

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106751

# 基于数字延迟和重采样的非线性调频 连续波声纳测距方法研究\*

钟 晨 张启元 余紫扬 袁鹏哲 张烈山  
(浙江理工大学 机械与自动控制学院 杭州 310018)

**摘要:** 针对连续波主动声纳在探测目标时易被对方声纳阵定位暴露自身位置的问题,提出了基于数字延迟和重采样技术的主动非线性调频连续波测距方法。通过信号发生器产生频率变化呈非线性的连续波测量信号,该信号经被测物体返回后与原始信号进行混频、滤波,得到测量混频信号;再根据原始激励信号的数字模型构造一路增加数字延迟的参考信号,参考信号与回波信号进行混频、滤波得到参考混频信号;利用参考混频信号对测量混频信号进行过零重采样与频谱分析,提取出信号主频进而计算得到被测物体距离。对水下重采样的非线性调频连续波测距实验系统进行搭建,根据实验室测量结果,所述方法的测量标准差为 0.083 m,相对误差优于 $\pm 8.5\%$ ,验证了该测距方法的可行性,并进一步分析了测距误差的主要来源。通过广义互相关时延估计算法对比仿真,确定使用该方法将无法准确估计出传播时延,证明测距的安全性得到提高。

**关键词:** 非线性;调频连续波;数字延迟;重采样;安全性

中图分类号: TH89 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4020

## Research on ranging method of nonlinear frequency modulation continuous wave sonar based on digital delay and resampling

Zhong Chen Zhang Qiyuan Yu Ziyang Yuan Pengzhe Zhang Lieshan

(School of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that continuous wave active sonar is easily exposed by the sonar array when detecting targets, an active non-linear frequency modulated continuous wave ranging method based on digital delay and resampling technology is proposed. The continuous wave measurement signal with non-linear frequency variation is generated by the signal generator. After the signal is returned by the measured object, it is mixed and filtered with the original signal to obtain the measurement mixing signal. According to the digital model of the original excitation signal, a reference signal with digital delay is constructed along the way. The reference signal and the echo signal are mixed and filtered to get the reference mixing signal. The reference mixing signal is used for zero-crossing resampling and spectrum analysis of the measured mixing signal, the main frequency of the signal is extracted and then the distance of the measured object is calculated. The underwater resampled nonlinear frequency-modulated continuous wave ranging experiment system is built, and according to the laboratory measurement results, the repeatable standard deviation is only 0.083 m and the average error is better than  $\pm 8.5\%$ , which verifies the feasibility of the ranging method, the main sources of ranging errors are further analyzed. Through the comparison and simulation of the generalized cross-correlation time delay estimation algorithm, it is confirmed that the propagation time delay cannot be accurately estimated by using this method, and the safety of ranging is improved.

**Keywords:** nonlinear; FMCW; digital delay; resampling; safety

## 0 引言

由于声波在水中可传播的距离比电磁波远得多,因此

利用声波作为载体在水中传播信息的声纳从 20 世纪初发明以来,在海洋测绘、海洋渔业以及军事领域等有着越来越广泛的应用,特别是在潜艇探测、水体测深、鱼群探测、沉船

收稿日期:2021-05-21

\* 基金项目:国家自然科学基金青年项目(61905220)、浙江省基础公益研究计划项目(LGF21F050004)、国家级大学生创新创业训练计划项目(201910338022)资助

打捞、检测船的尾迹<sup>[1-2]</sup>等方面,声纳发挥的作用愈显突出。随着信号调制解调技术以及水下换能器硬件的升级更新,连续波主动声纳表现出越来越强的应用潜能<sup>[3]</sup>。对于连续波主动声纳,线性调频连续波是其探测目标最常用的发射波形,它的信号带宽较宽,使其具有很高的距离分辨率和距离测量精度,以及具有较强的抗干扰性<sup>[4]</sup>。不仅如此,它的发射机与接收机同时工作,不存在距离测量盲区的问题,因此调频连续波(frequency modulated continuous wave, FMCW)也引起了越来越多国内外专家学者的关注与研究<sup>[5-8]</sup>。

