

# 多级背景均衡在多波束 LOFAR 处理中的应用

袁延艺<sup>1</sup>, 蒋小勇<sup>2</sup>, 杜选民<sup>2</sup>

(1. 复杂舰船系统仿真重点实验室, 北京 100000; 2. 上海船舶电子设备研究所, 上海 201108)

**摘要:** 被动声纳检测中背景均衡通常是沿着频率或者方位对噪声进行均值估计。为了提高多波束窄带检测能力, 需采用一种新的背景均衡方法来估计噪声的均值。针对水下目标辐射噪声的线谱横跨相邻多个波束, 将多级背景均衡应用到被动多波束窄带检测中。它是根据所选择的数据窗, 沿着频率和方位对多波束 LOFAR 图进行两维的背景均衡处理。该方法能够有效地抑制目标方位相邻波束线谱, 提高多波束 LOFAR 图中窄带信号检测能力。海试数据处理结果表明, 该方法不仅有效, 而且计算量小。

**关键词:** 被动声纳; 窄带检测; 背景均衡; LOFAR

中图分类号: U666.7 TN911.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2012)-03-0300-04

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2012.03.013

## Noise normalization technique in multi-beam LOFAR processing

YUAN Yan-yi<sup>1</sup>, JIANG Xiao-yong<sup>2</sup>, DU Xuan-min<sup>2</sup>

(1. Science and Technology on Complex Ship Systems Simulation Laboratory, Beijing 100000, China;

2. Shanghai Marine Electronic Equipment Research Institute, Shanghai 201108, China)

**Abstract:** In passive sonar, the noise normalization is usually implemented along frequency axis or azimuth axis. In order to improve the performance of the multi-beam narrowband detection, a new normalization technique needs to be taken for estimating the mean of noise. Because line frequency spectrum of radiated noise could leak into adjacent beams, a multi-stage normalization method is applied to passive narrowband detection. According to a selected window, noise normalization is implemented along frequency axis and azimuth axis of multi-beam LOFAR pictogram. This method can suppress leakage of line frequency spectrum among the adjacent beams and improve the detection performance of multi-beam LOFAR processing effectively. The results of sea-trial data processing show that the new noise normalization technique is effective.

**Key words:** passive sonar; narrowband detection; noise normalization; LOFAR

## 0 引言

海洋环境噪声在时间上的非平稳性和空间上的非均匀性导致海洋噪声背景在时间和空间上具有不同分布特性, 使得波束输出的能量在不同的时间、频率和方位上分布不同。因此, 在被动声纳检测中, 背景均衡处理是非常必要的。从信号检测理论的角度, 背景均衡是为了实现恒虚警(Constant False Alarm Ratio, CFAR)检测; 从显示和判决的角度, 背景均衡能降低背景噪声的起伏, 实现数据动态范围的压缩。W. A. Struzinski 和 E. D. Lowe 研究了 S3PM(Split Three-Pass Mean)、排序截断平均(Order Truncate Average, OTA)等四种背景均衡算

法, 并比较了各种算法的性能<sup>[1]</sup>。B. D. Jum 等人在此基础上对 S3PM 和 OTA 算法进行深入地分析, 并分别比较窗长、门限等参数对这两种算法性能的影响<sup>[2]</sup>。J. P. Kuhn 等人根据宽带干扰谱和窄带信号谱的自相关函数不同, 将自适应背景均衡算法应用于浅海多途环境下的噪声均值估计, 提高宽带干扰背景下窄带信号检测能力<sup>[3]</sup>。S. Stergiopoulos 提出了一种新的波束噪声归一化方法, 并分别对波束域和频域进行噪声均值估计; 该方法基于环境噪声具有一定的指向性<sup>[4]</sup>。李启虎等人将中值滤波和 OTA 相结合, 对波束域中非均匀、非平稳背景进行均衡处理<sup>[5]</sup>。这些方法仅沿着频率或者方位进行一维背景均衡, 并没有将频率和方位的信息联合考虑。D. R. Mogan 采用可分离的两维背景均衡对非平稳噪声背景进行估计<sup>[6]</sup>, 但该方法计算量大, 不易于工程使用。

被动声纳系统中, 多波束 LOFAR 图包含了丰

收稿日期: 2011-10-22; 修回日期: 2012-01-02

作者简介: 袁延艺(1971—), 男, 山东曹县人, 博士, 研究方向为水声信号处理、舰船系统仿真等。

通讯作者: 袁延艺, E-mail: yuanyanyi@sina.com

富的信息,不仅含有水下运动目标的速度或航迹等变化情况,而且还有助于水下运动目标的检测和识别<sup>[7]</sup>。因此,窄带检测处理常用多波束 LOFAR 图来进行分析。然而,由于背景噪声功率谱在不同时间、频率和方位上的差别很大,而且其数据的动态范围也不一致,因此为了提高多波束窄带检测能力,需要对多波束 LOFAR 图进行背景均衡处理。

