

广播网络中基于补丁流的丢包恢复机制研究

刘聪 廖建新 王纯 王敬宇 张婧
(北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室 北京 100876)

摘要: 现有的数字广播网络由于没有回传通道,发送端无法知悉传输过程中的丢包状况。接收端处在广播网络的不同位置,常常因处于小区边缘或受障碍物遮挡等原因造成信号减弱,从而导致丢包率提高。该文提出了一种基于pFEC (patching Forward Error Correction, 补丁 FEC)的丢包恢复机制,来解决单向广播网络的丢包问题。该方法利用蜂窝移动网络的双向信道来传输补丁流,提供自适应的FEC来降低丢包率。这种方式可以在广播业务中为不同位置的用户提供不同的丢包恢复能力。理论建模及仿真结果显示,在蜂窝移动网络丢包率不高的情况下,pFEC机制能够有效应对个别用户突发的丢包,从而提高广播业务整体的可靠性和服务质量。

关键词: 广播网络; 前向纠错; 补丁流; 丢包率

中图分类号: TN919.85

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)06-1460-05

Research on Mechanism of Packet Loss Recovery Using Patching FEC in Broadcasting Networks

Liu Cong Liao Jian-xin Wang Chun Wang Jing-yu Zhang Jing
(State Key Laboratory of Networking and Switching Technology,
Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: As the broadcasting networks have no feed back channel, the sender has no idea about the packets loss during the packets are transmitted. Signals may reduce and the Probability of Packet Loss (PPL) increases, when the terminals are on the edge of the cell or blocked by some buildings. A patching Forward Error Correction (pFEC) mechanism is proposed to provide low PPL in broadcasting networks. The mobile networks are used as the return channel to get the information of PPL, and the redundancy packets are transmitted via mobile networks for reducing the PPL. This mechanism provides the different packet loss recovery ability for different people according to the reports from receivers. The simulation results show that if the mobile networks are in a low PPL condition, the pFEC mechanism will have a good performance in decreasing the PPL, and improves the reliability and quality of service.

Key words: Broadcasting networks; Forward error correction; Patching stream; Probability of packet loss

1 引言

当采用单向的广播或组播方式进行流媒体传输时,由于没有回传通道,因而发送端无法知悉传输中的丢包情况;用户处在同一广播网络的不同位置,可能因处于小区边缘或因障碍物遮挡等原因造成信号减弱,从而导致丢包率提高。这种情况下,广播网络只能“一视同仁”地提供同样强度的纠错码,而不能针对具体用户的丢包情况提供不同纠错能力的编码。随着移动多媒体广播技术的发展,出现了基于广播网络与移动网络结合的混合网络架构,终端通过增加广播网络的接收模块,成为既能接收广播网络信号又能接收移动网络信号的双模终端。由于缺少回传通道而在广播网络中形成的

一些技术难题,可以通过广播网络与移动网络结合的方式来予以解决。

文献[1]提出了可以将FEC与媒体数据分别传输的思路;文献[2]提出了利用RTCP(Real-Time Transport Control Protocol)作为控制流进行流量控制的算法;文献[3]提出了一种帧的解码模型,在此基础上建立了用于在视频源数据和FEC数据之间分配网络带宽资源的优化算法,该算法适用于双向网络的传输,通过优化带宽资源来使接收端获得最大的可播放帧;文献[4,5]介绍了混合ARQ的方案,将重传与纠错结合起来,并且提出了信息与校验部分分开传输的思路;文献[6]研究了多播业务的纠错和重传问题,提出在通过使用混合FEC、分层网络局部修复技术和一种主动NAK(Negative Acknowledgment)机制,可有效控制并降低修复时间;文献[7,8]提出了通过多路方式在移动网络上降低丢包率的方法;以上这些文献从网络的各个层面研究了流媒体的纠错和重

2008-05-05 收到, 2008-09-30 改回

国家杰出青年科学基金(60525110), 国家 973 规划项目(2007CB307100, 007CB307103)和电子信息产业发展基金项目(基于3G的移动业务应用系统)资助课题

