

对信号长度不敏感的瞬态信号检测方法

游 波¹, 蔡志明²

(1. 武昌工学院信息工程系, 湖北武汉 430065; 2. 海军工程大学水声工程系, 湖北武汉 430033)

摘 要: 针对检测未知长度瞬态信号时累积和方法性能下降的问题, 提出对瞬态信号长度不敏感的累积和检测方法. 首先建立信号长度失配累积和方法检测模型, 然后比较了该方法和常规累积和方法在长度匹配和失配情况下的理论和仿真检测性能, 并利用海试单通道波束形成后数据对两种方法进行了比较. 结果表明, 本文所述方法对未知长度瞬态信号检测性能稳定, 且优于长度失配时的常规累积和方法.

关键词: 累积和检验; 瞬态信号检测; 未知信号长度; 被动声纳检测

中图分类号: TB566 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2017)06-1356-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.06.011

A Transient Detection Method Independent of Unknown Signal Length

YOU Bo¹, CAI Zhi-ming²

(1. Department of Information Engineering, Wuchang Institute of Technology, Wuhan, Hubei 430065, China;

2. Department of Underwater Acoustics Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China)

Abstract: The performance of the Page Test decreases without the exact knowledge of the transient signal length. A new method independent of the signal length is proposed in this paper. The detector of unmatched signal length of the Page Test is modeled at first. Then the theoretical detection performance and the simulative one of the new method are compared to the general Page Test while detecting the unknown length transient signal. The experiment data on the sea of certain bearing channel after beamforming are exploited to compare these two methods. The result shows that the performance of the method proposed in this paper is more stable than the general Page Test without the exact knowledge of the transient signal length.

Key words: Page Test; transient signal detection; unknown signal length; passive sonar detection.

1 引言

水下目标瞬态信号包括鱼雷在空投和潜射过程中产生的瞬态信号^[1], 潜艇在转向、加速时产生的瞬态信号^[2], 浮标声纳信号、主动声纳侦察脉冲信号^[3]等. 声纳对这些瞬态信号的有效检测能够克服由于吸声降噪技术的发展带来的稳态辐射噪声检测困境, 具有积极的军事意义.

瞬态信号检测技术基于多种原理. 基于变换域思想的方法包括短时傅立叶变换、分数阶傅立叶变换、Winger-Ville 分布、小波变换、Gaber 变换、希尔伯特-黄变换等. 经验模态分解^[4,5]是希尔伯特-黄变换理论的核心, 将信号依据不同的时间尺度分解成一系列的固有模态函数, 是一种分离局部特征的方法. 固有模态函数

截止阶数若选择不当, 会带来虚假的模式. 累积和检测方法 (Page test, PT) 基于信号出现前后概率特征的变化进行检测. 研究表明^[6,7]该方法性能优于 Power Law 检测器、短时傅立叶变换、小波变换等其他方法. 其实现需要解决两方面问题, 一是变化发生前后被检测序列概率密度模型 (PDF) 的建立, 二是未知长度信号时的检测问题.

由于发射波形已知, PDF 模型和检测参数可以准确计算得到, 累积和方法在主动声纳信号处理中的应用是成功的^[8-10]. 被动声纳累积和检测的思路是在变化发生前后 PDF 模型假设下, 基于纽曼皮尔逊准则, 利用马尔科夫状态转移矩阵的 FFT 方法计算门限^[3,11]等相关检测参数, 从而实现检测. 马尔科夫状态转移矩阵的方法和信号长度直接相关, 不同的瞬态信号长度对应

不同的检测参数,即检测参数的计算结果是在一定信号长度假设下得到的.若假设长度和真实长度失配,检测参数的计算结果不准确,检测性能将会大幅下降.实际上瞬态信号真实长度是未知的.

本文基于高斯分布方差变化的简单假设,着重从信号处理的角度解决未知信号长度的累积和检测问题.建立了信号长度失配模型,将理论检测概率的计算结果和蒙特卡罗仿真结果进行了对比,实现了一种对信号长度不敏感的变门限累积和检测方法.检测概率的理论计算结果和海试数据的验证结果表明,该方法性能稳健,且优于长度假设失配时的累积和检测方法.基于非高斯 PDF 模型的累积和检测方法是下一步的研究工作.

