

文章编号: 1672-2892(2011)06-0733-06

基于形态滤波的短波信号检测算法

王 权, 江 桦, 陈含欣

(解放军信息工程学院, 河南 郑州 450002)

摘 要: 针对短波信号检测中色噪声干扰导致信号检测概率低的问题, 通过研究实际短波信道特性和信号的频谱特征, 提出一种将信号频谱图作为一维灰度图像进行形态学滤波的预处理算法, 应用联合形态学滤波估计信号噪声基底, 利用改进的顶帽变换进行白化滤波, 最后依据高斯白噪声环境下的门限估计理论进行信号检测。实验结果表明, 该算法能在复杂的短波信道环境下较好地抑制色噪声干扰, 对弱信号的有效检测率可提高 10%~20%。

关键词: 短波信号检测; 形态学滤波; 顶帽变换; 预处理

中图分类号: TN971

文献标识码: A

An HF signal detection algorithm based on morphological filtering

WANG Quan, JIANG Hua, CHEN Han-xin

(PLA Information Technology Institute, Zhengzhou Henan 450002, China)

Abstract: Aiming at the problem of low signal detection probability caused by colored noise interference in signal detection, a pre-processing morphological filtering algorithm is proposed after studying the properties of the actual HF channel and the characteristics of the signal spectrum. It flattens the noise floor by morphological filtering theory and realizes whitening filter by Top-Hat transform. The signal is detected according to the threshold estimation theory under the Gaussian white noise environment. Simulation results show that the color noise interference can be suppressed under the complex environment of short-wave channel, and the detection probability of the weak signals is improved by 10%–20%.

Key words: detection of HF signal; morphological filtering; Top-Hat transform; preprocessing

短波通信具有传输距离远、机动重建性好、抗毁性好等特点, 随着短波通信技术的发展, 短波通信不仅成为一种必备的通信方式, 还是诸兵种合成部队协同作战的主要远程战术通信手段。但是, 短波信道为典型时变色散信道, 具有多径时延、衰落、多普勒频移等特性^[1], 而且信道存在大量冲击噪声干扰, 导致信号动态范围较大, 再加上实际接收机由于模拟前端受到器件非线性特性或者阻抗失配的影响^[2], 导致实际输出的信号噪声基底起伏较大。而常规的信号检测方法是通过搜索监视频谱, 并与某个门限值比较来确定信号的存在性, 此门限值通常由高斯白噪声环境下的信号检测理论确定^[3]。由于短波信道的特殊性, 若信号位于频谱的噪声较低处, 利用常规信号检测方法会造成弱信号漏检。因此需要在检测之前对短波信号进行预处理: 估计噪声基底, 降低信号动态范围, 削弱强信号, 补偿弱信号。本文提出了一种基于形态学滤波的噪声基底估计方法, 经仿真证明: 通过噪声基底估计后的预处理, 有效地抑制了短波信号检测中的漏警问题。

1 短波信号检测中面临的几个问题

在信号检测方面, 目前的研究热点是自适应电扫描方法, 即通过搜索频谱、测定能量确定在某频率上是否存在信号, 在无先验知识的条件下, 为提高信号的截获概率, 通常需要在一段频带内重复扫描, 将每个频点的电平值与设置的门限进行比较。一般情况下, 检测门限通常根据理想高斯白噪声环境下的信号检测理论来确定, 但是在电磁环境复杂的短波信道中进行信号检测要面临很多实际问题: 由于信道传输途径的特殊性, 短波频段的信号基底不平坦, 导致理想状态下的门限计算理论在实际应用中效果欠佳, 往往会造成漏警或虚警。图 1 是某短波频段频谱图, 可见该段信号底部电平起伏较大, 在对该频段进行检测时, 若采用门限 1, 则信号 4 会被漏检, 发生

