

一种改进的基于部分信息喷泉码度分布设计

牛芳琳^{1,2}, 李宝明³, 陈付亮³, 王洪玉², 祝开艳⁴

(1. 辽宁工业大学电子与信息学院, 辽宁锦州 121001; 2. 大连理工大学信息与通信工程学院, 辽宁大连 116024;
3. 航天恒星科技有限公司, 北京 100086; 4. 大连海洋大学信息工程学院, 辽宁大连 116023)

摘要: 与传统的喷泉码相比, 基于反馈信息的喷泉码可以有效降低译码开销, 其编码所采用度分布则是喷泉码设计的关键, 本文提出一种适用于反馈喷泉码的基于部分信息度分布构造方法. 该方法首先提出具有较小译码开销的最佳单项式度分布函数, 并将其与传统的 SRSD 度分布相结合, 然后通过参数调整可以获得修正后的 ISRS D 度分布函数. 仿真结果表明在已知部分信息的喷泉码中, 与传统的 SRSD 度分布函数相比, 采用 ISRS D 度分布函数进行编码使其性能得到明显的提高.

关键词: 喷泉码; LT 码; BP 译码; SRSD

中图分类号: TN911.23

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2016)02-0295-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2016.02.008

The Improved Degree Distribution for Rateless Code Under Partial Information

NIU Fang-lin^{1,2}, LI Bao-ming³, CHEN Fu-liang³, WANG Hong-yu², ZHU Kai-yan⁴

(1. School of Electronics and Information Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou, Liaoning 121001, China;

2. School of Information and Communication Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;

3. Space Star Technology Co., LTD, Beijing, 100086, China;

4. Institute of Information Engineering, Dalian Ocean University, Dalian, Liaoning 116023, China)

Abstract: Compared with traditional fountain codes, fountain codes with feedbacks can decrease the decoding overhead effectively. The degree distribution has a very important influence on the decoding efficiency of fountain codes. This paper proposes a new scheme of degree distribution under partial information and we use it in fountain codes with feedback. In the first place, we present an optimum monomial degree distribution with less decoding overhead, and then we combine it with shifted robust soliton distribution (SRSD). At last, we get the improved SRSD (ISRS D) through parameter adjustment. Simulations verify the encoding performance of fountain codes under parity information using ISRS D is greatly improved compared with traditional SRSD.

Key words: fountain codes; LT codes; belief propagation decoder; shifted robust soliton distribution

1 引言

喷泉码^[1]最早由 Michael Luby 等人在 1998 年首先提出来, 直到 2002 年, 文献[2]中提出了鲁棒孤子度分布 (Robust Soliton Distribution, RSD) 函数, 使喷泉码的实现成为现实. 与传统的固定矩阵编码方法不同, 喷泉码编码方法是指信源按照一定的概率规则随机选择信源符号进行异或求和得到编码符号, 其编码所采用的概率规则被称为度分布函数. 度分布函数的设计在很大程度上决定了喷泉码的性能的好坏, 一个好的喷泉码可以使译码开销趋于与 1. 为了降低译码开销, 近年来, 很多学者均致力于对喷泉码度分布的研究, 如文献[3]中提出通过对

度分布的修正增加低度校验节点, 使得规则变量节点度 LT (Luby Transform, LT) 码解码瀑布区域 (雪崩区域) 提前, 降低了成功解码所需的译码开销. 文献[4]对二进制度分布进行调整, 然后将其与 RSD 进行有机结合, 并进一步优化得到适用于短码长的修正二进制-鲁棒孤子度分布. 但是现有的喷泉码与理想喷泉码相比, 译码开销依旧较大. 由信息论理论可知, 有效利用接收端的反馈信息可以降低源信息的不确定度, 一些学者提出基于反馈信息的喷泉码, 即在喷泉码中合理有效利用少量反馈信息降低译码开销. 如文献[5]中提出基于反馈的 RT (Real time) 纠错方法, 文中指出利用反馈信息的喷泉码可以有效降低喷泉码的译码开销. 文献[6]提出基于反馈的

