

鱼雷电磁引信的水中目标高精度实时识别方法

陈彬强¹, 吕舒², 姚斌¹, 张周锁², 白志科³

(1. 厦门大学 物理与机电工程学院, 福建 厦门 361005; 2. 西安交通大学, 陕西 西安 710049;

3. 中国船舶重工集团公司 第705研究所, 陕西 西安 710075)

摘要: 鱼雷武器系统的主动电磁引信回波信号中蕴含着雷目交会过程重要特征信息。针对回波信号能量比较法受到直达场耦合成分和噪声影响的问题, 提出了基于数字信号处理技术的目标特征提取算法。对接收天线的回波信号进行全相位二次补偿处理; 采用短时傅里叶变换对目标回波信号进行包络解调; 再利用改进的三次多项式最小二乘拟合方法, 以抑制数据波动影响并提高计算效率; 提出一种基于钟型脉冲的参数识别算法对回波包络极大值点进行估计。仿真和试验数据验证表明所提出方法具有一定的工程实用性。

关键词: 兵器科学与技术; 短时傅里叶变换; 多项式; 最小二乘拟合; 包络解调

中图分类号: TJ431.7 文献标志码: A 文章编号: 1000-1093(2015)01-0122-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2015.01.018

Study of Underwater Target Recognition for Torpedo Electromagnetic Fuse with High Detecting Precision

CHEN Bin-qiang¹, LYU Shu², YAO Bin¹, ZHANG Zhou-suo², BAI Zhi-ke³

(1. School of Physics and Mechanical & Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China;

2. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China;

3. The 705 Research Institute, China Shipbuilding Industry Corporation, Xi'an 710075, Shaanxi, China)

Abstract: Characteristic information is hidden in the received signal of active torpedo electromagnetic fuse. The conventional burst controlling strategies based on energy-comparison are affected by ambient and electromechanical noises. The improved algorithms based on digital signal processing techniques are proposed. The received signals are first processed by all-phase compensation method to eliminate the direct coupling component, and then the residual signal is demodulated using STFT. An improved polynomial least mean square approximation method, which reduces the computation time, is presented for eliminating the side-effects brought by noise. A parametric estimation model base on bell-shape impulse is used to estimate the maximum of echo envelope. Simulation and trial data show that the proposed algorithm is effective and practical.

Key words: ordnance science and technology; short-time Fourier transform; polynomial; least mean square approximation; envelope demodulation

收稿日期: 2014-03-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51275384, 51275382); 国家科技重大专项(2010ZX04014-016)

作者简介: 陈彬强(1986—), 男, 讲师。E-mail: shangfengzi@126.com;

姚斌(1963—), 男, 教授, 博士生导师。E-mail: yaobin@xmu.edu.cn

0 引言

战斗部是鱼雷武器系统的重要组成部分,其制导和精确打击是重要的研究内容^[1]。战斗部的作战效用除了受弹药属性影响外,还与鱼雷与目标之间的位置有关。在采用主动电磁引信的鱼雷武器系统中,引信系统的发射天线向海水辐射电磁波,通过检测回波信号的变化发现目标^[2]。固定时延法从引信系统判断雷目交会起经历一个固定时间延迟输出起爆信号,无法保证战斗部在雷目相距最近处起爆。能量比较法通过比较雷目交会目标回波中工频信号能量的强度变化触发战斗部,但容易受工作环境和鱼雷自身机电噪声的影响。为了确保引信的可靠动作,需要对鱼雷电磁引信目标信号中包含的目标特征信息(包括载波信号的频率、相位以及调制包络信号的幅度、时间变化率和持续时间等)进行识别和提取^[3]。

能量比较法的核心是寻找合理的解调算子对以准确提取鱼雷过靶过程中工频信号的包络解调曲线,并使该曲线尽可能光滑单调以如实反映雷目交会的过程^[4]。除过靶包络曲线特征的理论建模和距离测量理论方法的研究外^[5-6],针对实际鱼雷武器战斗系统,学者们尝试利用数字信号处理方法对强噪声背景线下的包络曲线进行特征增强。康丽艳等采用频谱分析技术减小回波曲线的包络解调计算量^[7];倪辉等构建了全数字信号处理(DSP)化引信处理平台^[8];小波变换是暂态信号处理强大工具^[9],陈光等将其应用于雷目交会曲线的特征信息进行了提取^[10]。

本文目的在于提出效果可靠、计算效率高,并且可以运用于实际鱼雷武器系统的电磁引信水中目标识别算法。该算法针对能量比较法进行改进,采用短时傅里叶变换(STFT)对回波信号进行包络解调;利用改进的多项式最小二乘拟合算法从背景噪声中提取光滑的回波包络曲线;再通过钟型脉冲参数识别法对包络曲线极大值点进行估计。所提出方法能够在包络检波的同时对雷目位置信息进行自适应判断。