漏警；如果采用门限 2，则噪声会被判定为信号，发生虚警。因此，面对噪声基底起伏大的短波频段，难以设置合适的固定门限来实现准确、有效的检测。

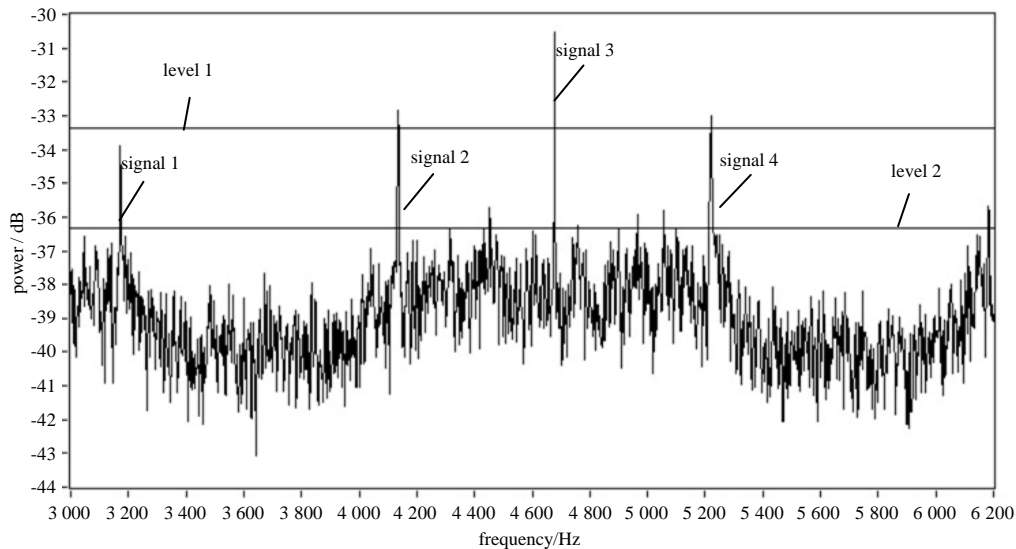


Fig.1 A real HF signal spectrum

图 1 某频段实际短波信号

针对以上问题，国内专家做了较多研究，文献[4]采用分段比较频谱均值，进行噪声基底估计，通过差值抑制处理后完成信号搜索；文献[5]采用小波多分辨率分析的方法估计信道个数，并自适应调节阈值，实现短波信道盲分离；文献[6]利用分段检测频谱最小值，做开运算后插值来检测噪声基底，实现短波信道信号的盲检测；文献[7]通过对含噪信号小波分解后的每一层高频系数进行阈值量化，达到了较好的消噪效果。但这些方法在实际应用中都有缺陷：文献[4]较好地抑制了色噪声，但在信道环境复杂，动态范围增大时效果会减弱；文献[5]算法复杂，计算量太大；文献[6]由于分段选取、插值运算和采取平顶型结构元素运算导致噪声基底估计不精确，文献[7]仅适用于生物医学信号，推广到其他领域应用局限性较大。鉴于此，本文提出了基于形态学滤波的短波信号检测算法，利用改进的形态学顶帽变换进行信号预处理，解决了色噪声干扰导致的信号检测不准确问题。

2 基于形态学滤波的预处理

2.1 形态学滤波

基于数学形态学理论，形态学滤波提供了一种基于形状的非线性变换理论和方法^[8]，在数字信号处理中有着重要的作用。该理论运用结构元素修改信号局部特征，得到信号更本质的形态^[9]。其一维离散情况下的多值形态变换，对信号频谱中的峰值(正脉冲)噪声、低谷(负脉冲)噪声以及白噪声有很好的抑制效果^[10]。

设信号 f 为定义在 $F = \{0, 1, \dots, N-1\}$ 上的离散函数，结构元素 b 为 $B = \{0, 1, \dots, M-1\}$ 上的离散函数，且有 $N > M$ ，则 4 种基本的一维灰度形态变换定义为：

$$f(x) \text{ 关于 } b \text{ 的膨胀: } (f \oplus b)(x) = \max_{m=0,1,\dots,M-1} \{f(n+m) + f(m)\} \quad n = 0, 1, \dots, N-M \quad (1)$$

$$f(x) \text{ 关于 } b \text{ 的腐蚀: } (f \ominus b)(x) = \min_{m=0,1,\dots,M-1} \{f(n-m) - f(m)\} \quad n = 0, 1, \dots, N-M \quad (2)$$