DALT (Doped Accumulate LT, DALT) 传输协议, 指出这种基于反馈传输的喷泉码性能接近于 Raptor 码^[7]. 文献[8]中, 通过反馈信息对 RSD 度分布函数进行修正得到基于部分信息的转移 RSD (Shifted RSD, SRSD) 度分布函数. 文献[9]提出了多次反馈喷泉码, 接收端依据编码符号度平均概率的变化给信源发送反馈信息, 用以修正 SRSD 度分布函数进行 LT 编码, 而文献[10~15]则提出对 ripple 等的变化进一步改进, 调整反馈信息来修正度分布函数, 减少反馈喷泉码译码开销. 针对反馈的喷泉码, 设计合适的度分布函数可以有效的降低译码开销. 本文对传统的基于部分信息的 SRSD 度分布函数进行改进, 首先提出具有较小译码开销的最佳单项式度分布, 将其作为修正项对传统的 SRSD 进行修正, 并进行优化得到了基于部分信息喷泉码的修正转移鲁棒孤立子度分布 (Improved SRSD, ISRS) 函数. 采用这种度分布函数进行基于部分信息的喷泉码编码, 与传统的 SRSD 度分布相比, 可以有效的降低译码开销.

2 基于部分信息的度分布函数

2.1 RSD 度分布函数

度分布函数是设计喷泉码的关键, 一个好的度分布函数可以有效减少喷泉码的译码开销. M. Luby 在文献[2]首先提出理想孤立子分布 ISD 度分布

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

其中, $\rho(d)$ 表示度为 d 的概率.

由于随机过程产生的实际行为在期望值上下波动, 采用 ISD 度分布的喷泉码在译码过程中可能会导致可译集符号消失, 从而使译码开销变大. M. Luby 在研究了 ISD 度的特性后, 对式进一步修改, 加入 $\tau(d)$ 用以增强 $\rho(1)$, $\rho(s/k)$ 等概率, $\tau(d)$ 的数学表达式为

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

其中, $s = c \ln(k/\delta) \sqrt{k}$; $c > 0$ 是一个稳定常数; δ 表示译码最大失败概率.

将理想分布 $\rho(d)$ 与 $\tau(d)$ 进行合并得到归一化 RSD 度分布

$$\mu(d) = \frac{\rho(d) + \tau(d)}{z} \quad (3)$$

其中, $z = \sum_d (\rho(d) + \tau(d))$.

2.2 基于部分信息的 SRSD 度分布函数

文献[8]提出基于部分信息的喷泉码概念, 当接收

端已知 n 个信源符号, 信源利用已知符号个数 n 对 RSD 度分布进行修正, 以降低信源编码符号的不确定度, 可以减少喷泉码的译码开销. 经过 n 修正的 RSD 度分布函数称为 SRSD 度分布函数, 依据这一度分布函数进行 LT 编码则称为 SLT 码. 其中 SRSD 数学表达式为

$$r(j) = \mu_{\text{RSD}(k-n)}(d), j = \text{round}\left(\frac{d}{1-n/k}\right) \quad (4)$$

其中, $1 \leq j \leq k$; k 表示信源需要发送的信源符号个数; n 表示接收端接已知的信源符号的个数; $\mu_{\text{RSD}(k-n)}$ 表示度 $1 \leq d \leq k-n$ 的 RSD 度分布; $\text{round}(\cdot)$ 表示四舍五入取整.

根据喷泉码编码方法可知, j 的取值范围必须满足 $1 \leq j \leq k$, 由式可知, 当 $k-n < d \leq k$, 则 $j > k$, 超出编码长度范围. 式(4)中 $1 \leq d \leq k-n$ 时, 存在 $\sum_j \mu_{\text{RSD}(k-n)}(d) < 1$, 则 $r(j)$ 不服从概率分布. 本文提出对式进行归一化处理, 得到

$$R_{\text{SRSD}}(j) = \frac{\mu_{\text{RSD}(k-n)}(d)}{\sum_d \mu_{\text{RSD}(k-n)}(d)} \quad (5)$$

其中: $j = \text{round}\left(\frac{d}{1-n/k}\right)$, $1 \leq d \leq k-n$.

