

基于 FEC 的改善 RTP 传输丢包

王豪, 魏世民

(北京邮电大学自动化学院, 北京 100876)

摘要: 随着计算机网络技术和多媒体技术的发展, 实时多媒体传输将变得越来越重要。由于当前网络带宽、多媒体数据压缩技术等限制, 远程学习、音视频会议系统、远程医疗诊断等还有很大的优化空间。在本文中, 提出了使用前向纠错 (FEC) 和服务质量 (Qos) 来改进实时视频传输中的丢包情况。一方面, 该方案使用改进的 Vandermonde 矩阵来避免由经典 Vandermonde 矩阵构建的纠错码可能不是 RS 码的问题。另一方面, 本文在接收端设计了一个 Qos 数据包乱序和重复的问题。实验表明, 所提出方案的丢包率和传输效率要优于传统方案。

关键词: 多媒体通信; 实时传输; 前向纠错技术; Qos; 丢包率

中图分类号: TN919.8

Packet Loss Recovery for RTP transmission Based on FEC

WANG Hao, WEI Shimin

(Automation School, Beijing University of Post and Telecommunications, Beijing 100876)

Abstract: With the development of computer network technology and multimedia technology, real-time multimedia transmission will become increasingly important. Due to the current network bandwidth, multimedia data compression technology, and other restrictions, such as distance learning, audio and video conferencing systems, remote medical diagnosis is now basically have not been fully realized. In this paper, a scheme using Forward error correction (FEC) and Quality of Service (Qos) is proposed to improving the Packet Loss in real-time video transmission. On one hand, the scheme uses improved Vandermonde Matrices to avoid the issue that the erasure codes built by classical Vandermonde Matrices may not be RS codes. On other hand, this paper design a Qos in receiving end to solve problems of disordered packets and repeated packets. The simulations indicate that the packet loss ratio and transmission efficiency of the proposed scheme are superior to conventional method.

Key words: multimedia communication; real-time transmission; forward error correction; Qos; packet loss ratio

0 引言

随着计算机网络技术和多媒体技术的发展, 实时视频传输也越来越受到关注。因特网上的实时视频传输的传输层方案通常基于实时传输协议 (RTP) [1,2]。但是提高实时性也意味着无法保证数据完成性, 以及数据包可能出现乱序或重复的问题, 这都会影响实时视频效果。通常有两种传统方式来恢复数据包: 前向纠错技术 (FEC) [3,4] 和自动重复请求 (ARQ) [5]。FEC 编码算法包括 BCH 码, Reed-Solomon (RS) 码, Turbo 码和低密度奇偶校验码 (LDPC) 等 [6]。

本文设计了一个实时视频系统, 如图 1 所示。视频编解码器采用 FFMPEG 技术, 在实际测试过程中, 发现在无线信道中丢包率较高, 影响接收端的视频效果 [7]。因此, 本文采用

基于改进的 Vandermonde 矩阵构造 RS 码来恢复丢包。发送端采用 FEC 编码生成冗余包, 接收端 FEC 解码恢复丢失包。此外, 它采用 Qos 模块, 以确保在 FEC 解码之前数据包的序

