

非高斯水声瞬态信号双通道 Power-Law 检测

邢 军, 刘 忠

(海军工程大学电子工程学院, 湖北武汉 430033)

摘要: 根据水声瞬态信号的特点, 在分析能量检测和高阶谱检测的特性基础上, 研究了基于能量检测和基于高阶谱的 Power-Law 检测方法, 将上述两种检测器联合构成一种双通道 Power-Law 检测器, 更好地利用了水声瞬态信号中的统计信息。通过计算机仿真试验, 证明了该检测器的有效性, 它能在更大程度上适应复杂水声环境变化的要求, 改善和提高水声瞬态信号的检测性能。

关键词: 水声瞬态信号; 双通道检测器; 能量检测; 高阶谱

中图分类号: TB556

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2008)-01-0126-05

Non-Gaussian underwater acoustic transient signals detection with dual-channel using Power-Law detectors

XING Jun, LIU Zhong

(Electronics Engineering College Navy University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Through analysing characteristics of energy detection and high-order spectrum detection, methods of Power-Law detection based on energy detection and high-order spectrum are studied according to traits of underwater acoustic transient signals. For better use of statistic information in underwater acoustic transient signals, these two detectors are jointed to be a dual-channel Power-Law detector, which validity is proved through simulation experiments. It can adapt to more complex underwater acoustic environment and improve detection performance for underwater acoustic transient signals.

Key words: underwater acoustic transient signals; dual-channel detector; energy detection; high-order spectrum

1 引 言

随着隐身技术的发展, 水下目标的辐射噪声越来越低, 无源检测和识别水下目标越来越困难。潜艇、鱼雷等目标由于机械设备的运行状态、工况等变化, 不可避免地会发出瞬态信号, 利用这些突发性的瞬态信号, 则可发现目标甚至识别目标。但由于瞬态信号的突发性和强烈的不稳定性, 尤其对于水下复杂的背景环境下瞬态信号的检测和识别, 设计一个宽容性的检测器非常困难^[1,2]。

实际海洋环境中的水声信号非常复杂, 声纳系

统接收的信号包括目标信号和噪声干扰, 它们经过复杂的水声信道畸变和各种环境的综合干扰, 具有明显的非高斯、非平稳特性。海洋噪声不是标准的高斯过程, 水声信道具有时变、空变和多途的特点, 检测的水下目标也并非点目标。现有的声纳系统却大多是以常规最佳检测理论为依据的能量检测器或匹配滤波器, 是理想假设条件下的最佳检测器。这些条件的失配, 造成了声纳系统性能的下降。因此, 切实地考察海洋环境条件, 建立适合实际条件下的检测器, 才能提高声纳系统的检测性能。

高阶谱易于处理非高斯、非平稳信号, 如果将常规能量检测器与高阶谱检测器联合构成一种双通道检测器, 则它同时利用了信号的二阶和三阶统计信息, 增加了所利用的信息量, 且利用了能量检测和高阶谱检测在性能上互补的特点, 可以构成一种性能

收稿日期: 2007-02-08; 修回日期: 2007-05-24

作者简介: 邢军(1980-), 男, 湖北人, 博士生, 研究方向: 水声信号检测和识别。

通讯作者: 邢军, E-mail: fumulan_cn@163.com

更稳定、适应性更广、更适合实际海洋环境变化要求的水声信号检测器,改善和提高水声信号的检测性能^[3]。

Power-Law 检测器特别适于检测未知物理过程产生的瞬态信号^[1,4,5]。本文在上述研究基础上,研究了双通道 Power-Law 检测,并将其用于非高斯瞬态信号的检测。

2 基于能量检测的 Power-Law 检测

大量的海试证明,海洋环境噪声并不是严格的高斯过程。由于声纳系统总有一定的接收带宽,因而可以把环境噪声归为有色高斯噪声。

实际水声信号因经过了复杂的水声信道及各种来自环境干扰的影响,一般均为非高斯过程。

本文研究被动声纳信号的情形,信号检测问题可以表述为如下二元检测:

$$H_0: \text{仅有噪声 } x(t_i)=n(t_i) \quad (1)$$

$$H_1: \text{信号存在 } x(t_i)=s(t_i)+n(t_i) \quad (2)$$

$i=1, 2, \dots, N$ 。其中 $x(t_i)$ 为声纳接收到的信号, $s(t_i)$ 、 $n(t_i)$ 分别为目标信号和干扰噪声。

对于上述情形的信号检测问题,依据常规最佳检测理论,选择能量检测方法。

假定有观测样本序列 $\{x(t_i)\}$, $i=1, 2, \dots, N$, 对于式(1)、(2)的信号检测问题,构造能量检测的统计量^[3]为:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^N x^2(t_i)}{\sigma_n^2} \begin{matrix} > \\ \leq \end{matrix} \lambda \quad (3)$$

