

# 一种线性调频扩频水声通信的新同步方法\*

何成兵<sup>†</sup> 黄建国 张群飞

(西北工业大学航海学院 西安 710072)

**摘要** 针对高速运动过程中的水声通信,提出一种新型稳健的同步方法。该方法充分利用线性调频(LFM)信号的自相关特性及LFM扩频水声通信解调原理。湖试结果表明该方法简单有效,能够消除同步误差累积。利用湖试数据进行的仿真结果表明:该方法在常速及变速运动情况下均有效;在水下24m/s高速运动、时变多途干扰、带内接收信噪比低于0dB时,数据率可达为100bit/s,误码率保持在 $10^{-4}$ 左右。

**关键词** 水声通信,线性调频信号,新同步方法,多普勒

## A novel synchronization method for LFM based spread spectrum underwater acoustic communication

HE Cheng-Bing HUANG Jian-Guo ZHANG Qun-Fei

(College of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

**Abstract** A novel synchronization method is proposed to improve the LFM based spread spectrum underwater acoustic communication in large Doppler environment. It uses the autocorrelation characteristic of the linear frequency modulation signal (LFM). Lake experiment results showed that it's being able to eliminate the synchronization error. Our simulated results by using the lake saved communication data show that this novel method is also effective in large Doppler and variant Doppler conditions. The LFM based spread spectrum underwater acoustic communication can reach 100bits/s when the received SNR is below 0dB, the time-varying multipath propagation exists and the relative speed between transmitter and receiver is as large as 24 m/s.

**Key words** Underwater acoustic communication, Linear frequency modulation, A new method of synchronization, Doppler

2007-01-18 收稿; 2007-08-01 定稿

\* 国家自然科学基金(60572098);西北工业大学博士论文创新基金(CX200602);教育部博士点基金(20070699020)

作者简介:何成兵(1981-)男,西北工业大学博士研究生,研究方向:水声通信技术。

黄建国(1945-)男,教授,博导,IEEE西安分会主席。张群飞(1968-)男,副教授。

<sup>†</sup> 通信联系人 E-mail: hcb.nwpu@gmail.com

## 1 引言

水声信道是十分复杂的时-空-频变信道,主要特征为:时变性、严重多途干扰和有限带宽<sup>[1-8]</sup>。由于中远程水声通信接收信噪比(SNR)低,通常采用扩频技术进行稳定的信息传输。线性调频信号(LFM)信号具有一定的抗 Doppler 效应,对相位变化不敏感,在稳定的水声通信中有着广泛的应用,如 Pattern 时延编码技术<sup>[2,3]</sup>、混沌调频<sup>[4]</sup>、M 元 LFM 扩频技术<sup>[5,6]</sup>等。我们先后利用 LFM 扩频技术进行了中远程湖海实验研究,取得了比较满意的效果<sup>[5,6]</sup>。

水声信道对同步检测的影响主要表现为<sup>[7,8]</sup>:(1)多途效应造成的同步抖动问题;(2)复杂的海洋环境造成信号的强烈起伏;(3)接收信噪比低;(4)发射与接收端 A/D, D/A 采样频率的影响。本文在前期 LFM 扩频水声通信实验研究的基础上,提出一种新型稳健的同步方法。该方法充分利用了 LFM 信号的自相关特性及 LFM 扩频水声通信的解调原理。25km 的实际湖试数据验证了该方法的有效性。同时,利用该湖试数据仿真了航行器在常速和变速运动时的水声通信同步性能,结果表明:在高速和变速运动情况下,该方法也有效可行。

## 2 线性调频扩频水声通信

由于 LFM 信号对水声信道中的多途传播和多普勒偏移造成的衰落和失真均不敏感,多数水声通信系统采用 LFM 信号作为同步信号。LFM 信号可以表示为

$$s(t) = \begin{cases} Ae^{j(\omega_l t + \pi\beta t^2)} & 0 \leq t \leq T \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (1)$$

其中  $\omega_l$  表示起始频率,  $\beta$  表示调制斜率。LFM 信号在码元持续时间  $T$  内其瞬时频率随时间线性变化。为了在有限带宽内提高通信数据率,可将通信带宽分成若干份,每个子带采用多种调制斜率的 LFM 信号,即 M 元 LFM。发射端根

据传输的信息,选择不同调制斜率的 LFM 信号进行发射;接收端根据 LFM 信号的相关性,利用相关器组进行判决译码, M 元 LFM 扩频水声通信采用的解调原理可如下表示

$$c = \max[Q_i(x(t))], \quad i = 1, \dots, M \quad (2)$$

其中,  $x(t)$  表示接收到的信号,  $Q_i(\cdot)$  表示第  $i$  个相关器的输出波形,  $\max[\cdot]$  表示最大峰值对应的相关器,根据  $c$  值判断相应的发射信号进行译码。

