

文章编号: 2095-4980(2013)02-0309-05

一种基于数字喷泉技术的高效网络传输方法

薛亚辉, 王 剑, 王非非

(中国传媒大学 广播电视数字化教育部工程研究中心, 北京 100024)

摘 要: 针对网络时延和丢包率较大情况下传输控制协议数据传输带宽利用率低下的问题, 提出了一种基于数字喷泉技术的高效网络传输方法。介绍了数字喷泉码的编译码原理, 设计并实现了基于 Raptor 码和用户数据包协议的高效可靠数据传输系统, 给出实际测试结果。实验结果表明, 该方法的传输效率较传统方法有较大幅度的提高。

关键词: 网络传输; 数字喷泉; Raptor 码; 用户数据包协议

中图分类号: TN919.3

文献标识码: A

Efficient method for network transmission based on digital fountain technology

XUE Ya-hui, WANG Jian, WANG Fei-fei

(Digital Engineering Center, Communication University of China, Beijing 100024, China)

Abstract: According to the problem of low efficiency of the network transmission system based on Transmission Control Protocol(TCP) in the case of large time delay and loss rate, this paper proposes an efficient method for network transmission system based on digital fountain. The principle of the digital fountain is described and a new system is designed and implemented on the basis of Raptor codes and User Datagram Protocol(UDP). The results are given and indicate that the transmission efficiency of this new method is greatly improved compared to that of the traditional one.

Key words: network transmission; digital fountain; Raptor codes; User Datagram Protocol

在基于数据包的互联网通信中, 为确保可靠性, 通常采用传输控制协议(TCP)进行数据传输。然而, 随着实时数据传输需求的增加, 人们对数据传输效率的要求越来越高, TCP 日益凸显其不足。TCP 采用基于反馈—确认—重传的可靠传输机制, 由于使用基于滑动窗口的流控制技术, 单次发送数据量受传输窗口的大小限制。未被确认的数据量最大为收发两端之间的数据率与往返时延的乘积。在实际操作中, 发送端会持续估计此乘积, 用于设定滑动窗口大小以控制在收到确认消息之前发送的数据量。Internet 上的所有 TCP 算法都假设丢包是由网络拥塞和往返时延过大造成的超时所引起的^[1]。因此, TCP 可达的吞吐量是与丢包率和往返时延有关的函数。在丢包率或往返时延较大的网络环境下, 误码及丢包将作为拥塞进行处理, 造成数据发送频率频繁减小^[2], 带宽无法得到充分利用。因此, 使用编码技术解决数据高效可靠的传输成为计算机和通信领域研究的热点。数字喷泉技术作为一种兼顾信道纠错和自适应信道状况技术, 在 1998 年由 Michael Luby 等人首次提出。其基本思想是: 编码端将原始的数据分组通过随机编码产生理论上无限长的编码包, 解码端只需接收略大于原始数据分组数目的编码包, 即可以高概率重构原始文件^[3], 且与具体接收到哪些编码包无关。数字喷泉码能够在最大限度地减少反馈信息的情况下更高效完成数据可靠传输。数字喷泉码是一种具有无比比特特性和线性编译码复杂度的新型随机编码方式, 在基于时变信道以及包通信的系统中有接近理想的纠错性能。目前能够实现的有效喷泉码主要有 2 种: LT(Luby Transform)码^[4]和 Raptor 码^[3]。Raptor 码是以 LT 码为核心的多层级联码。对于任意给定的小数 $\epsilon > 0$ (ϵ 为译码开销), 其编码时间复杂度为 $O\left(\log \frac{1}{\epsilon}\right)$, 解码时间复杂度为 $O\left(k \log \frac{1}{\epsilon}\right)$ 。两者均与码长呈线性关系, 优于 LT 码的对数关系, 进而克服了 LT 码译码时空代价不固定等不足, 是目前最先进的喷泉码技术。本文在数字喷泉码的基础上设计并实现了一种高效的网络传输系统, 采用的编码码字为 RFC5053^[5]中的系统 Raptor 码。根据实际应用, 对译码算法进行了相应的优化, 以进一步提高系统效率。最后, 分别对采用 TCP 和采用 Raptor 码与用户

收稿日期: 2012-06-25; 修回日期: 2012-07-27

基金项目: 国家科技支撑计划课题资助项目(2012BAH17B01)

数据包协议(UDP)结合的传输系统测试,得到了性能对比结果。

1 系统 Raptor 码的编译码原理

实际应用中,人们更倾向于采取系统形式的码字。即使信道状况较差,在译码失败的情况下也可以更快地获得部分原始数据。系统 Raptor 码编码方法比非系统码复杂,采用低密度奇偶校验码(Low Density Parity Check Code, LDPC)和 Half 两层外码方案。