调频连续波测距方法首先在无线电雷达领域得到了应用,国内外学者对 FMCW 在雷达应用上的多方面技术问题进行了研究。例如,屈奎等<sup>[9]</sup>为解决抗干扰能力差的问题,提出了对时间差信号做特定频率的离散傅里叶变换来还原物体运动状态的方法,但该方法无法对静止物体进行检测;于卫东等<sup>[10]</sup>提出了基于 Rife 算法的雷达测距方法,虽然整体准确性较高,但测量结果受到量化距离点的影响,性能不稳定;王斯盾等<sup>[11]</sup>通过产生非线性校正后的锯齿波调制信号来提高差频信号的采集的准确性,但硬件极其复杂;Kim 等<sup>[12]</sup>提出了基于 FFT 估计的高效超分辨 FMCW 雷达测距方法,该方法能在显著降低算法难度的同时提高准确性,但仍然无法避免暴露声源位置的问题。随着声源定位的时延估计(TDE)技术不断发展,利用广义互相关(GCC)方法、自适应最小均方(LMS)方法等 TDE 算法,可以估计同源信号回到不同传感器时由于传输距离不同而引起的时间差<sup>[13-16]</sup>。

线性调频连续波由于测量信号频率调制的规律性,可以利用 TDE 算法较为准确的估计出传播时延,因此在海洋作战探测时,容易暴露自身声源位置,存在较大的安全隐患。对此,我们曾利用声波在水中与空气中的传播速度差,通过空中传播的参考波对水中的测量波进行重采样,解算出被测距离<sup>[17]</sup>,取得了一定成效。但该方法对于参考空气路的距离有一定要求,当被测距离越远,参考路的长度也应越长,这对深海远距离测量是不利的。

因此本文从另一角度,提出通过构造数字延迟参考信号,对测量信号进行重采样,提取信号主频则可换算出被测距离。在未知非线性调频连续波频率调制模型的条件难以解调测量信号的准确时延,因此该方法在原理上具有更好的安全性。本文对该方法原理进行分析验证,并利用算法的对比仿真证明该方法的测距安全性。

### 1 调频连续波测距原理

目前应用最广泛的线性调频连续波测距方法的基本流程如图 1 所示。首先由信号发生装置产生线性调频连续波(LFMCW)信号,并将其分为两路。一路连续波作为探测信号经过功率放大器后由水下超声波换能器发射到探测区域,其传播速度为  $c$ 。探测波经被测障碍物反射经过时间  $\tau$

后被水下超声波接收换能器接收,接收到的探测波与另一路激励进行混频,混频后的信号再经过低通滤波和频谱分析,由此得到信号主频  $f$ ,进而根据式(1)计算出被测距离  $D$ 。

$$D = 0.5\tau c = 0.5 \frac{f}{B} c \tag{1}$$

式中: $B$  为线性调频连续波的调频斜率。

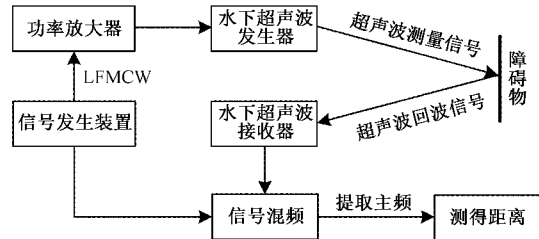


图 1 线性调频连续波声纳测距流程

图 2 为调频斜率  $B$  为 60 kHz/s 的线性调频连续波测量信号与原始信号混频后得到的混频信号图像。

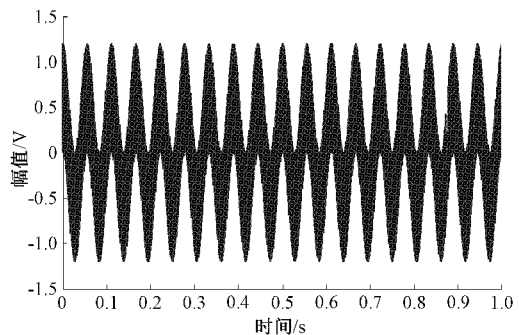


图 2 测量混频信号时域分布图

将图 2 中的混频信号经上位机数字滤波与频谱分析,得到频域分布如图 3 所示。频域图中混频信号具有明显的单一主峰,提取出主频即可根据式(1)计算出被测距离  $D$ 。

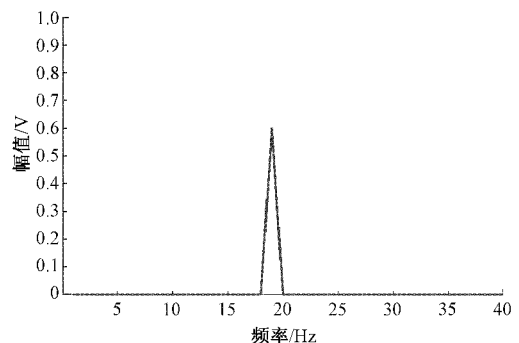


图 3 测量混频信号频域分布图

虽然线性调频连续波主动声纳与脉冲式主动声纳相比可以提高被测目标的重访率与测量的鲁棒性,但由于线性调频连续波调频的规律易解调与破解,在探测敌对目标时安全性存在很大的隐患。

