

分类号：
UDC:

密级：
编号：

河北工业大学硕士学位论文

基于喷泉码的不等差错保护方案的研究

论文作者：唐会娜

学生类别：全日制

学科门类：工学

学科专业：通信与信息系统

指导教师：贾志成

职 称：教授

Thesis Submitted to
Hebei University of Technology
for
The Master Degree of
Communication and Information System

**STUDY ON UNEQUAL ERROR PROTECTION BASED ON
FOUNTAIN CODE**

by
Tang Huina

Supervisor: Prof. Jia Zhicheng

November 2014

原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文不包含任何他人或集体已经发表的作品内容，也不包含本人为获得其他学位而使用过的材料。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人或集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：唐会娜

日期：2014. 12. 15

关于学位论文版权使用授权的说明

本人完全了解河北工业大学关于收集、保存、使用学位论文的以下规定：学校有权采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供本学位论文全文或者部分内容的阅览服务；学校有权将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索、交流；学校有权向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版。

（保密的学位论文在解密后适用本授权说明）

学位论文作者签名：唐会娜

日期：2014. 12. 15

导师签名：贾志伟

日期：2014. 12. 15

摘 要

信息传输质量与速度随着科学技术的发展引起了人们的高度重视。在传统传输机制中，反馈和自动重发传输效率低，增加了传输时间。喷泉码是一种无码率码，不需要反馈和自动重发请求，因此，节省了传输时间，避免了反馈风暴问题。

本文从喷泉码影响因素入手，针对影响因素对喷泉码编译码的影响进行了详尽的研究，得出鲁棒孤波分布性能较优。在此基础上进行了喷泉码编译码方案的研究。针对现有编译码方案的不足，本文引入了混沌的概念，充分利用混沌映射产生的序列遍历性、均匀性等特点，给出了一种基于混沌映射的喷泉码编译码方案。仿真结果表明该方案的编译码结果具有较好的稳定性，并提高了译码成功率。

其次，总结归纳了多种经典喷泉码不等差错保护（UEP）方案。经典的喷泉码 UEP 方案包括设置权重因子的 UEP 方案，基于扩展窗的喷泉码 UEP 方案以及采用复制窗方法实现的 UEP 方案。对这几种方案进行了仿真、分析，剖析出经典不等差错保护方案的特点。经典的不等差错保护方案有的牺牲了次重要数据的编译码成功率，有的不等差错保护特性不明显。在对仿真结果总结、分析的基础上，给出了一种基于复制窗—扩展窗的喷泉码不等差错保护方案。仿真结果表明此方案既增强了 UEP 特性，又改善了 LIB 的抗误码性能。

关键词：喷泉码、度分布、LT 码、编译码、不等差错保护

ABSTRACT

With the development of science and technology, information transmission quality and speed have drawn great attention of people. In the traditional transmission mechanism, feedback and automatic retransmission efficiency is low and increase the transmission time. Fountain code is a kind of rateless code, which doesn't need feedback and automatic retransmission request, therefore, it saves the transfer time, avoids the problem of feedback storm.

Starting from the influence factors of fountain code, the influence on fountain code encoding and decoding is made detailed study, which obtains the conclusion that robust soliton has a better distribution performance. On the basis of former study, fountain code encoding and decoding scheme is studied. Aiming at the shortcomings of the existing encoding decoding scheme, a fountain code encoding and decoding scheme based on chaotic mapping is presented, which introduces the concept of chaos and makes full use of ergodicity, uniformity and other characteristics. The simulation results show that the scheme has good stability and improves the success rate of decoding.

A variety of classic fountain code unequal error protection scheme are summarized. Classic fountain codes UEP scheme includes setting weighting factor UEP scheme, unequal error protection based on Expanding Window and the replication window method to realize unequal error protection scheme. The characteristics of unequal error protection scheme is analysed after the simulation and analysis to the several schemes. Some of classic unequal error protection scheme is at the expense of decoding success rate of less important bits, and some unequal error protection feature is not obvious. On the basis of summary and analysis of simulation results, copy-extension window of fountain code unequal error protection scheme is presented. The simulation results show that the scheme can enhance the UEP features and improve the LIB error resistance performance.

KEYWORDS: Fountain Code; Degree Distribution; LT Code; Coding and decoding; Unequal Error Protection

目 录

第一章 绪论.....	- 1 -
1.1 研究背景及意义.....	- 1 -
1.2 国内外研究现状及发展趋势.....	- 2 -
1.3 喷泉码技术的优缺点.....	- 4 -
1.3.1 喷泉码技术的优点.....	- 4 -
1.3.2 喷泉码技术的缺点.....	- 5 -
1.4 本文主要研究内容及结构安排.....	- 5 -
1.4.1 主要研究内容.....	- 5 -
1.4.2 全文结构安排.....	- 6 -
第二章 喷泉码相关知识介绍.....	- 7 -
2.1 删除信道.....	- 7 -
2.2 喷泉码概述.....	- 7 -
2.2.1 喷泉码的由来.....	- 8 -
2.2.2 喷泉码的基本模型.....	- 8 -
2.2.3 常见的喷泉码.....	- 8 -
2.3 度分布.....	- 10 -
2.4 度分布函数仿真.....	- 12 -
2.5 本章小结.....	- 13 -
第三章 喷泉码编译码方案.....	- 14 -
3.1 喷泉码的编码.....	- 14 -
3.2 喷泉码的译码.....	- 16 -
3.2.1 BP 译码算法.....	- 16 -
3.2.2 高斯消元译码算法.....	- 18 -
3.2.3 两种算法的缺憾.....	- 18 -
3.3 影响因素对喷泉码编译码性能的影响.....	- 19 -
3.3.1 度分布.....	- 19 -
3.3.2 鲁棒孤波分布参数研究.....	- 19 -
3.3.3 信息序列长度.....	- 20 -
3.3.4 译码开销.....	- 21 -
3.4 本章小结.....	- 21 -
第四章 基于混沌映射的喷泉码编译码方案的研究.....	- 23 -
4.1 引言.....	- 23 -

4.2 混沌映射.....	- 23 -
4.3 改进的无限折叠混沌映射.....	- 23 -
4.4 基于改进的无限折叠混沌映射的喷泉码编译码算法.....	- 25 -
4.5 实验结果与分析.....	- 25 -
4.6 本章小结.....	- 27 -
第五章 喷泉码不等差错保护方案的研究.....	- 28 -
5.1 引言.....	- 28 -
5.2 基于 LT 码设置权重因子的 UEP 方案.....	- 28 -
5.3 基于扩展窗的喷泉码不等差错保护方案.....	- 29 -
5.4 采用复制编码方法的不等差错保护方案的研究.....	- 30 -
5.5 仿真结果.....	- 31 -
5.5.1 UEP-LT 方案仿真.....	- 31 -
5.5.2 扩展窗 UEP 方案仿真.....	- 32 -
5.5.3 复制窗 UEP 方案仿真.....	- 32 -
5.6 本章小结.....	- 33 -
第六章 复制窗—扩展窗喷泉码不等差错保护方案.....	- 34 -
6.1 引言.....	- 34 -
6.2 UEP 编码过程.....	- 34 -
6.3 数据仿真.....	- 35 -
6.4 本章小结.....	- 37 -
第七章 结论与展望.....	- 38 -
7.1 结论.....	- 38 -
7.2 展望.....	- 38 -
参考文献.....	- 40 -
攻读学位期间所取得的相关科研成果.....	- 43 -
致 谢.....	- 44 -

第一章 绪论

1.1 研究背景及意义

科学技术的快速发展推动着互联网迅速成长，网络信息传输已经成为人类的必需品，互联网已迅速地融入到人们的生活中。例如，在互联网上发即时消息聊天、电子邮箱、文件传输等等。而这些都属于端到端的传输服务，所以，信息可靠快速的传输是端到端服务必须满足的。

随着社会的不断进步和科学技术的不断发展，人们对于通信的要求越来越高，越发体会到信息传输质量与速度的重要性，同时，通信用户数量也不断增多。对于一般的数据信号，安全可靠的传输是毫无疑问的，但是面对高清的图片、视频的数据传输时，传输信道的压力会非常大。压缩程度越大，越能高效可靠地传输，而伴随而来的就是图片、视频质量的下降；压缩程度越小，数据占用带宽资源越大，不能够高效、可靠地传输。因此，在信道传输过程中，如何做到可靠高效的传输已经引起人们的高度重视^[1]。

擦除信道又叫删除信道^[2]。在删除信道中进行数据传输时，接收端会根据接收到信号的正确与否来决定是否发送携带重新发送的信号的反饋。如果发送端接收到反饋重发的信息，那么发送端会进行重发处理。在删除概率较大的情况下，反饋的数据量较大。广播和多播系统具有多个接收机，如果每个接收机因为接收信号不正确而要求重发的话，势必会造成传输数据量的增多，传输效率也会随之降低，增加传输时间^[3]。

针对上述问题，数字喷泉码应运而生。对于数字喷泉码，首先对所要传输的数字喷泉码进行编码，就好比喷泉一样，源源不断的产生编码数据，而对于译码端只要接收到足够多的编码信息就能将原始信息译出。

在传统数据传输中，所有的数据都是等概率保护（Equal Error Protection, EEP）进行传输的，但这种情况并不适合所有的实际应用。比如：在 H.264 视频传输^{[4][5]}过程当中，I 帧比 P 帧和 B 帧更加重要。此外，基本层数据的丢失会导致严重的差错传播，因此，基本层的传输要比增强层的传输更加重要。此时，不等差错保护方案就（Unequal Error Protection, UEP）发挥了它的作用。它即使在严峻的环境下也能给重要数据格外的保护，从而增强传输的鲁棒性。

作为前向纠错编码技术，喷泉码不需要反饋和自动重发请求，节省了传输时间，

避免了反馈风暴问题^{[6][7]}。同时，喷泉码具有不固定码率、编译码复杂度较低、适合大量数据广播应用等优势^[8]。近年来，国内外研究学者对喷泉码的研究不断深入，喷泉码次优度分布研究^[9]，喷泉码编译码算法及性能研究^[10~12]，分布式喷泉码的研究^{[13][14]}，基于喷泉码的不等差错保护研究^[15~18]，以及基于喷泉码技术的音频、视频、网络数据传输^{[19][20]}等等研究方向成为了喷泉码研究的主流。喷泉码作为一种新的纠错编码形式，在多媒体广播^[21]、协作通信^[22~24]、深空通信^[25~27]等领域得到了广泛的关注和应用。

1.2 国内外研究现状及发展趋势

随着编码理论化，各种信息码在不断的研究过程中层出不穷。在国外，1950年 Hamming 发现汉明码^[28]，该码可以对一位错误进行自动处理；1957年 Prange 提出循环码^[29]，该码简化了码字本身的结构；1960年里得和所罗门提出 RS 编码^[30]，该码可以充分利用信息元间的相关性，随后级联码等被相继提出。

Michael Luby 于 2002 年提出了第一种实用喷泉码——LT 码。第二种实用的喷泉码码型是 Raptor 码，是 Amin Shokrollahi 在第一类实用喷泉码 LT 码的基础上提出来的。1998 年，喷泉码的完整定义给出后，紧随其后具有现代意义的数字喷泉码和具有线性指标的码^[31]被相继提出。目前，这些码仍然是比较常用的类型码。在国内，2008 年，朱宏杰提出具有不等差错保护特性的喷泉码，该码可以根据信息重要性的差别，自动调节信息发送比例，从而提高用户的满意度；张朝阳提出了一种编译码复杂度得到大大降低且对码率无累积性的码，该码是 LT 码的一种升华码。

喷泉码的编译码相关参数指标直接关系到码字能否成功恢复。目前的喷泉码采用的编码算法大体相同，它们大多都是采用 BP 迭代译码算法，该类算法从表面上看虽然使得译码的过程更加简单明了，但其译码的功能性却有一定的局限性。为此，增大恢复码字的可能性，就必须采取改进措施，无论是编码过程，所选码字，度分布，还是译码方法，都必须以提高成功率为目标对其进行完善。

自 1998 年 Michael Luby 等人对数字喷泉码进行明确定义后，喷泉码的设计及改进方案就源源不断的涌现出来，从最初的只是理论上的 MDS 码，到 LT 码，再到 Raptor 码，喷泉码及其技术得到不断改善。2010 年，朱宏杰，裴玉奎，陆建华针对传统译码过程中存在剩余可译性的不足提出了 EBP 译码算法^[32]，该算法是对传统算法的一种完善，可以有效的提高译码的成功几率。传统的 BP 译码算法主要寻找生成矩阵中重量为 1 的行，不断更新编码包和生成矩阵，再通过不断循环迭代求取各个数据包的取值。而 EBP 译码算法在传统译码过程失败时，并不是选择立即结束进程，而是将这些因进程终止而未译出的数据作为已知信息，使其重新满足译码迭代条件，以此来延续译码

的过程，并在延续过程中求出这些未译出数据包的真实值，从而译出更多的数据包，这样就可以达到减小译码开销，提升译码的效率的目的。除此之外，张冀，高宏峰，师春灵提出了通过降低 R 集合为空集的概率^[31]，来降低译码代价，进而改进算法；余国华，杨宇航，魏岳军提出了具有较低的译码失败率且兼顾译码复杂度的Raptor码译码算法的改进方案；臧求实在喷泉码技术的研究中，给出了基于编码单元度数的分布优化来提高编译码性能的方案设计与分析^[33]；朱宏杰从编码器的角度出发，研究了短码长的喷泉码设计；何秀慧等提出BP译码改进方案^[34]，其在BP译码过程中无度1的情况下，继续采用GE译码，通过译出这些少量的不确定的码字，提高译码成功率。周阳提出一种基于度1符号的改进设想^[35]，这些都在一定程度上使喷泉码的编译码算法得以改进。

不等差错保护^{[36][37]} (Unequal Error Protection, UEP) 思想最早是由 Manick 等人在 1967 年提出的。典型的喷泉码不等差错保护方案如下：在 2006 年，Rahnavard 和 Fekri 提出了设置权重因子的不等差错保护方案^[38]；D.Vukobratovi'c 和 V.Stankovi'c 于 2007 年提出的基于扩展窗 (EWF, Expanding Window Fountain) 的喷泉码不等差错保护方案^[39]；2008 年，Ahmad 和 Hamzaoui 等人提出了采用复制窗方法实现不等差错保护方案的研究^[40]。这些年来，研究人员结合新的信源信道的编码技术（例如 Turbo 码、卷积码、LDPC 码等）提出了一些实用的 UEP 实现方案，在网络数据传输方面有很大的应用价值。

随着喷泉码理论技术的不断发展，科学技术的不断成熟，喷泉码技术逐渐得到了应用，具有较好的应用前景。

(1) 多媒体广播^[41~44]

