

浅海水声信道中重复累积码性能研究

张兰^{1,2}, 许肖梅^{1,2}, 冯玮^{1,2}, 陈友淦^{1,2}

(1. 厦门大学 信息科学与技术学院, 福建 厦门 361005; 2. 厦门大学 水声通信与海洋信息技术教育部重点实验室, 福建 厦门 361005)

摘要: 针对浅海水声信道的强多途、长时延、严重衰落等特点, 需采用性能好、能够实现线性编译码便于实时处理的信道纠错码技术以提高水声通信系统可靠性的问题, 提出重复累积(Repeat-Accumulate, RA)码作为浅海水声信道的纠错码方案。建立 RA 码在浅海水声信道中的仿真模型, 比较其在不同浅海水声信道模型下的性能, 通过水池数据传输实验研究编译码参数对 RA 码性能的影响, 并以水下图像传输实验进一步验证该编码方案。仿真和实验结果表明: RA 码在浅海水声通信系统中具有较强的纠错能力, 选择合适的参数会进一步提高编码增益。与 Turbo 码和 LDPC 码的编译码复杂度对比, RA 码能够实现线性时间编译码, 算法复杂度低, 硬件实现简单, 在水声通信中具有非常好的应用前景。

关键词: 通信技术; 信道编码; 重复累积码; 浅海水声信道; 水声通信

中图分类号: TN929.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-4093(2012)02-0179-07

Performance Analysis of Repeat-Accumulate Codes over Shallow Water Acoustic Channels

ZHANG Lan^{1,2}, XU Xiao-mei^{1,2}, FENG Wei^{1,2}, CHEN You-gan^{1,2}

(1. School of Information Science and Technology of Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China;

2. Key Laboratory of Underwater Acoustic Communication and Marine Information Technology of the Ministry of Education, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China)

Abstract: Due to a large delay spread caused by multipath propagation and severe attenuation of the channel conditions, the Repeat-Accumulate (RA) code with short length codes, good performance and easy implementation has been proposed to enhance the reliability of the shallow water acoustic (SWA) communication system. A system model including RA coding over the SWA channels was established. As a comparison, the performance of RA codes under different ocean acoustic channel conditions was presented. The experiment in the pool was carried out to show how the encoding and decoding parameters affect the performance of RA codes, which was verified by the image transmission over channels in the pool tank. The simulation and experimental results show that RA codes have a strong error correction capability and the codes with appropriate parameters would further improve the coding gain, while they enjoy encoding and decoding in linear time and have simple hardware implementation, which have a good applied prospect in underwater acoustic communication system.

Key words: communication technology; channel coding; repeatedly-accumulated code; shallow water

收稿日期: 2010-06-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41176032); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2010121032)(20112G020); 厦门大学基础创新科研基金资助项目(201112G020)

作者简介: 张兰(1987—), 女, 博士研究生。E-mail: rabzlxm@qq.com;

许肖梅(1960—), 女, 教授, 博士生导师。E-mail: xmxu@xmu.edu.cn

acoustic channel; underwater acoustic communication

0 引言

浅海水声信道不同于传统的无线信道,是一种带宽、功率均受限的时-频-空变随机信道。海水媒介的复杂多变、不均匀性和水下存在的大量干扰噪声都将造成接收信号非常严重的衰落和畸变。为提高通信系统性能,保证通信可靠性,除了采用先进的调制解调技术、信道均衡、增加发射功率等措施外,信道纠错编码技术也是一种非常有效的方法,是水声通信系统不可或缺的部分,能够进一步降低误码率,提供一定的编码增益,保证通信的可靠性。

目前无线电通信中一些比较成熟的纠错码方案已经应用于水声通信系统中。文献[1]将网格编码调制技术与经典的自适应接收机结合应用到水声单载波传输中,文献[2]对卷积码和里德-所罗门(RS)编码在水声通信系统的性能进行了测试。近年来,Turbo码和低密度奇偶校验(LDPC)码在加性高斯白噪声信道中的研究表明其性能非常接近香农极限,得到了编码理论界的普遍关注,成为水声通信系统纠错编码方案的研究热点。美国康涅狄格大学、中国西北工业大学、厦门大学等单位都在此方面进行了相关研究,并且取得了一些初步的研究成果^[3-7]。但是Turbo码和LDPC码性能的提高是以实现复杂度为代价的,Turbo码只有在交织长度较大、迭代次数较多的情况下才能获得较高的编码增益;同样LDPC码也只有码长较长的情况下才能获得较高的编码增益。水声信道长时延的特点影响长码在通信中的应用,给硬件实现带来相当大的复杂度,对实现实时水声通信造成一定困难。因此探索一种能够适用于复杂随机多变的水声信道,同时容易实现、简单有效的信道纠错码方案,具有重要理论和实际应用意义。