2 信号长度失配累积和方法检测模型

给定观测值序列 $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_N)$, 假设瞬态信号出现前后, 概率分布律从 f_0 变化至 f_1 , 即从标准正态分布变化至方差为 σ^2 的高斯正态分布:

$$H_0: f_0(x_n) = N(0, 1), 1 \leq n < \theta \quad (1)$$

$$H_1: f_1(x_n) = N(0, \sigma^2), \theta \leq n < N$$

式中变化发生点 θ 未知. 依据最大似然比准则^[12] 得到累积和检验的对数似然比统计量写成:

$$Z_0 = 0, \quad n = 0 \quad (2)$$

$$Z_n = \max\{0, Z_{n-1} + g(x_n)\}, n = 1, 2, 3, \dots$$

式中 $g(x_n)$ 称为非线性量或更新量, 可写成 $g(x_n) = x_n^2 - \delta$, $\delta = \sigma^2 \cdot \ln \sigma^2 / (\sigma^2 - 1)$ 为偏差. 累积和检验实际上是一种基于最大对数似然比准则的序贯检测方法. 设 0 和 h 分别为上、下门限, 检测过程可描述为

$$Z_n \in \begin{cases} [h, \infty], & \text{停止检测, 有信号;} \\ [0, h), & \text{继续检测;} \\ (-\infty, 0), & \text{停止检测, 无信号.} \end{cases} \quad (3)$$

图 1 分别为 H_0 假设和 H_1 假设下更新量 $g(x_n)$ 的数学期望随着变化发生后信号和噪声和的方差 σ^2 ($\sigma^2 > 1$) 的变化关系, 满足 $E[g | H_0] \leq 0 < E[g | H_1]$. 即在 H_0 假设下, $E[g | H_0] < 0$, 由式(2)知检验统计量 Z_n 以大概率置零, 不易实现累加超门限; 在变化持续时间内 (H_1 假设下), $E[g | H_1] > 0$, Z_n 以大概率大于 0, 容易累加超门限, 实现检测. 并且随着方差增大, 信号越强, 获得的新息 $g(x_n)$ 越大, 对于瞬态变化上升沿的检测也越容易. 所以从统计意义上说, 更新量 $g(x_n)$ 表达了观测值方差有无变化以及有多大变化的信息.

在一定的检测和虚警概率下, 假设信号长度为 \bar{L} , 令 $\tilde{\sigma}^2$ 和 \bar{h} 为根据 FFT 方法计算所得方差和门限. 检测更新量重新写成:

$$g(x_n) = x_n^2 - \tilde{\delta}, \tilde{\delta} = \frac{\tilde{\sigma}^2 \cdot \ln \tilde{\sigma}^2}{\tilde{\sigma}^2 - 1} \quad (4)$$

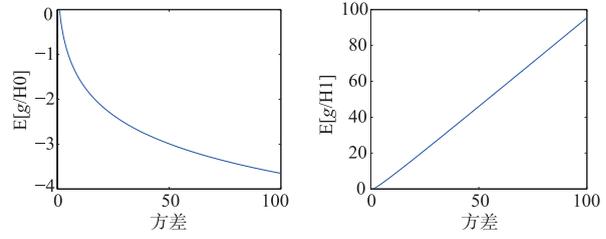


图1 左图为 H_0 假设下更新量随方差的变化关系, 右图为 H_1 假设下随方差的变化关系

令 $y_n = g(x_n) = x_n^2 - \tilde{\delta}$, 根据雅可比行列式, 经过计算可得更新量的概率分布密度:

$$f(y_n) |_{H_0} = \left| \frac{dx}{dy} \right| \cdot f(x_n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(y_n + \tilde{\delta})}} \exp\left[-\frac{(y_n + \tilde{\delta})}{2}\right]$$

$$f(y_n) |_{H_1} = \left| \frac{dx}{dy} \right| \cdot f(x_n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\tilde{\sigma}^2(y_n + \tilde{\delta})}} \exp\left[-\frac{(y_n + \tilde{\delta})}{2\tilde{\sigma}^2}\right] \quad (5)$$

式(5)中 $f(x_n)$ 的表达应以真实方差 σ^2 代入, 而 y_n 和 x_n 的关系应代入假设参数根据式(4)进行计算.