1 背景

理想情况下,鱼雷通过目标时在接收天线中得到受钟型脉冲调幅的信号。雷目相距最近时回

波中工频成分能量最强,是起爆战斗部的最佳时机。对回波信号进行包络解调后包络解调曲线中幅值变化率为0(回波包络曲线顶点)时刻为最佳起爆时刻。该策略又被称为能量比较法,过程如图1所示。

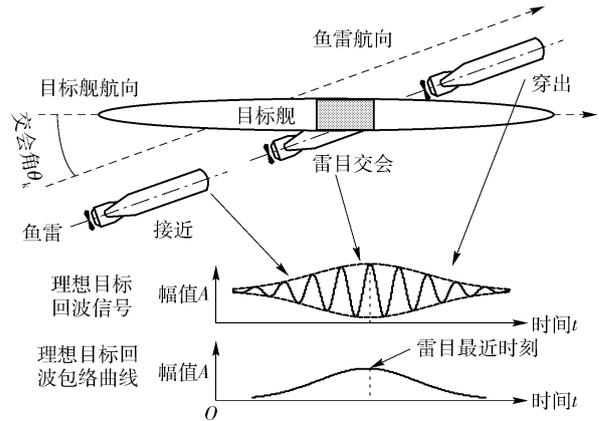


图1 雷目交会示意图

Fig. 1 Schematic diagram of torpedo-target intersection

实航中雷目交会的回波特征提取在受到两个因素的干扰:一是接收天线与发射天线之间的直达场耦合成分的干扰;二是环境噪声的干扰。因此接收的回波信号包络曲线“起伏不平”,无法直接求得曲线变化率,如图2所示。基于以上的需求,鱼雷引信接收机接收天线电磁回波的处理流程,如图3所示。

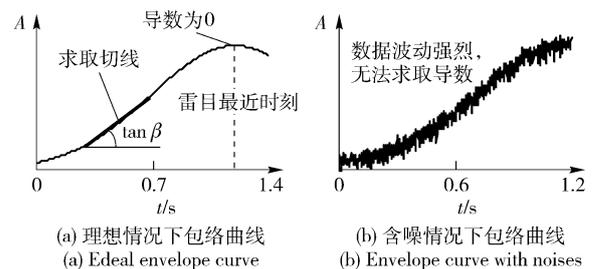


图2 受噪声影响的回波包络曲线

Fig. 2 Demodulation curve affected by noises

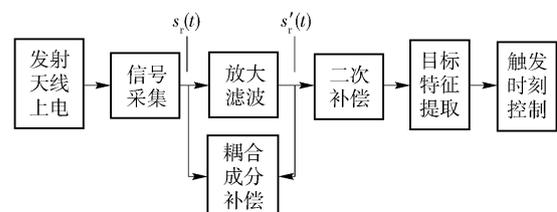


图3 鱼雷主动电磁引信检波工作流程

Fig. 3 Working flow chart of active electromagnetic fuse

2 残余直达场耦合信号补偿算法

令发射天线的工作频率为 f_c , 引信接收机记录了接收天线信号 $s_r(t)$ 经过初步补偿的结果 $s_r'(t)$ 和发射天线的基准信号 $s_{ref}(t)$. $s_r'(t)$ 可以被表示为

$$s_r'(t) = s_c(t) + r(t), \quad (1)$$

式中: $s_c(t)$ 表示残余的耦合场成分, 它与 $s_{ref}(t)$ 具有相同的频率, 但在幅值和相位上存在着差异; 残余信号 $r(t)$ 表示真实接收成分, 含有航行环境背景噪声. 文献 [11] 提出了在信号采样前直接对直达场耦合成分进行补偿的方法. 但在实航测试中发现残余的直达场耦合经过放大滤波后也同时增大, 对雷目交会阶段的回波特征判断产生不可忽略影响. 本文提出了改进的算法, 对放大滤波后的信号进行二次数字补偿, 进一步增强鱼雷过靶的回波特征.

2.1 基于 Hanning 窗的天线工频高精度检测算法

实航中发射天线的工作频率真实值 f_c' 与理论值 f_c 不可避免存在偏差, 严重影响耦合成分补偿效果和目标特征提取精度, 因此采用 Hanning 窗频谱校正方法对工频谱线进行校正. 离散化的 Hanning 窗函数的频域表达式为

$$w(n) = \frac{1}{2} [1 - \cos(2\pi n/N)], \quad (2)$$

式中: N 为 Hanning 窗长度; $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$. 令归一化频率 f_L^1 表示 Hanning 窗频谱函数主瓣区域中距离天线实际工作频率左侧最接近的谱线. 对长度为 N 的数字信号 $x(n)$, 加窗后 STFT 谱系数为

$$R_k = 2 \sum_{n=0}^{N-1} [x(n) w(n) \cos(2\pi kn/N) / N],$$

$$I_k = 2 \sum_{n=0}^{N-1} [x(n) w(n) \sin(2\pi kn/N) / N], \quad (3)$$

式中: k 为谱线索引. 则该谱线的幅值 $A_k = \sqrt{R_k^2 + I_k^2}$, 其归一化的频率校正量可以表示为

$$\Delta f^1 = \frac{A_{f_L^1} - 2A_{f_L^1+1}}{A_{f_L^1} + A_{f_L^1+1}} f, \quad (4)$$

式中: $f_L^1 = f_L / N$ 表示 $k = f_L$ 的归一化索引. 则对信号进行非整周期采样时, 引信接收机工作频率谱线的频率、相位和幅值的校正公式分别为

$$f_c' = (f_L^1 - \Delta f^1) \cdot f_s / N,$$

$$A_c' = \frac{2\pi \Delta f^1}{\sin(\pi \Delta f^1)} A_{f_L^1},$$

$$\varphi_c' = \arctan(I_{f_L^1} / R_{f_L^1}) + \pi \Delta f^1, \quad (5)$$

式中: f_s 为数字采样频率.

