# 一种被动声呐信号检测的低虚警率方法\*

张晓勇 罗来源

(西南电子电信技术研究所 成都 610041) 2012 年 5 月 24 日收到 2012 年 9 月 18 日定稿

**摘要** 针对被动声呐多目标信号检测中的噪声背景归一化问题,提出了一种基于数学形态学滤波的噪声背景归一化新方法。 该方法利用数学形态学处理中的膨胀和腐蚀算子,以及基于多项式拟合的数据均值估计方法,构造出了一种能够较为准确的 估计噪声门限的方法,并以之进行噪声背景归一化,在较好保留信号信息的前提下较大程度的抑制了噪声,有效降低了多目 标信号检测的虚警概率。通过计算机仿真对比了该算法与 S3PM 算法、OTA 算法的性能,结果表明该噪声背景归一化算法 能够在检测概率损失较小的情况下较大幅度地降低检测的虚警率。实际被动声呐数据处理的对比结果同样验证了该算法的有 效性。

PACS 数: 43.30, 43.60

## Passive sonar signal detection algorithm with lower false alarm rate

ZHANG Xiaoyong LUO Laiyuan

(Southwest Electronics and Telecommunication Technology Research Institute Chengdu 610041) Received May 24, 2012

Revised Sept. 18, 2012

**Abstract** A novel noise background normalization algorithm is proposed to deal with the multi-target signal detection problem of passive sonar. The key of the proposed algorithm is composed of three main parts, Dilation operator, Erosion operator and polynomial fitting method. The Dilation operator and Erosion operator are commonly used in Mathematical Morphology signal processing, and the polynomial fitting method is used to evaluate the mean value of the data. By using these three basic methods, the threshold of the noise is estimated accurately, and the proposed algorithm performs well in noise suppressing while preserving as much signal information as possible. Performance comparisons are given through computer simulations with the Split Three-Pass Mean (S3PM) algorithm and the Order Truncate Average (OTA) algorithm. Results showed that the proposed noise background normalization algorithm could depress the false alarm rate substantially when the cost of the detection probability is slightly. Real Bearing-Time Record (BTR) data of passive sonar is also used to check the capability of three algorithms mentioned above. The novel proposed algorithm presents a better performance than the other two methods in practical applications too.

引言

随着海洋经济的发展,浅海海域活动的各种船 只日益增多,被动声呐系统探测范围内同时出现的 船只可达数十个,这对系统的多目标检测能力提出 了更高要求。一方面,需要声呐系统能够尽可能多的 检测出目标,即检测概率高;另一方面,要求声呐系 统给出的检测结果有较高的可信度,即虚警率低。 通常,在数字多波束被动声呐系统中,多目标信

号检测是在方位历程图 (Bearing-Time Record, BTR) 上进行的,其检测方法是能量检测器。现有关于被动 声呐多目标信号检测的研究主要集中在三个方面: 一是对形成方位历程图的信号质量进行改进,增大 对旁瓣的衰减,如使用导向最小方差 (Steered Minimum Variance, STMV) 自适应波束形成方法代替常 规波束形成方法产生宽带方位信号<sup>[1]</sup>;二是对形成 方位历程图的方法进行改进,使得目标的方位显示

<sup>\*</sup> 国家 863 计划项目 (SS2012AA090116)

更为清晰,如使用波束域宽带峰值能量检测 (Beamdomain broadband Peak Energy Detection, BPED) 代替常用的频谱能量直接累加的方法<sup>[2]</sup>;第三,也 是研究的比较多的,是使用噪声背景归一化的方法 抑制海洋环境噪声在时间上和空间上的不均衡分布 对目标信号检测的影响,从而提高目标检测能力, 同时降低虚警率,如 Two-Pass Mean (TPM)算法、 Split Three-Pass Mean (S3PM) 算法、Order Truncate Average (OTA) 算法以及其改进算法、图像处理方法 等<sup>[3-10]</sup>。上述三种方法在提高被动声呐目标检测概 率上都可起到较好作用,然而只有第三种方法能够有 效抑制噪声非平稳性的影响,降低检测的虚警率。通 常,噪声背景归一化方法的结果与设定门限进行比较 即可完成目标检测,因此噪声背景归一化算法的性能 对被动声呐多目标信号检测的性能有直接影响。现有 噪声背景归一化方法虽然较为有效地提高了目标信 号检测的概率,但仍然存在对噪声的抑制能力不强, 噪声检测算法虚警率较高的问题,因此,从实际应用 考虑,需进一步探索有效降低虚警率的方法。

