# 一种基于线谱特征函数提取 LOFAR 图线谱的方法

李山1.2,王德俊1,王海斌1

(1. 中国科学院声学研究所声场声信息国家重点实验室,北京 100190;2. 中国科学院大学,北京 100190)

**摘要:**水声信号被动检测中广泛使用 LOFAR 图对接收信号进行处理和分析。针对 LOFAR 图中线谱信号检测问题, 根据线谱信号特征设计特征函数,提出频域滑动窗线谱特征累积检测法。该方法在频率轴移动观察窗,用多步决策 算法计算每个观察窗的最优解,得到最优路径,如果最优路径特征值大于阈值,则累积 LOFAR 图像素点被该最优路 径经过的次数,次数越多对应点为线谱点的概率越大。仿真研究表明,该方法对频率时变、低信噪比的线谱信号具 有良好的检测能力,可实现多根线谱的增强与检测。海试数据处理结果证明了该方法的可行性和稳健性。该算法对 于辐射线谱信号的水下目标远距离探测识别有较高的参考价值。

关键词:LOFAR 图,线谱特征;被动检测;线谱特征累积检测法

中图分类号: 文献标识码: A 文章编号: 1000-3630(2016)-04-0373-05 **DOI** 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2016.04.017

# An approach to lofargram spectrum line detection based on the spectrum line feature function

LI Shan<sup>1,2</sup>, WANG De-jun<sup>1</sup>, WANG Hai-bin<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: In field of passive signal detection, lofargram is widely used to process and analyze the received noise signal. Aiming at the problem of lofargram spectrum line detection, a new method named frequency domain accumulate detection algorithm based on spectrum line feature is designed. The key point of the method is moving observation window in the frequency axis; using the multistage decision algorithm to calculate the optimal solution of every window; and accumulating the counter of every image point. That is, if the function value of the optimal path is greater than threshold, then the counter of every image point on the optimal path increases one. The image point has higher probability to be a spectrum line point if the number of the point's counter is larger. Simulation research indicates that this method can detect several spectrum lines correctly when the SNR is low on the lofargram. The method is verified with sea trial data. So it is valuable in the field of remote detection of underwater radiant target.

Key words: lofargram, spectrum line feature, passive detection, frequency domain accumulate detection algorithm

# 0 引 言

水声被动探测和目标识别领域中,线谱信号由 于具有相对较高的信噪比并携带声源特征信息,长 期以来一直被广泛研究和应用于水声工程实践。如 吴国清等利用谱峰形状特点,给出了一套线谱识别 逻辑<sup>[1]</sup>; 陈敬军等提出模仿声呐员识别线谱过程的 基于人工智能的线谱检测技术<sup>[2]</sup>; 陈阳等提出一种

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11434012,41561144006)

通讯作者: 王海斌, E-mail: whb@mail.ioa.ac.cn

基于频率方差加权的线谱目标检测方法——常规 波束形成(Conventional BeamForming, CBF)频率方 差检测器<sup>[3]</sup>; 丛超等对常规型间歇混沌振子列检测 方法进行改进,提出了一种基于适应步长型间歇混 沌振子的信号检测方法<sup>[4]</sup>。基于混沌振子的研究目 前比较热,但是基于混沌振子的线谱检测有一定局 限性,常规方法需要已知线谱频率信息,丛超改进 方法也需要先知道线谱的范围,这使该方法检测低 信噪比信号的能力较差。

近年来,随着减振降噪技术的不断进步,水中 目标的辐射噪声大幅减弱,探测阵列的接收信号信 噪比越来越低,线谱分量在背景噪声场中亦越来越 弱,更加容易受到目标运动、信道效应、相干及非 相干干扰和背景起伏等因素影响,出现线谱展宽、

收稿日期: 2015-10-20; 修回日期: 2016-01-10

作者简介: 李山(1990一), 男, 江西赣州人, 硕士研究生, 研究方向为线 谱信号检测技术。

时强时弱甚至线谱轨迹中断破碎等问题,造成线谱 的增强与提取困难。因此,提高低信噪比情况下的 线谱信号增强与检测跟踪能力,成为当今水声信号 处理技术中一个重要的热点和难点。

