

基于 IBED 和仿生算法的 LT 码度分布设计

姚渭箐^{1,2}, 胡 凡²

(1. 国网湖北省电力有限公司信息通信公司, 湖北武汉 430077; 2. 武汉大学电子信息学院, 湖北武汉 430072)

摘 要: 度分布是影响 Luby 变换(Luby transform, LT)码性能优劣的关键因素,为了得到更优的度分布,提出一种基于改进的二进制指数分布(improved binary exponential distribution, IBED)和仿生算法的 LT 码度分布设计方案. 采用 IBED 度分布进行 LT 编码,初始译码成功率可高达 90% 以上,但随着译码开销增大,译码成功率上升速度减缓,而此时鲁棒孤子分布(robust soliton distribution, RSD)的译码性能表现更佳. 为了将 IBED 和 RSD 的优点有机结合,利用人工鱼群算法(artificial fish swarm algorithm, AFSA)在两种度分布间寻优,基于期望可译集构建该算法的目标函数,通过最大化目标值得到更优的度分布. 仿真结果表明,与类似方法及传统的 RSD 相比,采用新度分布进行 LT 编码可明显降低译码开销,并节约编译码耗时.

关键词: LT 码; 改进的二进制指数分布; 鲁棒孤子分布; 人工鱼群算法; 可译集

中图分类号: TP911 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2019)02-0428-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2019.02.024

The Design of Degree Distribution for LT Codes Based on IBED and Bionic Algorithm

YAO Wei-qing^{1,2}, HU Fan²

(1. State Grid Hubei Information & Telecommunication Company Limited, Wuhan, Hubei 430077, China;

2. School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

Abstract: The degree distribution greatly influences the performance of Luby transform(LT) codes. In order to obtain a better degree distribution, a method is proposed to design the degree distribution for LT codes based on improved binary exponential distribution(IBED) and bionic algorithm. The decoding performance of IBED outperforms robust soliton distribution (RSD) when the overhead is small, and its successful decoding rate reaches more than 90%. The successful decoding rate for IBED rises slowly as the overhead increases, while RSD performs better. In order to combine the advantages of IBED and RSD, we use artificial fish swarm algorithm(AFSA) to search the optimal degree distribution between these two. The expected ripple size is employed to present the objective function for AFSA, and the optimal degree distribution is obtained by maximizing the objective value. Simulation results show that compared to other optimized degree distributions and RSD, the new degree distribution reduces the overhead, and saves the average consuming time per encoding/decoding process.

Key words: luby transform(LT) codes; improved binary exponential distribution (IBED); robust soliton distribution (RSD); artificial fish swarm algorithm(AFSA); ripple size

1 引言

Luby 变换(Luby transform, LT)码是一类码率不受限制的纠删码^[1,2],具有无需反馈重传、译码开销较小和编译码复杂度低等特点,现已被广泛应用于广播通信^[3]、传感器网络^[4]、认知无线网络^[5]、物联网^[6]以及智能电网^[7]等无线通信领域,以便提高数据传输的

可靠性. 在 LT 码编译码过程中,编码器基于度分布编码生成无限且灵活数量的编码分组,而译码器能从略多于原始分组数量的任意编码分组集合中精确恢复出原始数据. 因此,度分布对 LT 码性能的影响至关重要.

国内外诸多学者和科研机构在 LT 码的度分布设计和优化问题上做了大量研究工作. 文献[8]基于可译集理论,通过调整度数为 1、度数为 2 以及度数最大的比例来

优化 LT 码度分布. 针对传统的鲁棒孤子分布 (robust soliton distribution, RSD) 不太适用于码长较短 ($< 10^4$) 的 LT 码的问题, 黄诚等人^[9,10] 采用蚁群算法 (ant colony algorithm, ACA) 和粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO) 将度分布中度数的比例值映射到仿生算法的解空间构建初始路径, 经过迭代优化, 从而得到相同度分布参数要求下更优的度分布值. 文献[11]将二进制指数分布 (binary exponential distribution, BED) 和 RSD 相结合提出一种译码性能更优的开关度分布 (switch degree distribution, SDD). 在编码器编码的初始阶段, 采用 BED 进行编码, 当已经产生一定数量编码分组后, 将 BED 切换到 RSD. 文献[12]则是通过结合改进的泊松分布 (improved poisson distribution, IPD) 和 RSD, 设计一种适用于 LT 码的新型泊松鲁棒孤子分布 (poisson robust soliton distribution, PRSD).

