

一种新的基于数字喷泉码的传输协议

徐大专^{1,2} 邓大椿^{1,2} 张瑞丹^{1,2} 邓昭^{1,2}

(1. 南京航空航天大学江苏省物联网和控制技术重点实验室, 南京, 210016; 2. 南京航空航天大学电子信息工程学院, 南京, 210016)

摘要: 数字喷泉码是一种无码率码。相较于传统的固定码率的分组码, 数字喷泉码能够很好地适应信道的变化, 并且能够有效地避免大规模数据传输中的“反馈风暴”问题。由于数字喷泉码没有固定的码率, 因此其传输协议与传统的分组码有着很大的区别。本文介绍了几种现有的喷泉码数据传输协议, 并在此基础上提出了一种新的喷泉传输协议。该协议以一种特殊的帧结构作为基本传输单元, 极大地减小了时延对系统性能的影响。最后对提出的协议进行了性能分析, 并给出协议中参数对协议性能的影响。

关键词: 数字喷泉码; 吞吐效率; 系统 LT 码; 传输协议

中图分类号: TN911 · 22 **文献标志码:** A

New Transmission Protocol Based on Digital Fountain Codes

Xu Dazhuan^{1,2}, Deng Dachun^{1,2}, Zhang Ruidan^{1,2}, Deng Zhao^{1,2}

(1. Jiangsu Key Laboratory of Internet of Things and Control Technologies, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 211106, China; 2. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: Digital fountain codes are a kind of rateless codes. Compared to the traditional block codes with fixed rate, digital fountain codes are able to adapt the changes in the channel well and can effectively avoid "storm feedback" in the transmission of big data. Because of the unfixed rate, the transmission protocols of digital fountain codes have a sharp difference with those of the block codes. The paper introduces several existing fountain codes based transmission protocols, based on which a new type of transmission protocol is proposed. The protocol takes a special frame structure as the basic transmission unit, which greatly reduces the effect of delay on the system performance. At last, the performance of the proposed protocol is analyzed and the influence of the parameters on the performance of the protocol is studied.

Key words: digital fountain codes; throughput; systematic LT codes; transmission protocol

引 言

喷泉码^[1]也叫无码率码, 是一类最初为二元删除信道(Binary erasure channel, BEC)而提出的纠删

码。根据给定的源数据符号序列 k , 喷泉码能够生成无限长的编码符号序列 n 。在理想情况下, 编码符号序列 n 的任意一个长度稍大于 k 的子集就足以帮助接收端成功恢复源数据符号序列。和传统的纠删码相比, 无码率码没有固定的编码速率, 可以根据信道状态变化而改变码率, 并且随着编码符号序列 n 的长度趋向无穷, 编码效率逐渐趋向于 0。从历史的观点来看, Tornado 码^[2]算是第 1 类喷泉码, 但是其对级联图的需求使得 Tornado 码并不实用。2002 年, Luby 提出的 LT(Luby Transform) 码^[3]是第 1 类实用的喷泉码。基于有限的输入符号, 发送端源源不断地生成编码符号并将之发送给接收端, 接收端从接收到的编码符号中译码并恢复源数据, 整个接收过程以输入符号的成功恢复为止。与 Tornado 码相比, LT 码不仅结构更简单, 而且展现出相同甚至更优秀的性能。LT 码最主要的缺点就是编译码复杂度不是线性的。2006 年 Shokrollahi 提出的 Raptor 码^[4]是最高效的一类喷泉码。Raptor 码有着线性的编译码复杂度, 并且在每个编码符号的生成过程中仅需少量的异或操作。目前, RaptorQ 码^[5]是最灵活且最强大的 Raptor 码, RaptorQ 码不仅支持更长的源数据符号序列长度, 还有着更高的编码效率。对于 LT 码, 信道状态信息不再是发送端和接收端编译码过程的必需品。最初的喷泉码是一类为二元删除信道提出的纠删码, 但由于其无码率的特性, 喷泉码的概念很快延伸到诸如二元对称信道(Binary symmetric channel, BSC)、加性高斯白噪声(Additive white Gaussian noise, AWGN)信道和衰落信道等信道中, 并且展现出优秀的译码性能。不可避免的是, LT 码在噪声信道中仍然存在着明显的错误平底现象^[6]。数字喷泉码经过学术界多年的探究, 已经得到了不同程度的应用。将数字喷泉码同网络编码相结合, 借助数字喷泉码适合大规模信息并发传输的特性, 形成网络喷泉码^[7]。实际应用中, 不同信息普遍存在着重要性及交互时间的差异性, 因此结合不等错误保护及数字喷泉码, 形成不等保护喷泉码^[8]。由于数字喷泉码没有固定的码率, 故其传输方式与传统的固定码率码有着很大的区别。对其传输协议的研究吸引了众多学者的关注。Thai 等提出了一种基于 LT 码的立克里德传输协议(Licklider transmission protocol, LTP)传输协议^[9]以缓解长延时对系统性能带来的影响, 而 Fang 等提出了一种基于数字喷泉码的国际空间数据系统咨询委员会(Consultative committee for space data systems, CCSDS)文件传输协议^[10], 进一步减小了传输时延对系统性能的影响。随着对数字喷泉码的研究逐渐深入, 设计适用于数字喷泉码的传输协议得到了越来越多的关注。