通过式(4)归一化得到的, 满足 $\sum_j R_{\text{SRSD}}(j) = 1$ 服从概率分布, 本文称式(5)为基于部分信息的归一化 SRSD 度分布函数.

3 修正的转移度分布函数

3.1 单项式度分布函数

传统的喷泉码编码度分布函数可以用多项式表示, 即

$$\Omega(d) = \sum_d a_d x^d, 1 \leq d \leq k \quad (6)$$

其中: k 表示信源符号数量; a_d 表示度为 d 的概率, 并且满足 $\sum_d a_d = 1$.

针对基于部分信息的喷泉码, 接收端已经存在部分度为 1 的信源符号, 在其度分布设计时候, 即使不考虑度 1 的概率, 接收端也可以采用 BP 方法成功译码, 因此, 本文提出一种单项式度分布函数

$$\Omega(d) = x^d, 1 \leq d \leq n+1 \quad (7)$$

其中: d 表示编码的度; n 表示接收端已经恢复信源符号个数; 由 $\sum_d a_d = 1$ 可知, $a_d = 1$.

式(7)即为基于部分信息的单项式度分布函数.

BP 译码方法中指出, 只有与编码符号相邻未知符号个数等于 1 才能恢复 1 个未知符号. 采用单项式度作为度分布函数, 受到 n 的限制, 度为 d 的编码符号与相邻未知符号个数大于 1 的情况, 导致不能译码, 因此需要对 d 的取值范围进行讨论.

以图 1 为例,接收端已知部分信源原始符号,采用喷泉码编码符号对未知符号进行恢复,设 $k=6, n=4$, 接收到编码符号度 d 分别为 5, 3 和 6. 图中黑色圆点表示已知信源符号,白色圆点表示未知信源原始符号,方框表示接收到度为 d 的编码符号.

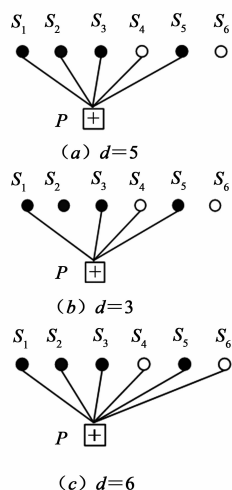


图1 反馈无码率编码解出第1个未知数据包情况分析

图 1(a) 中, $d=5$ 的编码符号与 4 个已知信源符号相邻, 与 1 个未知信源符号相邻, 由 BP 译码可以解出 S_4 ; 图 1(b) 中 $d=3$, 度小于 $n+1$, 可以从已知 n 个符号中选取到 $d-1$ 个已知符号, 解出 1 个未知符号; 图 1(c) 中, $d=6$ 大于 $n+1$, 编码符号无论采用什么组合方法, 不存在与 1 个未知符号相邻的情况.

由分析可知, 当 $d-1 > n$ 时, 度为 d 的编码符号无法进行 BP 译码, 因此我们可以得出满足单项式 x^d 作为度分布函数取值范围

$$1 \leq d \leq n+1 \quad (8)$$

3.2 最佳修正项

在 2.2.1 节中提出了基于部分信息的单项式度分布函数, 由式可知, 当 d 不同的时候, 度分布函数则不同, 恢复未知符号 ($k-n$) 所需要的译码符号个数 m 也不同. 下面我们通过实验观察选取不同的 d 对译码符号个数 m 的影响.

设信源需要发送符号个数 $k=500$, n 分别选取 495 和 450. 采用 Matlab 进行仿真, 运行次数 1000, d 与译码符号个数 m 的关系曲线如图 2 所示.