1998年,Divsalar, Jin和McEliece提出了一种类似Turbo码的编码结构——重复累积码^[8]。与Turbo码和LDPC码的编译码复杂度对比,RA码具有简单的编码和译码特性,被看作Turbo码和LDPC码最具潜力的替代者,得到了编码理论界的普遍关注。在无线通信系统中已经有了一定研究:文献[9]将RA编码应用于OFDM通信系统中,用RA码生成序列集合,并在该序列中选择具有最小峰均比(PAPR)的序列选择发送,成功降低了系统的PAPR值,并进一步降低了系统的误码率;文献[10]将RA

编码应用于具有多发送和接收天线的多输入多输出(MIMO)系统中,大大提高了系统的性能。

目前,RA码在水声信道中的性能研究还较少。对于Turbo码,无论并行或者串行都能进行线性时间编码,但译码算法比较复杂;对于LDPC码,它的编码复杂度为 $O(N^2)$, $O(N)$ 为码长,译码算法比较简单,满足线性译码特性;RA码编译码算法复杂度为 $O(N)$,能够实现线性编码和译码,性能更加接近香农极限^[11],且不需要在很长码较长的情况下得到体现。以上优点给RA码在浅海水声通信系统中更好地发挥性能带来了希望。文献[12]将RA码与RS码、卷积码和Turbo码在水声信道中进行了性能对比,并研究了基于直接序列扩频的水声系统中的RA码的性能。本文针对浅海水声信道强多途、长时延等复杂特性,通过计算机建立基于RA码相干水声通信系统模型,研究RA码在不同浅海水声信道模型下的性能,并通过水池试验研究了RA码编译码参数对其性能的影响,为水声通信系统参数的选择提供参考。

1 浅海水声信道模型

实际浅海水声信道的传输函数是时-频-空变的,不同海域的信道状况会有很大不同,目前还没有一个公认的浅海水声信道模型。虽然浅海水声信道的声传输特性是时变的,但在相干时间范围内,可认为其转移函数不随时间变化。本文着重考虑浅海水声信道强多途、长时延等特点对RA纠错编码性能的影响,因此在后续仿真中均假设多途结构是稳定的,即转移函数是不随时间变化的。

浅海水声信道相干多途模型可表示为^[13]

$$y(n) = \sum_{i=1}^L \alpha_i(n) x(n - n_i) + w(n), \quad (1)$$

式中: $x(n)$ 、 $y(n)$ 分别为发送和接收符号序列; $w(n)$ 为高斯噪声序列; $\alpha_i(n)$ 为第*i*径乘性衰落因子序列; n_i 为第*i*径的时延。在仿真中,可根据(1)式先将发送信号经过水声信道多途和衰落干扰,再叠加上高斯白噪声,采用典型5径信道为浅海水声信道模型,每一径参数如表1所示,其中平均功率根据每一径的乘性衰减因子计算所得^[13]。

声速度是海水介质最重要的声学参数,对声传播有重要的影响。图1为典型的海洋声速分布图。在海洋表层由于风浪搅动常常出现一定厚度的等温

层 其下邻接着负梯度水层。等温层中声速 c_0 为常数 称为表面声道^[14] ,声速为 1 535 ~ 1 537.5 m/s ,其厚度在 20 ~ 150 m^[15]。当风浪平静 ,日照强烈时 ,海洋表面水层被加热 ,而深水处水温仍未被加热 ,出现负声速梯度分布 ,声速为 1 530 ~ 1 540 m/s^[15]。在夏季 ,尤其是在南方海区 ,强烈的日照形成了较大的负温度梯度 ,相对声速梯度约为 10^{-4} m^[14]。由于负声速梯度的折射效应 ,声速随着海水深度的增加而减小 ,声线急剧折向海底 ,声传播损失很大 ,这是浅海中常见的恶劣信息传输条件。厦门港海域处于南方海区 ,信道条件与此十分相似 ,因此本文将针对浅海域中声速为常数的等温层和负声速梯度信道模型进行重复累积码性能的仿真研究 ,具有一定的参考价值。