下一步对更新量 y_n 进行量化, 然后建立状态转移矩阵. 根据契比雪夫不等式^[13], 则被检测序列 \mathbf{X} 以不小于 99% 的概率分布在 10σ 的范围, 即 $P\{|X| < 10 \cdot \sigma\} \geq 0.99$. 设 y_n 的量化范围为 $[h_1, h_2]$, h_1 为量化下门限, h_2 为上门限. 根据文献[3]给出的量化方法得到在 H_0 和 H_1 假设下 y_n 量化范围分别写为:

$$H_0: h_1 = \max(-\bar{h}, -\tilde{\delta}), h_2 = \max(\bar{h}, 100 - \tilde{\delta})$$

$$H_1: h_1 = \max(-\bar{h}, -\tilde{\delta}), h_2 = \max(\bar{h}, 100 \cdot \tilde{\sigma}^2 - \tilde{\delta}) \quad (6)$$

设量化阶数为 N , 步长为 Δ , 更新量序列中每一个点 $v_i = h_1 + i * \Delta; i = 1, \dots, N$, 代入(5)式得到每个量化点的概率, 即 $f_g(x_i) = \Pr\{g(x_i) = v_i\}$. 分别建立在 H_0 和 H_1 假设下的状态转移矩阵. 假设检测过程从零状态开始, 则根据文献[3]描述的 FFT 性能分析模型, 计算检测概率. 在该模型中, 长度失配时状态转移的次数, 应为真实信号长度 L . 假设信号长度的作用是为得到检测所用参数. 即基于纽曼皮尔逊准则, 假设信号长度为 \bar{L} 时, 根据性能分析模型计算得到信号方差 $\tilde{\sigma}^2$ 和检测门限 \bar{h} , 再根据式(2)和式(4)构造检验统计量 Z_n , 从而实现检测.

图 2 和图 3 分别表示在高斯分布方差变化和均值变化假设下得到的一定长度瞬态信号的检测概率随着假设瞬态信号长度的变化关系. 可见基于马尔科夫状态转移模型的 FFT 性能分析方法^[8] 与参与计算的信号长度密切相关, 因而对于常规 PT 算法而言, 当真实长度和假设长度吻合时, 检测性能最佳, 而当长度失配时,

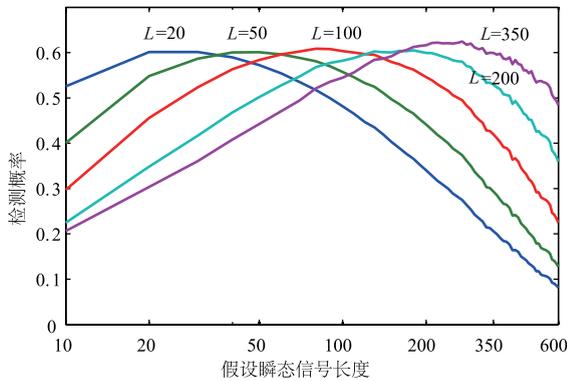


图2 方差变化假设下对一定长度瞬态信号的检测概率和假设瞬态信号长度的关系

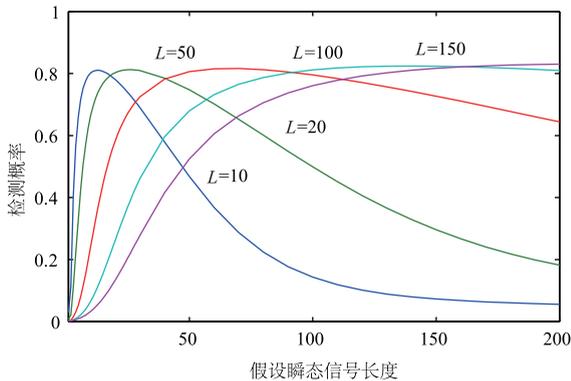


图3 均值变化假设下对一定长度瞬态信号的检测概率和假设瞬态信号长度的关系

性能下降很快。

3 变门限累积和算法

根据式(2)的表达,设检测从零状态开始,长度为 L 的瞬态信号累积和检测过程可表为:

$$0 \leftrightarrow \sum_{i=n_s}^{n_s+L} g(x_i) \leftrightarrow h_L \quad (7)$$

式中 \leftrightarrow 表示连续比较.假设累积和检测在 n_s 点置零, h_L 表示累积和算法对长度为 L 的瞬态信号的检测门限.利用变化前后式(1)关于PDF的假设,上式还可写作:

$$0 \leftrightarrow \sum_{i=n_s}^{n_s+L} (x_i^2 - \delta) \leftrightarrow h_L \quad (7)$$

