

DOI: 10.3969/j.issn.1672-2337.2018.03.017

一种非平稳复杂环境下的自适应恒虚警算法

芦永强, 韩壮志, 张宏伟

(陆军工程大学, 河北石家庄 050003)

摘要: 针对当前恒虚警算法在非平稳强干扰环境下检测适应性能较差的问题, 提出了一种自适应恒虚警检测方法。该算法利用二阶统计假设与 Shapiro-Wilk 检验得到具有均匀分布的杂波背景估计, 并且结合频域加窗处理方法, 对超高射速脱壳弹丸多目标回波进行处理, 消除了卡瓣频谱干扰的影响。实测数据表明, 该算法不需要任何关于背景环境的先验信息, 可以适应多种回波数据, 实现了在复杂强干扰环境中对目标的精确检测。

关键词: 超高射速弹丸多目标; 剔除平均恒虚警; 自适应恒虚警; 二阶统计假设; Shapiro-Wilk 检验; 频域加窗

中图分类号: TN957 文献标志码: A 文章编号: 1672-2337(2018)03-0333-05

An Adaptive CFAR Algorithm in Nonstationary and Complex Environment

LU Yongqiang, HAN Zhuangzhi, ZHANG Hongwei
(The Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: An adaptive CFAR detection method is proposed to solve the problem that the current CFAR algorithms show poor performance in nonstationary and strong interference environments. The algorithm uses second order statistical hypothesis and Shapiro-Wilk test to obtain uniformly distributed clutter background estimation. Combining with frequency domain windowing algorithm, it performs processing of the multi-target echoes of high firing rate projectile to eliminate the spectrum obstruct of the claw. The measured data show that the algorithm can adapt to a variety of echo data without any prior information about the background environment and achieve accurate CFAR detection in complex and strong interference environment.

Key words: ultra-high firing rate projectile multi-target; TM-CFAR; adaptive CFAR; second order statistical hypothesis; Shapiro-Wilk test; frequency domain windowing

0 引言

在高射速火炮弹丸弹道测量过程中, 雷达系统的接收机收到的回波中往往存在着大量的噪声与干扰, 恒虚警检测效果对雷达性能有直接的影响^[1]。随着火炮射速与弹丸速度不断提高, 雷达回波信号多存在于非平稳复杂环境下, 背景杂波分布不均匀, 经典的单元平均检测与剔除平均检测等恒虚警算法不能满足信号检测的要求。针对这一问题, 文献[2]提出了一种改进的剔除平均恒虚警检测(TM-CACFAR)算法, 该算法相比于经典恒虚警算法, 检测效果得到了一定的改善。但

是该算法对不同种类的回波数据适应性较差, 并且无法解决脱壳弹丸卡瓣频谱干扰的问题。

本文提出了一种非平稳复杂环境下自适应恒虚警算法, 对参考单元进行升序排列, 并利用二阶统计假设与 Shapiro-Wilk 检验^[3]得到检测单元在非平稳环境下符合高斯分布的杂波背景估计, 并且无需杂波背景先验信息, 具有良好的自适应性。针对弹丸卡瓣频谱干扰这一问题, 采用了频域加窗处理^[4]来抑制卡瓣频谱能量。本文给出了几种弹丸实测数据的检测结果, 实验结果表明, 本文改进算法相比于改进的 TM-CACFAR 算法具有更好的检测效果与更强的自适应性。

1 恒虚警检测原理

CFAR 算法基本流程如图 1 所示, 检测单元 X_i 的门限由背景杂波估计 Z 与门限系数 T 决定。当检测单元超过门限值时认为出现目标; 反之, 认为无目标。不同的 CFAR 算法背景杂波能量估计方法不同, 最常见的有均值类恒虚警算法与有序类恒虚警算法等。但是这两类算法均不适用于非平稳环境下背景杂波的能量估计^[5-6]。