LOFAR 图一直是水声被动探测和目标识别领域中一种重要的研究手段。LOFAR 图是对信号做时频谱分析得到的功率谱时间历程图,它反映信号在时、频两个维度上的功率谱分布及变化情况。 LOFAR 图线谱处理技术研究主要采用图像处理、神经网络和统计模型三类方法,其中图像处理算法大多数基于人类视觉模型,模仿操作员进行检测和识别处理,在这个领域已经有了大量研究成果。

1992 年 Abel 等提出基于统计似然比理论的线 谱提取方法<sup>[5]</sup>,这种方法需要信号和噪声的先验概 率分布信息,且该方法只适用于近似稳定线谱情 况。1993年 Di Martino 等提出基于线谱特征的代价 函数的最优路径搜索算法<sup>[6]</sup>,仿真结果表明该算法 可以降低噪声并提高线谱检测概率,但是该算法只 能检测单根线谱,在实际应用中有很大局限性。 1997 年, Claude 等基于概率数据关联模型 (Probability DataAssociation, PDA)和动态规划的原 则提出了一种新的线谱提取算法<sup>[7]</sup>,该算法可处理 最低谱级信噪比为 4 dB 的信号。2000 年 Chen 等利 用双通过分离窗(Two-Pass Split-Windows, TPSW) 提取线谱图像<sup>[8]</sup>,该算法实质是一种图像滤波技术, 可以检测高度不规则时变线谱信号,但是在处理低 信噪比信号时性能较差。2004 年 Gillespie 提出利用 高斯滤波器平滑 LOFAR 图的边缘检测算法<sup>[9]</sup>,该算 法对低信噪比线谱的检测概率比较低。总之,低信 噪比条件下的多线谱检测始终是一个值得深入研 究的课题。

本文在线谱特征函数<sup>[6]</sup>的理论基础上,提出一 种新的线谱检测算法,开展仿真研究和海试数据验 证研究,可以实现低信噪比条件下多根频率时变线 谱的增强与检测。

### 1 频域滑动窗线谱特征累积检测法

LOFAR 图中的线谱分量具有线谱强度局部极 大、连续、缓慢变化等基本特征;而 LOFAR 图中 的背景噪声强度具有随机性,其形成的亮点在时间 和频率上都不具有连续性。本文基于线谱和噪声谱 在 LOFAR 图中的不同特征,构建 LOFAR 图中积 分路径的线谱特征函数,提出频域滑动窗线谱特征 累积检测法。该方法在 LOFAR 图中设置一个移动 窄带观察窗,在观察窗中根据线谱特征函数寻找最 优路径。当特征函数积分路径经过噪声点时,特征 函数值较小;当路径靠近线谱时,特征函数值增大; 当路径经过线谱时,特征函数达到极大值。在窄带 观察窗中,将特征函数取极大值的路径作为待检测 线谱;移动窄带观察窗,得到每个位置观察窗的最 优路径;最后累积 LOFAR 图像素点被最优路径经 过次数得到线谱增强图。该方法实现了低信噪比多 根线谱信号的增强和检测。

#### 1.1 线谱特征函数

定义线谱特征函数如下:

$$\rho(\xi) = \frac{A(\xi)}{\alpha \cdot G(\xi) + \beta \cdot C(\xi) + \gamma}, \quad (\gamma \neq 0)$$
(1)

式(1)中:  $\xi$ 表示 LOFAR 图观察窗中的一条积分路 径;路径长度设为 N;路径上的每个像素点依次设 为  $P_i(1 \le i \le N)$ ;  $A(\xi) \ C(\xi) \ G(\xi)$ 分别表征线谱的 强度特性、频率连续性、轨迹连续性特征;  $\alpha \ \beta$ 、  $\gamma$  为三个权系数。 $A(\xi) \ C(\xi) \ G(\xi)$ 的定义式分 别为:

$$A(\xi) = \sum_{i=1}^{N} a(P_i) \tag{2}$$

$$d(P_i, P_{i+1}) = f(P_i) - f(P_{i+1})$$
(3)

$$C(\xi) = \sum_{i=2}^{N-1} |d(P_{i-1}, P_i) - d(P_i, P_{i+1})|$$
(4)

$$g(P_i) = \begin{cases} 1, & a(P_i) = 0\\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$
(5)

$$G(\xi) = \sum_{i=1}^{N} g(P_i) \tag{6}$$

式(2)中,  $P_i$ 的幅值为 $a(P_i)$ ,它所在频率值为 $f(P_i)$ ; 式(3)中, $d(P_i, P_{i+1})$ 表示路径前后两点的频率梯度; 式(5)中, $g(P_i)$ 是一个标记变量,如果 $P_i$ 是断点则 记为1,否则为0; $a(P_i)=0$ 表示此处出现断点,可 以根据实际情况把LOFAR 图中幅值低于一定门限 的点设为断点,门限一般设为噪声均值。