实际上瞬态信号幅度未知,长度未知,因而偏差 δ 和门限 h_L 无法确定.可以考虑将问题简化,即将两个不确定的检测参数简化为一个.假设偏差为常数 δ_c ,门限仍然随信号长度变化.将上式进行变量代换:

$$0 \leftrightarrow \sum_{i=n_s}^{n_s+L} (x_i^2 - \delta_c) \leftrightarrow h_L + L(\delta - \delta_c) \quad (9)$$

令 $h(L) = h_L + L(\delta - \delta_c)$,为随瞬态信号长度变化的新门限.在检测过程中,随着被检测序列长度的增加,置零、继续检测和过门限操作不断发生,以置零点为起点

的可能的瞬态信号长度 $k(k=1 \cdots L)$ 不断变化,相应的检测门限 $h(k)(k=1 \cdots L)$ 也在变化.因此上两式所描述的检验过程称为变门限累积和检验方法,即VPT方法(the varied-threshold Page Test).VPT方法的最终检测门限需将式(9)计算结果作为初值连同3.1节所述偏差值代入VPT方法的性能分析模型^[14],在满足设定的虚警概率下,搜索计算VPT检测门限.

3.1 偏差计算方法

变门限累积和方法常数偏差的确定方法基于如下考虑:真实信号起点可能对应累积和检验结果中零值和非零值两种情况.零值即为检测信号起点,随后利用 $h(1)$ 去检测下一个样本点,若结果非零且未超门限,用 $h(2)$ 再去检测下一个样本点,若超门限,则判断检测到信号,若结果为零,则设该点为新的信号起点,如此序贯检测.若真实信号起点对应累积和检验结果中的非零值,累积和检测门限已经是 $h(i)$, i 为该点与累积和检验结果中前一个置零点的距离,接下来用 $h(i+1)$ 替代 $h(1)$ 去检测下一个样本点,若结果非零且未超门限,继续用 $h(i+2)$ 替代 $h(2)$ 去检测下一个样本点……,在非零初始状态时,累积和序贯检测过程如下:

$$Z_n \in \begin{cases} [h(n+i-1), \infty), & \text{判决有信号} \\ (0, h(n+i-1)), & \text{继续检测} \\ (-\infty, 0), & \text{判决无信号} \end{cases} \quad (10)$$

累积和检测门限随着信号长度的增加而增加,因而在上述过程中检测门限事实上是偏高的,会带来检测概率和虚警概率的降低.为避免这种情况,应尽量将常数偏差 δ_c 压低. δ_c 减小,非线性量 $g(x_n) = x_n^2 - \delta_c$ 增大,累积和检验统计量增加,因而可以在一定程度上减小由于起点判断误差导致门限过高对检测性能带来的影响.累积和检测偏差随着信号长度的增加而减小^[2],设 N 为被检测序列的最大长度, δ_N 为 N 长序列对应的偏差, $\delta_N < \delta_i, i=1, \cdots, N-1$,因此 $\delta_c = \delta_N$.实际的检测过程无法确知被检测序列的最大长度.但当假设的最大长度足以在给定的信噪比下检测出信号时,可以将该长度设为被检测序列的最大长度.设检测概率为0.6,虚警概率为 10^{-4} ,可设 $N=1000$.显然,这样的假设会带来一定的性能损失,使得VPT方法的性能不及长度完全匹配时的PT方法,但对于未知长度下的瞬态检测问题,其性能仍然优于长度失配时的PT方法,详见3.3节.性能损失具体的量化分析有待于之后的研究工作.

高斯分布方差变化假设下,检测概率为0.6,虚警概率为 10^{-4} 时常规PT和变门限VPT方法门限和偏差的计算结果如图4.可见两种方法的检测门限均随着瞬态信号长度发生变化.在瞬态信号长度未知时,PT方法将信号长度假设为某确定值,根据下图选取该长度对应的门限和偏差进行检测.因而对于检测过程而言,门限和偏差实

为常数.与之不同,VPT方法检测每个样点时偏差为常数,门限却随着非零检测结果的长度发生着变化.