λ 为所设立的门限, σ_n^2 为观测样本序列 $\{x(t_i)\}$ 的方差,通过对所接收数据的比较,可对样本中是否含有信号作出判断。由于能量检测把信号与干扰噪声都当成高斯随机过程来处理,则对于上述统计量来说,有无信号的区别仅表现在信号平均能量的变化,对于所检测的信号和干扰噪声并不作更具体的分析,因而能量检测是一种条件失配下的检测,时常有检测性能不佳的表现。

对于高斯背景下瞬态信号的检测问题, Nuttall 提出了不需要预白化处理的非参量 Power-Law 检测方法^[1]:

$$\frac{\sum_{k=1}^N X_k^v}{(\sum_{k=1}^N X_k)^v} \begin{matrix} > \\ \leq \end{matrix} \lambda \quad (4)$$

其中, X_k 是接收时间序列信号 $x(t)$ DFT 结果的第 k 个幅度平方值, λ 是门限, v 是一个非负实数,经过实验 Nuttall 认为 $v=2.5$ 时性能最佳。

式(3)描述的是能量检测的统计量,可对一个观测周期内的观测样本序列 $\{x(t_i)\}$ 作 DFT,将所得到的 X_k 替换式(3)中的 $x(t_i)$,再结合式(4)描述的 Power-Law 检测器的特点,提出基于能量检测的 Power-Law 检测器:

$$\frac{\sum_{k=1}^N X_k^{2v} / \sigma_n^{2v}}{(\sum_{k=1}^N X_k^2 / \sigma_n^2)^v} \begin{matrix} > \\ \leq \end{matrix} \lambda \quad (5)$$

3 基于高阶谱的 Power-Law 检测

水声信号中除了包含二阶统计信息以外,更多的信息包含在三阶以上的高阶统计量中。双谱是信号三阶相关的傅立叶变换,对高斯噪声不敏感,具有很好的抗高斯噪声的能力,并能对所检测信号中所含有的非高斯信号进行定量的描述。

假设 $x(t)$ 是连续平稳过程, $X(\omega)$ 为 $x(t)$ 的傅立叶变换,其双谱函数:

$$B_x(\omega_1, \omega_2) = E[X(\omega_1)X(\omega_2)X^*(\omega_1+\omega_2)] \quad (6)$$

在抽样点数 N 较大的情况下,双谱域上各离散频率对的平滑双谱估计值是相互独立的,据此定义归一化双谱估计值函数:

$$\hat{\beta}(\omega_1, \omega_2) = \frac{\hat{B}_x(\omega_1, \omega_2)}{\sigma_x^2(\omega_1, \omega_2)} \sim N(0, 1) \quad (7)$$

$$\sigma_x^2(\omega_1, \omega_2) = \frac{M}{KM_1^2} P(\omega_1) P(\omega_2) P^*(\omega_1+\omega_2) \quad (8)$$

其中 M 、 M_1 、 K 为平滑参数。

$$\text{则 } 2|\hat{\beta}_x(\omega_1, \omega_2)|^2 \sim \chi_2^2[\lambda(\omega_1, \omega_2)] \quad (9)$$

$$\lambda(\omega_1, \omega_2) = \frac{2|\hat{\beta}_x(\omega_1, \omega_2)|^2}{\sigma_x^2(\omega_1, \omega_2)} \quad (10)$$

观测信号的双谱函数能定量定性地界定其所含有非高斯信号的强弱,从而达到对信号的检测。在双谱主域中取 P 个点作平滑估计双谱值,构造归一化双谱能量统计检测量^[3,6]:

$$T_c^2 = 2 \sum_{i=1}^P |\hat{\beta}_x(\omega_1, \omega_2)|^2 \begin{matrix} > \\ \leq \end{matrix} \lambda \quad (11)$$