1 LT 码

1998 年, Byers 等^[11]首次提出了数字喷泉码的概念, 但并未设计出具体的码型。2002 年, Luby 提出了第 1 种实用的数字喷泉码, 称之为 LT 码。它是第 1 种真正意义上的随机编码方案, 其编译码方法简单, 并且复杂度相对较低, 因此也经常将之作为对数字喷泉码进行理论分析的常用码, 其性能的优劣由度分布的好坏决定。

(1) LT 码编码过程。假设 k 为发送端需要向接收端传输的源符号数量, $\Omega(1), \dots, \Omega(d_{\max})$ 为度分布, 其中 $\Omega(d)$ 为度为 d 的概率, d_{\max} 为度分布中最大的度。度分布通常由生成多项式的形式给出:

$$\Omega(x) = \sum_{d=1}^{d_{\max}} \Omega_d x^d。LT 码编码的过程为:$$

- (a) 从度分布 $\Omega(1), \dots, \Omega(d_{\max})$ 中随机挑选度数 d 。
- (b) 从 K 个源数据符号中均匀随机地选取出 d 个不相同的符号。
- (c) 将选取的 d 个源数据符号按位进行异或操作, 从而生成相应的编码符号。

重复上述 3 个步骤, 发送端可以生成任意数量的 LT 编码符号。图 1 的二分图详细描述了源数据符号和 LT 码编码符号相互之间的关系。上层的 k 个节点 v_i 表示源数据符号, 本文称之为输入节点; 而下层的 n 个节点 C_j 表示相对应的 LT 码编码符号, 本文称之为输出节点。输出节点的度定义为其直接连接的输入节点数。

(2)LT 码译码过程。LT 码的性能与所采用的译码方法密切相关^[3], 置信传播 (Belief propagation, BP) 算法和高斯消除 (Gaussian elimination, GE) 算法是现今常用的 LT 码译码算法。BP 译码具体的译码过程如下^[3]:

(a) 在图 1 的二分图中寻找度为 1 的输出节点 C_j , 此时与该节点相连的输入节点 v_i 可以直接恢复, 即 $v_i = C_j$ 。

(b) 将恢复出的输入节点 v_i 与其邻接所有输出节点 C_{j_i} 进行异或操作, 令 $C_{j_i} = C_{j_i} \oplus v_i$ 。

(c) 删除与节点 v_i 相连接的所有边并更新二分图。

(d) 重复以上步骤, 译码过程至找不到度为 1 的输出节点或源数据符号完全恢复为止。

在译码过程结束时, 如果接收端没有完成所有输入符号的恢复, 则该次译码失败。此时, 接收端将会接收到更多的编码符号直到译码成功。而 GE 译码算法类似于线性方程组求解的过程, 与 BP 译码相比虽然有更好的误码率性能, 但其译码复杂度较高, 因此只适用于较短码长的数字喷泉码。

(3) 系统 LT 码。最初设计的 LT 码和 Raptor 码都不是系统码, 然而在实际应用中, 系统码有着更大的优势^[12], 因此系统形式的 LT 码很快被提出。Nguyen 等在 2007 年首次提出了构造系统 LT 码^[13]的方法, 并于次年设计出第 1 种适用于系统 LT 码的度分布函数——截断度分布 (Truncated degree distribution, TDD)^[14]。文献^[15]提出了另 1 个系统 LT 码的度分布设计。文献^[16]通过改变输入度分布使之不服从泊松分布, 从而提出了一种新的喷泉编码算法; 而文献^[17]提出了一种新的软译码方法, 提高了系统 LT 码性能。系统 LT 码的二分图如图 2 所示。

