文章编号：2095-4980(2015)02-0220-06

无线 ATM 中基于主动容错的新型 ARQ 机制

于　鹏

(信息工程大学 信息系统工程学院，河南 郑州 450002)

摘　要：自动请求重传(ARQ)机制是一种常用差错控制方法。典型的 ARQ 机制有选择重发 ARQ(SR-ARQ)和回退 N-ARQ(GBN-ARQ)。针对选择重发 ARQ 性能高，但复杂，而 GBN-ARQ 实现简单，但是性能较差的问题，在 GBN-ARQ 机制的基础上，做出改进，利用接收数据控制字段本身的统计关联关系，设计了一种适用于无线 ATM 的主动容错的 ARQ 机制，并在性能和实现复杂度上与常规 SR-ARQ 和 GBN-ARQ 分别进行了理论和仿真对比。实验结果表明，相同条件下 AFT-ARQ 实现复杂度明显低于 SR-ARQ，而性能上较常规 GBN-ARQ 机制有了显著提高，并接近于 SR-ARQ。

关键词：无线异步传输模式；统计关系；自动请求重传；主动容错

中图分类号：TN92　　**文献标识码：**A　　**doi:**10.11805/TKYDA201502.0220

A novel ARQ scheme based on active fault tolerance for wireless ATM

YU Peng

(Information System Institute, Information Engineering University, Zhengzhou Henan 450002, China)

Abstract: Automatic Repeat reQuest(ARQ) scheme is one of the error control methods. There are two typical ARQ categories: the Selective Repeat ARQ(SR-ARQ) and the Go-Back-N ARQ(GBN-ARQ). SR ARQ has a much better throughput performance than that of GBN-ARQ, whereas its implementation is more complicated which results in heavy processing load. Both of the two methods can hardly satisfy the standards of wireless Asynchronous Transfer Mode(ATM). A novel ARQ scheme based on active fault tolerant is designed. It makes use of the statistical relationship of the control data from the network to recover the erroneous data. It is compared with conventional SR-ARQ and GBN-ARQ both in theories and in simulations of throughput performance. The results show that AFT-ARQ has a lower complexity than that of SR-ARQ; and it has a better throughput performance than that of GBN-ARQ, which is close to that of SR-ARQ.

Key words: wireless Asynchronous Transfer Mode; statistical relationship; Automatic Repeat Request; active fault tolerant

异步传输模式(ATM)[1]可以在单一网络中提供多种多媒体服务，它基于高可靠光纤网络而开发。在 ATM 技术中，任何类型的信息都被划分为称作“ATM 信元”固定长度的短分组，通过单一的 ATM 网络传输。ATM 与移动业务结合，便诞生了无线 ATM(Wireless ATM，WATM)。为应对不同类型的多媒体服务，ATM 支持几种不同级别的服务质量(Quality of Service，QoS)[2-3]。例如，语音和视频业务主要对延时特征敏感，而数据通信则对信源丢失率敏感。无线移动通信环境下，阴影和多径效应将会导致信元丢失率出现显著的恶化，因此必须采用有效的差错控制手段保证 QoS。在差错控制方面，经典的方法是前向纠错(Forward Error Correction，FEC)和 ARQ。FEC 常常被用于提高误比特率性能，然而，由于无线移动环境下常常会出现突发的集中错误，单独使用 FEC 时，很难达到信元丢失率标准。ARQ 机制可以通过重传解决这种问题，但重传引入了时延，而语音及视频等实时业务对于时延敏感，对于比特错误可容忍。个别比特错误可能导致整个信元被丢弃，通过重传虽然解决可靠性问题，但增大了时延，因此对于 ARQ 机制的设计也有更高的要求。传统的 ARQ 机制有 2 种，即选择重发 ARQ[4]和回退 N-ARQ[5](Go-Back-N，GBN ARQ)。相比于 GBN-ARQ，SR-ARQ 有着更理想的吞吐量性能，然而，SR-ARQ 实现复杂度也要远高于 GBN-ARQ。

