

# 分形随机噪声信号处理的小波谱相关方法

张淑宁, 熊 刚, 赵惠昌, 王季军

(南京理工大学光电学院引信抗干扰实验站, 江苏南京 210094)

**摘要:** 提出了广义小波谱相关的概念, 简要分析了其基本性质及其与谱相关的关系, 通过对白噪声的谱相关和小波谱相关特性的研究, 推导出分形噪声的小波谱相关函数, 通过与白噪声的对比研究, 分析了分形随机噪声在小波谱相关域的特性. 考虑实际海杂波的特性, 提出了一种分形噪声调幅调频的海杂波模型, 分析了海杂波在小波谱相关域的表现, 体现了小波谱相关对海杂波处理的优势. 利用小波谱相关对分形噪声背景下的伪码脉冲串信号进行了识别仿真, 结果表明该方法能有效抑制分形噪声, 准确提取信号参数.

**关键词:** 小波谱相关; 分形噪声; 海杂波

**中图分类号:** TN957.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2005)07-1213-05

## The Method of Wavelet Spectral Correlation in Processing Fractal Stochastic Noise

ZHANG Shu ning, XIONG Gang, ZHAO Hui chang, WANG Li jun

(Lab of Anti-Jamming of Fuze, Nanjing University of science & technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

**Abstract:** The concept of "the Wavelet Spectral correlation function(WSCF)" is proposed. The property of WSCF and the relation between Spectral correlation function(SCF) and WSCF are analyzed briefly. The WSCF of the fractal stochastic noise is deduced based on the analysis of WSCF of white gauss noise(WGN) and the SCF of WGN. And the property of fractal stochastic noise in the WSC domain is analyzed. Considering the actual sea clutter, a fractal noise AM-FM model is proposed. The WSCF of the sea clutter is analyzed, which presents the advantage of the WSCF in processing the sea clutter. The signal recognition of pseudo random code pulse trains under the environment of fractal noise with WSCF is simulated. It is found that the method can effectively eliminate fractal noise and accurately extract the signal parameters.

**Key words:** wavelet spectral correlation; fractal noise; sea clutter

### 1 引言

小波变换是一种线性时频表示, 文献[1~5]通过对小波变换模的平方(所谓尺度图), 研究了基于小波的二次型时频表示, 同 Cohen 类时频表示一样, 基于小波的二次型时频分布也可拓展到四个等价的域进行分析. 由于小波具有变尺度多分辨率分析能力, 基于这种思想提出基于小波的广义二次型时频表示可望在信号检测和处理方面优于 Cohen 类时频分析.

以海杂波为例对分形噪声的研究大量存在, 对分形模型、分形参数估计和分形噪声抑制的研究一直比较热门<sup>[6,7]</sup>. 本文提出了小波谱相关函数的概念, 推导并分析了分形噪声的小波谱相关函数, 接着针对实际的海杂波, 提出了一种分形噪声调幅调频模型, 给出了合理的解释, 对比分析了它与窄带高斯噪声 AM-FM 信号的频谱关系, 推导并分析了海杂波的小波谱相关特性. 最后仿真分析了小波谱相关对分形噪声的抑制能力, 体现了小波谱相关理论的应用价值.

### 2 小波谱相关函数的定义与性质

#### 2.1 小波谱相关的定义

类似于对谱图的定义, 将信号小波变换模的平方称为尺度图<sup>[1,2,4,5]</sup>, 即:

$$|W_{a,b}|^2 = [\langle f, g_{a,b} \rangle][\langle f, g_{a,b} \rangle]^* \\ = \frac{1}{2\pi} \iint W_f(u, \omega) W_g((u-b)/a, a\omega) dud\omega \quad (1)$$

