

一种用于水声通信的喷泉码最大似然译码方法

武岩波* 朱敏

^①(中国科学院声学研究所声场声信息国家重点实验室 北京 100190)

^②(中国科学院声学研究所海洋声学技术中心 北京 100190)

摘要: 针对水声通信特点, 研究随机线性喷泉码及最大似然译码, 在分块数较小的包传输中纠正删除错误。传统的最大似然译码为整包统一处理, 译码延迟大。该文提出一种逐行累增的高斯消去法, 将译码过程划分到各块到达时隙中执行, 利用二进制分布求和的概率公式对单块到达所需计算量进行分析。在实际水声通信处理平台上进行了验证, 满足实时计算需求, 可用于水下图像、传感器数据等的传输。

关键词: 水声通信; 喷泉码; 高斯消去法; 随机线性喷泉码

中图分类号: TN929.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2016)02-0288-06

DOI: 10.11999/JEIT150572

Maximum Likelihood Decoding of Fountain Codes in Underwater Acoustic Communication

WU Yanbo ZHU Min

^①(State Key Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(Ocean Acoustic Technology Center, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Considering the characteristics of underwater acoustic communication, random linear fountain codes with maximum likelihood decoding are studied to correct erasure errors in the short packet transmission. In existing maximum likelihood decoding methods, processing begins when all the necessary blocks are available, resulting to the unacceptable decoding delay. An increment Gaussian elimination method is proposed to decrease the decoding delay by utilizing the time-slots of every block. The computation complexity is analyzed based on the principle of the probability distribution of the summation of binary random variables. The real-time ability of the proposed method is verified on the low-cost DSP chip for the underwater acoustic modem. The method is applicable to underwater transmissions of images, and sense data.

Key words: Underwater acoustic communication; Fountain code; Gaussian elimination; Random linear fountain code

1 引言

水声通信信道时变性强, 信道冲击响应、环境背景噪声和干扰是非平稳过程, 造成信道容量是时变的, 数据块传输错误或丢失的比例较高。目前, 实际水声通信系统中多采用选择性重传的反馈机制。水声传播速度小且水声通信为半双工方式, 因而反馈信道造成信道利用率低。从信息论来看, 反馈信道对信息传输是不必要的。

喷泉码可以显著地降低反馈信道开销。喷泉码

(无速率码)是一种应对删除信道的有效方法。理想的无速率特性主要体现在两个方面: (1)对有限数量的信源块进行编码, 可产生无限数量的编码块, 因而不需要事先知道信道的删除错误概率, (2)解码所需要块的数目尽可能接近信源块的数目, 即可以译码冗余接近 0。经典的 Reed-Solomon 码, 冗余为 0 时可以 100%正确译码, 但编码输出数量是有限的, 不满足喷泉码特性, 且其译码复杂度高。喷泉码中关注最多的为 LT 码, 及在其基础上构造的 Raptor 码。2002 年, LUBY^[1]提出 LT 码, 根据优化的度分布函数进行随机编码, 满足无限输出的特征, 在大数据包下仅需要少量的冗余, 译码为线性复杂度, 是最早出现的实用性喷泉码。采用 LT 码, 当信源块数目为 10000, 冗余为 5%时, 成功译码概率为 90%。2006 年, SHOKROLLAHI^[2]在 LT 码的基础

收稿日期: 2015-05-13; 改回日期: 2015-10-30; 网络出版: 2015-12-04

*通信作者: 武岩波 wuyanbo@mail.ioa.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61471351), 中国科学院声学研究所所长择优基金(Y454101231)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61471351), Preferred Foundation of Director of Institute of Acoustics, CAS (Y454101231)

上,利用级联编码提出 Raptor 码,有更高的译码成功概率。LT 码和 Raptor 码在大数据包下,具有低复杂度、低冗余开销的特点,但随着数据包的减小,冗余比特所占比例急剧上升。2015 年, HANZO 等人^[3]指出 LT 码和 Raptor 码在传输短块数据时性能急剧恶化原因在于 Tanner 图次优结构,提出一种改进的 Raptor 码(IRaptor),用于特定码率和包长度的传输。

