第 30 卷第 2 期　　　　声 学 技 术　　　　Vol.30, No.2
2011 年 4 月　　　　Technical Acoustics　　　　Apr., 2011

基于广义高斯噪声模型的低频线谱检测

杨秀庭[1]，曹 涛[2]，李 敏[3]

(1. 海军大连舰艇学院作战指挥系，辽宁大连 116018；
2. 海军装备部电子部，北京 100841；3 空军指挥学院后勤装备系，北京 100081)

摘要：研究浅海环境噪声中低频线谱的检测问题。首先对实测海洋环境噪声的统计特性进行分析，提出了应用广义高斯分布对海洋环境噪声建模方法。在此基础上，针对低频线谱检测问题，推导了广义高斯噪声场中的最大似然检测器和渐近检测器，给出了弱线谱条件下线谱频率的最大似然估计。最后，利用实测数据对三种检测器的线谱检测性能进行了验证，结果表明：噪声模型准确度对检测器性能具有重要影响，广义最大似然检测器最佳，渐近检测器次之，相关检测器最差。

关键词：广义高斯分布；线谱检测；最大似然估计

中图分类号：TB55　　　　**文献标识码**：A　　　　**文章编号**：1000-3630(2011)-02-0129-04

DOI 编码：10.3969/j.issn1000-3630.2011.02.004

Low frequency line spectrum detection based on generalized Gaussian noise model

YANG Xiu-ting[1], CAO Tao[2], LI Min[3]

(1. *Department of Operational Commands, the Navel Academy of PLA*, *Dalian* 116018, *Liaoning*, *China*;
2. *Electronic Subordinate of Naval Armanents Department, Beijing* 100841, *China*;
3. *Department of Logistic Equipments*, *Air Command Academy*, *Beijing* 100081, *China*)

Abstract: The problem of line spectrum detection in shallow water is investigated in this paper. The statistics of ambient noise recorded in sea trials is firstly analyzed by distribution fitting and Kolmogorov-Smirnov test, and the generalized Gaussian distribution is proved to be an appropriate model for ambient noise modeling. Thereafter, the generalized maximum likelihood detector (MLD) and asymptotic detector are deduced and the maximum likelihood estimation of frequency is proposed under the assumption of weak signal. The performances of three types of line spectrum detectors have been verified by simulation, and the results show that the accuracy of noise model plays an important role for signal detection and the MLD is an optimal one for line spectrum detection in ambient noise.

Key words: generalized Gaussian distribution; Line spectrum detection; maximum likelihood estimation

0 引 言

水下环境噪声的来源很多，地壳运动、行船、风雨、海洋生物、工业活动，甚至海水分子的热运动都会对环境噪声产生影响，在不同的频段上决定噪声谱的强度[1]。环境噪声的这种多源性，导致其时空统计特性非常复杂，在不同的季节和海域，其统计特性通常会存在较大的差异。根据中心极限定理，如果影响因素甚多，则其统计特性应趋于高斯分布，但事实上，水下环境噪声通常是偏离高斯假设的[2]。

以高斯噪声假设为基础的传统信号检测理论，一般较为适用于深海应用背景。浅海环境噪声的非高斯性，会导致声纳检测性能的降低。因此，建立适用于浅海环境噪声的统计模型，对于优化声纳信号处理技术，提高声纳浅海作战使用性能，具有重要的作用。

本文将分析浅海环境噪声的实际统计特性，建立概率统计模型，并以此为基础，讨论低频线谱检测器。

1 浅海环境噪声的统计特性

由于水下环境噪声的来源甚多，只要这些来源在强度上不是独占性的，那么其统计特性通常可用广义高斯模型来描述[1]。

对于均值为 μ、标准离差为 σ、拖尾控制参数为 c 的广义高斯分布，其概率密度函数为[1]：

收稿日期: 2010-04-20; **修回日期**: 2010-07-10
基金项目: 博士后基金资助项目(20090461462)
作者简介: 杨秀庭(1973-), 男, 浙江金华人, 工学博士, 副教授, 研究方向为水声信号处理, 水下作战仿真。
通讯作者: 杨秀庭, E-mail: yangxiuting@yahoo.com.cn

$$f(x)=Ae^{-(a|x-\mu|)^c} \tag{1}$$

式中，方差控制常数 a 和幅值常数 A 为：

$$\begin{cases} a=\dfrac{1}{\sigma}\left(\dfrac{\Gamma(3/c)}{\Gamma(1/c)}\right)^{1/2} \\ A=\dfrac{ac}{2\Gamma(1/c)} \end{cases} \tag{2}$$