小波变换是一种线性变换, 小波分析是一种线性的时频表示, 而尺度图作为一种二次型时频能量表示, 根据 Cohen 类时频变换的四个等价域的分析, 可将尺度图(时频域)拓展到谱相关域和模糊域进行分析, 在这两个域分别产生“小波谱相关函数(WSCF)”和“小波模糊函数”(WAF), 根据定义有:

$$WSC(a, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} |W_{a,b}|^2 e^{-j\theta b} db \\ WAF(\tau, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |W_{a,b}|^2 e^{-j(\theta + a\tau)d} dadb \quad (2)$$

在 Cohen 类时频分布中, 有一个重要的概念“核函数”, 对于能量型小波时频表示, 在四个域中可以等价地表示成:

$$|WT_f(t, a)|^2 = \iint A_f(\theta, \tau) A_g(a\theta, \tau/a) e^{-j\theta} d\theta d\tau \\ = \frac{1}{|a|} \iint R_f(u, \tau) R_g((u-t)/a, -\tau/a) d\tau du \\ = \frac{|a|}{4\pi^2} \iint R_F(\omega, \theta) R_C(a\omega, -a\theta) d\omega d\theta \\ = \frac{1}{2\pi} \iint W_f(u, \omega) W_g((u-t)/a, a\omega) dud\omega \quad (3)$$

式中  $A_f(\theta, \tau)$ ,  $A_g(\theta, \tau)$  为信号和母小波的模糊函数,  $R_f(u, \tau)$ ,  $R_g(u, \tau)$  为信号和母小波的瞬时自相关函数,  $R_F(\omega, \theta)$ ,  $R_G(\omega, \theta)$  为信号和母小波的谱相关函数,  $W_f(u, \omega)$ ,  $W_g(u, \omega)$  为信号和母小波威格纳分布函数。

联合式(1)、(2)、(3)可得广义的小波谱相关函数为:

$$WSC(a, \theta) = \frac{1}{2\pi} \int_R R_G(a\omega, -a\theta) R_F(\omega, \theta) d\omega \quad (4)$$

## 2.2 小波谱相关与谱相关的关系

从式(4)可见小波谱相关等于母小波的谱相关函数和信号的谱相关函数乘积的积分。值得注意的是, 式(4)中母小波的谱相关函数  $R_G(a\omega, -a\theta)$  中, 尺度量  $a$  同时作用于双谱平面的频率域和频偏域。在 Cohen 类的广义谱相关表示中, 不可能出现频偏和频率的乘积项, 因为在时频域的时间变量和频率变量之间不存在耦合关系, 但是对于小波的时频能量函数, 尺度量不仅决定了带通滤波器的中心频率, 而且控制了时间窗口的大小, 从而确定了对应的尺度分解级数的小波系数个数, 在通过傅立叶变换求小波谱相关的过程中, 这种在时频域的时间和尺度的耦合关系可转化为谱相关域的频率和频偏的耦合关系, 见下式:

$$R_G(a\omega, -a\theta) = \Psi[a(\omega - \theta)] \Psi^*[a(\omega + \theta)] \quad (5)$$

下文以单频正弦信号为例来说明小波谱相关的特性, 计算中采用 Daubechies 四阶小波, 并采用时间和尺度加密算法<sup>[8,9]</sup>。单频正弦信号形式为  $f(t) = \sin\omega_1 t$ , 根据单频信号谱相关函数的特点<sup>[10]</sup>, 由式(4)可以得到其 WSCF 为:

$$WSC(a, \theta) = \begin{cases} \frac{1}{8\pi} (R_G(a\omega_1, 0) + R_G(-a\omega_1, 0)), & \theta = 0 \\ \frac{1}{8\pi} R_G(0, \pm 2a\omega_1), & \theta = \pm 2\omega_1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

图1给出  $\omega_1$  为 10 时单频正弦信号的 WSCF 图, 由图可以发现, WSCF 平行于尺度轴呈现三个“鳞片”形状, 中间一片位于循环频率为零的尺度截面, 另外两片分别位于循环频率  $\pm 2\omega_1$  的尺度截面。图2给出单频正弦信号的 SCF 图。参照图1图2并结合式(4)可进一步看出, 小波谱相关函数实质上是信号的谱相关函数沿频率轴的积累, 再通过小波母函数的谱相关加权后的结果(即先对频率轴累积, 再沿尺度轴展开)。

