

低频脉冲信号的频域恒虚警检测

梁增, 马启明, 杜栓平

(杭州应用声学研究所声呐技术重点实验室, 浙江杭州 310012)

摘要: 为提高低频背景噪声中弱声呐脉冲信号的检测能力, 给出了一种频域恒虚警检测方法。该方法针对低频背景噪声平稳性较差、起伏较大的特点, 将频域中峰值点或极值点认为是疑似脉冲信号, 通过对疑似点能量与历史背景进行比对的方式完成脉冲信号的检测判决, 并且给出了相应的检验统计量获取方法、背景噪声估计方法和恒虚警检测门限的计算方法。仿真分析和实际数据处理结果表明, 频域恒虚警检测方法对单频脉冲、单频-线性调频组合脉冲等包含窄带成分的弱声呐脉冲信号有非常好的检测性能。

关键词: 低频脉冲信号; 频域; 恒虚警; 检测门限

中图分类号: TB566

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2016)-01-0068-05

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2016.01.015

Constant false alarm rate detection in frequency domain for low-frequency pulse

LIANG Zeng, MA Qi-ming, DU Shuan-ping

(Hangzhou Applied Acoustics Research Institute, National Key Laboratory of Science and Technology on Sonar, Hangzhou 310012, Zhejiang, China)

Abstract: To improve the ability of detecting a weak sonar impulse signal from low-frequency background noise, a new detection method with constant false alarm rate (CFAR) in frequency domain is proposed. In this method, the peaks in the frequency domain are taken as the potential pulse signal due to the poor stability and large fluctuation of low-frequency background noise. Then, the detection decision is made through comparing the energy of those peaks and the energy of the background noise. The way of how to get statistic of test, background noise estimation and CFAR threshold is also given. Results of computer simulation and real data processing have confirmed the satisfactory performance of the proposed method in detecting weak sonar pulse signal like CW and CW-LFM, which contain narrow-band components.

Key words: low-frequency sonar pulse signal; frequency domain; Constant False Alarm Rate(CFAR); detection threshold

0 引言

噪声中未知脉冲信号的检测是声呐信号处理的一个重要问题。随着减振降噪、先进推进、敷设消声瓦以及特殊的外形设计等特征管理技术的广泛应用, 潜艇的中高频目标辐射噪声水平和目标反射强度得以大幅度下降, 为提高对先进性潜艇的远程探测能力, 各国海军日益重视低频化声呐装备的发展, 且在使用上也将低频主动探测方式作为其主要工作模式之一。低频背景噪声的平稳性较差, 起伏较大, 干扰目标较多, 当噪声或者干扰背景很强时, 脉冲信号被严重污染, 传统的基于时域的能量检测方法其检测性能会受到较大影响。

本文将介绍一种频域恒虚警检测方法来提高低频背景噪声中脉冲信号的检测性能。此方法基于随机噪声能量分布于全频带, 而脉冲信号能量集中在有限的频率范围内的特点, 利用傅里叶变换获得比时域信噪比更高的局部信噪比来检测淹没于噪声中的脉冲信号。同时针对背景噪声平稳性较差、起伏较大、噪声和干扰强度的变化都将引起虚警概率和检测概率显著变化的特点, 在背景估计处理中采用恒虚警(Constant False Alarm Rate, CFAR)处理技术, 对背景噪声采取高置信度的自适应估计, 从而实现在将虚警概率控制一定条件下, 提高脉冲信号的检测性能。