采用式(7)作为基于 n 个信源符号的度分布函数进行喷泉码编码, 由图 2(a) 和图 2(b) 中的实验结果可以知, 当 d 不同时候, 译码符号个数 m 也不同, 并且均为下凹曲线, 存在一个 d 使译码符号 m 达到最小. 图 2(a) 为 $n=495$ 时 d 与 m 的关系曲线. 由 $k=500$ 可知, 当 $n=495$ 时候, 未知信源符号的个数等于 5. 而当 d 等于 185 时 m

为最少值, 即 $m=7.7$, 采用式(7)作为编码度分布函数的时候, 仅需要接收到 7.7 个编码符号即可恢复所有信源符号; 图 2(b) 中 $n=450$, 当 $d=32$, 仅需要接收到 76.9 个编码符号即可恢复未知的 50 个信源符号.

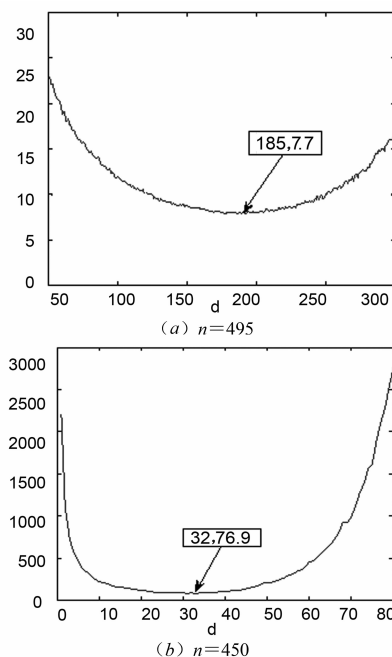


图2 单反馈无码率编码所需要数据包与 d 的关系曲线

通过大量的实验结果可以观察到, 采用单项式作为度分布函数, 每 1 个 n 都存在 1 个 d 值, 使译码符号 m 个数达到最小数值. 本文将此时对应的 d 称为最佳指数 d' , 由式(7)得到的单项式度分布函数称为最佳修正度分布函数, 其数学表达式为

$$\Omega(d') = x^{d'} \quad (9)$$

3.3 修正转移度分布函数

3.3.1 修正转移度分布函数表达式

由 2.2 节可知, 在 n 时候, 选取最佳修正项 d' 度, 可以使采用式(9)作为度分布函数进行喷泉码编码译码符号个数 m 达到最小, $d=d'$ 时候 BP 算法译码能力较强. 为了进一步降低译码符号个数, 本文提出一种新的基于部分信息的修正转移 RSD (Improved Shifted RSD, ISRSD) 度分布函数, 将式(9)作为修正项引入 SRSD 度分布函数中, 并对其做归一化处理得到

$$\mu_{\text{ISRSD}}(j) = \frac{\alpha\gamma(j) + (1-\alpha)\Omega(d')}{\sum (\alpha\gamma(j) + (1-\alpha)\Omega(d'))} \quad (10)$$

其中: $j = \text{round}\left(\frac{d}{1-n/k}\right)$; d' 修正项的最佳指数; α 调整系数, 并且满足 $0 \leq \alpha \leq 1$; d' 最佳指数; $\gamma(j)$ 为式(4); $\Omega(d')$ 为式(9).

α 表示 $\gamma(j)$ 在式(10)中占有的比例, $(1-\alpha)$ 表示最佳修正项 $\Omega(d')$ 在式(10)所占的比例. α 的变化将会

导致 $\mu_{\text{ISRS}}(j)$ 度分布函数随之发生变化, 采用其进行喷泉码编码, 译码符号 m 也会发生变化.

3.3.2 最佳指数与最佳调整系数

式(10)度分布函数与最佳调整系数 α 与最佳指数 d' 两个参数有关, 由于 d' 与 α 的大小均有 n 和 k 有关, 本文提出通过建立实验模型通过查找的方法得到 n/k 不同条件下 d' 与 α 的数值.