喷泉码已引起水声通信领域的关注,针对点对点传输、组播传输及多跳传输水声网络性能开展了仿真^[4,5]。2007 年, CHAN 等人^[6]将 LT 码用于水声通信文件传输协议,将 1 Mbit 文件分块后进行 LT 码编码传输,分块数目为 4000 时冗余开销最小为 15%。2008 年, CASARI 等人^[7]研究了用于水声通信多播消息传输的基于喷泉码的混合自动重传请求策略,文章用喷泉码的统一性能进行仿真,没有涉及到喷泉码的实现。2012 年, ZHOU 等人^[8]提出一种基于喷泉码的自适应多跳可靠数据传输方法。2014 年, CUI 等人^[9]将基于喷泉码的水声通信传输过程建模成一个统计优化问题,利用信道状态估计优化 Raptor 码的校验比例,系统性能仿真基于 Raptor 码译码失效概率公式。2015 年, CHITRE 等人^[10]考虑到水下传播延迟对水声通信文件传输的影响,对比不同的自动重传请求(ARQ)模式下的性能,指出喷泉码和 Juggling-like ARQ(J-ARQ)相结合的方法在传输可靠性和信道利用率上的优势。

目前,水声通信中喷泉码的研究主要采用仿真的手段,常用 LT 码或 Raptor 码,或者不涉及具体的喷泉码,研究侧重于网络整体性能。陆地无线电通信中的喷泉码多用于大数据量的传输,如视频广播,一个数据包包含 10000 个数据块,传输速率可在 1 Mbps 以上。水声通信中喷泉码的选择应充分考虑水声通信系统的以下特点:首先,水声通信带宽窄,通信比特速率低。如中程水声通信距离为 5 km 速率一般在 5 kbps 以下。低数据率可应用高复杂度的算法,以提升系统性能。其次,一个数据块大小有限。由于水声信道时变性强、带宽窄,中程通信数据块一般不超过 2000 bit。无速率编码过程应减少随机编码的块头信息。再次,一次传输所含数据块数有限。水下设备电量有限,且传输每比特能耗高,每比特能耗为 1 J 量级,更换一次电池传输 10 Mbit 左右。因而,水声通信数据块数目较少,一般在 1000 块以下。

本文给出一种实用的水声通信中喷泉码方案。选择随机线性喷泉码及最佳译码,以提升喷泉码在分块数目较小情况下的性能。传统的最佳译码为整

包统一处理,译码延迟大。本文提出一种逐行累增的高斯消去译码方法,将译码过程分散到单块到达时隙中,对单块到达的计算量进行分析,其复杂度为线性复杂度。在实际水声通信平台上进行了验证,分析其纠错性能及处理实时性,采用 1000 块分组,单块计算时间最大 60 ms,在采用最佳译码算法降低冗余开销的同时,满足实时计算条件。

2 水声通信中用于小分块数的喷泉码

随机线性喷泉码(Random Linear Fountain code, RLF)^[11,12]是一种基本的喷泉码,最佳译码时所需冗余很小,且冗余块数和数据块数无关,在块数小的情况下有很好的优势。在编码过程中,将一个完整的数据包进行分块,每块含 M 个比特,共 K 个数据块,第 k 数据块中第 m 个比特记为 $\mathbf{s}_{k,m}$ ($1 \leq k \leq K, 1 \leq m \leq M$)。第 n 个编码块中第 m 个元素记为 $\mathbf{T}_{n,m}$ ($n \geq 1, 1 \leq m \leq M$), 则

$$\mathbf{T}_{n,m} = \sum_{k=1}^K \mathbf{G}_{n,k} \mathbf{s}_{k,m} \quad (1)$$

其中 $\{\mathbf{G}_{n,k}\}$ 为随机比特,取 1 的概率为 p 。写成矩阵的形式为 $\mathbf{T} = \mathbf{G}\mathbf{S}$, 其中 $\mathbf{T}, \mathbf{G}, \mathbf{S}$ 分别为编码矩阵、生成矩阵、信息矩阵。编码块是随机挑选数据块逐比特模 2 加的结果。在接收端,收到 N 个编码块后,且生成矩阵是已知的,基于最大似然(Maximum Likelihood, ML)准则译码恢复原始数据。在 $p = 0.5, K > 10$ 时,译码失效概率约为 $2^{-(N-K)}$ 。通过高斯消去法完成 ML 准则,译码复杂度为 $O(MN^2)$ 。概率 p 代表生成矩阵 \mathbf{G} 的稀疏程度,减小 p 可降低译码复杂度,但性能有所下降^[11]。文献[13]采用伽罗华域上的多进制构造随机线性喷泉码,并采用高斯消去法,可以进一步降低冗余开销。在随机线性喷泉码基础上, LUBY 通过优化编码中的度分布函数构造了 LT 码。LT 码可以采用置信度传播(Belief Propagation, BP)算法进行译码,计算复杂度为 $O(MN)$ 。LT 码主要针对大量数据块数目传输问题,小数据包表现效果差。