1 算法理论分析

1.1 频域中的信噪比改善

信噪比通常定义成平均信号功率与平均噪声

收稿日期: 2015-01-06; 修回日期: 2015-05-02

作者简介: 梁增(1987-), 男, 浙江台州人, 硕士, 工程师, 研究方向为水声信号处理。

通讯作者: 梁增, E-mail: yuanloves@163.com

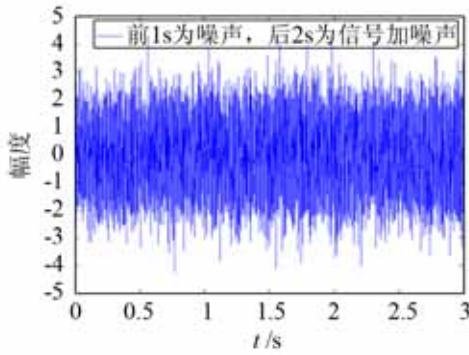
功率的比值。时域信号的平均功率定义为：

$$P_s = \frac{1}{T} \int_0^T S^2(t) dt \quad (1)$$

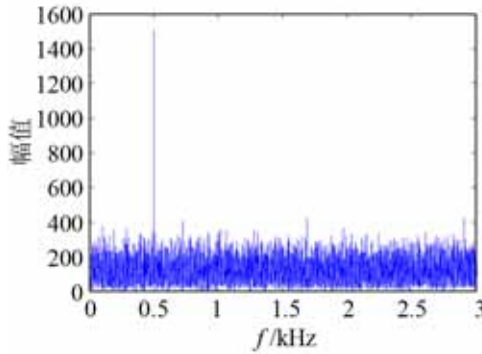
对于一个零均值、方差为 σ_n^2 的加性高斯白噪声，平均噪声功率为 $P_N = \sigma_n^2$ ，则信噪比如下：

$$SNR_{\text{average}} = \frac{P_s}{P_N} = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T S^2(t) dt}{\sigma_n^2} \quad (2)$$

对于淹没于零均值、方差为 σ_n^2 的加性高斯白噪声中的正弦信号(如图 1(a)所示)，由于平均信号功率较小，信噪比较低，以至于不能在时域从噪声中区分出信号。若对其进行傅里叶变换，则在频域中能明显看出信号的峰值(如图 1(b)所示)。



(a) SNR=-15 dB 时 CW 信号时域图



(b) SNR=-15 dB 时 CW 信号频域图

图 1 带噪正弦信号的时域和频域图

Fig.1 Diagrams of sinusoid signal plus noise in time domain and frequency domain

对于频域脉冲信号检测而言，已经不关心信号的平均功率，而关心信号的峰值功率。此时的峰值信噪比如下：

$$SNR_{\text{peak}} = \frac{P_{\text{peak}}}{P_N} = \frac{P_{\text{peak}}}{\sigma_n^2} \quad (3)$$

对于窄带信号检测，可以引入另一种类似的信噪比用作信号检测^[1]。假设信号峰值功率是 P_{peak} ，则在峰值处存在一个长度为 ΔB 的区域，在这个区域中瞬时信号功率高于半功率点：

$$\Delta B = \{f: 0 < f < F \text{ \& } |s^2(f)| \geq 0.5 P_{\text{peak}}\} \quad (4)$$

式中， F 为 ΔB 区域外频率点。

此时的信噪比表达式如下：

$$SNR_{\Delta B} = \frac{\frac{1}{\Delta B} \int_{f \in \Delta B} S^2(f) df}{P_N} = \frac{\frac{1}{\Delta B} \int_{f \in \Delta B} S^2(f) df}{\sigma_n^2} \quad (5)$$

对于一窄带信号，长度为 N ，平均功率为 P_s ，高斯白噪声平均功率为 σ_n^2 ，则信噪比为

$$SNR_{\text{in}} = \frac{P_s}{\sigma_n^2} \quad (6)$$

对信号进行短时傅里叶变换 (Short Time Fourier Transform, STFT)，对应的信号带宽为 B_N ，此时信号平均功率不变，而白噪声功率展宽到整个频段 B ，因此输出信噪比为

$$SNR_{\text{out}} = \frac{P_s}{\sigma_n^2 B_N / B} = SNR_{\text{in}} \frac{B}{B_N} \quad (7)$$

根据上述定义，图 1(b)中峰值处信噪比为 17 dB，较图 1(a)中时域信噪比 -15 dB 提高了 32 dB。这就是为什么淹没在零均值、方差为 σ_n^2 的加性高斯白噪声中的正弦信号(如图 1(a)所示)可以很容易地在频域中被检测出来的原因。

1.2 频域恒虚警检测

低频脉冲信号检测通常表述为二元假设检测，其观测结果要么是含噪的信号，要么是噪声。根据奈曼-皮尔逊准则，通常希望在虚警概率保持一定的条件下，使系统对脉冲信号检测概率最大。在低频背景噪声下，传统的基于固定阈值的检测方法不适合检测统计特性不稳定环境中的未知信号，这是因为低频背景噪声平稳性较差，起伏较大，噪声变化会引起虚警概率和检测概率的显著变化。