设信源需要发送符号个数为 k , 编码长度 n 分别取 100, 400, 500, n/k 取值范围 0.1 到 1, 步长 0.1. 其中, 参数 $c = 0.01, \delta = 0.5$. 实验采用 Matlab 进行仿真测试, 仿真次数 1000 次.

(1) 查找最佳修正项指数

采用式(10)作为信源度分布函数进行喷泉码编码, 其中 $a = 1, d$ 的取值从 1 到 $n+1$, 步长为 1, 当译码符号个数最少时候, 所对应的 d 即为本文提出的最佳指数 d' ;

(2) 查找最佳调整系数

将已知的最佳指数 d' 带入进行编码, a 选取值范围为 0 ~ 1, 步长 0.01, 在 n/k 为固定比值的时候, 调整 a , 使译码符号个数达到最少, 此时所对应的 a 为最佳调整系数.

通过实验查找出的最佳修正指数 d' 和最佳调整系数 a , 如表 1 所示.

将表 1 中 a 和 d' 带入式(10), 即可以得到不同 k 和 n 条件下的基于部分信息的 ISRS 度分布函数.

在 BP 译码过程中, 需要合理控制编码符号的释放速度, 一方面需要防止编码符号释放过快使译码结束;

另一方面, 防止编码符号释放过快重复覆盖已经被恢复的符号而增加冗余. RSD 度分布函数在设计过程中考虑到每步迭代恰好释放一个编码符号, 使迭代译码速度保持平衡. 基于部分信息的 SRSD 度分布通过对 RSD 度分布的转移取整, 致使这种平衡在一定程度上被破坏, 导致恢复未知信源符号的译码开销增加. 引入的最佳修正项通过调整系数 a 对 SRSD 编码符号的译码速度进行调整, 在一定程度上减少译码符号数量. 观察表 1, 大多数 a 取值为 0.8 左右. 但是当 n 为某些数值的时候, 得到 $a = 1$, 将其代入式则有 $\mu_{\text{ISRS}}(j) = \mu_{\text{SRSD}}(j)$, 即加入的修正项 $x^{d'}$ 没有发挥增强译码作用.

表 1 n/k 不同时候, 最佳修正项 $x^{d'}$ 与最佳调整 α

n/k		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
$k = 100$	d'	3	3	4	5	6	7	10	13	23
	α	0.79	0.79	0.78	0.8	0.78	0.76	0.75	0.77	0.76
$k = 400$	d'	3	4	5	6	7	9	11	17	32
	α	0.82	0.79	1	0.84	0.8	0.8	0.78	0.78	0.77
$k = 500$	d'	3	4	5	6	6	9	12	17	32
	α	0.84	0.8	1	0.8	0.77	0.77	0.79	0.74	0.76

3.3.3 不同的度分布直方图比较

设信源编码长度 $k = 100$, 接收端已知信源符号个数 $n = 70$, 由表 1 可知最佳修正项的指数 $d' = 10$ 、最佳调整系数 $a = 0.75$, 分别带入式(9)和式(10)可以得到最佳修正度分布 $x^{d'}$ 与 ISRS 度分布函数. 比较 RSD、SRSD、最佳修正项 $x^{d'}$ 和 ISRS 度分布直方图, 如图 3 所示.