其中，$\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数，定义为：

$$\Gamma(x)=\int_0^{+\infty} e^{-t}t^{x-1}\mathrm{d}t \tag{3}$$

图 1 是均值为 0、标准方差为 1 且拖尾控制参数 c 不同取值时广义高斯分布的概率密度函数。从图 1 可知：当 $c=2$ 时，概率密度函数为标准的高斯函数；c 取值越小，概率密度函数的峰越尖，噪声的冲击性越强(如 $c=0.8$)；c 取值越大，对应的峰越平缓，渐趋于均匀分布(如 $c=20$)。

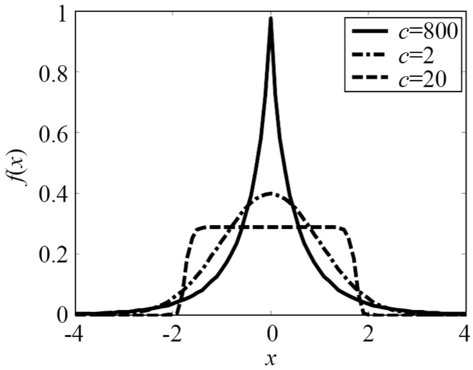

图 1　广义高斯分布的概率密度函数(μ=0, σ=1)

Fig.1　Probability density function of generalized Gaussian distribution with zero mean and unit standard variance

下面采用广义高斯分布对浅海环境噪声的统计特性进行分析。环境噪声数据为 2004 年 12 月在某海区(水深不大于 90m)海试期间采用标准水听器采集，水文气象条件良好(晴，微风轻浪，海水为全深度等温层)。数据通带：10~1000Hz，采样频率：5000Hz，分析选用数据长度：30s，结果如图 2 和图 3 所示。由图 2 可见，广义高斯噪声可以很好地

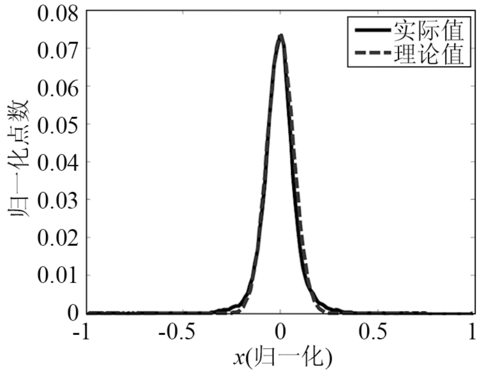

图 2　基于广义高斯分布的数据拟合结果(μ=0, σ=0.32, c=2.2)

Fig.2　Curve fitting result based generalized Gaussian distribution assumption(μ=0, σ=0.32, c=2.2)

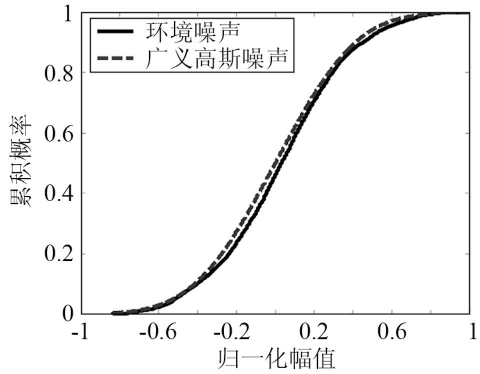

图 3　环境噪声的累积概率分布(测量数据与理论预测)

Fig.3　Cumulative distribution function of ambient noise (comparison of measured result and theoretical prediction)

描述环境噪声的统计特性，概率分布函数的均值、方差和拖尾控制参数可由最大似然估计方法得到。图 3 为噪声幅值分布的累积概率函数，接受显著性水平为 0.01 的 Kolmogorov-Smirnov 检验[3]。

因此，采用广义高斯分布对环境噪声统计特性建模是合理的，该模型可以兼容最常用的高斯噪声假设，同时还可通过调整模型参数，使之兼容温暖水域常见的冲击性噪声[2]。此外，由于广义高斯分布的概率密度函数存在解析形式，因此，可获得封闭形式的最佳检测器。