2.2 全相位补偿信号的高速生成算法

直达场耦合成分抑制可以采用数字延迟移相, 鉴相精度为 $\theta = 360^\circ \cdot f_c / f_s$. 为提高相位补偿精度, 须提高数字采样频率 f_s , 对硬件系统存储和处理造成巨大负担. 本节提出高效的简谐函数插值法即“复解析信号移相法”, 可以在不提高采样频率(频率分辨率)的前提下获取全相位补偿信号. 设 $X(n)$ 为基准信号的采样序列, $M(n)$ 为耦合信号的瞬时幅值,

$$\begin{cases} X(n) = M(n) \cos(2\pi f_c t_n), \\ X(n-1) = M(n-1) \cos(2\pi f_c t_n - \theta). \end{cases} \quad (6)$$

全相位补偿信号的高速生成算法如下:

1) 对基准信号进行采样, 采用矩形加窗频谱校正法对工频 f_s 进行校正.

2) 生成基准信号 $X(n)$ 对应的复解析信号 $Z(n) = R(n) + j \cdot I(n)$, 其中实部 $R(n) = X(n)$, 虚部和实部之间通过一个 Hilbert 变换对进行联系:

$$I = \text{Hilbert}\{R\}. \quad (7)$$

对于两个相邻的采样数据点, 可以合理地进行假设 $M(n) \approx M(n-1)$, 则对应的复解析信号 $Z(n)$ 可用通过矩阵形式表示为

$$\begin{bmatrix} R(n) \\ I(n) \end{bmatrix} = M(n) \begin{bmatrix} \cos(2\pi f_c t_n) \\ \sin(2\pi f_c t_n) \end{bmatrix} =$$

$$M(n) \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\cot \theta & \csc \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(2\pi f_c t_n) \\ \cos(2\pi f_c t_n - \theta) \end{bmatrix} \approx$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\cot \theta & \csc \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M(n) \cdot \cos(2\pi f_c t_n) \\ M(n) \cdot \cos(2\pi f_c t_n - \theta) \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\cot \theta & \csc \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X(n) \\ X(n-1) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中: 相位分辨率 $\theta = 360^\circ \cdot f_c / f_s$. 通过 (8) 式, 由基准信号生成了对应的一组复解析信号.

3) 对生成的复信号进行相位为 φ 的复相移后的补偿信号表示为

$$X\left(n + \frac{\varphi}{\theta}\right) = \text{Shift}_\varphi [Z(n)] =$$

$$\begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R[n] \\ I[n] \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中: Shift_φ 为对复信号进行相移的算子; $0^\circ < \varphi < \theta$. 将 (8) 式代入到 (9) 式可以得到最终的差值求公式:

$$X\left(n + \frac{\varphi}{\theta}\right) = \begin{bmatrix} \cos \varphi - \sin \varphi \cot \theta \\ -\sin \varphi \csc \theta \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} X[n] \\ X[n-1] \end{bmatrix}. \quad (10)$$

在补偿信号生成时, φ 和 θ 是已知的, (10) 式中的 $\cos \varphi$ 、 $\sin \varphi$ 、 $\tan \theta$ 和 $\sec \theta$ 是事先确定的常数, 只需要两次浮点数乘法和一次浮点数加法就可以得到补偿信号序列, 计算复杂度与线性插值法相同。由于 θ 的数值较小, 因此 θ 的误差对 $\cot \theta$ 和 $\csc \theta$ 的数值影响很大。

2.3 直达场耦合信号二次补偿的全相位补偿方法

在生成补偿信号之前, 首先要对采集的长度同为 N 的初步补偿后的信号 $s_r'(n)$ 和基准信号 $s_{ref}(n)$ 中工频成分的相位和幅值进行校正。令 $s_r'(n)$ 和 $s_{ref}(n)$ 的幅值和初始相位分别为 A_r 、 φ_r 和 A_{ref} 、 φ_{ref} 。通过带余除法将两信号的相位差 φ_{ref} 表示为

$$\varphi_r - \varphi_{ref} = \left\lfloor \frac{\varphi_r - \varphi_{ref}}{\theta} \right\rfloor \theta + \varphi_{ref}, \quad (11)$$

