

TDD 慢衰落无线通信系统的预重传协同 GBN-ARQ 算法

董洛兵^{1,2}, 易克初², 沈沛意¹, 于全²

(1. 西安电子科技大学 软件学院, 陕西 西安 710071;

2. 西安电子科技大学 综合业务网理论与关键技术国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

摘要: 提出一种新的适用于 TDD 慢衰落的 TDMA 无线通信系统的预重传协同 GBN-ARQ 算法(PC-GBN-CARQ, pre-repeat cooperative go-back- N automate repeat request)。利用 TDMA 的多址特性, 使得数据源和中继可同时参与出错分组的重发过程, 大大提高了数据分组的重发成功率; 数据源在发送的每组数据分组时加入 8bit 的附加信息, 将数据源利用 TDD 上下行信道相关性预测已发数据分组中哪些可能出错的结果告知中继, 使中继也能像数据源那样提前重发这些可能出错的数据分组, 以便提高系统的传输效率。仿真结果表明, 归一化吞吐率在 0.7 左右, 该算法较普通 GBN-ARQ 算法大约有 5dB 的信噪比增益。

关键词: 协同; ARQ; 预重传; 回退 N ; 无线通信

中图分类号: TN919.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2012)02-0149-07

Pre-repeat cooperative GBN-ARQ for TDD/TDMA based wireless networks

DONG Luo-bing^{1,2}, YI Ke-chu², SHEN Pei-yi¹, YU Quan²

(1. School of Software, Xidian Univ., Xi'an 710071, China;

2. State Key Lab. of Integrated Service Networks, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

Abstract: An efficient pre-repeat cooperative go-back- N automatic repeat request (PC-GBN-CARQ) algorithm for slow fading TDD/TDMA-based Wireless Networks was proposed. Taking advantage of the multiple access property of TDMA, the proposed scheme enabled both the source and the relay to retransmit packets to the destination simultaneously, which could greatly increase the successful probability of the retransmission. When the source was sending a group of data packets, it also sent 8bit of attached message to tell the relay about which packets among the group would be probably error in transmission, which was the result predicted based on TDD reciprocity, so that the relay could also pre-retransmit these packets like the source does. It should be very effective to raise the transmission efficiency. Simulation results show that the proposed algorithms can get an S/N ratio gain of about 5dB compared with the conventional ones for the normalized throughput of 0.7.

Key words: cooperation; ARQ; predicted repeat; go-back- N ; wireless communication

1 引言

目前, 提升无线通信系统的传输可靠性的 2 个主要技术是 ARQ (automate repeat request) 技术和协同通信技术。近些年来, 研究者将上述 2 种技术

结合起来, 提出了协同 ARQ (CARQ, cooperative ARQ) 技术, 并已证明它可以有效地提升无线通信系统的可靠性^[1~8]。但是目前所有的文献都只是局限在对简单的停等式 CARQ (SW-CARQ, stop and wait CARQ) 的研究, SW-CARQ 算法虽然能有效地提

升无线通信系统的可靠性，但由于每个数据分组发送后都有一个等待确认信息的空闲时间以及在重发过程中只有数据源或中继中的一个参与重发，极大地浪费了系统的传输资源。本文提出的 PC-GBN-CARQ 算法将连续发送式 ARQ 思想引入 CARQ，使数据可以连续向目的节点发送数据分组，并利用 TDMA 系统的多址特性，使当数据分组传输错误时，源节点和中继节点可同时参与重发过程，大幅度地提升了数据分组的重发成功率，节省了系统的传输资源。

由于中继节点并不知道源和目的节点之间的信道信息，无法有效利用信道估计技术来提升系统的传输可靠性。PC-GBN-CARQ 算法在数据源发送的每个数据分组前加入 8bit 的附加信息，用于携带信道信息给中继节点，使得数据源在利用 TDD 慢衰落系统中上下行信道的相关性预测到已发出数据分组的传输错误时，中继节点能及时得到预测信息，并与数据源同时提前发起对出错数据分组的重传过程，大大节约了系统的传输资源。