根据式(1)和式(2)， f 关于 b 的开运算和闭运算分别为：

$$O_b(f) = (f \ominus b) \oplus b \quad (3)$$

$$C_b(f) = (f \oplus b) \ominus b \quad (4)$$

如果对信号的频谱图作一维灰度形态学运算，则膨胀运算会减小信号频谱的谷值，扩展峰顶；而腐蚀运算则会减小信号的谱峰，加宽谷域。开运算是非扩张的，小于结构元素的部分会被“开掉”，所以开运算可以抑制信号的尖峰，如突发、毛刺等；闭运算是扩张的，小于结构元素的部分会被膨胀填充，所以闭运算可以抑制信号的波谷。开、闭运算所能滤除的正、负脉冲宽度取决于运算所使用的结构元素 b 的宽度 M ，选取大于噪声宽度的结构元素，可以利用开、闭运算去除信号中的噪声。上述基本运算的不同组合构成的滤波器可滤除不同类型的噪声，实现信号平滑处理。

2.2 改进的顶帽变换

经典的形态学顶帽变换^[11]可消除信号噪声，突出信号尖峰，其定义如下：

$$TH[f(x)]_b = f(x) - O_b(f) \tag{5}$$

形态学开运算 $O_b(f)$ 相当于最小值滤波，可以估计出信号的底部噪声，即一维频谱的电平最低点轨迹，但当信号频谱起伏较大时，会存在由色噪声造成的电平很低的毛刺(负脉冲)，这些毛刺会影响噪声基底的估计效果，导致形态学顶帽变换后的信号频谱仍然含有部分噪声，直接影响信号检测的准确性。本文提出一种改进顶帽变换，计算方法如式(6)：

$$TH[f(x)]_b = f(x) - O_b\left\{\frac{C_b[O_b(f)] + O_b[C_b(f)]}{2}\right\} \tag{6}$$

该方法对信号频谱分别进行联合开闭运算和闭开运算，并将运算结果做平均，最后将平均的结果再进行 1 次开运算，这样经过多次形态学处理和平均后，得到的结果会很好地反映信号的底部噪声电平，再用原信号频谱减去测算出的噪声基底，得到的信号基底会基本平坦，很大程度上避免了由于色噪声干扰和信号频谱起伏对信号检测造成的影响。