本文在频域检测中引入恒虚警处理方法，它利用测试单元的临近单元来估计背景噪声的统计特征，从而实现根据低频背景噪声的起伏自适应地调整检测阈值来提高脉冲信号检测性能。

通常被动声呐接收的海洋背景噪声经过限带以后可被视为限带高斯白噪声^[2]，其不同批次噪声数据经傅里叶变换后，同一频点 f_k 处的模值 $Y_{f_k}(y)$ 可以认为服从瑞利分布^[3-4]，如图 2 所示，其概率密度函数表达式如下：

$$f(y) = \frac{y}{\sigma^2} \exp(-y^2 / \sigma^2) \quad (8)$$

其中， σ^2 为背景噪声的平均功率。

由文献[3]可知，服从瑞利分布的模值 $Y_{f_k}(y)$ 取平方后的数据 $Y_{f_k}^2(y)$ 服从指数分布^[5]，其概率密度函数表达式为

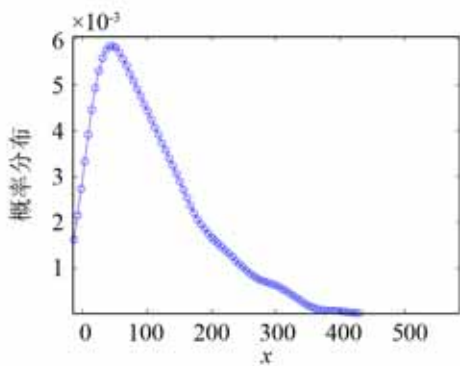


图2 频点 f_k 处不同批次数据的统计分布
Fig.2 Statistical distribution of different data at f_k

$$f_{y^2}(y) = \frac{1}{\eta} e^{-y/\eta} \quad (9)$$

其中, η 为背景噪声的平均功率。

若噪声的变换值服从指数分布, 脉冲信号 CFAR 检测的检测门限可以通过指数分布来确定。那些低于 CFAR 门限的点被认为是背景噪声, 而其他所有高于 CFAR 门限的点被认为是信号加上背景噪声。频域恒虚警检测可以描述如下:

$$\begin{matrix} H_1 \\ Y_{f_k}^2 > TZ \\ H_0 \end{matrix} \quad (10)$$

其中: Z 为估计的背景噪声; T 为门限加权系数。两者的估算方法如式(11)和(12)所示, 其中 N 为背景估计时参考滑窗的长度; P_{fa} 为虚警概率。

$$T = (P_{fa})^{-1/N} - 1 \quad (11)$$

$$Z = \sum_{i=1}^N Y_{f_k}^2(y_i) \quad (12)$$

图3给出了在海洋背景噪声中利用频域检测未知脉冲信号的流程图。

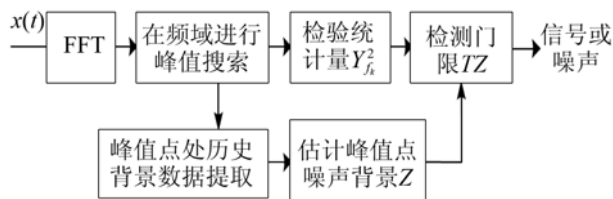


图3 频域恒虚警率检测流程图

Fig.3 Flow diagram of CFAR detection for a given constant false alarm rate in frequency domain

详细步骤描述如下:

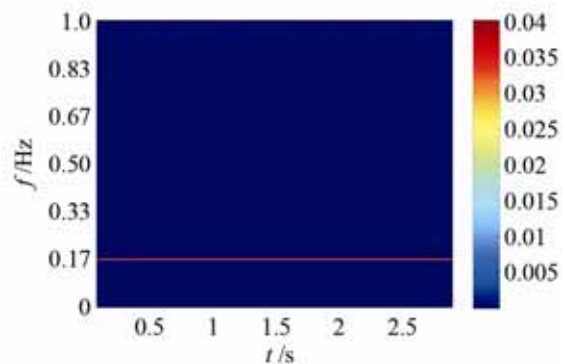
- (1) 对接收数据 $x(t)$ 进行 FFT 变换, 得到接收数据 $x(t)$ 的频谱信息;
- (2) 对步骤(1)得到的频谱数据进行峰值搜索, 确定峰值点频率及峰值点数值;
- (3) 提取峰值点位置历史背景数据, 估计当次检测判决的背景噪声 Z ;