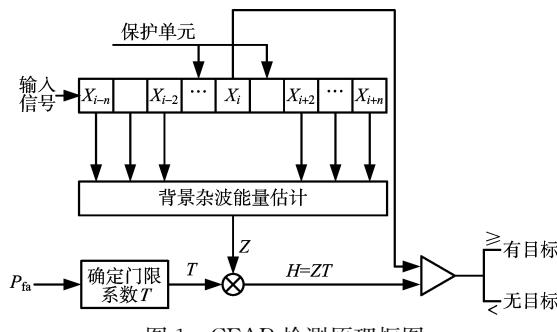


图 1 CFAR 检测原理框图

文献[2]针对当前经典恒虚警算法在非平稳复杂背景环境中检测性能较差的问题提出了一种改进的 TM-CACFAR 算法, 在经典的 TM-CACFAR 的基础上剔除能量超过均值 m 倍的参考单元, 更新样本得到背景均匀的杂波估计。最后, 通过设置双门限来消除回波数据中噪声功率与伪码副瓣形成的虚警。该算法在一定程度上增强了目标检测性能。但是在实验过程中仍存在以下几点问题:

- 1) 算法中的参数(剔除阈值 m , 双门限增益 \hat{G})不具有通用性, 不同数据检测效果差距过大, 需要根据检测效果不断地调整参数。
- 2) 算法中门限 2 由回波数据峰值决定, 当弹丸卡瓣频谱能量大于弹丸频谱能量时, 无法剔除弹丸卡瓣形成的虚警。

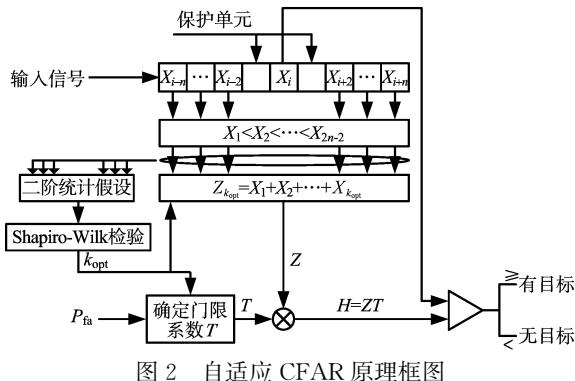
针对上述问题, 本文设计了一种非平稳复杂环境下的自适应恒虚警检测器, 对不同种类的回波数据均可以得到高斯分布的杂波背景。

2 复杂环境下的自适应恒虚警处理算法

2.1 二阶统计假设恒虚警算法

改进的自适应恒虚警算法在单元平均的基础上, 结合有序统计类恒虚警算法, 通过二阶统计假

设与 Shapiro-Wilk 检验, 自适应地选取参考单元得到符合高斯分布的杂波背景, 从而得到待测单元的检测门限, 其原理如图 2 所示。



该检测器包括 5 个步骤来估计杂波背景与设置相应的自适应阈值。

- 1) 对参考窗口样本进行排序, 得到一个升序的新序列 $\{X_1, X_2, X_3, \dots, X_N\}$ 。
- 2) 用有序样本最小二阶差分的指数 k 估计序列 $\{X_1, X_2, X_3, \dots, X_N\}$ 中的杂波干扰个数, 剔除干扰数据 $\{X_{k+1}, X_{k+2}, \dots, X_N\}$ 。
- 3) 利用 Shapiro-Wilk 检验剔除干扰后的序列 $\{X_1, X_2, \dots, X_k\}$ 是否符合正态分布, 若检验通过则输出参考单元窗长 $k_{opt}=k$; 若检验不通过, 则剔除 $k-1$ 开始重新进行 Shapiro-Wilk 检验, 直到找到符合条件的参考单元窗长 k_{opt} 。
- 4) 计算对应的背景电平与设置自适应阈值电平, 如式(2)所示:

$$k = \min_i(\text{var}(Y_i) - \text{var}(Y_{i+1})), i=1, 2, \dots, N \quad (1)$$

式中, Y_i 表示 X_1 至 X_i 的序列, 即 $Y_i = \{X_1, X_2, \dots, X_i\}$, $\text{var}(Y_i)$ 表示序列 Y_i 的方差。

3) 利用 Shapiro-Wilk 检验剔除干扰后的序列 $\{X_1, X_2, \dots, X_k\}$ 是否符合正态分布, 若检验通过则输出参考单元窗长 $k_{opt}=k$; 若检验不通过, 则剔除 $k-1$ 开始重新进行 Shapiro-Wilk 检验, 直到找到符合条件的参考单元窗长 k_{opt} 。