传机制,但是没有考虑在广播中使用自适应的纠错机制。文献[9,10]研究了组播的纠错和降低丢包率的机制,但是针对的都是媒体数据在双向的移动网络传输的情况,没有研究利用单向的广播网络传输媒体数据时,如何来实施丢包恢复的问题。

为了解决单向广播网络的自适应纠错的问题,本文提出了一种 pFEC(patching FEC, 补丁 FEC)机制,利用移动网络中的双向信道来传输补丁流,提供自适应的 FEC(Forward Error Correction, 前向纠错)。pFEC 机制在广播业务中为不同位置的用户提供自适应的纠错能力,能够有效应对突发的丢包率提高的问题,提高业务的可靠性和服务质量。本文第 2 节介绍了相关的工作;第 3 节对采用 pFEC 机制的移动多媒体广播系统(以下称为 pFEC 系统)进行分析;第 4 节对 pFEC 系统的性能进行了理论建模及仿真分析;第 5 节对本文进行总结。

2 pFEC 系统

为了对移动多媒体广播的内容进行有针对性的丢包恢复,需要利用移动网络的双向通信和点对点传输能力。在 pFEC 系统中,利用广播网/移动网混合网络的架构,选用数据与纠错信息可分离的分组码来进行丢包恢复。在广播网中传输数据信息,以充分利用带宽;在双向的移动网络中传输纠错码作为补丁流,利用 RTCP 协议的反馈信息(RR)^[2],由终端向服务器上报系统的丢包率等信息。服务器为处在网络中不同位置的用户提供自适应的纠错码,以降低丢包率。

图 1 给出了 pFEC 系统架构。服务器侧的视频源文件经过视频编码后,通过分级的 FEC 编码,生成多种级别的 FEC 数据包。打包后的视频流通过单向的广播网络被终端接收到之后,终端将当前网络的丢包率等与当前网络相关的信息,通过双向的移动网络上报给服务器侧的适配模块。适配模块根据终端上报的信息,选择适当的 FEC 纠错级别,通过移动网络发送 FEC 数据包作为补丁流发给终端。终端将收到的 FEC 数据包和视频流进行同步,恢复出正确的视频流信息,从而降低了丢包率,提高了广播传输的可靠性。

当广播信道质量改善,信道传输导致的误码率降低时,服务器的适配模块根据终端反馈的接收状况,降低通过移动

网络发送的 FEC 的级别,或者停止传输 FEC 数据包。这样在广播信号好的地方,就不需要占用移动网络的带宽资源来传输 FEC 数据包。

在网络侧,媒体文件被打包后,通过 FEC 封装模块产生一部分 FEC 包,这些 FEC 包里面包含的信息可以用来对丢失的媒体包进行恢复。从 FEC 封装模块中输出的数据包被封装成 RTP 流,通过 RTP/UDP 协议在网络中广播。终端通过广播网络接收到媒体包,利用 RTCP 协议发送 RR 信息给网络,报告自己的丢包情况。同时用接收到的媒体包和与其相关联的 FEC 包将丢失的媒体包恢复出来。网络根据收到的 RR 信息,可以了解到该终端所处的广播网络的丢包状况,选择适当的 FEC 编码效率,将生成的 FEC 包发送到该终端。

媒体包与 FEC 包分开传输,一个 FEC 包即 FEC 包头和 FEC 包的载荷放进 RTP 包的载荷中。FEC 包在单独 RTP 流中传输,采用单独的序号空间。FEC 包的时间戳是从对应的媒体包中得来的,同样是单调递增,这样就解决了 FEC 补丁流与 RTP 媒体流的同步问题。接收端收到 FEC 包和媒体包之后,先判断是否有媒体包丢失。如果没有,FEC 包就直接被丢弃。如果有丢包,就使用接收到的 FEC 包和媒体包来进行丢包的重建。