作者简介: 王豪(1992-), 男, 硕士研究生, 控制科学与工程

通信联系人: 魏世民(1965-), 男, 教授, 机器人机构运动学分析与综合. E-mail: wsmly@bupt.edu.cn

45 列号是正确的。

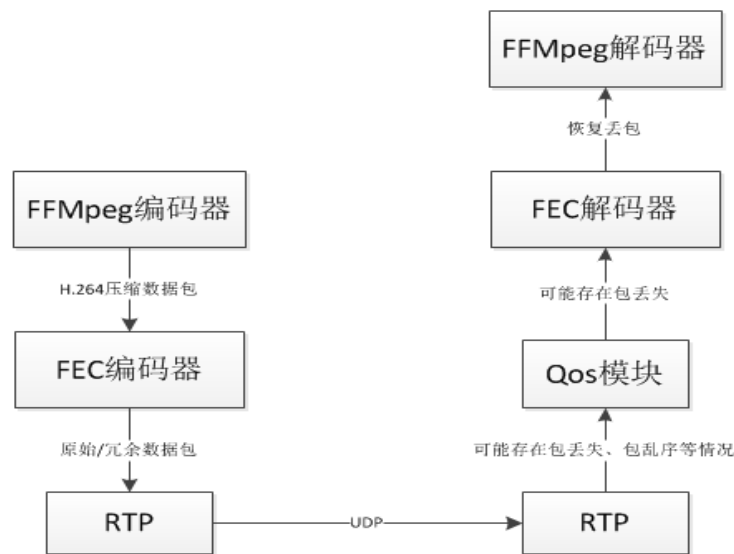


图1 丢包恢复方案流程图

Fig.1 Process of packet loss recovery scheme

1 前向纠错 (FEC) 模块

1.1 前向纠错 FEC 基本原理

FEC 的基本工作原理：首先将 k 个原始数据包通过 FEC 编码生成 m 个冗余数据包，这 m 个冗余数据包与 k 个原始数据包一起组成一个包含 $n = k + m$ 个数据包的传输组 TG。数据包在 TG 中的相对位置通过序列号标识。由于包交换网络服务的不可靠性，TG 中的一些数据包在传输过程中可能被丢失。由于冗余性的存在，一个 TG 中的任意 k 个数据包可以重建出 k 个原始数据包。如果丢失数据包小于或等于 m ，接收者收到一个 TG 中的任意 k 个数据包后，即可通过序列号确定丢失数据的包的相对位置，然后进行 FEC 解码，恢复 k 个原始数据包。

1.2 传统的基于 Vandermonde 矩阵的 RS 算法

设 k 个原始数据包 $D = (D_1, D_2, \dots, D_k)$ ， r 个冗余数据包 $C = (C_1, C_2, \dots, C_r)$ ，那么传输组 Group 表示为 $Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_n)$ ，其中 $Y_i = D_i$ ($1 \leq i \leq k$)， $Y_j = C_j$ ($k+1 \leq j \leq n$)。B 为 $n \times k$ 维 FEC 生成矩阵，由单位矩阵 I 和矩阵 G 组成，则一个 Group 可表示为如下所示：

$$\vec{Y} = B\vec{D} = \begin{bmatrix} I \\ G \end{bmatrix} \vec{D} \quad (1-1)$$

在接收端，如果接收到了 Group 中的任意 k 个数据包，即可根据所收到的数据包在 Group 中的位置信息，从 FEC 生成矩阵 B 中提取对应的行，组成一个新的 $k \times k$ 维矩阵 B'，显然

$$\vec{Y} = B'\vec{D} \quad (1-2)$$

如果 B' 为非奇异矩阵，那么就可以通过如下逆变换得到原始数据包，完成恢复

$$\vec{D} = (B)^{-1} \vec{Y} \quad (1-3)$$

设计 RS 码的关键就在于如何设计生成矩阵 B ，也就是其系数矩阵 G 。本论文采用 Vandermonde 矩阵来构建系数矩阵 G 。常规定义 Vandermonde 矩阵 V ， $r \times k$ 维，如下所示：

$$V = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \\ 1 & 2 & 2^2 & \cdots & 2^{k-1} \\ 1 & 3 & 3^2 & \cdots & 3^{k-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & r & r^2 & \cdots & r^{k-1} \end{bmatrix} \quad (1-4)$$

系数矩阵 $G=V$ ，该矩阵元素的运算都是在有限域 $GF(2^8)$ [8] 中进行的。根据论文 [9] 中的公式可以得到：

$$C_i = \sum_{j=1}^k g_{i,j} \otimes D_j \quad (i = 1, \dots, r) \quad (1-5)$$

其中， $g_{i,j}$ ($i = 0, \dots, m-1; j = 0, \dots, k-1$) 为系数矩阵 G 的元素， C_i 表示第 i 个冗余数据包， D_j 表示第 j 个原始数据包。如果在发送端使用 $k = 8, m = 2$ 的冗余度，那么系数矩阵即为：

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 4 & 8 \end{bmatrix} \quad (1-6)$$