式(11)描述的是双谱统计检测量,可将 $|\hat{\beta}_x(\omega_1, \omega_2)|^2$ 看作一个整体量,再结合式(4)描述的 Power-Law 检测器的特点,提出基于高阶谱的 Power-Law 检测

器:

$$\frac{2 \sum_{j=1}^P \sum_{k=1}^P |\hat{\beta}_x(\omega_{1k}, \omega_{2j})|^{2\nu}}{(2 \sum_{j=1}^P \sum_{k=1}^P |\hat{\beta}_x(\omega_{1k}, \omega_{2j})|^2)^\nu} \stackrel{H_1}{>} \lambda \quad (12)$$

$$\stackrel{H_0}{\leq}$$

4 水声瞬态信号的双通道 Power-Law 检测

当信噪比 SNR 低到接收信号与功率谱在、下相差无几时,能量检测器的性能会严重恶化,并且环境噪声偏离高斯性越严重,检测性能越差。而双谱检测器,无论信噪比多低,只要信号的双谱量足够大,就能以较高的概率发现目标。利用两种检测器在性能上的互补性,将从能量检测和双谱检测角度提取的水声瞬态信号中的信息进行融合处理,构造如下双通道 Power-Law 检测器^[3,7]:

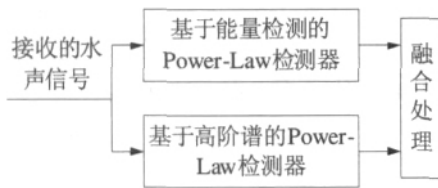


图1 双通道 Power-Law 检测原理图

Fig.1 Schematic diagram of dual-channel Power-Law detection

设双谱量为 B 、信噪比为 SNR , a_1 、 a_2 为两个较小的双谱常量, b_1 、 b_2 为两个较大的双谱常量, T_1 为基于能量检测的 Power-Law 检测通道的检测结果(0 为无信号, 1 为有信号), T_2 为基于高阶谱的 Power-Law 检测通道的检测结果(0 为无信号, 1 为有信号), DF 为融合处理结果, 双通道 Power-Law 检测器的融合处理算法如下:

If(($B > b_1$) and ($SNR > b_2$))

$T_1=1$; $T_2=1$;

$DF=1$;

End

If(($B < a_1$) and ($SNR > b_2$))

$T_1=1$; $T_2=0$;

$DF=1$;

End

If(($SNR < a_2$) and ($B > b_1$))

$T_1=0$; $T_2=1$;

$DF=1$;

End

If(($B < a_1$) and ($SNR < a_2$))

$T_1=0$; $T_2=0$;

$DF=0$;

End

设 P_D 为双通道 Power-Law 检测器的总检测概率, $P_D^{(E)}$ 、 $P_D^{(B)}$ 分别为基于能量检测的 Power-Law 检测通道的检测概率和基于高阶谱的 Power-Law 检测通道的检测概率, 有下式成立^[3]:

$$P_D = P_D^{(E)} + P_D^{(B)} - P_D^{(E)} P_D^{(B)} \quad (13)$$

5 仿真分析

以被动声纳系统对潜艇辐射噪声的检测为例进行仿真分析。依据文献[1]和[8], 建立瞬态信号模型为:

$$s(t) = [1 - \exp(-bt)] \exp(-at) \sin(2\pi ft) \quad (14)$$

参数取 $b=0.5$, $a=0.05$, $f=0.4\text{kHz}$, 其在 80s 采样周期中模拟的瞬态信号仿真如下:

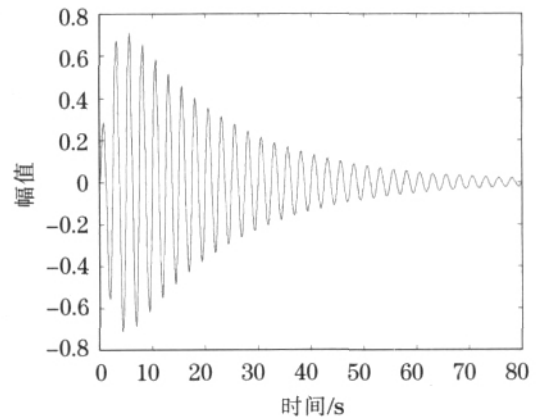


图2 潜艇辐射噪声的模拟瞬态信号

Fig.2 Transient signals simulation of radiated noise of submarine

以有色高斯噪声模拟海洋环境下的综合噪声干扰, 依据有色高斯噪声的特点和文献[9], 构造如下综合噪声模型:

$$n(k) = \sin[2\pi f_1(k/f_s)] + \sin[2\pi f_2(k/f_s)] + \sin[2\pi f_3(k/f_s)] + 6R \quad (15)$$

取采样点 $N=1000$, $N \geq k \geq 1$, $f_s=22\text{kHz}$, $f_1=1\text{kHz}$, $f_2=1.1\text{kHz}$, $f_3=1.2\text{kHz}$, R 为服从均值为 0、方差为 2 的正态分布的随机噪声。则一个采样周期(采样点数为 1000)内的综合噪声干扰信号仿真如下:

在该采样周期内, 被动声纳系统接收到的水声信号波形如下:

采用常规能量检测器和双谱检测器进行检测, 分别做 1000 次蒙特卡洛仿真试验, 根据得到的 ROC 曲线分析, 发现这两种检测器均难以检测到潜

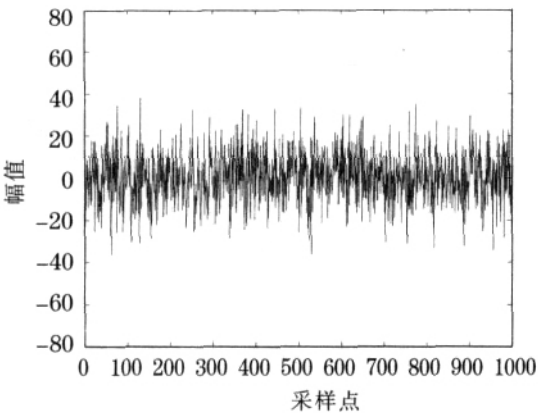


图 3 海洋环境下的综合噪声干扰信号

Fig.3 Signals of total noise interference under marine environment

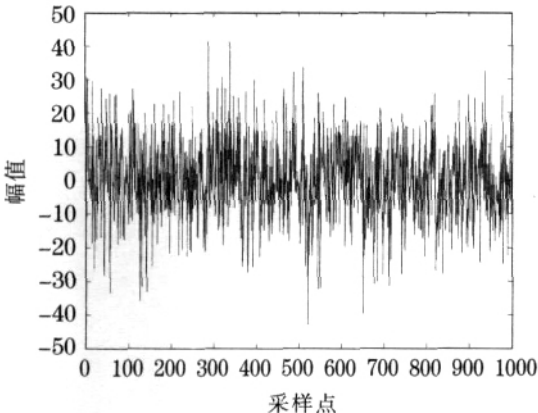


图 4 接收的信号波形
Fig.4 Waveform of received signals

艇辐射噪声中的瞬态信号。

采用本文提出的基于能量检测的 Power-Law 检测器(编号)、基于高阶谱检测的 Power-Law 检测器(编号)和双通道 Power-Law 检测器(编号)进行检测,分别做 1000 次蒙特卡洛仿真试验,得到 ROC 曲线依次如图 5 中曲线 A、B、C 所示,具体分析如表 1。

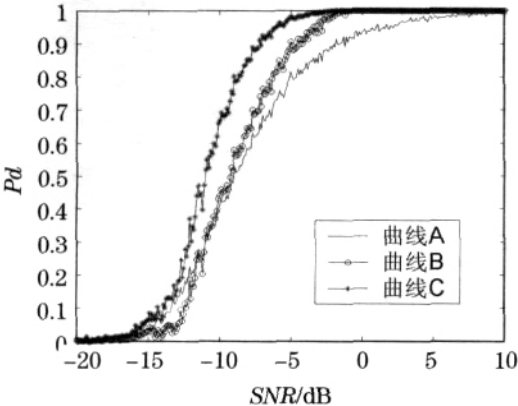


图 5 基于能量检测、基于高阶谱和双通道 Power-Law 检测器 ROC 曲线对比

Fig.5 ROC curves comparison of Power-Law detectors based on energy detection, high-order spectrum and dual-channel