## 2 调频连续波测距安全性研究

目前海洋舰艇多采用声呐阵列来对目标进行定位,图 4 所示为三元阵列定位声源的原理。3 个位置按等间距  $d$  排布的声呐阵元分别经  $\tau_1, \tau_2, \tau_3$  的声源信号传输时延接收到  $c$  声源发来的探测声波。然后根据式(2)与(3),可求出目标声源至声呐阵元 2 的距离  $R$  以及二者位置连线与垂直方向的夹角  $\theta$ 。

$$\theta = \sin^{-1} \left[ \frac{cd^2\tau - c^3\tau_{12}\tau_{23}\tau}{2d^3 - c^2d(\tau_{12}^2 + \tau_{23}^2)} \right] \quad (2)$$

$$R = \frac{d^2}{c(\tau_{12} - \tau_{23})} - \frac{c(\tau_{12}^2 - \tau_{23}^2)}{2(\tau_{12} - \tau_{23})} \quad (3)$$

式中: $c$  为声波在水中的传播速度; $\tau_{12}, \tau_{23}, \tau_{13}$  分别为声呐阵元 1 与 2、2 与 3、1 与 3 之间的信号传播时延差。

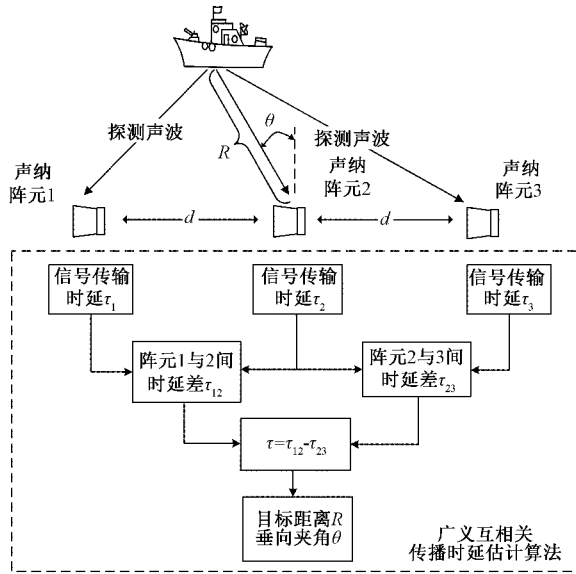


图 4 三元声呐阵列定位原理

由式(2)和(3)可知多元声呐阵列实现声源定位原理的核心是实现声信号时延的解算。一般来说,对目标声源信号传输时延的解算主要是利用广义互相关时延估计算法<sup>[18-21]</sup>。该算法主要是通过比较两信号在时域内的相似程度,实现对两信号传输时延的估计。在三元声呐阵列定位中,相邻两声呐阵元在不同时刻,分别接收到来自同一声源发出的探测信号记为  $s_1(t)$  与  $s_2(t)$ ,如式(4)所示。

$$\begin{cases} s_1(t) = A_1 s(t - \tau_1) + n_1(t) \\ s_2(t) = A_2 s(t - \tau_2) + n_2(t) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $A_1$  和  $A_2$  代表的是声源信号的幅度参量; $n_1(t)$  和  $n_2(t)$  为传播过程中的不相关的噪声干扰。进一步以  $s_1(t)$  为基准,对  $s_2(t)$  进行归一化处理得到式(5):

$$\begin{cases} s_1(t) = s(t) + n_1(t) \\ s_2(t) = \mu s(t - \delta) + n_2(t) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\mu = \frac{A_2}{A_1}, \delta = \tau_2 - \tau_1$  即为声呐阵元间的传播时延差。

由广义互相关函数的定义,可将  $s_1(t)$  与  $s_2(t)$  的互相关函数表述为式(6):

$$(s_1 * s_2) = \int_{-\infty}^{+\infty} s_1(\tau) s_2(t - \tau) d\tau \quad (6)$$

结合上述式(5)则可将互相关函数表述为式(7):

$$(s_1 * s_2) = \mu \cdot R(\tau - \delta) \quad (7)$$

式中: $\tau \in (-\infty, +\infty); R(\tau)$  为声源信号  $s(t)$  的自相关函数。由自相关函数的性质,当  $\tau = \delta$  时,  $R(\tau - \delta)$  取得最大值,即  $(s_1 * s_2)$  取得峰值时对应的时延为相邻两声呐阵元接收到声源信号间的时延差。

假设声源信号发出了调频斜率为  $B = 60$  kHz/s 线性调频连续波,经两相邻声呐阵元接收到后信号表达式如式(8)所示。

$$\begin{cases} s_1(t) = A_1 \sin[2\pi(f_s + Bt)] \\ s_2(t) = A_2 \sin[2\pi(f_s + B(t + \tau))] \end{cases} \quad (8)$$