表 1 浅海水声信道 5 径信道模型

Tab. 1 Parameters of 5-path shallow water acoustic channel

声线序号	1	2	3	4	5
平均功率/dB	0	-3.5	-7.0	-9.0	-15.0
延时/符号周期	0	10	20	30	40

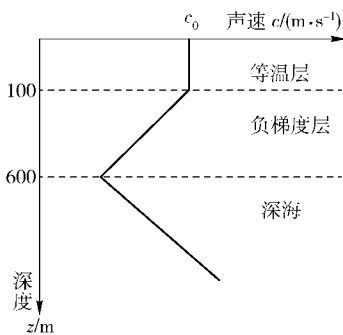


图 1 典型的海洋声速分布图
Fig. 1 The sound speed profile

在假设通信带宽为 5 kHz ,采样频率为 10 kHz 的条件下 ,艾宇慧等给出了以下两种典型声信道模型的传输函数^[16]

- 1) 声速为常数的均匀介质信道的传输函数

$$H(z) = 1 + 0.599971z^{-20}. \quad (2)$$
- 2) 负声速梯度信道的传输函数

$$H(z) = 1 + 0.263112z^{-7} + 0.151214z^{-39} + 0.391599z^{-67}. \quad (3)$$

2 重复累积码

RA 码在编码上 ,可看作是一类 Turbo 码 ,具有其线性编码特点;在译码上 ,可看作是一类 LDPC 码 ,具有 LDPC 码低复杂度的并行译码特点。

2.1 编码算法^[8, 11]

RA 码最初是作为一类 Turbo 码提出来的 ,所以它可以看作串行级联的 Turbo 码。如图 2 所示 ,它的两个成员码一个是码率为 $1/q$ 的重复码 ,一个是码率为 1、传递函数为 $1/(1+D)$ 的卷积码(称为累加器) ,这也是重复累积码名字的由来。在 RA 码的编码结构中 k 个信息比特 $m = [m_1, m_2 \dots m_k]$ 经过 q 次重复后得到重复码输出 $x = [x_1, x_2 \dots x_{kq}]$,交织器 $\Pi = [\pi_1, \pi_2 \dots \pi_{kq}]$ 定义了交织器的置换顺序 ,其输出比特为 $b = [b_{\pi_1}, b_{\pi_2} \dots b_{\pi_{kq}}]$ 。累加器里的累加为模 2 加 ,累积过程如下

$$y_i = \begin{cases} b_{\pi_i}, & i = 1; \\ b_{\pi_i} + y_{i-1}, & \text{其他}; \end{cases} \quad (4)$$

其中 b_{π_i} 为交织器输出的第 i 个信息比特 ,RA 码的最终码字为 $y = [y_1, y_2 \dots y_{kq}]$ 。

码率为 $1/q$ 的 RA 码编码器在信息长度为 k 的情况下 ,码字长度为 kq 。由编码器结构可知 ,编码的主要算术运算为模 2 加法 ,在编码过程中需要 kq 次加法操作。因此在编码码率一定的情况下 ,编码的复杂度与信息长度 k 成正比 ,实现线性编码 ,降低硬件电路实现的复杂度。

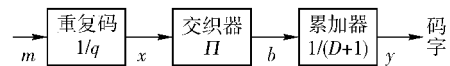


图 2 RA 码的类似 Turbo 码结构
Fig. 2 The Turbo-like structure of RA codes

2.2 译码算法

RA 码也可以看作 LDPC 码 ,具有 LDPC 码的结构 ,也可用 Tanner 图来表示 ,也称双向图 ,如图 3 所示。Tanner 图中包括变量节点与校验节点 ,其中变量节点又包括信息节点和奇偶节点 ,节点间通过边相互连接。图 3 中有 k 个信息节点 , kq 个校验节点 , kq 个奇偶节点 ,每个信息节点均与 q 个校验节点相连。LDPC 码的优点是译码采用基于置信度传播的迭代译码算法 (Iterative Decoding based on Belief Propagation , IDBP)^[17] ,它是一种兼有硬判决和软判决的译码算法 ,可以全并行译码 ,复杂度低 ,RA 码也具有这个优点。

