

一种新的 IP 网络视频通信丢包错误纠正方案

艾 达^① 常义林^① 罗 忠^② 王 静^②

^①(西安电子科技大学综合业务网国家重点实验室 西安 710071)

^②(华为技术有限公司 深圳 518129)

摘 要 分组丢失是 IP 交换网络常见的现象。该文针对下一代网络多媒体通信, 提出了一套 IP 网络抗分组丢失的方案。包括纠删编码、打包和发送以及接收端错误掩盖。与常见的纠删编码相比, 该文提出的[9,5,3]码具有构造简单, 编解码时间短, 纠删能力高的优点。打包和发送方案根据[9,5,3]码的纠删性能对视频数据打包, 并以一定顺序发送, 提高了纠删码抗突发错误的能力。采用新的视频编码方案 H.264 所提供的抗误码工具——灵活的宏块次序(FMO), 对纠删失效的视频数据在解码端进行错误掩盖。

关键词 视频通信, 分组丢失, 纠删码, H.264, 灵活的宏块次序

中图分类号: TN919.8

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)10-1879-04

A Novel Lost-Packet Recover Scheme for Video Communications over IP Networks

Ai Da^① Chang Yi-lin^① Luo Zhong^② Wang Jing^②

^①(State Key Lab. of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China)

^②(Huawei Technologies Co.LTD., Shenzhen 518129, China)

Abstract It is very common that the packets may be lost over IP networks during transmission. The scheme proposed in this paper involves a novel erasure correcting code, a packet sending order and error concealment method. The [9,5,3] erasure correcting code in this paper has excellent lost recovering capability, linear encoding and decoding time and is easily constructed. The packetization method increases the capability of error resilience against the burst packet loss. The error concealment tool FMO of H.264 is used to deal with the video information packet that can not be recovered.

Key words Video communications, Packet loss, Erasure codes, H.264, Flexible Macroblock Order(FMO)

1 引言

多媒体通信是下一代网络(Next generation network)的主要业务, 全 IP 技术有可能成为下一代网络的选择方案。在 IP 网络上传输时, 分组丢失会导致接收端图像、语音恢复质量下降。重发(ARQ)可以有效地解决分组丢失问题, 但对于会话类应用、IP 组播(Multicasting), ARQ 带来的延迟是无法接受的。对于实时性强的应用, 一般适宜采用前向纠错(FEC)方法。纠删码(Erasure codes)是 FEC 的一种, 根据已接收的数据分组和校验分组, 恢复丢失的分组。目前常用的纠删码有奇偶校验码, RS 码, BCH 码, 汉明码, Tornado 码等。

ITU-T 2003 年 5 月制定了新的视频编码标准 H.264^[1], 其中包括面向 IP 网络传输的一系列抗误码工具。为了减少分组丢失对图像恢复质量的影响, H.264 建议视频数据以 GOB, Slice 或 frame 等完整的语法单元为单位打包, 并对打包的数据采用纠删编码。本文首先分析了常见的纠删码, 综合纠删性能, 冗余度, 编解码复杂度, 编解码时间等几个方面, 结合 H.264 视频数据特点, 提出了一种新的 $[2m-1, m, 3]$ 纠删编码方

案, 以及与其特例 [9,5,3] 码配套的数据打包和发送方案。在解码端, 对无法纠删的数据错误掩盖。

2 常用的抗分组丢失技术

在 IP 网络传输时, 多媒体数据封装在 RTP 分组内。若干视频图像数据分组组成一个纠删组, 每一个数据分组作为一个数据节点参与纠删编码。为了避免过多的比特开销以及较长编解码延迟, 要求每一纠删组中视频数据分组个数不能过多, 因而采用码长较短的线性分组码较为合适。

奇偶校验码是最简单的纠删码, 只能恢复单个丢包, 纠删能力低而冗余度较大。RS 码纠删性能最好, 但编解码计算涉及矩阵的求逆问题, 复杂度高, 编解码时间随校验矩阵的维数增加呈指数增长。Tornado 码的纠删效率接近 RS 码又具有线性编码时间, 但编解码需要构造一个稀疏的校验矩阵, 即每个纠删组需要大量数据分组参与校验运算^[2]。线性分组码采用“异或”运算完成编码和解码, 具有线性的编码和解码时间, 用于纠删时运算简单快速。当线性分组码采用系统码的形式时, 可以直接从校验矩阵获得编解码关系。