本文通过理论分析和系统仿真，结果证实该算法在提升系统吞吐率方面是有效的。

2 系统模型

本文研究的所有算法都是基于图 1(a)所示的系统模型。该系统有 M ($M \geq 2$) 个节点可以向目的节点 D 发送信息，其中 R (中继节点) 作为伙伴节点可以协同 S (源节点) 将 S 的数据分组可靠的发送给 D。系统按 TDMA 方式工作，系统帧被等分为 M 个时隙 (s_1, \dots, s_M)，各节点可以在每个帧中自己的时隙内发送一个数据分组给 D，帧结构如图 1(b)所示。设一个帧的长度为 T_F ，则一个时隙的长度为 $\frac{T_F}{M}$ 。为研究方便，这里设 S 和 R 分别占用 s_1 和 s_R 时隙，

且 $s_R - s_1 = \Delta, 1 \leq \Delta \leq M - 1$ 。

为后文分析方便，假设系统确认信息 (ACK 和 NACK) 可以无差错发送。

3 相关研究

本节给出传统 ARQ 技术及 2 种已有相关算法的简单描述，以方便后文中与 PC-GBN-CARQ 算法进行分析比较。

3.1 传统 ARQ 技术

传统的 ARQ 算法分为 2 大类：停等式 ARQ (SW-ARQ, stop and wait ARQ) 算法和连续发送式 ARQ 算法，而连续发送式 ARQ 又分为 GBN-ARQ 和 SR-ARQ (select repeat ARQ, 选择性重发 ARQ)。SW-ARQ 虽然实施复杂度较低，但由于发送端只有在接收到前一个数据分组的 ACK 信息后才可以发送下一个数据分组，在等待确认信息的过程中，浪费了系统的资源；而连续发送式 ARQ (GBN-ARQ 和 SR-ARQ) 协议可以在没有收到前面数据分组的确认信息前连续发送 N 个数据分组，有效地提高了系统的传输效率，但是算法的实现复杂度要明显高于 SW-ARQ 协议。GBN-ARQ 由于兼顾了系统较高的传输效率 (比 SW-ARQ) 与较低实施复杂度 (比 SR-ARQ) 而得到了广泛的应用和研究^[9]。

3.2 传统 CARQ 技术

SW-CARQ 算法的具体过程为：S 在一帧的 s_1 时隙发送一个数据分组 packet i 给 D，发送过程中 R 监听 S 的发送内容，并试图正确解码收到的信息。如果在一个往返时延 T_R 内 S 收到 ACK($i+1$)，则继续发送下一个分组 packet $i+1$ ，否则，重新发送 packet i 。在重发过程中，如果第一次发送中 R 能够正确接收到 packet i ，则由 R 重发 packet i 的副本给 D，如果第一次发送中 R 没有正确接收到 packet i ，则由 S 重新向 D 发送 packet i ，在重发过程中，R