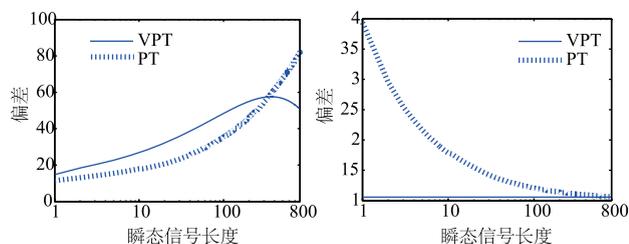


图4 高斯分布方差变化假设下PT和VPT方法门限和偏差计算结果

3.2 算法实现

图5为变门限算法的实现流程.检测初始状态从 $Z_0 = 0$ 和 $k = 0$ 开始, k 为出现连续非零累积和检测结果

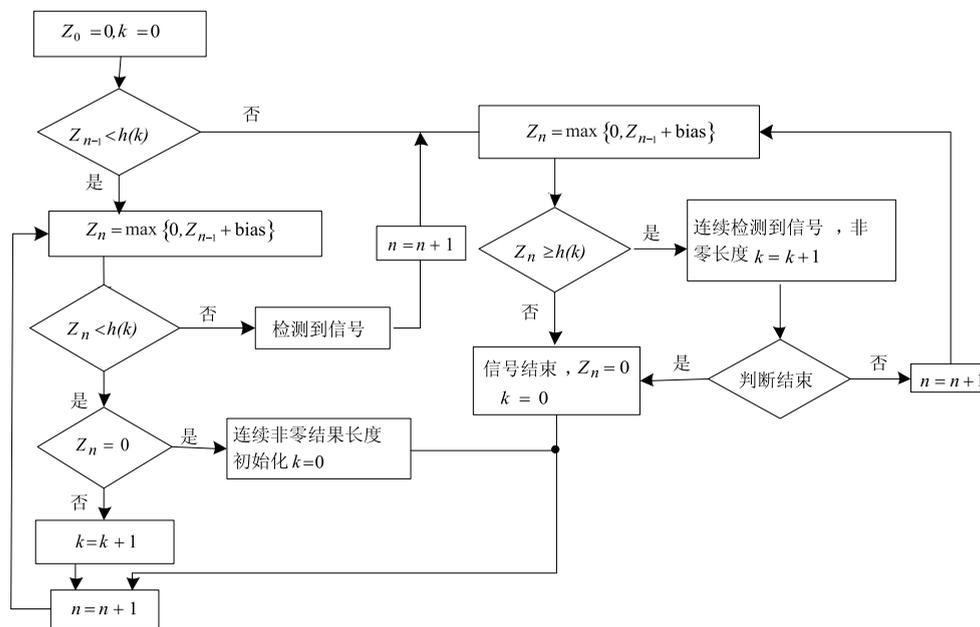


图5 变门限VPT方法实现流程

3.3 性能分析

变门限 VPT 方法检测性能的理论计算与常规 PT 方法一样,均是利用 FFT 方法的性能分析模型来实现,但有两点不同:

(1) 由于 VPT 方法的检测门限随非零连续检测样点数变化,因而在每一个量化步骤和 FFT 递归计算步骤,与门限有关的变量也随之发生变化.

(2) 初始检测状态不同

在 H_1 假设下进入正常检测时,变门限累积和方法检测概率应为零和非零两种初始检测状态下的检测概率之和.进入 H_1 假设的第一个点,根据检验统计量的计算公式(2),若 $Z_n = 0$ 称为零初始状态,否则为非零初始状态.零初始状态下检测概率的计算方法与常规 PT 方法相类似^[3].

时对应的样本点长度 k 增加,门限 $h(k)$ 也在变化,这是与常规 PT 方法取常数门限显著不同的地方.