仿真时假设声呐阵元 1 和 2 接收到的两信号传播时延差  $\tau = 0.0005$  s,根据广义互相关时延估计算法对上述信号进行时延估计处理,可得到两信号相关程度仿真图如图 5 所示。

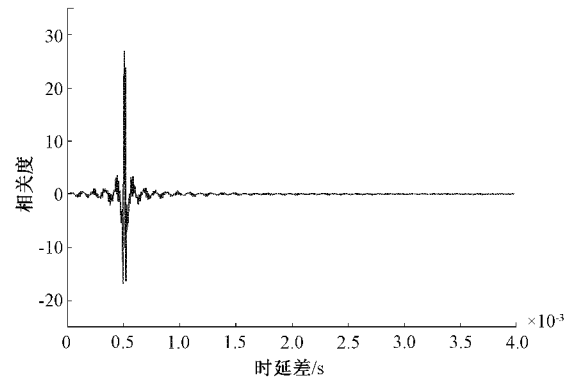


图 5 线性调频连续波广义互相关仿真图

由图 5 可以清晰看出,该图具有明显的相关程度最大值,提取出相关程度最大点处对应的坐标点,得到声呐阵元 1、2 接收信号的传播时延差  $\tau_{12} = 0.000504$  s,这与预设的值十分相符。同理可以求出声呐阵元 2、3 接收信号的传播时延差  $\tau_{23}$ ,进而利用三元声呐阵列法可解算出目标声源至声呐阵元 2 的距离  $R$  以及二者位置连线与垂直方向的夹角  $\theta$ 。由此可见,当线性调频连续波作为探测信号时可以通过广义互相关时延估计算法解算出声源信号位置,这种主动声纳探测方法探测的安全性非常低。

## 3 基于数字延迟和重采样的非线性调频连续波测距研究

针对线性调频连续波测距方法在目标探测时存在的安全隐患,本文提出的基于数字延迟重采样的主动非线性调频连续波测距方法基本原理如图 6 所示。首先由信号发生装置产生非线性调频连续波测量信号,经大型功率放大器

放大后驱动水下超声波换能器产生超声波测量信号。测量信号探测到被测目标后经接收器与原始信号进行混频滤波,然后利用构造的参考信号对混频测量信号进行过零重采样。最后对重构的信号进行频谱分析,提取主频计算出被测距离。

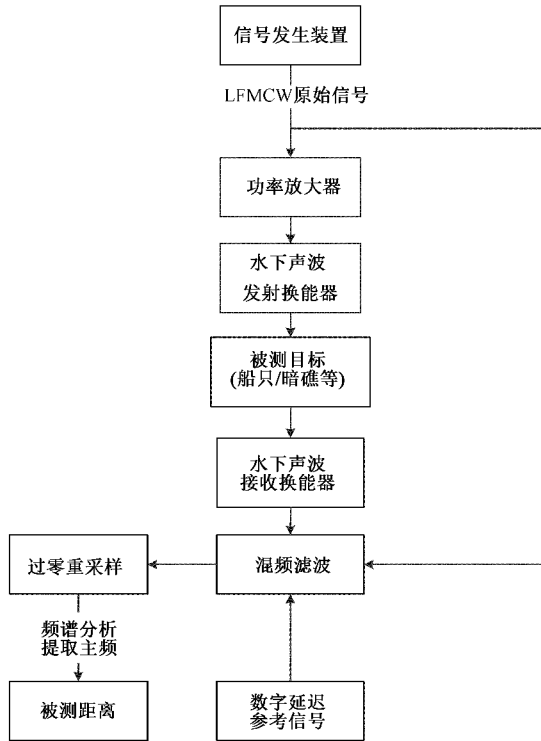


图 6 基于数字延迟重采样测距原理

利用上位机分别构造的非线性调频连续波混频测量信号与数字延迟参考信号如式(9)与(10)所示。

$$S_m = A_m \sin[2\pi(\tau_m B)t + \phi_m] \quad (9)$$

$$S_r = A_r \sin[2\pi(\tau_r B)t + \phi_r] \quad (10)$$

式中： $A_m$  与  $A_r$  分别为测量信号与参考信号的增益系数； $\phi_m$  与  $\phi_r$  为两信号的初相位； $\tau_m$  为测量信号的传播时延； $\tau_r$  为构造的数字时延； $B$  为中的非线性调频斜率。