尽管现有的度分布优化方案已取得一定成就, 但仍然存在提升的空间. 本文提出一种基于改进的二进制指数分布 (improved binary exponential distribution, IBED) 和仿生算法的 LT 码度分布设计方案. 相比传统的 RSD 和 BED, 采用 IBED 进行 LT 编码, 即使在译码器接收较少编码分组, 也能将 90% 以上的原始分组译出. 但随着接收编码分组数量增多, 其译码成功率上升速度减缓, 而此时 RSD 的译码性能表现相对更佳. 为了能同时提高译码效率和译码成功率, 故考虑将 IBED 和 RSD 的优点有机结合. 利用人工鱼群算法 (artificial fish swarm algorithm, AFSA)^[13] 在两种度分布间寻优. 通过 Matlab 软件编程仿真表明, 分别与 ACA 算法优化的度分布^[9]、PSO 算法优化的度分布^[10]、SDD^[11] 以及传统的 RSD 相比, 采用新方法设计的度分布进行 LT 编码可降低译码开销, 并节约编译码耗时.

2 LT 码

2.1 LT 码编译码过程

将原始数据均分为 k 个原始分组, 每个编码分组通过以下步骤产生: (1) 从度分布中随机选择一个度 i ; (2) 随机且均匀地选取 i 个原始分组; (3) 将这 i 个原始分组进行异或生成一个编码分组. 重复以上步骤, 编码生成无限且灵活数量的编码分组.

接收端接收到 N 个编码分组 (N 略大于 k), 然后开始译码^[2]. 通常, LT 码采用置信传播 (belief propagation, BP) 算法进行译码: (1) 度数为 1 ($i=1$) 的编码分组直接译码; (2) 译出的原始分组与跟其相连的编码分组进行异或后替代原编码分组, 同时删除其连接关系; (3) 重复以上步骤, 直至译码完成.

2.2 度分布

根据 LT 码编译码过程可知, 度分布对 LT 码的性

能影响至关重要. 常见的 LT 码度分布有理想孤子分布 (ideal soliton distribution, ISD)、RSD^[11] 和 BED.

(1) 鲁棒孤子度分布

ISD 表示的是一种理想情况, 即在每次译码迭代中, 只有一个度数为 1 的编码分组, 并且在每次迭代译码之后, 只出现一个新的度数为 1 的编码分组. 其度分布函数为:

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

式中, i 为每个编码分组的度, k 为原始分组数量.

然而, 这种度分布的实际性能很差, 一个很小的偏差就会导致度数为 1 的编码分组消失而造成译码终止. 针对 ISD 的不足, RSD 在度分布函数中引入 2 个参数 c 和 δ , 期望度数为 1 的编码分组数量在译码过程中始终保持为 $R = c \ln(k/\delta) \sqrt{k}^{[11]}$, 其中, k 为原始分组数量, c 为大于 0 的常数, δ 为允许的译码失败概率.

首先, 定义一个函数:

$$\tau(i) = \begin{cases} \frac{R}{ik}, & i=1, 2, \dots, \lceil \frac{k}{R} \rceil - 1 \\ \frac{R}{k} \ln\left(\frac{R}{\delta}\right), & i = \lceil \frac{k}{R} \rceil \\ 0, & i = \lceil \frac{k}{R} \rceil + 1, \dots, k \end{cases} \quad (2)$$

然后, 将 $\rho(i)$ 和 $\tau(i)$ 相加, 并做归一化处理得到 RSD:

$$\mu(i) = \frac{\rho(i) + \tau(i)}{\sum_{i=1}^k (\rho(i) + \tau(i))}, i=1, 2, \dots, k \quad (3)$$

式中, i 为每个编码分组的度.