本文将多级背景均衡应用到多波束窄带检测中,把一维背景均衡延伸到二维背景均衡,根据所选择的数据窗,沿着频率和方位对噪声进行均值估计。它能够有效地抑制目标方位线谱在相邻波束产生的线谱,剔除其它方位目标在目标方位形成的干扰线谱,提高了多波束 LOFAR 图中窄带信号检测能力。

## 1 一维背景均衡

潜艇、水面舰船、鱼雷等水下运动目标的辐射噪声谱由连续宽带噪声谱和叠加其上的若干离散线谱组成。由于其线谱具有一定的强度和稳定性,而且线谱的能量主要集中在低频段,在水中传播损失较小。因此,被动声纳中对水下运动目标辐射噪声进行窄带分析,可以有效地降低干扰,提高低信噪比下弱信号检测的能力,从而可以增大被动声纳的作用距离。此外,水下目标辐射噪声低频段的线谱包含丰富的信息,而且线谱特征常常作为被动声纳分类识别的重要判别依据。因此,窄带处理不仅可用于目标检测,而且还可用于目标的跟踪和识别。

一般情况下,海洋环境噪声在低频处的功率谱较大,而且随着频率的增加而减小。由于水下运动目标辐射噪声宽带谱的动态范围较大,且在各个频率分量上其目标辐射噪声谱是目标信号频谱叠加在噪声谱上,因此低频部分在目标辐射噪声谱中占主要成分,这就导致很难有效地检测弱的窄带信号。为了提高窄带信号的检测能力,压缩数据动态范围,消除宽带噪声谱的趋势项,通常需对水下运动目标辐射噪声谱进行背景均衡处理。

被动声纳窄带处理中,背景均衡通常仅对单一波束进行处理,即沿着频率对宽带噪声谱进行噪声均值估计。该算法的思想是尽可能降低信号的能量进入到所估计噪声均值中。它不仅有利于噪声背景中弱信号的检测,而且还可提高宽带噪声谱中高频成分检测能力。若  $X_k$  为  $k$  点频率值,  $\mu_k$  为  $k$  点的噪声均值,则背景均衡后宽带噪声谱  $N_k$  可表示为

$$N_k = X_k / \mu_k \quad (1)$$

## 2 多级背景均衡

多波束 LOFAR 谱图一般采用常规波束形成对接收的基元域信号进行预处理,然后对每个预成波束的输出分别进行 LOFAR 谱分析,最后将所得的多个波束的 LOFAR 谱图的结果按照每隔一定的高度来显示。由于常规波束输出的主瓣波束宽度较宽,且旁瓣较高,而且水下运动目标辐射噪声的窄带分量的能量较强,因此在多波束 LOFAR 谱图上,水下运动目标辐射噪声的线谱成分不仅出现在与目标方位对应波束的 LOFAR 谱图上,而且也出现在与目标方位相邻的多个波束的 LOFAR 谱图中。这对其它方位目标检测和识别产生干扰,而且声纳兵很难有效地根据多波束 LOFAR 谱图的信息判断水下运动目标的方位位于哪个波束,从而不利于目标的检测和识别。

针对多波束 LOFAR 谱图中强信号的线谱成分横跨多个波束的问题,文献[8]根据线谱的位置、线谱的强度等信息来判断线谱属于哪个波束,剔除其它方位目标在当前方位形成的干扰线谱以及目标方位线谱在相邻波束产生的线谱成分,提高了对目标检测和识别能力。本文采用多级背景均衡技术来对多波束 LOFAR 谱图进行处理。图 1 给出了多级背景均衡的原理框图。

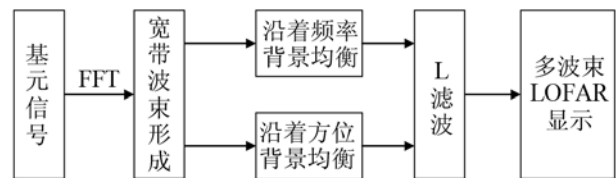


图 1 多级背景均衡原理框图

Fig.1 Block diagram of multi-stage noise normalization

多波束窄带处理中,背景均衡除了沿着频率进行分析外,还要考虑相邻波束之间关系,即要沿着方位进行噪声均值估计。也就是说,噪声均值估计需要将一维的背景均衡扩展到二维的背景均衡来处理。通常,二维的背景均衡技术是根据矩形窗或者十字窗内所有数据点来对窗的中心样本进行噪声均值估计。多级背景均衡源于图像处理中的多级滤波<sup>[9]</sup>,它是利用子窗内不同数据特性来对窗的中心样本进行噪声均值估计。相对于可分离二维背景均衡算法而言,该算法的性能较好,而且运算量不大,易于工程应用。