收稿日期：2014-06-12；**修回日期：**2014-07-03

在特定网络节点进行数据传输时，网络数据本身往往有一定的统计关系。如在 ATM 网中传输数据时，相邻节点传输的数据具有相同的虚信道标识(Virtual Channel Identifier，VCI)\虚通路标识(Virtual Path Identifier)，在 ATM 下，虚信道标识(VCI)和虚通路标识(VPI)是 ATM 信元属于哪个 ATM 适配层(ATM Adaptation layer)业务数据的重要标识，作为控制类数据对信元丢失率有着更大的影响。常规的 ARQ 机制并没有利用到这一潜在关系。本文所提出的新型 ARQ 机制考虑到了 ATM 数据中存在的统计关系，提出了一种主动容错的 ARQ 方法，该方法结合 GBN-ARQ 机制，利用接收报文自身的统计关系对错误报文在每次重传前预先进行容错，从而提高其准确率，减小重传次数，进而提高 ARQ 机制的性能。通过仿真可以看出，此方法的性能较常规方法有显著提高，与 SR-ARQ 的性能接近，但其实现复杂度要远小于 SR-ARQ。值得一提的是，本文所提出的方法的应用环境并不局限于无线 ATM，也可以用于用户数据报协议(User Datagram Protocol，UDP)及其他对时延敏感的通信环境中。

1　无线 ATM 中的常规 ARQ 机制

一种典型的无线 ATM 系统的协议栈[6]，如图 1 所示。ARQ 机制应用于链路层以恢复由于无线链路传输误码导致的 ATM 信元错误。其中每个 ATM 信元都作为 1 个带检错的分组发送。多个 ATM 信元组成 1 个时分多址帧。每个 TDMA 帧携带有 ARQ 控制信息。

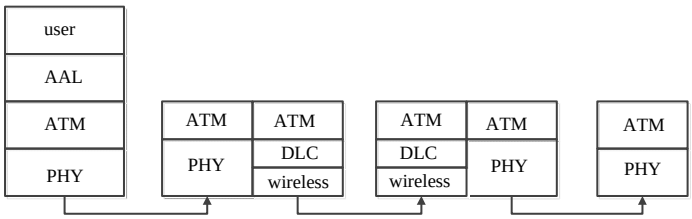

Fig.1 Wireless ATM stack
图 1 无线 ATM 协议栈

无线 ATM 协议中常规 GBN-ARQ 和 SR-ARQ 的工作机制，如图 2 所示[7]。在图 2 中，每个小方块代表 1 个无线 ATM 信元，方格中的数字表示发送信元的序号，由左向右为发送链路，反方向是接收方反馈的控制信息。图 2(a)表示 GBN-ARQ，图 2(b)表示 SR-ARQ。假设 1 个 TDMA 帧包含 8 个信元，其中，含错信元用阴影标示。从图 2(b)中，可以明显看出，SR-ARQ 机制的性能要好于 GBN-ARQ。例如，对于信元 5，第 1 帧发送时，GBN-ARQ 机制下由于信元 4 的错误，信元 5 被丢弃，而在 SR-ARQ 机制下，信元 5 被成功传送。SR-ARQ 机制的性能虽然要优于 GBN-ARQ，但是其实现过于复杂，可能会造成过大的处理开销。发送端必须采用复杂的流控制机制，挑选出上一帧中发送失败的信元进行重发。无线 ATM 中，对于延时敏感的业务对于 ARQ 控制信息的长度要求也较高，单纯采用常规 SR-ARQ 难以满足业务要求。

目前有很多针对常规 ARQ 机制的改进型机制[7−8]，但是还没有能够满足可解决上述矛盾的 ARQ 机制，于是从接收数据本身的角度考虑问题，提出一种新型的 ARQ 机制。