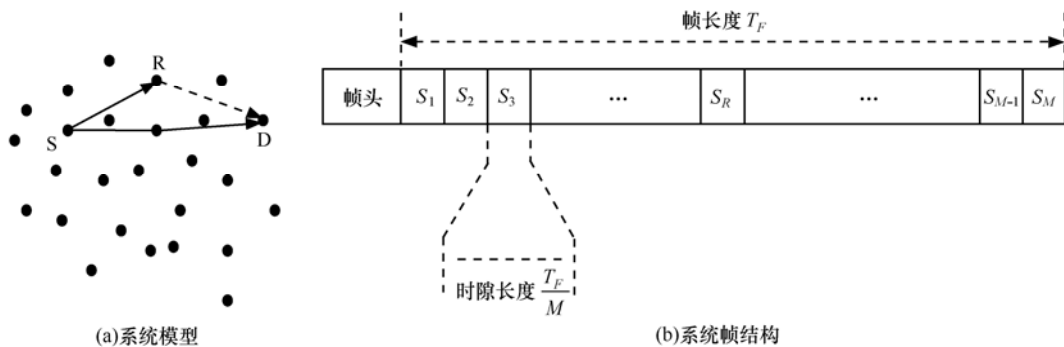


图 1 系统模型和帧结构

将不再监听 S 的发送。

3.3 Nakamura Osamu 预重传方案

Nakamura Osamu 在文献[10]中提出了一种应用在时分双工系统中的预测算法。以上行链路数据传送为例，其具体过程为：上行链路的发送端利用下行链路中接收到的数据分组来预测信道状态，如果下行链路中收到数据分组出错，就认为信道状态较差，发送出去的数据分组也极有可能出错，在接收到上行链路的收端反馈的 NACK 信号之前将上行链路中经历的衰落与下行链路该出错分组经历衰落最接近的数据分组重传一次，这样当上行链路的接收反馈信号 NACK 信号到来时，已将数据帧重新发送一次^[11]。

4 PC-GBN-CARQ 算法

SW-CARQ 算法虽然把协同通信技术和传统的 ARQ 技术结合起来，能有效地提升系统数据传输的可靠性，但是由于只是使用了简单的停等式传输，使得 S 在发送一个数据分组后必须等待该分组的反馈信息到达才能开启下一次发送过程，极大地浪费了系统的传输资源；同时，由于在重发过程中 S 和 R 只有一个参与，没有最大化地提升数据分组重发的成功概率。本文提出的 PC-GBN-CARQ 算法将 GBN-ARQ 思想引入到 CARQ 技术中，大大节省了系统的传输资源；同时利用 TDMA 帧结构的特殊性（S 和 R 能在同一帧中的不同时间隙发送数据分组给 D，也就是 S 和 R 可一起参与数据分组的同一次发送过程），使 S 和 R 能同时参与到出错分组的重发过程，极大地提升了出错数据分组的重发成功率，从而提升了系统的传输可靠性。

PC-GBN-CARQ 算法还通过改造 TDMA 帧的帧结构，在原有帧中 s_1 时隙的数据分组前加入 8bit 的信息位（如图 2(a)所示），用于告知 R 关于 S 对已发数据分组的预测结果，从而将 Nakamura Osamu 提出的预重传思想引入到 CARQ 技术中，进一步提

升了系统的传输效率。如图 2(b)所示，该信息位由 1bit 的标识位和 7bit 的偏移位组成，其中标识位告知 R 是否预测到错误，1 表示有错，0 表示无错。偏移位表示预测到错误的数据分组的 SN 号相对于 S 当前发送窗口中最小数据分组 SN 号的偏移值。

图 3 和图 4 分别给出了 PC-GBN-CARQ 算法中 S、R、D 的处理流程。S 连续发送 N 个数据帧给 D，并在发送一帧前根据接收到的由 D 发送过来的下行数据预测之前发送出但还未收到反馈信息的数据帧的对错，如果预测出有错，则在当前发送的数据帧中加入信息位，以告知 R 准备开启重发过程，并在下一帧开始发送出错帧及之后的 $N-1$ 帧；R 监听 S 发出的数据帧，如果信息位标示出有预测错误出现，则在下一帧的对应时间隙发送该出错帧的副本给 D；D 接收由 S 和 R 发送过来的数据帧，只要有一个正确，则认为该帧接收正确。

5 性能分析

对于传统的 GBN-ARQ 算法，其吞吐率公式为^[12]

$$\eta_G = \frac{n-r-b}{n} \cdot \frac{1-p_{S,D}}{1+(N-1)p_{S,D}} \quad (1)$$

其中， $p_{S,D}$ 表示 S 到 D 发送的数据帧不能被正确接收的概率， N 为环路延时长度， n 为码字的长度， r 为校验位数， b 为应答信号所占的码元数。

对于 SW-CARQ 算法，容易得到 S 成功传送一个数据给 D 的平均传送次数为

$$\begin{aligned} E(K) &= (1-p_{S,D}) + \sum_{k=1}^{\infty} (k+1)p_{S,D}(1-p_{SW-CARQ})p_{SW-CARQ}^{k-1} \\ &= 1 + \frac{p_{S,D}}{1-p_{SW-CARQ}} \end{aligned} \quad (2)$$