图 2 对比了文献[6]的算法和本文算法得出的噪声基底：

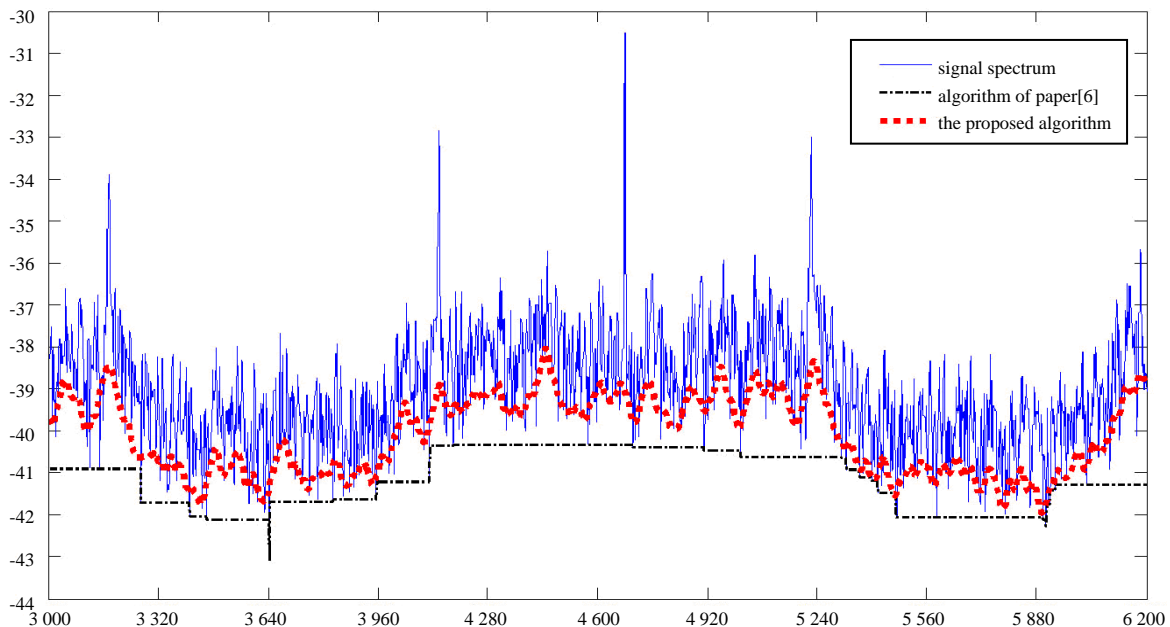


Fig.2 Contrast between different algorithms

图 2 不同算法计算的噪声基底对比

从图中可以明显看出，文献[6]的算法得出的噪声基底仅仅是各分段信号电平最低点的轨迹，不够平滑，而本文算法的结果贴近信号实际色噪声基底，能更精确地反映信号频谱底部起伏特征。

3 基于形态学滤波的预处理

本文提出了基于改进的顶帽变换形态学预处理的信号检测方法，整个检测流程如图 3 所示，关键步骤是噪声基底估计、白化处理等预处理过程。

信号预处理可以通过对频谱数据的形态学非线性变换消除噪声干扰、信号频谱底部形状变化等因素的影响，以便准确判断信号存在性，测量信号参数。

根据形态学滤波理论，算法利用 2.2 中改进的顶帽变换对谱估计后的数据进行非线性处理，以克服色噪声干扰和信号频谱形状变化对检测的影响，算法流程如下：

1) Welch 谱估计。假设观测数据为 $x(n), n=0,1,\dots,N-1$ ，将数据分为 L 段，每段长度为 M ，相邻段重叠 K 点，

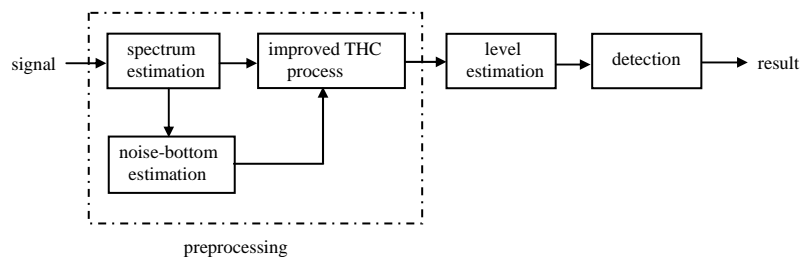


Fig.3 Detection process

图 3 检测流程

则平均周期图为:

$$\bar{P}(\omega) = \frac{1}{L} \sum_{i=0}^{L-1} \frac{1}{MU} |x^i(n)w(n)e^{-j\omega n}|^2 \quad (7)$$

其中, $U = \frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} w^2(n)$ 为归一化因子。

2) 噪底估计。选取适当的结构元素 b , 对 $\bar{P}(\omega)$ 进行联合开闭运算和闭开运算, 并将运算结果用开运算做平均:

$$\hat{P}(\omega) = O_b \left\{ \frac{\{C_b[O_b(\bar{P})] + O_b[C_b(\bar{P})]\}}{2} \right\} \quad (8)$$

3) 白化处理。

$$P_w(\omega) = \bar{P}(\omega) - \hat{P}(\omega) \quad (9)$$

4) 门限估计和信号检测。在经过白化处理后, 信号可以近似看作处于高斯白噪声环境, 可以利用高斯白噪声环境下的门限估计和信号检测理论进行处理。

在以上处理过程中, 平均周期图用于减弱信道衰落对变换造成的影响; 联合形态学运算用于精确估计信号频谱的噪声基底; 白化处理用改进的顶帽变换平缓噪声基底, 消除信号的杂散点和毛刺。

预处理参数通常可以根据信道参数和信号特征等先验知识确定, 一维灰度形态学的参数主要有 2 个: 结构元素的形状和尺寸。结构元素有平顶型、三角型、高斯型、抛物线型等, 文献[6]采用的是平顶型结构元素, 为了使估计结果最接近信号的实际噪声基底, 本文选择形状相对平滑的抛物线型结构元素。结构元素的尺寸会在很大程度上决定噪声估计的精度, 从而影响预处理的效果。通常结构元素尺寸的选取应遵循以下原则: 设观测带宽为 B_w , 频谱频率分辨力为 Δf , 信道带宽为 $B_c \leq B_w$, 单个通道内信号的频谱峰值间隔为 $\Delta f \leq B_i \leq B_c$, 则取开运算结构元素的尺度 $L_o \in Z^n$ 为:

$$\left\lceil \frac{B_c}{\Delta f} \right\rceil \leq L_o \leq \left\lceil \frac{B_w}{\Delta f} \right\rceil \quad (10)$$