本文提出了一种基于数学形态学滤波 (Mathematical Morphology Filter, MMF) 的噪声背景归一 化方法 (简称 MMF 算法),应用于被动声呐目标信号 检测时可有效地抑制背景噪声,在保持一定的检测 概率的前提下大幅降低检测算法的虚警率,计算机 仿真实验和实际声呐数据均验证了该算法的性能。

## 1 检测原理和方法

## 1.1 检测处理框架

对于被动声呐的多目标信号检测处理,其基本 流程如图 1 所示。通过水听器阵列接收的信号在经 过放大、滤波、采样等操作后得到由 M 个阵元  $N_t$ 个采样时刻组成的一帧阵列数据  $S_{M \times N_t}$ ;该数据通 过  $N_F$  点 FFT 和 (常规或自适应) 波束形成转换成 为反映 P 个方向上信号频率分布的数据  $H_{P \times N_F}$ ;对 其进行频带能量累加,得到一个 P 点向量  $Y(\theta)$ ,它 是方位历程图在当前时刻的结果;经过噪声背景归 一化后得到新的向量  $Y'(\theta)$ ;将之与设定的门限 DT进行比较,高于门限的方向上被认为有目标。

噪声背景归一化的一般方法是:首先,根据待处 理数据按照一定的准则(如数据均值乘以设定的系 数<sup>[3]</sup>)估计噪声门限;再用待处理数据减去噪声门限,并将所有小于0的数据置0。因此,准确估计噪 声门限是噪声背景归一化的核心任务。

噪声门限的估计应当在保证数据中信号不被置 0的情况下尽可能多的将噪声置 0。



#### 1.2 数学形态学滤波器

数学形态学 (Mathematical Morphology) 是分析 几何形状和结构的数学方法,它建立在集合代数的基 础上,是用集合论方法定量描述集合结构的学科。 1985年之后,数学形态学逐渐成为分析图像几何特 征的工具<sup>[11-12]</sup>。

数学形态学包括一组基本的形态学运算子,其 中最为基础的是膨胀 (Dilation) 和腐蚀 (Erosion) 算子。

A 被 B 膨胀定义为:

$$A \oplus B = \left\{ z | \left( \widehat{B} \right)_z \cap A = \varnothing \right\}, \tag{1}$$

其中:  $A 和 B 是 Z^2$ 中的集合,  $A \cap B$  表示 A 与 B的交集,  $\hat{B} = \{w|w = -b, b \in B\}$ 表示 B 的反射,  $(A)_z = \{c|c = a + z, a \in A\}$ 表示 A 平移到点 z.

同样,用B对A进行腐蚀,定义为:

$$A\Theta B = \{z | (B)_z \subseteq A\}, \qquad (2)$$

其中:  $B \subseteq A$  表示  $B \neq A$  的子集。

对于一维向量,腐蚀算子退化为最小值滤波器, 可以获得数据的下包络;相应的,膨胀算子退化为最 大值滤波器,可以获得数据的上包络,如图2所示。图 中信号模拟的是方位历程图在某一时刻的数据 **Y**(θ), 其中在 -86.04°和 -71.64°方向的两个峰值表示存 在信号,其余部分为噪声。可以看出,腐蚀算子滤波 器和膨胀算子滤波器很好的刻画了信号的包络。



## 1.3 噪声背景归一化处理算法

定义基于数学形态学滤波的噪声背景归一化处 理门限为<sup>[13]</sup>:

$$\mathbf{Y}_{t}(\theta) = \mathbf{Y}_{\text{mean}}(\theta) + \frac{\mathbf{Y}_{\text{max}}(\theta) - \mathbf{Y}_{\text{min}}(\theta)}{2}, \qquad (3)$$

$$\mathbf{Y}_{\text{mean}}(\theta) = c_0 + c_1 \theta + \dots + c_N \theta^N, \qquad (4)$$