其中， $p_{SW-CARQ} = P_{S,R}P_{S,D} + (1-P_{S,R})P_{R,D}$ 表示 SW-CARQ 算法中重发过程失败的概率， $p_{S,R}$ 和 $p_{R,D}$ 分别表示 S 到 R 和 R 到 D 发送的数据帧不能被相应的接收端正确接收的概率。

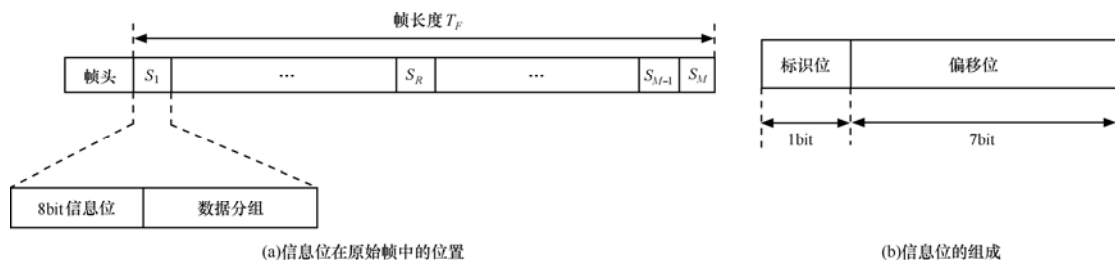


图 2 PC-GBN-CARQ 算法使用的帧结构

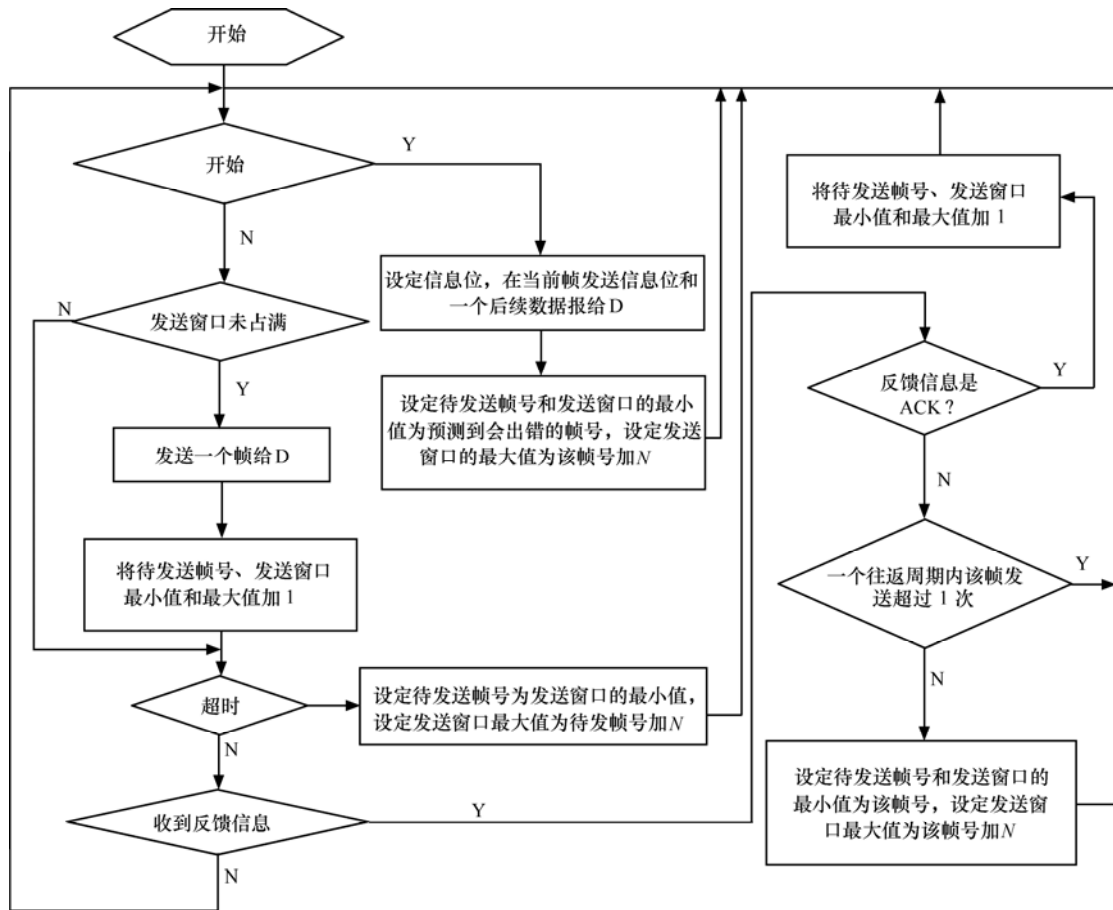


图 3 PC-GBN-CARQ 算法中 S 端处理流程

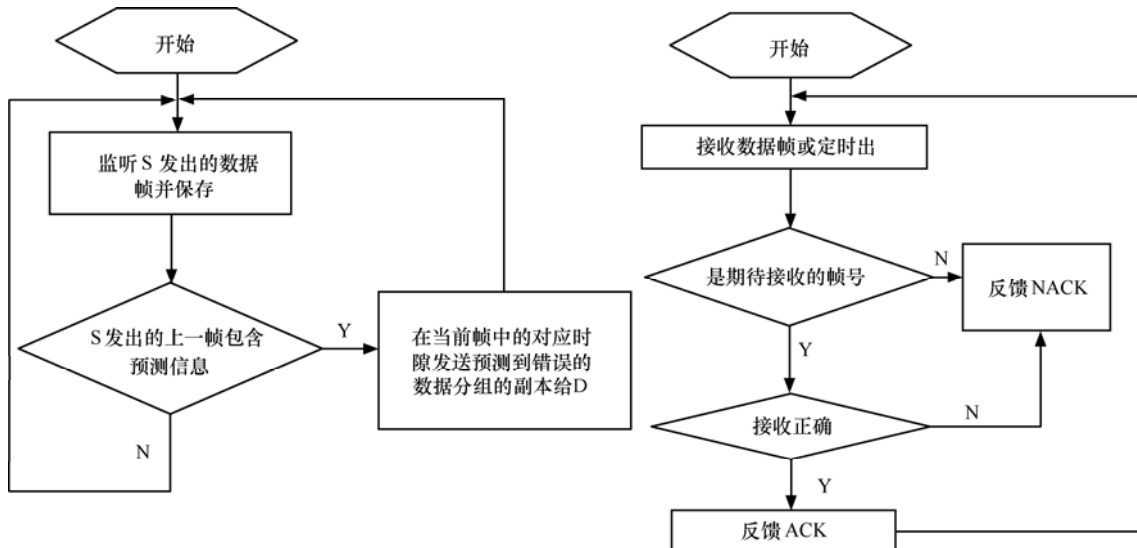


图 4 PC-GBN-CARQ 算法中 R 端 (左侧) 和 D 端 (右侧) 处理流程

由式(2)可知, SW-CARQ 算法的吞吐率为

$$\eta_{SW} = \frac{n-r-b}{n} \cdot \frac{1}{E(K)N} = \frac{n-r-b}{nN} \cdot \frac{1-p_{SW-CARQ}}{1-p_{SW-CARQ} + p_{S,D}} \quad (3)$$

对于 PC-GBN-CARQ 算法的性能分析与文献

[11]中的方法基本一致。为简化分析的复杂度, 这里设 S 端的预测完全准确, 且 R 总能正确接收 S 发送出的信息位。为便于分析, 可以将传送分为 2 个阶段^[11], 阶段 1 是无错传输阶段, 阶段 2 是从出错到恢复阶段: 阶段 1 有效传输数据帧数为 M_1 , 总共传