根据公式 1-5 可以得到两个冗余包，

$$C_1 = D_1 \oplus D_2 \oplus D_3 \oplus D_4 \quad (1-7)$$

$$C_2 = D_1 \oplus 2D_2 \oplus 4D_3 \oplus 8D_4 \quad (1-8)$$

如果在传输过程中数据包 D_2, D_7 丢失，那么接收端可以通过收到的包恢复丢失的数据包。具体过程如下：

由接收到的数据包再次生成冗余包，得到：

$$R_1 = D_2 \oplus D_4 \quad (1-9)$$

$$R_2 = 2D_2 \oplus 8D_4 \quad (1-10)$$

将 R_1, R_2 与发送端发送的冗余包 C_1, C_2 进行比较，就能得到丢失数据包的表达式，如下：

$$L_1 = C_1 - R_1 = D_2 \oplus D_3 \quad (1-11)$$

$$L_2 = C_2 - R_2 = D_1 \oplus 4D_3 \quad (1-12)$$

这样就能得到矩阵 $A = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 4 \end{bmatrix}$ ，利用高斯消除法可以求出该矩阵的逆矩阵，从而求出

D_1, D_3 ，但前提是矩阵 A 是非奇异的，高斯消除法求逆矩阵的运算遵循有限域的运算规则。

1.3 优化的基于 Vandermonde 矩阵的 RS 算法

传统的 Vandermonde 矩阵构造 RS 码时需要使用非奇异矩阵，然而，使用传统的

Vandermonde 矩阵，由于该矩阵的元素都取值于有限域，而且元素的运算遵循有限域的运算规则，就会出现矩阵奇异的情况。文献^[10]中指出，在实际应用中，在发送端指定发送模式的情况下出现以上情况的概率可以高达 0.5%。本节参考文献^[11]中的构建方法，使用两个 Vandermonde 矩阵构建 RS 码。

100 定理 1: 设 $V(a_1, \dots, a_r)$ 表示 Vandermonde 矩阵 $(a_i^{j-1})_{i,j=1}^r$ ，在有限域 $(F_q)^r$ 中，向量 $V(a_1, a_2, \dots, a_r)$ 和 $V(b_1, b_2, \dots, b_r)$ ，如果 a_i 和 b_j 是 $2r$ 个互不相同的元素，那么矩阵 $V(a_1, \dots, a_r)^{-1} \times V(b_1, \dots, b_r)$ 的任意阶子方阵都是非奇异的。

定理 2: 设 $V(a_1, \dots, a_k)$ 为非奇异的 $k \times k$ 维范德蒙矩阵，且 $V(b_1, \dots, b_k)$ 是一个 $k \times (n - k)$ 维矩阵 $(b_i^{j-1})_{i=1, \dots, n-k}^{j=1, \dots, k}$ 。那么，当且仅当 a_i, b_j 是 n 个互不相同的元素

105 时，由生成矩阵定义的码 $G = [I_k | V(a_1, \dots, a_k) \times V(b_1, \dots, b_k)]$ 一定是 MDS 码。

根据以上两条定理可得，如果发送端采用 $k = 8, r = 2$ 的发送模式（8 个数据包 + 2 个冗余包），那么就需要 $V(a_1, a_2, \dots, a_6)$ 以及 $V(b_1, b_2)$ ，共 $(8 + 2) \times 8$ 维的矩阵，如式 1-13 所示：

$$V = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 4 & 8 & 16 & 32 \\ 1 & 3 & 5 & 15 & 17 & 51 \\ 1 & 4 & 16 & 64 & 29 & 116 \\ 1 & 5 & 17 & 85 & 28 & 108 \\ 1 & 6 & 20 & 120 & 13 & 46 \\ 1 & 7 & 21 & 109 & 12 & 36 \\ 1 & 8 & 64 & 58 & 205 & 38 \end{bmatrix} \quad (1-13)$$

110 上面矩阵前 6 行构造矩阵 $V(a_1, a_2, \dots, a_6)$ ，后 2 行构造矩阵 $V(b_1, b_2)$ ，通过使用 2 个 Vandermonde 矩阵构建 RS 码的方法能有效避免出现非奇异矩阵的情况。

2 Qos 模块

在本文中，Qos 特指用来解决通过 RTP 传输到接收端时出现的数据包乱序问题和重复问题，特别是在无线信道中。Qos 模块通过 RTP 传输接收的标序了的数据包，对接收的数据包进行局部缓存和排序，同时去除接收的重复包以及超时包，经过 Qos 处理后的数据包按序号从小到大输出给后面的 FEC 解码模块，后者进行丢包的恢复，二者相互配合。Qos 采用环形数据作为数据结构，为了实现上述功能采用了“条件插入”和“验收输出”。前者负责将输入 Qos 模块的数据包按照包序号排好或对重复包做丢弃处理，后者是外部触发的并对队列进行扫描并输出满足条件的包。条件插入的流程如图 2 所示，延时输出的流程如图 3 所示。