图 1 给出了 RLF 码和 LT 码的译码失效概率。RLF 码生成矩阵分布概率取 $p = 0.5$, LT 码度优选所用参数取 $c = 0.1$ 及 $\delta = 0.5$ 。可以看出在小分块数时,LT 码性能较差。为了使包失效概率在 0.001 以下,对于 $K = 100$ 的 LT 码,即使采用 ML 译码方法,仍需要 70% 的冗余。RLF 码仅需要 10 个冗余块,所需冗余块数目不随 K 变化。

水声通信中小数据包的情况较为常见,采用 RLF 码及其最佳译码方法有优势,但其译码计算复杂度有待降低。目前,喷泉码的最佳译码方法主要

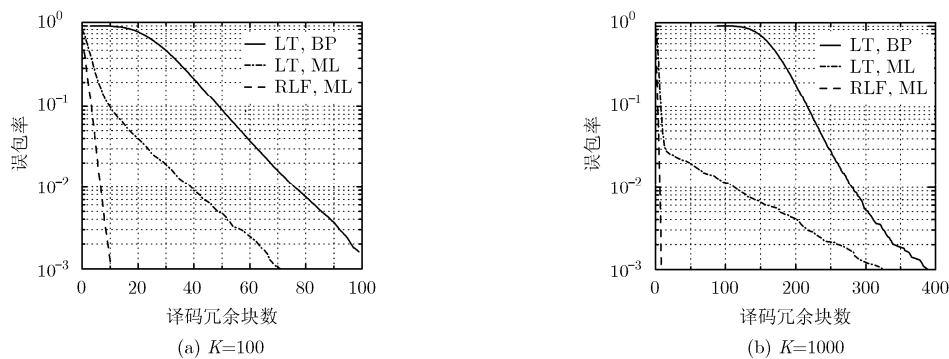


图1 LT码和RLF码的性能曲线

有高斯消去法(Gaussian Elimination, GE)^[12]和RU(Richardson-Urbanke)法^[14]。高斯消去法,将生成矩阵通过行变换转换成单位矩阵,同时对接收比特矩阵进行同样变换恢复出信息比特矩阵。高斯消去法的译码复杂度为 $O(MN^2)$ 。对于稀疏编码的喷泉码,可采用RU译码法,将编码矩阵置换处理得到近似三角矩阵,对稀疏矩阵求逆借鉴了低密度奇偶校验码(LDPC)编码方法^[15]。RU法译码复杂度约为 $O(MN \lg(N))$ 。现有的喷泉码最佳译码方法是整包统一处理。从满足译码实时性角度考虑,本文提出一种逐行累增的高斯消去译码方法,不限于稀疏编码,将译码过程分散到单块到达时隙中,对每块到达时的译码计算量进行分析,单步处理计算复杂度为 $O(MK)$ 。同时在分步处理中及时删除多余的编码块,总计算量略低于传统的高斯消去法。

3 逐行累增的高斯消去法

3.1 算法步骤

RLF码经典的译码方法为高斯消去法。接收端成功收到 N 个编码块,对应的编码矩阵和生成矩阵为 \mathbf{T} 和 \mathbf{G} 。如果生成矩阵的秩为 K ,通过高斯消去法将增广矩阵化简得到行最简形(reduced row echelon form)矩阵。这一化简过程记为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{G} & \mathbf{T} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{S} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中 \mathbf{I} 为单位矩阵, $\mathbf{0}$ 为零矩阵,行最简形矩阵包含了信息矩阵,因而完成了译码过程。