图5中前一时刻未检测到信号 $Z_{n-1} < h(k)$ 时,若当前时刻 $Z_n \geq h(k)$,即检测到信号;若 $0 < Z_n < h(k)$,则连续非零累积和结果对应的样点数 $k = k + 1$;若 $Z_n = 0$,则无信号, k 重新置零.如果前一时刻已检测到信号 $Z_{n-1} \geq h(k)$,当前时刻 $Z_n \geq h(k)$,即连续检测到信号, $k = k + 1$;若 $Z_n < h(k)$,则信号结束, Z_n 和 k 重新置零.由于累积和检验方法是针对信号上升沿的检测,对信号下降沿的判断会延迟于真实下降沿,因此即便在连续检测到信号的时候,也要及时判断信号的下降沿,在工程上可以考虑以多点的连续下降为下降沿的判据.

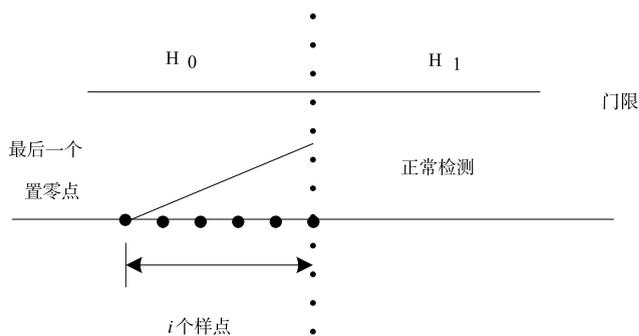


图6 VPT方法 i 种非零初始状态示意图

如 3.1 节所述,VPT 方法检测门限随着非零检测结果数目发生变化.如图6所示,非零初始状态 H_1 假设下 VPT 方法的检测门限与前一个 $Z_n = 0$ 点有关,即该点与 H_0 假设下最后一次置零复位点间的样点数 i 直接

决定了 VPT 方法在 H_1 假设下检测下一个点的门限是 $h(i+1)$, 而非 $h(1)$. 当 i 不同, 式(2)中 $n-1$ 时刻检验统计量 Z_{n-1} 的概率分布律不同, 利用基于马尔科夫状态转移的 FFT 性能分析方法计算所得的检测概率也就不同, 因而需要考虑 i 的多种可能性, 检测概率的计算过程更加复杂. 详细的计算过程参见文献[14].

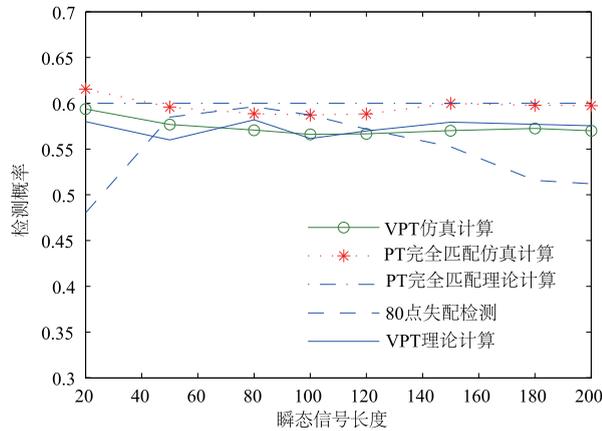


图7 在瞬态信号长度变化时的检测性能对比

图7为变门限VPT方法与常规PT方法在瞬态信号长度失配情况下的检测性能对比. 假设检测概率为0.6, 虚警间的平均间隔为 10^4 样点. 当信号真实长度为80, 假设长度为20至200时, 在长度匹配的80点处, 常规PT方法的检测概率为0.6, 其余长度假设下的检测概率均低于0.6. 而变门限VPT方法^[14]不存在真实信号长度与假设长度失配的问题, 无论是仿真还是理论计算, 其检测概率均在0.6上下波动. 虽然相比信号长度完全匹配时的PT方法, VPT方法性能有所下降, 但仍优于失配时的PT方法. 事实上信号真实长度未知, 完全匹配条件下常规PT方法优越的检测性能无法达到.

4 海试数据验证

图8为在消声水池中采集到的重物落水瞬态信号, 信号主要能量分布在1.6~2.4s内, 滤波频带100~400Hz, 采样率为1kHz. 在重物落水后的第2.1s左右出现短暂寂静, 随后是气泡脉动声. 将1.6~2.4s时间段共800点的瞬态信号在1.6s的位置处以-10dB叠加至4s长的高斯白噪声背景上, 如图9中的原始波形所示. 真实信号长度为800点, 长度失配检测时假设信号长度为100点, 常规PT方法检测所用参数根据文献[3]方法计算可得. 变门限VPT检测参数和流程如3节所述. 由图9可见, 常规PT匹配输出和变门限VPT方法均能在1.6~2.1s内有效检测瞬态信号. 但常规PT方法在失配情况下无法检测. 实际检测中信号长度未知. 变门限VPT方法的检测性能虽然不及长度完全匹

配时的常规PT方法, 但优于失配时的PT算法, 同样可以检测低信噪比水声瞬态信号.