多级背景均衡可以看作是二维的背景均衡处理,它的思想是根据选择数据子窗,沿着频率和方

位分别对波束输出的数据进行归一化处理。本文多级背景均衡的数据子窗采用十字窗，则多级滤波输出<sup>[10]</sup>可表示为：

$$Y_k = LF(LF(hwin), LF(vwin), X_k) \quad (2)$$

式中： $X_k$  为子窗的中心样本； $hwin$  表示水平窗，沿着波束方向； $vwin$  表示垂直窗，沿着频率方向； $LF$  表示 L-滤波。通常 L-滤波可以采用中值滤波、截断均值滤波(TrMean)以及混合滤波(频域采用 OTA，波束域采用 TrMean)。考虑到其运算量，多级滤波采用截断均值滤波来进行噪声均值估计。为了压缩噪声均值的动态范围，需对多级滤波输出进行加权，其加权因子可表示为

$$w = [\frac{c}{2^m}, c, \frac{c}{2^m}] \quad (3)$$

式中： $c$  为常数， $m$  为正整数。根据式(2)和式(3)，噪声均值估计可表示为

$$\mu_k = wY_k \quad (4)$$

将式(4)所估计的噪声均值代入式(1)中，可以得到背景均衡后的多波束 LOFAR 谱图。

### 3 试验数据处理

所分析的数据为某海试数据，利用常规波束形成对其进行预处理，得到其波束输出，并对目标方位的波束输出进行谱分析，其中处理参数为采样频率 10 kHz，每个快拍处理的数据段长度为 8192 个采样点，数据更新 0.1 s。LOFAR 图中横轴表示频率，纵轴表示时间。出于保密的原因，以下各图中的具体时间和频率被省略。

图 2、图 3 和图 4 给出了多波束 LOFAR 图的试验数据处理结果，其中波束形成均采用常规波束形成。图 2~4 的多波束 LOFAR 图均是从 180 个波

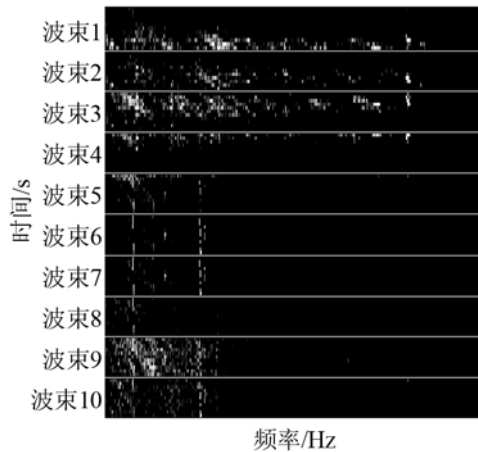


图 2 常规多波束 LOFAR  
Fig.2 Conventional multi-beam LOFAR

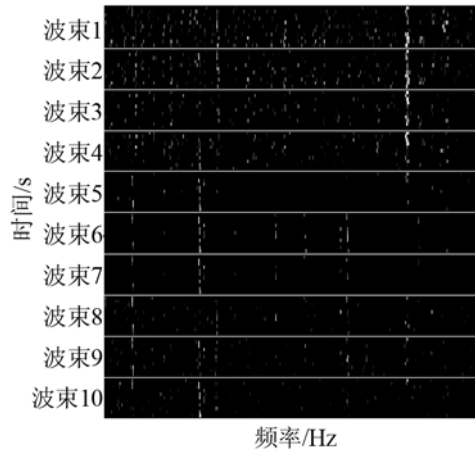


图 3 背景均衡多波束 LOFAR  
Fig.3 Multi-beam LOFAR with noise normalization

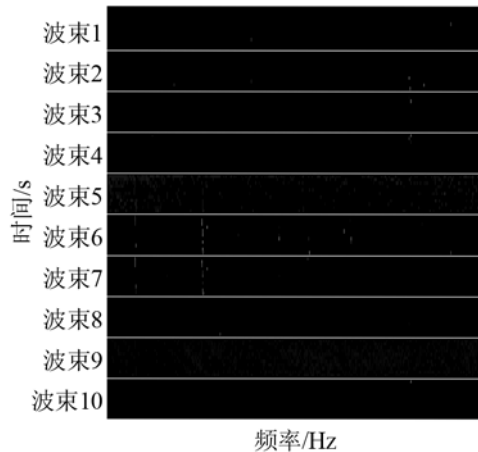


图 4 多级背景均衡多波束 LOFAR  
Fig.4 Multi-beam LOFAR with multi-stage noise normalization