2　似然比检测

根据传统的信号检测理论，单水听器的信号检测模型为：

$$\begin{cases} H_0: x(t)=w(t) \\ H_1: x(t)=s(t)+w(t) \end{cases} \tag{4}$$

式中，$x(t)$、$s(t)$ 和 $w(t)$ 分别为水听器的接收数据、信号和纯噪声；H_0 为水听器接收的是纯噪声，H_1 为水听器接收数据中同时含有信号和噪声。

根据上述环境噪声统计特性分析，并为数学处理方便，假设：环境噪声服从广义高斯分布，样本集满足独立同分布(Independent Identical Distribution, I.I.D)条件。

对 N 个独立的随机样本，将其写为向量形式：

$$\boldsymbol{r}=[x(1), x(2), \cdots, x(N)]^{\mathrm{T}} \tag{5}$$

则该数据向量的联合概率密度函数为：

$$f(\boldsymbol{r})=\prod_{n=1}^{N} f(x(n)) \tag{6}$$

进而，可得似然比检测器[4]为：

$$l(\boldsymbol{r})=\frac{\prod_{n=1}^{N} f(\boldsymbol{r};H_1)}{\prod_{n=1}^{N} f(\boldsymbol{r};H_0)} \to \begin{cases} \geq\gamma, \to H_1 \\ <\gamma, \to H_0 \end{cases} \tag{7}$$

式中，$l(x)$ 为 M 维数据向量所决定的似然比，f_M 为联合概率密度函数，γ 为判决门限。

若环境噪声的概率密度函数已知，根据独立同分布假设和似然比检测，可推导最佳检测器。

3　线谱检测

水下目标辐射噪声中的低频线谱难以消除，且具有良好的稳定性[5]，已成为水声工程领域的重要研究内容。提高线谱的检测概率，不仅有助于增大低频被动声呐的作用距离[6,7]，同时还可提高目标的正确识别率。下面具体推导广义高斯噪声中低频线谱检测器。

由式(4)，离散形式的线谱检测模型为：

$$\begin{cases} H_0{:}x[n]=w[n] \\ H_1{:}x[n]=A\sin(2\pi fn+\phi)+w[n]=s[n]+w[n] \end{cases} \tag{8}$$

式中：A、f 和 ϕ 分别为线谱信号的幅值、归一化频率($f=f_0/f_s$ ， f_0 和 f_s 为信号频率和采样频率)和初相； $w[n]$ 为环境噪声序列。

3.1　最大似然比检测器

根据 I.I.D 假设，似然比函数为：

$$l(\boldsymbol{r})=\frac{\prod_{n=1}^{N} f(x[n]-s[n])}{\prod_{n=1}^{N} f(x[n])} \tag{9}$$

代入广义高斯概率密度函数，经整理可得线谱检测的检验统计量为：

$$T(\boldsymbol{r})=\sum_{n=1}^{N}\left\{|x[n]|^c-|x[n]-s[n]|^c\right\} \tag{10}$$

3.2　渐近检测器

当线谱为微弱信号时，可对式(10)作进一步化简，得到渐近检测器。

由于 A=1，则有

$$|x[n]-s[n]|^c \approx |x[n]|^c - c\,\mathrm{sgn}(x[n])|x[n]|^{c-1} s[n] \tag{11}$$

把式(11)代入式(10)，并略去常数 c ，有

$$T(\boldsymbol{r})\approx\sum_{n=1}^{N}\mathrm{sgn}(x[n])|x[n]|^{c-1} s[n] \tag{12}$$

需要指出的是，当运用式(10)、(12)检测未知线谱时，必须先估计线谱的相关参数，此时通常可采用最大似然准则[4]。

图 4 给出了虚警概率为 10^{-4} 时相关检测器(Maximum Likelihood Detector in Gaussian Noise, MLDG, 高斯噪声中的最佳检测器)、最大似然检测器(Maximum Likelihood Detector in Generalized Gaussian Noise, MLDGG)和渐近检测器(Asymptotic Detector in Generalized Gaussian Noise, ADGG)的线谱检测性能。从图中可见，当信噪比较低时，三种检测器均无法正确估计线谱频率，线谱检测性能较差。当信噪比增大时，最大似然检测器性能最佳，渐近检测器次之，相关检测器最差，这主要是因为环境噪声模型失配造成的。由此可见，环境噪声建模的准确性将影响到线谱的检测性能。