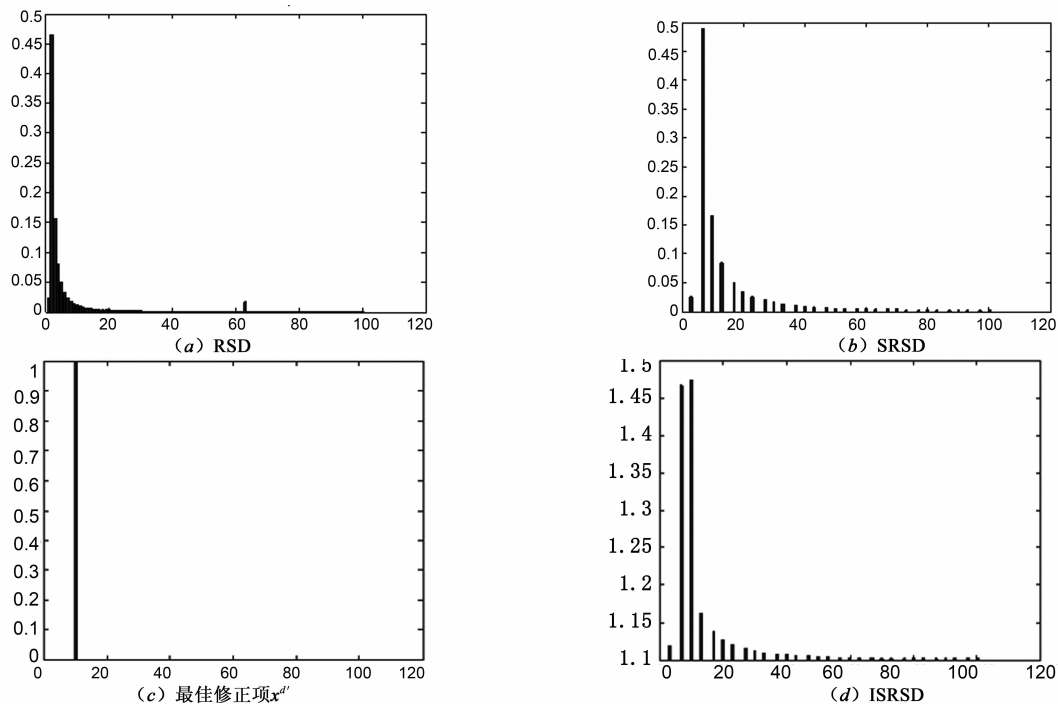


图 3 不同函数的度分布比较

图3(a)可知,RSD度分布中低度概率较高,如 d 等于1、2、3等.除了 $d=1$ 和 $d=k/s$ 的概率以外,随着 d 的增加,RSD度分布的概率逐渐降低,尤其是 d 大于20,概率几乎接近于0.图3(b)为SRSD度分布直方图,由 $j = \text{round}\left(\frac{d}{1-n/k}\right)$ 对RSD的度进行转移,使部分 d 对应的概率等于0,如原来较大概率的度为1和2的概率也等于0,由于采用其进行编码,BP译码过程中,接收端已经存在足够数量度为1的信源原始符号,可以恢复度3的编码符号,因此不在需要接收度1、2编码符号进行译码,因此可以减少编码符号的数量;图3(c)为单项式度分布最佳 d' 的概率为1;图3(d)为本文提出的ISRS度分布函数直方图,从图中可以观察到,度 d' 占用较大的概率.将式(10)与式(5)进行数学期望比较,显然ISRS度的数学期望增加,增加编码符号覆盖信源符号的概率,在一定程度上减少译码符号的数量.

4 实验

为了更好的衡量基于部分信息喷泉码恢复未知符号译码能力,本文中提出反馈译码开销 ε_f 的概念,即恢复未知信源符号的译码开销.