式中: 算子 $\lfloor x \rfloor$ 表示不大于变量 x 的最大整数。令 $q_{r-ref} = \lfloor (\varphi_r - \varphi_{ref}) / \theta \rfloor$, 在补偿信号生成过程中对相位补偿进行两步操作:

步骤 1 对 $s_{ref}(n)$ 进行 $q = q_{r-ref} + 1$ 点的平移得到简单移位信号 $s_{ref}(n - q)$;

步骤 2 对 $s_{ref}(n - q_{r-ref})$ 按照 (11) 式进行相位为 $\varphi'_{res} = \theta - \varphi_{res}$ 的微调。

最终的二次补偿信号 $s_{can}[n]$ 可以表示为

$$s_{can}(n) = \frac{A_r}{A_{ref}} \begin{bmatrix} \cos \varphi'_{res} - \sin \varphi'_{res} \cot \theta \\ -\sin \varphi'_{res} \csc \theta \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} X(n - q) \\ X(n - q_{r-ref}) \end{bmatrix}. \quad (12)$$

3 包络解调算法

信号的 STFT 表达式为 $\text{STFT}_x(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot h^*(t - \tau) e^{-j2\pi ft} dt$, STFT 对回波信号 $x(t)$ 分析的时频特性取决于窗函数 $h(t)$ 的时频特性。为分析回波信号中工频能量的强度随时间变化的关系, 采用宽度较短的矩形窗。设天线的工作频率为 f_c , 则其周期为 $1/f_c = T_c$, 单个时窗内数据长度为 $M = f_s/f_c$ 。

令矩形窗 $h(t)$ 时间宽度为 T_c , 计算工频 f_c 上的幅值信息, 可以得到回波信号的包络解调曲线。第 n 个时间窗内数据包络解调 $Ampl(n)$ 的计算如 (13) 式所示。回波数据解调过程如图 4 所示, 每隔 $0.5T_c$ 计算一次回波包络幅值 $Ampl(n)$ 。 $h(t)$ 的滑动步距为自身宽度 $1/2$ 。

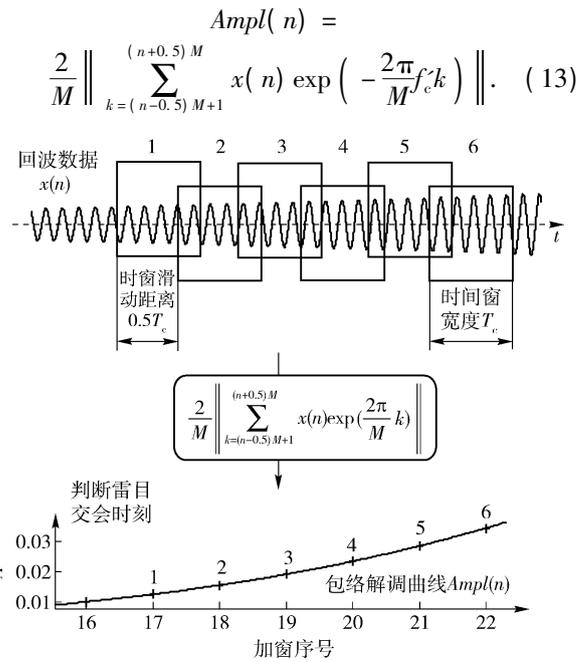


图 4 采用 STFT 对目标回波进行包络解调

Fig. 4 Demodulation of the received signal by STFT

4 目标识别和炸点控制策略

鱼雷的工作环境和自身机电噪声干扰使包络解调曲线出现严重的不规则“跳动”。本文提出一种改进的三次多项式最小二乘拟合的技术, 能有效抑制这一现象, 保证了拟合曲线的光滑性和单调性。

4.1 多项式最小二乘拟合原理

对于一个时间序列 $y = \{y(0), \dots, y(N)\}$ 进行最小二乘拟合的过程是采用 $\varphi_i(n) (i = 0, \dots, m - 1)$ 对序列进行逼近, 得到逼近函数 $p_n(x) : p_n(x) = \sum_{i=0}^{m-1} c_i \varphi_i(x)$, 选择合适的 $c_i (i = 0, \dots, m - 1)$ 使逼近函数产生的序列 $P(n) = \{p(1), \dots, p(N)\}$ 与 $Y(n)$ 的误差的均方和误差最小, 即 $\min_{n \in \{1, \dots, N\}} \|P - Y\| = \min \left\{ \sum_{i=1}^N \left[\left(\sum_{j=0}^{m-1} c_j \varphi_j(n) - y(n) \right)^2 \right] \right\}$ 。

当选用 $0 \sim 3$ 次单项式 $\varphi_i(x) = x^i (i = 0, \dots, 3)$ 作为基函数时, 最小均方误差意义下的最优解 \hat{C} 的求解转换为一个常系数线性方程组的计算:

$$G^T G \hat{C} = G^T y, \quad (14)$$

式中: $G(k) = [G_1(k) \ G_2(k) \ G_3(k) \ G_4(k)]$, 为一个 $N \times 4$ 的系数矩阵, $G_i(k) = [1^{i-1} \ 2^{i-1} \ \dots \ k^{i-1}]$, $i = 1 \ 2 \ 3 \ 4$; $\hat{C} = [c_0 \ c_1 \ c_2 \ c_3]^T$ 为多项式系数。