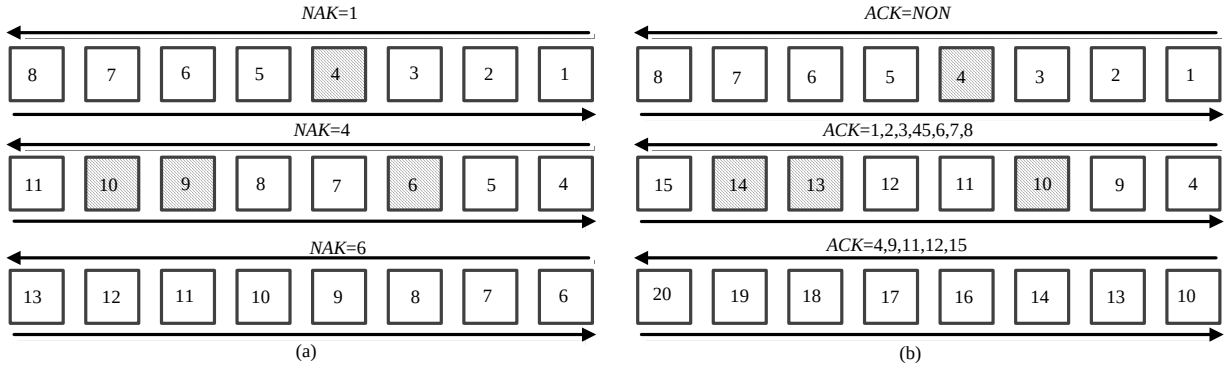

Fig.2 Conventional ARQ scheme in wireless ATM network
图 2 无线 ATM 网络中的常规 ARQ 机制

2　AFT-ARQ 原理及实现方法

针对常规 ARQ 机制应用于无线 ATM 环境中存在的问题，本文提出了一种新型的 ARQ 机制 AFT-ARQ，即主动容错的 GBN-ARQ 机制。特定 ATM 网络节点间的通信分部具有一定的相关性[9]，对利用接收信元的这种信息，很可能获得额外的性能增益。AFT-ARQ 的一个先决条件是无线 ATM 设备可以统计计算出通信节点之间的控制字段分布状况。考虑理想情况，即设备能够实时且无误地给出各个通信节点之间的控制字段分布状况，那么

AFT-ARQ 的主要思想是接收方对每次接收的信元进行 FEC 处理检错后，如发现错误，首先通过容错机制进行容错和检错，对容错后仍有错的信元进行重发。

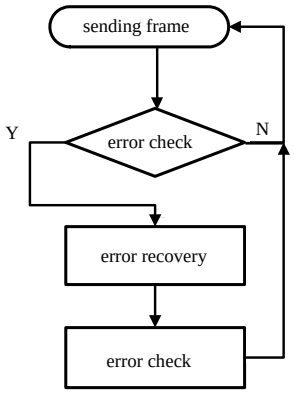

Fig.3 Flow of AFT-ARQ
图 3 AFT-ARQ 流程

2.1 AFT-ARQ 原理

利用上述容错模型，对常规 GBN-ARQ 协议进行改进，提出新型的 ARQ 机制。图 3 表示的是 AFT-ARQ 的简单流程，接收端在收到发送帧后进行第 1 次检错，如果这一帧中不含有错误信元，则按照常规 GBN-ARQ 机制，继续发送下一帧，如果出现错误，则对出错的首个信元进行容错，容错后再次检错，检错后还是按照常规 GBN-ARQ 机制发送下一帧。

对常规 GBN-ARQ 机制的改进之处在于，在第 1 次检错后，添加了 1 次容错操作和 2 次检错操作。这一操作的添加，使错误信元有很大几率被修正，从而使整个帧的成功传输概率增加。如图 4，第 1 帧传送时，4 号信元出现错误，按照 AFT-ARQ 机制对其进行 1 次容错，检错正确，这样 4 号信元就不需要出现在下一帧中，而在常规 GBN-ARQ 机制中，下一帧中需要重发 4 号信元；另一方面，容错操作仅在接收端进行，容易实现，较常规 GBN-ARQ 并没有太大变化，也没有增加 ARQ 控制信息的冗余量。

