

# 一种实时可靠多播协议延迟性能分析

杨瑞娟<sup>1,2</sup>, 黄美荣<sup>2</sup>, 柳健<sup>1</sup>

(1. 华中科技大学模式识别与人工智能研究所, 湖北武汉 430073;

2. 空军雷达学院信息与指挥自动化系, 湖北武汉 430019)

**摘要:** 现有的可靠多播协议种类繁多,但尚不能满足有些应用中的特殊实时性要求,即在新数据不断以固定时间步长到达之前,必须完成旧数据的修复,否则旧数据将会失效.实时可靠多播协议正是针对这种特殊需求提出的,该协议采用了混合 FEC、分层网络局部修复技术和一种主动 NAK 机制,可有效控制并降低修复时间,同时还采取了 NAK 抑制机制使协议具有较好的扩展性能.为了评价协议的性能,论文在建立协议传输模型的基础上,基于泊松理论,精确地量化了节点和端系统的处理延迟以及修复过程延迟,导出了其传输延迟的计算公式.仿真计算结果表明,该实时可靠多播协议的传输延迟性能稳健,且表现出较好的可扩展性,能够满足应用的要求.

**关键词:** 互联网;可靠多播;主动 NAK;局部修复;延迟

**中图分类号:** TN915.03 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 01-0091-04

## Analysis of Delay Characteristic in a Real Time Reliable Multicast Protocol

YANG Rui-juan<sup>1,2</sup>, HUANG Mei-rong<sup>2</sup>, LIU Jian<sup>1</sup>

(1. Institute of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430073, China;

2. Department of Information and Command Automation, Air Force Radar Academy, Wuhan, Hubei 430019, China)

**Abstract:** There have been various reliable multicast protocols now, but they can't satisfy special real-time requirement in applications, that is, before new data reach continuously in a certain time step the old data must be recovered, otherwise, the old data are invalidated. A real time reliable multicast protocol is put forward for the special application requirement. It takes techniques of hybrid FEC, hierarchical network local recovery and an active NAK mechanism to control and reduce the recovery time effectively, and use NAK suppression mechanism to preserve its high scalability. For evaluating the performance of the protocol, the processing and recovery procedure delays in the node and end-system are quantitated accurately through the Poisson theory on the basis of modeling the protocol communication in this paper. Then the transport delay calculating formula is presented. The simulated results show the transport delay of the protocol has good robustness and scalability.

**Key words:** internet; reliable multicast; active NAK; local recovery; transport delay

## 1 引言

至今为止,已经提出了多种可靠多播协议<sup>[1~4]</sup>,这些协议各自针对不同的应用需求,主要解决差错修复、抑制反馈内爆和协议的可扩展性等问题.实际中还存在另一类特殊的应用,在这种应用中,多播的“新”数据严格以一定的时间步长不断刷新“旧”数据,对当前(旧)数据的可靠性修复必须控制在新数据到来之前.如果修复时间超出了刷新步长,旧数据将失效,可靠性修复就失去了意义.实际中的这种应用领域包括金融交易系统、军事 C<sup>4</sup>ISR 系统以及分布交互式作战模拟系统等等.已有的可靠多播协议尚不能满足这种实时性要求,TRMP<sup>[3]</sup>虽然在 RMP<sup>[4]</sup>协议的基础上进行了实时性改进,但尚缺乏对其延迟性能的定量分析验证,并且该协议的扩展性能

也较差<sup>[1]</sup>.针对这些问题,我们提出了一种实时可靠多播协议,论文通过建立协议传输模型,精确地量化了各种因素引起的延迟,仿真分析了协议的延迟性能,全面地评估了协议的实时性,并证明该协议具有良好的实时性能,能够满足上述应用的要求.由此,弥补了现有协议功能和性能评估的不足.由于采用了 NAK 抑制机制,也使得该协议具有良好的扩展性.

论文后续内容组织如下:第二节介绍了实时可靠多播协议的概貌,第三节建立了协议的传输模型,给出了传输延迟性能的定量描述和 MATLAB 仿真结果分析,最后是本文的结论.