IDBP 算法迭代处理接收符号 ,采用对数似然比 (LLR) 作为每个译码符号的可靠度的量度 ,即 Tanner 图中边传递的是 LLR ,定义为

$$\text{LLR}(p_i) = \log \frac{P(x=0|y)}{P(x=1|y)}, \quad (5)$$

式中: x 为信道输入值; y 为信道输出值; $i = 1 \dots kq$ 。

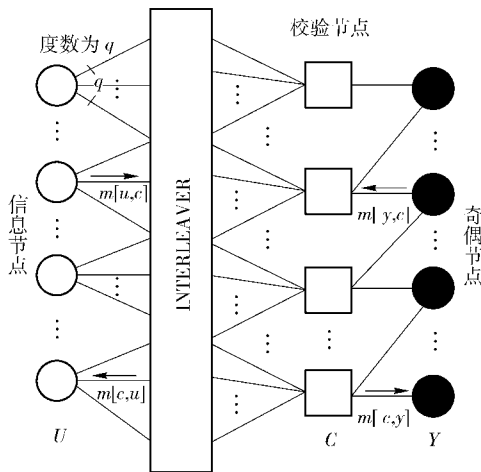


图 3 RA 码的 Tanner 图

Fig. 3 The Tanner graph of RA codes

每次译码迭代结束时得到的码字的 LLR 用作下一次的迭代的输入。译码迭代过程持续进行,直到满足某个预先设定的特定的停止条件(或准则),然后基于码字的可靠度量度的计算结果做出硬判决过程如下

1) 初始化

IDBP 这种概率迭代译码算法需要从信道得到有关的概率消息的初始化信息,因此消息的初始化对成功译码非常重要。如果消息的初始化不正确,可能会导致译码失败。对于二进制编码系统,码字经过 BPSK 调制后信息序列映射为 $\{-1, +1\}$, 经过 (1) 式给出的浅海相干多途信道模型,每个码字接收位的初始值为

$$\text{LLR}^{(0)}(p_i) = \log \frac{P(x = -1|y)}{P(x = +1|y)} = \frac{2}{\sigma^2} y \cdot \alpha, \quad (6)$$

式中 α 为 (1) 式中的衰减因子。

从 RA 码的 Tanner 图中可以看出,边传递了四种不同的信息:从信息节点 U 到校验节点 C 的信息 $m[u, c]$; 从校验节点 C 到信息节点 U 的信息 $m[c, u]$; 从校验节点 C 到奇偶节点 Y 的信息 $m[c, y]$; 从奇偶节点 Y 到校验节点 C 的信息 $m[y, c]$, 在初始化时都将它们置为零。^[11]

2) 更新奇偶节点到校验节点的信息,最后奇偶节点只有一个校验节点与之相连,所以

$$m[y, \rho] = \begin{cases} \text{LLR}, & y = y_{qk}; \\ \text{LLR} + m[c' + y], & c' \neq c \quad (c' \neq y) \in E; \end{cases} \quad (7)$$

式中: E 为 Tanner 图中的边的集合,也适用于以下 3 个公式。

3) 更新信息节点到校验节点的信息

$$m[u, \rho] = \sum_c m[c' \mu], \quad c' \neq c \quad (u \neq \rho) \in E. \quad (8)$$

4) 更新校验节点 $m[c, y]$ 和 $m[c, u]$

$$m[c, y] = \begin{cases} m[u, \rho] \\ 2 \operatorname{artanh} \left(\tanh \left(\frac{m[u, \rho]}{2} \right) \tanh \left(\frac{m[y', \rho]}{2} \right) \right), \end{cases}$$

$$c = c_1,$$

$$y \neq y' \quad (u, \rho) \quad (y', \rho) \in E. \quad (9)$$

$$m[c, \mu] = \begin{cases} m[y, \rho] \\ 2 \operatorname{artanh} \left(\tanh \left(\frac{m[y, \rho]}{2} \right) \tanh \left(\frac{m[y', \rho]}{2} \right) \right), \end{cases}$$

$$c = c_1,$$

$$y \neq y' \quad (y, \rho) \quad (y', \rho) \in E. \quad (10)$$

5) 循环执行步骤 2) ~ 4), 共 $\max\text{-iter}$ 次, 其中 $\max\text{-iter}$ 为译码时设定的最大迭代次数。

6) 硬判决

根据如下规则对每一信息节点进行判决

$$\hat{u} = \begin{cases} 0, & \text{if } \sum_c m[u, \rho] \geq 0; \\ 1, & \text{if } \sum_c m[u, \rho] < 0. \end{cases} \quad (11)$$