其中:  $Y_{max}(\theta)$  是使用膨胀算子得到的数据  $Y(\theta)$  的 上包络;  $Y_{min}(\theta)$  是使用腐蚀算子得到的数据  $Y(\theta)$  的 下包络;  $Y_{mean}(\theta)$  是采用多项式拟合方法得到的数据  $Y(\theta)$  的均值;  $c = (c_0, c_1, \dots, c_N)$  是拟合系数。

噪声背景归一化处理后的数据为:

$$\mathbf{Y}'(\theta) = \begin{cases} \mathbf{Y}(\theta) - \mathbf{Y}_t(\theta), & \mathbf{Y}(\theta) > \mathbf{Y}_t(\theta), \\ 0, & \text{else.} \end{cases}$$
(5)

2 算法仿真与分析

## 2.1 计算机仿真与分析

当各个目标之间互不相邻时,多目标信号检测 问题可以退化为一定数据范围内的单目标信号检测 问题,不失一般性,对高斯背景噪声情况下方向向量 中仅含有单个目标的情景进行计算机仿真,分析本 文所用的基于数学形态学滤波的噪声背景归一化方 法在目标信号检测中的性能。

经过内插后的单个方向向量长度为 2001 点,对应于 [-180°,180°] 范围内的信号能量,处理窗长选择 21 点,对 [-30 dB,5 dB] 内的每个信噪比进行 200 次独立测试,为方便对比,在相同条件下对 S3PM 算法和 OTA 算法进行了仿真测试,测试结果用检测概率  $P_d$  和虚警率  $^{0}P_f$  进行衡量,如图 3 和图 4 所示。

由图 3 可以看出,本文提出的 MMF 算法有较低的虚警率,相对于 S3PM 算法和 OTA 算法有明显的优势, MMF 算法的平均虚警率比这两种算法要低 0.1 以上,且在测试的信噪比范围内随信噪比的增加,该优势还在扩大。当信噪比为 5 dB 时, MMF 算法的虚警率比 S3PM 算法和 OTA 算法分别低 0.1254和 0.1186。可见,本文提出的 MMF 算法可以大幅降低现有检测方法的虚警率。

图 4 所示的是三种方法的检测概率的对比情况,可以看出,MMF 算法的检测性能仅在信噪比小于 –26 dB 后略低于其它两种方法,此时,三种算法的检测性能均快速下降,并很快失效;而对于信噪比 高于 –26 dB 的情况,三种算法均能保持准确检测, 且性能稳定。



图 4 不同信噪比条件下的检测概率

由上述分析可以看出, MMF 算法仅在性能快速恶化的信噪比区域内损失一定检测概率, 而得到在整个测试信噪比范围内的虚警率大幅降低, 对于实际应用来说是可接受的。

## 2.2 实际数据验证与分析

采用某型拖曳式线列阵声呐实际海试试验数据 作为对本文检测算法的验证,其方位历程图的部分 数据如图 5 所示。该数据中含有三个目标和一个强



① 注:此处的虚警率计算不同于一般意义上纯噪声条件下对虚警率的统计,鉴于本文所研究的是多目标信号情况下的检测问题,所以 计算的是含有目标信号情况下的虚警率,即对除去信号范围以外的数据的虚警情况进行统计。因此,信噪比对于虚警率的结果有影响。

声源信号,三个目标的初始方向角分别为 77°,90°, 110°, 声源信号从第 0.125 h 开始出现, 方向为 61°, 间隔 11 s 发射。

对该方位历程图数据分别采用两种处理窗长进 行噪声背景归一化,一种处理窗长小于目标信号的 主瓣宽度,另一种处理窗长大于目标信号的主瓣宽 度,同样对 S3PM 算法、OTA 算法和 MMF 算法的 性能进行比较,处理结果如图 6 — 图 11 所示。

图 6 — 图 8 所示的是处理窗长小于信号主瓣宽 度情况下的噪声背景归一化处理后的结果。可以看



图 6 S3PM 算法处理窗长小于信号主瓣宽度的处理情况





出. S3PM 算法和 OTA 算法在这种情况下会出现 "目标信号分裂"的情况,也就是将一个目标的信号 检测为两个邻近目标的信号,而 MMF 算法并不会 发生这种情况,即使处理窗长较小,得到的目标信号 仍然完整。