## 2 实时可靠多播协议(Real-Time Reliable Multicast Protocol, RTRMP)

实时可靠多播协议<sup>[5]</sup>采用了分层网络结构<sup>[6]</sup>.在网络边

缘设置多个网络主动节点,发送端与网络主动节点构成发送链路 (sender link),所有主动网络节点和中间节点组成骨干链路 (bone link),接收端与其所属的主动节点构成多个接收链路 (trail link)本地组。

在发送链路和接收链路上,采用混合差错控制方式进行多播.发送数据时,发送方(发端或主动节点)发送 FEC 组,其中包含  $k$  个原始数据包以及由其生成的  $r$  个校验包,一组 FEC 数据组的最后一个数据包捎带了组结束的标记.接收方(发送链路的主动节点和接收端)只要收到其中  $k$  个包,就可以通过解码运算恢复原始数据包.当接收到的组中数据包少于  $k$  个,解码运算便无法实施,此时由该接收方启动包丢失修复过程,以单播方式向上请求重发,重发请求一直到达拥有请求数据包的主动节点或发端,收到重传请求的边缘节点或发端将重发损坏的多播 FEC 组.在骨干链路上仅多播原始数据包,发现丢包的主动节点向上单播 NAK 请求重发。

接收端和主动节点在包修复过程中均采取定时器 NAK 抑制机制<sup>[7]</sup>,收到 NAK 报文的主动节点向下多播 NAK 确认报文,向上进行 NAK 聚集处理。

协议采取了一种主动 NAK 机制将丢失修复时间延迟控制在许可范围内.主动 NAK 的做法是,在接收方设置实时定时器,实时定时器在其收到一组 FEC 数据组的第一个包时启动,如果定时器超时仍未完成数据包接收或解码,接收方经过 NAK 抑制处理后向上级节点主动发送 NAK,请求数据块重传。

### 3 延迟性能

#### 3.1 传输模型

由于骨干链路传输特性十分优良,可不考虑骨干链路的丢包,故实时可靠多播传输网络可等效为三层结构模型,如图 1 所示。

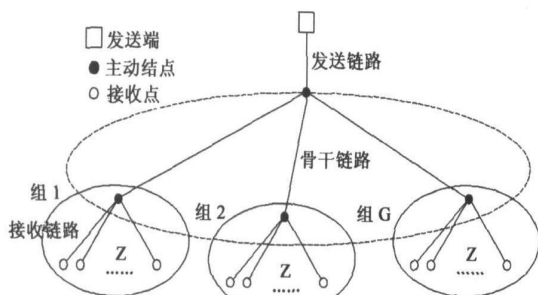


图 1 实时可靠多播层次网络模型

设总用户数为  $R$ ,每个本地多播组的用户数相同,均为  $Z$ .丢包只发生在传送过程中,且在时间和空间上都是相互独立的.在所有的端系统和节点上,各类数据的到达为相互独立的泊松过程<sup>[8]</sup>。

令  $p_i$  为第  $i$  ( $i=1,2,3$ ) 层子网的丢包率,  $p_1 = p_3 = p_i$ ,  $p_2 = 0$ .在发送、接收链路上考虑 NAK 丢失,且令 NAK 的丢失率与数据包的丢失率相同,亦为  $p_i$ 。

一个 FEC 组中共有  $n$  个数据包,其中  $k$  个为信息包.令任一接收端无法解 FEC 组的概率为  $p_i$ ,

$$p_i = p_i \left[ 1 - \sum_{j=0}^{n-k-1} \binom{n-1}{j} p_i^j (1-p_i)^{n-j-1} \right] \quad (1)$$

随机变量  $X, Y, V$  分别表示处理一个 FEC 组、一个 NAK 和一个数据包的时间,且  $E[X] = nE[V]$ 。

#### 3.2 网络数据流及处理时间描述

设在发送端、接收端以及主动节点上,数据发送速率均为  $r$ ,网络各端系统和主动节点所处理的数据流描述,以及在端系统和主动节点上平均等待时间表示如表 1 所示。