115

120

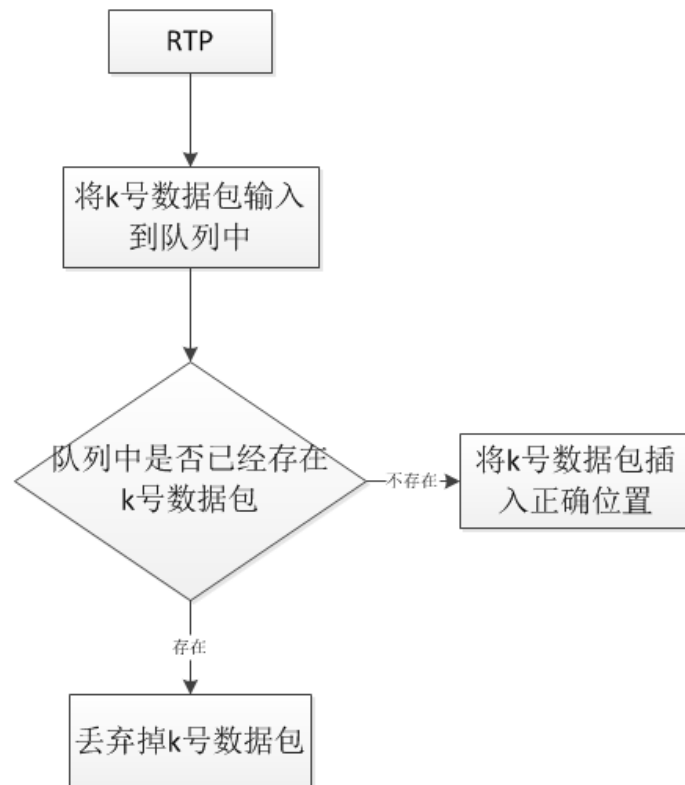


图2 条件插入流程

Fig. 2 Process of Conditional Insert

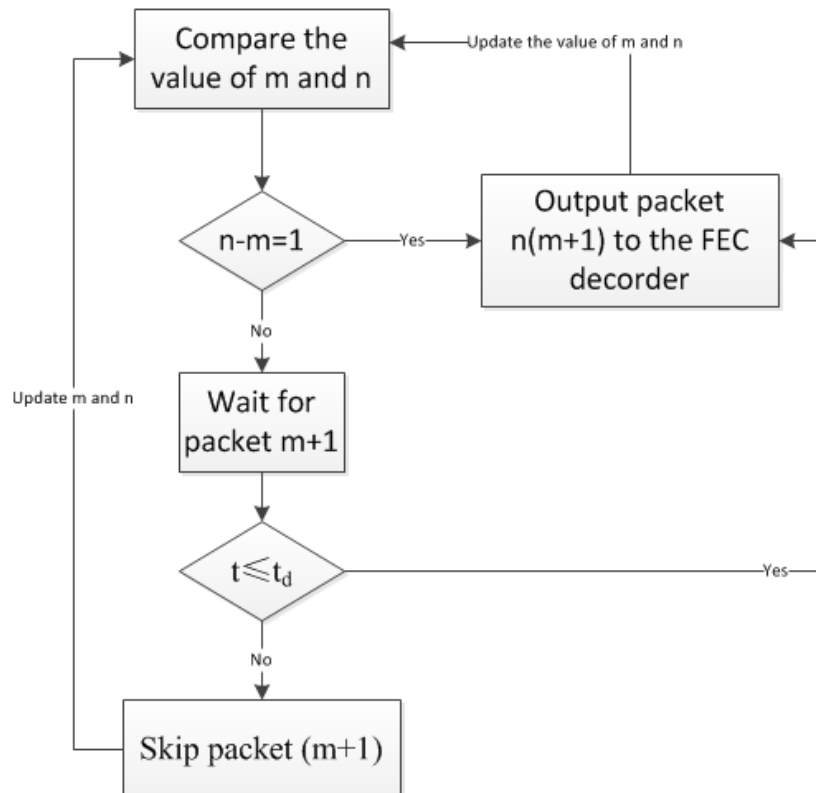


图3 延时输出流程

Fig. 3 Process of Delayed Output

图 3 中, m 表示最新的已经输出到 FEC 解码器的数据包序列号, n 表示下一个将会被
130 输出到 FEC 解码器的数据包序列号。需要注意的 m 的值会在有一个数据包从队列中输出后