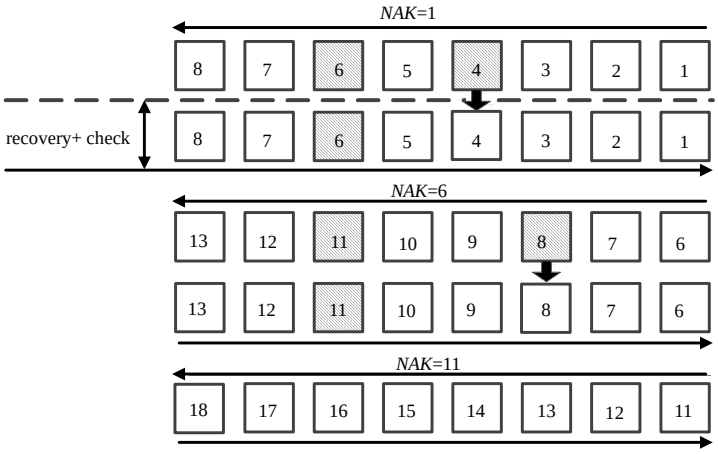

Fig.4 Way of AFT-ARQ applied in wireless ATM network
图 4 AFT-ARQ 机制在无线 ATM 网络中的实现方式

2.2 主动容错的原理和方法

信元的容错通过利用接收信元的控制字段的统计信息来实现。设发送信元的控制字段为 T，对应接收信元的控制字段为 R，由接收的信元控制字段 R 来推测最有可能的发送信元控制字段 T，从统计学角度上可以看作贝叶斯推断问题。根据贝叶斯公式，对发送信元控制字段 T 的最优推测应为：

$$T_e = \arg\max_T P(T/R) = \arg\max_T \frac{P(R/T)P(T)}{P(R)} = \arg\max_T P(R/T)P(T) \tag{1}$$

所以对发送信元的估计，首先要表示出先验概率 $P(T)$ 和似然概率 $P(R/T)$。具体要从 ATM 信元控制字段结构考虑。

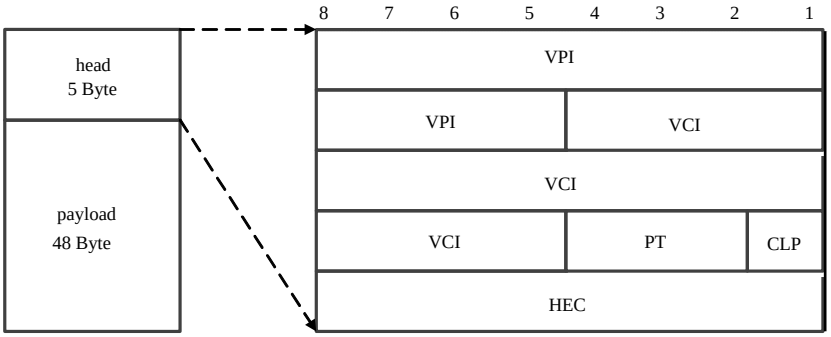

Fig.5 Structure of the ATM cell
图 5 ATM 信元结构

ATM 信元头部由 VPI,VCI,PT,CLP 以及 HEC 组成[1]，如图 5 所示。其中 VPI 和 VCI 表示虚通道和虚通路的值，与信元的传输路径有关，因此并不互相独立，这 2 个字段应联合考虑。PT 字段标示信元的类型，CLP 字段标示拥塞情况，HEC 字段为信头循环冗余校验位，校验信头 5 字节的正确性，因此当前 4 字节确定时，HEC 字

段也随之确定，发生在 HEC 字段的错误也不会影响有用信息的传输，因此不对 HEC 字段容错。这样对 ATM 信元头部的容错可以考虑为对{VPI/VCI},{PT},{CLP}3 个相互独立字段的容错。不妨令发送信头 $T=\{t_1,t_2,t_3\}$，其中 t_1 代表发送信头 VPI/VCI 字段，t_2 代表发送信头 PT 字段，t_3 代表发送信头 CLP 字段。接收信头 $R=\{r_1,r_2,r_3\}$，其中 r_1 代表接收信头 VPI/VCI 字段，r_2 代表接收信头 PT 字段，r_3 代表接收信头 CLP 字段。考虑到独立性假设，那么对信头的最优推测问题可以转化为：

$$\arg\max_{T} P(R/T)P(T) \Rightarrow \begin{cases} \arg\max_{t_1} P(r_1/t_1)P(t_1) \\ \arg\max_{t_2} P(r_2/t_2)P(t_2) \\ \arg\max_{t_3} P(r_3/t_3)P(t_3) \end{cases} \tag{2}$$