从图 3 和上述译码算法可以看出,译码算法所需要的信息置信度在边上传输,与 LDPC 码一样,RA 码的 Tanner 图也是稀疏的,那么传输信息的边的总数也会较小。在迭代译码次数一定的情况下,每条边传输信息的次数是一定的,可以推出译码算法与边的总数成正比,在 RA 码中,传输信息的边为 $3qk - 1$ 个(信息节点的边数 qk 与校验节点边数 $2qk - 1$ 的和)。因此,在码率一定的情况下,译码算法的复杂度与信息长度 k 成正比,实现线性译码,降低硬件电路实现的复杂度。

3 仿真实验分析

对 RA 码在 5 径信道、声速为常数的均匀介质信道和负声速梯度信道三种信道模型下的性能进行比较。仿真中采用 BPSK 调制,RA 码的编译码参数为:码长为 1 024 bits,码率为 0.5,采用 IDBP 译码算法,10 次迭代。从图 4 中可以看出,以误码率达到 10^{-4} 为参考,RA 码在 5 径信道模型中信噪比只需 4 dB,而负声速梯度信道、声速为常数的均匀介质信道则需多消耗 4 ~ 5 dB。RA 码在 5 径信道模型中的性能最优,信噪比 8 dB 时误码率可达到 10^{-5} ,负声速梯度信道次之,声速为常数的均匀介质信道最差。因为 5 径信道模型为相干多途信道模型,每一径延时分布均匀,幅度衰减不大,信道条件比较理想。负声速梯度

信道的径数多,且每一径的时延较长,可视为稀疏信道。可见 RA 码在码长 1 000 bits 左右且迭代译码次数不需要很多的情况下,可发挥较好的纠错性能,而且适应于时延长、衰落强的稀疏的水声信道。

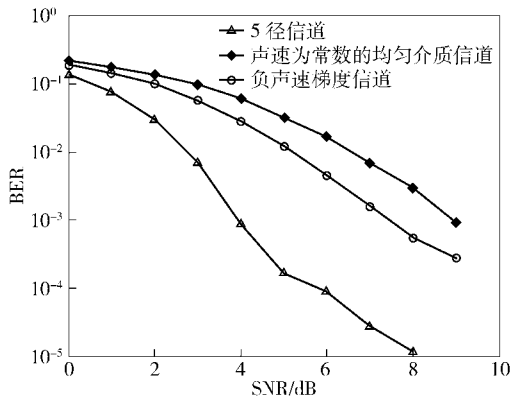


图 4 RA 码在不同浅海水声信道模型下的性能
Fig. 4 The performance of RA codes over different shallow water channels

4 水池实验研究与讨论

为进一步验证 RA 码在浅海水声通信系统中的性能,在厦门大学水声通信与海洋信息技术教育部重点实验室水池中进行了数据序列传输和图像传输实验。实验系统构建框图如图 5 所示,系统参数如表 2 所示。

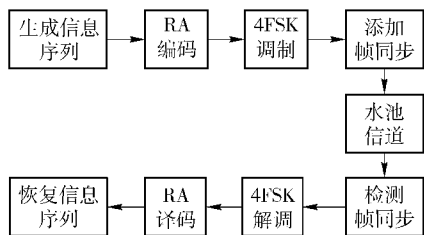


图 5 实验系统模型图
Fig. 5 A schematic diagram of RA coding for underwater acoustic communication system

表 2 实验系统参数

Tab. 2 System specification

项目	参数	项目	参数
映射方式	4FSK	模拟采样率	44.1 kHz
带宽	5 kHz	符号周期	10 ms
载波中心频率	15.5 kHz	信号速率	200 bps
频率间隔	1 kHz	同步信号	双曲调频信号
传输频带	13 ~ 18 kHz	传输距离	10 m

