

动态自适应 Pattern 时延差编码水声通信

赵安邦, 陈凯, 陈阳, 惠俊英, 解立坤

(哈尔滨工程大学水声技术国防科技重点实验室, 150001, 哈尔滨)

摘要: 针对 Pattern 时延差编码(PDS)水声通信中常规解码不能适应信道变化及收发节点运动的问题,提出了一种动态自适应解码方法. 该方法采用变长滑动窗动态地搜寻每个携带信息的 Pattern 码元,根据解码结果实时地修正下一码元偏移量,将有用信息最大限度地送入拷贝相关器进行解码. 该方法能够较好地自适应信道起伏及收发节点距离变化对信号造成的影响,使系统性能较常规拷贝相关解码大幅提高. 在吉林省松花湖的试验结果表明,采用动态自适应解码的 PDS 通信体制,在距离 1 000 m 通信时,误比特率较常规解码降低一个数量级,1 500 m 时实现了无误码通信. 该方法简单实用,适应性强,为构建高速、稳健的水下通信网打下了良好基础.

关键词: 水声通信;Pattern 时延差编码;动态自适应

中图分类号: TN911.72 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)08-0078-05

A Dynamic Adaptive Pattern Time Delay Shift Coding Scheme for Underwater Acoustic Communication

ZHAO Anbang, CHEN Kai, CHEN Yang, HUI Junying, XIE Likun

(National Laboratory of Underwater Acoustic Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: Focusing on the problem that the routine decoding method cannot adapt to the changes of the acoustic channel and movements of sending and receiving nodes in the pattern time delay shift coding underwater acoustic communication system, a dynamic adaptive decoding method is proposed. The method dynamically searches for every pattern code that carries with information using variable-length sliding window, real-timely corrects the deviation of the next code according to the decoding results and sends useful information as more as possible to copy correlator for decoding. The method is adaptable to the influence of received signals due to the movements of sending and receiving nodes and changes of the acoustic channel, and greatly improves the performance of the system compared with the routine decoding method. Trials in Songhua Lake of Jilin province show that the bit error rate of the dynamic adaptive decoding method is zero when the communicating distance is 1 500 meters, and is less a tenfold than the routine decoding method when the communicating distance is 1 000 meters. The proposed method is simple, has strong adaptability, and gives a foundation for high-rate and robust underwater communication nets.

Keywords: underwater acoustic communication; pattern time delay shift coding; dynamic adaptive

如何构建高速、稳健的水声通信网络,是当前水声通信领域研究的热点,但水声信道是随机时变、空变的,严重的多途扩展产生的码间干扰直接影响了

水声通信的质量^[1-2],此外由于换能器频带、声能量衰减^[3]等因素制约,可用的带宽非常有限,极大地限制了通信速率.因此,研究抗多途、高速、高频带利用

率^[4-5]的水声通信体制是十分有意义的。

Pattern 时延差编码(Pattern Time Delay Shift Coding, PDS)通信体制^[6]将信息编码技术和信道编码技术融于信号码元的设计中,利用 Pattern 脉冲出现在码元窗中的时延差值进行编码,占空比小,可节省功耗,并且采用码元分割,使得每个码元均具有抗码间干扰能力。PDS 通信体制在接收端采用时延估计进行解码,然而在实际通信时,收发节点的运动和信道随机的时变、空变,将导致信号被压缩或者扩展,严重时会导致 Pattern 码元发生错位,按照常规的拷贝相关解码方法开窗时将找不准对应的码元,导致后续解码时误码急剧增加。为此,本文提出了一种动态自适应解码方法,利用携带信道信息的校正码与信息码作拷贝相关,解码时计算出每个 Pattern 码元被压缩或者扩展的长度,然后基于该 Pattern 码元相关峰的位置计算出下一个 Pattern 码元的位置,为防止有用信息的丢失,动态地调整下一个 Pattern 码元的搜寻长度,最大限度地将信息送入拷贝相关器。对比常规解码,本文方法可自适应信道起伏及多普勒频偏对信号的影响,最大限度地利用 Pattern 码元携带的信息。在松花湖的试验结果验证了本文方法的优良性能。