当路径接近或者经过谱线时,路径上点的幅值 之和增大,断点数减少,频率差减小,即 $A(\xi)$ 增大,  $C(\xi)$ 和 $G(\xi)减小,特征函数 \varphi(\xi)增大。在观察窗$  $中,使 <math>\varphi(\xi)$ 为最大值时的路径为最优路径。

#### 1.2 线谱检测过程

由上述分析可知,线谱检测过程中需要在 LOFAR 图观察窗中寻找一条路径,使上述特征函 数值最大。寻找最优路径可采用多种搜索算法,以 降低计算量。本文利用多步决策算法<sup>[10]</sup>,它是一种 动态规划算法,主要思想是用局部最优解代替全局 最优解。本文中由该算法先得到局部最优路径,通 过比较局部最优路径得到全局最优路径。具体步骤 为:

(a) 如图 1 所示,时间轴长度为 N,起点为 t<sub>1</sub>,终点为 t<sub>N</sub>,频率轴长度为 L,起点为 f<sub>1</sub>,终点为 f<sub>L</sub>。

(b) 为图中每一点 P 定义一个三元变量  $[A(\xi_p^*), C(\xi_p^*), G(\xi_p^*)], 其中\xi_p^* 为从 t_1 行中某一起始$ 点到 <math>P 的最优路径。

(c) 初始化  $t_1$ 行每个点 *P* 的三元变量 [ $A(\xi_p^*), C(\xi_p^*), G(\xi_p^*)$ ]为[0, 0, a(P)]。

(d) 从 $t_2$ 行到 $t_N$ 行,逐行找到长度从 2 到 N 的 最优路径。具体过程如图 1 所示:设 $P_i(2 \le i \le N)$ 为 $t_i$ 行任意一点,在 $t_{i-1}$ 行中与 $P_i$ 邻近的 $k(1 \le k \le L)$ 个点 组成一个集合 $V(P_i)$ ,即 $V(P_i) = \{P_{i-1}^1, \dots, P_{i-1}^k\}$ ,则到 $P_i$ 长度为i的最优路径可以表示成到 $P_{i-1}^j(1 \le j \le k)$ 长度 为i-1的最优路径再到 $P_i$ ,即 $\xi_{P_i}^* \cup \{P_i\}$ 。 $\xi_{P_i}^*$ 为 $\varphi(\xi_{P_i}^* \cup \{P_i\})$ 取最大值时的路径,即

 $\varphi(\xi_{P_i}^*) = \operatorname{MAX}_{P_{i,j}^j \in V(P_i)} \varphi(\xi_{P_{i,j}^*}^* \cup \{P_i\}) \circ$ 



Fig.1 The process of the multistage decision algorithm in observation window

用以上步骤从 $t_2$ 行到 $t_N$ 行逐行计算,观察窗内 长度为N的最优路径满足 $\varphi(\xi^*)=MAX_{1\leq j\leq L} \varphi(\xi^*_{P_N})$ ,  $\xi^*$ 为观察窗内的最优路径。

通过上述多步决策算法计算,如果将观察窗设 为 LOFAR 图,则只能得到一条最优路径,仅能检 测单根谱线。本文提出的频域滑动窗线谱特征累积 检测法,使用了移动窄带观察窗。水听器接收的线 谱信号,其频率变化由目标辐射信号的频率变化和 多普勒频移决定,一般在短时间内相对变化不大, 即在 LOFAR 图中一根线谱可以用一个窄带窗覆 盖。因此可以设置窄带移动观察窗(见图 2),在观 察窗内寻找最优路径,每个观察窗可以得到一条最 优路径; 然后用累积的方法,对每个 LOFAR 图像 素点被最优路径经过的次数进行计数,最后得到线 谱增强图。频域滑动窗线谱特征累积检测法具体步 骤如下:

(a) 如图 2 所示, M 为 LOFAR 图频率轴长度, 设窄带移动观察窗频率轴长度为  $L(1 \le L \le M)$ ,观察 窗起始位置左侧频率为  $f_1$ ,右侧频率为  $f_L$ ,移动步 长为 1;终止位置左侧频率为  $f_{M-L+1}$ ,右侧频率为  $f_M$ ;同时为 LOFAR 图中每个点设置一个计数器, 计数器计数值初始化为 0。