由于 (14) 式的计算量庞大。引信接收机每隔

半个工频周期就返回一个新的包络解调数据点,如果每次都要重新计算(14)式中两个矩阵 $G^T G$ 和 $G^T y$ 中的各个系数则无法保证计算的实时性要求。本文提出了一种改进的拟合算法,利用新数据对原有的计算结果进行更新。对已有的数据点序列 $Y(k) = \{y(1), \dots, y(k)\}$ 进行三次多项式拟合。改写(14)式为如下形式: $A(k)C(k) = G^T(k)Y(k)$ 式中: $Y(k) = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_k]^T$, 为长度为 k 的包络解调序列。

又令 $A(k) = G^T(k)G(k)$ $B(k) = G^T(k)y(k)$ 。当新包络解调数据 $y(k+1)$ 到来时,序列 $Y(k)$ 更新为 $Y(k+1) = \{y(1), \dots, y(k), y(k+1)\}$ 。其他重要的参量 $A(k+1)$ 与 $B(k+1)$ 可由 $A(k)$ 与 $B(k)$ 更新而来。 $A(k+1)_{ij} = A(k)_{ij} + (k+1)^{i+j} \delta_{ij}$, $i, j = 0, 1, 2, 3$; $B(k+1)_i = B(k)_i + y_{k+1}(k+1)^i$, $i = 0, 1, 2, 3$ 。

新包络解调数据到来时,曲线拟合的计算归结为求解如下 4 阶线性方程组: $A(k+1)C(k+1) = G^T(k+1)Y(k+1)$ 。

所提出的改进算法避免了数据更新过程中的大量重复计算。每次更新所需的浮点数乘法不到 100 次,高性能 DSP 处理器可确保在两个回波包络点返回间隔完成计算。随着实航过程中回波数据的更新,该算法对原有计算结果进行迭代,实时更新拟合结果,防止了滤波相位延迟、边界效应等缺点。

图 5 为鱼雷过靶过程的一段回波信号。采用 STFT 对信号进行包络解调结果中出现了强烈的数据跳动,采用本文提出的改进三次多项式最小二乘拟合结果后消除了数据的波动。

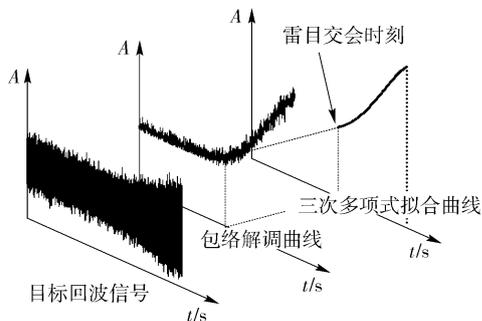


图 5 三次多项式拟合包络解调曲线示意图

Fig. 5 Polynomial approximation of demodulation curve

4.2 基于钟型脉冲模型的参数模型识别法

钟型脉冲参数法由陈泽茂等^[5]提出,用于目标尺度识别,本文将之应用于包络极大值点估计。鱼

雷通过目标时回波是一个工频谐波受钟型脉冲 $f(t)$ 调幅的信号 $H_{zp}(t)$ 。 $H_{zp}(t) = f(t) \cos(2\pi f_c t) = H_{zm} e^{-\alpha(t-t_{axis})^2} \cos(2\pi f_c t)$, 衰减指数 $\alpha = \frac{0.36 \sin^2 \theta_k v_{TK}^2}{B_K^2 + (1 + 0.063h)}$ 式中: H_{zm} 是接收效应曲线 $f(t)$ 的最大值; B_K 是目标舰等效宽度; v_{TK} 是雷目相对速度; θ_k 是雷目交会角; f_c 为天线工作频率; α 为衰减指数。

钟型脉冲 $f(t) = H_{zm} e^{-\alpha(t-t_{axis})^2}$ 中有 3 个参数待定: H_{zm} 、 α 和 t_{axis} 。可将该模型的表达式表示为 $\ln[f(t)] = \ln(H_{zm}) - \alpha(t - t_{axis})^2$ 。

在由 4.1 节中得到的多项式拟合曲线上取相距较远的三点 $(t_i, f(t_i))$ ($i = 0, 1, 2$), 如图 6 所示, 其中 t_0 是包络起始点, t_2 是获得最新数据点时刻, t_1 是介于 t_0 和 t_2 间的任一时刻。则有