1 Pattern 时延差编码水声通信

PDS 通信体制属于脉位编码,它将信息调制在 Pattern 脉冲出现在码元窗中的时延信息中,不同的时延值代表不同的信息^[7],每个码元通过 Pattern 脉冲的起始位置 $k\Delta\tau$ ($k=0,1,\dots,2^n-1$) 的不同来携带信息, $\Delta\tau=(T_0-T_p)/(2^n-1)$ 为编码量化间隔, n 为每个码元所携带的信息比特位数。图 1 为一组从 0 到 LT_0 共 L 个 Pattern 码元的编码示意图,其中 T_0 为每个码元的长度, T_p 为 Pattern 脉冲长度,编码时间 $T_c=T_0-T_p$, $P_1, P_2, \dots, P_L$ 为挑选出的 Pattern 脉冲, PDS 通信体制的通信速率 $N=n/T_0$ (b/s)。

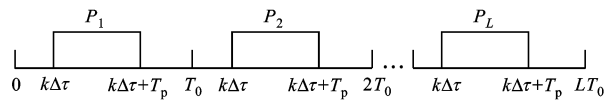


图 1 Pattern 时延差编码示意图

系统对 Pattern 脉冲进行码元分割和频率分割,优点是占用频带窄且能稳健地适应水声多途信道通信。若 Pattern 脉冲有 L 个,它们相互正交,则相邻的同一个 Pattern 脉冲出现的时间间隔为

LT_0 ,即最大抗多途时延扩展的时间。PDS 编码波形^[8]可表示为

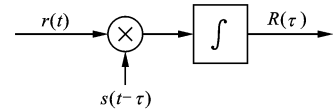
$$s(t) = \sum_{i=0}^{+\infty} \sum_{j=1}^{L-1} p_j[t - (j + Li)T_0 - k_{ij}\Delta\tau] \quad (1)$$

式中: $p_j(t)$ 为第 j 号 Pattern 波形; $k_{ij}=0,1,\dots,2^n-1$ 为第 $Li+j+1$ 号 Pattern 码元的时延差数值。

Pattern 脉冲的码型选择至关重要,它们决定了系统占用的带宽,直接影响到 PDS 体制抗多途的能力。要求 Pattern 脉冲的码型自相关峰尖锐,彼此互相关性尽量小,这样才能保证足够好的抑制码间干扰效果,具体论述可参考文献[9]。PDS 通信体制抗多途性能与 Pattern 脉冲的码型个数成正比,为尽可能多地挑选不同的 Pattern 脉冲,可以增大脉宽或带宽,但这样会降低通信速率或占用较宽的频带,即码型的增多是以牺牲通信速率或带宽为代价的,所以要均衡控制各种参数。本文将 5 段 CW 信号通过移频和移相进行组合,从中挑选出 4 种不同的码型,占用频带 1920 Hz,它们的归一化互相关系数均小于 0.31。

2 动态自适应解码

PDS 通信体制常规解码一般采用拷贝相关器^[10],在理想条件下,拷贝相关器的性能可以等价于匹配滤波器,其输出具有最大信噪比,其处理增益由信号的带宽和脉宽的乘积决定。图 2 为拷贝相关器的模型。