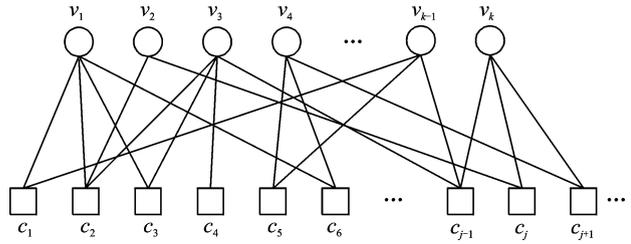


图 1 LT 码的二分图

Fig. 1 Bipartite graph of LT codes

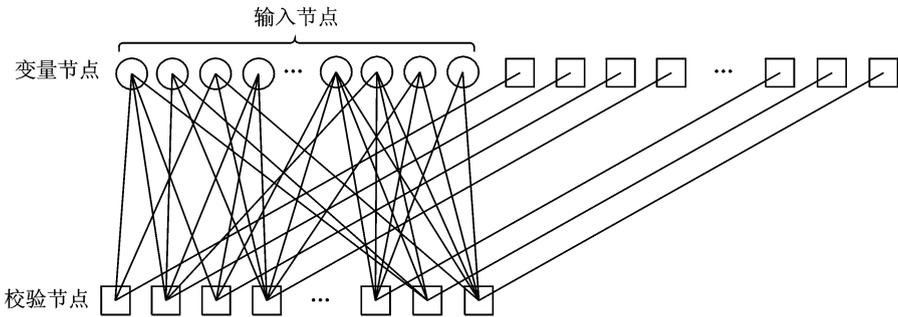


图 2 系统 LT 码的二分图

Fig. 2 Bipartite graph of systematic LT codes

简单地说, 采用系统 LT 码的通信系统就是将输入符号作为编码符号的一部分进行传输。借助 LT 编码器, 发送端生成 m 个编码符号, 则系统 LT 码的符号长度为 $k + m$ 。此时定义系统 LT 码的开销为

$$\epsilon = n/k - 1 = m/k \tag{1}$$

如未做提及, 本文仿真所使用的度分布函数均为^[18]

$$\Omega(x) = 0.006x + 0.492x^2 + 0.0339x^3 + 0.2403x^4 + 0.006x^5 + 0.095x^8 + 0.049x^{14} + 0.018x^{30} + 0.0356x^{33} + 0.033x^{200} \tag{2}$$

2 喷泉码传输协议及其改进

2.1 系统模型和喷泉模型

本文研究系统 LT(Systematic Luby transform,SLT)码分别在加性高斯白噪声信道和瑞利衰落信道下的吞吐效率。现定义系统 LT 码编码器的输出 $c = (c_1, c_2, \dots, c_i, \dots)$, 系统调制输出符号 $x = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots)$ 。假设传输功率始终不变,则高斯白噪声信道下的接收符号 $y = (y_1, y_2, \dots, y_i, \dots) = x + n$; 瑞利衰落信道下的接收符号 $y = h \times x + n$,其中 n 为高斯白噪声, h 为瑞利信道衰落因子。

传输系统的简略模型如图 3 所示,其中循环冗余码校验(Cyclic redundancy check,CRC)表示为 CRC。数字喷泉码的基本传输模型如图 4 所示,发送端连续不断地向接收端发送编码符号,整个发送过程以发送端接收到用户发来的命令正确应答(Acknowledgement, ACK)信息为止。设接收端成功恢复 k 个源数据符号所需要的编码符号数为 n_i ,接收端在等待 ACK 信息期间发送的冗余符号数为 Δ_i 。这就意味着成功发送一段长为 k 的源数据块,发送端总共发送的编码符号数为 $n_i + \Delta_i$ 。本文定义吞吐效率 η 为单位时间内被成功接收的信息符号的平均数量与该时间内编码符号平均发送量的比值。故此时模型的吞吐效率为

$$\eta = E\left[\frac{k}{n_i + \Delta_i}\right] \tag{3}$$

式中: $E(x)$ 为 x 的期望。

该模式是数字喷泉码最基本的传输模式,在每一段源数据的传输过程中,发送端在接收到 ACK 确认之后下段源数据的传输才能开始,然而当信道往返时延 τ 过大时,该方案的效率十分低下。为了提高数字喷泉码传输的效率,现对图 4 所示基本模型进行改进,使发送端能同时对多段源数据块进行传输,同时传输的数据块个数为 2,则修改结果如图 5 所示。长度均为 k 的两源数据块经由 LT 码编码器交替生成成长为 n 的编码符号块,并按照生成顺序将之连续发送给接收端;接收端分别对两个数据块进行译码,如成功恢复某源数据块,则经由反馈信道向接收端发送 ACK 确认信息;接收端如接收到 ACK 信息,则安排新的源数据块替换已恢复的数据块进行交替编码过程。在图 5 所示模型中,单个源数据块在接收端译码成功到发送端接收到 ACK 期间所发送的冗余符号数相较于基本喷泉模型减少了一半,大大提高了信道的利用率,但是其系统性能极易受 n 值的影响。当 n 较小时,该模型的吞吐效率为