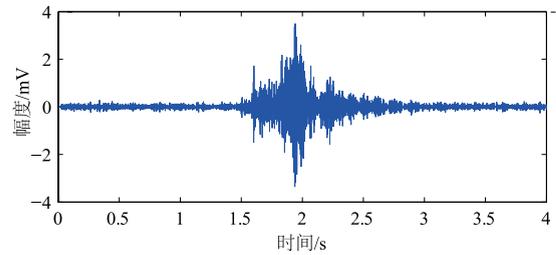


图8 水池采集重物落水信号滤波后波形

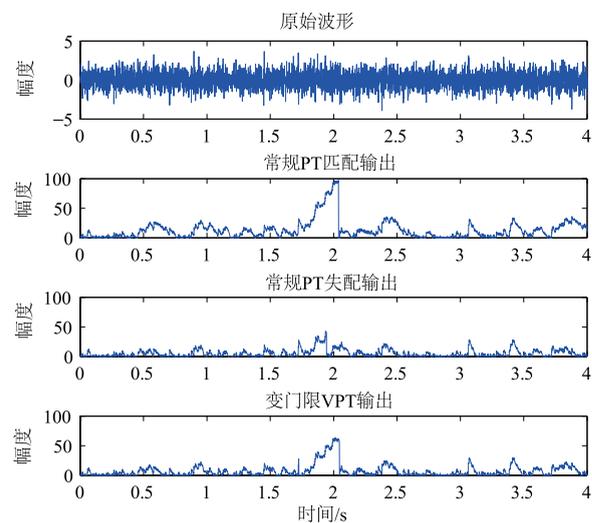


图9 几种方法对水池重物落水信号检测效果对比

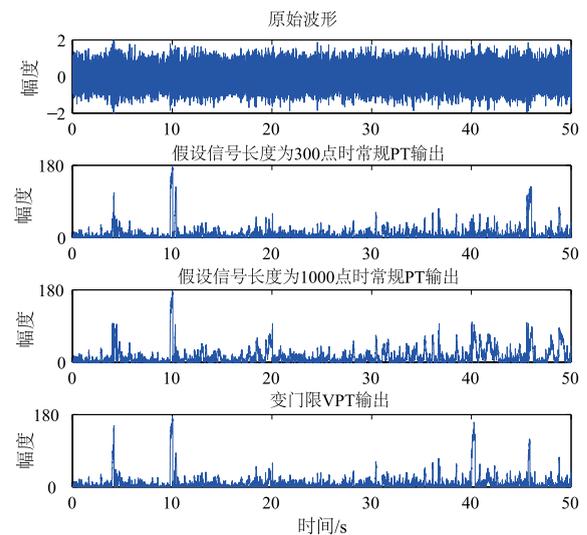


图10 某次海试数据某方位通道的两种方法检测结果对比

图10为2014年12月在东海海域, 接收船的拖曳侦测设备发现的水下不明脉冲信号在某方位通道的检测情况. 上图为原始数据, 四个脉冲的真实位置分别位于3.94s、9.76s、39.9s和45.6s处. 瞬态信号的长度在200

点至 500 点之间,确切的脉冲宽度未知;假设瞬态信号长度为 300 点和 1000 点时的常规 PT 输出结果均不能同时检测出四个脉冲,而变门限 VPT 方法在有效检测出四个脉冲的同时,背景噪声也得到一定程度的抑制. 在未知脉冲宽度的情况下,变门限 VPT 方法在这三个位置的检测峰值分别为假设长度 300 点时 PT 方法的 1.372 倍、1.01 倍、2.868 倍和 0.932 倍,是假设长度 1000 点时 PT 方法的 1.57 倍、1.02 倍、1.613 倍和 1.204 倍,可见变门限 VPT 方法对未知长度瞬态信号的处理增益明显.