下面对该方法进行数值仿真研究,假设产生的非线性调频斜率  $B$  的表达式如式(11)所示。

$$B(t) = 2000 \times \sin(3 \times \pi \times t) + 10000 \quad (11)$$

式中： $t$  为调频时间。同时采用积分法拟合非线性调频的平均斜率  $B_{av}$ ,计算公式如式(12)所示。

$$B_{av} = \int_{t_0}^{t_1} B(t)dt \quad (12)$$

取水中传播声速为  $c = 1500 \text{ m/s}$ ,此时  $\tau_m = 0.002 \text{ s}$ 。为满足奈奎斯特采样定律,参考信号的  $\tau_r$  设置为  $0.01 \text{ s}$ ,两路信号的初相位均设置为  $0$ 。因此可得到测量信号与参考信号频域分布如图 7、8 所示。

最后利用参考信号对测量信号进行过零触发重采样,并对重构信号进行时域与频域分析如图 9 与 10 所示。可

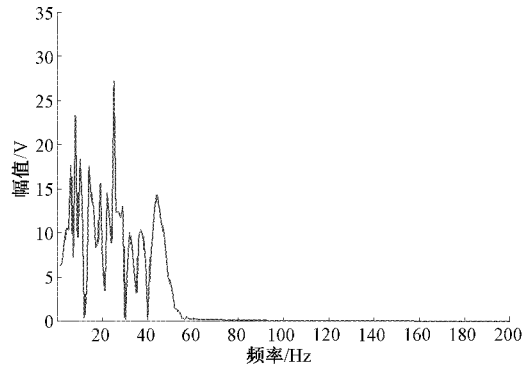


图 7 测量信号频域分布图

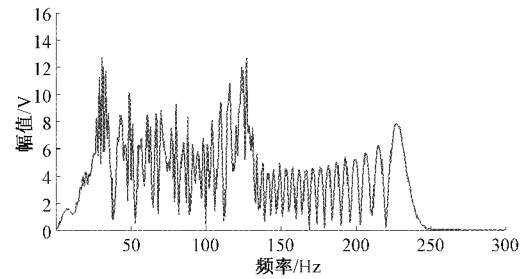


图 8 参考信号频域分布图

以从图中清楚地发现重构后的信号时域分布均匀,频域分布具有明显的主峰,提取出主频  $f = 21.759 \text{ Hz}$ ,进而由式(13)解算得到传播时延,换算被测距离为  $D$ 。

$$D = \tau c = \frac{f}{B_{av}} c \quad (13)$$

式中： $B_{av}$  非线性调频的平均斜率为  $10.424 \text{ kHz/s}$ ,解算出传播时延  $\tau = 0.0020873 \text{ s}$ ,求出被测距离  $D = 3.131 \text{ m}$ 。这与预设的传播时延  $\tau_m$  几乎完全一致,故从仿真上证明了测距原理的正确性。

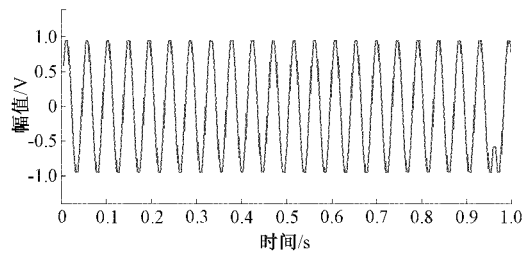


图 9 重采样信号时域分布图

假设声源信号产生如式(9)所示的非线性调频连续波测量信号,预设被声纳阵元 1 与 2 接收到探测信号的时延差  $\tau_{12} = 0.0005 \text{ s}$ ,经广义互相关时延估计算法处理后得到的相关性仿真图如图 11 所示。

从图 11 可以看出非线性调频连续波互相关仿真图虽然具有单峰,但并不十分突出,并且峰值对应的时延差为  $0.000216 \text{ s}$ ,与设定值具有明显的偏差。将进一步求出的时延差代入三元声纳阵列的目标定位公式,求解出的声源信号方位将与信号源实际位置的偏差进一步增大,从而无法准确估计出目标声源位置。