编码过程简述如下:首先由 K 个长为 T 字节的源符号 $C'[0], C'[1], \dots, C'[K-1]$ 进行预编码,产生 $L(L>K)$ 个长为 T 字节的中间符号 $C[0], C[1], \dots, C[L-1]$, 然后由中间符号进行 LT 编码产生源符号和修复符号。其中, K 个源符号 $C'[0], C'[1], \dots, C'[K-1]$ 和 L 个中间符号 $C[0], C[1], \dots, C[L-1]$ 之间的 2 种约束关系如下:

1) 第 1 种约束关系是 L 个中间符号和 K 个源符号之间的关系,此关系表达式如下所示:

$$C'[i] = \text{LTEnc}[K, (C[0], C[1], \dots, C[L-1]), (d[i], a[i], b[i])], \quad 0 \leq i < K \quad (1)$$

式(1)表明,源符号 $C'[i]$ 可以通过三元组 $(d[i], a[i], b[i])$ 利用 LT 编码符号发生器(LTEnc)与中间字符相关联。

令 $(\mathbf{G}_{\text{LT}})_{K \times L}$ 表示 GF(2)域上的 LT 编码符号发生器的生成矩阵,此约束关系可表示为:

$$(\mathbf{G}_{\text{LT}})_{K \times L} * [(C[0], C[1], \dots, C[L-1])]^T = [(C'[0], C'[1], \dots, C'[K-1])]^T \quad (2)$$

2) 第 2 种约束关系是 L 个中间符号内部的约束关系。 $L(L=K+S+H)$ 个中间符号包含前 K 个中间符号、 S 个 LDPC 符号和 H 个 Half 符号。其关系包含 S 个 LDPC 符号和前 K 个中间字符,即源符号之间的约束关系以及 H 个 Half 符号和前 $K+S$ 个中间符号的约束关系。令 $(\mathbf{G}_{\text{LDPC}})_{S \times K}$ 和 $(\mathbf{H}_{\text{Half}})_{H \times (S+K)}$ 分别表示 GF(2)域上的 LDPC 符号和 Half 符号的生成矩阵,则此约束关系可表示为:

$$(\mathbf{G}_{\text{LDPC}})_{S \times K} * [(C[0], C[1], \dots, C[K-1])]^T = [(C[K], C[K+1], \dots, C[K+S-1])]^T \quad (3)$$

$$(\mathbf{H}_{\text{Half}})_{H \times (S+K)} * [(C[0], C[1], \dots, C[K+S-1])]^T = [(C[K+S], C[K+S+1], \dots, C[K+S+H-1])]^T \quad (4)$$

根据以上的推导过程,以上约束关系可表示为:

$$\begin{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{Bmatrix}_S \\ \begin{Bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{Bmatrix}_H \\ \begin{Bmatrix} C'[0] \\ C'[1] \\ \vdots \\ C'[K-1] \end{Bmatrix}_K \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} (\mathbf{G}_{\text{LDPC}})_{S \times K} & \mathbf{O}_{S \times S} & \mathbf{O}_{S \times H} \\ (\mathbf{H}_{\text{Half}})_{H \times (S+K)} & \mathbf{O}_{H \times H} \\ (\mathbf{G}_{\text{LT}})_{K \times L} \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}_{L \times L} (L = K + S + H)} \cdot \begin{bmatrix} C[0] \\ C[1] \\ \vdots \\ C[L-1] \end{bmatrix} \quad (5)$$

同理,解码端收到的 $N(N>K)$ 个符号 $D[0], D[1], \dots, D[N-1]$ 和中间符号 $C[0], C[1], \dots, C[L-1]$ 的关系可表示为:

$$\begin{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{Bmatrix}_S \\ \begin{Bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{Bmatrix}_H \\ \begin{Bmatrix} D[0] \\ D[1] \\ \vdots \\ D[N-1] \end{Bmatrix}_N \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} (\mathbf{G}_{\text{LDPC}})_{S \times K} & \mathbf{O}_{S \times S} & \mathbf{O}_{S \times H} \\ (\mathbf{H}_{\text{Half}})_{H \times (S+K)} & \mathbf{O}_{H \times H} \\ (\mathbf{G}_{\text{LT}})_{N \times L} \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}_{M \times L} (M = N + S + H)} \cdot \begin{bmatrix} C[0] \\ C[1] \\ \vdots \\ C[L-1] \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: $(\mathbf{G}_{\text{LDPC}})_{S \times K}$ 为 S 行 K 列用于 LDPC 编码的生成矩阵; $(\mathbf{H}_{\text{Half}})_{H \times (S+K)}$ 为 H 行 $S+K$ 列用于 Half 编码的生成矩阵。两者在编解码端均已知, $(\mathbf{G}_{\text{LT}})_{K \times L}$ 和 $(\mathbf{G}_{\text{LT}})_{N \times L}$ 用源符号和接收符号的序号应用 LT 编码规则即可得到。由式(5)和式(6)可知, 在编解码过程中, 需要先用改进的高斯消元法对矩阵 $\mathbf{A}_{L \times L}$ 和 $\mathbf{A}_{M \times L}$ 求逆获得中间符号, 再由中间符号进行 LT 编码得到编码符号或恢复出源符号。通常情况下, 在接收端收到的任意 K 个编码符号所生成的矩阵不一定满秩, 所以 N 一般大于 K 。

2 基于数字喷泉码的网络传输系统的实现

2.1 系统设计

在上述系统 Raptor 码的编译码原理基础上, 利用系统 Raptor 码对数据进行保护, 实现数据的可靠传输。该系统由 C++ 语言编写, 利用 Winsock 类库, 在 VS2010 的 MFC 平台上开发友好人机界面用于控制数据传输。该系统的发送端主要包括文件分块、单播及组播 UDP、TCP 连接、系统 Raptor 码中间符号生成和 Raptor 编码符号生成及发送。接收端主要包括单播及组播 UDP、TCP 连接、系统 Raptor 码译码和 Raptor 编码符号接收。系统整体流程见图 1。

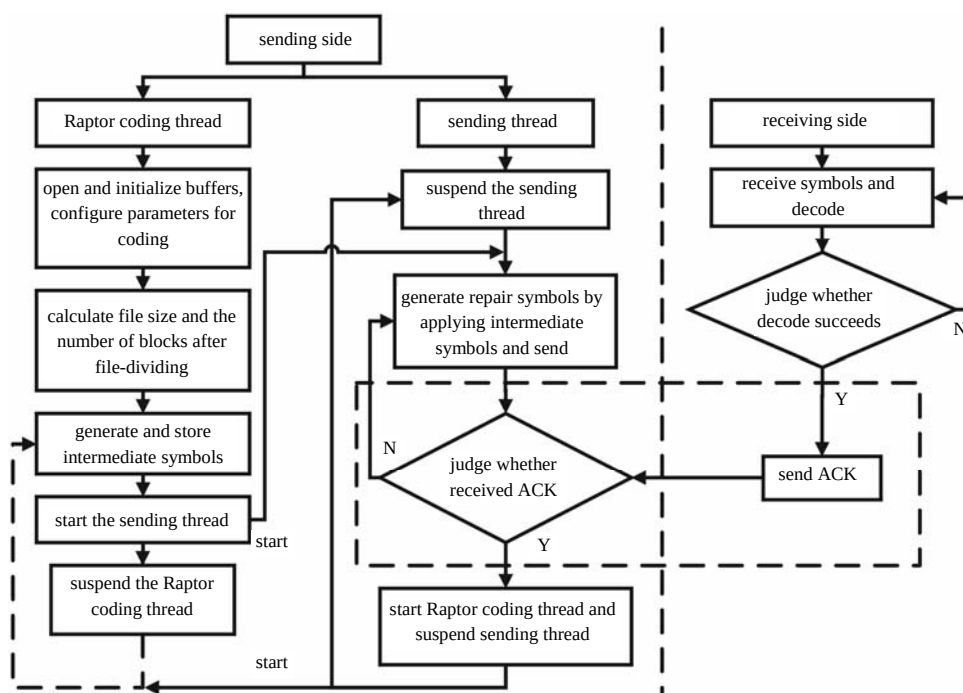


Fig.1 System design flow
图 1 系统设计流程

本系统采用 2 种模式: 有反馈模式和无反馈模式。图 1 的虚线框中部分是可选项。若选择无反馈模式, 发送端和接收端不建立连接, 发送端可以通过对网络环境的估计选择编码倍率, 然后进行编码及发送工作。若选择有反馈模式, 发送端的编码倍率相当于无限大, 在收到来自接收端的确认(ACK)信息之前, 可以持续地发送编码包。当收到 ACK 信息时, 发送下一数据块的编码包。下面分别介绍发送端和接收端的工作流程。