4) 计算对应的背景电平与设置自适应阈值电平, 如式(2)所示:

$$T_{k_{opt}} Z_{k_{opt}} = T_{k_{opt}} \sum_{j=1}^{k_{opt}} X(j) \quad (2)$$

式中, $T_{k_{opt}}$ 由设定的虚警率 P_{fa} 通过计算得到, 两者关系如式(3)所示^[7]:

$$P_{fa}(k_{opt}) = \binom{N}{k_{opt}} \prod_{j=1}^{k_{opt}} \left(T_{k_{opt}} + \frac{N-j+1}{T_{k_{opt}} - j + 1} \right)^{-1} \quad (3)$$

通过计算可得^[8]

$$P_{fa}(k_{opt}) = (1 + k_{opt})^{-k_{opt}} \cdot$$

$$\frac{\Gamma(N-k_{opt}) \Gamma\left(\frac{N+k_{opt} T_{k_{opt}}}{1+T_{k_{opt}}}\right)}{\Gamma(N) \Gamma\left(\frac{N-k_{opt}}{1+T_{k_{opt}}}\right)} \quad (4)$$

5) 根据门限阈值 $T_{k_{\text{opt}}} Z_{k_{\text{opt}}}$ 进行判定:

$$\begin{cases} H_1: X_i \geq T_{k_{\text{opt}}} Z_{k_{\text{opt}}} \\ H_0: X_i < T_{k_{\text{opt}}} Z_{k_{\text{opt}}} \end{cases} \quad (5)$$

式中, 判决准则 H_1 为待测单元大于门限, 出现目标; 判决准则 H_0 为待测单元小于门限, 无目标。

2.2 恒虚警检测在超高速多目标检测中的应用

高射频弹丸多目标回波信号经过时频分析得到时频域信号。每一个距离点包含了在该距离内所有频谱的分布信息, 考虑到多目标存在干扰的问题, 在距离维上以频率点为基准进行恒虚警处理, 如图 3 所示。

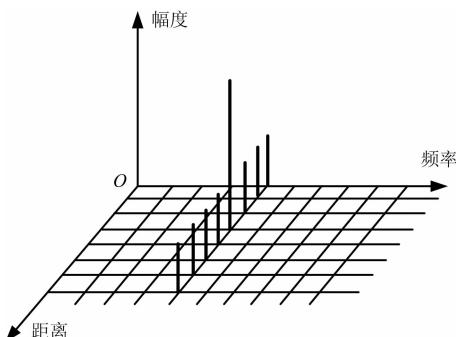


图 3 频率距离恒虚警示意图

该自适应恒虚警算法得到的临近单元的杂波统计特性与待检单元一致, 因此适用于距离维单元的恒虚警检测。

2.3 频域加窗处理

在超高速弹丸回波数据中主要包括了 3 种形式的干扰: 1) 高斯噪声; 2) 伪随机码副瓣产生的能量泄露; 3) 弹丸发射过程中卡瓣底托产生的回波频谱干扰。高斯噪声与伪码副瓣的能量要小于目标能量, 通过恒虚警检测可以检测出目标频谱。而弹丸卡瓣产生的频谱与目标能量接近, 部分弹丸卡瓣的 RCS 要大于目标的 RCS, 其频谱能量大于目标的频谱能量。通过恒虚警检测必然会出现虚警。针对该问题, 本文通过频谱加窗, 根据目标信号与干扰信号在频域分布的差异, 设计了一种频域滤波器来抑制卡瓣干扰。

因为卡瓣的速度要远小于弹丸速度, 卡瓣频谱主要分布在低频区域。本文根据弹丸的先验速度信息, 对弹丸目标频谱分布区间以外的低频部分进行频域加窗处理来抑制卡瓣频谱能量。图 4