或超过等待时间后自动加 1, 而 n 的值则是下一个将要被输出的数据包的序列号, 图中提到的
更新 m 和 n 的值即二者自动加 1。另外, t 表示 $(m+1)$ 号数据包进入队列的时间, t_d 表
示设定的等待时间。

3 实验结果

135 本部分主要展示在采用改进型 RS 码和 Qos 降低网络丢包率的仿真结果。在发送端和接
收端之间采用了 Gilbert 模型, 因此我们可以仿真出在不同丢包率情况下, 采用了本论文方
案后丢包率的改变。本论文的仿真主要考虑了 5%~40% 这个区间的丢包率, 传统 RS 算法和
改善型 RS 算法 (即图中的 NRS) 的发送模式均设为 $RS(10, 2)$, 即 FEC 冗余度为 20%。首
先, 我们通过比较由两个 RS 算法之间的奇异矩阵导致的丢包率, 以验证是否改进了奇异矩
140 阵的问题。如图 4 所示, 采用传统 RS 算法因奇异矩阵导致的丢包率均不为 0, 而采用改善
型 RS 算法因奇异矩阵导致的丢包率均为 0, 这就说明了改善型 RS 算法彻底的解决了奇异
矩阵的问题。

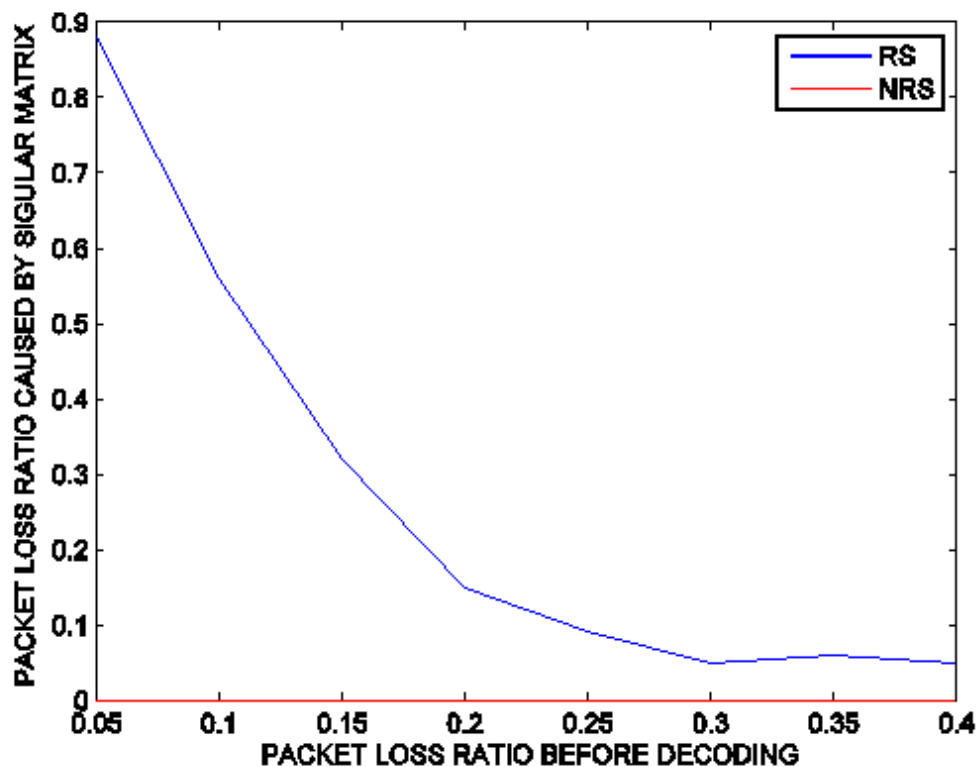
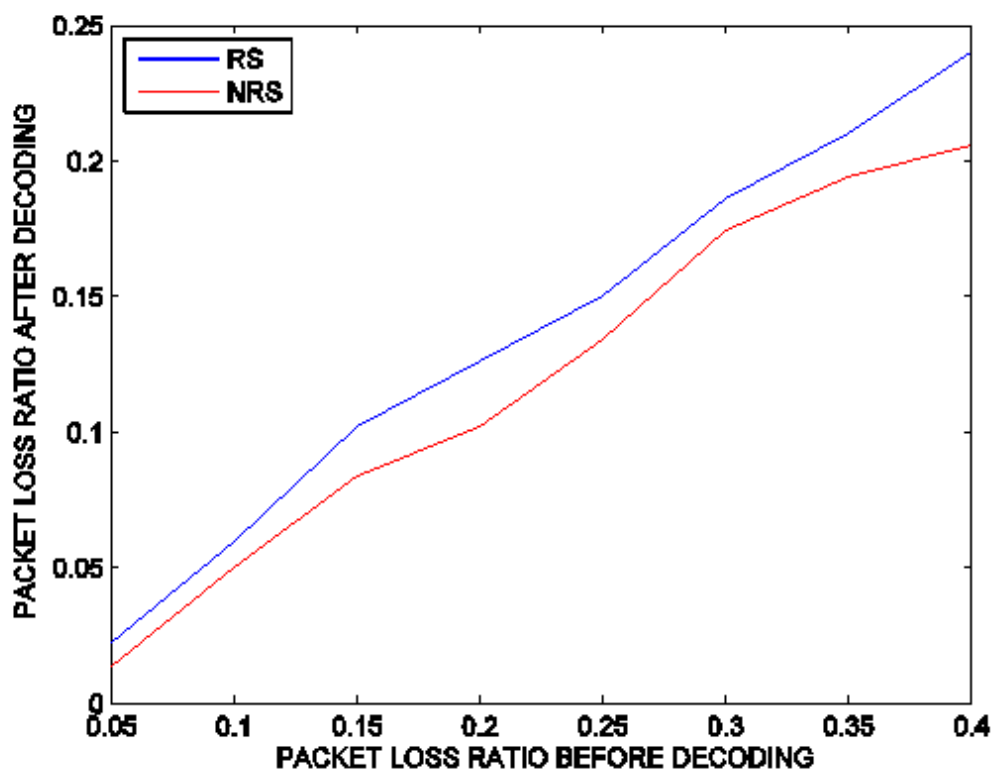