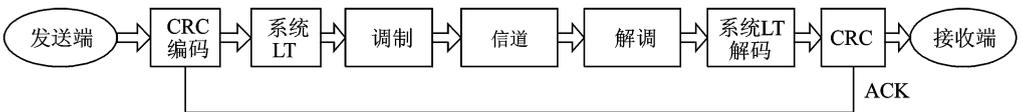


图 3 系统模型
Fig. 3 System model

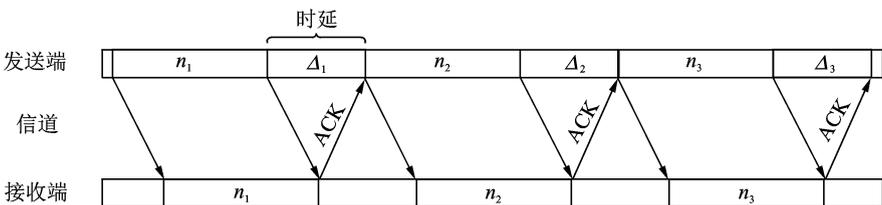


图 4 基本喷泉模型
Fig. 4 Basic fountain model

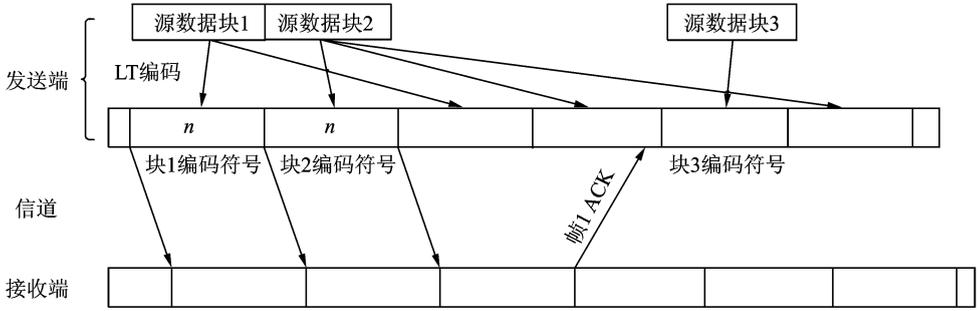


图 5 改进的喷泉模型

Fig. 5 Improved fountain model

$$\eta = E\left[\frac{k}{a_i n}\right] \approx E\left[\frac{k}{n_i + \Delta'_i}\right] = E\left[\frac{k}{n_i + \Delta_i/2}\right] > E\left[\frac{k}{n_i + \Delta_i}\right] \quad (4)$$

式中： Δ'_i 为某数据帧在等待 ACK 阶段发送端继续发送的冗余符号数， a_i 为恢复某源数据块所需的对应编码符号块数量。基于上述两种模型，本文提出了一种新的喷泉传输协议。

2.2 基于帧结构的喷泉传输协议

在传统的固定码率码的重传模式中，如果接收端不能完全恢复所有的源符号，发送端会对该数据帧进行重传；而对于数字喷泉码，如果接收端译码失败，发送端只需要单纯的增加开销 ϵ 即可。此时适用于固定码率码的重传模式将不再适用，为此本文提出一种基于帧结构的数字喷泉码传输协议。协议以数据帧作为基本传输单元，并且当发送端待发送数据充足的前提下，系统能够无间断地传输数据符号。协议简化的帧结构图如图 6 所示，数据帧被划分为两个相对独立的部分。1 个叫基本块，包含 $k(1 + \epsilon_0)$ 个系统 LT 码编码符号；另 1 个叫增量块，其符号长度为 Δ 。协议的传输模式如图 7 所示。发送端将待传输的数据划分为长度为 k 的等长源数据块。采用系统 LT 码生成长度为 $k(1 + \epsilon_0)$ 的编码符号块（其中包含 k 源数据符号和 $k\epsilon_0$ 个 LT 码编码符号），并将之置于数据帧的基本块部分。发送端以数据帧为传输单元连续向接收端发送数据，接收端对每个接收到的数据帧进行译码，若某数据帧的源数据块能成功被译码恢复，则认定该数据帧传输成功，接收端立即通过反馈信道向发送端传送 ACK 确认信号；否则，该数据帧传输失败。发送端以时间 $t(t > \tau)$ 为时间间隔检查是否接收到 ACK 信号。如果未收到，则发送端对传输失败的数据块生成长度为 Δ 的 LT 码编码符号块，并将之安置于某待发送数据帧的增量块部分等待传输； t 时间后如若仍未收到该段数据的 ACK 信号，则继续重复前一步骤直至该段数据成功接收。为描述简便，本文忽略了数据帧的导频序列、FCH 帧控头等部分。然而当多个 Δ 符号块同时需要传输时，系统难免会发生数据冲突，本文简单假设源数据块次序靠前的 Δ 块总是优先被传输。该协议使得发送端能源源不断地发送数据符号，并且极大地削弱了信道往返时延 τ 对吞吐效率的影响。根据对吞吐效率的定义，当 Δ 足够小并且 $\epsilon_0 < \epsilon_i$ 时，本模型的吞吐效率为