H.264 视频数据的 RTP 打包协议 RFC2733^[3] 规定了用于前向纠错(FEC)的 RTP 载荷的格式, 提出了使用 [7,4,3] 汉明码

的纠删方案。[7,4,3]汉明码^[4]可以恢复两个分组丢失以及连续3个分组丢失,冗余度为42.9%。它的校验分组为 $f(a,b,c)$, $f(a,c,d)$ 和 $f(a,b,d)$ 。其中 a, b, c, d 为数据分组, $f(x_1,x_2,\dots) = x_1 \oplus x_2 \oplus \dots$, “ \oplus ”为“异或”运算。

3 新的纠删编码

数据分组和校验分组之间的关系可以用编码采用的校验矩阵来描述。校验矩阵的元素为0或1,如果位于第 m 行, n 列交叉处的元素为1,则表示第 m 个校验分组和第 n 个数据分组相关(即数据分组作为函数 f)的参数参与了校验分组的生成),如果该元素为0,则表示无关。

本文提出了一种新的 $[2m-1,m,3]$ 线性纠删码编码方案,其系统码形式的校验矩阵的构造过程如图1所示:

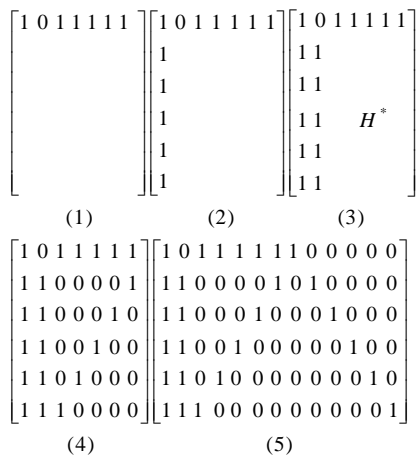


图1 $[2m-1,m,3]$ 校验矩阵生成步骤

Fig.1 $[2m-1,m,3]$ check matrix generating process

- (1)第1行共 m 个元素: $C1 = \{1, 0, 1, \dots, 1, 1\}$;
- (2)第1列 $m-1$ 个元素: $D1 = \{1, 1, 1, \dots, 1, 1\}^T$;
- (3)第2列元素为 $D2 = \{0, 1, 1, \dots, 1, 1\}^T$;

(4)以元素(2, 3)为左上顶点, $(m-1, m)$ 为右下顶点的子矩阵 H^* , 维数是 $(m-2) \times (m-2)$ 。使 H^* 的反对角线为1, H^* 其余元素均为0; 矩阵右侧添加单位阵 $I_{(m-1, m-1)}$ 。

$[2m-1,m,3]$ 线性分组码最小汉明距离为3,可以纠两个删除错误。[7,4,3]汉明码是本文提出 $m=4$ 时的一个特例。当 $m>5$ 时,纠正两个以上删除的性能有所增加,但相对汉明码改善并不明显,其编码冗余度随 m 增大趋近于50%。本文采用了 $m=5$ 的 $[9,5,3]$ 码,有5个数据节点和4个校验节点。每个节点的长度可以是一个比特也可以是一个字节,在本文中,每个节点是一个视频数据的RTP分组。与[7,4,3]汉明码相比, $[9,5,3]$ 码校验信息的开销只增加了1.5%,但纠错性能却有显著的提高。

设数据节点分别为 a, b, c, d 和 e , 校验节点为 $f1, f2, f3$ 和 $f4$, 编码方法为 $f1=f(a,c,d,e)=a \oplus c \oplus d \oplus e$; $f2=f(a,b,e)=a \oplus b \oplus e$; $f3=f(a,b,d)=a \oplus b \oplus d$; $f4=f(a,b,c)=a \oplus b \oplus c$, 其校验矩阵如图2