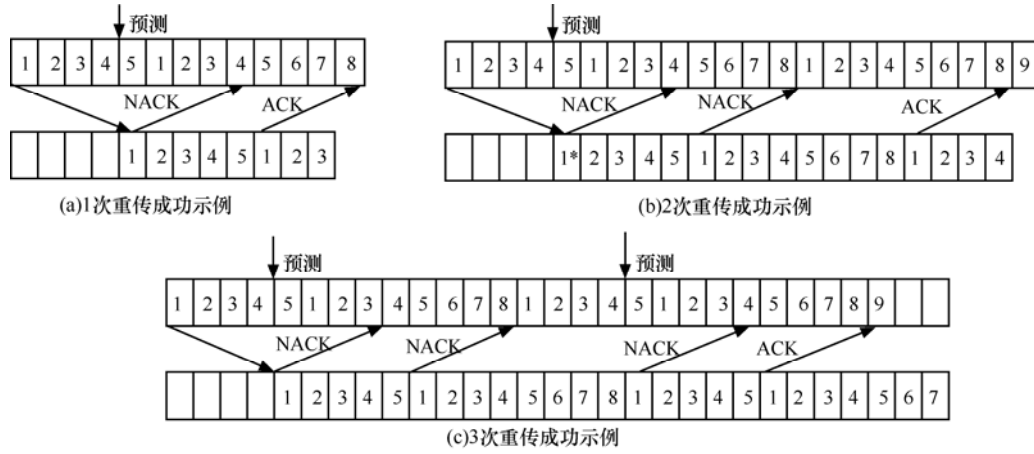


图 5 N=8 时的传输传输实例

输的数据帧数为 V_1 ，阶段 2 有效传输的数据帧数为 M_2 ，总共传输的数据帧数为 V_2 ，则吞吐率表达式为^[11]

$$\eta_{PC} = \frac{n-r-b}{n} \cdot \frac{E(M_1) + E(M_2)}{E(V_1) + E(V_2)} \quad (4)$$

容易得出： $E(M_1) = E(V_1) = \sum_{i=0}^{\infty} i(1-p_{S,D})^i p_{S,D} = \frac{1-p_{S,D}}{p_{S,D}}$ 。下面计算 $E(M_2)$ 和 $E(V_2)$ 的值。

图 5 给出了当 $N=8$ 时的传输实例（图 5(a) 表示经过一次重传成功，图 5(b) 表示经过 2 次重传成功，图 5(c) 表示经过 3 次重传成功）。显然 $E(M_2)=1$ ，而 $E(V_2)$ 的计算方法同文献[11]中 $E(V_B)$ 的计算方法；不同的是，在 PC-GBN-CARQ 算法中，S 预测到发送错误后需再发送一帧携带预测信息的数据帧，以通知 R 开启重发过程。从图 5 中可以看出， $2i+1$ 次重传时总共传送数据帧的数量为 $\frac{N+3iN}{2} + i + 1$ ， $2i$ 次重传时总共传送数据帧的数量为 $\frac{3iN}{2} + i$ 。所以：

$$E(V_2) = \sum_{i=0}^{\infty} p_{PC}^{2i} (1-p_{PC}) \left[\frac{N+3iN}{2} + i + 1 \right] + \sum_{i=1}^{\infty} p_{PC}^{2i-1} (1-p_{PC}) \left[\frac{3iN}{2} + i \right] \quad (5)$$

其中， $p_{PC} = 1 - [p_{S,D}(1-p_{S,R})(1-p_{R,D}) + (1-p_{S,D})]$ 为 PC-GBN-CARQ 算法中数据帧重传失败的概率。

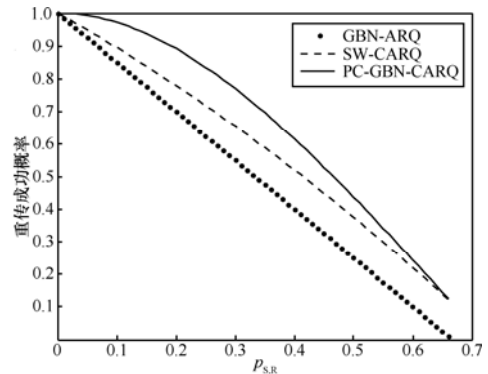
计算得出：

$$E(V_2) = \frac{N(1+2p_{PC})}{2(1-p_{PC}^2)} + \frac{1}{1-p_{PC}^2} + \frac{1}{1+p_{PC}} \quad (6)$$