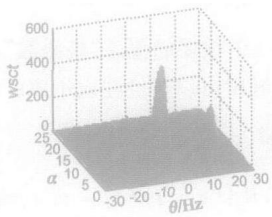


图1 单频正弦信号的 WSCF

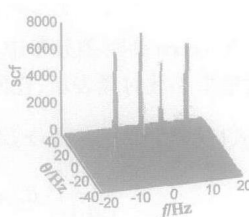


图2 单频正弦信号的 SCF

## 3 分形随机噪声的小波谱相关

对于分形随机噪声, 有多种建模方法, 其中主要的有小波模型、高斯差分模型、分数布朗运动模型以及基于小波的多重分形模型。在这些模型中都体现了分形噪声和白噪声的关系,

例如体现小波模型中各级小波分解系数的方差之间关系的功率谱因子  $\nu$ 、高斯差分模型和分形布朗运动模型中的 Hurst 指数等。本文从研究高斯白噪声的谱相关入手, 进而再分析白噪声的小波谱相关, 最后研究分形噪声的小波谱相关特性。

### 3.1 平稳高斯白噪声的谱相关

根据谱相关函数的定义有:

$$R_F(\omega, \theta) = \iint R_f(t, \tau) e^{-j(\omega t + \theta \tau)} dt d\tau \quad (7)$$

文献[11]证明了周期平稳性、二阶平稳性和谱相关性三个概念的等价性, 对于理想的平稳高斯白噪声而言, 由于其不具备在二次时不变变换下的二阶周期性, 即在循环频率非零处, 其谱相关值为零, 其谱相关函数为谱相关域循环频率  $\alpha = 0$  的截面, 即:

$$R_F(\omega, \theta) = \begin{cases} |F(\omega)|^2, & \theta = 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

其中  $F(\omega)$  表示白噪声的频谱。

### 3.2 平稳高斯白噪声的小波谱相关

理想情况下高斯白噪声的谱相关函数为理想的一堵墙(如图3所示), 根据小波谱相关的定义式(4), 白噪声的小波谱相关函数为:

$$WR_{gn}(a, \theta) = \begin{cases} \frac{a}{2\pi} \int_R R_G(a\omega, 0) |F(\omega)|^2 d\omega, & \theta = 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

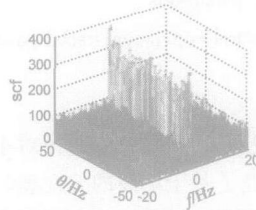


图3 高斯白噪声的 SCF

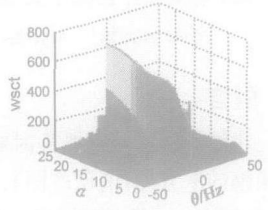


图4 高斯白噪声的 WSCF

图4给出了高斯白噪声的 WSCF, 由图可以发现高斯白噪声的 WSCF 为分布在零循环频率截面上的一堵墙。

### 3.3 分形随机噪声的小波谱相关

分形随机噪声是一种常见的非平稳噪声, 近年来, 利用小波变换对其进行分析和处理取得较好的效果, 但是通过小波谱相关对其进行研究却尚未见报道。已经证明, 通过适当地选取小波母函数, 分形信号的小波变换的各级小波系数是近似平稳的, 且其原有的长程相关特征可被白化掉, 故可以对其采用传统的平稳信号的处理方法进行处理。

由于分形信号具有  $1/f$  型的广义功率谱, 其在谱相关的频率截面和循环频率截面均呈现  $1/f$  型(如图5所示), 然而其 WSCF 却类似于白噪声的小波谱相关函数, 即近似为循环频率为零的截面(一堵墙)(如图6所示), 不同的是, 其在尺度较小(对应高频)时幅值较小, 而在尺度较大(对应低频)时幅值较大。分形随机噪声的小波谱相关如下式所示:

$$WR_{fn}(a, \theta) = \begin{cases} \frac{1}{2\pi} \int_R R_G(a\omega, 0) R_{fn}(\omega, 0) d\omega, & \theta = 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