(2) 二进制指数分布

文献[14]提出了 BED:

$$b(i) = \begin{cases} \frac{1}{2^i}, & i=1, 2, \dots, k-1 \\ \frac{1}{2^{i-1}}, & i=k \end{cases} \quad (4)$$

式中, i 为每个编码分组的度, k 为原始分组数量.

2.3 可译集

可译集 (ripple) 是 LT 译码过程中度数为 1 的编码分组集合. 期望可译集大小一定程度上反映了译码性能和度分布函数之间的关系. Karp R^[15] 等人第一次给出期望可译集的表达式, 在此基础上, Maatouk G^[16] 进行完善工作. 期望可译集表达式如下:

$$R_{\Omega}(n) = (1 + \varepsilon)(k - n) \left(\Omega' \left(\frac{n}{k} \right) + \frac{1}{1 + \varepsilon} \ln \frac{k - n}{k} \right) + O(1) \quad (5)$$

式中, $\Omega(\cdot)$ 为度分布, k 为原始分组数量, n 表示成功译码的原始分组数量, $\varepsilon = (N - k)/k$ 表示译码开销, N 为译码成功所需编码分组个数.

3 改进的二进制指数分布

3.1 度分布重要特性

大量的研究工作已证实, 度分布的某些特性对 LT 码的编译码性能起主导作用. 下面分别从度分布函数和期望可译集方面对 RSD 和 BED 的特性进行比较分析.

(1) 度分布函数比较

从编码过程的分析可知, 在度分布函数方面, 一个好的度分布应具有以下三个特性: (1) 一个重要特征是度数为 2 在度分布中所占比例最高. 当 $k \rightarrow \infty$ 时, 度数为 2 的比例趋近于 $1/2$ ^[17]; (2) 度数为 1 的比例必须要小且大于 0. 需要度数为 1 的编码分组来触发 BP 译码开始, 但过多的度数为 1 的编码分组会造成低效译码^[2]. 而且在度数为 1 的比例大于度数为 2 的比例的情况下, 则会导致一个相当大的最小译码开销^[18]; (3) 编码分组的平均度数尽可能小. 平均度数是生成一个编码分组所需的平均异或运算次数, 因此, 平均度数决定了编码复杂度, 而译码复杂度则是平均度数乘以译码成功所需编码分组数量^[1].

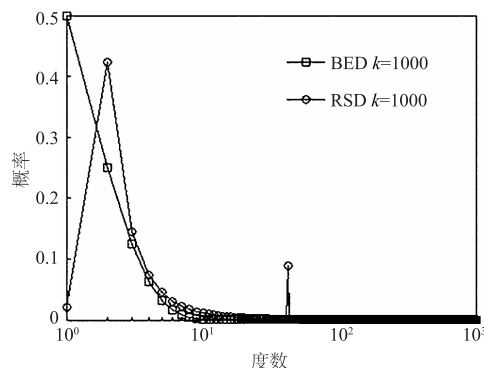
如图 1(a) 所示, RSD 函数最后的“Spike” $\tau(k/R)$ 能保证编码过程中高效地覆盖所有原始分组. 与 RSD 相比, 采用 BED 进行编码能产生更多度数为 1 的编码分组, 从而减少异或运算次数, 有效降低编码复杂度. 但是随着度 i 增加, 其对应的概率 $b(i)$ 呈指数降低, 导致度 i 较大的编码分组数量快速减少而无法保证所有原始分组都能被覆盖.