$r(t)$ 为输入信号; $s(t-\tau)$ 为参考信号; $R(\tau)$ 为输出相关信号

图 2 拷贝相关器模型

假设 $s(t)$ 为发送信号, $h(t)$ 为多途信道冲激响应,有

$$h(t) = \sum_{i=1}^M A_i \delta(t - \tau_i) \quad (2)$$

式中: M 为信道多途个数,即本征声线个数; A_i 为沿第 i 条途径到达的信号幅度; τ_i 为第 i 条途径的时延。

若接收信号中的噪声为 $n(t)$,则接收信号为

$$r(t) = s(t) * h(t) + n(t) = \sum_{i=1}^M A_i s(t - \tau_i) + n(t) \quad (3)$$

式中: $*$ 为卷积。

拷贝相关器的输出为

$$R(\tau) = \int r(t)s(t-\tau)dt =$$

$$\sum_{i=1}^M A_i R_{ss}(t-\tau_i) + R_{ns}(t, t-\tau) =$$

$$\sum_{i=1}^M A_i R_{ss}(\tau - \tau_i) = R_{ss}(\tau) * h(\tau) \quad (4)$$

式中: R_{ss} 为信号自相关函数; R_{ns} 为信号与噪声的互相关函数. PDS 解码是通过测量 $R(\tau)$ 的峰值时刻进而求出对应的信号时延值来进行的. 在拷贝相关时延估计时, 将接收到的校正码作为参考信号的方法称为相干重置, 此时拷贝相关器的输出为

$$R(\tau) = r(\tau) * r(-\tau) =$$

$$s(\tau) * h(\tau) * s(-\tau) * h(-\tau) =$$

$$R_{ss}(\tau) * R_{hh}(\tau) \quad (5)$$

式中: $R_{hh}(\tau)$ 为信道冲激响应的自相关函数. 在高混响、多途严重的信道环境下, $R_{hh}(\tau)$ 的波峰十分尖锐, 波峰幅值为 $R_{hh}(0)$, 是信道各多途信号能量的总和, 此时相干重置信号相关峰尖锐, 峰选精确, 时延估计精度高. 在低混响及多途影响较弱时, 尖峰顶部变化较为平缓, 极端情况下会出现等幅值双峰或多峰, 相干重置信号峰选时会出现选不准的现象, 此时时延估计将出现错误. 一般信道环境下, 相干重置信号的主相关峰远高于副相关峰, 且选用的 4 种校正码的互相关系数小于 0.31, 时延估计时不会出现选不准的现象.

PDS 通信体制以帧为单位, 同步码采用 LFM 信号. 常规解码时, 同步码给出译码窗的时基并确定最强的多途到达时刻, 接收机利用拷贝相关器依次解出其后续信号的相关峰时刻, 计算时延差值从而完成解码. 同步码与其后的校正码以及帧与帧之间均留有一段时隙 T_{ISI} , 以抑制多途对信号的影响, 其长度应大于多途扩展时间. 帧的长度取决于信道的时变性和空变性, 应短于信道的相对稳定时间, 若收发节点间存在较大的相对运动, 则帧的长度应短一些. 实际通信时由于信道的变化及风浪水流等环境条件的影响, 常规解码时会发生同步码开窗后各 Pattern 码元起始时基估算误差偏大, 严重时会导致解码完全错误, 而动态自适应解码则能较好地克服这一问题. 图 3 为帧结构及解码示意图, 系统采用 4 种挑选的 Pattern 脉冲 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 , 它们组成的校正码置于时隙 T_{ISI} 后, 校正码之后为信息码. 动态解码时, 首先根据同步码确定的时基将校正码截取出来, 信息码段的开窗时基由最后一个校正码 P_4 确定为 T_1 , 然后用 P_1 与信息码的第 1 个 Pattern 码元拷贝

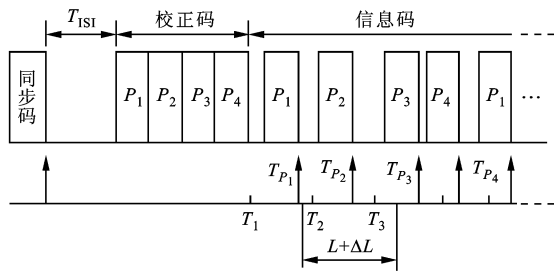


图3 帧结构及解码示意图

相关, 测出相关峰时刻 T_{P_1} . 可以得到第 1 个信息码元的测量时延差值为

$$k_1 \Delta\tau = T_{P_1} - T_p - T_1 \quad (6)$$

由 $k_1 \Delta\tau$ 即可解出第 1 个 Pattern 码元携带的信息, 自此开始, 测算其后码元长度的动态偏移量 $k' \Delta\tau$