3 pFEC 系统性能分析

本文选用 RS(Reed-Solomon)编码作为 pFEC 系统中 FEC 包的编码方式,定义为 $RS(n,k)$,其中 n 为编码后的全部符号数量, k 表示原始信息符号的数量, $n-k$ 表示编码后产生的冗余信息符号的数量。在视频流化过程中使用 RS 编码时,通常先将视频帧封装在若干个包中,然后用这些原始数据包生成冗余数据包后再传输。RS 编码最大可以纠正 $n-k$ 个错误,当经过网络传输后,如果有任意 k 个或更多的数据被正确接收,那么就可以从中恢复出原始的 k 个数据。 k/n 称为编码效率,表明了冗余信息的多少,冗余信息越多,纠错能力也越强。当 n, k 确定时,就可以计算出全部数据的正确接收概率 $P(n,k)$,如式(1)所示:

$$P(n,k) = \sum_{l=k}^n \binom{n}{l} (1-p)^l p^{n-l} \quad (1)$$

其中 p 为当前平均丢包率。

3.1 理论建模

如图 2 所示,由于广播网络和移动网络是不同的传输路径,丢包率不同,需要分别考虑两条路径上的丢包率问题。为了便于计算,我们对使用到的参数做了规定,如表 1 所示。

网络的丢包率等于丢包数量的数学期望除以传输包的总量,当没有进行包的恢复时:

$$p = \frac{E(X)}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n i \cdot P_i}{n} \quad (2)$$

由前述可知,当媒体数据包数量为 k 个,FEC 包为 $n-k$

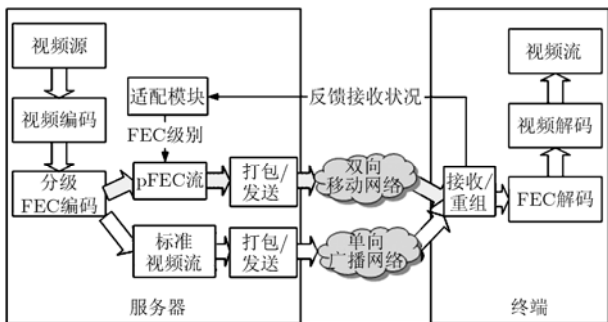


图 1 pFEC 系统架构

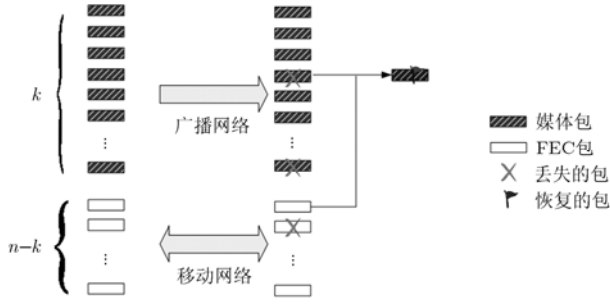


图2 采用 pFEC 机制的丢包恢复模型

表 1 相关参数设定

k	媒体数据包数目
$n - k$	FEC 包数目
p_1	广播网络的初始丢包率
p_2	移动网络丢包率
$P_{1,i}$	广播网络丢失 i 个包的概率
$P_{2,i}$	移动网络丢失 i 个包的概率
P_i	pFEC 系统丢失 i 个包的概率
p	pFEC 系统的丢包率
P'_i	采用广播机制进行丢包恢复的系统丢 i 个包的概率
p'	采用广播机制进行丢包恢复的系统的丢包率

个, 根据文献[3], 此时接收端成功接收 n 个数据包中的 k 个, 就可以完整恢复出全部的媒体数据包。因此, 对于少于或等于 $n - k$ 个的丢包都可以被恢复出来, 从而可以恢复包的数量的数学期望为

$$E(X \leq n - k) = \sum_{i=1}^{n-k} i \cdot P_i \quad (3)$$

进行丢包恢复后, 实际丢包的数量的数学期望为

$$E(X) = E(X') - E(X \leq n - k) = \sum_{i=n-k+1}^n i \cdot P_i \quad (4)$$

由于整个系统由两条传输链路组成, 系统丢包是有两条链路丢包共同引起的, 假设总的丢包数目为 i , 广播网络这条链路上丢了 j 个包, 那么移动网络这条链路就丢了 $i - j$ 个包。因此有

$$P_i = \sum_{j=0}^i P_{1,j} \cdot P_{2,(i-j)} \quad (5)$$

由式(1)可以分别计算出两条链路中丢失 j 个包和 $i - j$ 个包的概率:

$$P_{1,j} = C_k^j \cdot p_1^j \cdot (1 - p_1)^{k-j} \quad (6)$$

$$P_{2,(i-j)} = C_{n-k}^{i-j} \cdot p_2^{i-j} \cdot (1 - p_2)^{(n-k)-(i-j)} \quad (7)$$