5 小结

本文主要研究了累积和方法在应用于被动信号检测时遇到的信号长度失配问题及应对策略. 首先建立了长度失配累积和方法检测模型,在分析失配原因的基础上,将门限和偏差两个检测参数简化为一个,得到了新的检测器形式,研究了偏差和门限的计算方法,从理论计算、蒙特卡罗仿真、水池实验以及海试数据验证三个方面比较了该方法和常规累积和方法在信号长度匹配和失配情况下的检测性能. 结果表明,本文所述方法对未知长度瞬态信号检测性能稳定,且优于长度失配时的常规累积和方法,解决了未知信号长度下累积和方法的稳健性检测问题.

参考文献

- [1] 刘文海. 水下被动目标瞬态特征检测技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2010.
LIU Wenhai. The Analysis of Transient Signal via Underwater Targets[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010. (in Chinese)
- [2] 吴国清,等. 水声瞬态信号短时谱形态及谱相关法检测[J]. 声学学报,2000,25(6):510-515.
WU Guoqing, et al. The analysis of underwater transient signal and their detection by spectral correlation[J]. Acta Acoustica,2000,25(6):510-515. (in Chinese)
- [3] 游波,蔡志明. 一种水声瞬态信号检测方法的性能分析模型[J]. 哈尔滨工程大学学报,2015,36(10):1386-1390.
YOU Bo, CAI Zhi-ming. Study on the performance analytical model of the underwater transient signal detection method[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2015, 36(10):1386-1390. (in Chinese)
- [4] 王燕,邹男,等. 基于局部瞬时能量密度级的瞬态信号检测方法[J]. 电子与信息学报,2013,35(7):1720-1724.
WANG Yan, ZOU Nan, et al. Transient signal detection method based on partial instantaneous energy density level[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013, 35(7):1720-1724. (in Chinese)
- [5] Nikolaos T, Konstantions D, Scott R. A formal study of the nonlinearity and consistency of the empirical mode decomposition[J]. Signal Processing, 2012, 92(9):1961-1969.
- [6] WANG Zhen. New Approaches to Transient Detection and Signal Segmentation[D]. Connecticut: University of Connecticut, 2002.
- [7] WANG Zhen, Peter Willett. A performance study of some transient detectors[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2000, 48(9):2682-2685.
- [8] Douglas A Abraham, Peter K Willett. Active sonar detection in shallow water using the Page Test[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2002, 27(1):35-46.
- [9] 游波,蔡志明. 累积和检验算法中的反馈机制研究[J]. 电子学报,2010,38(6):1434-1437.
YOU Bo, CAI Zhi-ming. On feedback mechanism of the Page Test[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(6):1434-1437. (in Chinese)
- [10] 游波,蔡志明. 一种估计主动声纳回波扩展时间的有效方法[J]. 电子学报,2012,40(12):2223-2556.
YOU Bo, CAI Zhi-ming. An effective method to estimate spreading time of active sonar echoes[J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(12):2223-2556. (in Chinese)
- [11] HAN Chunming, Peter K Willett. Some methods to evaluate the performance of Page's Test as used to detect transient signals[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1999, 47(8):2112-2127.
- [12] 濮晓龙. 关于累积和(CUSUM)检验的改进[J]. 应用数学学报,2003,26(2):225-241.
Pu Xiaolong. The improvement of the CUSUM Test[J]. Acta Mathematicae Applicatae Sinica, 2003, 26(2):225-241. (in Chinese)
- [13] 盛骤,谢式千. 概率论与数理统计[M]. 北京:高等教育出版社,2008.
- [14] YOU Bo, CAI Zhiming. Research on performance of the page test independent of unknown signal length[A]. IEEE/OES China Ocean Acoustics Symposium COA2016[C]. Harbin, China: IEEE, 2016.

作者简介



蔡志明 男,1962年11月出生,浙江湖州人,教授,博士生导师,从事水声信号处理、海洋声学建模与声纳测试、声纳系统技术、声纳作战效能评估等方面的教学和科研.

游波 女,1976年11月出生,江苏泰州人,博士,讲师,主要研究方向为海洋物理、主动声纳抗混响抗多途信号处理和被动目标瞬态特征检测技术研究. 邮箱: bbyouyou2002@aliyun.com