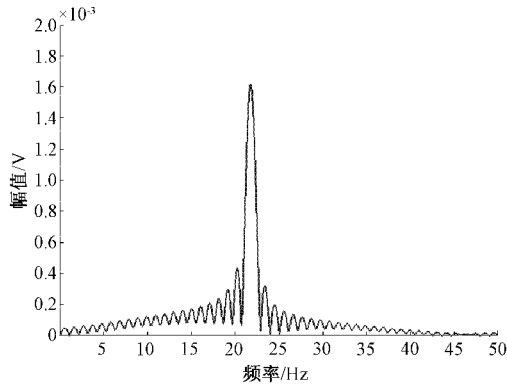


图 10 重采样信号频域分布图

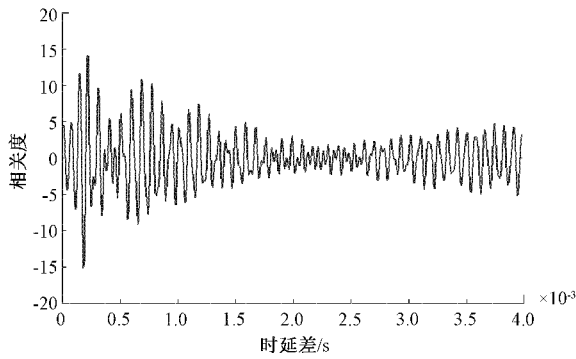


图 11 非线性调频连续波广义互相关仿真图

#### 4 实验研究

##### 4.1 基于重采样的非线性调频连续波测距实验系统方案

为验证主动非线性调频连续波的测量准确性和安全性,搭建了实验测量系统框图与实物图如图 12 与 13 所示。由信号发生器发出非线性调频连续波经功率放大器驱动水下超声波发射器发出探测信号,被水下超声波接收器重新接收后与信号发生器发出的原始调频连续波进行混频滤波。在上位机中根据信号发生器调制的非线性调频连续波的调频斜率,构造一路增加了数字延迟的参考信号对混频滤波后的测量信号进行过零重采样与频谱分析,进而提取出信号主频,换算出被测距离。

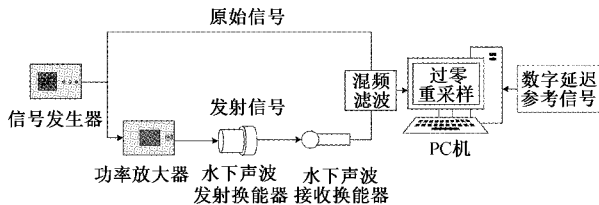


图 12 测量系统原理框图

##### 4.2 实验结果与误差分析

###### 1) 测距安全性分析

为充分证明非线性调频连续波测距的安全性,进行了对比重复仿真验证。用上位机构造形如式(8)所示的调频连续波测量信号,设置非线性调频斜率如式(11)所示,并合

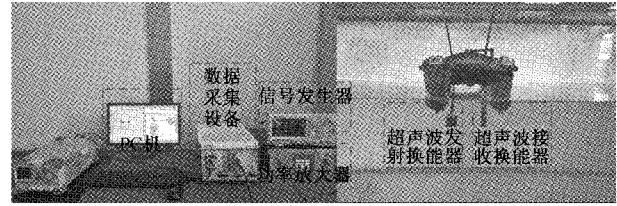


图 13 测量系统实物图

理设置 10 组不同的声纳阵元接收时延差。利用广义互相关时延估计算法对构造的测量信号进行时延差估计,将估算出的时延差与预设的标准时延差进行比较验证,如表 1 所示。

表 1 安全性对比仿真实验结果

广义互相关法 估算时延/s	本文方法估算 时延/s	设计时延/s
0.000 016	0.000 042	0.000 050
0.000 080	0.000 096	0.000 100
0.000 400	0.000 599	0.000 600
0.000 680	0.000 999	0.001 000
0.003 992	0.006 001	0.006 000
0.006 640	0.009 999	0.010 000
0.039 528	0.059 998	0.060 000
0.065 440	0.099 997	0.100 000
0.359 700	0.599 999	0.600 000
0.557 310	0.999 970	1.000 000

从表 1 可以发现,利用广义互相关法对非线性调频连续波估算的时延与实验设计时延有较大的偏差,进而导致距离解算出现错误,即被测目标无法解算出声源的位置,提高了测距的安全性。而利用数字延迟和重采样的方法对非线性调频连续波进行解调,估算时延与设计时延几乎一致,保证了测距的准确度。因此从仿真上证明了主动非线性调频连续波测距具备较好的水下测距安全性。

###### 2) 测距准确性分析

由于实验室条件的限制,无法进行大距离的测量准确度的验证与大量重复性验证实验。故在实验设备的允许条件下,进行了短距离测距实验,并对结果进行了分析。信号发生器产生的调频斜率如式(14)所示的非线性调频连续波测量信号。

$$B = 1.5^{(t+\log_{1.5} 20\ 000)} - 1.5^{\log_{1.5} 20\ 000} \quad (14)$$

对测量信号进行频域分析,得到时频图如图 14 所示。从图中可以看出,测量信号为一个起始频率为 20 kHz,终止频率为 30 kHz 的非线性调频连续波。

将超声波接收器接收到的测量信号与原始信号混频滤波后得到测量混频信号。在上位机根据发出的原始非线性调频信号的数学模型构造另一路增加了数字延迟的参考信号,根据实验测量的距离合理设置参考信号的数字延迟,使参考信号延时大于测量信号延时的 2 倍以上(满足奈奎斯