即分别对各个字段进行最优推测，然后组成对整个信头的最优推测。

对于任意的 n，目标式 $P(r_n/t_n)P(t_n)$ 中，先验项 $P(t_n)$ 可以通过对网络中每个字段的取值种类长期统计获得。对于字段 t_n，可以通过统计计算出其近似服从的概率分布函数，以此作为先验项 $P(t_n)$。

似然项 $P(r_n/t_n)$ 与信道误码率相关。假设传输信道为二进制对称信道(Binary Synchronous Communication，BSC)，在误比特率为 p_e 的情况下，设发送字段 t_n 与接收字段 r_n 的汉明距为 d，t_n 的位数为 L，那么似然项的表示应为：

$$P(r_n/t_n)=p_e^d(1-p_e)^{L-d} \tag{3}$$

3　性能分析

ATM 网中信元组成的 TDMA 帧长确定，设每个帧包含有 M 个 ATM 信元。由于信元在 ATM 网中匀速传输，因此，可以通过衡量每帧能够成功传输信元个数的期望来评价各种 ARQ 机制的性能。

设信道误比特率为 p_e，信元(控制字段)的错误率为 p_f，p_f 与 p_e 有着固定的对应关系。对于控制字段为 40 bit 的 ATM 信元，其错误率为：

$$p_f=1-(1-p_e)^{40} \tag{4}$$

对于常规 GBN-ARQ 协议，其每帧成功发送信元个数为 n ($0\leqslant n\leqslant M$)的概率为 $P_{GBN}(n)$。常规情况下发送信元个数为 n 的情况有 2 种：当 $n<M$ 时，前 $n-1$ 个信元正确，第 n 个信元错误；当 $n=M$ 时，发送信元全部正确。那么：

$$P_{GBN}(n)=\begin{cases}(1-p_f)^n p_f, & n<M \\ (1-p_f)^n, & n=M\end{cases} \tag{5}$$

常规 GBN-ARQ 协议每帧成功发送信元的期望为：

$$E_{GBN}=\sum_{n=0}^{M-1} n(1-p_f)^n p_f+M(1-p_f)^M=\frac{1-(1-p_f)^M}{p_f}-M(1-p_f)^M \tag{6}$$

对于常规 SR-ARQ 协议，其每帧成功发送信元个数为 n ($0\leqslant n\leqslant M$)的概率为 $P_{SR}(n)$。常规情况下发送信元个数为 n 的情况为发送的 M 个信元中，有随机的 n 个错误。那么：

$$P_{SR}(n)=C_M^n(1-p_f)^n p_f^{M-n} \tag{7}$$

常规 SR-ARQ 协议每帧成功发送信元个数的期望为：

$$E_{SR}=\sum_{n=0}^{M} nC_M^n(1-p_f)^n p_f^{M-n}=M(1-p_f) \tag{8}$$

对于 AFT-ARQ 协议，假设对每个错误信元的容错成功率为 p_s，其每帧成功发送信元个数为 n ($0\leqslant n\leqslant M$)的概率为 $P_{AFT}(n)$，其成功发送信元个数为 n 的情况分为 4 种，即 $n<M$ 时，前 $n-1$ 个信元有 1 个随机错误，但容错后校验正确，第 $n+1$ 个信元错误；第 $n+1$ 个信元错误，且容错后校验仍错误；当 $n=M$ 时，M 个信元中有 1 个错误但容错后通过校验，或者全部正确，那么：

$$P_{\mathrm{AFT}}(n)=\begin{cases}\mathrm{C}_n^1 p_{\mathrm{f}}(1-p_{\mathrm{f}})^{n-1}p_s p_{\mathrm{f}}+(1-p_{\mathrm{f}})^n p_{\mathrm{f}}(1-p_s) & ,n<M\\ \mathrm{C}_n^1 p_{\mathrm{f}}(1-p_{\mathrm{f}})^{n-1}p_s+(1-p_{\mathrm{f}})^n & ,n=M\end{cases} \tag{9}$$