我们对不同参数的 LFM 扩频水声通信进行了多次湖上实验研究<sup>[6]</sup>。实验区水深 40 ~ 100m,不存在明显的温跃层,声速呈微弱负梯度,收发换能器布放深度分别为 20m 和 6m 左右,通信距离 25km。通信距离和水深的比值远大于 100,属于浅水信道。利用覆盖整个通信带宽、时长为 1s 的 LFM 脉冲信号(带宽时间积为 4000)进行信道响应的测试发现多途干扰是时变的,且最大多途扩展约 15ms。

## 3 同步误差累积现象

目前,在水声通信中,采用较多的是同步头法<sup>[7,8]</sup>,即在传输正式信息之前,先发送一段已知信息,用作同步头,供通信双方的接收机建立同步,然后再发送有用信息。这种方法简单易行,可以提高捕获和同步速度。一般采用自相关性非常尖锐的伪随机码或者 LFM 信号,后续的解调过程则根据初始同步获得的参数进行。在利用频率调制的水声通信中,误差范围在码元宽度的  $\pm 10\%$  以内是符合要求的。由于水声信道及发射接收端 A/D, D/A 采样频率误差等的影响,将会造成同步误差累积现象。设码元宽度为  $T$ ,误差偏移量为  $\Delta\tau$ ,定义同步误差为:

$$MSE = \left| \frac{\Delta\tau}{T} \right|^2 \quad (3)$$

由 LFM 扩频水声通信解码原理可知,在解码的过程中同时记录峰值偏移中心点的位置,即误差偏移量为

$$\Delta\tau = \tau_{\max}[Q_i(x(t))], \quad i=1, \dots, M \quad (4)$$

其中  $Q_i(\cdot)$  表示的含义为第  $i$  个相关器的输出波形, 而  $\tau_{\max}[\cdot]$  表示最大峰值偏移相应相关器输出波形中心点的位置。在没有同步误差情况下,  $\Delta\tau$  受噪声影响应该始终保持在 0 附近, 不会存在误差累积现象。利用数据率为 200bit/s 的湖试数据, 分析实验中的同步误差随符号个数的变化曲线, 如图 1 所示, 图中横坐标表示传输的符号个数, 纵坐标是式 (3) 表示的同步误差。可以看出, 随着符号个数的增加, 同步误差逐步累加, 且由于噪声或多途影响存在着同步抖动的现象, 同步误差累积现象是小 Doppler 偏移以及 A/D, D/A 采样频率联合产生的。检查该组数据译码后的错误序列的位置发现, 图 1 中尖峰的位置产生两个比特的误码。LFM 扩频信号虽然具有一定的抗同步误差能力, 然而随着信息数据帧长的增加, 同步误差累积逐步增大, 误码会更多。

### 4 同步误差修正方法

同步误差累积会造成后续数据符号码元同步不准确, 无法进行正确的解调。根据 (4) 式获得的误差偏移量, 对 (2) 式进行修正。同步误差修正原理为: 利用估计出的当前码元同步误差偏移量, 对下一码元进行同步修正, 即改变下一码元分割的起始位置。

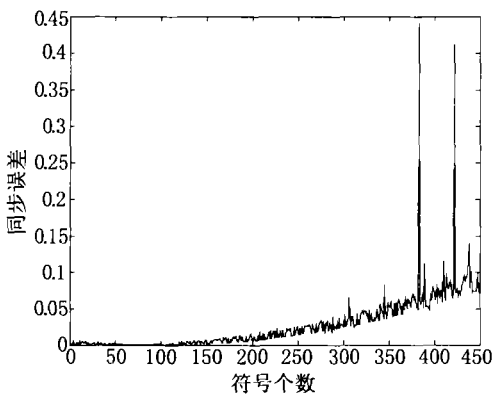


图 1 湖试数据中的同步误差随符号个数变化情况

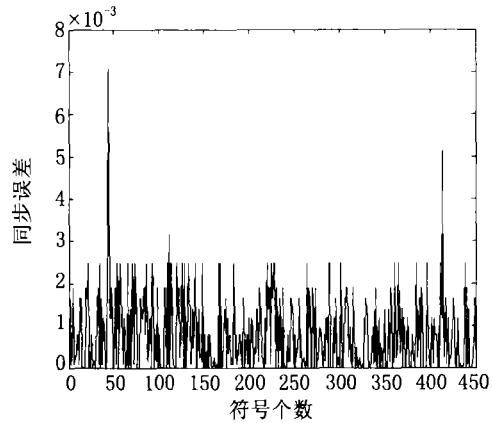


图 2 修正后的同步误差随符号个数变化情况

该修正方法需要在每个码元的解调过程中同时判决偏移量的大小, 联合同步误差修正方法的 LFM 扩频水声通信的解码原理为

$$c = \max[Q_i(x(t - \Delta\tau))], \quad i=1, \dots, M \quad (5)$$

利用该同步修正方法, 对数据率为 200bit/s 的湖试数据进行再次处理, 消除了两比特的误码, 修正后的同步误差随符号个数变化曲线如图 2 所示, 整个过程中平均同步误差始终保持在  $10^{-3}$  以下, 消除了由采样频率、水声信道及 Doppler 引起的误差累积现象。