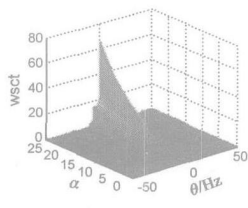
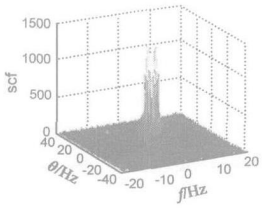


图 5 分形随机噪声的 SCF      图 6 分形随机噪声的 WSCF

其中  $R_{fn}(\omega, \theta)$  为分形随机噪声的 SCF.

为了说明白噪声和分形噪声的 WSCF 的联系, 本文分析了尺度  $a$  从 1 变化到 5 时两者的各级小波变换系数, 由于白噪声的小波变换系数仍然是不相关的<sup>[2]</sup>, 且各级小波变换系数都是均值为零, 方差为  $\sigma_w^2$  的白噪声, 而对于分形噪声而言, 各级小波变换系数为近平稳的, 各级小波变换系数均值为零, 方差有下面的关系:  $\text{var}[d_n^m] = \sigma^2 2^{-vm}$ .

白噪声和分形噪声的区别在于, 在时频域随着尺度的变大(频率变小), 分形噪声的小波变换系数的方差以  $2^v$  为倍数减小, 而白噪声方差不变, 这正是两者小波谱相关函数存在前述差异的根本所在, 图 7(a)(b) 对比分析了尺度从 1~5 时白噪声和分形噪声的小波系数变化情况, 注意其中不同尺度小波系数幅值的变换趋势. 通过对小波尺度图中的平移量(时间量)作傅氏变换求取 WSCF 时, 他们都体现出循环频率在 0 的尖峰, 不同的是高斯白噪声各种尺度峰值相等, 而分形噪声随着尺度的减小(频率变大)其峰值变小.

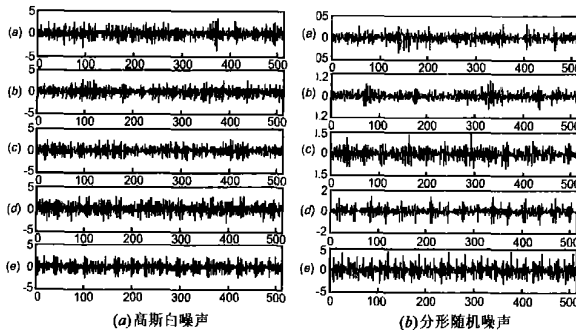


图 7 尺度  $a$  为 1~5(a)-(e) 时对应的小波变换系数对比分析

## 4 基于小波谱相关的海杂波分析

### 4.1 海杂波模型

已有海杂波模型主要有小波模型、分形布朗运动模型、分数高斯差分模型、多重分形模型等, 但这些模型只分析了海杂波本身的特性, 未考虑发射信号和海杂波之间的相互作用, 和实际海杂波不符, 本文通过对实测海杂波数据进行分析认为海杂波为分形噪声对载波的调幅调频过程, 即:

$$FN(t) = fn_1(t) \cos(\omega_0 t + \int_0^t fn_2(i) di + \varphi) \quad (1)$$

作者已经撰文研究了两个通道的信号均存在分数维和统计自相似特性, 大量的研究发现幅度调制信号  $fn_1(t)$  通常具有大的方差和低频特性, 比较而言, 调频信号  $fn_2(t)$  具有小的方差和较高的频率. 可以认为:  $fn_1(t)$  是由涌浪等大的起伏轮廓和长程有序性因素作用产生的, 而  $fn_2(t)$  则是由风浪、涟漪和其他细微结构等不很规则的较陡的波组成, 这也是对上述模型

一个合理的解释.