所示。编码完成后,将数据节点和校验节点一同发送。

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

图2 $[9,5,3]$ 码的校验矩阵

Fig.2 Check matrix of $[9,5,3]$ code

当有部分节点在传输过程中丢失时,可根据图2给出的校验矩阵,以及“异或”运算的性质,恢复丢失的节点。例如,若节点 a 和 c 丢失,可根据以下关系恢复: $a=f2 \oplus b \oplus e$, $c=a \oplus b \oplus f4 = f2 \oplus f4 \oplus e$ 。

假设分组在信道(网络)传输过程中,丢包为随机独立事件,信道丢包率为 p_c ,每个纠删组有 n 个节点,丢失 m 个节点的组合有 $\binom{n}{m}$ 个,其概率为

$$p(m|n) = \binom{n}{m} p_c^m \cdot (1 - p_c)^{n-m} \quad (1)$$

在所有 m 个节点丢失的组合中,含有节点 i 的组合数为 $\binom{n-1}{m-1}$,因此丢失 m 个节点时,节点 i 丢失的概率为

$$p_m^i = \left\{ \frac{\binom{n-1}{m-1}}{\binom{n}{m}} \mid m=1, 2, \dots, n \right\} = m/n \quad (2)$$

在同时丢失 m 个节点的情况下,其中节点 i 可以被恢复的概率 $P_r(i|m)$ 可通过统计解码计算结果得到,如表1所示。

表1 丢失个数为 m 时,节点 i 的恢复概率

Tab.1 The recover probability $P_r(i|m)$ of node i when the number of lost nodes are m

丢失节点数 m	1	2	3	4	5	6	7
节点0	1.00	1.00	0.96	0.77	0.23	0.05	0.00
节点1	1.00	1.00	0.96	0.75	0.26	0.05	0.00
节点2	1.00	1.00	0.96	0.75	0.26	0.05	0.00
节点3	1.00	1.00	0.96	0.75	0.26	0.05	0.00
节点4	1.00	1.00	0.96	0.75	0.26	0.05	0.00
节点5	1.00	1.00	0.86	0.57	0.06	0.00	0.00
节点6	1.00	1.00	0.96	0.77	0.23	0.05	0.00
节点7	1.00	1.00	0.96	0.77	0.23	0.05	0.00
节点8	1.00	1.00	0.96	0.77	0.23	0.05	0.00

节点 i 无法被恢复的概率 $P_{ur}(i)$ 为

$$P_{ur}(i) = \sum_{m=1}^n p_m^i \cdot p(m|n) \cdot (1 - P_r(i|m)) \quad (3)$$

$$= \sum_{m=1}^n \frac{m}{n} \cdot \binom{n}{m} p_c^m \cdot (1 - p_c)^{n-m} \cdot (1 - P_r(i|m)) \quad (4)$$

用 $[9,5,3]$ 码的校验关系对所有可能的丢失节点进行恢复,并统计恢复的结果,得到丢失 m 个节点被全部恢复的概率 $P_r(m)$,如表2所示。

表 2 m 个丢失节点可以全部恢复的概率 $P_r(m)(\%)$

Tab.2 The probability $P_r(m)$ of all the m lost nodes can be recovered (%)

丢失节点数 m	1	2	3	4	5
[7,4,3]汉明码	100	100	80	0	0
[9,5,3]码	100	100	95.24	69.05	0

由表 2 可知 [7,4,3] 汉明码无法恢复同时丢失的 4 个节点。而 [9,5,3] 码可以恢复其中的 69.05%。

最终的纠删能力可用丢失节点无法恢复的概率的平均值 P_{dxc} 表示：

$$P_{dxc} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} P_{ur}(i) \quad (5)$$

其中 d 表示数据节点个数， c 表示校验节点个数， $n=d+c$ 。将表 1 给出的 $P_r(im)$ 代入式(4)，式(5)，可得到经过纠删码保护后的分组丢失率，如表 3 所示。

根据表 3，丢包率经过纠删码保护后均下降到小于 3% 的水平。可以预测丢包率高达 20% 的条件下，经过 [7,4,3] 汉明码或 [9,5,3] 码保护的图像恢复质量应当优于 [7,4,3] 汉明码。