$$k' \Delta\tau = k \Delta\tau - k_1 \Delta\tau \quad (7)$$

式中: $k \Delta\tau$ 为编码时原始时延长度. 可知只要满足 $-\Delta\tau/2 \leq k' \Delta\tau \leq \Delta\tau/2$, 即可正确译码. 设第 1 个 Pattern 码元修正后的码长为 L_1 , 则有

$$L_1 = T_0 - k' \Delta\tau \quad (8)$$

式中: T_0 为原始码长. 计算第 1 个 Pattern 码元的结束位置, 即下一个 Pattern 码元的起始位置

$$T_2 = T_1 + L_1 \quad (9)$$

T_2 的精确度直接影响到后续解码的质量, 正常情况下, 由 T_2 向后截取 L_1 长度即为第 2 个 Pattern 码元信号, 然后重复上述步骤即可依次解出该帧信息. 实际通信中由于前文所述的信道变化等因素对信号的影响, 这样截取可能丢失第 2 个 Pattern 码元的部分信息, 导致与校正码相关性变弱, 严重时可能造成峰选错误, 因此在截取第 2 个 Pattern 码元时应根据实际情况调整滑动窗, 适当增加搜寻长度 ΔL . 由于系统使用 4 种彼此互相关性很弱的 Pattern 脉冲, 理论上 ΔL 最大可达到 $3L_1$, 这样能确保下一个 Pattern 码元的有用信息不丢失, 但实际解码时 ΔL 并不是越大越好, 要根据相关性动态调整以获得最佳性能.

上文提到解码时每帧接收信号利用同步码确定出开窗时基, 由此分割出校正码, 但是在通信时由于信道变化及收发端相对运动, 会造成接收的同步码信号产生一定的压缩或扩展. 这种压缩或扩展使信号起始位置发生错位, 在利用这种错位的接收同步码进行时基估计时, 会造成时基位置估计产生偏差, 在校正码提取时, 将不能得到完整正确的校正码信号, 致使在相干重置解码时, 有用信息能量会丢失, 导致主相关峰值下降和副相关峰值增大, 严重时

出现较高的副峰甚至无法正确测量时延值,极大地影响到后续的时延差估计精度. 由于发送的校正码是已知的,不携带编码信息,因此为了提高时基估计的精确性,在信号错位不超出系统所能承受的偏差范围时,可在校正码开窗时适当加大搜索范围.

PDS 通信体制所能承受的收发端最大相对运动速度为

$$v_{\max} = c\Delta\tau / (2(T_s + T_{\text{ISI}})) \tag{10}$$

式中: c 为声速; T_s 为同步码长. 在 $\Delta\tau$ 不变时,减小 T_s 可以提高 $v_{\max}$,但同步码相关性会下降,导致开窗时基难以测量. 一般情况下,由于 LFM 信号具有较好的多普勒容限,通过选取合适的带宽和长度,在收发端相对运动速度小于 $v_{\max}$ 时,同步码的压缩或扩展导致开窗时基产生的误差对解码的影响是可以忽略的.

动态自适应解码与常规拷贝相关解码相比,能够实时修正码元偏移量,动态地搜寻每个携带信息的 Pattern 码元,最大限度地将有用信息送入拷贝相关器,较好地自适应信道起伏及收发节点距离变化对信号造成的影响,理论上只要偏移量 $k'\Delta\tau$ 不超过 PDS 编码体制所要求的时延估计精度,即可实现无误码通信. 如果 $k'\Delta\tau$ 超出了 $[-\Delta\tau/2, \Delta\tau/2]$ 的范围,将明显增加误码率. 由 $\Delta\tau$ 的定义式可知,减小编码位数 n 或者增大编码时间 T_c 可增大 $\Delta\tau$,使系统能承受更大的时延误差,但减小 n 会降低通信速率,增大 T_c 会减小 Pattern 脉冲长度,使解码时信号相关性变弱,影响时延估计精度. 因此,一般在 n 和 T_0 不变的情况下,可以适当增加 T_c 来增大 $\Delta\tau$.