(2) 期望可译集比较

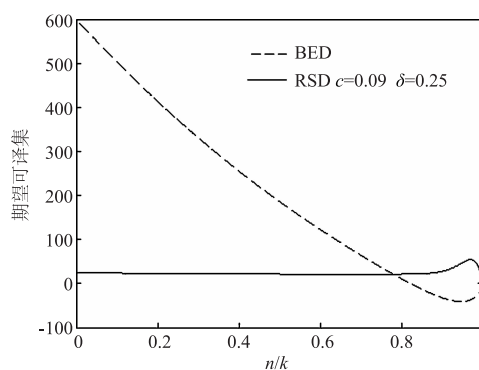
从译码过程的分析可知, 在期望可译集方面, 一个好的度分布具有以下两个特性: (1) 如果可译集消失, 译码过程会在某些步骤的末尾中断. 因此, 期望可译集应该足够大, 防止由于可译集消失而导致的译码过程终止; (2) 任何由于编码分组进入和移出而造成的可译集的变化都有可能可译集消失. 因此, 不期望在译码过程中可译集的波动幅度太大.

从图 1(b) 中可以看出, BED 在初始阶段期望可译集较大, 能防止由于可译集消失而导致的译码过程终止, 因此译码失败发生的概率将会大大降低. 但随着译出的原始分组数量增多, 期望可译集随之降低. 并在译码后期阶段期望可译集快速降低到一个不合理值, 导致一个低的恢复概率. 所以 BED 一定程度上提高了译码效率, 却导致一个相当大的译码开销.

对 RSD 而言, 期望可译集在译码过程大多数阶段几乎保持为一个定值. 并在译码结束阶段期望可译集



(a) BED和RSD概率分布



(b) BED和RSD期望可译集

图1 BED和RSD性能比较

上升到一个较大值, 则保证译码过程能持续到最后, 从而译出所有的原始数据.

3.2 基于度分布重要特性改进二进制指数分布

根据以上对比分析可知, BED 在译码开销较小时具有高译码成功率, 而 RSD 在译码开销较大时能保证将原始分组全部译出. 通过调整度数为 1 的比例逼近 RSD 理想值, 来降低 BED 译码后期的缺陷. 根据文献 [1] 的命题 14 和命题 17 可知, RSD 中为了能够高概率译码, 度数为 1 的编码分组的数量主要集中在 0 到期望值的 $1/(16e)$ 之间. 在设计度分布时, 利用 RSD 这一特性来提高译码成功率. 而极端理想情况是期望所有编码分组的度数都为 1, 因此将度数为 1 的比例设置为 $1/(16e)$. 其次, 将度数为 2 的比例设置为 $1/2$. 并且, 对其他度数的比例也作一定调整. IBED 具体表达式如下:

$$b'(i) = \begin{cases} \frac{1}{16e}, & i = 1 \\ \frac{1}{2^{i-1}}, & i = 2, \dots, k \end{cases} \quad (6)$$

归一化得到 IBED:

$$\zeta(i) = \frac{b'(i)}{\sum_{i=1}^k b'(i)}, \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (7)$$

式中, i 为每个编码分组的度, k 为原始分组数量.

从式(7)可知, 随着 k 降低, IBED 产生度数为 1 的

编码分组数量逐渐减少. 若当 k 较小时(例如, $k < 100$), 由于度数为 1 的编码分组过少, 很可能在译码过程中一个很小的偏差就会导致度数为 1 的编码分组消失从而造成译码终止. 因此, IBED 在译码开销较小时的具有较高译码成功率的性能优势, 只有在 k 较大时的表现才会更为明显.

为验证 IBED 性能, 分别采用这三种度分布对 LT 码进行 1000 次编译码仿真. 成功译出的原始分组比率随译码开销变化情况的仿真结果如图 2 所示. 可以明显看出, IBED 的译码性能优于 BED. 随着译码开销的增加, IBED 译码成功率一直保持较高的状态, 甚至可达 90% 以上. 然而, 随着译码开销增大, RSD (参数 $c = 0.09, \delta = 0.25$) 的译码性能仍旧表现相对更佳.

