

# LDPC 码与 ARQ 在水声通信中的性能研究

韩 维, 黄建国

HAN Wei, HUANG Jian-guo

西北工业大学 航海学院, 西安 710072

School of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

E-mail: hanwei\_nust@163.com

**HAN Wei, HUANG Jian-guo. Research of performance of ARQ and LDPC codes in underwater acoustic communication. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(34): 20-22.**

**Abstract:** It is required very low bit-error probabilities in some special underwater acoustic communication systems, and just depending on forward error code cannot satisfy the request of communication quality. Circle Redundancy Check (CRC) is a kind of circle code with good performance, and it is suitable for check error system. The performance of Low Density Parity Check codes (LDPC) is nearly Shannon limit with lower complexity compared with Turbo codes. It is proposed a method that LDPC code and automatic request for repetition can be combined together, added LDPC after CRC. Simulation results indicate that bit-error probabilities can be descended to below  $10^{-9}$ .

**Key words:** Automatic Repeat-reQuest (ARQ); Low Density Parity Check code (LDPC); Cyclic Redundancy Check (CRC); error bit rate; signal noise ratio

**摘 要:** 在水声通信中, 有些情况下系统中要求误码率非常低, 仅仅靠信道编码的方法不能满足通信质量要求。循环冗余校验码 (CRC) 是一种性能良好的循环码, 非常适用于检错系统, 低密度校验码 (LDPC) 性能接近香农极限的信道编码之一, 其译码复杂度远远小于 Turbo 码。为了满足低误码率的要求, 提出了一种将 LDPC 码和自动重发请求 (ARQ) 结合应用的方法, 在 CRC 校验之后进行信道编码, 在保证通信质量的前提下尽量减小发送信息的冗余度。仿真结果表明, 该方法可以将误码率降低到  $10^{-9}$  以下。

**关键词:** 自动重发请求; 低密度校验码; 循环冗余校验; 误码率; 信噪比

**DOI:** 10.3778/j.issn.1002-8331.2008.34.005 **文章编号:** 1002-8331(2008)34-0020-03 **文献标识码:** A **中图分类号:** TN911

水声信道是一个窄带宽、大多普勒、大延时的时间-空间-频率变换的复杂信道, 在这种信道中, 为了能可靠通信, 信道编码技术必不可少。在有些情况下, 接收端要求误码率极低, 仅仅用信道编码技术很难达到这一要求, 此时可以考虑在纠错编码之后加上检错技术, 通过反馈信道向发送端发出请求, 使其将出错帧重发, 这就保证了接收端达到极低的误码率, 满足系统要求。

## 1 自动重发请求 (ARQ) 原理

自动重发请求方式就是要求发送端发出能够检测到错误的码源, 接收端收到通过信道传输过来的码后, 根据编码规则判断接收到的码序列中是否有错误产生, 并通过反馈信道把判决结果通知发送端。发送端根据这些判决信号把接收端认为有错的信息重新发送, 直到接收端认为正确接收为止。ARQ 方式要一般适用于双向通信, 而且要求信源能够控制, 系统收发两端

必须互相配合密切协作, 因此控制电路比较复杂。由于重发次数和信道干扰有关, 因此这种方式传输消息的连贯性和实时性较差。这种方式的优点是: 编译码设备比较简单; 在一定冗余码元下, 纠错性能极强, 能获得极低的误码率。

ARQ 可以分为两种<sup>[1]</sup>: 等待式 ARQ 和连续式 ARQ。连续 ARQ 比等待式 ARQ 更有效, 但也较昂贵。卫星通信系统中, 传输速率高而且往返时延大, 通常采用连续 ARQ 方式。等待式 ARQ 一般用于传送一个码字所花的时间大于收到一个回执所需要的时间这样的系统中。等待式 ARQ 设计用于半双工信道, 连续式 ARQ 用于全双工信道。

## 2 CRC 校验

循环冗余校验码 (CRC) 由是一种线性循环码, 其主要应用于二元码组, 编码简单且误判概率很低, 非常适用于检测错误, CRC 校验在通信系统中已经得到了广泛的应用。常用的 CRC