2014 年作为第四代移动通信 (4G) 元年，标志着通信行业深入转型改革的历史大幕已经拉开。此外，多网融合也已经不是猜想。由此可见，以多媒体通信为核心的通信技术必将成为研究重点和热点。

在进行多媒体广播过程中遇到噪声干扰会导致接收性能畸变，解决这一棘手问题的关键技术就是信道编码。CMMB 准则中采用 RS 码 (Reed-solomon codes) 和 LDPC 码 (Low Density Parity Check Code, 低密度奇偶检验码) 级联的编码思路进行性能改进。但是，在较强噪声干扰和信噪比较低的情况下，仍旧无法保证数据通信的可靠性。为了确保数据通信的可靠性，提高多媒体传输的质量，会使用 ARQ (自动重发请求) 和 ACK 确认来解决。但是当有大规模的用户反馈时，会导致网络阻塞。较适宜的方案就是在高层协议中增加前向纠错编码，以此使得传输更加可靠。喷泉码是一种无码率码，不需要反馈和重发请求。因此，喷泉码编码方案在多媒体广播应用中应用广泛。

(2) 协作通信^[45~48]

2007 年，Molisch 第一次在协作通信中应用了喷泉码技术，喷泉码不需要反馈和

自动重发请求，只需要接收端接收到一定充足的编码信息就可以将原始信息成功译出。因此，节省了传输时间，避免了反馈风暴问题。在数字喷泉码的异步传输方案中，每个中继节点完成对接收到数据的译码就会对目的节点传输译码结果。这种传输方式不仅能将有用信息提供给目标节点，还有利于未完成的中继节点译码。

(3) 深空通信^[49-51]

深空通信具有传输距离远、误码率大等特点。而喷泉码不需要反馈和自动重发请求，只要接收端接收到足够多的编码信息就能将原始信息译出，不要重传和确认机制，从而节省了文件传输时间，传输的效率得到了提高。另外，文献[52]提出了在深空通信中将 LDPC 码和喷泉码级联的编码方式，满足通信质量要求，有很大的应用前景。

此外，喷泉码还可以应用于流媒体，无线网络通信系统当中。

通过对喷泉码以及不等差错保护方案背景及研究现状的了解，我对喷泉码不等差错保护方案的研究逐渐深入。根据前人的经验，了解最基本的喷泉码理论知识以及了解现有不等差错保护方案，为我之后的研究打下了基础。

1.3 喷泉码技术的优缺点

1.3.1 喷泉码技术的优点

喷泉码最初的提出是针对数据广播的，因此，在数据广播方面喷泉码具有以下优点^[53]：

(1) 不需要重新发送。喷泉码是一种无固定码率码，虽然在最初提出的时候是针对删除信道的，但后来随着喷泉码不断发展以及研究的不断深入，喷泉码被证明同样适用于加性高斯白噪声、二元对称信道等信道当中。无固定速率这一特点可使得即便在信道条件不良的情况下，只要接收端接收到足够多的编码包个数，不需要重新发送也能正确译码。面对复杂的信道条件，喷泉码表现出了较强的“鲁棒性”。

(2) 接收端不需要进行反馈。只要接收端接收到足够多的编码包个数，就能正确译码，恢复出原始数据。这样，就减小了因反馈信号往返的时延，还会有效避免反馈风暴。

(3) 灵活性较高。喷泉码可以适应不同条件的信道以及用户。用户可以根据自己的实际情况来灵活的确定接收端编码包的个数，不需要考虑其他用户的情况。

(4) 译码复杂度较低。无论是 LT 码还是 Raptor 码，喷泉码的译码复杂度都是线性的。对实际应用中接收端和发射端编译码器软硬件的设计都提供了便利，有助于简化软硬件设计。

1.3.2 喷泉码技术的缺点

喷泉码的编译码性能直接影响到喷泉方案的性能。现有的喷泉码编译码方式大都采用随机编码算法，也就是说编码包的生成矩阵只是一个随机矩阵，并不一定是满秩的，并不保证译码一定全部成功。因此，存在以下几个缺点：

(1) 虽说在接收端只要接收到足够多的数据即可正确译码，但是如果接收端的码长过大会需要较大的存储来作为后盾，这不利于硬件设备的小型化。

(2) 当接收端接收到的数据不够多时，喷泉码编译码成功率会大大降低。因此，它不适合差错率较高、冗余度较低的信道。

可见，虽然喷泉码技术有其特有的优势，但同时也存在着一些尚未解决的问题，因此，喷泉码的研究之路还很漫长。

1.4 本文主要研究内容及结构安排

1.4.1 主要研究内容

本文主要研究基于喷泉码的不等差错保护方案，主要内容包括以下几个方面：

(1) 影响喷泉码编译码算法的因素。喷泉码编译码成功与否的几个关键因素主要有：度分布函数、信息序列长度、译码开销 γ ，这些影响因素的研究对后续喷泉码编译码算法的研究起到了至关重要的作用。研究各因素对喷泉码编译码的影响，确定相应参数，为后续研究打下坚实基础。

(2) 喷泉码编译码算法的研究。在研究喷泉码关键影响因素的基础上，选定适当参数，确定性能较好的度分布函数，展开对喷泉码编码算法的研究。常见的编译码算法是先产生随机数，根据度分布函数确定随机数落在了哪个度分布的范围，从而确定度分布，进行喷泉码编码。而常见的译码算法有置信传播迭代译码算法（BP 算法）和高斯消元法（GE 算法）。前者译码复杂度小，但译码效率较低；后者译码算法具有运算量大，高复杂度的缺点。在此基础上给出了一种基于混沌映射的喷泉码编译码方案。仿真结果表明该方案的编译码结果具有较好的稳定性，并改善了译码成功率。

(3) 基于喷泉码的不等差错保护方案。在阅读大量国内外参考文献的基础上，总结、归纳了常见的基于喷泉码的不等差错保护方案。本文针对几种方案进行了仿真、分析，结果表明，基于喷泉码的不等差错保护方案确实对重要数据起到了较高保护作用，但是牺牲了次要数据的编译码成功率，此外，还有的方案 UEP 特性不明显。

(4) 基于复制窗—扩展窗喷泉码的不等差错保护方案。常用的喷泉码不等差错保护方案牺牲了次要数据的编译码成功率，有的方案不等差错保护特性表现的不是

很明显。在对结果总结、分析的基础上，提出了一种基于复制窗—扩展窗喷泉码的不等差错保护方案。通过设定其中的扩展因子，改变译码开销，实验得到大量的实验数据及其仿真图，验证了此方案既增强了 UEP 特性，又改善了 LIB 的抗误码性能。

1.4.2 全文结构安排

第一章：绪论。绪论部分主要论述了课题的研究背景及意义，阐述喷泉码、不等差错保护方案理论在国内外的研究现状及发展趋势，阐述了喷泉码技术的优缺点。而后对论文主要研究内容进行了简述，说明了论文全文结构安排，简要概述每章内容。

第二章：喷泉码的基本理论。由于喷泉码最初是针对删除信道提出的，因此，在本章一开始介绍了删除信道的概念，接着介绍了几种常见的度分布。对喷泉码基本理论进行了学习，为本文后续的研究工作奠定了基础。

第三章：喷泉码编译码。在第二章基本知识的基础之上，首先介绍了喷泉码编译码的方法，分析了常用的编译码算法的优劣性，并对不同的参数进行设置，得到不同参数下喷泉码编译码的性能，得到大量实验仿真，并对结果进行分析。

第四章：基于混沌映射的喷泉码编译码方案。针对喷泉码编译码的不足，本文将混沌思想融入到喷泉码编译码方案中，给出了一种基于混沌映射的喷泉码编译码方案，对 LT 码的编译码进行了一定的改进，对基本思路进行了简要阐述，并进行了仿真。

第五章：喷泉码不等差错保护方案的研究。归纳、总结了三种具体的喷泉码不等差错保护方案：典型的设置权重因子的 UEP-LT 方案、基于扩展窗喷泉码的 UEP 方案以及基于复制窗喷泉码的 UEP 方案。对这三种基本的喷泉码不等差错保护方案的基本思想进行了阐述，通过理论分析演算和具体的实验数据，得出每个方案的优缺点。

第六章：复制窗—扩展窗喷泉码不等差错保护方案的研究。在第四章的基础上，给出了一种基于复制窗—扩展窗喷泉码的不等差错保护方案。对该方案的基本思想进行了阐述，并进行了实验仿真。

第七章：总结与展望。对论文的研究工作进行进一步的总结，指出不足以及有待改善之处，对下一步进行展望。

第二章 喷泉码相关知识介绍

2.1 删除信道

Michael Luby 于 2002 年提出了第一种实用喷泉码——LT 码，最初设计 LT 码是针对删除信道的。由于具有无固定码率特性，喷泉码在删除信道中性能接近香农限。后来，随着喷泉码不断发展以及喷泉码研究的不断深入，喷泉码的应用被推广到加性高斯白噪声、二元对称信道等信道当中。二元删除信道如图 2.1 所示。

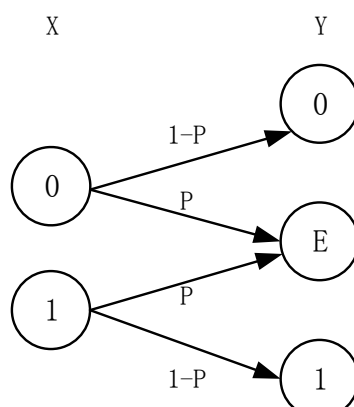


图 2.1 二元删除信道模型

图中，离散信道的输入为 $X(0,1)$ ， $Y(0,E,1)$ ，信道的删除概率为 P 。当接收到的信息既不能决策为“0”，也不能决策为“1”的时候，这时候就要体现“删除”的意思了，输出结果为“E”。

在删除信道中进行数据传输时，接收端会根据接收到信号的正确与否来决定是否发送携带重新发送的信号反馈，如果发送端接收到反馈重发的信息，那么发送端会进行重发处理。但是，当删除概率很大时，也会伴随有很大的信息请求重传，并且，数据包在发端被不断的传送，从而、会产生较大的信道负载。因此，不能采用反馈重传的策略。当多播信道具有删除特性的时候一个发送多个接收，而在发送端都能接收到接收端发送的重传请求时，会很大程度上降低数据传输效率。所以只能通过某种不用反馈的编码方法才可以实现在删除信道上的大量数据的传输。

2.2 喷泉码概述

2.2.1 喷泉码的由来

喷泉码的前身是 Tornado 码^[54]。Tornado 码是一种级联型的码^[55]。它的编译码过程可以简单用下图表示。第一层的白色节点代表原始数据，第二层的黑色节点代表对第一层的原始数据进行检验后的编码结果。编码结果是随机选取第一层的原始数据进行异或得到的。同理的到第三层、第四层……，最后一层采用码速率为 $1-\beta$ 的传统分组码进行编码，这也标志着编码的结束，如图 2.2。

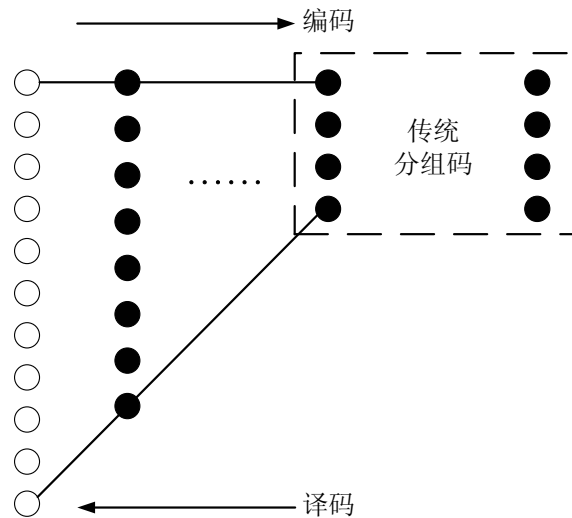


图 2.2 Tornado 码编译码基本思想

Tornado 码曾经一度被认为是实用喷泉码的首选，它具有简单高性能的编译码算法，但是它是具有固定码率的，也就是说不完全符合喷泉码中“喷泉”的定义，并且在实际的使用中局限性较大。但是，Tornado 码的出现为真正意义上的喷泉码——LT 码和 Raptor 码提供了巨大的指导。

2.2.2 喷泉码的基本模型

喷泉码是一种无码率码。无论删除信道的删除概率是多少，只要接收端接收到足够多的符号就能进行完全译码。数字喷泉码^[56]，像一座喷泉般能够持续而不间断的对要发送的数据随机进行指定运算，继而向信道中发送任意多数量的编码数据，将该编码数据具体化成小球，如 M 个，而接受者如同一定数量的水杯，如 N 个， N 要大于等于 M ，只要保证每个水杯中都有一个小球，即可精确的得到原输入数据。

2.2.3 常见的喷泉码

LT 码 (Luby Transform codes) 是第一类码率不受限制的实用喷泉码，同时，它还具有编译码算法较简单，译码开销较小，编译码复杂度较低等特点，为此，得到了国内外学者的广泛关注。

LT 码的编码过程可以看成是 k 个二进制输入符号的线性映射获得的, 该线性映射如下:

$$F: x \mapsto (y_j)_{j \in N} \quad (2.1)$$

其中, $y_j = Y_j(x) = \bigoplus_{i \in S_j} x_i$, $S_j \subseteq N_k = \{1, 2, \dots, K\}$, $j \in N$ 。编码过程即随机产生一定原始符号, 根据度分布函数选择相应个数的原始符号进行模二和操作, 编码过程图 2.3。

设原始数据符号的个数为 K , 平均经过 $O(\ln(k/\delta))$ 次运算生成一个编码符号, 每个编码符号都是独立的, 平均经过 $O(k * \ln(k/\delta))$ 次异或操作就能生成任意的 $k + O(\sqrt{k} \ln^2(k/\delta))$ 个编码符号中, 以 $1 - \delta$ 恢复出 K 个原始数据符号。

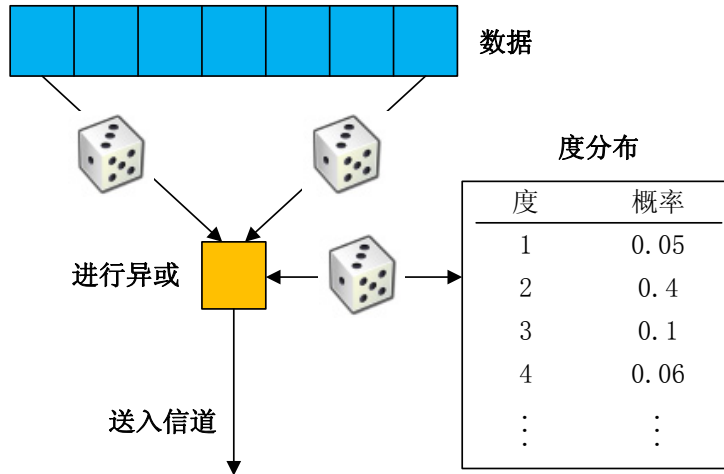


图 2.3 LT 码编码过程

第二种实用的喷泉码码型是 Raptor 码, 是 Amin Shokrollahi 在第一类实用喷泉码——LT 码的基础上提出来的。Raptor 码的基本思想是在进行 LT 码编码之前进行预编码处理, 将经过预编码处理后的新的节点作为相应的原始编码分组, 然后再按照 LT 码的编码过程进行编码。实际上, 可以将 Raptor 码看成是一种级联码。而译码过程则是先将得到的编码分组看做是 LT 码, 按照 LT 码的译码过程进行译码, 得到中间符号后, 在利用相应的纠错码进行解码, 以恢复原始数据。

