前向误差校正法实时修复丢包

张 钶,谢忠诚,鞠九滨
(吉林大学计算机科学系,长春 130023)

摘 要: 在 IP 电话和远程会议系统等实时应用中,丢包不可避免并极大地影响传输服务质量. 前向误差校正法 FEC(Forward Error Correction)是实时修复丢包的一种较好的方法. 本文介绍了 FEC 丢包修复方法的原理,并把丢包修复功能结合到我们实现的实时传输协议 RTP(Real-time Transport Protocol)库中,验证了丢包修复功能的正确性.

关键词: FEC; 丢包; 修复; RTP
中图分类号: TN915 **文献标识码**: A **文章编号**: 0372-2112 (2001) 02-0263-03

Repairing Lost Packets with FEC Method

ZHANG Ke, XIE Zhong-cheng, JU Jiu-bin
(*Computer Science Department of Jilin University, Chuangchun* 130023, *China*)

Abstract: In real-time applications, such as IP phones and remote conference systems, packet loss that impairs quality of transmitting severely is inevitable. FEC (Forward Error Correction) is a better way for repairing lost packets. In this paper, a method of lost repairing with FEC based on RTP(Real-time Transport Protocol) was designed and implemented. Then a testing method of lost repairing function and results are illustrated.

Key words: FEC; packet loss; lost repairing; RTP

1 引言

实时话音包在因特网上传输时的丢失包将严重地影响 IP 电话的话音质量[1],采取丢包修复方法是很必要的. 目前有四种常见的丢包修复方法:重发法[3],冗余法[1],交叠法[2],差错分散法(Error Spread)[4]以及 FEC 法[2]. 重发法处理开销高,交叠法延迟大并只有大致的修复能力. 其中 FEC 法和冗余法适合实时传输的应用. 而 FEC 法有精确的修复能力,并且只有较低的处理开销. 其缺点是有较大的延迟(缓存多个包以进行 FEC 运算),增加了带宽需求.

对丢包现象的研究发现,单包丢失的概率最大,因此主要解决单包丢失的修复问题. IP 电话和远程会议系统中,实时传输协议 RTP(Real-time Transport Protocol)[6]已经成为媒体传输的通用标准. 实时媒体传输的丢包检测和修复需要 RTP 的支持,例如通过包序列号监测丢包等. 如果把丢包修复能力结合到 RTP 的传输功能中,将是解决实时媒体传输丢包的一个较好方法.

本文介绍了 FEC 丢包修复的方法,并把 FEC 的丢包修复功能结合到我们实现的 RTP 库中,通过设计的测试平台验证了丢包修复的正确性.

2 前向误差校正法 FEC

2.1 校验编码

定义 1 $f(x, y, \cdots)$是应用在数据块 $x, y, \cdots$的按位异或操作. 假定每个数据块是长度为 L 的一组简单比特流,则函数对所有数据块做异或运算后输出长度为 L 的校验块,特别地,$f(x) = x$.

定义 2 校验块一般由一组线性无关的数据块的组合来产生,这种组合称为校验编码.

修复数据的方法一般是对 k 个媒体数据块产生一个或多个校验块,共有 n 个数据块和 $n-k$ 个校验块,接收方只要接到其中任意 k 个块就可以再生出原来的 k 个媒体数据包. 对于给定的 n 和 k 有以下多种检验编码(左面的字母代表输入的数据块流,右面的字母代表数据块和校验块流):

方式 0 不能修复丢包,定义为 $a, b, c, d, \cdots \rightarrow a, b, c, d, \cdots$;

方式 1 能修复单个丢包,如果 b 和 $f(a, b)$ 交换位置,允许连续两包丢失的修复定义为 $a, b, c, d, e, f \rightarrow a, f(a, b), b, f(b, c), c, f(c, d), d, \cdots$;

方式 2 修复所有单包丢失和若干连续丢失的包,它比方式 1 的需要的冗余 FEC 包少,因此它的传输开销要小: $a, b, c, d, e, f, g \rightarrow f(a, b), f(a, c), f(a, b, c), f(c, d), f(c, e), f(c, d, e), \cdots$;方式 2 比方式 1 修复能力强、传输开销小,但是它对每个包至少做两次异或运算,所以它的计算复杂度大,并且引入较大的延迟.