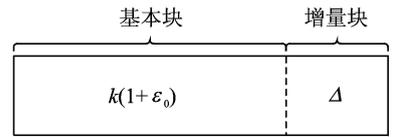


图 6 协议帧结构图

Fig. 6 Frame structure of proposed protocol

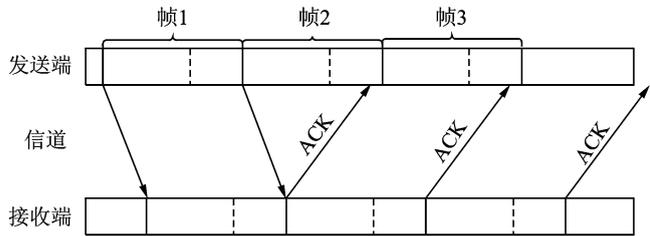


图 7 协议传输模型

Fig. 7 Transport model of proposed protocol

发送端以时间 $t(t > \tau)$ 为时间间隔检查是否接收到 ACK 信号。如果未收到，则发送端对传输失败的数据块生成长度为 Δ 的 LT 码编码符号块，并将之安置于某待发送数据帧的增量块部分等待传输； t 时间后如若仍未收到该段数据的 ACK 信号，则继续重复前一步骤直至该段数据成功接收。为描述简便，本文忽略了数据帧的导频序列、FCH 帧控头等部分。然而当多个 Δ 符号块同时需要传输时，系统难免会发生数据冲突，本文简单假设源数据块次序靠前的 Δ 块总是优先被传输。该协议使得发送端能源源不断地发送数据符号，并且极大地削弱了信道往返时延 τ 对吞吐效率的影响。根据对吞吐效率的定义，当 Δ 足够小并且 $\epsilon_0 < \epsilon_i$ 时，本模型的吞吐效率为

$$\eta = E\left[\frac{k}{k(1 + \epsilon_0) + a_i \Delta}\right] = E\left[\frac{k}{n_i}\right] = E\left[\frac{1}{1 + \epsilon_i}\right] \quad (5)$$

式中: ϵ_i 为第 i 次传输 k 个源数据符号时,接收端成功恢复该数据所需要的译码开销; a_i 为传输 Δ 符号块的次数。相较于 2.1 节所描述的喷泉模型,该协议能够最大限度地减弱时延对系统吞吐效率的影响,提高了系统传输效率。

3 协议性能分析

3.1 仿真分析

现对上述几种协议进行性能对比,假设各协议均采用系统 LT 码进行仿真。协议中各参数值定义如下:码长 k 为 200,系统往返时延 τ 期间传输的符号数为 $4k$,改进协议中 $n=k$,新协议的基本块中参数 $\epsilon_0=0, \Delta=1$ 。协议在 AWGN 信号和瑞利衰落信道下的吞吐性能曲线分别如图 8,9 所示。从图 8,9 中可以发现,信道往返时延 τ 对系统的性能影响极大,虽然改进方案相对基本喷泉模型对吞吐效率的改善效果很明显,但是其信道利用率仍然较低,当时延逐渐增加时,其性能将下降得更明显。尽管可以增加系统同时发送的源数据块数量(假设数量为 n'),此时单个数据块传输完成所需要的时间等同于信道传输 $n' \cdot a_i \cdot n$ 个编码符号所需要的时间,当 n' 足够大时,单个数据块的传输时间将会变得十分漫长。而本文提出的协议极大地减弱了信道时延对系统吞吐效率的影响,同时由于协议总是重传序号靠前数据帧的增量 Δ ,因此单个数据块的传输时间会远小于基本喷泉模型改进的方案。

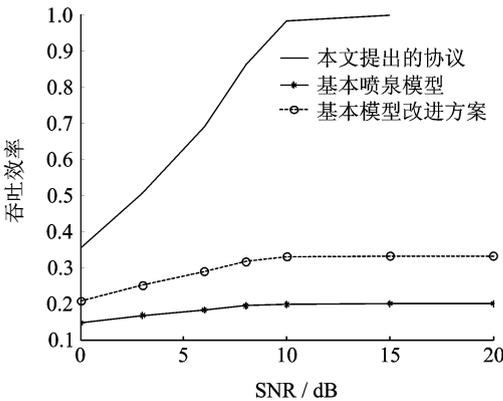


图 8 AWGN 信道下各协议吞吐性能

Fig. 8 Throughput performance of those protocols over AWGN channel

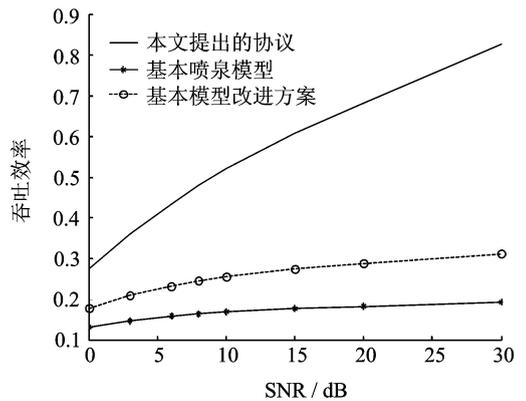


图 9 瑞利衰落信道下各协议吞吐性能

Fig. 9 Throughput performance of those protocols over Rayleigh fading channel

同时本文将低密度奇偶校验码(Low density parity check, LDPC)与本文提出的喷泉协议进行吞吐性能比较,为公平起见,比较时忽略了 LDPC 的传输时延,其在 AWGN 信道和瑞利衰落信道的仿真比较结果分别如图 10,11 所示。在图 10 中,当 $\text{SNR} < 2$ dB 时,采用本文协议的 SLT 码相较 LDPC 码有着更为理想的吞吐性能,并且此时 LDPC 码的性能与 SLT 码相差过大;当 $\text{SNR} > 8$ dB 时,LDPC 码的吞吐性能受其码率的限制难以逼近 1,而 SLT 码的吞吐性能却随着 SNR 的增加逐渐接近 1;而当 2 dB $<$ $\text{SNR} < 8$ dB 时,尽管此时 LDPC 的吞吐效率更高。但当 SNR 值变化时,LDPC 码需要进行码率变换才能使其吞吐效率高于 SLT 码。因此,SLT 码相较 LDPC 码能更好地适应信道的变化,尽管在部分 SNR 条件下,其吞吐效率较低。从图 11 的瑞利衰落信道性能比较曲线中可以得到相同的结果,其中 LDPC-rate 表示采用的 LDPC 码的码率。