在高斯消去法上改进,每收到一个编码块对生成矩阵进行高斯消去法处理,并根据生成矩阵秩的增加进行编码矩阵处理,生成矩阵秩为 K 做为译码结束条件。因而,本文提出表1所示的逐行累增高斯消去法(Increment Gaussian Elimination, IGE)。

3.2 计算复杂度的预测方法

首先给出多个二进制随机数的模2加和的概率计算方法。相互独立的 K 个二进制数 b_k ($1 \leq k \leq K$),

表1 IGE的迭代过程

- | |
|--|
| (1)初始化: $j = 0$, $[\mathbf{G}^{(0)} \ \mathbf{T}^{(0)}]$ = 空矩阵。 |
| (2)生成矩阵单次处理: 接收到第 n 个编码块, 矢量和编码矢量为 $\mathbf{G}_n, \mathbf{T}_n$ 。将 $\begin{bmatrix} \mathbf{G}^{(j)} \\ \mathbf{G}_n \end{bmatrix}$ 进行高斯消去法处理, 得到行最简形矩阵及秩大小, 并记录处理过程。 |
| (3)编码矩阵单次处理: 如果 $\begin{bmatrix} \mathbf{G}^{(j)} \\ \mathbf{G}_n \end{bmatrix}$ 的秩等于 $\mathbf{G}^{(j)}$ 的秩, 不做处理; 否则 $j \leftarrow j + 1$, 将第(2)步所记录的处理过程用于 $\begin{bmatrix} \mathbf{T}^{(j)} \\ \mathbf{T}_n \end{bmatrix}$ 的处理, 增广矩阵变为 $[\mathbf{G}^{(j+1)} \ \mathbf{T}^{(j+1)}]$ 。 |
| (4)译码结束条件: 如果 $j = K$, 则译码成功, 信息矩阵为 $\mathbf{T}^{(K)}$; 否则返回第(2)步。 |

概率分别为 $P_{b_k} = P(b_k = 1)$ 。它们模2加和为 b , 则

$$P_b = P(b = 1) = f(P_1, P_2, \dots, P_K) = \frac{1}{2} \left(1 - \prod_{k=1}^K (1 - 2P_k) \right) \quad (3)$$

下面分析逐行累增高斯消去法的计算量大小。一般情况下 $M \gg K$, 因而只关心对编码矩阵处理的计算量, 即表1中第(3)步的计算量。在生成矩阵秩由 j 变换到 $(j+1)$ 时, 对编码矩阵行操作的平均次数记为 $s(j+1)$ 。在一次迭代中, 执行两种行操作: 用 $\mathbf{G}^{(j)}$ 的各行首变量(lead variables)抵消 \mathbf{G}_n 中对应位置, 将新增行的首变量抵消所在列的其它元素。两种操作如式(4), 式(5)所示:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{G}^{(j+1)} \end{bmatrix}_{(j+1),m} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_n \end{bmatrix}_m + \sum_{i=1}^j \begin{bmatrix} \mathbf{G}_n \end{bmatrix}_i \begin{bmatrix} \mathbf{G}^{(j)} \end{bmatrix}_{i,m} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{G}^{(j+1)} \end{bmatrix}_{i,m} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}^{(j+1)} \end{bmatrix}_{(j+1),m} \begin{bmatrix} \mathbf{G}^{(j)} \end{bmatrix}_{i,k} + \begin{bmatrix} \mathbf{G}^{(j)} \end{bmatrix}_{i,m} \quad (5)$$

其中 k 为 $\mathbf{G}^{(j+1)}$ 第 $(j+1)$ 行的首变量所在位置。假设 $\mathbf{G}^{(j)}$ 中第 i 行自由变量(free variables)取值1的概率为 $P_i^{(j)}$, 则式(4)的行操作平均次数为 jp , 式(5)的行操作平均次数为 $P_i^{(j)}$ 。因而

$$s(j+1) = jp + \sum_{i=1}^j P_i^{(j)} \quad (6)$$

设定初始值 $P_1^{(1)} = p$ 。根据式(3)，对式(4)和式(5)左端为自由变量时求概率得到

$$P_{j+1}^{(j+1)} = f(p, pP_1^{(j)}, pP_2^{(j)}, \dots, pP_j^{(j)}) \quad (7)$$

$$P_i^{(j+1)} = f(P_{j+1}^{(j+1)} P_i^{(j)}, P_i^{(j)}), 1 \leq i \leq j \quad (8)$$