### 4.2 实际海杂波的功率谱特性

首先讨论分形噪声调频的性质, 由于对噪声调频而言, 已调波的功率谱密度不受调制噪声功率谱密度的影响, 而决定于调制噪声的概率密度函数  $p(fn_2(t))$ , 通过对概率密度的拟合发现, 它具有近似的高斯分布函数. 从这个角度看, 分形噪声调频和窄带高斯白噪声调频的效果是一样的.

文献[12]指出当有效调制系数  $m_{fe} \gg 1$ , 噪声调频信号的功率谱密度与调制噪声概率密度有线性关系, 且这种线性关系对高斯分布和非高斯分布都适用, 直接对  $p(fn_2(t))$  作雅可比变换, 即可得到噪声调频信号的功率谱  $G_1(f)$ :

$$G_1(f-f_0) = \frac{U^2}{2} P_n \left[ \frac{f-f_0}{K_{FM}} \right] \frac{1}{K_u FM} \quad (12)$$

其中  $U$  和  $K_{FM}$  分别为信号幅度和调频指数, 在此可取作常数.

当  $m_{fe} \ll 1$  时, 噪声调频信号的功率谱可以表示为:

$$G_1(f) = \frac{U^2 K_{FM}^2 \sigma_{n_2}^2 / 2 \Delta F_{fn_2}}{2(\pi K_{FM}^2 \sigma_{n_2}^2 / 2 \Delta F_{fn_2})^2 + (f-f_0)^2} \quad (13)$$

其中  $\sigma_{n_2}^2$ ,  $\Delta F_{fn_2}$  表示  $fn_2(t)$  的方差和有效带宽, 通常分形噪声  $fn_2(t)$  的方差相对于其有效带宽很小, 即有效调制指数  $m_{fe} = K_{FM} \sigma_{n_2} / \Delta F_{fn_2}$  比较小, 可以认为分形噪声调制的功率谱密度为式(13). 从中可以看出, 此时的功率谱具有  $1/f$  的形式, 这一点恰好和分形信号本身的广义功率谱是一致的. 同时, 对于窄带高斯白噪声而言, 当满足  $m_{fe} \ll 1$  时具有分形噪声调频的作用.

上面的分析说明了窄带高斯白噪声调频和分形噪声调频之间的关系, 这一点从窄带高斯噪声调频的时域表达式也可见一斑:  $J(t) = U_j \cos[\omega_0 t + 2\pi K_{FM} \int_0^t u(i) di + \varphi]$ , 其中调制项  $\int_0^t u(i) di$  表示对高斯白噪声的积分, 从不严格的意义上讲, 这正是布朗运动(BM)的定义式, 而分形噪声可以采用分形布朗(FBM)进行建模分析.

对于分形噪声调幅, 和常规的调幅一样, 其功率谱为载波对信号频谱的上下边带搬移. 联合考虑调幅调频的情况, 海杂波的功率谱  $fn_1(t)$  为的功率谱  $F_1(f)$  和分形调频信号功率谱  $G_1(f)$  的卷积, 即:

$$G(f) = \frac{1}{2\pi} F_1(f) * G_1(f) \quad (14)$$

对于实际海杂波, 由于其调频噪声半功率带宽  $\Delta f_2 = \pi m_{f_2}^2 \cdot \Delta F_{fn_2} = \pi \sigma_{n_2}^2 / \Delta F_{fn_2}$  很小, 远远小于调幅信号  $fn_1(t)$  的有效带宽, 所以, 可将海杂波的功率谱简化为

$$G(f) = \frac{1}{2\pi} G_1(f_0) [F_1(f+f_0) + F_1(f-f_0)] \quad (15)$$

### 4.3 海杂波的小波谱相关函数

根据上面分析, 可得海杂波的谱相关函数为:

$$F_F(\omega, \theta) = \frac{1}{4\pi^2} |G(f_0)|^2 [R_{F_1}(\omega + \omega_0, \theta) + R_{F_1}(\omega - \omega_0, \theta) + R_{F_1}(\omega, \theta - 2\omega_0) + R_{F_1}(\omega, \theta + 2\omega_0)] \quad (16)$$