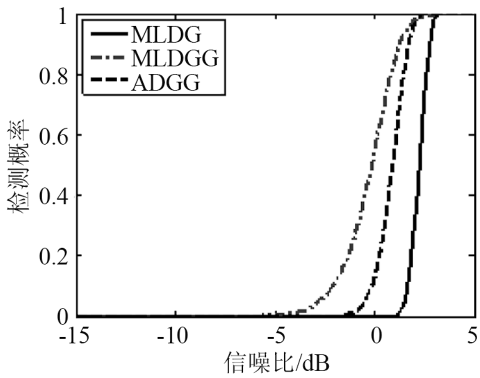

图 4　广义高斯噪声场中线谱的检测性能($P_{fa}=10^{-4}$)

Fig.4　Detection performance of line spectrum detectors in generalized Gaussian noise ($P_{fa}=10^{-4}$)

3.3　弱线谱的频率估计

对于低频线谱的被动检测，通常只关心线谱频率的估计。在幅值和初相估计的基础上，可推导线谱频率的最大似然估计

$$\hat{f}=\arg\max\frac{I_g(f)}{\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}|x[n]|^{c-2}} \tag{13}$$

式(13)推导过程详见附录 **A**。式(13)等式右侧的统计量与高斯噪声情况的周期图类似，称为广义周期图。通过广义周期图的峰值搜索，可获得频率的最大似然估计。

采用仿真手段检验式(13)中频率检测器的性能：在实测环境噪声中混入低频线谱(f=50 Hz，信噪比为 5 dB)，积分时间 0.5 s(样点数为 2500)，分别

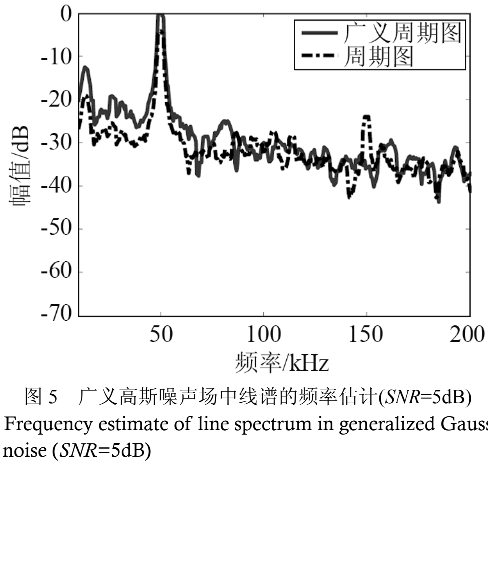

图 5　广义高斯噪声场中线谱的频率估计(SNR=5dB)

Fig.5　Frequency estimate of line spectrum in generalized Gaussian noise (SNR=5dB)

采用周期图和广义周期图估计线谱频率，结果如图5所示。

从图5可知，由于环境噪声(拖尾控制参数$c=2.2$)的统计特性与高斯分布较为接近，模型失配的影响并不明显，此时两种检测方法的频率估计性能基本相同，广义周期图略优。

4 结 论

本文通过对实测海洋环境噪声数据的统计特性进行分析，验证了广义高斯分布在海洋环境噪声建模的适用性。在此基础上，推导了低频线谱检测的广义最大似然检测器和渐近检测器。基于实测数据的线谱检测仿真结果表明：最大似然检测器具有最佳的检测性能，渐近检测器次之，由于噪声模型失配，相关检测器的线谱检测性能最差。此外，未知线谱频率的广义最大似然估计，可由广义周期图的峰值搜索获得。

参 考 文 献

[1] Nielson P A, Thomas J B. A comparison of parameter and non-parameter detector perform levels in underwater noise[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1990, **87**(1): 225-236.

[2] Chitre M A, Potter J R, Ong S H. Optimal and near-optimal Signal detection in snapping shrimp dominated ambient noise[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, **31(2)**, 2006: 497-503.

[3] 吴翊，胡庆军，李永乐. 应用数理统计[M]. 湖南长沙：国防科技大学出版社, 1995.
WU Yi, HU Qingjun, LI Yongle. Applied mathematical statistics[M]. Press of National University of Defense Technology, Changsha, Hunan Province, 1995.