表 1 数据流及平均等待时间描述

系统	数据流	速率	处理时间	平均等待时间
发送端	发送端产生并传输的 FEC 组	$r$	$X$	$E[W_s]$
	收发送链路主动节点 NAK 请求并促使重传的数据	$\frac{s}{r}$	$X+Y$	
发送链路主动节点 (S-主动节点)	从发送端接收到的数据流	$\frac{sp}{r}$	$X$	$E[W_{sp}]$
	由于无法解码而自身产生的 NAK 和接收链路主动节点发来的 NAK	$\frac{sp}{n}$	$Y$	
	发送给多播骨干网中下一级可靠主动节点的数据流	$r$	$V$	
接收链路主动节点 (R-主动节点)	接收多播骨干网中的上级可靠主动节点的数据流	$\frac{rp}{b}$	$V$	$E[W_r]$
	向接收组多播的 FEC 组	$r$	$X$	
	接收 NAK 请求促使重传的数据	$\frac{rp}{n}$	$X+Y$	
	来自接收端的其他 NAK 请求,包括接收端无法解码引起的 NAK 流和收端实时定时器超时引起的 NAK 流	$\frac{rp}{n}$	$Y$	
接收端	接收主动节点多播的 FEC 组	$r$	$X$	$E[W_r]$
	由于不能解码而发送的 NAK 请求	$\frac{rp}{n}$	$Y$	

#### 3.3 传输延迟

延迟分析的时间段为从发送端产生一个 FEC 组开始到任意一个接收端正确接收到为止.传输延迟包括数据在端系统及主动节点上的服务延迟、网络上的传输延迟以及丢包修复延迟等.用  $\tau_1, \tau_2$  表示发送(接收)链路和骨干链路的传输延迟.首先考虑发送链路上的延迟情况,如图 2 所示.发送链路正确接收数据情况的传输延迟为

$$E[D_c^S] = E[W_s] + E[W_{sp}] + 2E[X] + \tau_1 \quad (2)$$

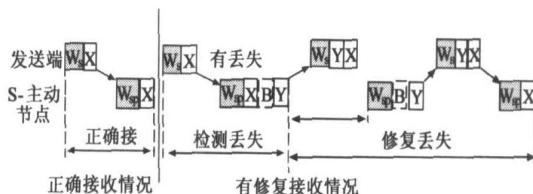


图 2 发送链路传输延迟情况

在有修复接收数据情况中:检测丢失阶段是丢包致使主动节点无法正确解码,而引发 NAK 请求的过程.该阶段的传输延迟为

$$E[D_d^S] = \frac{p_i}{(1-p_i)\tau_1} + E[W_s] + E[W_{sp}] + 2E[X] + E[Y] + E[B] + \tau_1 \quad (3)$$

其中,  $B$  为 NAK 抑制定时器的时长。

修复丢失阶段在第一个 NAK 发送之后,考虑多次重发 NAK 的轮回,直至最后接收到数据块的时段.设  $T$  为实时定时器超时时间,则修复丢失阶段的延迟为

$$E[D_r^S] = \left[ \frac{p_l}{1-p_l} + \frac{p_l}{1-p_l} - 1 \right] (T + E[W_{sp}] + E[B] + E[Y]) + E[W_s] + E[Y] + E[W_{sp}] + 2E[X] + 2 \quad (4)$$

故发送链路上的平均延迟为

$$E[D_s] = E[D_c^S](1-p_l) + (E[D_d^S] + E[D_r^S])p_l \quad (5)$$

骨干链路上的延迟仅为网络传输延迟。再考虑接收链路上的延迟。接收链路也分为正确接收情况和有修复接收情况,接收链路正确接收情况时的传输延迟为

$$E[D_c^R] = E[W_{rp}] + E[W_r] + 2E[X] + 1 \quad (6)$$

当接收链路有修复情况时,其丢失检测与发送链路相似,但要考虑主动节点有  $Z$  个接收端,其检测丢失阶段延迟为

$$E[D_d^R] = \sum_{j=0}^{Z-1} \binom{Z-1}{j} p_3^j (1-p_3)^{Z-1-j} \frac{p_3^{j+1}}{(1-p_3^{j+1})} + E[W_s] + E[W_{sp}] + 2E[X] + E[Y] + E[B] + 1 \quad (7)$$