将上式代入小波谱相关函数表达式(4), 可得海杂波的谱相关函数为:

$$WSC_s(a, \theta) = \frac{|a|}{2\pi} \int R_F(\xi, \theta) R_C(a\xi, -a\theta) d\xi$$

$$= \begin{cases} \frac{|a| |G(f_0)|^2}{8\pi^3} \int [R_{F_1}(\omega + \omega_0, 0) + R_{F_1}(\omega - \omega_0, 0)] \\ \cdot R_C(a\omega, 0) d\omega, & \theta = 0 \\ \frac{|a| |G(f_0)|^2}{8\pi^3} \int R_{F_1}(\omega, 0) R_C(a\omega, -2a\omega_0) d\omega, & \theta = 2\omega_0 \\ \frac{|a| |G(f_0)|^2}{8\pi^3} \int R_{F_1}(\omega, 0) R_C(a\omega, 2a\omega_0) d\omega, & \theta = -2\omega_0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (17)$$

上面分析表明, 海杂波的小波谱相关近似分布在  $\theta = 0, \pm 2\omega_0$  的截面上, 但是由于载波的作用, 此时三个截面都被搬到高频段(小尺度), 而小尺度意味着低的频率分辨率, 在尺度-循环频率平面, 分形噪声的小波谱相关被压缩到一个很窄的尺度范围内, 这对于海杂波背景下的信号检测和估计、分形噪声的抑制都是极有利的。

## 5 应用与仿真

上面主要分析了海杂波的小波谱相关特性, 对于实际的信号处理, 有用信号在小波谱相关域的特征将如何体现? 有用信号与噪声的交叉项如何抑制? 对于不同的信号检测问题如何选择小波母函数以使构造的小波谱相关函数性能最佳? 下文将研究 WSCF 在具体分形噪声背景下的信号检测中的应用——海杂波背景下所截获信号的检测和参数估计。

研究的侦察信号为伪随机二相码脉冲串体制信号, 杂波为实际的海杂波, 仿真中参数如下: 子脉冲宽度  $T_p = 200\text{ns}$ , 子脉冲重复周期  $T_{r1} = 600\text{ns}$ , 伪码编码数为 7, 载频为  $100\text{MHz}$ , 海杂波为实测海杂波。图 8(a)(b) 给出了含噪声的侦察信号小波谱相关图, 其中信噪比为  $0\text{dB}$  和  $-5\text{dB}$ , 图 9(a)(b) 为其尺度为 8 时循环频率截面图正单边带的中心部分, 可以清楚看到在正负两倍的载频处有小波谱相关尖峰出现, 此时海杂波的影响主要体现在  $\theta = 0, \pm 2f_0$  的截面上, 有用信号的 WSCF 则分布在不同  $\theta$  值处, 出现了类似于其幅谱的许多尖峰, 而且每两个尖峰对应的循环频率的倒数为子脉冲重复周期  $T_{r1}$ , 每 3 个尖峰之间还会出现一个短峰, 这正好体现了脉冲的占空比为  $2/1$ , 即: 每两个相邻短峰对应的循环频率差的倒数为子脉冲宽度  $T_p$ 。从图中可以看到, 在信噪比为  $-5\text{dB}$  时, 上述特征仍可以被很好的提取出来, 并可以方便的设计参数自动检测

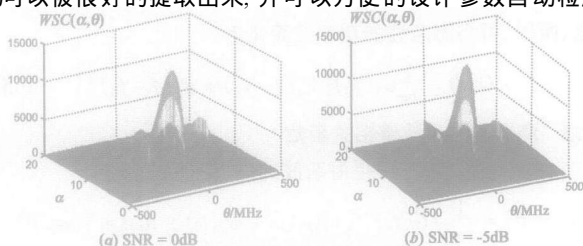


图 8 信号的小波谱相关函数

算法, 在此不做详述。

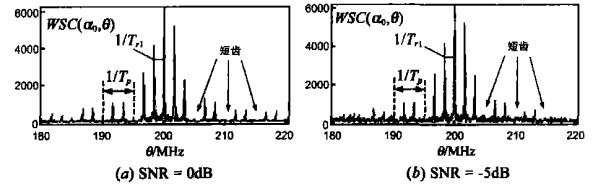


图 9 尺度为 8 时循环频率截面图(正单边带的中心部分)