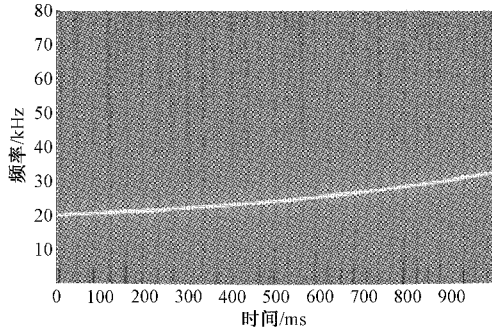


图 14 非线性调频连续波测量信号时频图

特采样定律)。该参考信号也同样与原始信号进行混频、滤波,得到参考采样时钟信号,并利用参考采样时钟信号对混频测量信号进行过零重采样,重构测量信号,并进行频谱分析如图 15 所示。从图中可以清晰地发现测量信号具有明显的主峰,提取出主频,代入式(13)即可计算出被测距离。

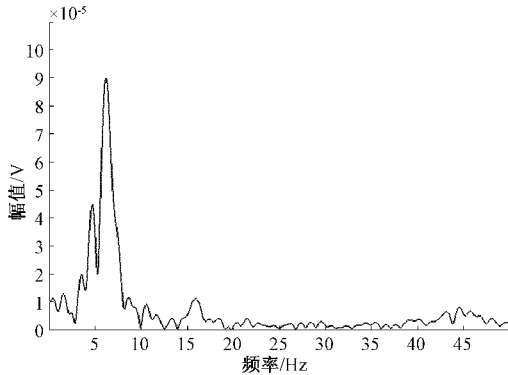


图 15 重采样后重构信号频域图

为了验证系统的测量可重复性,在相同实验室条件下对特定距离(3.500 m)进行了 20 组独立测量实验,重复性验证实验的测量结果如图 16 所示。实验中,利用红外激光测距仪的测量结果作为相对真值,所使用红外激光测距仪的型号为 HILTI PD5,其测量精度为  $\pm 0.001$  m。由图 16 可知,实验所得测量结果的绝对误差始终小于 0.300 m,验证了本文所述方法的测量结果具有较好的测量可重复性。

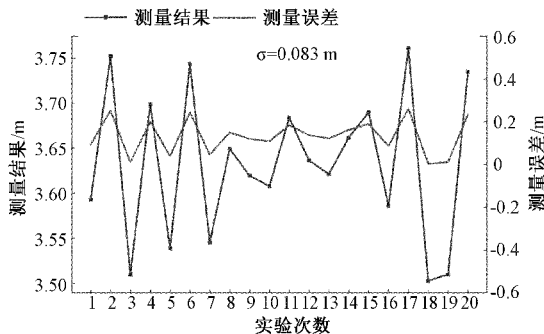


图 16 可重复性验证实验结果

为了进一步证明本文所述方法的准确性,对 6 个不同的距离进行了测量实验。同样以激光测距仪的测量值作为

相对真值,测量结果如表 2 所示。由表 2 可知,本文所述方法和系统的测量结果与激光测距仪测量结果基本吻合,验证了本文方法的准确性。

表 2 准确性验证实验结果

红外激光测距仪 测量结果/m	本文方法测量 结果/m	相对误差/ %
1.002	1.085	8.28
1.506	1.587	5.38
2.012	1.924	-4.37
2.506	2.675	6.74
3.012	2.854	-5.25
3.520	3.798	7.90

实验发现利用上述测量思路解算出的距离与实际距离存在一定的误差,同仿真中距离的准确解算有一定出入。经理论分析,误差来源主要为信号产生与接收时在硬件设备上产生的非线性干扰。上位机可以较为准确地描述主动调频的非线性,重采样后可以较好地消除非线性误差。然而硬件设备的非线性干扰很难在上位机上用数字模型来描述,因此构造的参考信号重采样后几乎无法将这部分的非线性干扰消除,从而使得提取出的重构信号主频与实际值存在一定的偏差,无法得到准确的被测距离。对于远距离目标的测距应用来说,这种因为硬件设备产生的非线性误差是可以忍受的。

## 5 结 论

为解决主动连续波声纳在测距时存在的易被目标声纳阵解调定位的安全性问题,本文提出了基于数字延迟和重采样技术的非线性调频连续波声纳测距方法。该方法由信号发生设备主动发出非线性调频的连续波测量信号,其频率不规则变化,经被测目标后返回,再通过上位机构造的数字延迟参考采样时钟信号对测量信号进行重采样,提取出信号主频,求出被测距离。