修复丢失阶段又分为两种情况:(a)若在接收端发起重发请求时,其上级主动节点总有请求数据,则与发送链路类似,该阶段延迟为

$$E[D_r^{R(1)}] = \left[ \frac{p_l}{1-p_l} + E[M_3^S] - 1 \right] (T + E[W_{sp}] + E[B] + E[Y]) + E[W_s] + E[Y] + E[W_{sp}] + 2E[X] + 2 \quad (8)$$

(b)在接收端发起 NAK 请求时,其上级主动节点没有请求数据。由于假设骨干链路无包丢失,接收链路主动节点没有请求数据是因为发送链路丢失修复时间过长所引起,此时只有发送端有修复数据。这一丢失修复阶段除包含 (a) 的延迟外,还包含主动节点向上请求数据重发的过程,修复示意如图 3 所示,其延迟为

$$E[D_r^{R(2)}] = E[D_r^{R(1)}] + 2E[W_{rp}] + 2E[W_{sp}] + 2E[Y] + 2E[B] + 2E[X] + E[D_r^S] + 2 \quad (9)$$

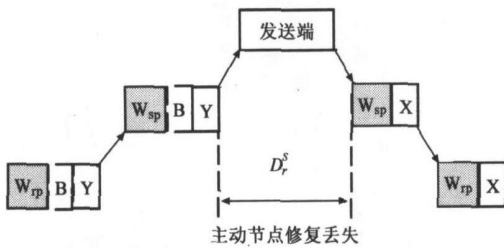


图 3 接收链路主动节点丢失修复情况

于是接收链路上的平均延迟为

$$E[D_R] = E[D_c^R](1-p_l)(1-p_3) + (E[D_d^R] + E[D_r^{R(2)}])p_l p_3 + (E[D_d^R] + E[D_r^{R(1)}])(1-p_l)p_3 \quad (10)$$

由此可得总平均传输延迟为

$$E[D] = E[D_s] + 2 + E[D_R] \quad (11)$$

### 3.4 延迟仿真分析

利用 Matlab 对上述结果进行仿真计算,分别计算了用户数、丢包率等因素对延迟特性的影响。仿真参数设置如下

$$T = 30\text{ms}, \quad \tau_1 = \tau_2 = 10\text{ms}, \quad E[V] = 0.5\text{ms}, \quad E[V^2] = 0.25$$

$$\tau_l = 0.1, \quad E[Y] = 0.1\text{ms}, \quad E[Y^2] = 0.01$$

图 4 给出了本地组用户数对延迟特性的影响曲线,由该图可见,用户数的增加对延迟特性的影响不大,即协议具有良

好的扩展性能,这是因为模型进行了有效的 NAK 抑制和 NAK 聚集。但本地组用户数的设置还和诸如带宽等其他性能因素有关,因此应综合考虑。另外不同的 FEC 编码方式的延迟特性差别较大,冗余小 ( $n=9, k=7$ ) 的 FEC 组较冗余大 ( $n=15, k=7$ ) 的组延迟小,原因是冗余大的编码组处理时间相应较长。但冗余大的 FEC 组具有稳健的抗干扰特性,如图 5 所示,其传输延迟随丢包率的恶化仅发生极其微小的变化;另外对于冗余小的 FEC 组,当链路丢包率较高,实时定时器设置时间长度超过网络传输时间的 2 倍以上时,其传输延迟将随之较快增加,如图 6(a) 所示,但对于冗余大的 FEC 组,延迟特性几乎不随实时定时器时长的变化而变化,如图 6(b) 所示。