闭运算结构元素的尺度 $L_c \in Z^n$ 为:

$$\left\lfloor \frac{B_i}{\Delta f} \right\rfloor \leq L_c \leq \left\lfloor \frac{B_c}{\Delta f} \right\rfloor \quad (11)$$

其中, $\lceil \bullet \rceil$ 表示最近数取整。

4 算法验证

图 4 为短波某频段的实际信号频谱(与图 1 相同), 图 5 为采用联合形态学运算对图 4 频谱进行滤波后的结果, 可以看出: 作为该频谱底部噪声的估计, 图 5 中的曲线较好地描述了图 4 频谱中的底部噪声。

图 6 为采用改进的顶帽变换方法对图 1 频谱进行白化处理后的频谱图, 白化处理后的频谱底部平坦, 可以近似为高斯白噪声环境。

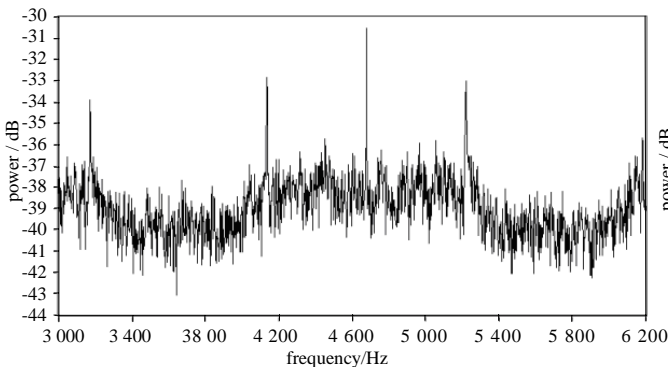


Fig.4 A real HF signal spectrum
图 4 短波某频段实际信号

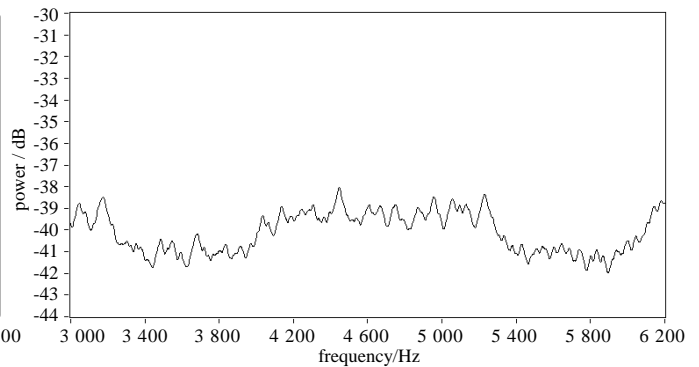


Fig.5 Estimation of background noise by the algorithm
图 5 本文算法对信号频谱噪声基底的估计

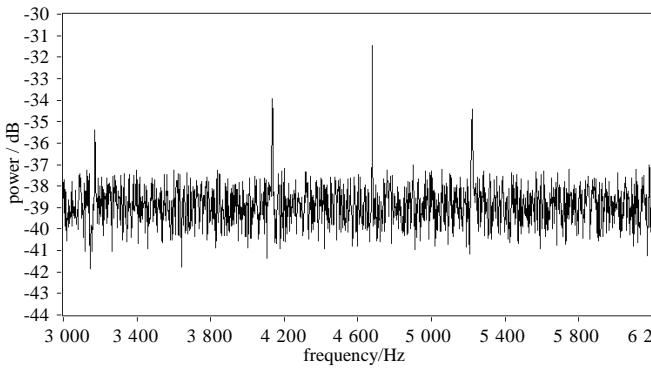


Fig.6 Whiten-processed spectrum by the proposed algorithm
图 6 利用本文算法白化处理后的频谱

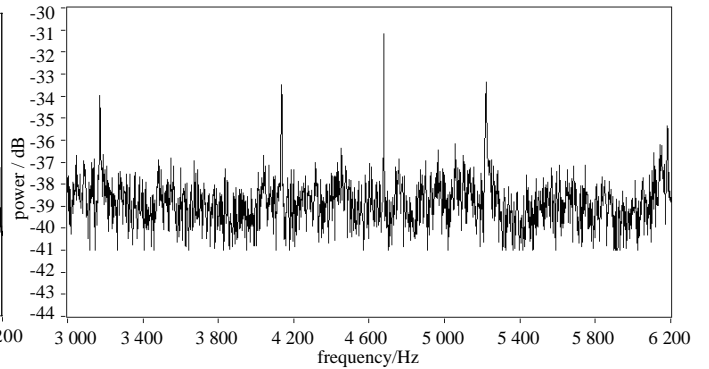


Fig.7 Whiten-processed spectrum by the algorithm in paper[6]
图 7 文献[6]方法白化处理后的频谱

图 7 为文献[6]方法处理后的频谱图，可见：由于插值运算造成的误差与结构元素形状不够平滑，导致白化处理后频谱底部电平不够平坦。

为验证算法的有效性，分别利用直接检测原始频谱法、文献[6]处理方法和形态学预处理方法对图 1 内选定的 4 个实际信号(如表 1 所示，分别对应于图 1 中的信号编号，信噪比为一段时间的统计均值)进行检测概率实验。

表1 选定的待检测信号

Table1 Selected candidates signals

signal number	center frequency/MHz	signal character
1	3.172	FM signal,SNR:3.69 dB
2	4.134	FSK signal,SNR:5.11 dB
3	4.678	unknown signal,SNR:7.63 dB
4	4.750 449	aberrated BPSK signal,SNR:4.63 dB