采用迭代方法可计算所有的 $P_i^{(j)} (1 \leq i \leq j, j < K)$ 。式(6)给出了单次迭代中行操作次数的期望值。在 $K = 100$ 时，行操作次数曲线随迭代序号 j 的关系如图 2 所示，总的计算量被分散到各次迭代中，计算次数随 j 单调增长。同时，图 2 还给出了操作次数的蒙特卡洛仿真的结果，产生 1000 个数据包进行 IGE 译码，分别记录各自的操作次数，在不同包之间取平均值。预测值和仿真结果基本一致，尤其在 j 较大时完全重合。

3.3 行操作次数的最大值

行操作次数的单步最大值影响着系统的实时处理能力，下面对最大值进行分析。通过仿真计算，可得出经过行累增迭代后自由变量取 1 的概率接近 0.5，即

$$P_{a_i}^{(j)} \approx 0.5, j \gg 1, 1 \leq i \leq j \quad (9)$$

因而编码矩阵的行操作次数简化为

$$s(j+1) = (p + 0.5)j \quad (10)$$

逐行累增高斯消去法行操作次数的单步最大值为

$$s_{\max} = s(K) = (p + 0.5)(K - 1) \quad (11)$$

图 3 给出了不同生成矩阵稀疏程度 p 及不同分块数目 K 下，IGE 算法中最大行操作次数的仿真运行结果(仿真 1000 个数据包，取平均值)及预测值的对比。从图中可知，式(11)很好地给出了最大行操作次数的预测结果。降低 p ，IGE 算法的计算量不能成比例地减少，但性能有所恶化^[8]。因而，在水声通信小分块数传输中，选择 $p = 0.5$ 的 RLF 码及 IGE 译码方法。采用所提出的 IGE 算法，在保证最佳译

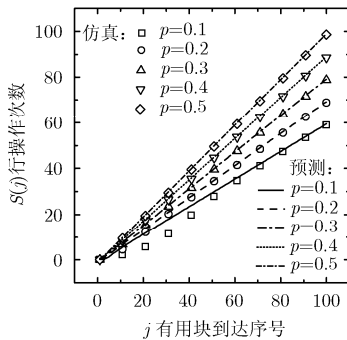


图 2 IGE 的单次迭代中行操作次数($K=100$)

码性能的同时，单次迭代行操作次数为 $O(K)$ ，相对于单步处理的 GE 译码，有效地降低了译码延迟。

4 水声通信系统的应用

水下数据包通信主要用于传输水下图像、温盐深链数据、分层流速，采用纠删除错误码进行分块之间的编码有利于大数据包的传输。在“蛟龙号”载人潜水器水声图像传输^[16]中，图像数据包用于传输小波压缩后的 512×512 像素彩色图像，数据包分为 60 个数据块，每块 2000 bit。由于数据包大小固定且显控计算机参与计算，采用基于 Reed-Solomon 码的纠删除错误方案，所需译码冗余为 0。从 2013 年应用航段开始，应用 Reed-Solomon 码有效地纠正了船体噪声、吊缆结构件摩擦、定位声呐等突发干扰源造成的块传输错误。

在水声通信系统中，喷泉码比 Reed-Solomon 码在计算复杂度、信源大小可变、信道删除概率不确定等方面有明显优势。在图像传输应用中，可进一步利用喷泉码根据图像压缩后信源比特的重要性进行不对等保护编码，优化传输效果^[17,18]。为了验证喷泉码最佳译码算法在水声通信中的实时性，将本文提出的 IGE 算法进行平台实现。采用 ADI 公司的低功耗定点信号处理器 ADSP-BF547 做为开发平台，系统时钟为 480 MHz，将数据包分块，每块 2000 bit，采用 RLF 编码。在 VisualDSP++ 环境下开发，利用 c++ 语言嵌入式标准模板库 STL 中 bitset 模板进行比特矢量的紧凑存取及处理，图 4 给出了一个数据包的分块数取 $K = 100$ 及 $K = 1000$ 的计算时间。对于 $K = 1000$ ，单块的最大计算时间为 60 ms，远小于数据块传输时间 0.5 s，符合实时处理要求。而传统的 GE 法在接收到足够的数据块之后才进行处理，对于 $K = 1000$ 情况处理时间在 33 s 以上，不能满足实时处理需要。