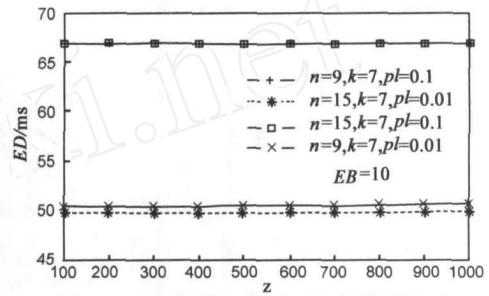


图 4 本地组用户数对延迟特性的影响

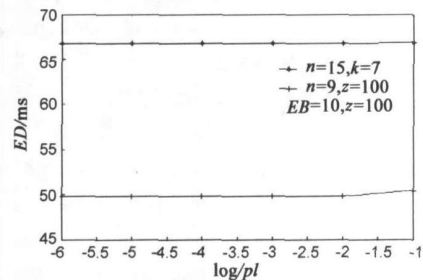


图 5 链路丢包率对延迟特性的影响

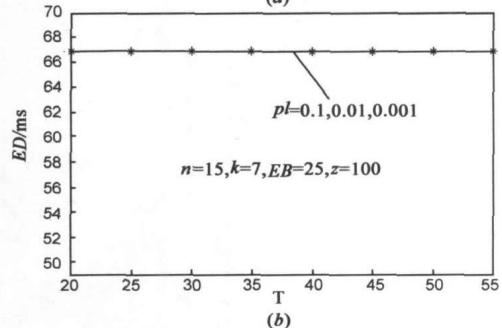
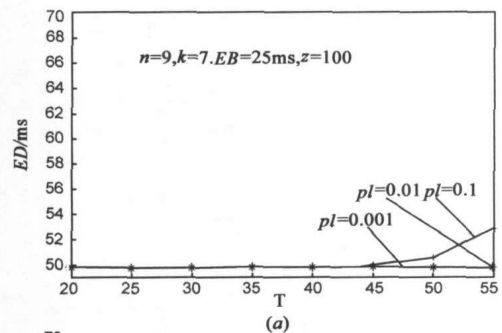


图 6 实时定时器对延迟特性的影响

## 4 结论

实时可靠多播协议在动态数据同步刷新的数据分发传输中有着重要的作用. 本文对影响批量数据实时动态分发可靠多播协议传输延迟的各种因素进行了全面分析, 建立了实时可靠多播协议传输模型, 导出了传输延迟量化公式. 仿真计算结果表明, 当网络质量较好时, 采用冗余较小的 FEC 组既可使延迟小又可获得稳健的延迟特性; 当网络质量较差时, 采用冗余较大的 FEC 组虽然延迟增加, 但其特性却很稳定, 变化很小, 仍然表现出优良的性能. 同时, 该协议在延迟特性方面还表现出良好的扩展性能, 能够满足批量动态数据同步分发、刷新的要求.

### 参考文献:

- [1] J W Atwood. A classification of reliable multicast protocols[J]. Network, May 2004, 18 (5) :24 - 34.
- [2] Reliable Multicast Transport Building Blocks for One-to-Many Bulk-Data Transfer[S]. RFC3048, 2001.
- [3] N F Maxemchuk. Reliable multicast with delay guarantees[J]. Communications Magazine, 2002, 40(9) :96 - 102.
- [4] B Whetten ,G Taskale. An overview of reliable multicast transport protocol II[J]. Network, 2000, 14(1-2) :37 - 47.
- [5] 杨瑞娟, 柳键, 田金文. 适用于同步数据分发的实时可靠多播协议[J]. 计算机工程, 2005, 31 (24) :72 - 74.  
Yang Ruijuan, et al. A real time reliable multicast protocol for synchronous data delivery. Computer Engineering, 2005, 34 (24) :72-74 (in Chinese)
- [6] N Taku, et al. Reliable multicast protocol applied local FEC [R]. IEICE Tech. Rep. ,2001 ,3 :2348 - 2354.
- [7] M Christian, et al. A Throughput Analysis of Reliable Multicast Transport Protocols[A]. In Proc. IEEE ICCCN '2000[C]. Las Vegas :IEEE Press ,2000. 250 - 257.
- [8] C Maihofer, et al. A delay analysis of tree-based reliable multicast protocols[A]. Computer Communications and Networks ,In Proc. Tenth International Conference[C]. 2001. 274-281.

### 作者简介:



杨瑞娟 女, 1964 年生于四川省成都市, 空军雷达学院四系通信教研室教授, 华中科技大学博士生, 主要从事网络通信与雷达组网研究. E-mail :ruijuany @sohu.com



黄美荣 女, 1978 年出生于黑龙江哈尔滨市, 硕士, 空军雷达学院四系通信教研室讲师, 从事雷达组网方向的研究.

柳 健 男, 1939 年出生于湖南省长沙市, 华中科技大学教授, 博士生导师, 主要从事数字图像处理与流媒体传输方向的研究.