$$\ln[f(t_0)] = \ln(H_{zm}) - \alpha(t_0 - t_{axis})^2, \quad (15)$$

$$\ln[f(t_1)] = \ln(H_{zm}) - \alpha(t_1 - t_{axis})^2, \quad (16)$$

$$\ln[f(t_2)] = \ln(H_{zm}) - \alpha(t_2 - t_{axis})^2. \quad (17)$$

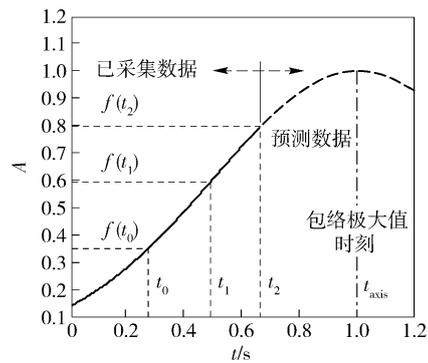


图 6 钟型脉冲参数估计法

Fig. 6 Parameterized bell-impulse estimation model

(16) 式 - (15) 式、(17) 式 - (15) 式分别可得

$$\ln \left[\frac{f(t_i)}{f(t_0)} \right] = \alpha(t_0 + t_1 - 2t_{axis})(t_0 - t_1), \quad i = 1, 2. \quad \text{定}$$

义参数 q_1 和 q_2 分别为 $q_i = \ln \left[\frac{f(t_i)}{f(t_0)} \right] \frac{1}{t_0 - t_i}$, $i = 1, 2$ 。

经过代数推导, 衰减指数 α 和包络极大值点出

现时刻 t_{axis} 为 $\alpha = \frac{q_2 - q_1}{t_2 - t_1}$, $t_{axis} = \frac{1}{2} \left\{ t_1 + t_2 + \ln \left[\frac{f(t_2)}{f(t_1)} \right] \frac{1}{\alpha(t_2 - t_1)} \right\}$ 。同时可知, 当 $\frac{f(t_s)}{H_{zm}} = \lambda$ 时, t_s 可由下式求得

$$t_s = t_{axis} - \sqrt{\frac{-\ln\lambda}{\alpha}} \quad (18)$$

4.3 改进包络极大值估计算法

仿真和实测数据试验表明 4.2 节中 t_0 的选取对包络极值估计精度具有很大影响。当 $f(t_0) \approx 0.25H_{zm}$ 时包络极值点估计结果较好,但包络解调中 H_{zm} 未知。可通过钟型脉冲模型参量识别法在包络解调的同时对 H_{zm} 进行估计。

改进的包络极大值点估计算法流程(见图 7)如下:

- 1) 确定鱼雷正在接近目标舰后,立即开始对回波数据进行包络解调,与此同时采用三次多项式对包络曲线进行拟合并估计极大值点时刻。当极值估计值逐渐收敛时,采用钟型脉冲参数估计法粗略估计本次鱼雷发射钟型脉冲的数学表达式 $f(t)$ 。
- 2) 由 (18) 式计算回波包络值为 $0.25H_{zm}$ 的时刻,将该时刻设为最优修正包络起始时刻 N_s 。
- 3) 以 N_s 作为多项式拟合的起始点,对回波包络数据重新进行拟合,再利用钟型脉冲参数估计法对极大值做出最终的估计。

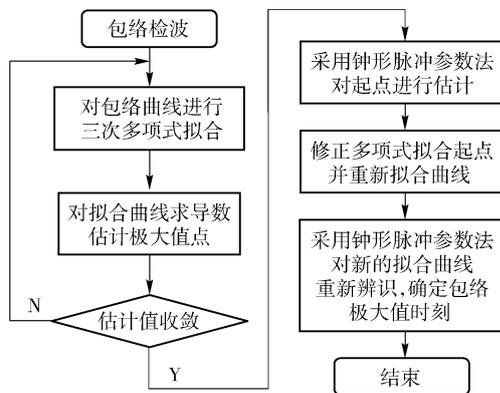


图 7 改进包络极大值点估计算法流程图

Fig.7 Flow chart of envelop maximum estimation algorithm

5 仿真和试验数据验证

5.1 仿真数据验证

参照文献 [10] 中给出的典型鱼雷过靶参数,经过计算得 $\alpha = 8.75$ 。令 $H_{zm} = 1$, 仿真信号为 $H(t) = e^{-8.75(t-t_{axis})^2} \cos(2\pi f_c t) + 0.3N(0, 1)$, 其中 $N(0, 1)$ 代表均值为 0、方差为 1 的高斯白噪声。选取虚构工作频率 $f_c = 1000$ Hz, 仿真信号采样频率为 16 kHz。理论雷目最近点在 $N = 2000$ 点所在时刻。采用本文的极大值估计算法对 5 组不同含噪信号进

行分析,估计结果和误差如表 1 所示。

表 1 典型参数下本文算法的估计值和误差

Tab.1 Estimated results and errors for typical parameters

参数	估计次数				
	1	2	3	4	5
估计值	2 004	2 028	2 016	2 004	1 996
误差/ms	1	7	4	1	1

改变衰减系数 α 的数值分别为 2、4 和 6, 仿真信号包络极大值估计结果与误差如表 2 所示。可知当衰减指数 $\alpha \in [2, 6]$, 包络曲线极大值点估计值与理论值的误差处于 ± 15 ms 之内。因此本文提出算法对钟型脉冲形状变化具有鲁棒性。典型的处理过程如图 8 所示。