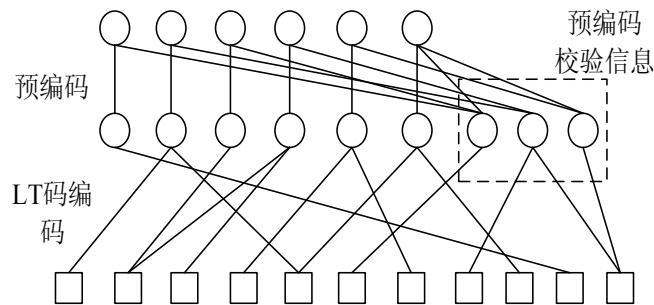


图 2.4 单层校验预编码

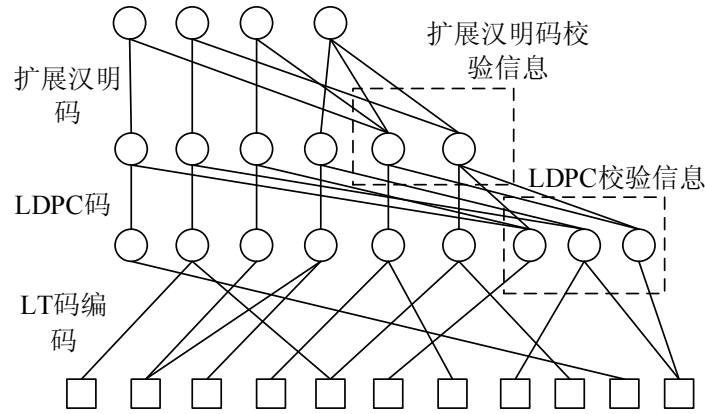


图 2.5 多层检验预编码

按照预编码层数的不同可以分为单层校验预编码和多层校验预编码。如图 2.4 和图 2.5 所示。

2.3 度分布

喷泉码的度分布的性能直接影响着编译码的复杂程度和译码的成功率。通常，性能优良的度分布满足的条件有：

- (1) 编码符号的个数尽可能的少，即较低的译码开销；
- (2) 编码符号的平均度数尽可能的少，即编译码代价较小。

度分布^[12] $\Omega = [\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_D]$ 表示选取度 d 的概率是 Ω_d 。LT 码编码度分布函数的表式是：

$$\Omega(x) = \Omega_1 x + \Omega_2 x^2 + \dots + \Omega_D x^D \quad (2.2)$$

常见的度分布如下：

设 K 为原始分组数目， M 为编码数据数目，每个数据分组为一个输入符号。

- (1) 均匀分布：

$$\rho(d) = 1/K, d = 1, 2, \dots, K \quad (2.3)$$

表 2.1 均匀分布概率表

度的数值	概率
1	1/100
2	1/100
.....
100	1/100

可将其动态的比喻成一个水滴滴水的画面，即将 m 滴小水珠滴到 n 只水杯中，求每只水杯中至少存在一滴水的可能性的的大小，其中每滴水是随机滴下的，且相互之间

无影响。以输入度值 $d=100$ 为例，将输入度值依次代入，得到均匀分布概率表，见表 2.1。

该种分布总的操作数量最小，但要求译码失败率足够小时，所需编码符号值过大，以致编译码效果不好，通常不予采用。

(2) 度 1 分布:

$$\rho(d)=\begin{cases} 1 & d=1 \\ 0 & d=2,3\cdots k \end{cases} \quad (2.4)$$

均匀分布只有在度数为 1 的时候有概率分布，在其他度数上的概率均为 0。其概率分布如表 2.2 所示。

表 2.2 度 1 分布概率表

度的数值	概率
1	1
2	0
.....
100	0

(3) 理想孤波分布:

$$\rho(d)=\begin{cases} \frac{1}{k} & d=1 \\ \frac{1}{d(d-1)} & d=2,3\cdots k \end{cases} \quad (2.5)$$

任何一个数据分组都是一个独立的个体，例如存在有 L 个输入数据等待编码处理时，度值 m 的编码分组被恢复的可能性不受其他分组的影响，该分布的理想效果是有效数据的长度达到最大，并且兼顾着较低的译码复杂度，但是会致使度值 1 的编码分组存在的概率过小而使译码进程受限制。表 2.3 为理想孤波分布的概率表。

表 2.3 理想孤波分布概率表

度的数值	概率
1	1/100
2	1/2
3	1/6
.....
100	1/9900

(4) 鲁棒孤波分布:

定义: $S = c \ln\left(\frac{k}{\delta}\right) \cdot \sqrt{k}$, 其中 δ 为译码得到预先设定的分组个数时的失败容限, S 为译码时度 1 校验结点的平均值, 并定义了 $\tau(d)$ 如下

$$\tau(d) = \begin{cases} \frac{s}{k} \cdot \frac{1}{d} & d = 1, 2, \dots, \left(\frac{k}{s}\right) - 1 \\ \frac{s}{k} \ln\left(\frac{s}{\delta}\right) & d = \frac{k}{s} \\ 0 & d > \frac{k}{s} \end{cases} \quad (2.6)$$

把上述理想孤波分布加入 $\tau(d)$ 中, 化简可得鲁棒孤波的数学表达式 $u(d)$ 如下:

$$\beta = \sum_{d=1}^k \rho(d) + \tau(d) \quad (2.7)$$

$$\mu(d) = (\rho(d) + \tau(d)) / \beta \quad d = 1, 2, 3 \dots k \quad (2.8)$$

以 $d=100$ 为例, 将输入度值依次代入, 得到鲁棒孤波分布概率表, 见表 2.4。

表 2.4 鲁棒孤波分布概率表

度的数值	概率
1	0.0195
2	0.4793
3	0.1614
.....
100	9.5816×10^{-4}

2.4 度分布函数仿真

针对不同的度分布表达式, 给出度数和概率分布仿真结果, 分别如图 2.6-2.9 所示。

从各个度分布函数的概率分布仿真结果图中可以看出均匀分布各个度值的选取概率是一样的, 度 1 分布仅仅有度数为 1 的选择概率, 且为 1, 这样并不利于原始分组全部参与编码。因此, 从这里可以推断这两个分布的效果并不会很好。

仔细观察理想孤波分布和鲁棒孤波分布的概率仿真图可以看出, 二者的差别并不是很大, 鲁棒孤波分布度值为 1 的概率高于理想孤波分布, 并在后面稍大些的度值有一个突出的较高概率, 而理想孤波分布在度值为 2 时的概率略高于鲁棒孤波分布, 这样的差别会对喷泉码度分布产生怎样的影响, 在本文后续的文章中会得到结果。

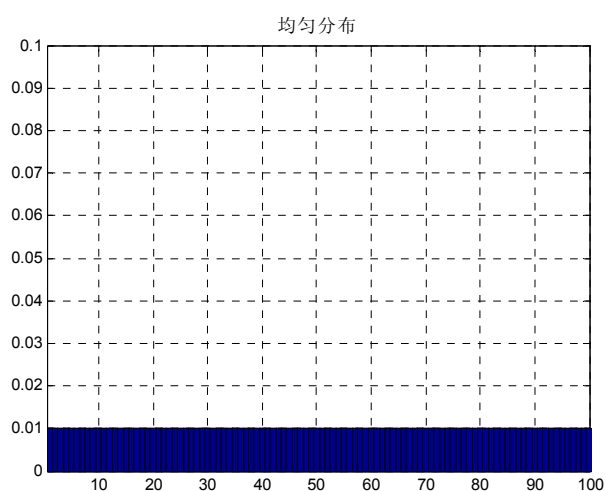


图 2.6 均匀分布

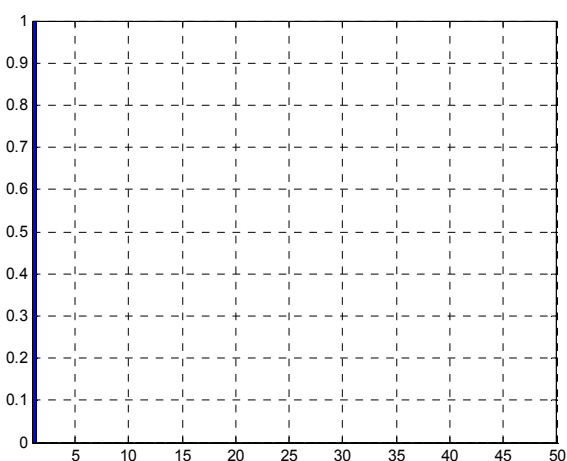
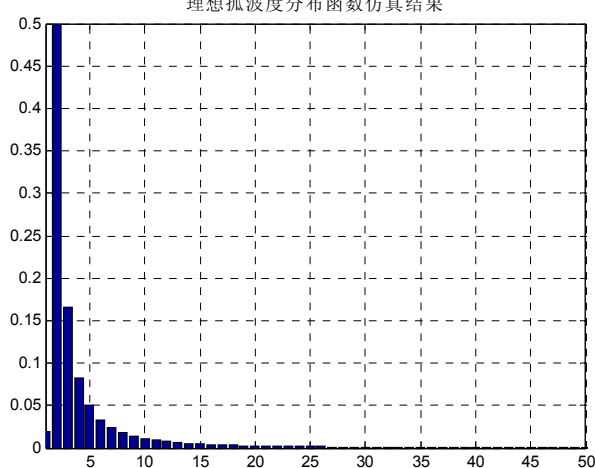
图 2.7 度 1 分布
鲁棒孤波度分布函数仿真结果

图 2.8 理想孤波分布

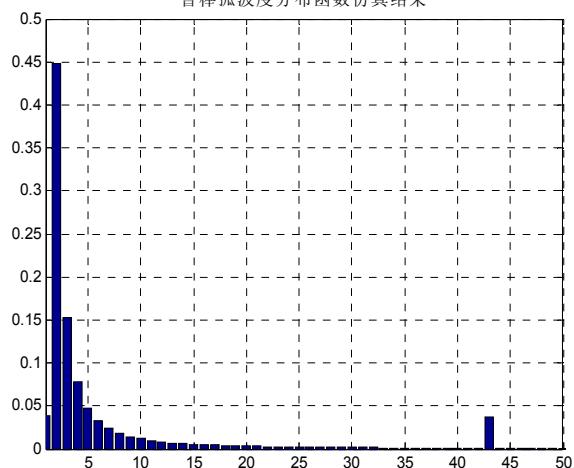


图 2.9 鲁棒孤波分布

2.5 本章小结

本章首先介绍了删除信道的概念,简单阐述了喷泉码的基本数学模型以及常用的使用喷泉码码型,最后介绍了几种常见的度分布函数。对喷泉码基本理论进行了学习,为本文后续的研究工作奠定了基础。

第三章 喷泉码编译码方案

3.1 喷泉码的编码

2002 年, Luby 提出了第一种喷泉码——LT 码, LT 码具有较好的应用前景, 得到了国内外学者的青睐。

在介绍喷泉码编译码方法之前首先对本文中遇到的一些参数进行说明: 原始分组的个数用 K 表示, 进行喷泉码编码过后的编码分组个数用 N 表示, 相应的度数用 d 表示。

以 LT 码为例, 确定度分布 d 后, LT 码的编码过程如下^[56]:

- (1) 首先按照度分布函数随机选择一个度 d ;
- (2) 从原始数据分组中等概率的随机选取 d 个数据;
- (3) 将选择的 d 个数据进行异或运算, 得到编码分组的数据;

重复以上步骤源源不断的产生编码分组。

图 3.1 介绍了喷泉码编码的过程, 假设编码过程中的度值选取为 $\{2, 1, 2, 2, 3, 1, \dots\}$ 。

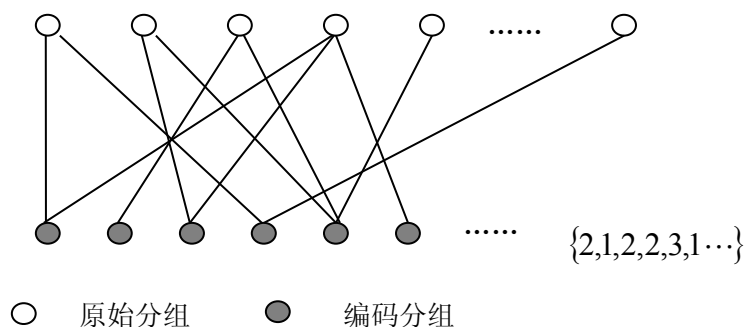


图 3.1 LT 码编码过程

当选择的度数为 2 时, 随机的从原始分组中选择 2 个原始符号进行异或的到编码分组, 同时, 当选择度数为 3 时, 随机的从原始分组中选择 3 个原始符号进行异或操作得到编码分组, 就这样按照度分布函数确定度数源源不断的产生编码分组。

第二章重点介绍了几种度分布函数, 从相应的公式表达以及仿真结果可以看出, 度分布的结果是某一度值对应的概率值, 那么怎么根据概率值得到相应的度分布呢?