方式 3 能修复连续丢失的 1、2、3 个包,但需要 4 个包的

收稿日期:1999-12-27;修回日期:2000-03-22
基金项目:高等学校博士点基金(No. 1999018319)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

延迟: $a, b, c, d, e, f \rightarrow f(a), f(b), f(a, b, c), f(c), f(a, c, d), f(a, b, d), f(d), \cdots$;

2.2 传输 FEC 校验块的 RTP 包格式

校验块由 FEC 包传送. FEC 包由在 RTP 净载部分的一个 FEC 包头和 FEC 净载组成(图 1)[7]. 该格式可以传送任意长度和校验方式的数据块,可以对 RTP 净载和重要的 RTP 包头域进行修复. FEC 校验包头(图 2)中定义了 24 比特的偏移屏蔽码域,如果第 i 个比特被置位 1,表明序列号为 $N + i$ 的媒体包和本 FEC 包相关联, N 是 FEC 包头中的序列号基域. FEC 包头中的其他域有:

® 长度修复域:决定修复后的媒体包的长度.

® 净载类型修复域:同本 FEC 包相关联的媒体包的净载类型值应用保护操作过程得到.

® 序列号基域:本 FEC 包保护的那些媒体包中最小的序列号值.

® 时间戳修复域:同本 FEC 包相关联的媒体包的时间戳值应用保护操作过程得到.

® E 位:用来指示 FEC 头部扩展.

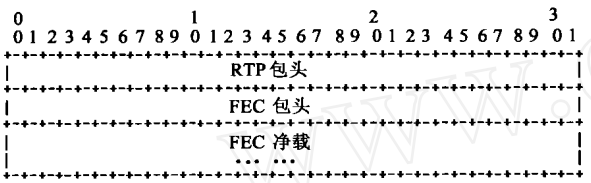

图 1 FEC 包结构

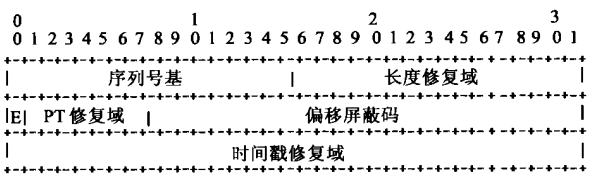

图 2 校验包头格式

FEC 包的净载部分是对本 FEC 包相关联的媒体包的 CSRC 列表、净载、填充部分和扩展部分应用保护操作得到的. 所谓保护操作是为了修复丢包发送端对媒体包执行的一种操作: (1) 从媒体包头中取得各种域值、净载和填充部分(如果存在)附加在一起形成一个二进制数据块,如果这些数据块的长度不等,用 0 填充至与最长的数据块等长; (2) 对这些数据块做校验运算得出 FEC 数据块; (3) 把 FEC 结果数据放入 FEC 包中.

2.3 丢包修复的实现

接收端检测到丢包后要启动修复过程重建丢失的媒体包. 修复过程分两个部分:

第一步 根据实现者选择的算法,确定为修复丢失的媒体包必须具有哪些包(媒体包和 FEC 包).

第二步 丢包重建,假设 T 是修复媒体包 Xi 所需的媒体包和 FEC 包序列, (1) 对 T 中媒体包和 FEC 包执行保护操作的步骤一; (2) 对所有的二进制数组执行异或操作,产生修复数组; (3) 产生一个新的无净载 RTP 包; (4) 修复数组中的比特值依次填入新包的相应域; (5) 新包序列号设置为 Xi 的序列号; (7) 新包的 SSRC 值设置为它保护的媒体流的 SSRC. 以上过程将完全修复一个 RTP 数据包的包头和净载.

参考 RFC1889[6] 和 H. 225. 0 的附录实现了一个通用的 RTP 库,把 FEC 的丢包修复机制结合到该库中. 实现中选择节 2.1 中性能价格比较好的方式 1 作为校验编码. 在 RTP 的打包过程中采用该校验编码和保护操作过程生成 FEC 包,每两个连续序列号的媒体包就有一个与之相关联的 FEC 包. 接收方把所有接收到的 FEC 包都放到相应参与者的一个 FEC 队列中,由 RTP 拆包过程维护该队列. 当拆包过程发现收到的数据包的序列号同上一次收到的序列号之差大于 1 时,断定发生了丢包现象,则启动丢包修复操作:

```
BEGIN
    IF (本参与者保存了前一个到来的媒体包) THEN
      WHILE (TRUE) DO
        IF (新到的或新修复的包与上一次缓存的包的序列号之差如果 > 1) THEN
            利用 FEC 队列和该媒体包修复丢包;
            IF (修复不成功) THEN BREAK;
      WHILE (TRUE) DO
        IF (缓存的或新修复的包与上面刚修复的最小序列号之差 > 1) THEN
            利用 FEC 队列和该媒体包修复丢包;
            IF (修复不成功) THEN BREAK;
    ELSE
      WHILE (TRUE) DO
        IF (新到的或新修复的包与上一次收到的包的序列号之差 > 1) THEN
            利用 FEC 队列和该媒体包修复丢包;
            IF (修复不成功) THEN BREAK;
    将新到的媒体包缓存并从 FEC 队列中将无用的 FEC 包清理掉;
END
```