AFT-ARQ 协议每帧成功发送信元个数的期望为：

$$E_{\mathrm{AFT}}=\sum_{n=0}^{M-1}n[\mathrm{C}_n^1 p_{\mathrm{f}}(1-p_{\mathrm{f}})^{n-1}p_s p_{\mathrm{f}}+(1-p_{\mathrm{f}})^n p_{\mathrm{f}}(1-p_s)]+M\mathrm{C}_M^1 p_{\mathrm{f}}(1-p_{\mathrm{f}})^{M-1}p_s+(1-p_{\mathrm{f}})^M \tag{10}$$

当 M=10 时，作图绘出 3 种 ARQ 协议每帧成功发送信元个数的期望曲线如图 6。从曲线中可以看出，在每帧的信元数为 10，误码率在 10^{-4} 到 10^{-2} 范围内时，理想情况下，即容错成功率为 1，AFT-ARQ 的性能明显高于常规 GBN-ARQ 的性能且与常规 SR-ARQ 的性能接近。

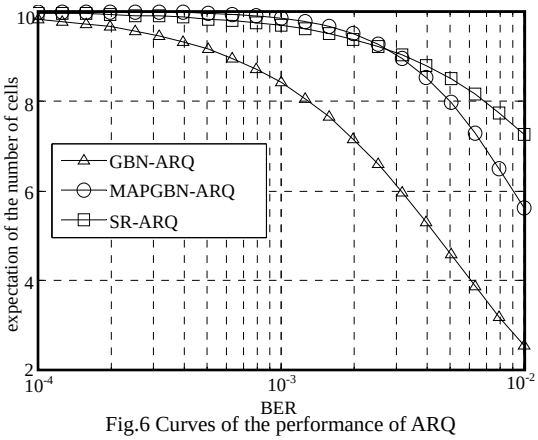

Fig.6 Curves of the performance of ARQ
图 6 ARQ 性能的理论曲线

4 仿真及结果分析

假设发送缓存的大小固定，即 1 个发送周期中待发送信元总数固定，按照无线 ATM 网中要求，信元匀速发送。发送信元的控制字段初始的概率分布确定，如图 7，按照轮盘赌方法，产生发送信元，固定数量的信元构成 1 个 TDMA 帧，匀速通过误比特率固定的信道。

在衡量仿真结果时，采用的性能指标是实际传输固定信元数所需要的帧数与信道无误的情况下传输固定信元数所需要的帧数的比值，该值越大，表示每帧需要的平均重传次数越多，性能表现越差。图 8 表明，AFT-ARQ 的性能要明显优于 GBN-ARQ 的性能，并且与 SR-ARQ 的性能相接近。

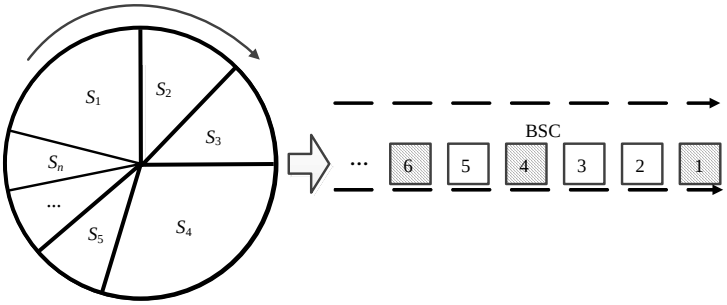

Fig.7 Production of the cells in simulation
图 7 仿真信元数据的生成及传输模型

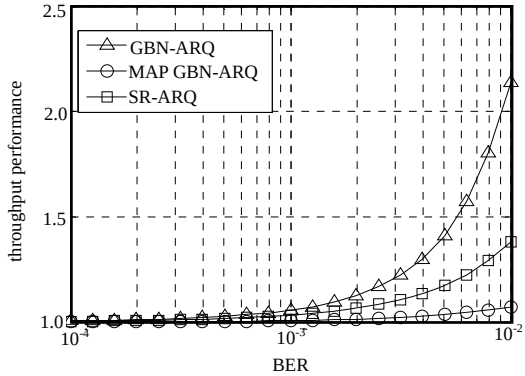

Fig.8 Performance comparison of the AFT-ARQ and the conventional ARQ
图 8 AFT-ARQ 与常规 ARQ 机制的仿真性能对比