图 5 给出了基于逐行累增高斯消去法的随机线性编码在译码前后错误率，可看出对于恶劣的信道

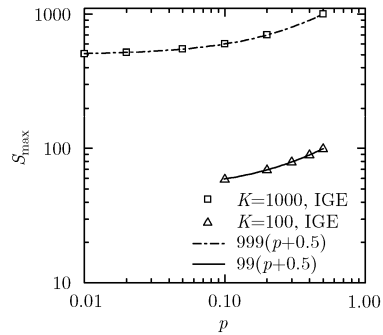


图 3 IGE 最大行操作次数的蒙特卡洛仿真及预测值对比

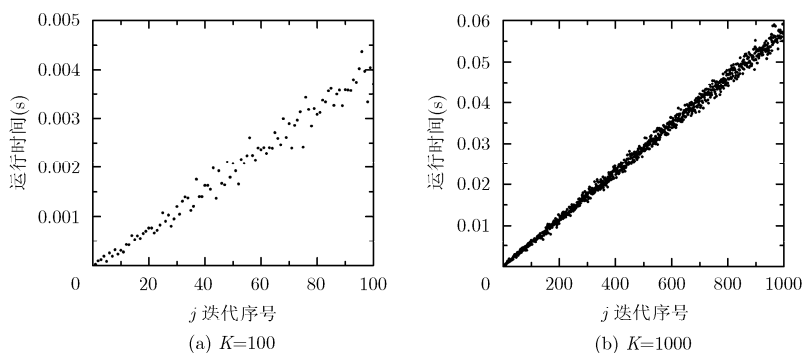


图4 本文算法在BlackFin547上的译码时间

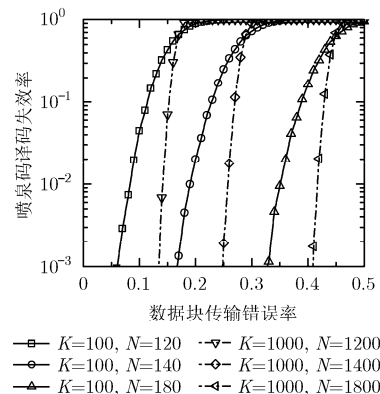


图5 喷泉码译码前后错误率对比(K 为每包的数据块数, N 为已发送的数据块数)

增加少量的冗余可以实现可靠的传输,如:将包分成1000个数据块,在块传输错误率为25%的情况下,仅需要40%的冗余,通过喷泉码纠错可实现99.99%的可靠传输。从图中还可看出,在同样的分块错误率下为达到特定的包正确率,分块数目增加,所需冗余比例降低。

5 结论

针对水声通信中数据包的传输,本文提出一种逐行累增的高斯消去法进行随机线性编码的最佳译码,所需要冗余远小于LT码,给出了计算复杂度的预测式,单块到达时的比特计算次数为 $O(Mk)$ 。在实时处理平台上进行算法实现,验证了所提出算法的实时性满足系统需求。所提译码算法可用于水下图像、视频片段、传感器数据等大数据量的可靠传输。