1) 发送端的工作方式

由系统 Raptor 码编码原理可知, 运算量最大的部分是在求中间符号过程中对矩阵求逆的部分。高斯消元法的运算复杂度为 $O(K^2)$, 因此运算量随着 K 的增大而呈指数增加。因此, 为了获得更高的系统吞吐率, 将开启 2 个线程分别用于中间符号的计算和编码符号的生成及发送, 分别为图 1 中的 Raptor 编码线程和发送线程。其次, 在 Raptor 编码线程中, 按照乒乓操作的原理, 开辟 2 块内存用于交替存储不同数据块的中间符号。具体做法见图 2。在发送当前数据块的编码符号时可以同时计算下一数据块的中间符号。如此交替可以将中间符号尽可能没有停顿地送到发送模块, 以此提高系统的数据吞吐量和带宽利用率。

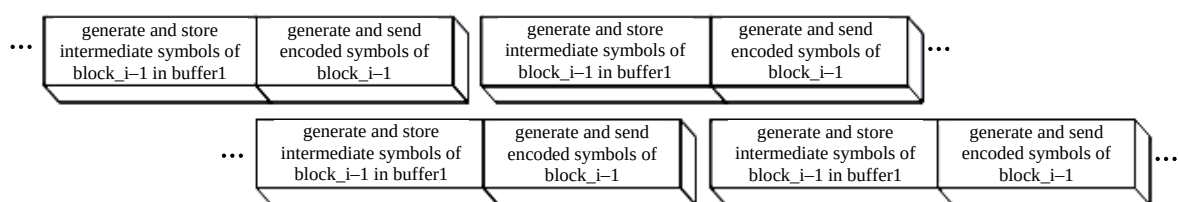


Fig.2 Double buffer for alternately restoring intermediate symbols
图 2 两块内存交替存储中间符号

2) 接收端的工作方式

同样地,接收端为了提高译码吞吐量,开启 2 条线程分别用来接收编码符号和 Raptor 译码。收到数据包的包头信息及其含义见表 1。在译码过程中,当收到符号的文件编号 FILE-ID 或分块编号 ID_B 改变时,表明新的文件或者数据块到来,需要重新进行译码模块的初始化以及内存的开辟。

2.2 算法改进

在一些对实时性要求较高的实际应用中,对系统译码端的时延要求较严格。为了减少译码时间,针对接收端的译码过程进行了 2 点优化:

1) 对矩阵求逆的过程中,需要获知矩阵中每行的权重,并选择权重最小的 1 行进行行变换。通常每进行 1 次行变换就要重新计算所有行的权重。当矩阵较大时这样做耗时、耗资源。优化的具体做法是将每 1 行的权重存储在 1 个数组中,且在矩阵求逆过程中做行变换、列变换、行异或操作时对数组进行实时更新。这样做可以避免每次行变换时重复计算每行权重。

2) 在译码端,根据系统 Raptor 码的译码原理,若源符号发生丢包,则需要获得中间符号,进而求解源符号。当矩阵求逆失败,即矩阵不满秩时,通常做法是再接收 1 个编码包,并对新生成的矩阵重新求逆。以此循环,直到译码成功。以上做法在 K 较小时可取,当 K 较大时,译码的运算量主要集中于矩阵求逆,会引起较大的译码延时。本系统具体做法是:将中间符号和编码符号的序号分别存储于数组 c 和 d 中,令 $c[0]=0, c[1]=1, \dots, c[L-1]=L-1$; $d[0]=0, d[1]=1, \dots, d[M-1]=M-1$ 。在译码过程中,数组 c 和 d 中的序号分别随着列变换和行变换进行实时交换。当收到 1 个编码符号时,只需将其对应的矩阵行中元素根据数组 c 中的序号进行交换。然后将其与之前矩阵求逆过程中生成的单位矩阵所在行进行异或。此做法通过对新生成矩阵行进行预处理,避免了因译码失败而重新求逆的大量重复操作。此外,之前为了避免此类重复计算,通常在接收 $K+8$ 到 $K+10$ 个编码符号才进行译码。而采用此做法可以在不产生大量重复运算的同时,接收 K 个符号就可以开始进行译码。采用此做法可以较大提高译码吞吐量,且此优势随着 K 的增加而愈发明显。

3 测试结果及分析

在广域网环境下,以采用 TCP 的传输系统为比较对象,对本文提出的网络传输系统进行实际应用性能测试。在相同信道环境下,分别使用 2 种系统传输同一文件,根据测试得出的传输时间结果,计算二者的平均传输速率,并进行比较。在实际测试中, Raptor 码的分组数目 K 设为 1 024, 分组长度 T 设为 1 000 字节。测试文件大小为 18 MByte。测试模式选为支持反馈的单播模式,接收端所在地均为北京。测试结果见表 2。其中,传输带宽(Bandwidth)、往返时延(Round Trip Time, RTT)和丢包率(Packet loss)为收发两端之间信道状况参数。传输速率比(Rate ratio)为本系统与 TCP 系统的实际平均传输速率的比值。从测试结果可知,与采用 TCP 的传输系统相比,本系统在丢包率和往返时延较大的网络环境下,效率至少提高 4 倍以上,传输性能提升明显。