基金项目: 国家自然科学基金 (the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60572098)。

作者简介: 韩维 (1977-), 女, 博士, 研究方向为纠错编码及信号处理; 黄建国 (1945-), 男, 教授, 博士生导师, IEEE 西安分会主席, 研究方向为现代信号处理、水下通信、水声对抗、阵列信号处理等。

收稿日期: 2008-07-28 修回日期: 2008-09-10

码的生成多项式主要有以下几种:

$$\text{CRC4}=X^4+X+1$$

$$\text{CRC8}=X^8+X^5+X^4+1$$

$$\text{CRC12}=X^{12}+X^{11}+X^3+X^2+1$$

$$\text{CRC-CCITT}=X^{16}+X^{12}+X^5+1$$

$$\text{CRC16}=X^{16}+X^{15}+X^5+1$$

$$\text{CRC32}=X^{32}+X^{26}+X^{23}+X^{22}+X^{16}+X^{12}+X^{11}+X^{10}+X^8+X^7+X^5+X^4+X^2+X+1$$

CRC-12 用于字符长度为 6 bit 的情形,CRC-16、CRC-CCITT、CRC-32 用于 8 bit 字符,CRC-4 用于其它情形。

CRC 校验并不能完全检测出码字的全部错误,CRC 校验能够检验的错误类型包括( $n$  表示码字总长, $k$  表示信息位长度):

- (1)突发长度  $\leq n-k$  的突发错误;
- (2)大部分突发长度  $=n-k+1$  的错误,其中不可检测这类错误只占  $2^{-(n-k)}$ ;
- (3)大部分突发长度  $>n-k+1$  的错误,不可检测错误只占  $2^{-(n-k)}$ ;
- (4)所有与许用码组码距  $\leq d_{\min}-1$  的错误;
- (5)所有奇数个随机错误。

CRC 校验的具体步骤如下:

利用 CRC 进行检错的过程可简单描述为:在发送端根据要传送的  $k$  位二进制码序列,以一定的规则产生一个校验用的  $r$  位监督码(CRC 码)附在原始信息后构成一个新的二进制码序列数共  $k+r$  位,然后发送出去。在接收端根据信息码和 CRC 码之间所遵循的规则进行检验以确定传送中是否出错。

CRC-16 校验的编码电路图如图 1 所示。

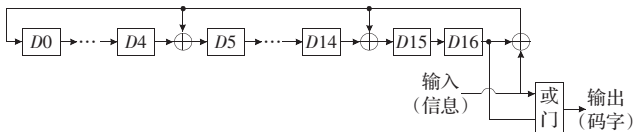


图 1 CRC-16 编码电路图

直接用上述方法就可以实现 CRC 校验,但是直接编程来实现上面的算法,不仅繁琐,效率也不高,所以实际应用时可以采用查表法来完成 CRC 校验。

### 3 LDPC 码

低密度检验码(LDPC)码是一种线性分组码,它于 1962 年到 1963 年由 Gallager<sup>[2-3]</sup>提出,之后很长一段时间没有受到人们的重视,主要原因在于当时计算机的仿真能力有限,无法对码长较长的 LDPC 码进行仿真实现,而且正是由于硬件水平的限制,使得学术界当时也错误地认为 LDPC 码译码算法过于复

杂,无法在实际系统中应用。对 Turbo 码<sup>[4]</sup>方案的深入研究使人们重新认识到 LDPC 码所具有的优越性能和巨大的实用价值。与 Turbo 码相比,LDPC 码具有一套较为系统的优化设计方法,更强大的纠错能力和更低的地板效应,同时由于 LDPC 码迭代译码算法为并行算法,延时远远小于 Turbo 码的串行迭代译码算法。这些都为 LDPC 码的应用提供了广阔的前景。因此本系统的信道编码选用 LDPC 码。

线性分组码可以用生成矩阵和校验矩阵来描述,LDPC 码是一种线性分组码,LDPC 码的校验矩阵  $H$  是一个非常稀疏的矩阵,即矩阵  $H$  中包含了大量的 0 和少量的 1。式(1)就是一个 (12,6)码的校验矩阵。