在实际程序的仿真过程中, 利用 matlab 自带的随机函数 rand 产生随机序列。具体方法如下: 根据鲁棒度分布函数计算出每个度值相应的概率, 设定度的分布概率区

间，将 $(0,1)$ 区间划分为 K 个子区间，取长度为 K 的随机序列进行度值的选取，通过判定随机序列中每一个值所在的区间，获取相应的度值 d ，以得到度值序列，方法见图 3.2。具体编码流程图见图 3.3。

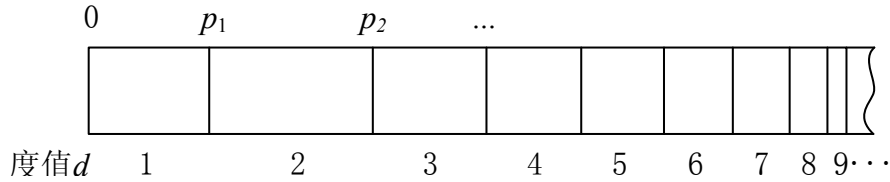


图 3.2 度分布的选择方法



图 3.3 编码过程流程

LT 码的编码过程还可以由生成矩阵的方式进行表述：令 S 表示输入符号集， G 表示编码过程中的生成矩阵， T 表示编码符号集，编码过程即可简单的表示为

$$T = G \cdot S \quad (3.1)$$

从中可以看出，编码过程就是输入符号和生成矩阵的线性运算。

在实际传输当中，分为显式传递和隐式传递两种方式。显式传递在编码包中加上编码头部，这种方式增加了开销；相反，隐式传递则借助一定算法进行传递，这样就节省了编码头部的开销，提高了传输效率。

3.2 喷泉码的译码

在介绍 LT 码的编码方法时候，从两个角度进行了表示、介绍。同样，这里也给出相对应的两种译码的表达方案。

LT 码的译码过程有两种算法：置信传播迭代译码算法（BP 算法）^[57]和高斯消元法（GE 算法）。其中，在译码符号个数较多的情况下，高斯消元法的运算复杂度非线性增加，这样会导致译码效率很低，为此，经常采用置信传播迭代译码算法（BP 算法）进行译码。

3.2.1 BP 译码算法

为了将译码思路表现的更加直观、易懂，借助图进行表述。如图 3.5 所示，其中，黑色节点代表原始数据分组，即译码后的结果，白色节点代表经过喷泉码编码后的结果，中间的连线代表编码分组是由原始分组经过模二和运算得到的。

下面介绍LT码的译码过程^[58]：

（1）首先，找到编码分组中度数为 1 的编码分组，将与其相连的信息比特恢复，若不存在度为 1 的分组，则译码停止。

（2）将上一步骤中已恢复的信息比特与其相连的编码分组进行异或，使其度数减 1 生成新的编码分组。如果在此过程中，某个编码分组的度数减少为 1，则该编码分组被释放，同时获得新的原始数据分组，若未能出现新的度数为 1 的编码分组，则译码停止；

（3）重复步骤 1、2，直至译码停止，若所有原始分组都已恢复，则译码成功，否则译码失败。具体译码流程图如图 3.4。

以一个例子具体说明一下喷泉码译码的过程。具体过程如图3.5所示。

（1）首先寻找度为 1 的结点，如图（a）所示，将相应的值赋给 S1，也就得到了 S1 的值为 1，如图（b）；

（2）将得到的 S1 的值与其相连的结点进行异或，删除与 S1 相连的边，如图（c）；

（3）继续寻找度为1的结点，即重复执行步骤（1），（2），继续进行译码，如图（d），（e）；

（4）当所有的结点都被恢复时，译码成功，得到图（f）。

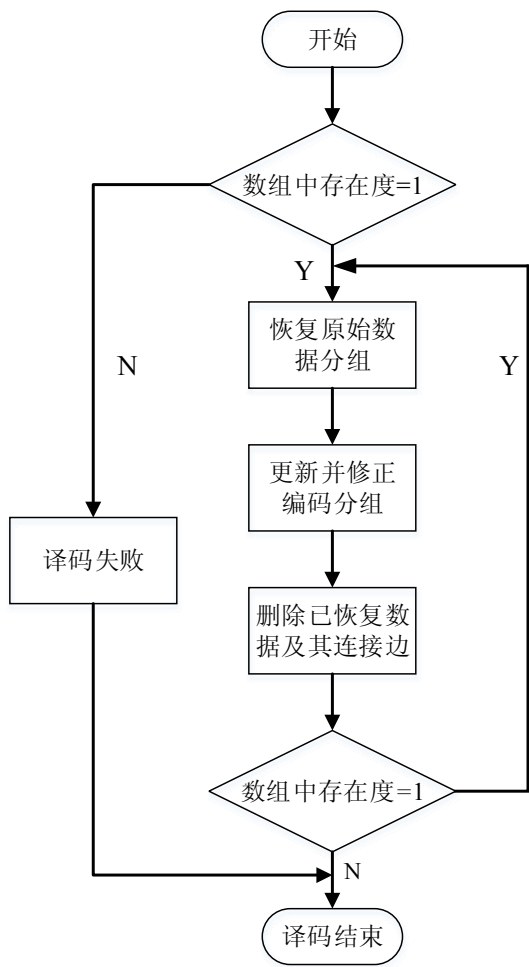


图 3.4 译码过程流程图

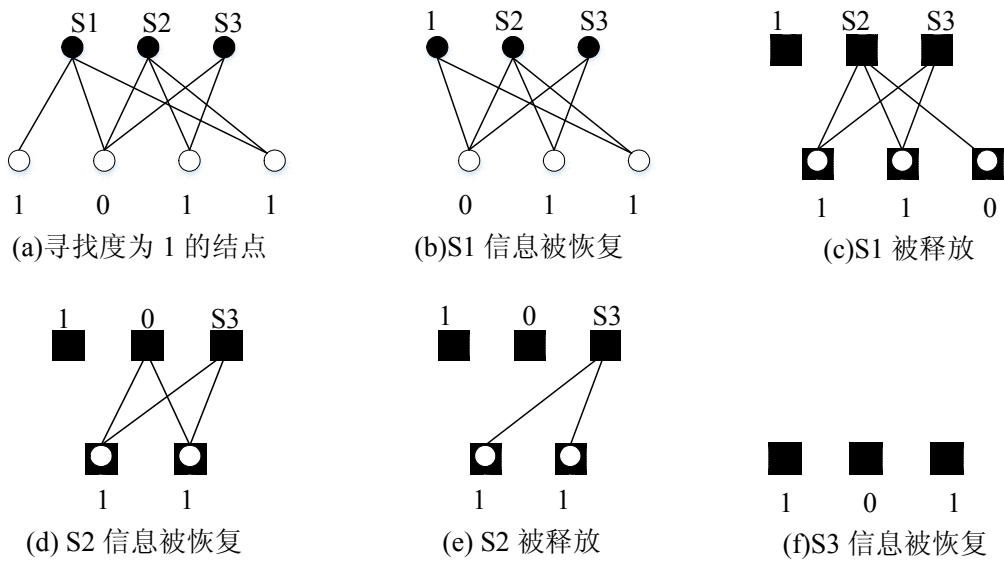


图3.5 LT码译码过程示例

从上述的译码过程我们可以看出，平均度数小的话，编码过程的运算量就会减少，

也就是说编码过程会简单些，同时，译码停止的可能性也就小。但是，从另一个角度考虑，如果平均度较小，为了编码过程能够包含所有的原始分组信息，就增加了冗余信息。基于上述原因，就必须寻找一个适合的度分布才能增加喷泉码编译码的成功率。

3.2.2 高斯消元译码算法

第二种译码方法是针对前面生成矩阵编码方式而言的，叫做高斯消元译码法。

原始数据单元表示为：

$$S_i = \sum_{i=1}^N T_i \oplus G_{im}^{-1} \quad (3.2)$$

其中：1. S_1, S_2, \dots, S_k ：K 个原始数据单元；

2. $G_m = [G_{1m}, G_{2m}, \dots, G_{km}]^T$ ：第 m 时刻随机生成矩阵；

3. T_1, T_2, \dots, T_m ：第 1~m 时刻生成的编码。

其具体步骤如下：

(1) 引入收到的编码数据，从而对生成矩阵进行扩展

$$G' = [G^T, T] \quad (3.3)$$

(2) 经过矩阵的行列变化得：

$$G' = \begin{bmatrix} I_{k \times k} & T'_{k \times 1} \\ 0_{(n-k) \times k} & 0_{(n-k) \times 1} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

(3) 若 $T'_{k \times 1}$ 和接收端收到的编码数据相同，则高斯译码成功，否则继续接收更多的编码数据再进行上述过程。

3.2.3 两种算法的缺憾

BP 译码算法得以进行的前提就是存在度 1 的编码数据单元，当不存在度 1 的编码数据单元时就意味着算法的结束，将不能正确的使得原始数据全部恢复出来，造成译码的失败率增加。因此，保证有足够多的度 1 数据单元的存在是关键，传统意义上的译码方法通过不断地接收编码分组的办法来解决这个问题，从某种程度上说这个办法虽然行之有效，但无形中却加大了译码开销，这是我们所不希望的，也是我们要进行改进的地方。而对于高斯消元法而言，在输出符号较多的情况下，与传统的 BP 译码相比，高斯消元法具有大运算量大，高复杂度的缺点，程序运行速度很慢。

3.3 影响因素对喷泉码编译码性能的影响

在介绍喷泉码编译码方案的时候，认识到度分布函数是影响喷泉码编译码的一个重要因素。而喷泉码是一种无码率码，只要接收到足够多的编码个数就能成功译码，得到原始分组，可见，译码开销对喷泉码编译码性能也有一定的影响。本节就喷泉码编译码影响因素进行研究。

3.3.1 度分布

下面就常见的度分布对喷泉码编译码结果的影响进行实验分析。常见的度分布函数包括均匀分布、度 1 分布、理想孤波分布、鲁棒孤波分布。其中 $K=1000$ ，逐渐增大 N ，即译码开销 γ 得到仿真数据结果如下，其中 BER 都是 10^{-4} 数量级的。

可以看出不同度分布对误码率的影响相差较大，在较小译码开销时，理想孤波分布和鲁棒孤波分布的误码率要比均匀分布、度-1 分布差得多，但是当随着度分布的增加，鲁棒孤波分布时的误码率不断下降， $\gamma \geq 1$ 时尤为明显，此时，鲁棒孤波分布的误码率要远小于均匀分布和度-1 分布。从这里还可以看出，理想孤波分布中波动的过程，因此，理想孤波分布稳定性较差。从大量数据仿真结果可知，鲁棒孤波分布性能最好。

表 3.1 度分布对编译码结果的影响

度	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25	1.30	1.35
均匀分布	4487	4265	4075	3856	3684	3495	3315	3173	2897	2848	2716	2589
度 1 分布	4482	4261	4063	3877	3680	3499	3329	3163	2995	2875	2738	2597
理想孤波分布	9976	9949	9919	9817	9534	9113	8544	6318	7184	6162	6987	3593
鲁棒孤波分布	9716	9663	9643	9302	9116	8192	5618	2845	1290	156	0	0

表 3.1 (续)

度	1.40	1.45	1.50	1.55	1.60	1.65	1.70	1.75	1.80	1.85	1.90	1.95
均匀分布	2473	2361	2219	2140	2039	1920	1826	1729	1694	1566	1490	1448
度-1 分布	2487	2338	2249	2105	2024	1924	1838	1731	1663	1553	1504	1432
理想孤波分布	6187	4784	3994	3195	4187	3797	4197	1598	2399	3398	1999	1400
鲁棒孤波分布	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

3.3.2 鲁棒孤波分布参数研究

从上述研究结果可以看出,鲁棒孤波分布性能最好。而鲁棒孤波分布除了理想孤波分布以外,还加入了一部分参数。鲁棒孤波分布中有一系数 c , c 的不同将导致最后的鲁棒孤波分布不同,这里对 c 的影响进行研究。此外,鲁棒孤波分布还有一个参数是 δ , 通过阅读国内外文献, δ 对喷泉码编译码结果的影响并不明显,这里选取经验值 $\delta = 0.05$ 。因此,在这里不再讨论。

表 3.2 $\delta = 0.05$ 时不同 C 时 LT 码误码率

C	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25	1.30	1.35
0.008	9908	9897	9831	9801	9335	7617	6393	2732	1977	596	596	593
0.015	9863	9834	9746	9650	9359	7480	3045	1549	1365	593	197	195
0.028	9787	9731	9624	9437	8916	8293	3933	1674	562	0	0	0
0.029	9760	9684	9610	9453	9192	8384	3153	688	191	0	0	0
0.030	9759	9732	9664	9580	9163	7995	3032	857	186	0	0	0
0.031	9772	9681	9612	9519	8986	8409	3193	887	197	0	0	0
0.04	9691	9687	9546	9362	8962	8659	5273	917	207	0	0	0
0.05	9695	9602	9572	9333	9006	8537	7024	2441	294	0	0	0
0.06	9683	9592	9483	9222	9020	8316	7481	3227	444	0	0	0
0.1	9605	9504	9404	9224	9064	8690	8349	7516	4587	263	0	0
0.5	9329	9269	9201	9118	9022	8941	8838	8744	8553	8456	8256	8145
0.9	9301	9246	9159	9111	9018	8963	8854	8780	8685	8551	8444	8418

从结果中可以看出,对于 $K = 2000, \delta = 0.05$ 的情况,当参数 c 为较小值时,不管译码开销 γ 为较大值还是较小值,LT 码的误码率都较大,下降缓慢;参数 c 为较大值时,不管译码开销 γ 为较大值还是较小值,LT 码的误码率都较大,下降缓慢;当 $c=0.03$ 左右的时候,在译码开销 γ 较小时,误码率下降较缓慢,但随着译码开销的增大,误码率曲线变得很陡峭,误码率迅速下降。从此中可以看出 c 的值不宜太小和太大,在 0.03 左右较适宜。

3.3.3 信息序列长度

信息序列的长度 K 也是一个影响因素,这里针对参数 K 对喷泉码编译码结果的影响进行研究,上一小节得出当 $c=0.03$ 左右时误码率下降较快,误码率较小,这里选

取 $c=0.03$ 。当 $c = 0.03, \delta = 0.05$ 时, 改变 K 和译码开销 γ 时的误码率 BER 见表 3.3。

表 3.3 不同信息序列长度对编译码结果的影响

K	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25	1.30	1.35	1.40
500	9680	9478	9338	9373	8902	8465	6706	4956	2903	1833	1137	570	0
1000	9704	9619	9638	9379	9063	8488	6649	2649	928	198	156	0	0
3000	9817	9743	9619	9476	9232	8112	2125	572	191	0	0	0	0
5000	9821	9771	9666	9571	9019	7259	532	0	0	0	0	0	0

从仿真结果得出对于 $c = 0.03, \delta = 0.05$ 的情况, 当 $\gamma < 1$ 时, LT 码的误码率随着参数 K 的增大而略有增大; 当 $\gamma \geq 1$ 时, LT 码的误码率随着参数 K 的增大而明显减小, 误码率曲线变得更加陡峭, 尤其当 γ 远离 1 时, 随着参数 K 的增大, 误码率(BER)下降得更快。

3.3.4 译码开销

所谓译码开销是指在译码过程中接收端接收到的编码分组个数 N 与原始分组个数 K 之间的一个比值。在研究上述几个影响因素的过程中可以看出随着译码开销的增大, 误码率都是下降的。

当选取鲁棒孤波分布, 其中 $c = 0.03, \delta = 0.05$ 时, 分布选取 $K=100$ 和 $K=1000$ 时, 逐渐增大译码开销 γ 时的译码率, 如下表 3.4 所示。

表 3.4 译码开销对编译码结果的影响

γ	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9
100	13.1	25	59.6	71.7	72	90.2	100	100	100
1000	42.9	62.8	90.8	100	100	100	100	100	100