## 6 结论

本文首先分析了基于小波的能量化时频分布表示, 提出了小波谱相关函数的概念, 并分析了其基本特性. 通过对白噪声的谱相关特性和小波谱相关特性的研究, 推导并分析了分形噪声的小波谱相关函数, 接着针对实际的海杂波, 提出了一种分形噪声调幅—调频模型, 并给出合理的解释, 通过分析其频谱特性, 推导并分析了海杂波的小波谱相关特性. 最后利用小波谱相关对分形噪声的抑制进行了模拟仿真研究, 体现了小波谱相关理论的应用价值。

对于小波谱相关函数乃至基于小波的广义时频分析尚有大量问题亟待深入研究, 例如对小波模糊函数的研究, 对小波谱相关函数中交叉项的抑制, 对不同的信号检测如何选择小波母函数以使所构小波谱相关函数性能最佳, 在算法如何获得更密集的时间和尺度间隔, 以便于特征提取等等。

## 参考文献:

- [1] Jechang Jeong, William J Williams. Variable windowed spectrograms: connecting Cohen's class and the wavelet transform [A]. Fifth Assp Workshop on Spectrum Estimation and Modeling [C]. Rochester, Ny, USA: Assp, 1990. 270-274.
- [2] Shubha Kadambe, Faye Boudreaux-Bartels. A comparison of the existence of cross terms' in the Wigner distribution and the squared magnitude of the wavelet transform and the short-time fourier transform [J]. IEEE Trans, 1992, 40(10): 2498-2516.
- [3] Olivier Rioul, Patrick Flandrin. Time scale energy distributions: A general class extending wavelet transforms [J]. IEEE Trans, 1992, 40(7): 1746-1757.
- [4] 张贤达. 现代信号处理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002. 10.
- [5] 王宏禹. 非平稳信号分析与处理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1999. 1.
- [6] 郭立新, 吴振森. 考虑海谱分布的动态分形海面的电磁散射 [J]. 电子学报, 2001, 29(9): 1287-1289.
- [7] 苏菲, 孙景步, 蔡安妮. 雷达数据的多重分形模型 [J]. 电子科学学报, 2000(3): 291-295.
- [8] 杨福生. 小波变换的工程分析与应用(第一版) [M]. 北京: 科技出版社 1999. 2.
- [9] O Rioul. Fast algorithm for discrete and continuous wavelet transform [J]. IEEE Trans. on IT, 1993, 38(2): 569-586.
- [10] 罗利春. 无线电侦察信号分析与处理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2003. 1.
- [11] 王增印, 周希元. 相关理论及其在通信情报侦察中的应用 [J]. 无线电通信技术, 1994, 20(5): 59-68.

- [12] 赵国庆. 雷达对抗原理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999. 10.

作者简介:



张淑宁 女, 1977年8月出生于山东威海, 南京理工大学电光学院在读博士生, 主要研究方向为电子对抗、时频分析、雷达引信信号处理. E-mail: shuningzhang0704@sohu.com.



熊 刚 男, 1977年12月出生于湖北天门, 南京理工大学电光学院博士生, 主要研究方向为非平稳信号处理、小波变换、时频分析及其在伪码体制引信对抗中的应用.

赵惠昌 男, 1958年生于浙江, 南京理工大学教授, 博士生导师, 主要从事无线电近炸引信的理论和技术研究, 特别是引信对抗技术研究, 曾作为课题负责人主持并完成“八五”、“九五”、“十五”国防重点预研课题, 完成各层次研究课题十多项, 获省部级科技进步奖3项, 国家发明专利2项, 出版教材2部, 在各类刊物上发表研究性论文60多篇.