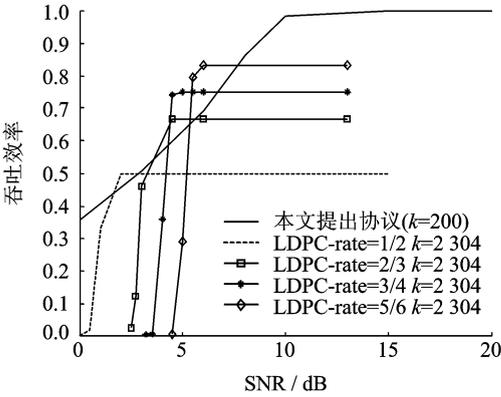


图 10 AWGN 信道下 LDPC 码与本文提出喷泉协议的性能比较

Fig. 10 Performance comparison between LDPC codes and proposed fountain protocols over AWGN channel

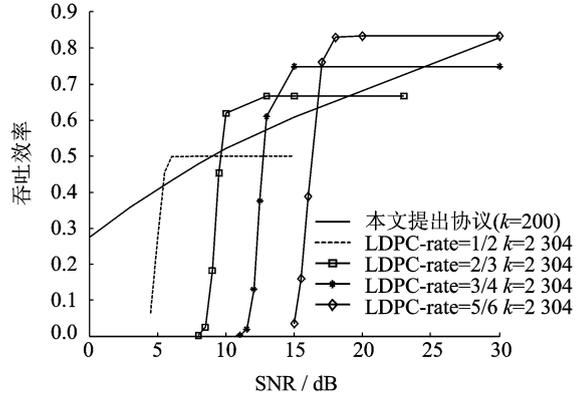


图 11 瑞利衰落信道下 LDPC 码与本文提出喷泉协议的性能比较

Fig. 11 Performance comparison between LDPC codes and proposed fountain protocols over Rayleigh fading channel

3.2 协议参数分析

2.1 节所述协议性能主要受到输入符号长度 k , 额外开销 ϵ_0 以及增量块长度 Δ 的影响。对于 Δ , 假设接收端仍需要 $\Delta/10$ 个 LT 码编码符号才能完全恢复源数据, 而发送端仍然会向接收端发送 Δ 个编码符号, 但这样会使得其余的 $9\Delta/10$ 个编码符号冗余, 若 Δ 过小, 小于 $\Delta/10$, 则会增加 Δ 的重传次数 a_i , 增加单个源数据块传输的时间。因此 Δ 应根据系统需求选取适当值。图 12, 13 分别给出了系统 LT 码在 AWGN 信道和瑞利衰落信道下的吞吐效率与源数据块长度关系的仿真结果。从仿真结果中可以轻易发现, 在大多数信道条件下 (10dB, 6dB 之类), 较之码长较长的系统 LT 码, 码长较短的系统 LT 码有着更高的吞吐效率; 而在信道 SNR 较低时, 不同码长的系统 LT 码吞吐性能几乎相同。也就是说, 对于系统 LT 码, 编译码复杂度更低的短码长系统 LT 码能更有效率地传输数据。