表 2 不同衰减指数 α 的估计误差

Table 2 Estimated results with different values of α ms

估计次数	$\alpha = 2$	$\alpha = 4$	$\alpha = 6$
1	3	1	5
2	3	1	9
3	8	2	4
4	12	1	5
5	3	3	1

5.2 实测数据验证

鱼雷实航中噪声成分复杂多样。图 9 为鱼雷通过目标回波信号的时域波形,单位 $T_c = 1/f_c$ 为工频周期。回波信号中存在强大噪声,淹没了特征信息。另外可以观察到实测信号中仍有较强的直达场耦合成分残余。

对该信号进行数字域的二次补偿后进行 STFT 包络解调处理后结果如图 10(a) 所示;采用改进的三次多项式最小二乘拟合技术对上升阶段的一部分包络数据进行拟合,并采用拟合数据进行钟型脉冲辨识,结果如图 10(b) 所示,得到了试验信号的包络解调起始点修正结果。

采用本文 4.3 节中提出的算法对有效信号包络极大值点进行估计,结果如图 10(c) 所示,信号包络的极大值点估计值为 $317T_c$ 所在时刻。为了计算估计误差,将对原信号全部包络解调数据进行三次多项式拟合后的极大值点计算值作为雷目交会最近点的理论值,为 $327T_c$, 则包络极大值的估计误差为 $10T_c$, 估计误差很小。

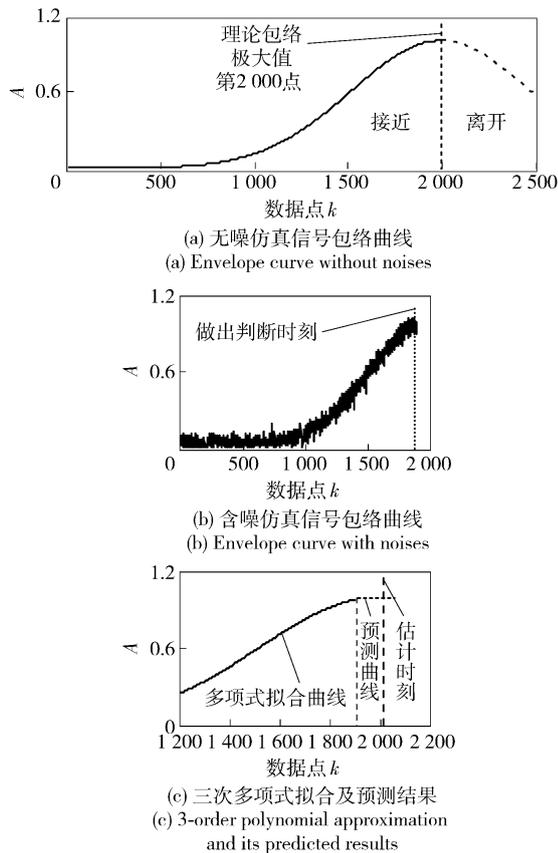


图 8 仿真信号包络解调结果

Fig. 8 Demodulation results of simulated signal

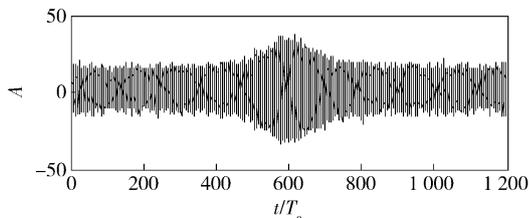


图 9 实测数据信号波形

Fig. 9 Waveform of measured data

6 结论

提出了基于数字信号处理方法的鱼雷电磁引信回波特征识别算法。对接受天线中的直达场耦合成分和噪声成分进行了有效的抑制。采用模拟信号域和数字信号域两次补偿抵消。特别是通过引入给予 Hanning 窗的频谱校正算法对初步补偿信号与基准信号参数差异进行了精确识别；提出解析信号移相法对残余直达场耦合成分进行了全相位补偿，减小了对后续特征提取环节的影响。采用 STFT 对目标回波信号进行包络解调。基于