表 3 理论纠删性能 P_{dxc} 对比

Tab.3 Comparison of theoretical erasure correcting capability P_{dxc}

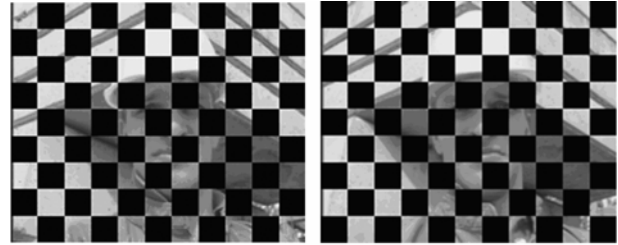
纠删前分组丢失率	3%	5%	10%	20%
$P_{4 \times 3}$ ([7,4,3]汉明码)	8.43E-05	3.99E-04	3.30E-03	2.68E-02
$P_{5 \times 4}$ ([9,5,3]码)	4.16E-05	2.09E-04	1.98E-03	1.96E-02
纠删能力比 ($P_{5 \times 4} / P_{4 \times 3}$)	2.0	1.9	1.7	1.4

4 新的 H.264 视频数据打包发送和错误掩盖方案

根据编码理论，最小汉明距离为 3 的 [9,5,3] 码，纠正删除的个数为 2。当突发错误的长度为 4，即有连续 4 个节点丢失时，不能保证所有节点都可以恢复。例如，按照以下顺序发送分组： $a-b-c-d-e-f(a,c,d,e)-f(a,b,e)-f(a,b,d)-f(a,b,c)$ ，当 $e, f(a,c,d,e), f(a,b,e), f(a,b,d)$ 这 4 个分组丢失时，数据分组 e 无法被恢复。表 2 指出，在所有丢失数为 4 的组合中，[9,5,3] 码可以恢复其中的 69%。本文根据这一特性，通过调整分组的发送顺序，可以保证连续 4 个丢失分组被恢复。并且，当正确接收到前 5 个分组时，图像数据就可以正确解码。

当丢失分组无法恢复时，需要在解码端对视频图像进行错误掩盖，以减少分组丢失对图像恢复质量的影响。错误掩盖的方法有直流信息掩盖，时间域数据掩盖，空间相邻信息掩盖等。以往的视频压缩标准如 H.261, H.263, MPEG2，按照光栅扫描顺序将图像以 GOB 或 Slice 划分，通常只能为丢失数据提供垂直方向的相关信息。H.264 的新抗误码工具——灵活的宏块次序(Flexible Macroblock Order, FMO)，可将一帧视频图像的所有宏块以任意的次序排列并置于不同的 Slice 组中，可以为丢失宏块提供更加丰富的水平方向的

相关信息，以实现更加高效的错误掩盖。本文按照棋盘模式(Checker-board fashion)将一帧图像分为两个 Slice 组，如图 3 所示。每个 Slice 组打包为一个数据分组。当某个 Slice 组无法被恢复时，不但可以用上一帧相同位置的 Slice 做时间域掩盖而且还可以用当前帧正确接收到的宏块做空间域掩盖。



(a) Slicegroup0 (b) Slicegroup1

图 3 FMO 的棋盘模式

Fig.3 FMO checker-boardfashion

本文的抗分组丢失方案如下：

- (1) 将视频数据按 FMO 棋盘模式编码，每一帧图像由两个 Slice 组构成，每个 Slice 组作为一个数据分组(数据节点)。
- (2) 按本文提出的 [9,5,3] 码以比特为单位，将 5 个数据分组异或运算生成 4 个校验分组。
- (3) 将数据分组和校验分组以下列顺序在 IP 网络上传送： $a-b-f(a,b,c)-f(a,b,d)-f(a,c,d,e)-e-c-d-f(a,b,e)$
- (4) 接收端根据收到的数据分组和校验分组，恢复丢失的数据分组。
- (5) 对无法恢复的数据分组，用前一帧相同位置的 Slice 组做错误掩盖。

5 实验结果

实验编解码器采用 TML 发布软件 JM.76, JVT(Joint Video Team)通用测试条件^[5]，测试序列为 QCIF 格式的 foreman 序列和 CIF 格式的 paris 序列。网络的丢包状况由丢包模式文件^[6]给出。通过循环播放方法使测试序列长度为 4000 帧。编码模式为 FMO 棋盘模式。每 100 帧插入一个 IDR 帧，以保证图像恢复质量。