束中连续地挑选 10 个波束来显示，且相邻波束之间相隔 5°。图 2 是直接对每个波束输出数据进行谱分析得到的多波束 LOFAR 图，图 3 是对图 2 进行一维背景均衡处理，从图中可以看出，目标方位在波束 6 附近，其线谱的能量最强。

对比分析图 2 和图 3 可知，经过背景均衡处理后，目标的高频线谱成分得以呈现，且其数据的动态范围缩小，从而有利于线谱的检测和跟踪。此外，在图 2 和图 3 的多波束 LOFAR 图中，目标的线谱不但出现在波束 6 附近的 LOFAR 图上，而且还出现在其它方位对应的 LOFAR 图上。图 4 的多波束 LOFAR 图是对图 2 进行多级背景均衡处理得到的，对比分析图 3 和图 4 可知，目标的线谱仅在波束 6 和波束 7 存在，而在其它相邻波束中线谱减少甚至没有。因此，对试验数据处理表明，多级背景均衡能有效抑制目标方位线谱在相邻波束产生的线谱成分，不仅有利于线谱检测和跟踪，而且有助于声纳兵根据多波束 LOFAR 图的信息判断目标方位。

## 4 结论

本文联合考虑波束输出的频率和方位信息,把一维背景均衡思想延伸到二维背景均衡,将多级背景均衡应用到多波束窄带检测来估计背景噪声均值。根据海试数据处理结果可知,多级背景均衡不仅提高多波束 LOFAR 图中线谱检测能力,而且运算量小,便于实际工程应用。

### 参 考 文 献

- [1] Struzinski W A, Lowe E D. A performance comparison of four noise background normalization schemes proposed for signal detection systems[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1984, **76**(6): 1738-1742.
- [2] Joo J H, Jum B D. The performance test of the background noise normalization in the narrow band detection[C]// UDT Europe, 2006.
- [3] Kuhn J P, Heath T S. Apparatus for and method of adaptively processing sonar data[P]. USA: US005481503A, 1996.
- [4] Stergiopoulos S. Noise normalization technique for beamformed towed array data[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1995, **97**(4): 2334-2345.
- [5] 李启虎, 潘学宝, 尹力. 数字式声纳中一种新的背景均衡算法[J]. 声学学报, 2000, **25**(1): 5-9.
- LI Qihu, PAN Xuebao, YIN Li. A new algorithm of background equalization in digital sonar[J]. ACTA Acustica, 2000, **25**(1): 5-9.
- [6] Morgan D R. Two dimensional normalization techniques[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1987, **12**(1): 130-142.
- [7] Waite A D, 王德石(译). 实用声纳工程(第三版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [8] 陈敬军. 被动拖线阵声纳目标检测和识别一体化开发[D]. 中国科学院声学研究所博士后出站报告, 2008.
- CHEN Jingjun. Development of the integration of target detection and identification in passive towed line array sonar[D]. Post-doctor Report of the Institute of Acoustics of Chinese Academy of Sciences, 2008.
- [9] Astola J, Kuosmanen P. Fundamentals of nonlinear digital filtering[M]. USA: CRC Press, 1997.
- [10] Suojoki T, Tabus I. A novel efficient normalization technique for sonar detection[C]// Proceedings of the 2002 International Symposium on Underwater Technology, 2002: 296-301.

---

## 中国科学院东海研究站仿生耳与声音技术实验室参加 ACOUSTICS 2012 HONGKONG 声学会议

2012年5月13日至2012年5月18日,2012香港声学会议(ACOUSTICS 2012 HONG KONG),在香港会议和展览中心举行。该会议由中国声学学会(ASC)、西太平洋声学委员会(WESPAC)、美国声学学会(ASA)和香港声学学会(HKIOA)共同主办,香港声学学会承办,为全球从事声学领域的工程师和科学家提供了良好的交流机会。

本次会议,东海站仿生耳与声音技术实验室随行14人,在语音信号处理,心理和生理声学等分会场作了4场口头报告及3篇海报展示。会议期间,实验室成员和与会的各国声学领域专家和学者在人工耳蜗技术、助听器技术、语音信号处理等方面进行深入的交流和讨论,对国内外相关科研技术的最新发展进行学习了解,增强了国际视野,活动取得了圆满成功。