令搜索总次数为 N_r ，检测到某信号的次数为 N_d ，将某信号误判为多个信号的次数为 N_f ，则定义检测率 P_d 、虚警率 P_f 如下：

$$P_d = \frac{N_d}{N_r} \tag{12}$$

$$P_f = \frac{N_f}{N_r} \tag{13}$$

为使测试结果具有可比性，3 种方法均采用式(14)的门限计算方法。

$$\delta_A = \gamma \times \underset{i=1,2,\dots, \lfloor M \times \alpha \rfloor}{\text{mean}} \{ \text{sort}(P(\omega)) \} + (1 - \gamma) \times \underset{i=\lfloor M \times \beta \rfloor, \lfloor M \times \beta \rfloor + 1, \dots, M}{\text{mean}} \{ \text{sort}(P(\omega)) \} \tag{14}$$

式中： $0 < \alpha, \beta, \gamma < 1$ 为比例因子； $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整； $\text{sort}(\cdot)$ 表示升序排列； $\text{mean}(\cdot)$ 表示取均值。表 2 显示了经 1 000 次蒙特卡洛实验后得到 3 种方法的检测率对比，给出了形态学预处理算法相对于原有算法的性能改善情况。由表 2 可见，3 种方法均能对较高信噪比的信号进行有效检测，本文算法与文献[6]方法均能较好地抑制色噪声干扰，实现对弱信号的检测，但本文对频谱的噪声基底估计更准确，检测率更高。仿真结果与前面的分析相符，从而验证了算法的有效性。

表2 三种方法对选定信号的检测率

Table2 Detection rate of selected signals by the three methods

detecting method	signal 1	signal 2	signal 3	signal 4
direct detecting	70%	78%	97%	76%
algorithm of paper [6]	89%	94%	98%	92%
the proposed algorithm	91%	96%	99%	94%

5 结论

为了克服短波信号检测中的色噪声干扰，本文对短波信道特性和信号频谱特征进行了分析，提出了基于改进的顶帽变换形态学的信号检测预处理算法，并研究了算法实现中的结构元素形状与参数选取问题。实验结果表明，该算法能很好地抑制色噪声干扰，提高了检测性能，有利于弱信号的检测，并增强了检测方法的适用性。