本文针对常用的三元声纳阵列目标定位原理对非线性连续波声纳测距的可重复性,准确性和安全性进行了实验和仿真验证。结果表明本文所述方法相对误差始终优于 8.5%,在特定距离(3.500 m)的标准差为 0.083 m,探测信号标准差经广义互相关时延估计算法处理后无法得出准确的声源位置,相较于线性调频连续波声纳测距,本文提出的方法不易被目标声纳阵解算出相邻阵元间的时延差,提高了测距的安全性,这为海洋中声纳的隐蔽探测提供了一种可行的思路。

本文内容主要侧重于非线性调频连续波测距可行性与安全性的原理验证,但对该方法测距的稳定性以及文中提及的硬件设备引起的无关非线性干扰问题并未展开深入的研究,还需在今后研究中进一步的深入探讨。

## 参考文献

- [1] JEONG S, BAN S W, CHOI S, et al. Surface ship-wake detection using active sonar and one-class support vector machine [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2012, 27(3):456-465.
- [2] 马深. 依赖多波束合成孔径侧扫声纳图像的海底障碍物研究[J]. 电子测量技术, 2020, 43(5):102-106.
- [3] MUNAFO A, CANEPA G, LEPAGE K D. Continuous active sonars for littoral undersea surveillance[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2018, 44(4): 1198-1212.
- [4] LEE D H, SHIN J W, DO D W, et al. Robust LFM target detection in wideband sonar systems[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2017, 53(5): 2399-2412.
- [5] 刘大利. 连续波主动声呐探测性能分析[C]. 中国声学学会, 2018, 37(6):2-3.
- [6] 刘大利, 刘云涛, 蔡惠智. 水下连续波有源探测的回波检测算法[J]. 声学学报, 2014, 39(2):163-169.
- [7] MURPHY S M, HINES P C. Sub-band processing of continuous active sonar signals in shallow water[C]. OCEANS 2015-Genova, IEEE, 2015: 1-4.
- [8] BATES J R, GRIMMETT D, CANEPA G, et al. Towards Doppler estimation and false alarm rejection for continuous active sonar[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2018, 143(3):1972-1972.
- [9] 屈奎, 张荣福, 肖鹏程. 基于调频连续波雷达的物体运动状态实时检测算法研究[J/OL]. 物理学报, 2021: 1-20[2021-07-01].
- [10] 于卫东, 涂亚庆, 詹启东, 等. 基于改进 Rife 算法的 LFMCW 雷达测距方法及实现[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(4):550-557.
- [11] 王斯盾, 涂亚庆, 牟泽龙, 等. LFMCW 雷达的差频信号采集系统设计[J]. 传感器与微系统, 2017, 36(7): 93-95, 99.
- [12] KIM B S, JIN Y, LEE J, et al. High-efficiency super-resolution FMCW radar algorithm based on FFT estimation[J]. Sensors, 2021, DOI:10.3390/s21124018.
- [13] 张传义, 米常伟. 基于 TDE 技术的声源定位算法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2014, 35(3): 333-336, 369.
- [14] 张伟, 董阳泽, 张刚强, 等. 一种基于广义互相关的水声直扩信号检测方法[J]. 声学技术, 2021, 40(1): 44-48.
- [15] 唐浩洋, 陈子为, 黄维. 基于麦克风阵列的 GCC 时延估计算法分析[J]. 计算机系统应用, 2019, 28(12): 140-145.
- [16] 向博, 钟典儒, 张学军, 等. 基于最小均方的自适应滤波时差估计研究[J]. 成都大学学报(自然科学版), 2020, 39(2):170-175.
- [17] 张烈山, 刘璞, 林杰俊, 等. 基于重采样的主动非线性调频连续波声呐测距技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(10):74-82.
- [18] 唐小明, 吴昊, 刘志坤. 基于广义互相关算法的时延估计研究[J]. 电声技术, 2009, 33(8):71-74.
- [19] 李保伟, 张兴敢. 基于广义互相关改进的麦克风阵列声源定位方法[J]. 南京大学学报(自然科学), 2020, 56(6):917-922.
- [20] 刘浩, 谭亮, 程晶晶. 一种基于物联网技术的管道漏失检测电路设计[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(5): 94-98.
- [21] 帅海峰, 朱诗兵, 李长青. 三星干扰源定位 TDOA 参数估计算法研究综述[J]. 电子测量技术, 2019, 42(22): 91-97.

## 作者简介

钟晨, 本科在读, 主要研究方向为声纳测距技术。

E-mail: breakfast759@163.com

张烈山(通信作者), 讲师, 硕士, 工学博士, 主要研究方向为水声测量技术、机器视觉测量技术等。

E-mail: zhangoptoacoustic@163.com