3 试验结果

2009 年 10 月 28 日上午,在吉林省内的松花湖进行了 3 组通信试验,由手持式 GPS 测得 3 次通信距离分别为 670 m、1 000 m 和 1 500 m. 信息码段长 3 s,发送数据帧同步码及时隙 T_{ISI} 长度均为 50 ms, Pattern 码元长度 $T_0 = 20$ ms, Pattern 脉冲长度 $T_p = 10$ ms, 占空比 $\eta = 0.5$, 每个 Pattern 码元携带 $n = 4$ b 信息, 占用频带 3 700~5 620 Hz, 采样频率 $f_s = 48$ kHz, 通信速率 200 b/s, 发送原始信息为北京 2008 奥运会的徽标. 试验时湖面浪较大,两船距离 1 000 m 时发射船抛锚(其他 2 组试验未抛锚),根据 GPS 手持机估算此时两船径向速度约 1 m/s,发射换能器深 1.5 m,接收水听器深 6 m,均垂直吊放,换能器工作频带为 1~9 kHz. 实测声速分布如图 4 所示,可见声速呈负梯度分布. 图 5 为距离 1 500 m

通信时接收到的同步码进行拷贝相关后得到的声信道多途扩展情况,可看出接收信号的信噪比较低,多途扩展约 25 ms,多途幅度较大. 图 6 为原始发送图及通信距离为 670 m 时 3 种解码方案的结果.

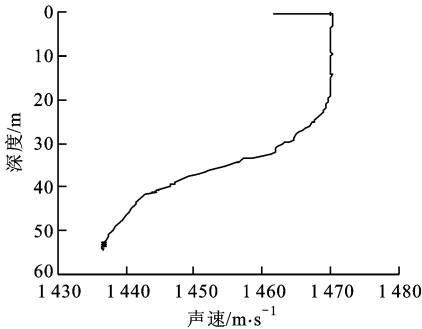


图 4 声速分布图

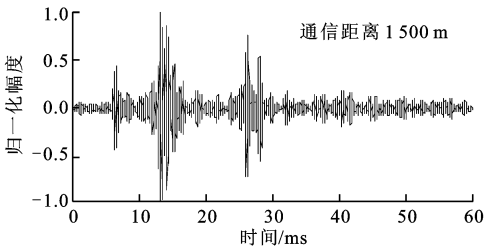


图 5 同步码拷贝相关后的结果

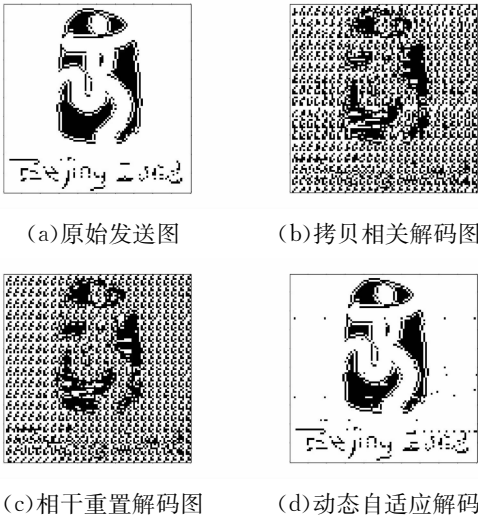


图 6 原始发送图及距离 670 m 时不同解码方案的结果图

表 1 统计了对 3 组试验数据应用不同解码方案的误比特率. 距离 1 000 m 时发射船抛锚,多普勒频移影响可以忽略,由表 1 可以看出,相干重置解码在此情况下较拷贝相关解码的误比特率降低了一个数量级. 其他 2 组通信试验由于发射船漂移造成的多普勒频移及信道变化的影响,拷贝相关解码和相干重置解码的误比特率十分大,已无法正常通信(解码结果图可参考图 6b、图 6c),而从动态自适应解码结果可看出其稳健的通信性能.