从仿真结果可以看出, 随着译码开销的增加, LT 码的译码成功率越来越高, 并且当输入的原始数据较大时, 译码效果更好。

此外, 针对特殊情况, 全零和全 1 的情况也进行了仿真, 得到的仿真结果的规律和随机产生 0,1 序列的结果是相同的。

3.4 本章小结

本章首先从两个角度简单介绍了喷泉码编译码方案, 并对喷泉码编译码方案的影

响因素：度分布、鲁棒孤波分布参数、原始信息符号长度以及译码开销等因素进行了研究。从大量研究数据结果得出，采用鲁棒孤波分布的编译码成功率较高。因此，在之后的研究中将采用鲁棒孤波分布及确定的相应参数。

第四章 基于混沌映射的喷泉码编译码方案的研究

4.1 引言

喷泉码的编译码性能直接影响到喷泉方案的性能。现有的喷泉码编译码方式大都采用随机编码算法，也就是说编码包的生成矩阵只是一个随机矩阵，并不一定是满秩的，并不保证译码一定全部成功。因此，现有的结果还存在着改进的余地。本文将混沌思想融入到喷泉码编译码方案中，给出了一种基于混沌映射的喷泉码编译码方案，对 LT 码的编译码进行改进。

4.2 混沌映射

混沌映射常用于产生伪随机数。近年来，混沌已被尝试运用在通信领域，如保密通信^[59-61]、语音及图像处理^[62]等。混沌映射产生的伪随机序列具有均匀性和遍历性。文献[63]提出了一维 Markov 映射（One-dimensional Markov Map, ODMM），其迭代式如下：

$$x_{n+1} = f(x_n) = \text{mod}(a/x_n, b) \quad (4.1)$$

式中， $x_n \in (0, b)$ ； $a \in [1, \infty)$ ； $b \in (0, 1]$ ； $n = 0, 1, 2, \dots$ ； $\text{mod}(\bullet, b)$ 为模 b 函数。文献[64]利用该映射产生均匀分布的伪随机序列，提高了 LT 码编译码的成功率。但是 ODMM 存在着下面不足之处：

(1) 该映射对初始值比较敏感。如果 a/x_n 的结果是整数时，例如当初始值选择 $x = 0.2$ ， $a = 20$ ， $b = 1$ 时，迭代后得到的序列不再是具有随机性，即将失去随机性。具体仿真图见图 4.1。从图 4.1 中 a 图可以看出，当初始值选择， $x = 0.2$ ， $a = 20$ 时，一维 Markov 映射已经失去了随机性。

(2) 文献[64]中指出当 b 趋近于零或者 a 趋向于无穷时，这种映射的分布才趋于均匀分布。而在 $b = 1, a > 10$ 时，如果 a 不够大，均匀性会变差。

4.3 改进的无限折叠混沌映射

针对前面一维无限折叠映射存在的缺陷进行分析，关键是避免初始值 x_0 使得

a/x_n 部分为整数。因此，在一维无限折叠映射的基础上引入 Logistic 混沌映射。具体改进的无限折叠混沌映射（Improved Chaotic Map with Infinite Collapses, ICMIC）迭代式如下：

$$x_{n+1} = f(x_n) = \text{mod}(a/x_n + \lambda x_n(1-x_n), b) \quad n=0,1,2\dots \quad (4.2)$$

式中， $x_n \in (0, b)$ ； $a \in [1, \infty)$ ； $b \in (0, 1]$ ； $n = 0, 1, 2, \dots$ ； $\text{mod}(\cdot, b)$ 为模 b 函数， λ 是非线性差分方程的系数。当 $\lambda \in (3.57, 4)$ 时，Logistic 映射进入混沌状态^[35]。Logistic 映射输出随机数都在 0~1 之间。正是因为 logistic 混沌映射产生的随机数都在 0~1 之间，这样即使 a/x_n 为整数，也会因为加上了 0~1 范围内的一个随机数，而避免了输出为零的情况。针对 ODMM 存在的两个缺点，改进算法对存在的两个缺点的都有一定的改进。具体对比图见图 4.1，图 4.2。

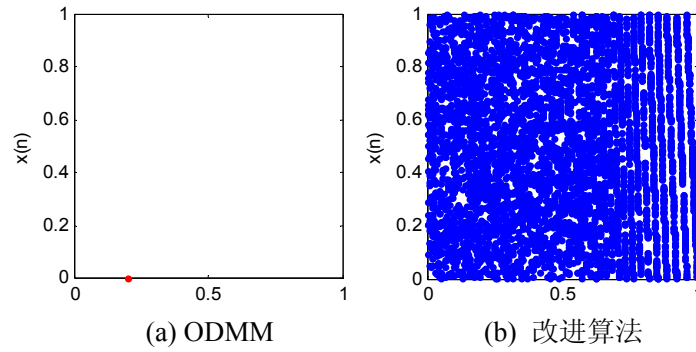


图 4.1 两种映射针对初始值的仿真对比

图 4.1 中 (a) 是针对 ODMM 初始值敏感性的仿真，(b) 是改进算法对初始值的敏感性仿真。可以看出，当初始值选择 $x = 0.2$ ， $a = 20$ 时，一维 Markov 映射已经失去了随机性，而改进的算法则没有失去随机性。改进的算法解决了 ODMM 对初始值敏感的问题。

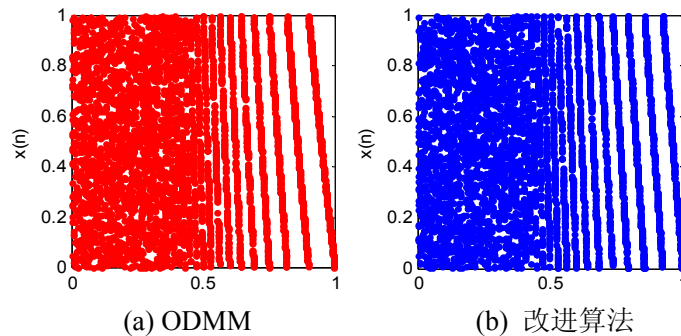


图 4.2 两种映射针对均匀性的仿真对比

图 4.2 中图是针对 ODMM 均匀性的仿真，b 图是改进算法均匀性的仿真。当选择不敏感初值，从图 4.2 中可以看出，ODMM 均匀性不如改进的算法好。

4.4 基于改进的无限折叠混沌映射的喷泉码编译码算法

设原始数据分组长度为 K ，度分布函数采用鲁棒孤子分布，具体编码算法如下：

(1) 首先，根据鲁棒度分布函数计算出每个度值相应的概率，设定度的分布概率区间，将 $(0,1)$ 区间划分为 K 个子区间，取长度为 K 的 ICMIC 序列 1 进行度值的选取，通过判定 ICMIC 序列中每一个值所在的区间，获取相应的度值 d ，以得到度值序列。

(2) 将 $(0,1)$ 区间等划分为 K 个子区间，每个区间对应一个原始数据分组。在 (1) 中确定度值 d ，根据 ICMIC 序列 2 选取前 d 个随机数对应的各个区间，选择与区间相对应的原始的 d 个数据分组，将它们进行异或，得到编码分组。

(3) 重复上述步骤，根据度分布依次选择对应的数据进行编译，输出编码后的数据。

需要说明的一个问题是：为了使得原始编码分组中数据更好的被覆盖，对 ICMIC 序列 2 随机数的使用采取累计的原则，即下一个编码分组在上一个编码分组的基础上继续向后累加进行。例如，上一个度值为 3，选取了 ICMIC 序列 2 中的前 3 个数进行判断、确定选取原始的分组；而下一次度值为 2，则顺延选取序列中的第 4、5 个数值进行判断。

而在译码端，译码过程和 LT 码的译码过程类似，都是通过 BP 算法，得到译码数据。

4.5 实验结果与分析

本文采用 Matlab 软件对基于改进的无限折叠混沌映射 LT 码编译码进行了仿真实验，并对采用随机函数、ODMM 方案以及改进的无限折叠混沌映射方案的 LT 码编译码性能进行了实验结果的比较。仿真实验当中，选取原始数据分组个数为 1000，采用鲁棒孤子分布，选取 $c = 0.03, \delta = 0.05$ 接收编码个数为 N ，从 $N=1000$ 开始，以 50 为步长值，其度值和参与编码的原始分组分别采用随机函数、ODMM、改进的无限折叠混沌映射进行判断、选取。其中 ODMM 的参数选取为： $x_0 = 0.3198, a = 1500, b = 1$ 。无限折叠混沌映射参数选取 $\lambda = 3.9999, x_0 = 0.3198, a = 1500, b = 1$ 仿真结果得到三种方法在不同译码开销的情况下译码的成功率，如图 4.3 所示。

图 4.3 中 a、b 为采用随机函数的仿真结果，c、d 为采用 ODMM 的仿真结果，e、f 为采用改进的无限折叠混沌映射的仿真结果。两次调用随机函数得到的结果不相同，且结果相差较大，波动较大，随机性较明显。而两次运用 ODMM 和改进的无限折叠

混沌映射得到的结果趋于一致，二者的性能稳定。

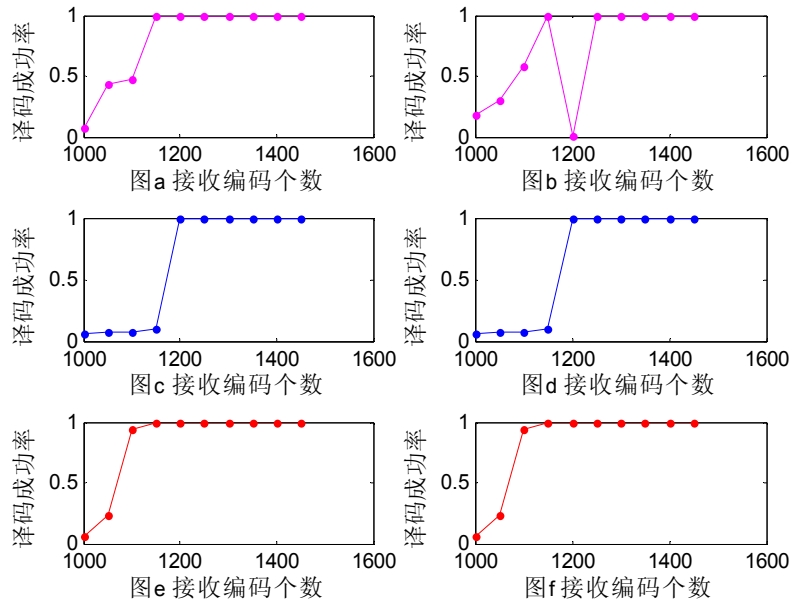


图 4.3 三种算法译码成功率对比

由图中还可以看出，在接收编码个数足够多时，三种方法均能成功译码，但在接收编码分组较少时，三者却有显著差别。相比较而言，采用 ODMM 实现的喷泉码编译码性能优于随机函数实现的喷泉码编译码性能，采用改进混沌映射实现的喷泉码编译码性能优于 ODMM 实现的喷泉码编译码性能。采用随机函数随机性大，波动较大。对于后两者有遍历性和均匀性，具有很好的稳定性。

对比后面两种方法，可以看出 ODMM 方法在接收编码分组大于 1200 之后，能够保证成功译码，而本文给出的改进无限折叠混沌映射方法在接收编码分组大于 1150 之后就能保证成功译码，并且在接收编码分组较小的时候的误码率低于其他两种方法，这是其他两种方法不能媲美的。

不同的编码长度也会影响到喷泉码编译码的性能。下面从这个角度检验一下改进的算法是否有效。对改进算法、ODMM 方案以及随机函数三种方案实现 LT 码编译码方案进行仿真比较，得到不同编码个数的仿真结果。分别选择 $K=1000$ 和 $K=2000$ ，得到图 4.4 的仿真结果。

图 (a) 是对 $K=1000$ 时三种方法的编译码结果仿真，图 (b) 是对 $K=2000$ 时三种方法的编译码结果。从图中可以看出，采用随机函数编译码的结果表现出了很大的波动性，译码成功率有很大波动，而改进算法和 ODMM 算法具有稳定性。当编码个数不同时，比较三种方案的性能，改进算法的性能要优于其他二者的性能，有较高的编译码成功率。

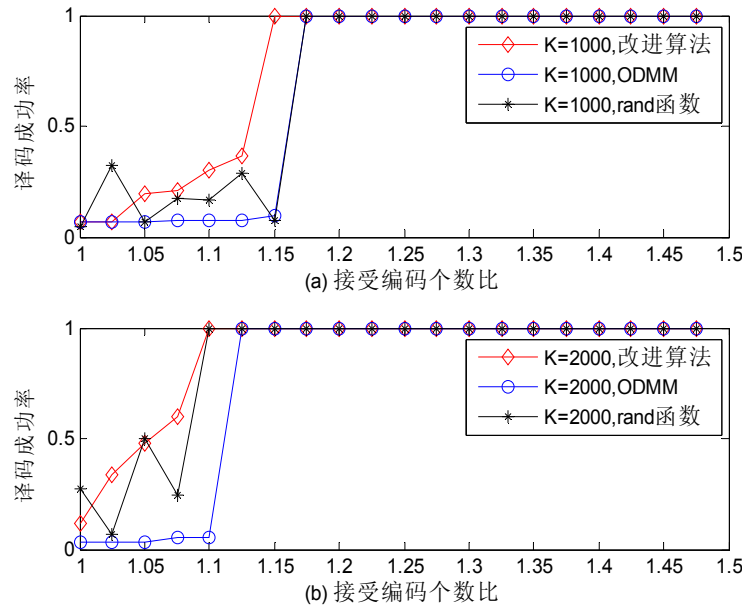


图 4.4 不同编码个数三种算法性能对比

4.6 本章小结

本章首先介绍了混沌映射，在此基础之上，按照算法传输的角度，即隐式传输的方法，给出了一种基于混沌映射的喷泉码编译码方案，从仿真结果可以看出，该方案对喷泉码编译码成功率有了一定的提升。

第五章 喷泉码不等差错保护方案的研究

5.1 引言

随着喷泉码研究的热潮以及理论知识的不断发展,基于喷泉码技术的不等差错保护方案的研究也得到了国内外学者的广泛青睐。UEP 方案的主要目的是在传输过程中,对具有较高重要级的数据加以重要保护。经典喷泉码不等差错保护方案的基本思想都是给予较重要数据较大的选取概率,以增加重要数据编码的概率。典型的喷泉码方案主要包括:设置权重因子的 UEP 方案,EFW 方案以及复制窗方案。这几种方案的根本都是对重要数据进行了较多次的选取,从而增加了重要数据被选中的概率。下面对这几种方案进行详尽的介绍。为了便于问题的说明,均采用两个重要等级。