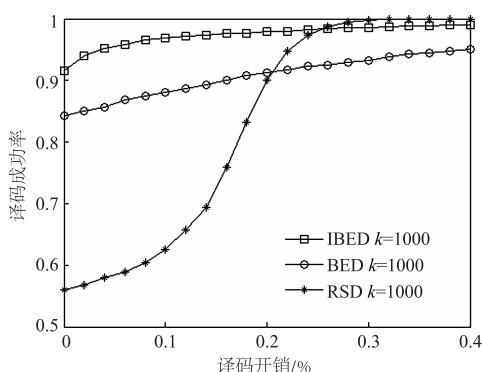


图2 RSD、BED和IBED译码性能

4 基于仿生算法使 IBED 和 RSD 有机结合

为了将 IBED 和 RSD 的优点进行有机结合, 采用仿生算法在两种度分布间进行寻优得到编译码性能最佳的度分布. 其核心是: 首先, 在 RSD 和 IBED 间随机产生初始值; 接着, 基于期望可译集理论构建该算法的目标函数; 然后, 通过比较和迭代逼近最大目标值从而获得优化的度分布.

每个度数比例的初始值从这两种度分布相应的度数比例间随机选取, 即

$$\Omega(i) \in [\min(\zeta(i), \mu(i)), \max(\zeta(i), \mu(i))], \\ i = 1, 2, 3, \dots, k$$

其中, IBED 为 $(\zeta(1), \zeta(2), \dots, \zeta(k))$, RSD 为 $(\mu(1), \mu(2), \dots, \mu(k))$.

通过优化期望可译集性能, 来实现度数比例的多目标寻优. 将度数比例寻优问题转换为期望可译集的性能最优化问题, 并采用人工鱼群算法 (AFSA) 搜索得到度数比例的最优值. AFSA 是一种模拟鱼群的觅食、聚群、追尾等典型行为在搜索域中实现寻优的仿生算法. 该算法能快速搜索到全局极值点并稳定在满意解域内. 并且对初值与参数选择不敏感, 具有较强的鲁棒性和较好的收敛性能^[13].

基于上述分析, 我们希望增大期望可译集均值并同时降低其方差^[8], 即通过最大化下式来获得优化度分布:

$$f = \frac{1}{k} \sum_{n=0}^{k-1} R_{\Omega}(n) - a \cdot \frac{1}{k} \sum_{n=0}^{k-1} (R_{\Omega}(n) - \frac{1}{k} \sum_{n=0}^{k-1} R_{\Omega}(n))^2 \quad (8)$$

式中, $a \in (0, 1)$. a 过大会降低均值的容忍度. 如果 $a = 0$, 目标则转化为求期望可译集方差的最大值. 通常情况下, 将 a 的取值范围设置为 0 到 1 之间.

寻优流程如下:

Step1 基于 IBED 和 RSD 产生初始鱼群, 例如, 鱼群大小为 m , 有 k 个待优化的参数, 即 $\Omega = (\Omega(1), \Omega(2), \dots, \Omega(k))$, 其中, $\Omega(i) \in [\min(\zeta(i), \mu(i)), \max(\zeta(i), \mu(i))]$, $i = 1, 2, 3, \dots, k$, 则要随机产生一个 k 行 m 列初始鱼群 $\{\Omega_v | v = 1, 2, \dots, m\}$.

Step2 每个人工鱼执行群聚行为得到局部最优值, 执行追尾行为得到个体最优值.

Step3 通过行为评价, 即比较两种行为的目标函数值, 选取函数值较大者作为一个人工鱼的最优值 f_{vmax} 及其对应的 Ω_{vmax} .

Step4 m 个人工鱼完成一次感知行为得到 $\{f_{1max}, f_{2max}, \dots, f_{mmax}\}$ 及其对应的 $\{\Omega_{1max}, \Omega_{2max}, \dots, \Omega_{mmax}\}$, 再比较 m 个人工鱼目标函数值, 选取函数值最大者作为人工鱼群的最优值, 得到 f_{MAX} 及其对应的 Ω_{MAX} .