(4) 根据 CFAR 检测原理得到检测门限 TZ , 并将峰值数据的模平方 $Y_{f_k}^2$ 与门限值 TZ 进行比较判决, 确定数据 $x(t)$ 是否包含脉冲信号, 若不包含脉冲信号则将该部分数据放入背景数据库。

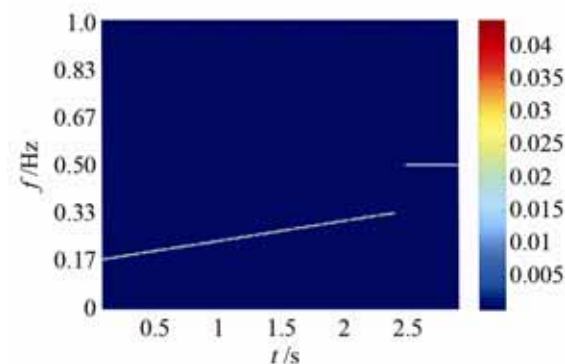
2 仿真分析

利用几组仿真数据验证频域恒虚警检测算法的检测性能, 其中每次快速傅里叶变换窗长为信号自身长度。

被检测信号分别为 CW 正弦脉冲、CW-LFM 线性调频组合信号(其时频信号如图4所示), 其中 CW 信号的脉宽分别为 0.5 s、3 s, 中心频率 f_0 归一化后为 0.17; CW-LFM 组合信号中 LFM 信号的脉宽为 2.4 s, 信号分布频段归一化后为 [0.17, 0.33], CW 信号脉宽为 0.5 s, 中心频率 f_0 归一化后为 0.5, 两组信号间隔为 0.1 s。



(a) CW 信号



(b) CW-LFM 组合信号

图4 CW 和 CW-LFM 组合信号的时频图

Fig.4 Time-frequency diagrams of CW signal and CW-LFM composite signal

设频域 CFAR 检测时背景噪声估计的参考滑窗长度 N 为 8, 其中虚警概率 P_{fa} 为 0.001, 由式(11)算得门限加权系数 $T=1.3714$ 。根据仿真数据对 CW、CW-LFM 组合信号进行 1000 次蒙特卡罗实验, 统计得到两类信号频域 CFAR 检测的检测概率 P_d 随 SNR 的变化情况, 如图 5(a)所示。为了跟传统

的时域恒虚警检测算法进行性能比较，这里利用文献[4]提出的双门限 CFAR 能量检测方法，对一组脉冲信号进行检测分析。图 5(b)给出了对 CW 信号的双门限 CFAR 能量检测^[6]的检测概率曲线，其中双门限检测融合样本数目 N_r 为 48，第二级门限 r 值为 10；第一级检测为平方积分长度 M 为 2 的 CFAR 能量检测，其中参考滑窗长度为 48，门限加权系数 T_E 为 0.1004。

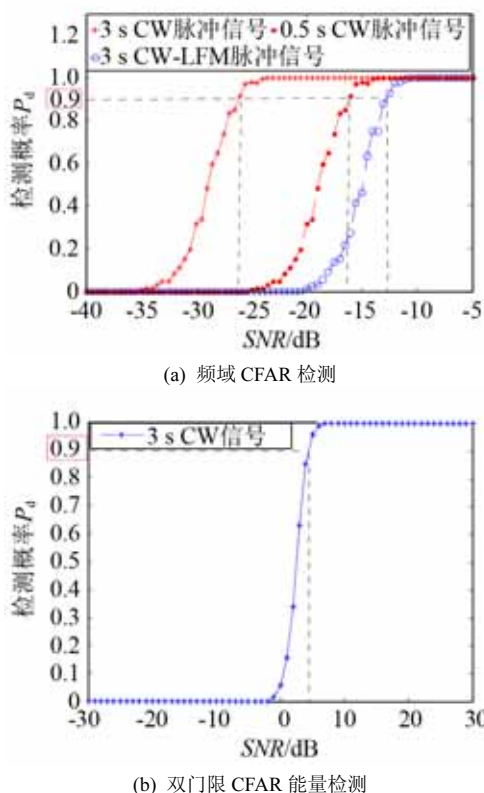


图 5 频域 CFAR 检测和时域 CFAR 检测性能比较
Fig.5 Performance comparison of CFAR detections for a given CFAR both in frequency domain and time domain