参考文献

- [1] LUBY M. LT codes[C]. Proceedings of the 43rd Annual IEEE Symposium on Foundations of Computer Science, Vancouver, 2002: 271-282. doi: 10.1109/SFCS.2002.1181950.
- [2] SHOKROLLAHI A. Raptor codes[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(6): 2551-2567. doi: 10.1109/TIT.2006.874390.
- [3] HANZO L, MAUNDER R, CHEN H, et al. Hybrid-ARQ-aided short fountain codes designed for block-fading channels[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2015. doi: 10.1109/TVT.2015.2388632.
- [4] 赵旦峰, 梁明坤, 段晋珏. 水声网络中喷泉码的应用研究现状与发展前景[J]. *系统工程与电子技术*, 2014, 36(9): 1838-1843. doi: 10.3969/J.ISSN.1001-506X.2014.09.27.
ZHAO Danfeng, LIANG Mingshen, and DUAN Jinjue. Survey of fountain codes in underwater acoustic sensor networks[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2014, 36(9): 1838-1843. doi: 10.3969/J.ISSN.1001-506X.2014.09.27.
- [5] NICOPOLITIDIS P, PAPADIMITRIOU G I, and POMPORTSIS A S. Adaptive data broadcasting in underwater wireless networks[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2010, 35(3): 623-634. doi: 10.1109/JOE.2010.2049674.
- [6] CHAN C Y M and MOTANI M. An integrated energy efficient data retrieval protocol for underwater delay tolerant networks[C]. Proceedings of the OCEANS, Aberdeen, 2007: 1-6. doi: 10.1109/OCEANSE.2007.4302341.
- [7] CASARI P, ROSSI M, and ZORZI M. Towards optimal broadcasting policies for HARQ based on fountain codes in underwater networks[C]. Proceedings of the 2008 Fifth Annual Conference on Wireless on Demand Network Systems and Services, Garmisch-Partenkirchen, 2008: 11-19. doi: 10.1109/WONS.2008.4459350.
- [8] ZHOU Z, MO H, ZHU Y, et al. Fountain code based adaptive multi-hop reliable data transfer for underwater acoustic networks[C]. Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Communications, Ottawa, 2012: 6396-6400. doi: 10.1109/ICC.2012.6364846.
- [9] CUI Y, QING J, GUAN Q, et al. Stochastically optimized fountain based transmissions over underwater acoustic channels[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2014, 64(4): 2108-2112. doi: 10.1109/TVT.2013.01958.
- [10] CHITRE M and SOH W S. Reliable point-to-point underwater acoustic data transfer: to juggle or not to juggle?[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2015, 40(1): 93-103. doi: 10.1109/JOE.2014.2311692.
- [11] SCHOTSCH B, SCHEPKER H, and VARY P. The performance of short random linear fountain codes under maximum likelihood decoding[C]. Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Communications, Kyoto, 2011: 1-5. doi: 10.1109/ICC.2011.5962476.
- [12] MACKAY D J C. Fountain codes[J]. *IEE Proceedings-Communications*, 2005, 152(6): 1062-1068. doi: 10.1049/IP-

- COM: 20050237.
- [13] LIVIA G, PAOLINI E, and CHIARI M. Performance versus overhead for fountain codes over Fq[J]. *IEEE Communications Letters*, 2010, 14(2): 178–180. doi: 10.1109/LCOMM.2010.02.092080.
- [14] MADGE O G H and MACKAY D J C. Efficient fountain codes for medium blocklengths[OL]. <http://www.inference.phy.cam.ac.uk/oghm2/files/fountain-draft.pdf>. 2006, 1.
- [15] RICHARDSON T J and URBANKE R L. Efficient encoding of low-density parity-check codes[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2001, 47(2): 638–656. doi: 10.1109/18.910579.
- [16] 朱维庆, 朱敏, 武岩波, 等. 载人潜水器“蛟龙”号的水声通信信号处理[J]. *声学学报*, 2012, 37(6): 565–573. doi: 10.15949/J.CNKI.0371-0025.2012.06.001.
- ZHU Weiqing, ZHU Min, WU Yanbo, *et al.* Signal processing in underwater acoustic communication system for manned deep submersible “Jiaolong”[J]. *Acta Acustica*, 2012, 37(6): 565–573. doi: 10.15949/J.CNKI.0371-0025.2012.06.001.
- [17] 刘国, 于文慧, 吴家骥, 等. 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, 35(11): 2554–2559. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.01362.
- LIU Guo, YU Wenhui, WU Jiaji, *et al.* Compressed image transmission based on systematic Raptor codes with unequal error protection[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(11): 2554–2559. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.01362.
- [18] 黄太奇, 易本顺, 姚渭箐, 等. 基于规则变量节点度和扩展窗喷泉码的不等差错保护算法[J]. *电子与信息学报*, 2015, 37(8): 1931–1936. doi: 10.11999/JEIT141530.
- HUANG Taiqi, YI Benshun, YAO Weiqing, *et al.* Novel scheme of unequal error protection based on regularized variable-node and expanding window fountain codes[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(8): 1931–1936. doi: 10.11999/JEIT141530.
- 武岩波: 男, 1982 年生, 副研究员, 研究方向为水声通信信号处理.
- 朱敏: 男, 1971 年生, 研究员, 研究方向为海洋声学技术.