Step5 将 f_{MAX} 与前一次的最优值进行比较, 得到一次迭代的最优值 f_{best} 及其对应的 Ω_{best} , 如果迭代次数小于设定值, 转移到 Step2, 否则寻优完成, 得到全局最优目标函数值 f_{BEST} 及其对应的人工鱼状态 Ω_{BEST} .

5 性能仿真及分析

为验证所提方法的有效性, 分别采用 RSD 和本文方法设计的度分布 (以下简称 IRAD (IBED-RSD-AFSA degree) 度分布) 进行 1000 次 LT 码的编译码仿真, 然后对实验结果进行比较和分析. 借鉴参考文献[8], 目标函数参数选取为: $\varepsilon = 0.1, a = 0.25$. 按照文献[12]的方法为不同 k 选取合适的 c 和 δ 参数值, 度分布参数选取如表 1 所示.

表 1 度分布参数选择

k	c	δ
500	0.08	0.32
1000	0.09	0.25
2000	0.11	0.40

从图 3 可以明显看出, 随着接收编码分组数的增多, IRAD 度分布译码成功率快速上升. 在接收编码分组数较少的情况下译码性能比传统的 RSD 好很多. 表 2 对 RSD 和 IRAD 度分布的译码成功所需的平均译码开

销、平均度数以及单次编译码耗时进行比较. 可以看出 IRAD 度分布的平均度数较小, 意味着编译码过程中进行的异或运算量大大降低. 并且, 当 $k = 500, 1000, 2000$ 时, 采用 IRAD 度分布进行 LT 编码, 译码成功所需的平均译码开销比 RSD 降低了 13.24% ~ 18.64%. 同样可以看出, 与 RSD 相比, IRAD 度分布节约了 17.32% ~ 52.52% 编译码耗时.

选取相同参数 $k = 1000, c = 0.09, \delta = 0.25$ 时, 分别对 IRAD 度分布、参考文献[9]中的度分布优化方法(以下简称 PSO 度分布)、参考文献[10]中的度分布优化方

法(以下简称 ACA 度分布)、参考文献[11]中的度分布设计方法(以下简称 SDD 度分布)和 RSD 进行 1000 次编译码仿真, 仿真结果如图 4 所示.

表 2 RSD 和 IRAD 度分布性能比较

原始分组 k	译码开销(%)		平均度数		平均耗时(s)	
	RSD	IRAD	RSD	IRAD	RSD	IRAD
500	24.27	5.63	9.50	6.03	3.81	3.15
1000	20.46	5.16	10.72	6.73	17.48	8.30
2000	16.80	3.56	11.63	7.22	47.21	31.48

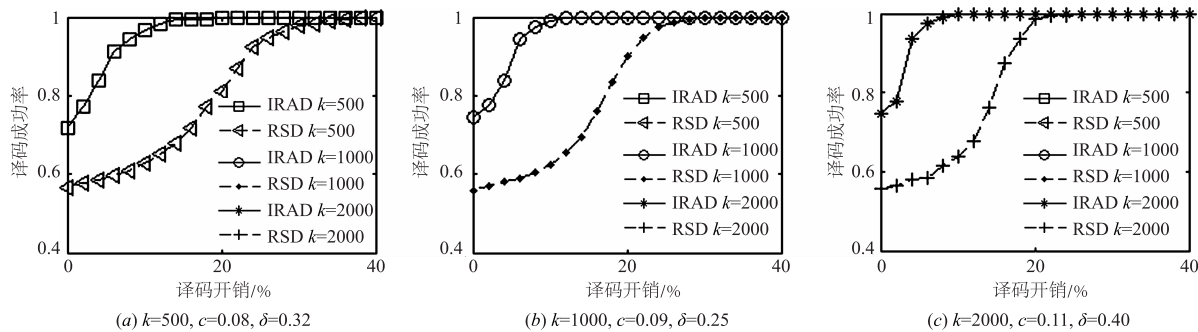


图3 RSD和IRAD度分布译码性能

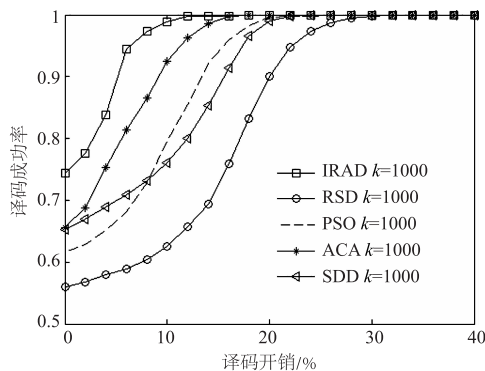


图4 不同度分布译码性能($k=1000, c=0.09, \delta=0.25$)