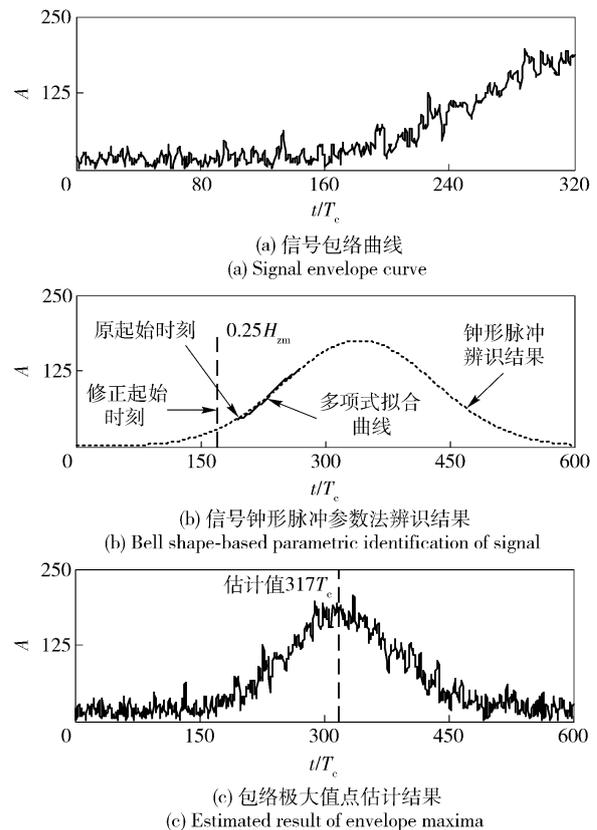


图 10 实测数据处理结果

Fig. 10 Processing results of measured data

改进的三次多项式拟合曲线技术对包络解调曲线进行最小二乘逼近，消除了数据跳动的不利影响；结合钟型脉冲参数估计法，提出了一种包络极大值时刻估计算法，该算法能根据航具体情况估计出雷目交会曲线的形状和包络解调极大值点所在时刻。采用仿真数据和试验数据验证了算法的有效性和一定的工程实用性。

参考文献 (References)

- [1] 沈哲, 肖素娟, 南长江, 等. 鱼雷战斗部与引信技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
SHEN Zhe, XIAO Su-juan, NAN Chang-jiang, et al. Technology on torpedo warhead and fuse [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009. (in Chinese)
- [2] 王玮, 朱健. 一种电磁引信收发天线组合配置方式 [J]. 鱼雷技术, 2013, 21(6): 422-424.
WANG Wei, ZHU Jian. Combined disposition mode of receiver-transceiver antenna for electromagnetic fuse [J]. Torpedo Technology, 2013, 21(6): 422-424. (in Chinese)
- [3] 王绍卿. 鱼雷近炸引信原理与设计 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1992.

- WANG Shao-qing. Principle and design of torpedo's proximity fuse [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 1992. (in Chinese)
- [4] 孙钟阜. 基于目标能量特性的被动声引信[J]. 声学技术, 2012, 31(6): 574-577.
- SUN Zhong-fu. Passive acoustic fuse based on energy feature of target[J]. Technical Acoustics, 2012, 31(6): 574-577. (in Chinese)
- [5] 陈泽茂, 任志良, 刘志明. 鱼雷电磁引信的目标尺度识别方法研究[J]. 探测与控制学报, 2000, 22(1): 23-25.
- CHEN Ze-mao, REN Zhi-liang, LIU Zhi-ming. The study on the target scale recognition method for the electromagnetic fuse for a torpedo[J]. Journal of Detection & Control, 2000, 22(1): 23-25. (in Chinese)
- [6] 陈光, 黄小艺, 潘兰强. 基于电磁引信原理的鱼雷过靶距离测量方法[J]. 鱼雷技术, 2012, 20(1): 28-32.
- CHEN Guang, HUANG Xiao-yi, PAN Lan-qiang. Active measurement of torpedo missdistance based on electromagnetic fuse[J]. Torpedo Technology, 2012, 20(1): 28-32. (in Chinese)
- [7] 康丽艳, 苏涛, 王平. 数字化同步检波的新方法[J]. 鱼雷技术, 2006, 14(3): 32-35.
- KANG Li-yan, SU Tao, WANG Ping. A new method of digital synchronous demodulation [J]. Torpedo Technology, 2006, 14(3): 32-35. (in Chinese)
- [8] 倪辉, 乔纯捷, 王跃科, 等. 基于 DSP 的鱼雷主动电磁引信信号处理平台设计[J]. 计算机测量与控制, 2008, 16(5): 681-683.
- NI Hui, QIAO Chun-jie, WANG Yue-ke, et al. Design of torpedo active electromagnetic fuse signal process platform based on DSP[J]. Computer Measurement & Control, 2008, 16(5): 681-683. (in Chinese)
- [9] HE W P, ZI Y Y, HE Z J, et al. Tunable Q-factor wavelet transform denoising with neighboring coefficients and its application to rotating machinery fault diagnosis[J]. Science China Technological Sciences, 2013, 56(8): 1956-1965.
- [10] 陈光, 任志良, 李耀波, 等. Morlet 组合小波及其在鱼雷电磁引信信号处理中的应用[J]. 鱼雷技术, 2009, 17(3): 13-17.
- CHEN Guang, REN Zhi-liang, LI Yao-bo, et al. Application of Morlet combined wavelets to signal process of torpedo electromagnetic fuse [J]. Torpedo technology, 2009, 17(3): 13-17. (in Chinese)
- [11] 白志科, 施晓海, 肖素娟. 鱼雷电磁引信信号处理软硬件技术研究[J]. 探测与控制学报, 2009, 31(S1): 8-10.
- BAI Zhi-ke, SHI Xiao-hai, XIAO Su-juan. Study on signal processing software and hardware techniques for torpedo electromagnetic fuse [J]. Journal of Detection & Control, 2009, 31(S1): 8-10. (in Chinese)