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$H$  矩阵中每一行所含 1 的个数称为行重量,每一列所含 1 的个数称为列重量。LDPC 码还可以用二分图表示,图 2 所示的是 (12,6)码的二分图,上面的点表示变量节点,下面的点表示校验节点。

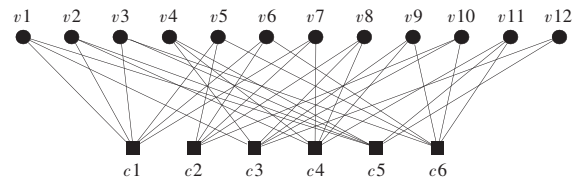


图 2 (12,6)码的二分图表示

校验矩阵  $H$  的构造有多种方法,主要包括随机构造和代数构造法等,这些方法在很多文献中都有描述<sup>[5-7]</sup>。本文采用随机构造的方法,构造围长为 6 的 LDPC 码。

由于 LDPC 码是一种特殊的线性分组码,所以可以按照线性分组码的基本方法进行编码。T.Richardson 和 R.Urbank 在文献[8]中给出了一种 Efficient 编码算法,可以有效地解决巨大的运算量和存储空间消耗的问题。对某些特殊的 LDPC 码可以用特殊的方法,比如对循环或准循环的 LDPC 码,可以用反馈移位寄存器来实现。

消息传递算法(Message Passing Algorithms)是一种迭代译码算法(Iterative Algorithms),也是 LDPC 码通用的一类译码算法。置信传播算法的具体过程见参考文献[9]等,这里不再赘述。

### 4 系统结构和仿真结果

根据以上对 ARQ 和 LDPC 码的编译码原理的介绍,这里

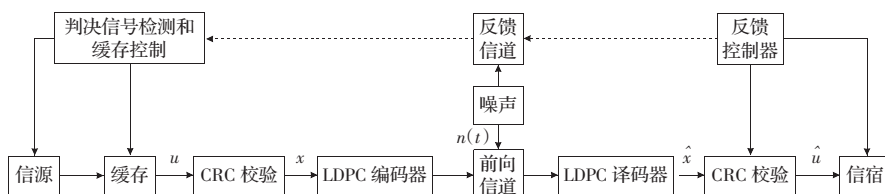


图 3 系统模型

认为如果将 ARQ 和 LDPC 码结合起来,必然会使误码率更低,获得更好的通信效果,能够满足某些特定情况下在水声通信中获得极低误码率的要求。

在利用 ARQ 时,如何选择校验码非常重要。如前所述 CRC 校验码非常适合于 ARQ,由于 CRC 校验和解校验完全相同,所以只要在信道编码之前和信道译码之后加上 CRC 校验,就可以完成检错功能。构建的系统模型如图 3 所示,其中前向信道和反向信道都是某实测水声信道。

由于系统在 LDPC 纠错码同时使用了 CRC 检错码,因此由于 LDPC 码强有力的纠错功能使得 CRC 校验检出错误的机会比较小,所以可以把退  $N$  步 ARQ 进行修正使其适合系统要求。在本系统中,为了节约信道带宽和减少由于反馈信道带来的误码,反馈信道不发送 ACK 信号而只发送 NAK 信号,如图 4 所示。假定每一帧的往返时间为  $t$ ,在经过发出一帧时间  $t$  后,如果没有收到任何反馈信号则认为该帧正确。其工作方式为:信源信息分帧输出,每一帧的帧头加上其编号,然后存在一个缓存器中,缓存器要大于  $t$  时间内可以发送的帧的总和。每一帧经过 CRC 校验和 LDPC 编码后就送至信道,这就是发端的工作;在接收端,经过 CRC 校验发现错误的帧之后就反馈一个 NAK 信号,并且连同帧号码一起传送给发端,发端受到该 NAK 信号之后,退回到 NAK 所对应的帧,重新发送该帧及其以后的帧。在接收到出错帧后并不将该帧抛弃而是存储起来与以后信道传输来的该帧信号进行判决,判决结果再次进行 CRC 校验,如果正确就不再发送 NAK 信号,而是将判决结果作为最终结果输出,否则继续发送 NAK 信号,通知发送端继续发送该帧消息,直至 CRC 校验结果正确为止。