发送端首先产生随机信息比特序列,然后经 RA 编码后生成码字序列,在经 4FSK 调制后的序列前加入一个 10 ms 的双曲扫频信号作为同步信号,作为一帧信号在水池信道中传输。本实验主要验证 RA 码的性能,所以采用调制和解调相对简单的非相干调制方式。接收端检测帧同步后,利用鉴频器进行 4FSK 解调,并经 IDBP 算法译码,最后恢复出信息序列。

实验水池长宽深约 25.5 m × 5.5 m × 2 m,瓷砖墙面,浅处水深约 1 m,占全长 53%左右,深处约 2 m,占全长 47%左右。换能器入水深度 40 cm,传输距离约为 10 m,声速 1 500 m/s,布置如图 6 所示。

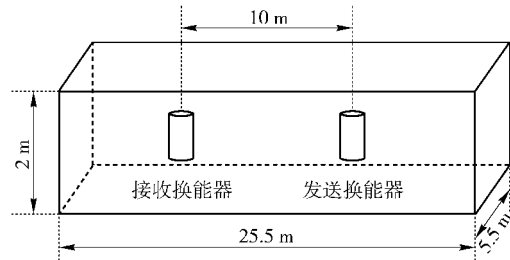


图 6 水池实验换能器布置示意图
Fig. 6 Transducer layout in the pool

信道编码的性能除了受到编码译码算法的参数影响,还依赖于信道特性。在进行信息传输实验之前,发送 20 ms 的双曲调频信号,对水池信道进行了多途测试实验。如图 7 所示,水池信道多途较为严重,多途延迟时间约在 16 ~ 20 ms,而且幅度衰减较大,第一径与第二径的相对延迟较小,后面每径之间的延时都较长,与上述的负声速梯度信道模型比较相似,主要由于水池面积较大,水深较浅,多途干扰主要由水池底和水面反射产生,与实际海洋信道比较接近。

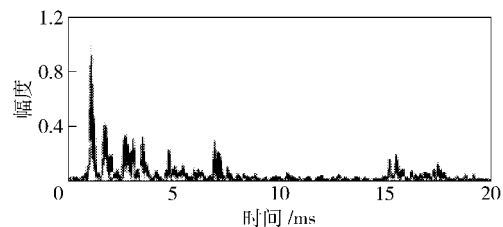


图 7 水池的多途测试结果
Fig. 7 Experimental results of Multipath of the pool of UAC

4.1 编译码参数选取研究

在给定的通信环境中,一种码型的性能好坏主要由其参数的选择来决定。由香农的信道编码定理

知 随着码长的增加($n \rightarrow \infty$),译码错误概率按指数方式趋于零,但同时也会提高编译码算法的复杂度。因此合理选择码型的参数,可以发挥码型的优越性能,提高其应用前景。

为了研究 RA 码的编译码参数对系统性能的影响,实验中发送不同码长的编码序列,接收端进行不同迭代次数的译码。图 8 描述了译码迭代次数和码长对译码性能的影响。发送端发送码长为 512 bits 的序列,研究迭代次数对译码性能的影响。从图 8(a)中可以看出,随着译码迭代次数的增加,误码率降低,当达到 4 次以上,误码率可以从译码前的 10^{-2} 降为 0,但同时译码算法复杂度也相应增加。发送端分别发送码长为 512 bits、2 048 bits、4 096 bits 和 10 000 bits 的码字,接收端进行 2 次迭代译码,由图 8(b)可以看出,通过 RA 译码,每种码长的误码率都有所下降,不过码长为 2 048 bits 和 4 096 bits 的码字的误码率可以从解调后 10^{-3} 降为 0,而码长为 512 bits 和 10 000 bits 的编码性能不够显著,可见对于比较复杂的水声信道,应当取恰当的码长进行可靠通信,采用过长或者过短的码字都可能会影响通信质量和设备复杂度。实验证明通过 RA 码的信道编码可以进一步降低系统的误码率,对 RA 码参数合适的选择,可以显著提高编码增益,实现信息的可靠传输,而码长选取几千比特,迭代次数为 4 次左右可满足浅海水声通信的基本要求。