为回波数据频谱加窗处理的原理框图。

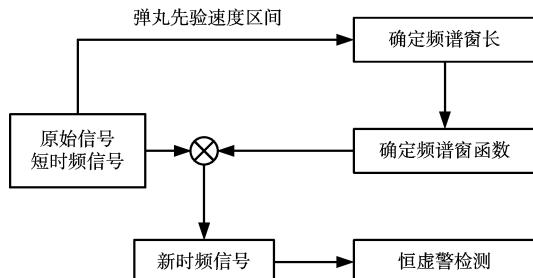


图 4 频域加窗处理方法原理框图

其中窗函数如图 5 所示, 采用向上开口的半抛物线形式。一方面可以很好地抑制低频段卡瓣频谱能量, 另一方面半抛物线形式易于计算, 利于硬件实现^[5]。

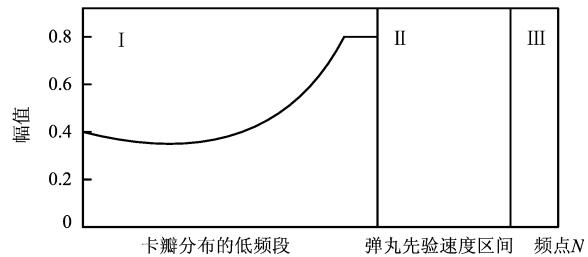


图 5 基于先验速度构建的频谱窗

3 数据处理结果与分析

本次实验采用 3 组高射速弹丸实测回波信号, 其中包括了 3 连发、7 连发和 32 连发的高炮回波信号。采用文献[2]提出的改进 TM-CACFAR 和本文的自适应恒虚警算法进行处理。其中, 虚警率统一采用 10^{-6} , 改进的 TM-CACFAR 算法中采用文献[2]给定的参数, 恒虚警门限为最终的门限 2, 由于文献[2]中的门限 2 是通过回波数据最大值减去一个固定增益, 因此为固定门限。为了更加准确地观察门限与数据关系, 本文将每一维时间内的回波频谱与计算得到的门限值按照时间维的顺序同时显示在同一图中。

图 6 为 3 连发弹丸回波数据的处理结果图, 其中图 6(a) 为短时傅里叶变换后得到的回波时频图, 图中像素代表能量幅值大小, 从图中可以看出, 3 个明亮谱点区域代表 3 发弹丸的回波信号, 具有较强的伪码副瓣干扰, 并且在低速区域存在一个高能量的弹丸卡瓣。图 6(b)、图 6(c) 分别为文献[2] 算法和本文改进算法的恒虚警门限仿真

图。图 6(b)为文献[2]算法的恒虚警门限,由于卡瓣频谱能量高于弹丸回波能量,因此导致了恒虚警门限过高,无法检测出弹丸目标,造成漏警。图 6(c)为改进算法的恒虚警门限,图中门限随杂波背景自适应变化,可以检测出目标信息,并且成功剔除了弹托卡瓣的能量干扰。图 6(d)、图 6(e)分别为文献[2]算法与本文算法的检测结果,由于门限过高导致文献[2]中的恒虚警算法存在漏警现象,而本文提出的改进算法可以实现目标的准确检测。

图 7 所示为 7 连发弹丸回波数据的处理结果图,其中图 7(a)为短时傅里叶变换后得到的回波时频图,从图中可以看出,该回波数据信噪比较高并且不存在卡瓣频谱的干扰。图 7(b)、图 7(c)分别为两种算法的恒虚警门限,从图中可以看出,两

种算法的门限值均可以剔除干扰,实现目标分辨。两种算法在对 7 连发弹丸回波数据进行处理时均取得了较好的检测效果。

图 8 为 32 连发弹丸的回波数据的处理结果图,其中图 8(a)为短时傅里叶变换后得到的回波时频图,该回波数据的信噪比很低,存在大量的高斯噪声、伪码副瓣和卡瓣频谱的干扰。从图 8(b)可以看出,文献[2]算法的门限过低,无法完全滤除 3 种形式的干扰,而改进算法的自适应性较强,图 8(c)中改进算法门限随杂波背景自行调整,可以准确地剔除干扰,提取目标。图 8(d)、图 8(e)为两种算法的检测结果,从图中可以看出,文献[2]算法处理结果中存在大量虚警,检测效果很差。而本文改进的恒虚警算法成功剔除了 3 种形式的干扰,准确地检测出了弹丸目标。