将式(6), 式(7)带入到式(5)中, 则有

$$P_i = \sum_{j=0}^i C_k^j \cdot p_1^j (1 - p_1)^{k-j} \cdot C_{n-k}^{i-j} \cdot p_2^{i-j} (1 - p_2)^{(n-k)-(i-j)} \quad (8)$$

根据式(2), 式(4), 式(8)得到 pFEC 系统的丢包率为

$$\begin{aligned} p &= \frac{E(X')}{n} \\ &= \frac{\sum_{i=n-k+1}^n i \times \sum_{j=0}^i C_k^j p_1^j (1 - p_1)^{k-j} C_{n-k}^{i-j} p_2^{i-j} (1 - p_2)^{(n-k)-(i-j)}}{n} \\ &= \left[k p_1 + (n - k) p_2 - \sum_{i=1}^{n-k} i \times \sum_{j=0}^i C_k^j p_1^j (1 - p_1)^{k-j} C_{n-k}^{i-j} p_2^{i-j} (1 - p_2)^{(n-k)-(i-j)} \right] / n \end{aligned} \quad (9)$$

如图 3 所示, 如果媒体包和 FEC 包都通过广播网络来传输, 则有

$$P'_i = P_{1,i} = C_n^i p_1^i (1 - p_1)^{n-i} \quad (10)$$

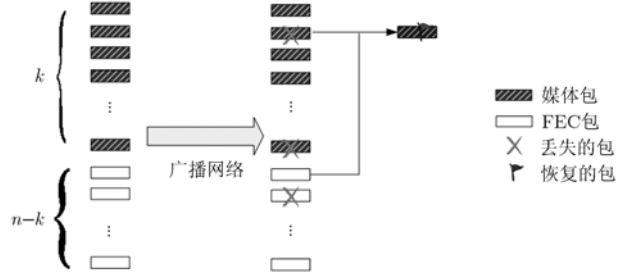


图3 采用广播机制的丢包恢复模型

有丢包恢复的广播网络丢包的数量的数学期望为

$$E(X'') = \sum_{i=n-k+1}^n i P'_i = \sum_{i=n-k+1}^n i C_n^i p_1^i (1 - p_1)^{n-i} \quad (11)$$

由式(2), 式(12)可以得到采用广播机制的系统丢包率为

$$p' = \frac{\sum_{i=n-k+1}^n i \times C_n^i p_1^i (1 - p_1)^{n-i}}{n} = p_1 - \frac{\sum_{i=1}^{n-k} i \times C_n^i p_1^i (1 - p_1)^{n-i}}{n} \quad (12)$$

3.2 仿真分析

下面对计算结果进行仿真, 首先分析 pFEC 系统的性能与编码效率的关系:

图 4 横坐标为编码效率, 纵坐标为 pFEC 系统的丢包率。对于广播网络的初始丢包率分别为 0.25, 0.3, 0.35 的情况, 我们设定移动网络的丢包率为 0.3, 对于编码效率为 0.8 的情况, pFEC 系统将丢包率从原先的 0.25, 0.3, 0.35, 分别下降到了 0.15, 0.22, 0.29; 而当编码效率降低到 0.7 时, pFEC 系统丢包率则进一步下降到了 0, 0.03, 0.11。

通过对图 4 的分析可以看出, pFEC 系统能够显著降低广播网络的丢包率。对于丢包率较低的网络, 其性能提高更为明显, 当丢包率提高时, 通过降低编码效率, 增加冗余包, pFEC 系统可以进一步降低丢包率。