4.2 图像传输验证

为了验证 RA 码的性能,在水池中进行了图像传输实验。图像为部重实验室的图标,黑白图片,像素为 80×48 。图 9 为水下图像传输实验结果。可以看出,无编码图像解调后大批的像素点被错位判断;经 RA 编码后的图像 1 次迭代译码后被错位判断的像素点有所减少,而 5 次迭代译码后的图像与原始图像相差无几。因此,水下图像传输结果验证了以下结论:译码迭代次数的增加可以提高 RA 码的性能,RA 码在水下图像的传输中将有良好的应用前景。

5 结论

将重复累积码引入浅海水声通信系统中,分析了其编译码复杂度,并结合浅海水声信道特性对其译码算法进行有效初始化,建立了基于 RA 码的浅海水声通信系统仿真模型,并进行了水池数据和图像传输实验。仿真和实验结果表明:RA 码在浅海水声信道中性能良好,5 径水声信道模型中信噪比

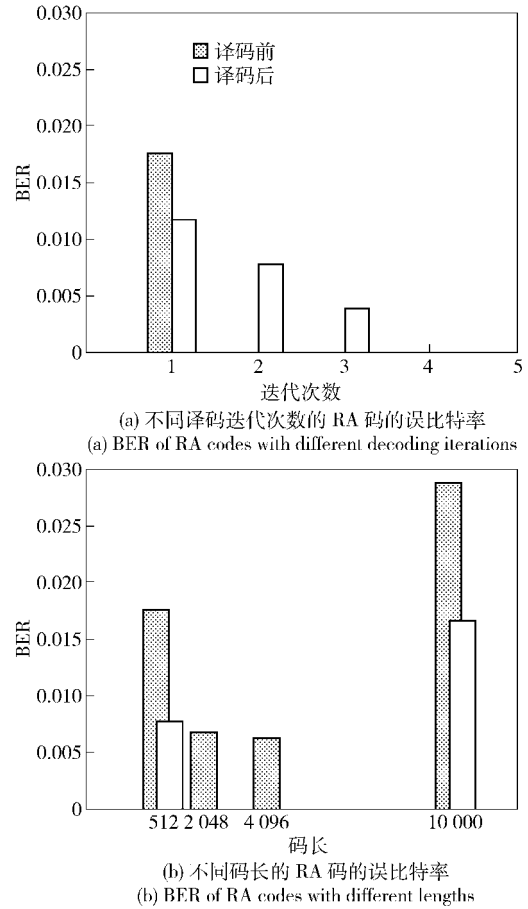


图 8 RA 码编译码参数对系统性能的影响
Fig. 8 BER of RA codes with different parameters

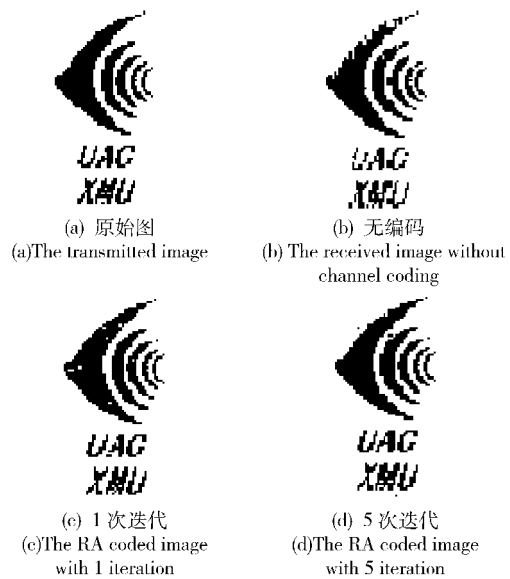


图 9 水池图像传输结果
Fig. 9 Results of image transmission in the pool

8 dB 时误码率可达到 10^{-5} ; 随着译码迭代次数增加,误码率降低,运算代价也相应增加,当达到 4 次以

上, 误码率从译码前的 10^{-2} 降为 0; 码长太长或太短译码效果均不佳。应根据实测海洋信道状况, 从性能和运算代价两方面综合考虑, 合适选择 RA 码编译码参数实现信息的可靠传输。

RA 码以低的编译码复杂度实现了良好的纠错能力, 是一种实用化的编码方案, 能够在复杂多变的水声通信环境实现可靠通信, 可进一步在硬件实现上展开研究, 为嵌入水声通信样机中使用提供参考。

参考文献 (References)