ε_f :译码符号个数 m 与未知符号 $(k-n)$ 个数之比值.其数学表达式为

$$\varepsilon_f = \frac{m}{k-n} \quad (11)$$

由式(11)和喷泉码的性质可知,反馈译码开销 ε_f

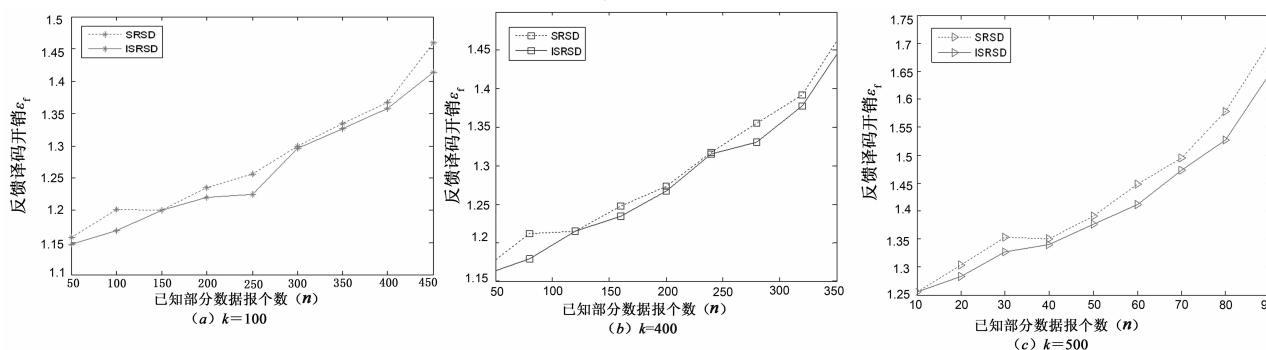


图4 本文方法与文献[8]反馈译码开销相比较

5 结论

由于采用最佳修正项 $x^{d'}$ 作为基于部分信息 n 的喷泉码编码可以提高BP译码性能,本文中 $x^{d'}$ 引入SRSD的分布函数中,并选取合适的调整系数 a 得到ISRS度分布函数.结合实验结果分析可知,对于在相同条件下的基于部分信息的喷泉码,采用改进的ISRS度分布函数与SRSD度分布函数进相比,可以有效的降低译码开销,提高反馈喷泉码在无线传输的网络性能.

≥ 1 , ε_f 越小表明恢复信源所需要的编码符号个数 m 越少,喷泉码性能越好,理想的反馈译码开销 $\varepsilon_f \rightarrow 1$.

关于喷泉码译码开销与度分布函数的计算比较复杂,文献[16]中给出了 $k \rightarrow \infty$ 的计算方法;当 k 为有限值时候,文献[17,18]给出了 k 为有限长度的译码开销的计算方法.然而,目前还没有基于部分信息的喷泉码译码开销计算方法,本文通过实验来比较ISRS度分布与文献[8]中的SRSD分布的 ε_f ,实验仿真结果如图4所示.

由图4(a)、图4(b)和图4(c)中的实验结果可知,当 k 分别为100、400和500的时候,ISRS度得到的反馈译码开销 ε_f 明显优于传统的SRSD,同时 ε_f 与 k 的大小有关,随着 k 的增加, ε_f 下降.

ISRS优于SRSD的主要原因为,当 n 为不同数值的时候,都存在一个最佳单项式度分布函数式(10)可以使反馈译码开销达到一个较低的数值,采用其对SRSD进行优化,得到基于部分信息的ISRS度分布函数式.采用查找的方法调整 a ,使 ε_f 达到最小得到最佳调整系数 a ,因此可以得到采用ISRS度分布编码的反馈译码开销 ε_f 小于SRSD.如果最佳单项式度分布函数不能使SRSD的反馈译码开销降低,则 $a=1$,即 $\mu_{\text{ISRS}}(d) = \mu_{\text{SRSD}}(j)$,即ISRS的反馈译码开销 ε_f 与SRSD相同.因此可以得出由本文提出的ISRS度分布得到的反馈开销 ε_f 始终小于等于SRSD,使基于部分信息的喷泉码性能得到提升.

参考文献

- [1] 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):56-67.
- [2] Michael L. Lt codes[A]. Proceedings of 43rd Annual IEEE Symposium on Foundations of Computer Science[C]. USA: IEEE, 2002. 271-282.
- [3] 孙文珠,王洪玉,祝开艳,王洁,唐震洲.一种规则变量节