5.2 基于 LT 码设置权重因子的 UEP 方案

最先研究 UEP (Unequal Error Protection) 特性的喷泉码的设计问题的是 Nazanin 和 Fekri, 他们的基本思想是想办法将最重要数据的选择概率大于次等重要数据的选择概率,最后终于研究出了典型的 UEP-LT 方案。

该方案通过设置权重因子来提高重要数据被选中的概率,提出了一种典型的 UEP-LT 码设计方案。

基本思想: 设输入的原始符号共 K 个, 其中, 重要信息比特 (Most Important Bits, MIB) 的个数为 K_1 , 它需要较高的保护等级, 所占比例为 $a = K_1/K$; 次要重要原始信息比特 (Least Important Bits, LIB) 的数量为 K_2 , 其中 $K_2 = K - K_1$ 。定义 $p_1 = k_M/K$ 、 $p_2 = k_L/K$ 分别是 MIB 和 LIB 数据符号的选择概率。其中 $0 < k_L < 1$, $k_M = (1 - (1 - a)k_L)/a$ 。 $\Omega(x)$ 为度分布函数。

具体编码过程如下:

- (1) 选定度分布函数 $\Omega(x)$, 得到各个编码符号的度数 d ;
- (2) 从重要原始信息比特 MIB 中选择 $d_1 = \min(\lceil (K_1/K)dk_M \rceil, K_1)$ 个信息比特, 从次要原始信息比特 LIB 中选择 $d_2 = d - d_1$ 个信息比特;
- (3) 将 d 个信息比特进行模二求和运算生成一个编码符号。

编码过程示意图如图 5.1:

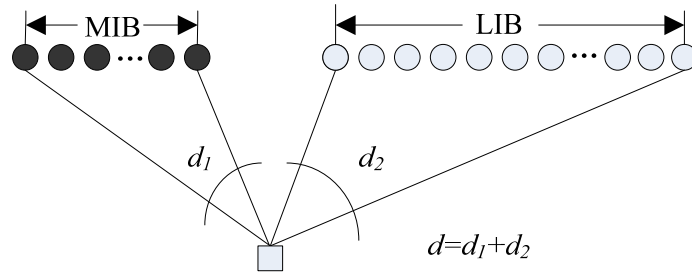


图 5.1 基于 LT 码设置权重因子的 UEP 方案示意图

5.3 基于扩展窗的喷泉码不等差错保护方案

D.Vukobratovi'c 和 V.Stankovi'c 于 2007 年提出了基于扩展窗的喷泉码不等差错保护方案, 该方案的基本思路是利用窗口技术, 将不同重要等级的数据放入到不同窗口, 设置较重要数据窗的选中概率高于次重要数据窗的概率, 从而增加重要数据参与编码的概率, 实现了不等差错保护。

基本思想: 设输入的原始符号共 K 个, 其中, 重要信息比特 (Most Important Bits, MIB) 的个数为 K_1 , 它需要较高的保护等级, 所占比例为 $a = K_1/K$; 次重要原始信息比特 (Least Important Bits, LIB) 的数量为 K_2 , 其中 $K_2 = K - K_1$ 。另外, 定义两个窗 w_1 和 w_2 , 两个度分布函数 Ω_1 和 Ω_2 。具体编码过程如下:

- (1) 将重要原始信息比特 MIB 放入窗 w_1 , 将原始信息比特整体放入窗 w_2 ;
- (2) 设定选择窗 w_1 的概率为 p_1 , 选择窗 w_2 的概率为 p_2 ;
- (3) 若选择窗 w_1 , 根据度分布函数 Ω_1 确定编码度数为 d_1 , 若选择窗 w_2 , 根据度分布函数 Ω_2 确定编码度数为 d_2 ;
- (4) 当选择窗 w_1 时, 从窗 w_1 中均匀随机选择 d_1 个信息符号进行模二和运算, 从窗 w_2 中均匀随机选择 d_2 个信息符号进行模二和运算。

编码过程示意图如图 5.2:

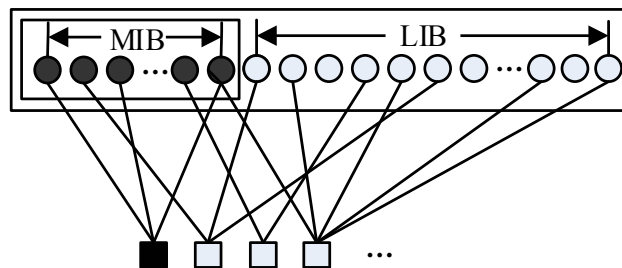


图 5.2 基于扩展窗的喷泉码不等差错保护方案示意图

5.4 采用复制编码方法的不等差错保护方案的研究

复制编码方法的 UEP 方案的基本思路是通过对 MIB 进行较多次的复制, LIB 进行相对较少次的复制, 虚拟的增加了重要数据的个数, 从而增加其在编码过程中被选中的概率。

基本思想: 设输入的原始符号共 K 个, 其中, 重要信息比特 (Most Important Bits, MIB) 的个数为 K_1 , 它需要较高的保护等级, 所占比例为 $a = K_1/K$; 次要重要原始信息比特 (Least Important Bits, LIB) 的数量为 K_2 , 其中 $K_2 = K - K_1$ 。定义 MIB 扩展因子为 RF_1 , LIB 扩展因子为 RF_2 , 满足 $RF_1 \geq RF_2$, 并且定义 EF 为二级扩展因子。

具体编码过程如下:

- (1) 将 MIB 和 LIB 数据分别重复 RF_1 和 RF_2 , 得到虚拟扩展后的 MIB' 和 LIB', 得到 K' 个数据符号, $K' = K_1 * RF_1 + K_2 * RF_2$;
- (2) 将 K' 个数据符号进行二级扩展, 复制 EF , 得到 $K' * EF$ 个数据符号;
- (3) 根据度分布函数 Ω 确定编码符号的度数为 d ;
- (4) 从 $K' * EF$ 个数据中随机均匀选择 d 个数据, 进行模二和运算得到编码符号。

以将 MIB 数据复制两次, LIB 数据复制一次为例, 图 5.3 简单的介绍了该编码过程。

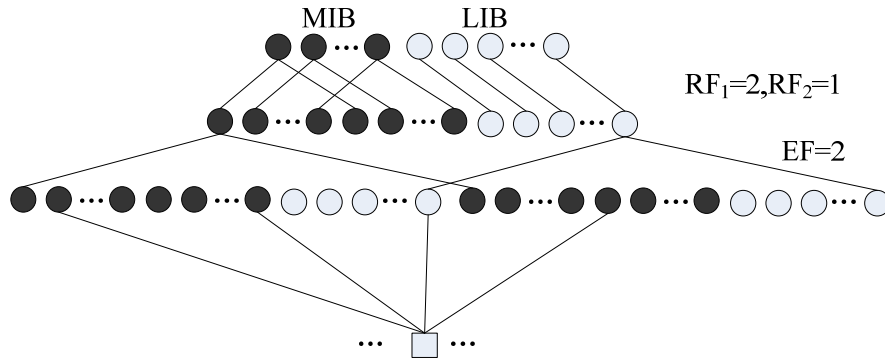


图 5.3 采用复制编码方法的不等差错保护方案示意图

译码结束后, 进行下标转换。其中, j 表示编码符号 $K' * EF$ 中的索引, $j \in \{1, 2, \dots, K' * EF\}$, m 表示原始数据分组的索引 $m \in \{1, 2, \dots, K\}$, 通过下面的转换, 由 j 得到 m , 具体过程如下:

$$m = j \bmod K'$$

$$m = \begin{cases} j \bmod K_1 & 1 \leq j \leq K_1 * RF_1 \\ [(j - K_1 * RF_1) \bmod K_2] + K_1 & K_1 * RF_1 < j \leq K' \end{cases} \quad (5.1)$$

5.5 仿真结果

在第二章和第三章仿真结果的基础上得到的参数如下：度分布采用鲁棒孤子分布。其中，选取 $c = 0.03, \delta = 0.05$ ，根据仿真结果可知这些参数下仿真结果误码率较小。因此，仿真过程采用这些选取好的参数。

5.5.1 UEP-LT 方案仿真

设原始符号个数 $K = 1000$ ， $a = 0.1$ 时， $MIB = 100$ ， $LIB = 900$ ，选取度分布为鲁棒孤波分布，得到仿真结果如图 5.4：

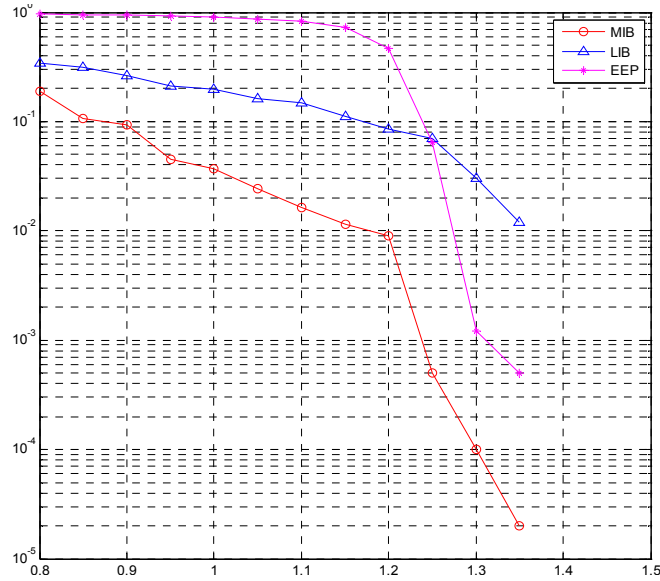


图 5.4 UEP-LT 方案 MIB 和 LIB 误码率曲线

当译码开销比较小的时候，MIB 和 LIB 误码率均比较大，但明显小于之前不分重要等级时候的误码率，也就是说明设置重要等级，即设置权重因子的 UEP 方案要优于之前的编译码方案。此外，随着译码开销的增大，误码率逐渐减小。但是，随着译码开销的增加，EEP 的误码率比 LIB 的误码率小，可见，UEP 方案牺牲了 LIB 的误码率成就了 MIB 的误码率。

另外， k_M 值的不同对 UEP—LT 方案的性能会产生很大影响。当 $\alpha = 0.1$ ， $K = 3000$ 时，仿真 500 次，改变参数 k_M 时得到的误码率数据见表 5.1。

从表中可以看出，当 k_M 比较小的情况下，MIB 的误码率反而高于 LIB 的误码率，这于 UEP 方案的初衷是背道而驰的。针对 UEP-LT 仿真结果中显示的问题，进行分析。主要的原因如下：MIB 数据占的比例 α 很小，则对于低度数 d 的编码符号且 k_M 不够大时， αdk_M 的值一般较小。若 $\alpha dk_M < 0.5$ ，则由于舍入操作而选取 MIB 的符号个数 $d_1 = \min(\alpha dk_M, K_1)$ 被置 0 从而没有 MIB 符号参与运算。

表 5.1 $K = 3000$ 时改变参数 k_M 时得到的误码率

k_M	1.0	1.4	1.8	2.2	2.6	3.0	3.4	3.8	4.2	4.6	5.0	5.4
MIB	1722	823	614	511	28	12	9.6	5.8	4.467	1.8	0.467	0.4
LIB	573	458	573	511	1439	1358	1304	1337	1281	1234	1514	1495

5.5.2 扩展窗 UEP 方案仿真

设原始符号个数 $K = 1000$ ， $a = 0.1$ ，即 $MIB=100$ ， $LIB=900$ ，窗 w_1 和窗 w_2 均选取度分布为鲁棒孤波分布，其中，选择窗 w_1 的概率为 0.1，得到仿真结果如图 5.5：

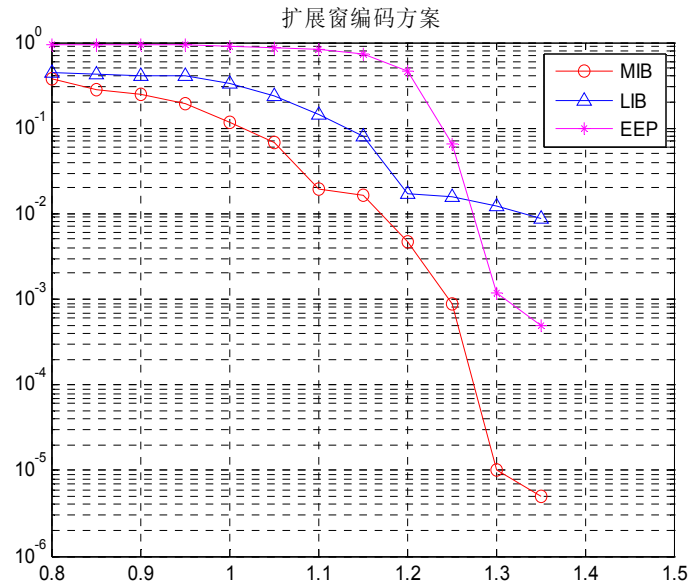


图 5.5 扩展窗编码方案误码率

从仿真结果图中可以看出，误码率随着译码开销的增加不断减小，但 MIB 的误码率比 LIB 和 EEP 的误码率要小得多。但在译码开销等于 1.3 的时候，LIB 的误码率要高于 EEP 的误码率，可见，该方案对 MIB 进行了很好的保护，但是牺牲了 LIB 的译码正确率。

5.5.3 复制窗 UEP 方案仿真

设原始符号个数 $K = 1000$ ， $a = 0.1$ 时，即 $MIB=100$ ， $LIB=900$ ，选取度分布为鲁棒孤波分布，将 MIB 部分复制 $RF_1 = 2$ 倍，LIB 复制 $RF_2 = 1$ 倍，二级扩展因子 $EF = 2$ ，得到仿真图 5.6。

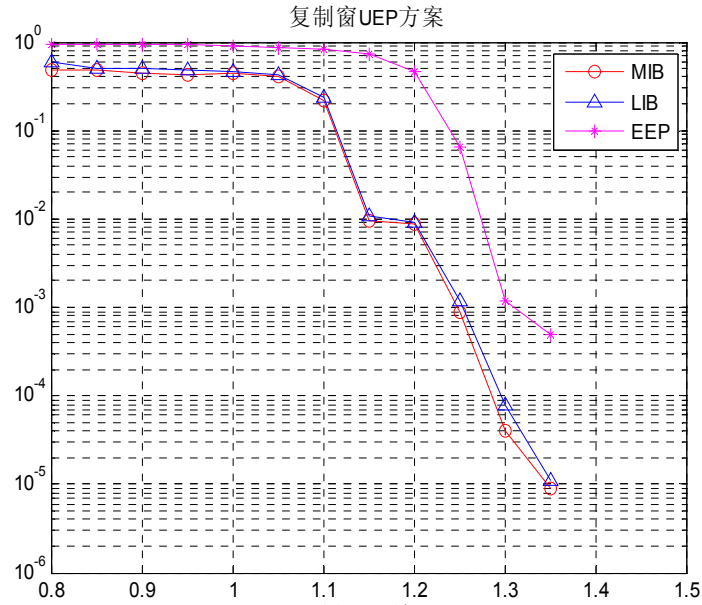


图 5.6 复制编码方法 MIB 和 LIB 的误码率

从仿真结果中可以看出，随着译码开销的增大，MIB 和 LIB 误码率 BER 迅速下降，这是其他不等差错保护方案不能比拟的，但同时也能够看出，对于 MIB 和 LIB 来说二者的误码率比较接近，也就是说这种对喷泉码的保护方案并没有对 MIB 进行较重要的保护，也就是 UEP 特性并不明显。