### 5 Doppler 环境中同步修正方法的性能

水声通信的载波跟踪和符号同步受 Doppler 干扰严重。由于水声速度低, 以及宽带调制信号的使用 (如 LFM 信号), 其 Doppler 相对偏移量比电磁波中的高几个数量级。对于如 LFM 这样的宽带信号, Doppler 偏移对每个频率分量的绝对值是不一样的, 将导致接收信号的压缩或扩展, 在水声通信中, Doppler 的影响一般建模为<sup>[9,10]</sup>:

$$r(t) = s((1 + \Delta)t) \quad (6)$$

其中,  $s(t)$  表示发射信号,  $r(t)$  表示接收到的具有 Doppler 偏移的信号,  $\Delta$  表示 Doppler 偏移因子, 可以表示为:

$$\Delta = v/c \quad (7)$$

其中,  $c$  是声速,  $v$  是发射和接收机相对径向速度。目前, 对宽带水声通信中的 Doppler 影响较理想的处理方法是采用重采样或插值方法<sup>[9,10]</sup>, 其基本原理是首先估计出 Doppler 因子  $\Delta$ , 而后通过  $\Delta$  来改变接收端 A/D 的采样频率, 或者是通过插值方法实现重采样, 两种方法运算量都较大, 实验结果表明该方法的可行有效<sup>[9]</sup>, 然而只适合恒定低速 ( $\pm 2.6\text{m/s}$ ) 运动, 对于变速运动, 需要采用自适应方法进行实时重采样处理<sup>[10]</sup>。

对于 LFM 信号来说, Doppler 偏移会造成信号的展宽和压缩, 信号的占宽和压缩会造成同步不精确, 对于相关器则表现为其输出峰值幅度下降以及偏移中心位置, 我们认为 Doppler 效应造成了码元同步误差, 因而, 利用前面提出的同步误差修正方法, 可以补偿由于 Doppler 所造成的影响。

采用如文献[9]中的重采样方法产生具有 Doppler 影响的接收信号, 来模拟在 Doppler 环境下的同步修正方法的性能。仿真数据为实际湖上实验数据: 4LFM 信号, 带宽 4kHz, 码元宽度为 0.02s, 数据率 100bits/s, 发送 450 个符号数据 (共 900bit 比特信息), 按照式(2)常规解码方法, 无误码产生, 带内信噪比约为 5dB。由于整个通信过程中其同步误差保持在 0.05 以下, 同步误差累积较小, 没有产生误码。

利用该数据进行同步修正方法在 Doppler 环境中的性能研究, 其优点在于该数据包含了信道的时变多途效应, 在考虑同步修正方法由于 Doppler 引起的性能损失外, 隐含考虑了多途干扰带来的影响。在仿真实验中, 主要参数为发射机和接收机的相对径向速度  $v$ 。相对径向速度  $v$  包括常速运动和变速运动两种情况, 常速情况下速度分别为 12m/s, 18m/s, 24m/s; 变速情况下, 在整个数据端前中后三部分, 速度分别为 12m/s, 18m/s 及 24m/s。首先利用重采样方法产生所需 Doppler 偏移量的接

收信号, 为了同时考虑方法在低信噪比下的效果并进行误码率性能的统计, 我们对原本带内信噪比为 5dB 的湖试数据叠加了 0dB 的高斯白噪声, 并对每种参数条件下进行了 300 次的 Monte Carlo 仿真, 仿真结果如表 1 所示。

表 1 同步修正方法在 Doppler 环境下的性能

速度 (m/s)	12	18	24	12-18-24 变速
误码率	0	0	$8.4 \times 10^{-4}$	0

从表 1 的仿真结果可以得出如下结论:

(1) 该同步修正方法在适用于 Doppler 环境, 无需估计 Doppler 偏移因子, 其性能随速度的增加而逐渐变差。

(2) 该同步修正方法在相对径向速度达 24m/s 时能正常工作, 系统误码率在  $10^{-4}$  左右。

(3) 该同步修正方法不仅适用于常速运动, 而且适用于变速运动。变速运动过程中的系统误码率性能好于以该变速中最高速进行常速运动时的系统误码率性能。

图 3 给出了根据式(3)(4), 在常速 24m/s 情况下, 没有采取同步修正方法时的同步误差随符号长度变化情况。从图 3 看出, 同步误差出现了周期现象, 这是由于在式(4)中仅考虑了误差偏移量小于一个码元长度时的情况, 当同步误差超过一个码元宽度时, 根据式(4)获得的误差偏移量会从小变大直到再次超过一个码元宽度, 因而出现了如图 3 中所示的周期现象。此时, 已无法实现正确的解调, 误码率为 46%。

图 4 给出了利用同步修正方法获得的同步误差随符号长度变化曲线, 利用同步修正方法完全消除了图 3 中的周期现象, 误码率在  $10^{-4}$  左右。这说明, 在高速 Doppler 情况下该方法是有用的。在常速 24m/s 情况下, 利用同步修正方法后, 平均同步误差保持在  $5 \times 10^{-3}$  左右。

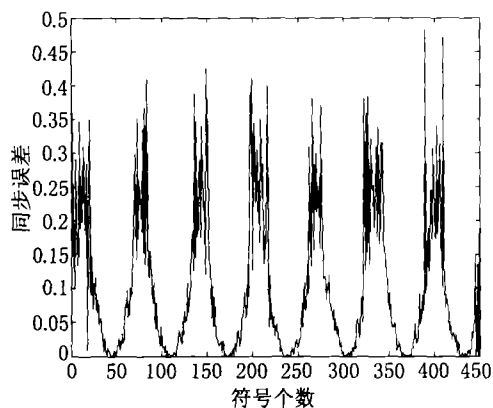


图3 24m/s时同步误差随符号个数变化情况图

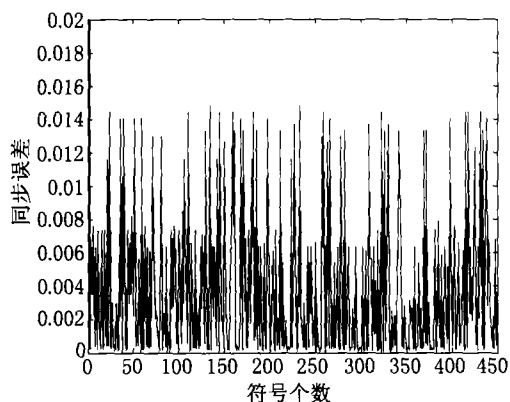


图4 24m/s时修正后的同步误差随符号个数变化情况

## 6 结论

本文在前期 LFM 扩频水声通信研究的基础上,提出一种新型稳健的同步方法。湖试结果表明,该方法简单有效,能有效补偿由于水

声信道、发射接收机中的 A/D, D/A 部分采样频率引起的误差累积和同步抖动。利用 25km 湖试数据仿真表明,该方法在高速 (24m/s)、时变多途干扰、带内信噪比为 0dB 时,系统误码率在  $10^{-4}$  左右,且该同步修正方法在变速情况下仍旧有效。

## 参 考 文 献

- [1] Kilfoyle D B, Baggeroer A B. The State of Art in Underwater Acoustic Telemetry. IEEE J Oceanic Eng, 2000, 25 (1): 4-27.
- [2] 惠俊英,刘丽,刘宏. Pattern-一时延差编码水声通信研究. 声学学报,1999,24(6):561-573.
- [3] 马雯,黄建国,张群飞. 用时延编码实现远程水声通信. 电讯技术,2002,42(4):70-72.
- [4] 王海斌,吴立新. 混沌调频 M-ary 方式在远程水声通信中的应用. 声学学报,2004,05:161-166.
- [5] 何成兵,黄建国,张群飞. M 元线性调频远程水声通信新技术. 西北工业大学学报,2005,23(6):777-780.
- [6] Jianguo HUANG, Chengbing HE, Qunfei ZHANG. M-ary Chirp Spread Spectrum Modulation for Underwater Acoustic Communication. IEEE TENCON 05,2005: 1873-1877.
- [7] Samir S S. Synchronization Issues in Ocean Telemetry. IEEE J. Oceanic Eng., 1991, 16(1):74-85.
- [8] 童峰,许鹭芬,许肖梅. 水声数据传输系统中的同步信号处理. 厦门大学学报,2001,40(3):684-688.
- [9] Sharif B S, Neasham J, Hinton O R and Adams A E. A Computationally Efficient Doppler Compensation System for Underwater Acoustic Communications. IEEE. J. Oceanic Engineering. 2000,25(1):52-61.
- [10] Sharif B S, Neasham J, Hinton O R and Adams A E. Adaptive Doppler compensation for coherent acoustic communication. IEE Proceedings Radar, Sonar and Navigation, 2000, 147(5):239-246.