4 结论

本文针对 TCP 的不足,提出了一种采用 Raptor 码的高效网络传输系统。本文在系统的应用层采用 Raptor 码对原始数据进行编码,有效地解决了因网络时延和丢包率较大情况下采用 TCP 的数据传输系统带宽利用率低下的问题。此外,接收端只需在恢复每个数据块结束后发送确认信息,最大限度地减少了反馈确认信息的数量,较大幅度地提高了系统传输效率。通过实际测试验证了该系统的高效性和可靠性,并且随着传输带宽、往返时间和丢包率的继续增大,采用 Raptor 码将会展现更加优异的性能。此系统不仅可以应用于网络传输,而且可以融合在卫星数据广播分发系统或可靠多播环境中,具有良好的应用前景。

表 1 数据包包头信息

parameter	meaning	byte size
FILE_ID	file ID for indentifying files	2
Block_Num	block number for a file	2
ID_B	block ID for indentifying block	2
ESI	encoding symbol ID for indentifying symbol	2
K	total numbers of source symbols for one source block	2

表 2 采用 Raptor 码和采用 TCP 传输的性能比较

send site	bandwidth/Mbps	RTT/ms	packet loss/%	data rate/(KB·s ⁻¹)		rate ratio
				TCP	Raptor	
Seoul	2.6	200	1	64	283	4.4
Boston	2.6	416	1	40	233	5.8
Chicago	0.7	660	1	14	73	5.2
Guilin	2.6	340	2	48	276	5.8
Wellington	1.0	422	1	23	102	4.4

参考文献:

- [1] 特南鲍姆,韦瑟罗尔. 计算机网络[M]. 5版. 严伟,潘爱民,译. 北京:清华大学出版社, 2012.
- [2] 曾孝平,王兴隆,王志明,等. 民航移动通信中 TCP 协议的改进[J]. 信息与电子工程, 2012,10(1):13-17.
- [3] Shokrollahi A. Raptor Codes[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006,52(6):2551-2567.
- [4] Luby Michael. LT-codes[C]// Proceedings of the 43rd Annual IEEE Symposium on the Foundations of Computer Science. Washington,DC,USA:[s.n.], 2002:271-280.
- [5] Luby M,Shokrollahi A,Watson M,et al. RFC 5053:Raptor Forward Error Correction Scheme for Object Delivery[EB/OL]. (2007-10)[2012-03-25]. <http://www.ietf.org/rfc/rfc5053.txt>.

作者简介:



薛亚辉(1987-),女,河南省焦作市人,在读硕士研究生,研究方向为移动多媒体.email: xueyh0510@hotmail.com.

王 剑(1977-),男,湖南省宁乡县人,助理研究员,研究方向为计算机通信.

王非非(1986-),男,安徽省宿州市人,助理工程师,研究方向为数字通信技术、数字信号处理技术.

(上接第 294 页)

- [8] 魏利辉,杨斌,贾立哲. 二维带限高斯噪声的 FPGA 实现[J]. 无线电通信技术, 2006,32(4):62-64. (WEI Lihui, YANG Bin, JIA Lizhe. Implementation with FPGA of band-limited Gauss noise of two dimensions[J]. Radio Communications Technology, 2006,32(4):62-64.)
- [9] 蒋乐,冯文全. 高性能可编程高斯白噪声的设计与实现[J]. 电子技术应用, 2006,32(8):113-114. (JIANG Le, FENG Wenquan. Design and implementation of high-performance programmable Gaussian white noise[J]. Application of Electronic Technique, 2006,32(8):113-114.)
- [10] 韩之俊,姚平中. 概率与统计[M]. 北京:国防工业出版社, 1985. (HAN Zhijun, YAO Pingzhong. Probability and statistics[M]. Beijing:National Defence Industry Press, 1985.)

作者简介:



张小乾(1987-),男,河南省封丘县人,在读硕士研究生,主要研究方向为雷达信号处理.email:zhxq0528@163.com.

姚远程(1962-),男,四川省阆中县人,教授,主要研究方向为卫星通信及软件无线电技术.

林 华(1962-),男,福建省浦城县人,高级工程师,主要研究方向为雷达信号处理、超大规模数字集成电路设计.

王 凌(1961-),男,重庆市人,研究员,副总工程师,主要研究方向为雷达引信.