采用 IRAD 度分布进行编码, 在接收编码分组数较少的情况下译码性能比其他 4 种度分布好很多. 从表 3 可以看出, 与其他 4 种度分布相比, 该方法降低了 3.99%

~ 15.30% 译码开销, 并且节约了至少 11.04% (11.04% ~ 52.52%) 的平均编译码耗时.

表 3 不同度分布性能比较($k=1000, c=0.09, \delta=0.25$)

	PSO	ACA	SDD	RSD	IRAD
译码开销(%)	13.34	9.15	15.52	20.46	5.16
平均度数	6.87	6.23	9.85	10.72	6.73
平均耗时(s)	9.33	10.24	14.78	17.48	8.30

为获得更为直观的对比较果, 采用 $256 \times 256 \times 8 = 524288$ bit 的灰度图作为传输数据. 将原始数据均分为 1024 个原始分组(每个原始分组包含 512 bit), 当接收端接收到 1100 个编码分组($\epsilon \approx 0.10$)时强制译码恢复, 对图像的恢复质量进行直观评估. 从图 5 中明显看出, RSD 以及其他四种优化度分布恢复的图像失真严重, 而 IRAD 度分布几乎完全恢复图像.

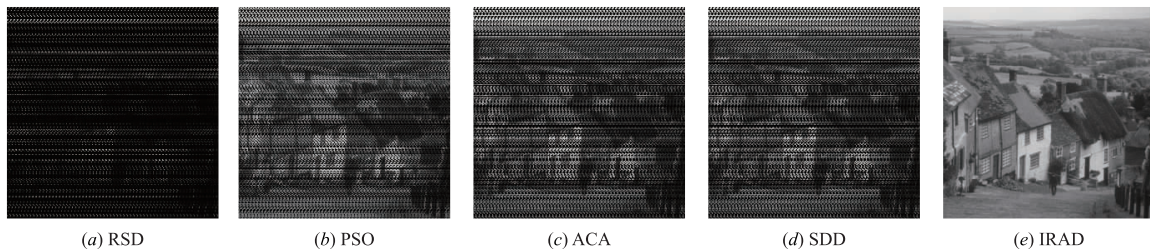


图5 五种度分布图像恢复质量比较

6 结束语

将译码开销较小时具有高译码成功率的 IBED 与

译码开销较大时能保证将原始分组全部译出的 RSD 进行有机结合, 通过 AFSA 在两种度分布间进行寻优得到译码性能更佳的度分布. 仿真结果表明, 与传统的 RSD