如以 $P_d=0.9$ 作为检测器的性能评价标准，由图 5(a)可见，频域恒虚警检测器对两类脉冲信号都有很好的检测性能，对脉宽 3 s 的 CW 信号最低检测 SNR 甚至达到了 -26 dB；而图 5(b)表明双门限 CFAR 能量检测对相同信号的最低检测 SNR 仅为 4 dB。

此外对于组合脉冲信号的检测性能与其包含的 CW 信号长度有关，图 5(a)中 CW-LFM 组合信号 CW 成分长度为 0.5 s，对其最低检测 SNR 达到了 -13 dB。

由上述仿真分析，可以看出对于声呐脉冲信号中的窄带成分的检测，频域恒虚警检测方法的检测性能优于时域恒虚警检测方法。利用频域恒虚警检测技术可以较大程度提高对弱声呐脉冲信号检测性能，其性能与包含的窄带信号成分有关，其所含窄带成分越多则性能越优。

3 海试数据处理

利用实际录取的主动脉冲信号数据验证海洋背景噪声下频域恒虚警检测算法的检测性能，其中每次快速傅里叶变换窗长为信号自身长度。

被检测信号分别为 CW、CW-LFM 组合信号(其时频信号如图 6 所示)，其中 CW 信号的脉宽为 0.5 s，中心频率 f_0 归一化后为 0.175；CW-LFM 组合信号中 LFM 信号的脉宽为 0.4 s，分布频段归一化后为 $[0.117, 0.233]$ ，CW 信号频率脉宽为 0.1 s，中心频率 f_0 归一化后为 0.412，两组信号间隔 0 s。

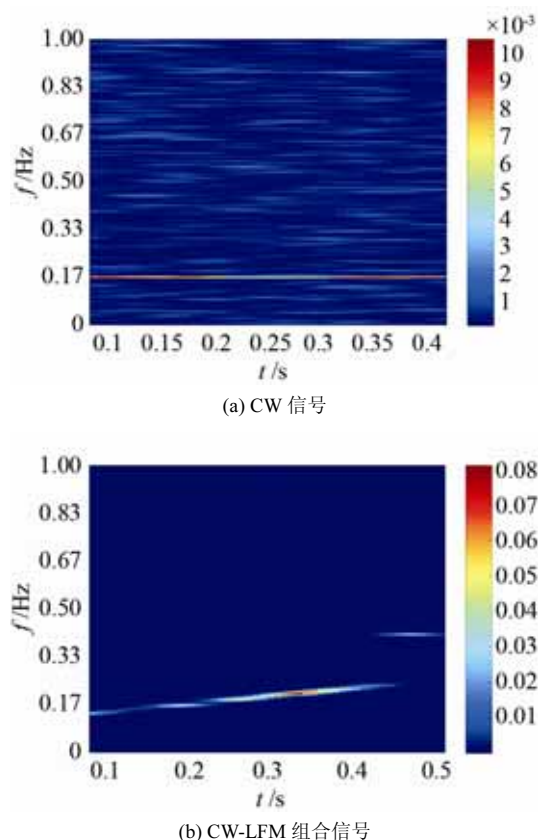
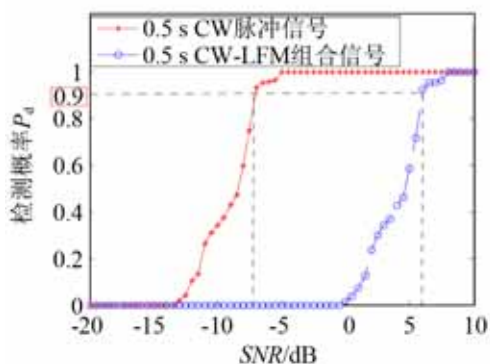


图 6 CW 和 CW-LFM 组合信号实际数据时频图
Fig.6 Real data diagrams of CW signal and CW-LFM composite signal in time-frequency domain