经修复操作后,已丢失的媒体包被尽可能多地恢复出来. FEC 包在紧接 RTCP 的下一个端口中独立传输,它们具有自己的序列号空间,但时间戳仍来源于媒体包. 传输 FEC 格式的 RTP 数据包采用动态净载类型标识,没有实现 FEC 方式的接收者可以忽略接收到的 FEC 包,从而实现后兼容性.

3 功能测试

设计了一个协议测试系统来测试 FEC 的丢包修复功能. 该系统可以建立一个 RTP 对话,指定模拟丢包概率发送数据包;手动启动/禁用 FEC 修复机制;关闭指定的 RTP 对话. 它采用定量的测试策略,发送端发送如下格式的数据文件,每一行内容由一个媒体包传送,接收端将接收到的 RTP/RTCP 数据存储在两个文件中,从收到的数据序列来观察丢包和丢包修复的效果.

```
1     1     1     1
……
4000     4000     4000     4000
```

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

在局部网络连接的两台 PC 机上运行测试系统,建立连接后定时发送 RTP 数据包和 RTCP 控制包. 先在未启动 FEC 方式下,按一定丢包率发送数据包;发送一段时间后,使能 FEC 修复机制. 对话结束后,从相应的数据文件可见 RTP 数据文件中的前半部分数据序列有许多跳跃间隔,表示发生了丢包现象,在 RTP 数据文件的后半部分基本没有跳跃间隔,证明 FEC 方式的修复能力. 对应的 RTCP 报告也显示出积聚的丢包比率. 经过多次测试证明丢包修复功能的正确性(见表 1).

表 1　修复功能测试结果

测试序列	1	2	3
选择丢包率	30 %	20 %	10 %
修复后的丢包率	< 3 %	< 1 %	无丢包

FEC 法需要增加带宽需求,不适合在较低带宽情况下采用. 今后工作中要进一步拓展实时丢包修复的灵活性,使之能够根据网络的状态动态地改变校验编码方式,以适应环境的变化.

参考文献:

[1] Vicky Hardman, Martina Angela Sasse, Mark Handley, Anna Watson. Reliable audio for use over the internet [DB/OL]. < URL: http://www-mice. cs. ucl. ac. uk/multimedia/publications/RAT/inet95-rat. ps. > .

[2] Colin Perkins and Orion Hodson. Options for repair of streaming Media [DB/OL]. draft-ietf-avt-info-repair-03, 13 March 1998, work in progress. < URL: http://www. ietf. org/internet-drafts/draft-ietf-avt-info-repair-03. txt > .

[3] Bert J. Dempsey, Alfred C. Weaver. On retransmission-based error control for continuous media traffic in packet-switching network [J]. Computer Networks and ISDN Systems, 1996, 28: 719 - 736.

[4] Hung Q. Ngo, Srivatsan Varadarajan, and Jaideep Srivastavas. On achieving lower consecutive losses for continuous media streams [DB/OL]. < URL: http://cs. mnu. edu/tr1999/99 - 005. ps > .

[5] ITU-T Recommendation H. 323 (1998): Packet based multimedia communications systems [DB/OL]. < URL: http://www. radvision. com/hproduct. htm > .

[6] H. Shulzrinne, S. Casner, R. Frederick, and V. Jacobson. RTP: A Transport Protocol for real-time applications [DB/OL]. RFC1889. < URL: http://www. ietf. org/RFC/RFC1889. txt > .

[7] J. Rosenberg, H. Schulzrinne. An RTP payload format for generic forward error correction [DB/OL]. draft-ietf-avt-fec-04. txt, November 10, 1998, work in progress. < URL: http://www. ietf. org/internet-drafts/draft-ietf-avt-fec-04. txt > .

作者简介:

张　钶　1971 年 12 月生. 吉林大学计算机科学系计算机软件专业博士生,分别于 1994、1997 年在吉林大学计算机科学系获理学学士和硕士学位. 主要研究领域是计算机网络与分布式系统,现从事有关 IP 电话的科研工作.

谢忠诚　1972 年 9 月生. 于 1996、1999 年在吉林大学计算机科学系获理学学士和硕士学位. 研究领域是计算机网络与分布式系统.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net