图 12, 13 的分析结果表明短码长的系统 LT 码有着更优秀的吞吐性能。现以仿真方法分析协议中

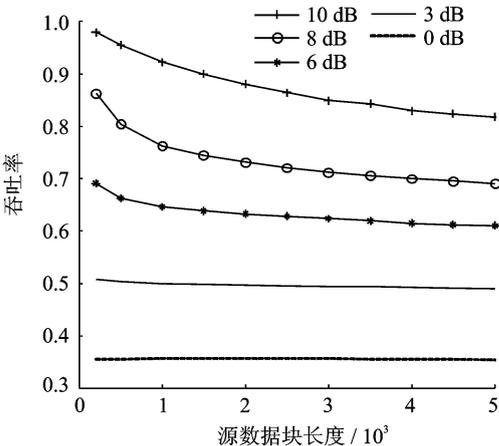


图 12 系统 LT 码在 AWGN 信道下的吞吐效率
Fig. 12 Throughput of SLT codes over AWGN channel

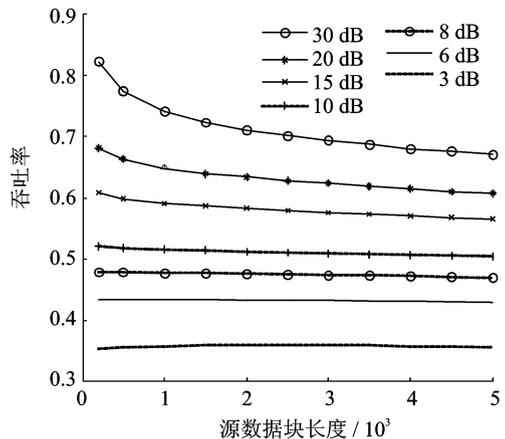
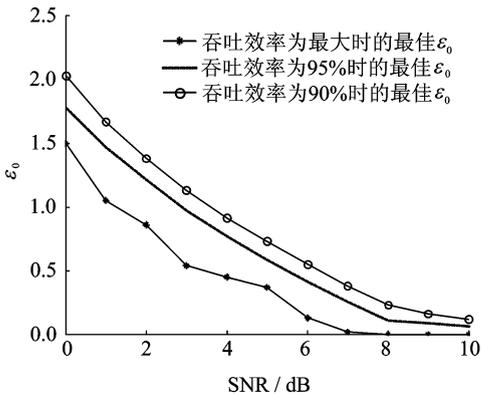
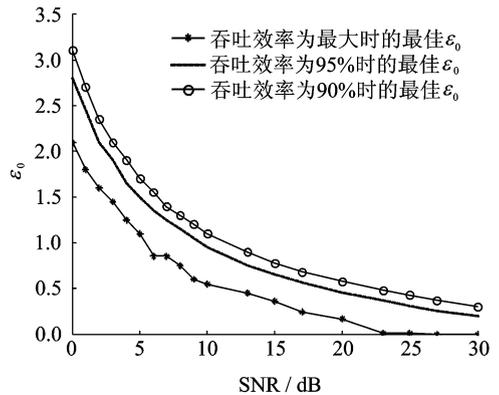


图 13 系统 LT 码在瑞利衰落信道下的吞吐效率
Fig. 13 Throughput of SLT codes over Rayleigh fading channel

的参数对系统吞吐性能的影响。假定此时系统采用码长 k 为 200 的系统 LT 码,即码长为度分布最大的度,由本文可知,接收端译码恢复长为 k 的源数据块平均需要的编码符号数为 $k(1 + \epsilon_0) + a_i \Delta$ 。当 Δ 的值固定时, ϵ_0 越大,发送端需要重传的次数 a_i 就越少,系统成功传输源数据块所需的时间也会相应减少;但是当 $\epsilon_0 > \epsilon_i$,即喷泉码初始发送的开销 ϵ_0 大于接收端成功译码所需要的开销 ϵ_i 时,此时首次发送的开销 ϵ_0 足以恢复该源数据块,此时随着 ϵ_0 的增加,系统的吞吐效率会逐渐下降。因此一个合适的参数 ϵ_0 在保证吞吐效率不下降的前提下,能使系统尽可能快地恢复数据。通过仿真方法,参数 ϵ_0 在 AWGN 信道和瑞利衰落信道下的最佳取值曲线图分别如图 14,15 所示。可以发现,随着 SNR 的增加, ϵ_0 的最佳值逐渐下降至 0。同时,图 14,15 给出了当降低对系统吞吐效率要求时(即系统吞吐效率要求分别降为 95% 和 90% 时), ϵ_0 的最佳值曲线图。以牺牲系统吞吐效率为代价来增加 ϵ_0 的取值, ϵ_0 的增加同时也意味着增量重传次数 a_i 的减少,重传次数 a_i 的减少也就代表单个源数据块传输所需时间的减少。换句话说,就是牺牲系统性能来提高单个源数据块传输的速率。

图 14 AWGN 信道下的最佳 ϵ_0 曲线图Fig. 14 Optimal ϵ_0 in AWGN channel图 15 瑞利衰落信道下的最佳 ϵ_0 曲线图Fig. 15 Optimal ϵ_0 in Rayleigh fading channel

4 结束语

从 1998 年数字喷泉码概念的首次提出至今,关于数字喷泉码的研究已经取得了众多成果。而数字喷泉码在众多信道条件下均有着十分优秀的性能,因此数字喷泉码受到了学术界的广泛关注。现有的研究主要集中在数字喷泉码度分布的设计、有限长分析、编译码算法的研究和密度演化等领域,而对数字喷泉码传输协议的设计仍处于理论阶段。由于数字喷泉码的无码率特性,适用于固定码率的传输协议不再适用,因此设计出实用的数字喷泉码传输协议成为数字喷泉码走向实用的必经之路。本文在已有喷泉协议的基础上提出了一种新的喷泉传输协议,并分析了协议中参数对其性能的影响。该协议极大地减小了时延对数据传输的影响,提高了信道利用率。传输协议的研究是数字喷泉码研究体系中不可或缺的一部分。怎样将该协议应用于实际通信系统中还需要更为深入的研究。尽管学术界对数字喷泉码的研究已经取得了长足的进步,但将数字喷泉码应用于实际仍有部分问题需要解决:(1)优秀度分布的设计及优化。度分布的优劣极大影响了数字喷泉码的性能,而现有的度分布大多基于非系统喷泉码而设计,针对系统喷泉码的度分布函数的设计仍需深入研究。(2)编译码复杂度的降低。数字喷泉码主要有 GE 译码和 BP 译码,尽管先后经过国内外学者的改进,但仍然存在着较高的算法复杂度。尽管数字喷泉码仍存在一些问題,但随着对数字喷泉码研究的不断深入,其研究成果必将推动数字喷泉码向着实际应用长足进步。