以下分析 pFEC 系统与采用广播机制进行丢包恢复的系统, 比较其丢包恢复的性能。如图 5 所示, 我们设定编码效

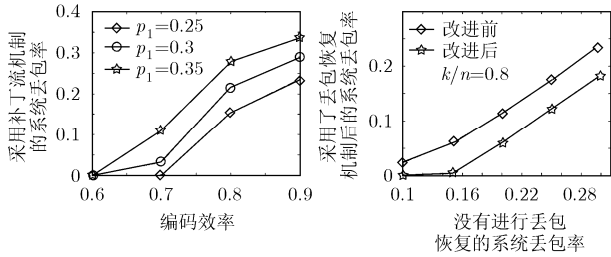


图 4 pFEC 系统丢包率与编码效率的关系

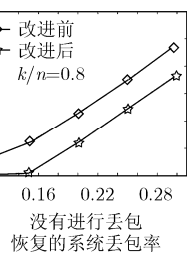


图 5 两种丢包恢复系统的比较

率为 0.8, 移动网络的丢包率为 0.2, 可以看到, 改进后的 pFEC 系统, 比改进前的采用广播机制进行丢包恢复的系统, 能够较显著的降低丢包率。对广播网络的初始丢包率小于 0.15 的情况下, pFEC 系统可以将丢包率降低到接近 0; 而当丢包率迅速上升时, pFEC 系统也明显优于采用广播机制进行丢包恢复的系统。以广播网络的初始丢包率为 0.2 为例, 采用广播机制进行丢包恢复的系统将丢包率降为 0.11, 而 pFEC 系统可以将丢包率降到 0.06。当广播网络的初始丢包率上升到 0.3 时, 采用广播机制进行丢包恢复的系统将丢包率降为 0.24, pFEC 系统可以将丢包率降到 0.18。

通过对图 5 的分析可以看到, 改进后的 pFEC 系统与采用广播机制进行丢包恢复的系统相比, 具有一定的优势。对于系统丢包率小于 0.2 的状况, pFEC 系统可以显著降低丢包率, 当系统的初始丢包率升高时, pFEC 系统的性能依然优于采用广播机制进行丢包恢复的系统。

pFEC 系统通过移动网络传输冗余信息来进行丢包的恢复, 因而有必要考察移动网络的丢包率对 pFEC 系统性能的影响。

如图 6 所示, 设定系统的编码效率为 0.8, 对于移动网络的丢包率分别为 0.1, 0.15, 0.2 的情况进行分析, 可以看出, 移动网络的丢包率对 pFEC 系统的性能有着明显的影响。当移动网络的丢包率升高时, pFEC 系统的丢包恢复能力也随之下降。当系统的初始丢包率为 0.2 时, 对于移动网络的丢包率分别为 0.1, 0.15, 0.2 的情况, pFEC 系统的丢包率分别为 0.03, 0.04, 0.06。可见, pFEC 系统在移动网络的丢包率较低的情况下, 能更好的发挥作用。

通过对 3.1 节的理论建模进行仿真分析, 可以看出 pFEC 系统在移动网络丢包率较低的情况下, 其性能明显优于采用

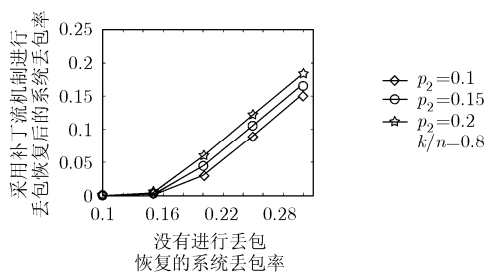


图 6 移动网络的丢包率对 pFEC 系统性能的影响

广播机制进行丢包恢复的系统。在系统降低编码效率, 增加用于丢包恢复的冗余包时, 优势更为明显。但是 pFEC 系统的性能要受制于移动网络的丢包状况, 当移动网络的丢包率升高时, 会对系统整体性能造成一定影响。