表 1 3 种不同解码方案的误比特率

收发节点 水平距离 /m	误比特率/%		
	拷贝相关解码	相干重置解码	动态自适应解码
670	35.67	35.31	0.61
1 000	1.91	0.76	0.12
1 500	31.08	31.78	0

4 结 论

Pattern 时延编码水声通信体制一般采用拷贝相关解码和相干重置解码,这 2 种解码方案在信道变化较快及多普勒频移影响较大时已不再适用. 本文提出的动态自适应解码方案,能够较好地适应时变的信道和多普勒频移对信号的影响,湖试结果验证了该方案较常规解码方案的优越性,系统占用带宽 1 920 Hz,通信速率 200 b/s,在 1 500 m 时达到了无误码通信,若采用多信道通信,则通信速率可成倍提高.

采用动态自适应解码的 Pattern 时延差编码水声通信体制具有实用、稳健的优点,为构建水下通信网打下了良好基础.

参考文献:

[1] CATIPOVIC J A. Performance limitations in underwater acoustic telemetry [J]. IEEE J Oceanic Eng, 1990, 15(3): 205-216.

[2] URICK R J. Models for the amplitude fluctuations of narrow-band signals and noise in the sea [J]. Acoust Am Soc, 1977,62(4): 878-887.

[3] 惠俊英,生雪莉. 水下声信道 [M]. 2 版. 北京:国防工业出版社,1992:37-40.

[4] STOJANOVIC M. Recent advances in high-speed underwater acoustic communication [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1996, 21(2): 125-135.

[5] KILFOYLE D, BAGGEROER A. The state of the art in underwater acoustic telemetry [J]. IEEE J Oceanic Eng, 2000, 25(1): 4-27.

[6] 惠俊英,刘丽,刘宏,等. Pattern-时延差编码通信研究 [J]. 声学学报,1999, 24(6): 561-573.

HUI Junying, LIU Li, LIU Hong, et al. Research on pattern time delay shift coding communication [J].

Chinese Journal of Acoustics, 1999, 24(6): 561-573.

[7] 温周斌,冯海泓,惠俊英. 一种新的水声通信体制 [J]. 声学学报,1993,18(5): 345-351.

WEN Zhoubin, FENG Haihong, HUI Junying. A new underwater acoustic communication method[J]. Chinese Journal of Acoustics, 1993, 18(5): 345-351.

[8] 殷敬伟,惠俊英,王逸林,等. M 元混沌扩频多通道 Pattern 时延差编码水声通信[J]. 物理学报,2007,56(10): 5915-5921.

YIN Jingwei, HUI Junying, WANG Yilin, et al. M-ary chaotic spread spectrum pattern time delay shift coding scheme for multichannel underwater acoustic communication [J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(10): 5915-5921.

[9] YIN Jingwei, HUI Junying, HUI Juan, et al. Underwater acoustic communication based on pattern time delay shift coding system [J]. China Ocean Engineering, 2006, 20(3): 499-508.

[10] 殷敬伟. 多途信道中 Pattern 时延差编码水声通信研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学水声工程学院,2007: 21-26.

[本刊相关文献链接]

被动合成阵列极大似然参数估计的快速方法. 西安交通大学学报,2009,43(12):106-110.

快速四阶累积量旋转不变子空间算法. 西安交通大学学报,2009,43(6):88-92.

采用帧延迟的实时编码协作方案. 西安交通大学学报,2009,43(2):63-66.

一种适合任意阵列流型的相干信号波达方向估计算法. 西安交通大学学报,2009,43(6):72-75.

三维参数联合估计的免疫记忆量子克隆算法. 西安交通大学学报,2009,43(4):75-79.

一种新的浅海目标方位估计方法. 西安交通大学学报,2008,42(10):1295-1299.

二维波达方向估计的非酉联合对角化方法. 西安交通大学学报,2008,42(6):747-750.

多输入多输出系统下行链路发射与接收的联合线性预编码. 西安交通大学学报,2007,41(4):475-478.

多输入多输出系统下低复杂度的自适应预编码方法. 西安交通大学学报,2007,41(4):467-470.

(编辑 刘杨)