图 9 — 图 11 所示的是处理窗长大于信号主瓣宽 度情况下的噪声背景归一化处理后的结果。此时, 三 种算法均能正确的检测出信号,但是,通过简单对比 就可以发现, S3PM 算法和 OTA 算法得到的目标信 号的能量中心位置不突出,并且主瓣较宽,其它位置



图 9 S3PM 算法处理窗长大于信号主瓣宽度的处理情况





图 11 MMF 算法处理窗长大于信号主瓣宽度的处理情况

图 7 OTA 算法处理窗长小于信号主瓣宽度的处理情况

仍然有较多噪声存在; MMF 算法处理得到的目标 信号清晰且能量集中,其它位置的噪声也仅有少量 残留。此外,对于声源信号, OTA 算法的分辨能力 最差,而 MMF 算法的分辨能力最好,可以准确的辨 别出每一次发射。

对比图 8 和图 11 可以看出,随着处理窗长的增加,MMF 算法处理得到的信号能量更为集中,噪声残留也更少。

由上述分析可以看出, MMF 算法在对实际被 动声呐方位历程图的噪声背景归一化处理中表现出 了较强的凸显信号和抑制噪声的能力,且不会因为 处理窗长过小而发生"目标信号分裂"的情况。

3 结论

本文对被动声呐多目标信号检测中的噪声背景 归一化问题进行了深入研究,提出了一种基于数学 形态学滤波的噪声背景归一化新方法。该方法能够 在保证较高的信号检测概率的前提下大幅降低检测 算法的虚警概率。计算机仿真实验表明,在信噪比高 于 -26 dB 时,使用本文提出的噪声背景归一化方法 的检测算法能够在相同的检测概率条件下,平均虚 警概率比使用 S3PM 方法或 OTA 方法的检测算法 低 0.1 以上。此外,实际被动声呐方位历程图数据的 噪声背景归一化处理实验对比表明,本文提出的方 法有更强的凸显信号和抑制噪声的能力,且不会出 现"目标信号分裂"的情况。

## 参考文献

- 蒋小勇,于李洋,杜选民.提高被动声纳宽带检测性能的一种新 方法.声学技术, 2011; **30**(6): 484—488
- 2 杨晨辉,马远良,杨益新.峰值能量检测及其在被动声纳显示中

的应用. 应用声学, 2003; 22(5): 31-35

- 3 Struzinski W A, Lowe E D. A performance comparison of four noise background normalization schemes proposed for signal detection systems. *Journal of the Acoustical Society* of America, 1984; **76**(6): 1738—1742
- 4 Shapiro J H, Green T J Jr. Performance of split-window multipass-mean noise spectral estimators. *IEEE Transac*tions on Aerospace and Electronic Systems, 2000; **36**(4): 1360—1370
- 5 Suojoki T, Tabus I. A novel efficient normalization technique for sonar detection, In: Proceedings of the 2002 International Symposium on Underwater Technology, 2002: 296—301
- 6 Carbone C P, Kay S M. A novel normalization algorithm based on the three-dimensional minimum variance spectral estimator. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2012; **48**(1): 430–448
- 7 李启虎,潘学宝,尹力.数字式声呐中一种新的背景均衡算法. 声学学报,2000;25(1):5—9
- 8 郑援,胡成军,李启虎,孙长瑜.一种多目标方位历程实时提取 方法.声学学报,2005;30(1):83—88
- 9 王晓宇,杨益新.一种新的宽带声呐波束域背景均衡方法.航海 工程, 2009; **38**(5): 181—185
- 10 陶剑锋,刘洪生.声呐数据动态显示算法研究.声学与电子工程, 2009(4): 35—38
- 11 Maragos P, Schafer R. Morphological filters—Part I: Their set-theoretic analysis and relations to linear shift-invariant filters. *IEEE Trans. Acoustics, Speech and Signal Pro*cessing, 1987; **35**(8): 1153—1169
- Maragos P, Schafer R. Morphological filters—Part II: Their relations to median, order-statistic, and stack filters. *IEEE Trans. Acoustics, Speech and Signal Processing*, 1987; 35(8): 1170—1184
- 13 Zhang Xiaoyong, Xiong Jinyu, Luo Sheng'en *et al.* Novel line spectrum frequency estimation method based on mathematical morphology filters. In: Proceedings of 2010 IEEE 10th International Conference on Signal Processing, Beijing, 2010; 3: 2415-2418