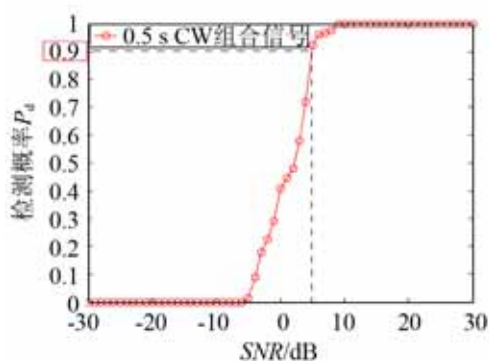
设频域 CFAR 检测背景噪声估计的参考滑窗长度 N 为 8，其中虚警概率 P_{fa} 为 0.001，由式(11)算得门限加权系数 $T=1.3714$ 。根据实际数据对 CW、CW-LFM 组合信号进行 1000 次频域恒虚警检测，统计得到两类信号频域 CFAR 检测的检测概率 P_d 随 SNR 的变化情况，如图 7(a)所示。

同时为了与时域恒虚警检测方法进行性能比较，利用双门限 CFAR 能量检测方法对一组脉冲信号进行检测分析。图 7(b)给出了对 CW 信号的双门限 CFAR 能量检测的检测概率曲线，其中双门限检

测融合样本数目 N_r 为 250, 第二级门限 r 值为 33; 第一级检测为平方积分长度 M 为 2 的 CFAR 能量检测, 其中参考滑窗长度为 48, 门限加权系数 T_E 为 0.1004。



(a) 频域 CFAR 检测



(b) 双门限 CFAR 能量检测

图 7 实际数据频域 CFAR 检测和时域 CFAR 检测性能比较
Fig.7 Performance comparison between CFAR detections in frequency domain and in time domain of the real data

如果以 $P_d=0.9$ 作为检测器性能评价标准, 由图 7(a)可以看出频域恒虚警检测方法实际处理中对 CW、CW-LFM 组合信号都有较好的检测性能, 其中对脉宽 0.5 s 的 CW 信号最低检测 SNR 达到了 -8 dB, 而图 7(b)表明双门限 CFAR 能量检测对相同信号的最低检测 SNR 仅为 5 dB。

此外对于组合信号等复杂脉冲信号的检测性能与其 CW 成分长度有关, 图 7(a)中脉宽 0.5 s 的 CW 信号最低检测 SNR 为 -7 dB, 而 CW-LFM 组合

信号 CW 成分长度为 0.1 s, 对其最低检测信噪比也达到了 6 dB。

上述实际数据处理验证结果表明, 对于实际中声呐脉冲信号的窄带成分的检测, 频域恒虚警检测方法的检测性能优于时域恒虚警检测方法。利用频域恒虚警检测技术可以较大程度提高对弱声呐脉冲信号的检测性能, 并且其性能与包含的窄带信号成分有关, 其所含窄带成分越多则性能越优。

4 结束语

文中提出了一种频域恒虚警检测方法, 在频域中对疑似信号与估计背景进行比对的方式完成脉冲信号的检验判决, 并给出了相应的检验统计量获取方法、背景噪声估计方法和恒虚警检测门限的计算方法。仿真分析和实际数据处理结果表明, 该方法对弱声呐脉冲信号的检测性能较常规的固定门限检测和时域恒虚警检测方法有较大提高, 具有非常大的工程应用价值。

参 考 文 献

- [1] XIA X G, A quantitative analysis of SNR in the short-time fourier transform domain for multicomponent signals[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1998, 46(1): 200-203.
- [2] 田坦, 声呐技术(第二版)[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2010: 180.
TIAN Tan, Sonar Technology[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2010: 180.
- [3] LANK G W, CHUNG N M. CFAR for homogeneous part of high-resolution imagery[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 1992, 28(2): 370-381.
- [4] 宋惠波, 高梅国, 田黎育. 雷达微弱信号检测算法中的恒虚警处理[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(6): 1330-1331, 1342.
SONG Huibo, GAO Meiguo, TIAN Liyu. CFAR detection algorithm for radar dim target[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(6): 1330-1331, 1342.
- [5] 何友. 雷达目标检测与恒虚警处理(第二版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011: 37.
HE You. Radar target detection and CFAR processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011: 37.