- 点度 LT Codes 编码方案[J]. 电子学报, 2014, 42(10): 1918 - 1924.
- Sun Wen-zhu, Wang Hong-yu, Zhu Kai-yan, Wang Jie, Tang Zhen-zhou. A novel encoding scheme for regular variable-node degree LT codes[J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(10): 1918 - 1924. (in Chinese)
- [4] 雷维嘉, 张梦, 谢显中. 基于度分布合并和可译集优化的 LT 码度分布设计方案[J]. 电子学报, 2015, 43(4): 800 - 805.
- Lei Wei-jia, Zhang Meng, Xie Xian-zhong. A design scheme for LT codes degree distribution by combining degree distributions and optimizing ripple size[J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 43(4): 800-805. (in Chinese)
- [5] Amos B, Shlomi D, Noam S. RT oblivious erasure correcting[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2007, 15(6): 1321 - 1332.
- [6] Yuan X, Ping L. Doped accumulate LT codes[A]. Proceedings of IEEE International Symposium on Information Theory[C]. France: IEEE, 2007. 2001 - 2005.
- [7] Shokrollahi A. Raptor codes[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(6): 2551 - 2567.
- [8] Agarwal S, Hagedorn A, Trachtenberg A. Adaptive rateless coding under partial information[A]. Proceedings of Information Theory and Applications Workshop[C]. San Diego: IEEE, 2008. 5 - 11.
- [9] Hagedorn A, Agarwal S, Starobinski D, et al. Rateless coding with feedback[A]. Proceedings of INFOCOM[C]. Rio de Janeiro: IEEE, 2009. 1791 - 1799.
- [10] Sorensen J H, Popovski P, Ostergaard J. Design and analysis of LT codes with decreasing ripple size[J]. IEEE Transactions on Communications, 2012, 60(11): 3191 - 3197.
- [11] Sorensen J H, Popovski P, Ostergaard J. Feedback in LT codes for prioritized and non-prioritized data[A]. Proceedings of Vehicular Technology Conference (VTC Fall)[C]. Quebec City: IEEE, 2012. 1 - 5.
- [12] Dai J, Zesong F, Chenglin S, et al. LT Codes with Limited Feedback[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Computer and Information Technology (CIT)[C]. Xi'an: IEEE, 2014. 669 - 673.
- [13] Talari A, Rahnavard N. LT-AF codes: LT codes with alternating feedback[A]. Proceedings of IEEE International Symposium on Information Theory Proceedings (ISIT)[C]. Istanbul: IEEE, 2013. 2646 - 2650.
- [14] Talari A, Rahnavard N. Robust LT codes with alternating feedback[J]. Computer Communications, 2014, 49: 60 - 68.
- [15] Zhang L, Liao J, Wang J, et al. Design of improved Luby transform codes with decreasing ripple size and feedback[J]. IET Communications, 2014, 8(8): 1409 - 1416.
- [16] Sejdinovic D, Piechocki R J, Doufexi A. AND-OR tree analysis of distributed LT codes[A]. Proceedings of Networking and Information Theory[C]. Volos Greece: IEEE, 2009. 261 - 256.
- [17] Karp R, Luby M, Shokrollahi A. Finite length analysis of LT codes[A]. Proceedings. International Symposium on Information Theory[C]. USA: IEEE, 2004. 37 - 37.
- [18] Maatouk G, Shokrollahi A. Analysis of the second moment of the LT decoder[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2012, 58(5): 2558 - 2569.

作者简介



牛芳琳 女, 1971 年出生于辽宁锦州. 2015 年在大连理工大学获得博士学位, 现在辽宁工业大学工作. 目前主要从事信息论、信道编码、喷泉码、无线通信技术等方面的工作研究.
E-mail: niufanglin@sina.com



王洪玉 (通信作者) 男, 1968 年 9 月出生于吉林长春. 教授、博士生导师、中国电子学会高级会员、IEEE 会员. 1990 年、1993 年和 1997 年分别在吉林工业大学、中国科学院长春光机所和天津大学获工学学士、工学硕士和工学博士学位. 现为大连理工大学工作, 主要从事移动通信技术、无线网络技术等方面的工作.
E-mail: whyu@dlut.edu.cn