表 1 仿真结果比较
Table 1 Comparison of simulation results

检测器编号	检测瞬态信号	仿真试验分析
能		SNR 为 0dB 时, Pd 约为 0.9; SNR 为 10dB 时, Pd 趋近于 1。ROC 曲线变化较为平缓。
能		SNR 为 0dB 时, Pd 已达 1; 虽然在 SNR<- 10dB 范围内, Pd(A)> Pd(B), 但曲线 B 变化比曲线 A 变化陡峭, 说明总体上检测器比检测器 性能优越。
能		SNR 为 0dB 时, Pd 已达 1, 曲线 C 变化比曲线 A、B 变化都要陡峭, 并且在 SNR 相同的情况下, Pd(C) 均高于 Pd(A) 和 Pd(B), 说明检测器 的性能比检测器 、 的性能均要优越。

从仿真结果来看, 基于能量检测的 Power-Law 检测器、基于高阶谱检测的 Power-Law 检测器和双通道 Power-Law 检测器均能从干扰频率约为 1.1kHz 的有色噪声中检测出频率为 0.4kHz 的水声瞬态信号, 充分证明了这三种检测器的有效性。

6 结 论

本文研究了基于能量检测的 Power-Law 检测器和基于高阶谱的 Power-Law 检测器, 仿真结果表明这两种检测器均可检测到水声瞬态信号, 弥补了常规能量检测和高阶谱检测难以检测到水声瞬态信号的缺陷。将构造的两种 Power-Law 检测器联合构成一种双通道 Power-Law 检测器, 充分利用了水声瞬态信号中的统计信息。仿真结果证明了本文提出的两种 Power-Law 检测器的有效性, 表明双通道 Power-Law 检测器在更大程度上综合了两种 Power-Law 检测器的长处, 进一步改善和提高了水声瞬态信号的检测性能。但实际工程应用中能否达到仿真试验的效果, 还需要实际的试验数据支持, 这将是进一步需开展的研究工作。

参 考 文 献

[1] 吕俊军, 吴国清, 杜波. 非高斯水声瞬态信号 Power-Law 检测[J]. 声学学报, 2004, 29(4): 359-362.
LV Junjun, WU Guoqing, DU Bo. Non-Gaussian underwater transient signals detection using Power-Law detector [J]. ACTA ACUSTICA, 2004, 29(4): 359-362.

[2] WANG Zhen, Willett P. A performance study of some transient detectors[J]. IEEE Transaction on Signal Process-

- ing, 2000, 48(9): 2682-2685.
- [3] 胡友峰, 焦秉立. 高阶谱双通道的水声信号检测方法研究[J]. 声学技术, 2005, 24(2): 65-69.
HU Youfeng, JIAO Bingli. Detection of underwater acoustic signals with dual-channel high-order spectrum[J]. Technical Acoustics, 2005, 24(2): 65-69.
- [4] Kirsteins I P, Mehta S K. Power-Law processors for detection unknown signals in colored noise[C]. IEEE Proc. ICASSP, 1997, 1: 483-486.
- [5] WANG Zhen, Willett P. All-purpose and plug-in power-law detectors for transient signals[J]. IEEE Transaction on Signal Processing, 2001, 49(11): 2454-2466.
- [6] Stefannia Colonnese, Gaetano Skarano. Transient signal detection using higher order moments[J]. IEEE Transaction on Signal Processing, 1999, 47(2): 515-520
- [7] David O Walsh, Pamela A Delancy. Detection of transient signals in multipath environments[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1995, 20(2): 687-695.
- [8] Baugh K W. Transient signal modeling and detection using spectral correlation[A]. Proceeding IEEE Sixth SSAP Workshop on Statistical and Array Processing[C]. Victoria B C, Canada, 1992: 7-9.
- [9] 赵树杰, 赵建勋. 信号检测与估计理论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
ZHAO Shujie, ZHAO Jianxun. Detecting and estimating theory for signals[M]. Peking: Publishing company of Tsinghua University, 2005.
- [10] 张贤达. 现代信号处理(第二版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
ZHANG Xianda. Modern signal processing(Second edition)[M]. Peking: Publishing company of Tsinghua University, 2002.