[4] Kay S M. Fundamentals of Statistical Signal Processing: Estimation Theory[M]. Prentice Hall PTR, New Jersey, USA, 1993.

[5] 李启虎，李敏，杨秀庭. 水下目标辐射噪声中单频信号分量的检测:数值仿真[J]. 声学学报, 2008, **33**(4): 289-293.
LI Qihu, LI Min, YANG Xiuting. Detection of line spectrum in radiated noise of underwater target: Numerical simulations[J]. Acta Acoustica, 2008, **33**(4): 289-293.

[6] 陈敬军，陆佶人. 被动声纳线谱检测技术的现状与发展[J]. 声学技术, 2004, **23**(1): 57-60.
CHEN Jingjun, LU Jiren. The circumstance and development of techniques for line spectrum detection of passive sonar[J]. Technical Acoustics, 2004, **23(1)**: 57-60.

[7] 刘科满，相敬林. 起伏背景下目标噪声线谱检测与频率估计[J]. 声学技术, 2008, **27**(5): 746-749.
LIU Keman, XIANG Jinglin. Dection and frequency estimation of Line spectrum in radiated noise of underwater target in the fluctuated background[J]. Technical Acoustics, 2008, **27**(5): 746-749.

[8] 李敏. 水下目标辐射噪声被动检测与水声环境的匹配技术研究[D]. 博士学位论文, 中国科学院声学研究所, 2009: 9-38.
LI Min. Study on passive detection of radiated noise of underwater target and matched techniques in underwater acoustic environment[D]. PH.D dissertation, Institute of acoustics, Chinese Science of Academy, June 2009: 9-38.

附录A　线谱频率的广义最大似然估计

广义高斯噪声场中线谱检测的检验统计量为

$$T(\boldsymbol{r})=\sum_{n=1}^{N}\left\{\left(\left|x[n]\right|\right)^{c}-\left(\left|x[n]-\hat{A}\sin\left(2\pi fn+\hat{\phi}\right)\right|\right)^{c}\right\} \tag{A.1}$$

当线谱为微弱信号时($\hat{A}\approx 0$)，式(A.1)可化为

$$T(\boldsymbol{r})=\sum_{n=1}^{N}\hat{A}\,\mathrm{sgn}\left(x[n]\right)\left|x[n]\right|^{c-1}\sin\left(2\pi fn+\hat{\phi}\right) \tag{A.2}$$

由于

$$\sin\left(2\pi fn+\hat{\phi}\right)=\sin(2\pi fn)\cos\hat{\phi}+\cos(2\pi fn)\sin\hat{\phi} \tag{A.3}$$

把式(A.3)代入式(A.2)，可得

$$\begin{aligned}T(\boldsymbol{r})=\hat{A}\Bigg\{&\sum_{n=1}^{N}\mathrm{sgn}\left(x[n]\right)\left|x[n]\right|^{c-1}\sin(2\pi fn)\cos\hat{\phi}+\\&\sum_{n=1}^{N}\mathrm{sgn}\left(x[n]\right)\left|x[n]\right|^{c-1}\cos(2\pi fn)\sin\hat{\phi}\Bigg\}\end{aligned} \tag{A.4}$$

由式（A.4），根据文献[8]，检验统计量可写为：

$$T(\boldsymbol{r})=\frac{\left|\sum_{n=1}^{N}\mathrm{sgn}\left(x[n]\right)\left|x[n]\right|^{c-1}\exp(-j2\pi fn)\right|^{2}}{\sum_{n=1}^{N}\left|x[n]\right|^{c-2}} \tag{A.5}$$

众所周知，周期图定义为：

$$I(f)=\frac{1}{N}\left|\sum_{n=1}^{N}x[n]\exp(-j2\pi fn)\right|^{2} \tag{A.6}$$

对比式(A.5)和(A.6)，定义广义周期图为：

$$I_g(f)=\frac{1}{N}\left|\sum_{n=1}^{N}\mathrm{sgn}\left(x[n]\right)\left|x[n]\right|^{c-1}\exp(-j2\pi fn)\right|^{2} \tag{A.7}$$

从而，式(A.5)中的检验统计量可写为：

$$T(\boldsymbol{r})=\frac{I_g(f)}{\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}\left|x[n]\right|^{c-2}} \tag{A.8}$$

式(A.8)中，检验统计量峰值所对应的频率即为线谱频率的广义最大似然估。