参考文献：

[1] 汤素华,戴旭初,徐佩霞. 宽带短波信号处理平台及算法[J]. 数据采集与处理, 2005,20(1):75-82. (TANG Suhua,DAI

- Xuchu, XU Peixia. Wide-Band Wireless Signal Processing Platform and Algorithms[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2005,20(1):75-82.)
- [2] 王永明,张尔扬,赵津丽. 应用形态学滤波的宽带侦察接收机信号检测新方法[J]. 应用科学学报, 2009,27(4):343-347. (WANG Yongming,ZHANG Eryang,ZHAO Jinli. Signal Detection in Broadband Recognition Receiver Based on Morphological Filter[J]. Journal of Applied Sciences, 2009,27(4):343-347.)
- [3] 罗佳,张文明,陶华敏,等. 通信侦察测频接收机的建模与仿真[J]. 系统仿真学报, 2006,18(10):2440-2444. (LUO Jia,Zhang Wenming,TAO Huamin,et al. Modeling and Simulation of Communication Reconnaissance Receiver's Frequency Measurement[J]. Journal of System Simulation. 2006,18(10):2440-2444.)
- [4] 熊伟,崔伟亮,江桦. 基于信道色噪声抑制的信号搜索方法[J]. 电子技术应用, 2009,35(9):116-118. (XIONG Wei,CUI Weiliang,JIANG Hua. A new signal reconnaissance method based on channel color noise suppressing[J]. Application of Electronic Technique, 2009,35(9):116-118.)
- [5] 李合生,赵明生,吴佑寿. 一种短波通信盲信道快速分离算法[J]. 通信学报, 2003,24(7):59-65. (LI Hesheng,ZHAO Mingsheng,WU Youshou. Study on fast blind channel separation algorithm of SW communication[J]. Journal of China Institute of Communications, 2003,24(7):59-65.)
- [6] 王永明,张尔扬,程巧金. 一种有效的宽带数字侦察接收机信号检测方法[J]. 信号处理, 2010,26(2):208-212. (WANG Yongming,ZHANG Eryang,CHENG Qiaojin. An Efficient Method of Signal Detection for Wideband Digital Reconnaissance Receiver[J]. Signal Processing, 2010,26(2):208-212.)
- [7] 王燕,王海滨,刘立汉. 基于小波变换的心音信号降噪方法[J]. 信息与电子工程, 2010,8(3):303-307. (WANG Yan,WANG Haibin,LIU Lihan. Noise reduction for heart sound based on wavelet transform[J]. Information and Electronic Engineering, 2010,8(3):303-307.)
- [8] 郭晓鑫,刘立,冯志鹏. 数学形态学在信号处理中的应用综述[J]. 仪器仪表学报, 2009,30(10):187-191. (GUO Xiaoxin, LIU Li,FENG Zhipeng. Summary of Mathematical Morphology Application In Signal Processing[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009,30(10):187-191.)
- [9] 王志强,安良,陆佶人. 基于数学形态学的海洋混响背景下的信号检测[J]. 信号处理, 2008,24(6):1004-1007. (WANG Zhiqiang, AN Liang,LU Jiren. Signal Detection Based on Mathematical Morphology in Ocean Reverberation[J]. Signal Processing, 2009,30(10):187-191.)
- [10] 张建成,吴新杰. 形态滤波在实时信号处理中应用的研究[J]. 传感技术学报, 2007,20(4):828-831. (ZHANG Jiancheng, WU Xinjie. Research on Applications of Morphological Filtering in Real-Time Signal Processing[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007,20(4):828-831.)
- [11] 赵伟,王希常,李晓寒. 基于顶帽变换和模糊C均值聚类的图像分割方法[J]. 计算机技术与发展, 2010,20(8):52-55. (ZHAO Wei,WANG Xichang,LI Xiaohan. Image Segmentation Method Based on Top-Hat Transformation and FCM Clustering[J]. Computer Technology and Development, 2010,20(8):52-55.)

作者简介:



王 权(1987-),男,山西省原平市人,助理工程师,研究方向为电磁频谱监测与信号分析. email:kongyunzi@163.com.

江 桦(1956-),男,江苏省南通市人,教授,博士生导师,研究方向为通信信号处理.

陈含欣(1981-),男,湖北省荆州市人,助理工程师,研究方向为通信信号分析.