(b) 对每个位置的观察窗,用上述多步决策算 法计算得到该观察窗内的最优路径。如观察窗处于 起始频率为  $f_i(1 \le i \le M - L + 1)$ ,终止频率为  $f_{i+L-1}$ 位 置,在观察窗内计算得到最优路径  $\xi_{P_N}^*$ ,  $P_N$ 表示此 时观察窗内最优路径的终止点,  $\{P_1, \dots, P_N\}$  为该最 优路径上的 N 个点,该路径特征值为  $\varphi(\xi_{P_N}^*)$ ,与观 察窗此时位置对应,用  $\varphi(f_i)$ 表示;如  $\varphi(f_i)$ 大于由 环境噪声 LOFAR 图计算得到的门限值  $d_0$ ,则最优 路径上 N 个点对应的计数器计数值分别加 1。

(c) 移动观察窗,重复步骤(b),直至观察窗终止位置。

(d) 输出计数值图,该图为线谱增强图;输出 观察窗的最优路径特征值 $\varphi(f_i)$ ,如 $\varphi(f_i) > d_0$ ,则判 定在频率 $f_i$ 附近存在线谱,该方法可实现线谱检 测。为表示方便,用变量f表示观察窗起始频率位 置,则输出观察窗的最优路径特征值用 $\varphi(f)$ 表示。



由上述步骤可知,计数器计数值表示特征值大 于 $d_0$ 的最优路径经过该点的次数,其最大值为L, 最小值为0。因为卡门限处理,大部分噪声点计数 值为零,而线谱点计数值相比噪声点计数值较大, 从而使线谱增强;同时,由上述特征函数设定可 知, $\varphi(f)$ 使输出信噪比增大,通过设定阈值可实 现线谱自动检测;从算法复杂度分析,该算法的计 算次数为: $(M-L)\cdot L^2 \cdot N$ , L取值较小,所以复杂度 近似为: $O(M \cdot N)$ ,计算量较小。

# 2 仿真研究

由于实际应用中接收到的大部分水下目标辐射信号频率是时变的,为了模拟接收信号频率时变 特性,仿真使用 LFM 信号。

设输入信号为 $f_1$ =100~105 Hz 和 $f_2$ =120~125 Hz 的 LFM 脉冲,脉冲宽度 T=100 s,采样率 $f_s$ =4 kHz, 干扰输入为全带宽高斯白噪声,谱级信噪比 SNR= -1 dB(全带宽信噪比-34 dB),通过短时傅里叶变换 计算得到 LOFAR 图,傅里叶变换窗长度为 1 s,数 据重叠率为 40%。最优路径算法观察窗长度 M=5, 即观察窗频率长度为 5 Hz。图 3 为 LOFAR 图,图 4 为频域滑动窗线谱特征累积检测法输出线谱增强 图,图 5 为噪声归一化处理后的 $\phi(f)$ 等效输出"频 谱"图,其值用 $\overline{\phi(f)}$ 表示为

$$\overline{\phi(f)} = 10 \lg \left| \frac{\phi(f) - \phi_n}{\delta_n} \right|$$
(7)

式(7)中:  $\overline{\phi_n}$  为对噪声 LOFAR 图相同处理后得到的 特征函数平均值(蒙特卡洛仿真计算 1000 次噪声 LOFAR 图的特征函数值 $\phi_n$ ,取平均),  $\delta_n$  为 $\phi_n$ 的方 差。







图 5 噪声归一化后的 φ(f) 等效输出"频谱"图(SNR=−1 dB)
 Fig.5 The equivalent output spectrum of φ(f) after noise normalization from LFM signal simulation

从仿真实验结果可知,上述算法可抑制噪声, 增强线谱,检测出多根谱级信噪比为-1 dB 的 LFM 线谱。同时通过该算法能得到  $\phi(f)$  图,从该图可知 该线谱检测算法有较大处理增益。

# 3 海试数据处理

2012年5月中国科学院声学研究所在某海域进行了一次海上试验,试验采用水平阵接收信号,被测目标在多种距离和方位上运动。图6为海上试验过程中接收的目标辐射噪声信号的LOFAR图。采用本文频域滑动窗线谱特征累积检测法对该数据进行处理,得到线谱增强图(见图7)和等效输出"频谱"图(见图8)。