此外，这几种不等差错保护方案同样针对全零和全 1 的特殊情况进行了仿真，仿真结果的规律和利用随机数产生 0,1 序列的结果是一致的。

5.6 本章小结

本章研究了三种基于喷泉码的 UEP 方案，通过设定不同参数实验，采集仿真数据，研究了典型 UEP-LT 方案、基于扩展窗的 UEP 方案和基于复制窗的 UEP 方案。通过仿真得到了几种喷泉码 UEP 方案的曲线特性。误码率随译码开销的变化图中，重要数据符号的误码率和次等重要数据符号的误码率都是随着译码开销的增大而减小，即数据符号的抗误码性能都是随着译码开销的增大而增强；将不等差错保护方案的误码率和等差错保护方案的误码率放在同一个仿真图中作对比，可以明显的看出 UEP 方案的抗误码性能优于 EEP 方案的抗误码性能。但同时从数据仿真图中也曝露出了其中的缺点：牺牲了次等重要数据很大的抗误码性能得到更好的 UEP 特性，UEP 特性并不明显等。

第六章 改进喷泉码不等差错保护方案

6.1 引言

通过上一章的仿真分析得到，经典的喷泉码 UEP 方案中，MIB 的抗误码性能优于 EEP 方案的性能，但是有的方案是建立在牺牲次要数据的保护之上的，而有的方案 UEP 的特性不明显。因此，要集思广益，分析各个方案的优点，不仅要考虑到次要数据的抗误码性能又要考虑到 UEP 特性。基于此，给出改进喷泉码方案。

6.2 改进 UEP 编码过程

将原始的 K 个数据符号按重要与否分为 2 个等级，即 s_1 、 s_2 。假设 s_1 代表最重要的数据符号（MIB）， s_2 代表次要的数据符号（LIB）， Π_1 、 Π_2 分别是 s_1 、 s_2 占总数据符号比重， s_1 、 s_2 对应的数据符号长度分别是

$$K_1 = \Pi_1 * K \quad (6.1)$$

$$K_2 = \Pi_2 * K \quad (6.2)$$

其中 $\Pi_1 + \Pi_2 = 1$ 。

将两个等级的数据符号按各自的扩展因子 n 、 l 进行扩展，得到扩大后的数据符号： s_1' 、 s_2' ，其中

$$K_1' = K_1 * n \quad (6.3)$$

代表 s_1' 的数据符号长度；

$$K_2' = K_2 * l \quad (6.4)$$

代表 s_2' 的数据符号长度。虚拟扩展数据总和：

$$K' = K_1' + K_2' \quad (6.5)$$

将得到的扩展数据符号 s_1' 、 s_2' 划入两个窗中，即

$$\omega_1 = s_1' \quad (6.6)$$

$$\omega_2 = s_1' + s_2' \quad (6.7)$$

ω_1 扩展后的总数据符号是 K_1' ， ω_2 扩展后的总数据符号为 K' 。然后将第一个窗 ω_1 的度

分布从 K_1 扩大到 K'_1 ，第二个窗 ω_2 的度分布从 K 扩大到 K' ，采用鲁棒孤波度分布。第一个窗的选择概率是 T_1 ，第二个窗的选择概率是

$$T_2 = 1 - T_1 \quad (6.8)$$

同样也需要进行数据符号下标索引替换， j 代表虚拟数据符号 K' 中的索引， $j \in \{0, \dots, K' - 1\}$ ， m 代表原始数据符号 K 的索引 $m \in \{0, \dots, K - 1\}$ ，通过下面的转换，由 j 得到 m 。若选择窗 1 可由公式 6.9 转换得到原始下标，若选择窗 2 则可由公式 6.10 得到。

$$m = j \bmod K_1 \quad (6.9)$$

$$m = \begin{cases} j \bmod K_1 & 0 \leq j \leq K_1 * n \\ [(j - n * K_1) \bmod K_2] + K_1 & K_1 * n < j \leq K' - 1 \end{cases} \quad (6.10)$$

具体编码流程见图 6.1。

6.3 数据仿真

为检验该方案的性能，对该方案进行了仿真实验。仿真过程中，数据符号长度为 1000，选择鲁棒孤波分布，参数 $c=0.03$ ， $\delta=0.05$ ，原始 MIB 数据所占的比重为 $\alpha=0.1$ ，采用 BP 译码算法，进行如下实验：

(1) 重要数据 MIB 和次重要数据 LIB 同时扩展相应的倍数，得到在同等扩展倍数情况下，随着译码开销的不断增大，MIB 和 LIB 的译码结果见图 6.2。

(2) 重要数据 MIB 和次重要数据 LIB 扩展的倍数不同。分为两组实验：第一组仿真中，将 MIB 数据扩展 4 倍，而 LIB 数据扩展 2 倍；第二组仿真中将 MIB 数据扩展 8 倍，而 LIB 数据扩展 2 倍。在这两种情况下，随着译码开销的不断增大，MIB 和 LIB 的译码结果见图 6.3。

仔细观察图 6.2 和图 6.3，随着译码开销的不断增大，MIB 和 LIB 的误码率逐渐减小，因此增大译码开销可以增强系统的抗误码特性，且随着扩展倍数的增加，UEP 特性更加明显。

对比图 6.2 和 6.3 可以看出，扩展不同倍数的情况下得到误码率要低于扩展相同倍数的情况，UEP 特性优于扩展相同倍数的情况。经过分析，原因在于：在扩展相同倍数的情况下，UEP 的实现主要依赖窗口技术，而对于不同扩展倍数的情况下，在窗口技术的基础上，增加了重要数据 MIB 参与编码的概率，MIB 数据得到较高等级的保护。

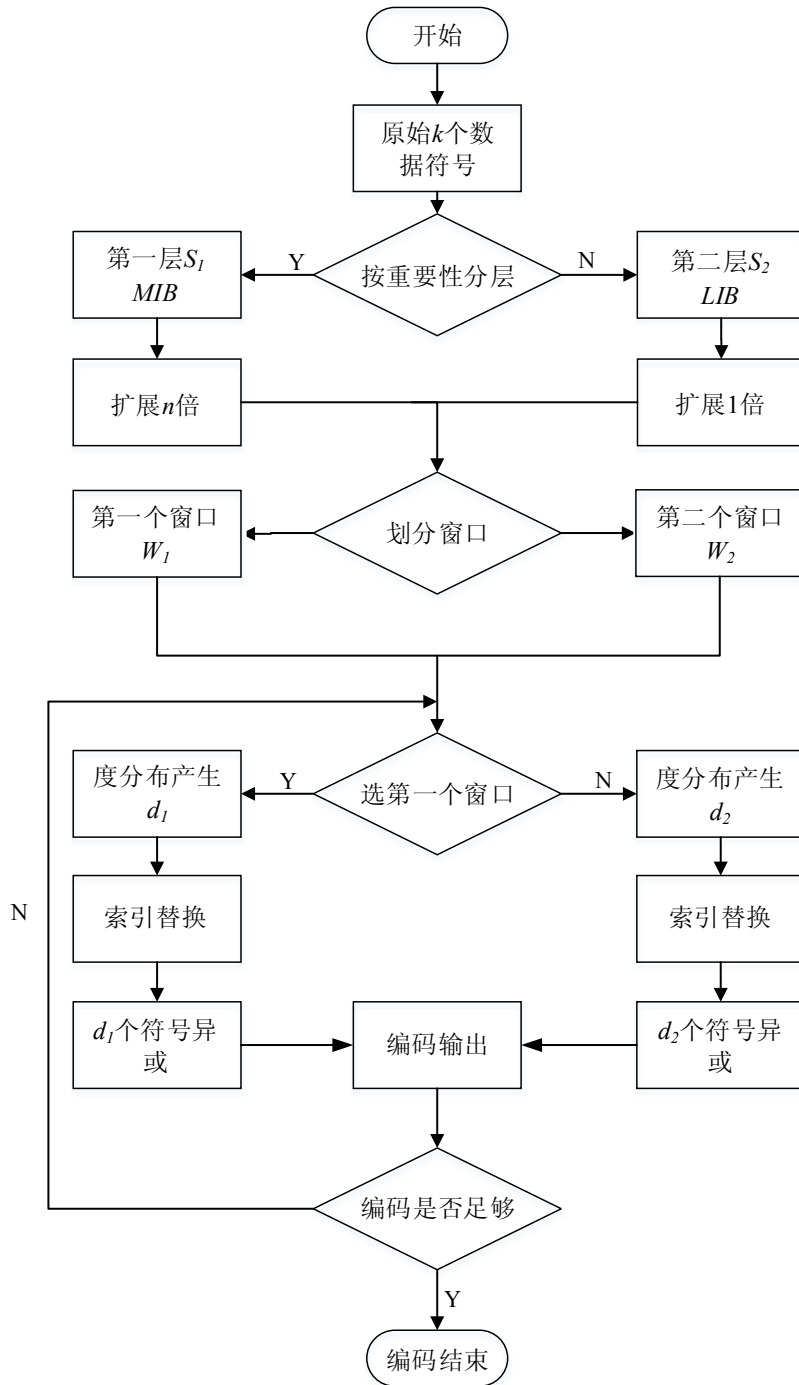


图 6.1 复制扩展窗喷泉码的编码流程图

与图 5.6 相比，观察 LIB 的误码率曲线可以看出，其误码率不是骤降的，且 MIB 的误码率低于 LIB 的误码率，因此，该方案改善了复制窗方案中不明显的 UEP 特性。与图 5.5 相比，观察 MIB、LIB 的误码率曲线可以看出，LIB 误码率曲线与 MIB 误码率曲线相差不是很大，即此方案具有较优越的 UEP 特性，并没有牺牲很大的 LIB 的抗误码性能，同时也使得扩展窗方案的缺点得到弥补。

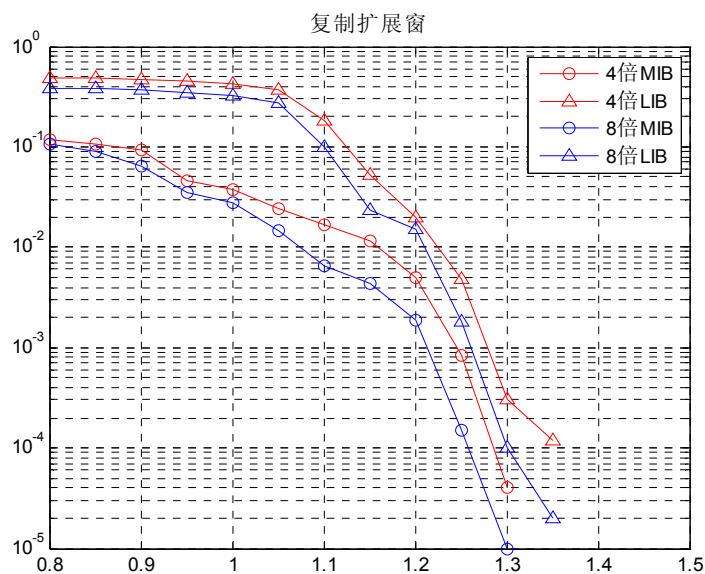


图 6.2 同等扩展倍数情况下译码效果图

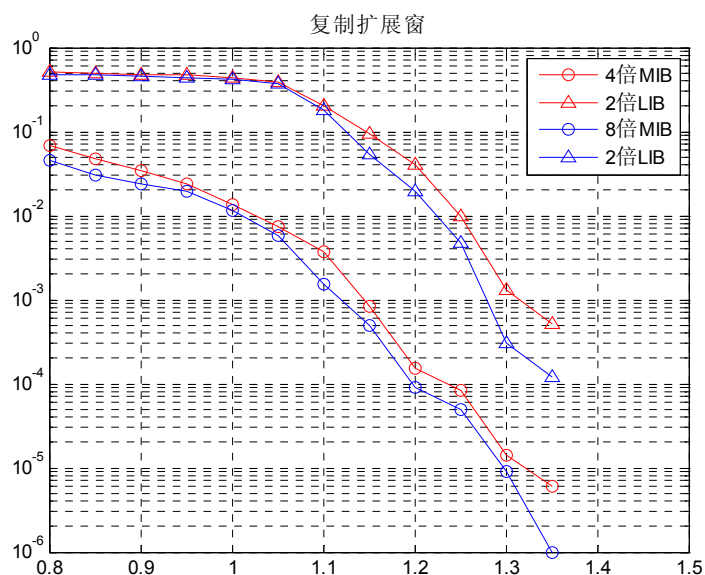


图 6.3 不同扩展倍数情况下译码效果图

6.4 本章小结

本章根据第三章的数据仿真研究得到扩展窗和复制窗方案的优缺点，利用其优点，克服其缺点组合成了复制扩展窗喷泉码。该方案的实现是通过对前面方案大量的实验数据分析创新出来的，而且通过设定其中的扩展因子，然后改变译码开销，最后通过实验得到大量的实验数据及其仿真图，验证了此方案既增强了 UEP 特性，又改善了 LIB 的抗误码性能。

第七章 结论与展望

7.1 结论

近年来,喷泉码技术迅速发展,得到了国内外学者的青睐,它所变现出的优越性也使得喷泉码在多个领域得到了广泛的应用。本文在研究喷泉码编译码理论的基础上,重点研究了基于喷泉码的不等差错保护方案。主要研究工作及内容如下:

(1) 针对喷泉码编译码影响因素的研究。喷泉码编译码成功的几个关键因素主要有:度分布函数、信息序列长度、译码开销 γ 及其相应参数等等。本文针对这些影响因素做了大量仿真工作,确定了鲁棒孤波分布的性能最好,并确定了鲁棒孤波分布中相应的参数,得到了随着译码开销的增大,喷泉码编译码成功率不断提高等结论,为后续的研究打下了基础。

(2) 喷泉码编译码算法的研究。在研究喷泉码关键影响因素的基础上,选定适当参数,确定性能较好的度分布函数,展开对喷泉码编码算法的研究。而常见的译码算法有置信传播迭代译码算法(BP 算法)和高斯消元法(GE 算法)各有优缺点。针对喷泉码编译码的不足之处,给出了基于混沌映射的喷泉码编译码方案。仿真结果表明,该方案提高了喷泉码编译码成功率。