以及类似方法相比,采用提出的方法优化度分布更能有效提高 LT 码的译码效率和译码成功率。

参考文献

- [1] LUBY M. LT codes [A]. Proc of the 43rd Annual IEEE Symposium on Foundations of Computer Science [C]. Vancouver, Canada: IEEE, 2002. 271 – 280.
- [2] MacKay D J C. Fountain codes [J]. IEE Proceedings-Communications, 2005, 152(6): 1062 – 1068.
- [3] 慕建君, 焦晓鹏, 曹训志. 数字喷泉码及其应用的研究进展与展望 [J]. 电子学报, 2009, 37(7): 1571 – 1577.
MU Jian-jun, JIAO Xiao-peng, CAO Xun-zhi. A survey of digital fountain codes and its application [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(7): 1571 – 1577. (in Chinese)
- [4] SUN L, REN P, DU Q, et al. Fountain-coding aided strategy for secure cooperative transmission in industrial wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2016, 12(1): 291 – 300.
- [5] CHEN X, CHEN H H, MENG W. Cooperative communications for cognitive radio networks – From theory to applications [J]. IEEE Communications surveys & tutorials, 2014, 16(3): 1180 – 1192.
- [6] KHOUEIRY B W, SOLEYMANI M R. A Novel Machine to Machine Communication Strategy Using Rateless Coding for the Internet of Things [M]. Beyond the Internet of Things. Springer International Publishing, 2017. 85 – 118.
- [7] KABORE A W, MEGHDADI V, CANCES J P. Cooperative relaying in narrow-band PLC networks using fountain codes [A]. Proc of Power Line Communications and its Applications (ISPLC), 2014 18th IEEE International Symposium on [C]. Glasgow, United Kingdom: IEEE, 2014. 306 – 310.
- [8] YEN K K, et al. Modified robust soliton distribution (MRSB) with improved ripple size for Lt codes [J]. Communications Letters, IEEE, 2013, 17(5): 976 – 979.
- [9] 黄诚. 喷泉码理论与若干关键技术研究 [D]. 武汉大学, 2010.
HUANG Cheng. Research on theory and key technique of Fountain codes [D]. Wuhan University, 2010. (in Chinese)
- [10] 黄诚, 等. 短码长 LT 码的蚁群算法度分布优化 [J]. 北京邮电大学学报, 2010, 33(6): 129 – 133.
HUANG Cheng, et al. The degree distribution optimization of short code length LT codes using ant colony algorithm [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2010, 33(6): 129 – 133. (in Chinese)
- [11] ZHANG M, LEI W, XIE X. Combined degree distribution; A simple method to design the degree distribution of fountain codes [A]. Proc of Information Science and Technology (ICIST), 2013 International Conference on [C]. Yangzhou, China: IEEE, 2013. 1089 – 1092.
- [12] YAO W Q, YI B S, HUANG T Q, et al. Poisson robust soliton distribution for LT codes [J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(8): 1499 – 1502.
- [13] 李晓磊, 等. 一种基于动物自治体的寻优模式: 鱼群算法 [J]. 系统工程理论与实践, 2002, 22(11): 32 – 38.
LI Xiao-lei, et al. An optimization mode based on Autonomous; fish-swarm algorithm [J]. Systems Engineering Theory and Practice, 2002, 22(11): 32 – 38. (in Chinese)
- [14] AGHA A K, KADI N, STOJIMENOVIC I. Fountain codes with XOR of encoded packets for broadcasting and source independent backbone in Multi-hop networks using network coding [A]. Proc of Vehicular Technology Conference [C]. 2009. VTC Spring 2009. IEEE 69th. Barcelona, Spain: IEEE, 2009. 1 – 5.
- [15] KARP R, LUBY M, SHOKROLLAHI A. Finite length analysis of LT codes [A]. Proc of Information Theory, 2004. ISIT 2004. Proceedings. International Symposium on [C]. Chicago, USA: IEEE, 2004. 39.
- [16] MAATOUK G, SHOKROLLAHI A. Analysis of the second moment of the LT decoder [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2012, 58(5): 2558 – 2569.
- [17] ETESAMI O, SHOKROLLAHI A. Raptor codes on binary memoryless symmetric channels [J]. Information Theory, IEEE Transactions on, 2006, 52(5): 2033 – 2051.
- [18] HYYTIÄ E, TIRRONEN T, VIRTAMO J. Optimizing the degree distribution of LT codes with an importance sampling approach [A]. RESIM 2006, 6th International Workshop on Rare Event Simulation [C]. 2006.

作者简介



姚渭箐 (通信作者) 女, 1983 年生, 湖北武汉人, 博士, 工程师, 研究方向为无线通信、信道编码、图像处理。
E-mail: ywq1005@whu.edu.cn



胡凡 男, 1988 年生, 湖北随州人, 博士, 研究方向为高分辨率遥感图像解译、模式识别及深度学习。