- [1] Stojanovic M, Catipovic J A, Proakis J G. Phase-coherent digital communications for underwater acoustic channels [J]. *Oceanic Engineering*, 1994, 19(1): 100 - 111.
- [2] Goalie A, Trubuil J, Beuzelin N. Channel coding for underwater acoustic communication system [C] // Boston: OCEANS, 2006: 1 - 4.
- [3] Jie Huang, Shengli Zhou, Willett P. Nonbinary LDPC coding for multicarrier underwater acoustic communication [J]. *Selected Areas in Communications*, 2008, 26(9): 1684 - 1696.
- [4] Han W, Huang J G, Jiang M. Performance analysis of underwater digital speech communication system based on LDPC codes [C] // *Industrial Electronics and Applications*, Xi'an: ICIEA, 2009: 567 - 570.
- [5] 陈友淦, 许肖梅. LDPC 码在浅海水声通信中的应用研究 [J]. *通信技术*, 2009, 42(4): 41 - 45.
CHEN You-gan, XU Xiao-mei. Application of LDPC code in shallow water acoustic communication [J]. *Communications Technology* 2009, 42(4): 41 - 45. (in Chinese)
- [6] 张洁. LDPC-COFDM 系统在水声通信中的应用研究 [D]. 厦门: 厦门大学, 2007.
ZHANG Jie. Study of application of LDPC-COFDM system in the underwater acoustic communication [D]. Xiamen: Xiamen University, 2007. (in Chinese)
- [7] Chen Y G, Xu X M, Zhang L. Performance analysis of LDPC codes over underwater acoustic channel [C] // 5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, Beijing: WiCOM, Sept. 2009: 24 - 26.
- [8] Divsalar D, Jin H, McEliece R J. Coding theorems for "turbo-like" codes [C] // 36th Allerton Conf. on Communication, Control, and Computing, Monticello, Illinois, USA: Sept. 1998: 201 - 210.
- [9] Carson N, Gulliver T A. Performance of OFDM with modified RA codes and clipping. *Communications Letters [J]. IEEE*, 2003, 7(9): 440 - 442.
- [10] Yue G S, Wang X D. IRA code design for MIMO systems with iterative receivers [C] // *Control, Communications and Signal Processing*, Hammamet, Tunisia: ISCCSP, 2004: 567 - 570.
- [11] 高宏峰. 重复累积码及其在通信系统中的应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2008: 16 - 31.
GAO Hong-feng. RA codes and its application in communication systems [M]. Beijing: Science Press, 2008: 16 - 31. (in Chinese)
- [12] Liu L J, Wang Y H, Li L, et al. Design and implementation of channel coding for underwater acoustic system [C] // IEEE 8th International Conference on ASIC, Changsha: ASICON, Oct 2009: 497 - 500.
- [13] 刘胜兴, 许肖梅. 浅海水声信道中 Turbo 码性能研究 [J]. *厦门大学学报(自然科学版)* 2006, 45(5): 656 - 659.
LIU Sheng-xing, XU Xiao-mei. Study on the anti-multipath performance of turbo code over shallow water acoustic channels [J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2006, 45(5): 656 - 659. (in Chinese)
- [14] 惠俊英, 生雪莉. 水下声信道 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 26 - 36.
HUI Jun-ying, SHENG Xue-li. Underwater acoustic channel [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007: 26 - 36. (in Chinese)
- [15] 陈天润, 胡建宇, 王清池, 等. 台湾海峡南部声速垂直、断面分布的区域特征 [J]. *海洋技术*, 2000, 19(2): 18 - 22.
CHEN Tian-run, HU Jian-yu, WANG Qing-chi, et al. Regional characteristics of vertical and sectional distributions of sound velocity in southern taiwan strait [J]. *Ocean Technology*, 2000, 19(2): 18 - 22. (in Chinese)
- [16] 艾宇慧, 惠俊英, 高静. 水声信道相关均衡器仿真研究 [J]. *声学学报*, 1999, 24(6): 589 - 597.
AI Yu-hui, HUI Jun-ying, GAO Jing. Study of simulation of Underwater acoustic channel correlated equalizer [J]. *Acoustics*, 1999, 24(6): 589 - 597. (in Chinese)
- [17] Shu L, Daniel J, Costello Jr. Error control coding [M]. Beijing: China Machine Press, 2007: 577 - 580.