(3) 基于喷泉码的不等差错保护方案。在阅读大量国内外参考文献的基础上,总结、归纳了常见的基于喷泉码的不等差错保护方案。本文针对这几种方案进行了仿真、分析。结果表明,典型的 UEP 方案对重要数据起到了较高保护作用,但是牺牲了次重要数据的编译码成功率,有的方案 UEP 特性不明显。

(4) 基于复制窗—扩展窗喷泉码的不等差错保护方案。常用的喷泉码不等差错保护方案牺牲了次重要数据的编译码成功率,有的方案不等差错保护特性表现的不是很明显。在对结果总结、分析的基础上,给出了复制窗—扩展窗喷泉码不等差错保护方案。通过设定其中的扩展因子,改变译码开销,实验得到大量的实验数据及其仿真图,仿真结果表明该方案既增强了 UEP 特性,又改善了 LIB 的抗误码性能。

7.2 展望

本文通过对喷泉码理论知识的深入研究,在喷泉码编译码方面、基于喷泉码的不

等差错保护方面取得了一些阶段性的进展，为今后的研究打下了基础。但本文仍有很多问题值得进一步深入研究，主要有一下几个方面：

（1）度分布的探索研究。度分布作为影响喷泉码编译码结果成功率的一个重要因素还有很多值得研究的地方。虽然，在本文中经过大量实验，得出了鲁棒孤波分布的性能最优的结论，但只是相对而言。实验数据表明，鲁棒孤波分布在较小的译码开销的情况下，误码率很高，并不是最优度分布。因此，还需要对度分布进行进一步的研究与探索。

（2）喷泉码编译码的深入研究。本文提出了一种基于混沌映射的喷泉码编译码方案，但是该方案改善的效果并不明显。常见的译码方案有置信传播迭代译码算法（BP 算法）和高斯消元法（GE 算法）两种方案，前者译码复杂度小，但译码效率较低；后者译码算法具有运算量大，高复杂度的缺点。寻找一种折中的算法也是今后研究的一个重点方向。

（3）探究新型 UEP 方案。其实，无论是本文中经典的喷泉码不等差错保护方案还是提出的基于复制窗—扩展窗的不等差错保护方案，其根本都是对重要数据进行了较多次的复制，从而增加了重要数据被选中的概率。未来的一种重要方向就是探究新型的 UEP 方案，跳出复制思想的牢笼。

参考文献

- [1] 谢飞. 喷泉码的优化设计[D]. 北京邮电大学, 2009.
- [2] 傅祖芸. 信息论[M]. 北京:电子工业出版社, 2011:74.
- [3] 雷维嘉, 谢显中, 李产军. 采用数字喷泉码的无线协作中继方案及其性能分析[J]. 电子学报, 2010, (1):228-233.
- [4] 常侃. H.264的关键技术研究[D]. 北京邮电大学, 2010.
- [5] 马耀国. 针对H.264实时视频传输应用的数字喷泉码技术改进[D]. 电子科技大学, 2011.
- [6] 姜博, 晏坚, 蒋卫东. 喷泉码及其在通信网络中的应用[J]. 数字通信世界, 2007, (10):64-67.
- [7] 吴丹, 田亚飞, 杨晨阳. 喷泉码多路并行转发中继系统传输时间分析[J]. 通信学报, 2010, (8):121-126.
- [8] 种雕雕. LT 码的非等差错保护方法研究[D]. 西安电子科技大学, 2011.
- [9] 朱宏鹏, 张更新, 谢智东. 喷泉码中 LT 码的次优度分布[J]. 应用科学学报, 2009, 27(1):6-11
- [10] Palanki R, Yedidia J S. Rateless codes on noisy channels[C]. Information Theory, Isit, Proceedings, International Symposium on. IEEE, 2004.
- [11] H.Weizheng, L.Huanlin, J.Dill. Digital Fountain Codes System Model and Performance over AWGN and Rayleigh Fading Channels[J]. International Institute of Informatics and systemics on Communications Systems, Technologies and Applications, 2010.
- [12] H.Jenkac, T.Mayer, T.Stockhammer. Soft decoding of LT codes for wireless broadcast[J]. Proc Mobile Summit 2005,Dresden, Germany, June 2005.
- [13] Puducheri S, Klierer J, Fuja T E. Distributed LT Codes[C]. Information Theory, 2006 IEEE International Symposium on. 2006:987 - 991.
- [14] 刘国超. 分布式喷泉码在深空通信中的应用研究[D]. 电子科技大学, 2013.
- [15] Kozat U C, Ramprasad S A. Unequal Error Protection Rateless Codes for Scalable Information Delivery in Mobile Networks[C]. Infocom, IEEE International Conference on Computer Communications, IEEE. 2007:2316 - 2320.
- [16] 王晶. 具有不等差错保护性能的复制喷泉码方案研究[D].天津大学,2012.
- [17] 蒋大明, 侯晓彬, 单冬等. 不等保护喷泉码用于应答器报文编码的可行性研究[J]. 北京交通大学学报, 2013, (5):138-142.
- [18] 赵旦峰, 钱晋希, 吴宇平. 一种改进的UEP喷泉码算法及其在FGS系统中的应用[J]. 系统工程与电子技术, 2011, (1) :170-172,232.
- [19] Hamzaoui R, Stankovic V M, Xiong Z. Optimized error protection of scalable image bitstreams[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2005(22): 91-107.
- [20] 温明才. Raptor码在视频通信中的应用研究[D]. 南京邮电大学, 2011.
- [21] J.W.Byers, M.Luby, M.Mitzenmacher. A digital fountain approach to reliable distribution of bulk data[C]. Proceedings of the ACM SIGCOMM'98 conference on Applications, technologies, architectures, and prococols for computer communication. Canada, 1998, 28(4), 56-67.

- [22] 张鸿涛. 无线网络多用户协作传输关键技术研究[D]. 北京邮电大学, 2008.
- [23] 闫慧慧. 喷泉码在无线协作传输中的应用[D]. 南京邮电大学, 2011.
- [24] 杨玲. 协同无线通信的分布式喷泉编译码技术研究[D]. 电子科技大学, 2012.
- [25] 顾术实, 焦健, 杨志华, 张钦宇. 面向深空通信的中继协作喷泉码设计[J]. 系统工程与电子技术, 2012(08):1696-1701.
- [26] 魏丽婷. 深空通信分布式喷泉码的研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2012.
- [27] 杜超. 深空通信中喷泉码编译码性能研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2009.
- [28] A. Nechiporuk P, V. Zhuravskaya O, A. Poberaylo A. Improvement of interference immunity of telemetry transmission systems based on the use of the Hamming code[J]. Radioelectronics and Communications Systems, 2008, 51(2):92-96.
- [28] Nechiporuk, P.A. Improvement of interference immunity of telemetry transmission systems based on the use of the Hamming code[J]. Radioelectronics and Communications Systems, Kharkov, Ukraine, February 2008, 92-96.
- [29] Norton G H, Sălăgean A. On the Structure of Linear and Cyclic Codes over a Finite Chain Ring[J]. Applicable Algebra in Engineering, Communication and Computing, 2000, 10:489-506.
- [30] Berlekamp E R.Bit serial reed solomon Encoders. IEEE Transactions on Information Theory . 1982.
- [31] 张冀, 高宏峰, 师春灵. LT码编译的改进方法[J]. 计算机工程, 2010, (11):271-273.
- [32] 朱宏杰, 裴玉奎, 陆建华. 一种提高喷泉码译码成功率的算法[J]. 清华大学学报, 2010, 50(4): 609-612.
- [33] 臧求实. 喷泉码技术的研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2011.
- [34] 何秀慧, 蒋敏兰. 一种改进的LT码置信传播译码[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(14): 109-111.
- [35] 周阳. 基于数字喷泉码的研究及应用[D]. 北京: 北京邮电大学, 2010.
- [36] 温明才, 刘峰. 基于喷泉码的不等差错保护技术实现[J]. 图像处理与图像通信, 2011, 21(4).
- [37] 刘国, 于文慧, 吴家骥, 白宝明. 基于系统 Raptor 码不等差错保护的图像压缩传输[J]. 电子与信息学报, 2013, 11: 2554-2559.
- [38] Nazanin Rahnavard, Faramarz Fekri. Generalization of Rateless Codes for Unequal Error Protection and Recovery Time[C]. Proceedings of the 2006 IEEE International Symposium on Information Theory, Seattle, USA, 2006, 523-527.
- [39] D.Vukobratovi'c, V. Stankovi'c, D. Sejdinovi'c, et al. Expanding Window Fountain Codes for Unequal Error Protection[C]. Conference Record of the Forty-first Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, 2007, 1020-1024.
- [40] S.Ahmad, R.Hamzaoui, M. Al-Akaidi. Unequal error Protection using LT Code and block duplication[J]. Proceedings of 9th Middle Eastern Simulation Multiconference, Amman, Jordan., 2008, 104-108.
- [41] 李秦梓, 彭木根, 张兴, 王文博. 无线多媒体广播传输中的多描述编码和喷泉码技术[J]. 数据通信, 2010, 06: 17-21.
- [42] 孙文珠. 多媒体信号可伸缩编码传输方法研究[D]. 大连理工大学, 2013.
- [43] 潘雍. 基于喷泉码的P2P文件共享系统研究[D]. 西安电子科技大学, 2010.
- [44] 陈文文. 基于LDPC和喷泉码的H.264抗分组丢失技术的研究[D]. 南京邮电大学, 2011.
- [45] 赵香琴. 喷泉码及其在协作通信系统中的应用研究[D]. 西南交通大学, 2009.

- [46] 陈坤. 协作通信中的链路自适应传输技术[D]. 北京邮电大学,2009.
- [47] 祝开艳, 王洪玉, 孙文珠,牛芳琳.一种分布式喷泉码在协作通信中的应用[J]. 电子学报,2014, 07:1249-1255.
- [48] 李璐颖. 无线通信中喷泉码应用关键技术研究[D]. 北京邮电大学,2011.
- [49] 宋时立. 深空通信中的低复杂度喷泉码编译码研究[D]. 电子科技大学,2012.
- [50] 刘珩, 王正欢, 李祥明, 安建平. 一种基于喷泉码和并行路径的深空通信无反馈协议[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版),2012,05:554-558.
- [51] 焦健, 张钦宇, 李安国. 面向深空通信的喷泉编码技术[J]. 宇航学报,2010,04:1156-1161.
- [52] 姚文顶, 李晖, 陈立甲, 许洪光. 深空通信中喷泉码技术研究[J]. 系统工程与电子技术,2009, 01: 40-44.
- [53] 朱宏杰.喷泉码编译码技术与应用研究[D]. 清华大学,2009.
- [54] Luby M, Mitzenmacher M, Shokrollahi A, et al. Practical loss-resilient codes[C]. Proc 29th Annual ACM Symposium on Theory of Computing, 1997: 150–159.
- [55] Luby M, Mitzenmacher M, Shokrollahi A, et al. Efficient erasure correcting codes[J]. IEEE Trans Inform Theory, 2001, 47(2): 569-584.
- [56] Luby M G, Mitzenmacher M, Shokrollahi M A et al. Efficient erasure correcting codes[J]. Ranaon on Nformaon Hory, 2001, 47:569 - 584.
- [57] Luby M. LT codes[C]. Foundations of Computer Science, Proceedings, Annual IEEE Symposium on IEEE, 2002:271 - 280.
- [58] 刘峰, 吕晓鹏, 夏宏飞等. 改善LT码性能的预译码集优化方法研究[J]. 电信科学, 2009, 25(12):21-25.
- [59] 包浩明, 朱义胜. 基于多层密钥的混沌映射保密通信系统[J]. 电子学报, 2009, (6) :1222-1225.
- [60] Yang Liu,Xiaojun Tong,Shicheng Hu.A family of new complex number chaotic maps based image encryption algorithm[J]. Signal Processing:Image Communication, 2013:1548-1559.
- [61] Yichong Zhou,Long Bao,C.L. Philip Chen.Image encryption using a new parametric switching chaotic system[J]. Signal Processing.2013,93(11): 3039-3052.
- [62] 刘淑聪, 杨敬松, 宋燕星. 过抽样混沌映射在语音通信中的应用研究[J]. 计算机工程与应用. 2013, 49(2):119-121,129.
- [63] 邱跃洪, 何晨, 诸鸿文. 一种新型均匀分布混沌伪随机数发生器[J]. 计算机工程, 2002, 28(4): 51-52.
- [64] 孙晓辉, 林秋华. 改进的无限折叠混沌映射伪随机数发生器[J]. 数据采集与处理, 2006(21):6-10.

攻读学位期间所取得的相关科研成果

- [1] 贾志成, 唐会娜, 张艳, 刘丽. 基于混沌映射的喷泉码编译码方案[J]. 现代电子技术, 已录用
- [2] 贾志成, 唐会娜, 张艳, 刘丽. 喷泉码 UEP 方案及应用研究展望[J]. 计算机技术与发展, 已投稿

致 谢

首先，我要感谢贾志成教授，他为人随和热情，治学态度严谨，细心。在论文的完成过程中，贾老师费了很大心思，为我们及我们的论文倾注了大量的心血，从选题到开题报告、中期报告，从论文目录大纲到不辞辛苦地耐心、细心地指出我论文中的问题，严格把关，循循善诱，认真负责的给了我很多很细致的指导和帮助，开拓了我的思路。正是贾老师的热忱和无私帮助使得我顺利完成我的毕业论文。在此，请允许我代表我们您所有的学生向您深情地说一声：您辛苦了！在此我表示衷心感谢，谢谢贾老师！以后要早点睡哦，要注意身体。

其次，我要感谢张艳老师。张艳老师为人谦和，就好像我的大姐姐一样。张老师在课题方向上给了我很大启发，经常不辞辛苦抽时间和我探讨论文中的问题，为我解惑答疑，给我提供了很多的帮助，为我的课题研究拓宽了思路。

另外，还要感谢陪伴我的教研室同学们：齐国坤、李琳、温柔美丽的滕琳琳，贤惠多才的史琳，温婉淑女的祖宝开，甜美可爱的赵新，还有亭亭玉立的张婷婷。还有李腾飞同学对我论文的帮助。他们是我研究生生活中一道亮丽的风景线，是他们使得我的生活变得更加丰富多彩，无论是在学习还是生活中都给予了我很大帮助，很庆幸在研究生阶段能够有这么多的好朋友陪伴。

我还要衷心感谢我的父母，父母这么多年不辞辛苦供我们姐弟四个人读大学，我和弟弟还要继续攻读研究生。他们靠他们勤劳的双手培育出了四位大学生。在这论文完成之际，我想对他们说一声：您们辛苦啦！！无论以后的人生道路是怎样的，我都会带着他们的淳朴善良，勤劳勇敢，我会在以后的道路上更加努力，尽我最大的努力来报答他们对我的爱。