此外，还仿真了帧长大小对 AFT-ARQ 性能的影响。图 9 展示的是不同帧长度时 AFT-ARQ 的性能曲线，通过对比可以看出，在帧长较小的情况下，AFT-ARQ 的性能更加优异。这是由于 AFT-ARQ 采用的机制是对一个 TDMA 帧中多个错误的第一个容错。当帧长增加时，单个帧中出现多个错误的可能性增大，因此 AFT-ARQ 的性能出现下降。

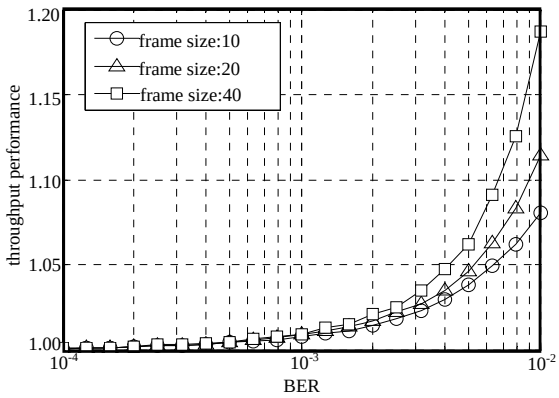

Fig.9 Performance comparison of AFT-ARQ with different frame lengths
图 9 不同帧长情况下的 AFT-ARQ 的性能对比

5 结论

本文讨论了常规 ARQ 应用于无线 ATM 中的优缺点，并首次提出了基于主动容错的改进型 ARQ 机制。通过性能分析和仿真结果分析，认为 AFT-ARQ 由于利用了 ATM 数据控制字段的统计关系，在性能上较常规 ARQ 有着较大的

提升；另一方面，由于其改动基于 GBN-ARQ，只在接收方做容错操作而无须合作通信，降低了延时，而且其实现复杂度接近于常规 GBN-ARQ，远低于 SR-ARQ。虽然本文只是针对无线 ATM 环境提出了这种新型 ARQ 机制，但由于协议的相似性，本文机制可推广于其他对控制数据错误敏感但对业务数据相对不敏感的通信环境。

参考文献:

[1] Dimitri P Bertsekas,Robert G Gallager. Data Networks[M]. USA:Prentice Hall, 1992.

[2] Raychaudhuri D. Wireless ATM networks:Architecture,system design and prototyping[J]. Personal Communications, IEEE, 1996,3(4):42–49.

[3] Kandlur D,Saha D,Willebeek-LeMair M. Protocol architecture for multimedia applications over ATM networks[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 1995,25(3):33–43.

[4] Weldon Jr E. An improved selective-repeat ARQ strategy[J]. IEEE Transactions on Communications, 1982,30(3):480–486.

[5] Morris J. On another Go-Back-N ARQ technique for high error rate conditions[J]. IEEE Transactions on Communications, 1978,26(1):187–189.

[6] Larikka T,Rajala J,Virtanen S. Connection identification in transmission system of wireless telecommunication network over ATM protocol stack:USA, Patent 6,349,099[P]. 2002.

[7] Kallel S. Efficient hybrid ARQ protocols with adaptive forward error correction[J]. IEEE Transactions on Communications, 1994,42(234):281–289.

[8] YOSHIOKA M,UMEHIRA M. Prime ARQ:a novel ARQ scheme for high-speed wireless ATM[J]. IEICE Transactions on Communications, 2001,84(3):474–483.

[9] 施里涛,李鸥,王晓梅,等. 一种高能效的无线传感器网络主动容错机制[J]. 新能源进展, 2013,18(2):102–107.(SHI Litao,LI Ou,WANG Xiaomei,et al. An active fault-tolerant scheme with high energy efficiency in wireless sensor networks[J]. Advances in New and Renewable Energy, 2013,18(2):102–107.)

作者简介:

于　鹏(1988–)，男，辽宁省岫岩市人，在读硕士研究生，主要研究方向为无线自组织与传感器网络.email:eeyupeng@qq.com.