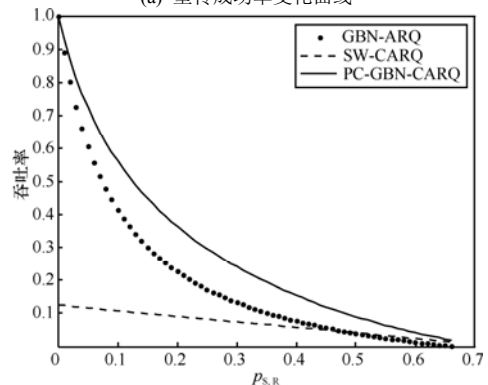
代入式(4)得：

$$\eta_{PC} = \frac{n-r-b}{n} \cdot \frac{2(1-p_{PC}^2)}{[N(1+2p_{PC}) + 2 + 2(1-p_{PC})]p_{S,D} + 2(1-p_{S,D})(1-p_{PC}^2)} \quad (7)$$

为比较方便，设 $p_{S,D} = gp_{S,R} = gp_{R,D}$ ，因为 R 到 S 和 D 的信道状态总是好于 S 到 D 的信道状态，否则中继就无存在的意义，所以上述假设是合理的。图 6 给出了当 $g=1.5$ 时 3 种算法(即 GBN-ARQ



(a) 重传成功率变化曲线



(b) 系统吞吐量变化曲线

图 6 3 种算法的重传成功率和吞吐量曲线

算法、SW-CARQ 算法和 PC-GBN-CARQ 算法) 的重发成功率(图 6(a))和系统吞吐率(图 6(b))随 $p_{S,R}$ 的变化曲线。

从图 6(a)可知, PC-GBN-CARQ 算法的重传成功率明显好于其他 2 算法, 主要是因为中继和源节点可同时参与重发过程, 从而使得 PC-GBN-CARQ 算法的吞吐率性能要高于其他 2 种算法(如图 6(b)所示)。

6 系统仿真

为验证 PC-GBN-CARQ 算法的有效性, 对 3 种算法进行了性能仿真, 以下是具体仿真参数。

- 仿真软件: MATLAB;
- 每帧占时: 5ms;
- 信道条件: 瑞利衰落+高斯白噪声;
- 信道个数: 10;
- 调制方式: DPSK;
- 系统速率: 50kbit/s;
- 复用方式: TDD;
- 多普勒频偏: 100Hz;
- 多址方式: TDMA;
- 总帧数: 5 000。

图 7 给出了系统的仿真结果, 与图 6(b)反映的结果基本一致, 也证明了文中对算法的理论分析方法及结果的正确性。

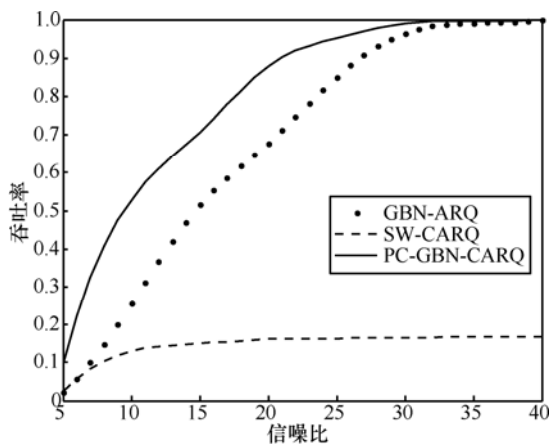


图 7 仿真结果

从图 7 可知, SW-CARQ 算法的吞吐率性能最差, 且总是小于 0.2, 主要是由于每次重发后必须等待确认信息回来后才能继续发送, 极大地浪费了系统的信道资源。而另外 2 个算法则采用了连续发送思想解决了这一问题。