实验对比了不同纠删码方案对视频图像恢复质量的影响。分别为：本文提出的 [9,5,3] 码、无纠删保护、[7,4,3] 汉明码以及相同校验冗余度的 RS 码。在信道丢包率分别为 0%，3%，5%，10% 和 20% 时，4000 帧图像亮度分量峰值信噪比 (PSNR) 均值如图 4 所示。

当丢包率大于 3% 时，无纠删保护的亮度 PSNR 为 27.6dB，主观图像恢复质量已无法接受，该结果与 Wenger^[7] 给出的结论一致。采用纠删码保护后，图像的恢复质量得到显著改善，采用 RS 码，[7,4,3] 汉明码和本文提出的 [9,5,3] 码的亮度 PSNR 均高于 31dB，主观恢复质量可以接受，与本文的性能分析相符。[9,5,3] 码比 [7,4,3] 汉明码的 PSNR 提高了 0.3~0.7dB。当丢包率小于 10% 时，[9,5,3] 码的 PSNR 比 RS 码提高 0.3dB，丢包率大于 10% 时，[9,5,3] 码的 PSNR 小于 RS 码。

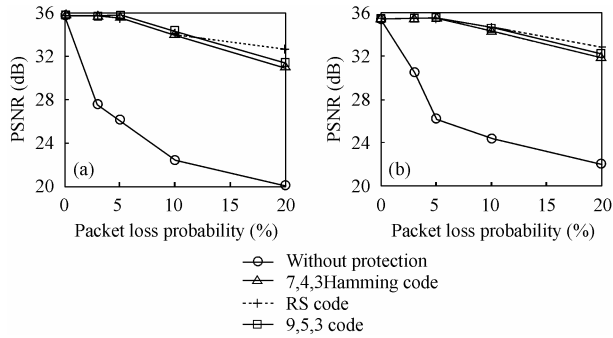


图4 不同纠错码的亮度 PSNR 对比
(a)QCIF 序列 Foreman (b)CIF 序列 Paris

Fig.4 Luminance PSNR comparison between different erasure correcting codes

(a)QCIF sequences foreman (b)CIF sequences paris

6 结束语

本文提出一套新的基于 IP 网络的视频通信抗分组丢失方案。其中的纠错码具有系统码的构造结构，同时又具编解码算法简单、编解码时间只随数据长度线性增加的优点。与常用的[7,4,3]汉明码相比，在冗余度增加 1.5% 的情况下，丢包率为 20% 时，恢复丢包性能提高 40% 以上，图像平均恢复质量提高 0.3~0.7dB；传输分组时，将数据分组和校验分组按本文规定顺序通过 IP 网络传输，提高了恢复连续丢分组的能力；对无法恢复的分组，紧密结合新一代的视频编码标准 H.264 提供的抗误码工具——FMO，对无法恢复的图像信息进行错误掩盖。采用本文提出的方案，IP 网络多媒体通信

的视频图像恢复质量有明显的提高。

参考文献

- [1] ITU-T, H.264: Advanced video coding for generic audiovisual services, May, 2003.
- [2] 慕建军, 路成业, 王新梅. 关于纠错码的研究与进展. 电子与信息学报, 2002, 24(9): 1276-1280.
- [3] RFC2733—An RTP payload format for generic forward error correction, December, 1999.
- [4] 王新梅, 肖国镇. 纠错码——原理与方法(修订版), 西安: 西安电子科技大学出版社, 2001: 第 3 章
- [5] Wenger S. Common conditions for wire-line, low delay IP/UDP/RTP packet loss resilient testing. ftp://ftp.imtc-files.org/jvt-experts/0109_San/VCEG-N79r1.doc, 2001.
- [6] VCEG. Internet error patterns VCEG-O38r1. doc. ftp://ftp.imtc-files.org/jvt-experts/9910_Red/Q15-I16r1.zip, 1999.
- [7] Wenger S. H.264/AVC over IP. *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology*, 2003, 13(7): 645-656.

艾 达: 男, 1973 年生, 博士生, 研究方向为多媒体通信抗误码。

常义林: 男, 1944 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为多媒体通信/网络管理。

罗 忠: 男, 1970 年生, 副教授, 国际多媒体通信标准专家, 从事通信和网络技术研究。