参考文献:

- [1] Mackay D J C. Fountain codes[J]. IEE Proceeding Communications, 2005, 152(6): 1062-1068.
- [2] Luby M. Tornado codes: Practical erasure codes based on random irregular graphs[C]//Proceedings of the 2nd International Workshop on Randomization and Approximation Techniques in Computer Science. Barcelona, Spain; Springer, 1998: 171-175.
- [3] Luby M. LT codes[C]//Proceedings of the 43rd IEEE Symposium on Foundations of Computer Science. Vancouver, Canada; IEEE, 2006: 271-280.
- [4] Shokrollahi A. Raptor codes[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(6): 2551-2567.
- [5] Luby M, Shokrollahi A, Stockhammer T. RaptorQ forward error correction scheme for object delivery[J]. Letf Rmt Working Group Work in Progress, 2007, 11(3): 82-89.
- [6] Hussain I, Xiao M, Rasmussen K L. Error floor analysis of LT codes over the additive white Gaussian noise channel[C]//IEEE Global Telecommunications Conference. California, USA; IEEE, 2012, 1-5.
- [7] 徐大专, 邵汉钦, 张小飞, 等. 数字喷泉码及网络喷泉码的最新进展[J]. 数据采集与处理, 2014, 29(3): 351-359.
Xu Dazhuan, Shan Hanqin, Zhang Xiaofei, et al. Recent research progress on digital fountain codes and network fountain codes[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2014, 29(3): 351-359.
- [8] 邓再辉, 同小军, 甘良才. 改进的块复制不等差错保护喷泉码[J]. 数据采集与处理, 2015, 30(3): 591-598.
Deng Zaihui, Tong Xiaojun, Gan Liangcai. Improvement of unequal error protected fountain codes based on block duplication [J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2015, 30(3): 591-598.
- [9] Thai T T, Chaganti V G, Lochin E, et al. Enabling E2E reliable communications with adaptive re-encoding over delay tolerant networks[C]//IEEE International Conference on Communications. London, UK; IEEE, 2015: 928-933.
- [10] Fang J, Bu X, Yang K. Retransmission spurts of deferred NAK ARQ in fountain coding aided CCSDS file-delivery protocol [J]. IEEE Communications Letters, 2006, 20(4): 816-819.
- [11] Byers J W, Luby M, Mitzenmacher M, et al. A digital fountain approach to reliable distribution of bulk data[J]. ACM Sigcomm Computer Communication Review, 1998, 28(4): 56-57.
- [12] 徐大专, 许生凯, 华洁, 等. 数字喷泉码度分布优化设计的最新研究进展[J]. 数据采集与处理, 2015, 30(4): 733-746.
Xu Dazhuan, Xu Shengkai, Hua Jie, et al. Recent progress on optimization design of degree distribution in digital fountain codes[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2015, 30(4): 733-746.
- [13] Nguyen T D, Yang L L, Hanzo L. Systematic Luby transform codes and their soft decoding[C]//IEEE Workshop on Signal Process. Shanghai, China; IEEE, 2007: 67-72.
- [14] Nguyen T D, Yang L L, Ng S X. An optimal degree distribution design and a conditional random integer generator for the systematic Luby transform coded wireless Internet[C]//IEEE WCNC'08. Las Vegas, USA; IEEE, 2008: 243-248.
- [15] Chen L, Meng L M, Xu Z J, et al. A design of degree distribution for systematic fountain codes[C]//19th IEEE International Conference on Networks (ICON). Singapore; IEEE, 2013: 1-5.
- [16] Hayajneh K F, Yousefi S. Improved systematic fountain codes in AWGN channel[C]//13th Canadian Workshop on Information Theory (CWIT). Canada; IEEE, 2013: 148-152.
- [17] Zhang M X, Kim S Y. A new soft decoding method for systematic LT codes[C]//Proceeding of VDE, 20th European Wireless Conference. Barcelona, Spain; European Wireless, 2014: 1-6.
- [18] Etesami O, Shokrollahi A. Raptor codes on binary memoryless symmetric channels[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(5): 2033-2051.

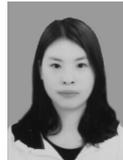
作者简介:



徐大专(1963-),男,教授,博士生导师,研究方向:通信理论与信号处理, E-mail: xudazhuan@nuaa.edu.cn.



邓大椿(1993-),男,硕士研究生,研究方向:数字喷泉码、无线通信。



张瑞丹(1993-),女,硕士研究生,研究方向:数字喷泉码。



邓昭(1994-),女,硕士研究生,研究方向:数字喷泉码。