从图 7 可以看出, PC-GBN-CARQ 算法在吞吐率性能方面要明显优于其他 2 种算法, 且在归一化吞吐率为 0.7 时, 相对于 GBN-ARQ 算法有大约 5dB 的系统增益, 主要缘于 PC-GBN-CARQ 算法中由于中继节点和源节点同时参与到重发过程, 大大提升了重发的成功率。另外, 在系统信道条件较差时(5dB 附近), GBN-ARQ 算法的吞吐率快速下降, 主要是因为此时每个分组都要多次传输才能成功, 而每一次错误会引起其后连续 $N-1$ 个分组的重传, 大大降低了系统的性能。但是, 此时 PC-GBN-CARQ 算法还是有明显的优势(超过 3dB 的增益), 主要是因为该算法可以通过对信道的预测, 提前开启重发过程, 使每次重传前都较 GBN-ARQ 算法减少了大量的不必要传输, 节约了大量的系统传输资源。

7 结束语

本文提出一种预重传协同 GBN-ARQ 算法, 适用于 TDD/TDMA 慢衰落系统, 经理论分析和系统仿真证明该算法在提升吞吐率性能方面是有效的, 并且在一般情况下较 GBN-ARQ 算法有 5dB 左右的信噪改善。

参考文献:

- [1] DIANATI M, LING X, NAIK K. Delay models of single-source single-relay cooperative ARQ protocols in slotted radio networks with poisson frame arrivals[J]. IEEE Trans Network, 2008, 4(16): 371-382.
- [2] ANDREAS F, MOLISC H. Wideband Wireless Digital Communications[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1998.
- [3] WANG D D, CHONG C C, WATANABE F. Opportunistic cooperative ARQ transmission scheme in cellular networks[A]. International Conference on Communications[C]. Beijing, China, 2008. 4802-4808.
- [4] CAO Y Q, WANG Y F, LIANG M. Performance of retransmission partner selection scheme for cooperative HARQ[A]. International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing[C]. Beijing, China, 2009. 1-4.
- [5] BOUJEMAA H. Delay analysis of cooperative truncated HARQ with opportunistic relaying[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 11(58): 4795-4804.

- [6] TOMASIN S, LEVORATO M, ZORZI M. Steady state analysis of coded cooperative networks with HARQ protocol[J]. IEEE Transactions on Communications, 2009,8(57): 2391-2401.
- [7] NAM Y H, LIU L J, WANG Y. Cooperative communication technologies for LTE-advanced[A]. International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing[C]. Dallas, TX, USA, 2010.14-19.
- [8] BYUN I, KIM K S. The maximum achievable throughput of a decode-and forward based hybrid-ARQ protocol[A]. Military Communications Conference[C]. Boston, MA, USA, 2009. 18-21.
- [9] 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[J]. 兰州理工大学学报, 2008,34(3): 94-98.
- LIU C M, LI S P. Analysis and comparison of time-delay performance of three single-mode GBN-ARQ schemes[J]. Journal of Lanzhou University of technology, 2008,34(3):94-98.
- [10] NAKAMURA O, MATSUKI H, TAKANASHI H. Pre-repeat go-back-N ARQ with error prediction in fading channel[A]. IEEE Transactions on Signal Processing[C]. 1996. 1011-1014.
- [11] 何波, 李军, 林家孺. 具有缓存结构的 GBN 预测重传[J]. 通信学报, 2005, 26(12): 24-29.
- HE B, LI J, LIN J R. Predicted repeat GBN HARQ with several buffers [J]. Journal on Communications, 2005, 26(12): 24-29.
- [12] 林纾. 差错控制编码[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1986. 559-567.
- SHU L. Error Control Coding [M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 1986. 559-567.

作者简介:



董洛兵 (1981-), 男, 河南洛阳人, 博士, 西安电子科技大学工程师, 主要研究方向为无线通信、协同通信技术、无线通信网络规划与设计、软件无线电。



易克初 (1942-), 男, 湖南涟源人, 博士, 西安电子科技大学教授、博士生导师, 综合业务网国家重点实验室副主任, 主要研究方向为卫星通信、通信抗干扰、通信信号处理。



沈沛意 (1969-), 男, 浙江绍兴人, 博士, 西安电子科技大学教授、硕士生导师, 主要研究方向为计算机视觉和图像处理技术、数字信号处理、智能交通系统。



于全 (1965-), 男, 江西九江人, 博士, 院士, 西安电子科技大学博士生导师, 主要研究方向为自组织网络技术、无线通信网络规划与设计、软件无线电。