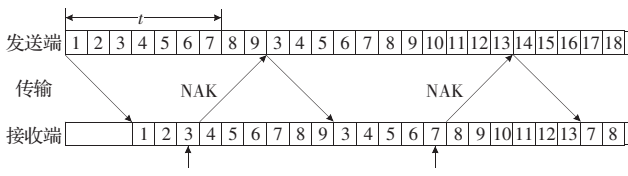


图4 本文所设计的退  $N$  步 ARQ( $N=7$ )

选择参数如下:LDPC 每帧长分别为 1 008 bit、600 bit,码率=1/2,CRC16,实测水声信道。

如果只采用 LDPC 码前向纠错,那么所得到在水声信道中的误码率曲线如图 5 所示。从图 5 中可以看出在信噪比为 3 dB 时,帧长为 1 008 bit 的 LDPC 码的误码率大于  $10^{-6}$ ,帧长为 600 bit 的 LDPC 码的误码率大于  $10^{-5}$ ,而采用 CRC 校验的 ARQ 之后,仿真数据总长为  $10^{10}$  时,未见误码。

## 5 结论

实际上除了水声通信之外,在一些传输要求比较高而信道情况又比较复杂的情况下,都可以采用高性能检错和纠错同时

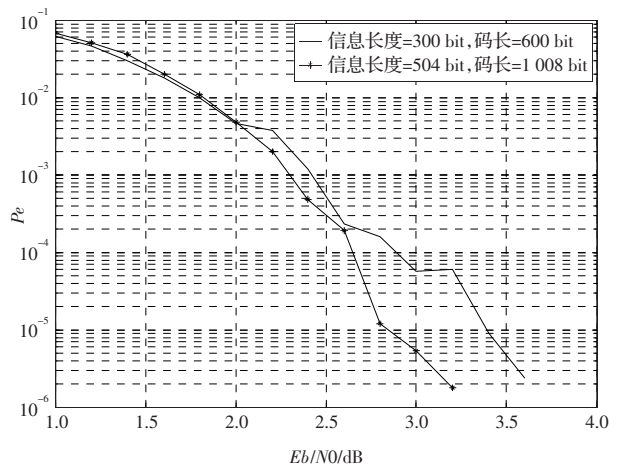


图5 LDPC 码在水声信道中的性能

应用的方法,本文中只是这些方法中的一个特例。采用本文的方法,水声通信系统的误码率可以达到  $10^{-9}$  以下,得到非常高的译码性能,当然这是以系统复杂性的提高和系统有效性的降低为代价的。在实际应用中,要根据实际情况折中考虑,以达到系统性能最优。

## 参考文献:

- [1] 王新梅,肖国镇.纠错码—原理与方法[M].西安:西安电子科技大学出版社,1991.
- [2] Gallager R G.Low density parity check codes[J].IRE Trans Info Theory,1962,IT-8:21-28.
- [3] Gallager R G.Low density parity check codes [M].[S.l.]:MIT Press,1963.
- [4] Berrou C,Glavieux A,Thitimajshima P.Near Shannon limit error-correcting coding and decoding:Turbo-codes[C]//ICC'93,Geneva,Switzerland,1993:1064-1070.
- [5] Xu J,Chen L,Djurđević I,et al.Construction of regular and irregular LDPC codes:geometry decomposition and masking [J].IEEE Trans Info Theory,2007,53:121-134.
- [6] Kou Y,Lin S,Fossorier M P C.Low-density parity-check codes based on finite geometries:a rediscovery and new results[J].IEEE Trans Info Theory,2001,47(7):2711-2736.
- [7] Vasic B,Milenkovic O.Combinatorial constructions of low-density parity-check codes for iterative decoding[J].IEEE Trans Info Theory,2004,50:1156-1175.
- [8] Richardson T J,Urbanke R L.Efficient encoding of low-density parity-check codes[J].IEEE Trans on Info Theory,2001,47(2):638-656.
- [9] Richardson T,Urbanke R.The capacity of low-density parity-check codes under message-passing decoding[J].IEEE Trans Inform Theory,2001,47:599-618.