图 6 目标辐射噪声信号 LOFAR 图 Fig.6 Lofargram of the target radiated noise signal

在 LOFAR 图(图 6)中,由于信噪比低,人为直 观识别仅发现图中左侧的一根线谱较为明显。使用 频域滑动窗线谱特征累积检测法对 LOFAR 图处理 之后(见图 7),大部分噪声被抑制,多根频率时变的 线谱分量被增强;且在信噪比较低时效果仍然较好 (见图 7 左侧第一根谱线和右侧第一根谱线);经与 目标线谱的实际情况比对,被增强提取的线谱与实 际线谱一致。从图 8 可见,各线谱都有一个谱峰, 通过  $\phi(f)$  曲线可实现线谱信号的自动检测。以上海 试数据计算结果表明,本文线谱检测算法效果良 好,具有一定的实用性。



图 7 线谱增强图 Fig.7 Line-spectrum enhanced figure from sea trial





Fig.8 The equivalent output spectrum of  $\phi(f)$  after noise normalization from sea trial

## 4 结论

针对 LOFAR 图中线谱信号的检测问题,本文 基于线谱信号的特征,设定线谱信号特征函数,提 出频域滑动窗线谱特征累积检测法。该算法检测低 信噪比窄带噪声信号能力良好,可检测 LOFAR 图 中谱级信噪比-1 dB 以上的线谱信号。 本文算法可实现多根线谱的增强与检测。仿真 研究表明,该算法对低信噪比的多根线谱信号具有 较好的线谱增强效果,可明显提高对线谱的检测能 力,并且计算量较小。海试数据分析处理结果证明 了该算法的可行性。该算法对于水下辐射线谱目标 的远距离探测识别具有较好的应用参考价值。

#### 参考文献

- 吴国清,李靖. 舰船噪声识别(I): 总体框架,线谱分析和提取[J]. 声学学报,1998,23(5):394-400.
   WU Guoqing, LI Jing. Ship radiated-noise recognation(I): the overall framework, analysis and extraction of line-spectrum[J]. Acta Acustica, 1998, 23(5): 394-400.
- [2] 陈敬军,陆佶人,刘淼. 基于人工智能的线谱检测技术[J]. 船舶工程, 2004, 26(3):68-71.
   CHEN Jingjun, LU Jiren, LIU Miao. A technique of line-spectrum

detection based on arificial intelligence[J]. Ship Engineering, 2004, **26**(3): 68-71.

- [3] 陈阳, 王自娟, 朱代柱, 等. 一种基于频率方差加权的线谱目标检测方法[J]. 声学学报, 2010, 35(1): 76-80.
   CHEN Yang, WANG Zijuan, ZHU Daizhu, et al. A detecting method for line-spectrum target based on variance-of-frequency weight[J]. Acta Acustica, 2010, 35(1): 76-80.
- [4] 丛超,李秀坤,宋扬. 一种基于新型间歇混沌振子的舰船线谱检测 方法[J]. 物理学报, 2014, 63(6): 168-179.
   CONG Chao, LI Xiu-Kun, SONG Yang. A method of detecting line spectrum of ship-radiated noise using a new intermittent chaotic oscillator[J]. 2014, 63(6): 168-179.
- [5] Abel J S, Lee H J, Lowell A P. An image processing approach to frequency tracking[C] // Proceedings of the IEEE international Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1992(2): 561-564.
- [6] Di Martino J C, Haton J P Laporte A. Lofargram line tracking by multistage decision process[J]. IEEE, 1993(1): 317-320.
- [7] Claude Jaufferet, Damien Bouchet. Frequency line tracking on a lofargram: an efficient wedding between probabilistic data association modelling and dynamic programming technique[J]. 1058-6393/97 IEEE, 1997(1): 486-490.
- [8] Chen C H, Lee J D, Lin M C. Classification of underwater signals using neural networks[J]. Tamkang J Sci Eng, 2000, 3(1): 31-48.
- [9] Gillespie D. Detection and classification of right whale calls using an 'edge' detector operating on a smoothed spectrogram[J]. Can Acoust, 2004, 32(2): 39-47.
- [10] Bellman R, Dreyfus S. Applied dynamic programming[M]. Princeton U. Press, Princeton, N.J.,1.