图 4 RS 算法和 NRS 算法奇异矩阵导致的丢包率

Fig. 4 Packet loss ratio of RS and NRS caused by singular matrix

145 仿真中加入了 Qos 模块, 并且设定延时等待时间为 100ms。如图 5 所示, 在不同的丢包
环境中, 基于 NRS 算法的丢包率恢复效率高于传统 RS 算法, 然而, 如果能以较小延时的
代价实现如此明显的丢包恢复是值得的。



150

图5 RS算法和NRS/Qos算法的丢包率

Fig. 5 Packet loss ratio of RS and NRS/Qos

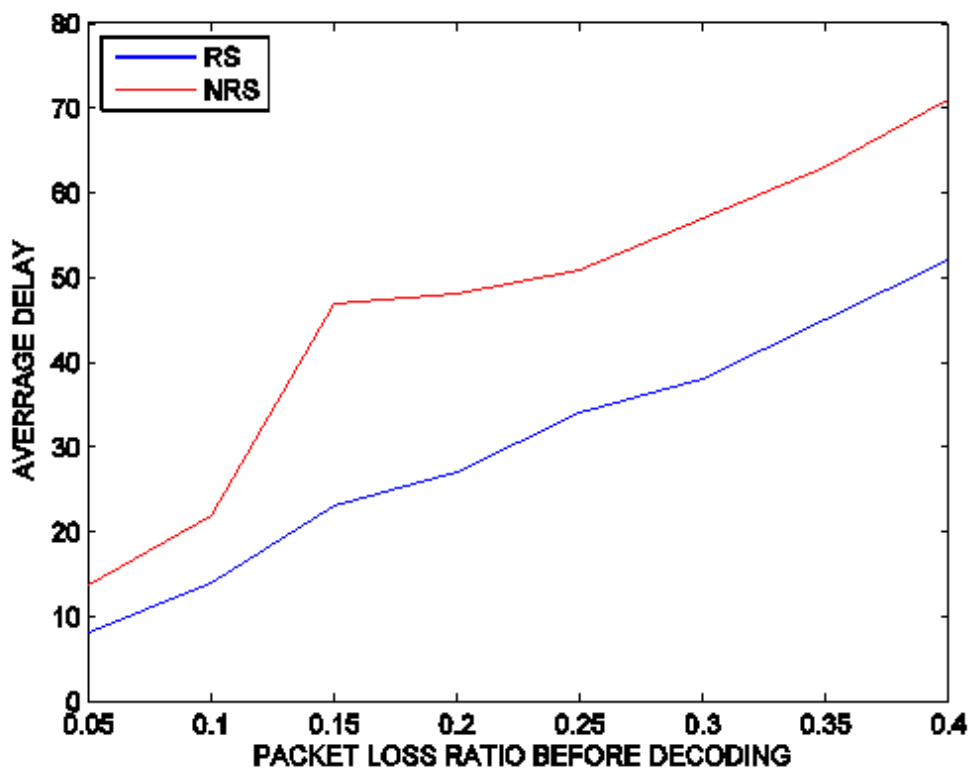


图6 RS算法和NRS/Qos算法的平均延时

Fig. 6 Average delay of RS and NRS/Qos

4 结论

本文提出了一种基于 FEC 的丢包恢复方案来改善 RTP 传输中的丢包率。采用了基于两个 Vandermonde 矩阵改善型 RS 算法,彻底解决了传统的基于 Vandermonde 矩阵的 RS 在 Vandermonde 矩阵的子方阵奇异的情况,无法正常恢复原始数据包的情况。此外,还采用了 Qos 来保证 FEC 解码前的数据包顺序是正确的。如图 4 和图 5,本方案能有效地改善丢包率并且确保由两个 Vandermonde 矩阵构建的 RS 码一定是 MDS 码。

[参考文献] (References)

- [1] Dae Won Kim et al. Internet Protocol Engine in TCP/IP Offloading Engine[C]. International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT),2008.Vol1,pp:270-275.
- [2] In-Su Yoon, Sang-Hwa Chung, Jeong-Soo Kim. Implementation of Lightweight TCP/IP for Small, Wireless Embedded System[C]. International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA),2009.965-970.
- [3] Yoong Chang, Sze Lee, Komyia, R. A fast forward error correction allocation algorithm for unequal error protection of video transmission over wireless channels[C].IEEE Transactions on Consumer Electronics(TCE) ,2008.Vol 54,Issue 3,pp:1066-1073.
- [4] Yuming Lu, Brodersen, R. Implementation architecture of a ariableforward error correction decoder[C], Global Telecommunications Conference (GLOCOM),1998.Vol 5,pp:2840-2847.
- [5] Huahui Wu, Mark Claypool, Robert Kinicki. Adjusting Forward Error Correction with Quality Scaling for Streaming MPEG[J].In Proceedings of the international workshop,2005,30(2):43-44.
- [6] Rowitch D N, Milstein L B. On the performance of hybrid FEC/ARQ systems using rate compatible punctured turbo (RCPT) codes[J]. Communications IEEE Transactions on, 2010, 48(6):948-959.
- [7] Z Fu,P Zeros,H Luo,S Lu and L Zhang. The impact of multihop wireless channel on TCP throughput and loss[C]. Joint Conference of the IEEE Computer & Communications IEEE Societies, 2003, 3(3):1744-1753.
- [8] BSK Jr.Finite Field. Encyclopedia of Cryptography & Security[C]. IEEE Computer Society and Association for Computing Machinery,2011,15(3):468.
- [9] J. Fimes, J. Lacan. Estimation of the number of singular squaresubmatrices of Vandermonde matrices defined over a finite field[C]. Tech.Rep. ENSICA, 2003,35(1):38-40.
- [10] Botzko,Stephen.SYSTEM AND METHOD FOR LOST PACKET RECOVERY WITH CONGESTION AVOIDANCE[P].United States Patent Application 201 10096776.12/14/2010.
- [11] Lacan J, Fimes J. Systematic MDS Erasure Codes Based on Vandermonde Matrices[J]. IEEE Communications Letters, 2004, 8(9):570-572.