4 结束语

为了解决单向广播网络的自适应丢包恢复的问题, 本文提出了一种 pFEC 机制, 利用移动网络的双向信道来传输补丁流, 提供自适应的 FEC。这种方式弥补了单向广播无法通过 ARQ 实现可靠传输的缺陷, 保障了业务的实时性, 可以在广播业务中为不同位置的用户提供自适应的纠错能力。计算及仿真结果显示, pFEC 系统在移动网络的丢包率较低的情况下, 能够比较有效地应对个别用户突发的丢包率提高的问题, 从而提高业务的可靠性和服务质量。当用来传输冗余信息的移动网络状况恶化, 导致丢包率上升时, 会对 pFEC 系统的整体性能造成影响, 同时, 点对点传输冗余信息, 也在一定程度上耗费了移动网络的带宽, 下一步将研究如何提高 pFEC 系统的传输效率。

致谢 感谢朱晓民老师对本文的修改。感谢亓中瑞、高新颖、熊昱昊、吴淑艳、荀兆勇、倪萍、李元振、樊利民的帮助。

参考文献

- [1] Rosenberg J and Schulzrinne H. An RTP Payload Format for Generic Forward Error Correction. RFC2733, Dec 1999.
- [2] 蒋建国, 苏兆品, 李援, 梁立伟. RTP/RTCP 自适应流量控制算法. 电子学报, 2006, 34(9): 1659-1662.
Jiang Jian-guo, Su Zhao-pin, Li Yuan, and Liang Li-wei. Adaptive flow control algorithm for RTP/RTCP. *Acta Electronica Sinica*, 2006, 34(9): 1659-1662.
- [3] 梅峥, 李锦涛. 一种自适应的视频流化前向纠错算法. 软件学报, 2004, 15(9): 1405-1412.
Mei Zheng and Li Jin-tao. An adaptive forward error correction algorithm for streaming video. *Journal of Software*, 2004, 15(9): 1405-1412.
- [4] 张立军, 曹志刚, 李安国. 基于校正子的第一类混合 ARQ 及其性能分析. 电子与信息学报, 2006, 28(2): 242-246.
Zhang Li-jun, Cao Zhi-gang, and Li Victor O K. Syndrome-based type-I hybrid ARQ and its performance analysis. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2006, 28(2): 242-246.
- [5] 张立军, 曹志刚, 李安国. 基于可逆 RS 码的第二类多进制混合 ARQ 及其性能分析, 上海交通大学学报 2006, 40(1): 50-53.
Zhang Li-jun, Cao Zhi-gang, and Li Victor O K. Invertible RS codes based non-binary type-II hybrid ARQ and its performance analysis. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2006, 40(1): 50-53.
- [6] 杨瑞娟, 黄美荣, 柳健. 一种实时可靠多播协议延迟性能分析,

- 电子学报, 2007, 35(1): 91-94.
- Yang Rui-juan, Huang Mei-rong, and Liu Jian. Analysis of delay characteristic in a real time reliable multicast protocol. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 35(1): 91-94.
- [7] Djukic P and Valace S. Reliable packet transmissions in multipath routed wireless networks. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2006, 5(5): 548-559.
- [8] Nafaa A, Taleb T, and Murphy L. Forward error correction strategies for media streaming over wireless networks. *Communications Magazine, IEEE*, 2008, 46(1): 72-79.
- [9] Tan Wai-Tian and Zakhor A. Video multicast using layered FEC and scalable compression. *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology*, 2001, 11(3): 373-386.
- [10] Zaichen Zhang and Li V O K. Network-supported layered multicast transport control for streaming media. *IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems*, 2007, 18(9): 1332-1344.
- 刘 聪: 男, 1980 年生, 博士生, 研究方向为移动多媒体广播业务及其关键技术.
- 廖建新: 男, 1965 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为普适服务、业务网络智能化.
- 王 纯: 男, 1965 年生, 高级工程师, 研究方向为普适服务、业务网络智能化.
- 王敬宇: 男, 1978 年生, 博士, 研究方向为多路传输、普适服务.
- 张 婧: 女, 1983 年生, 硕士生, 研究方向为业务网络智能化.