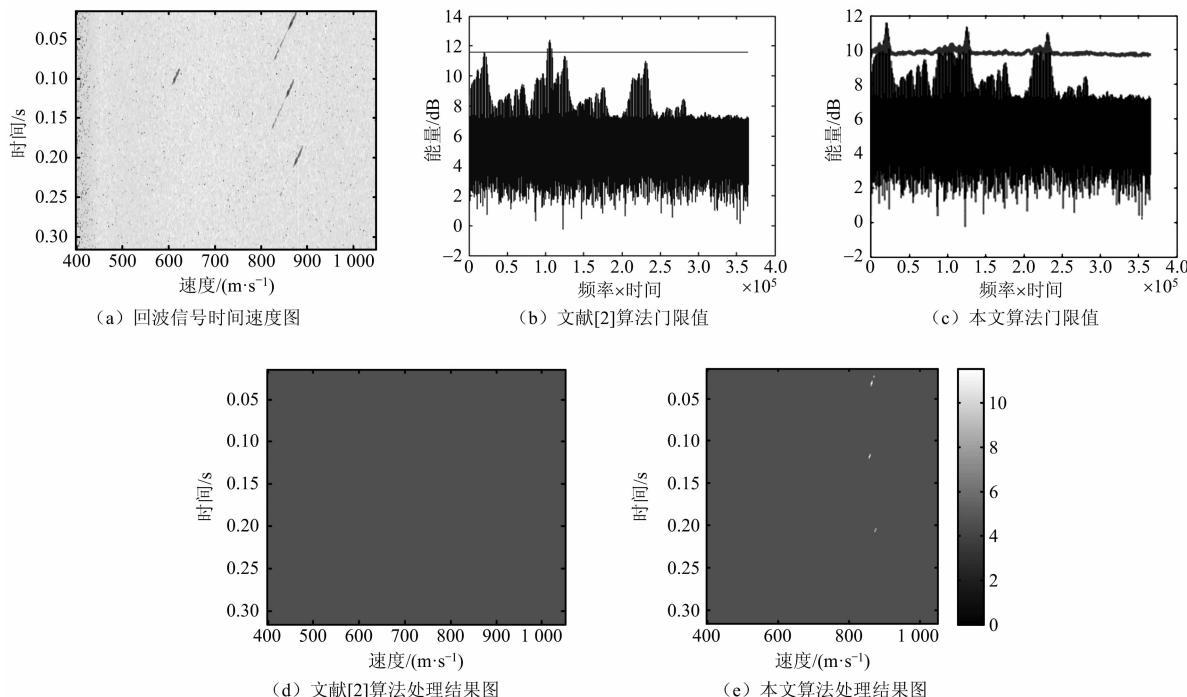
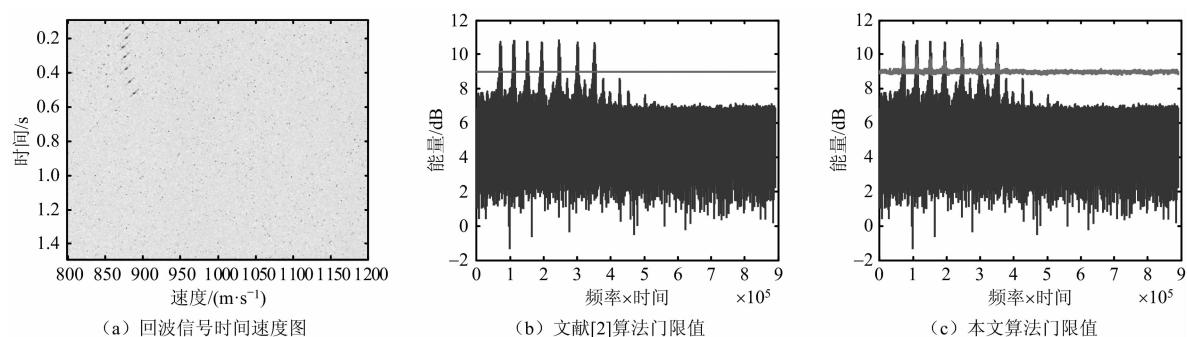


图 6 3 连发弹丸回波数据处理结果图



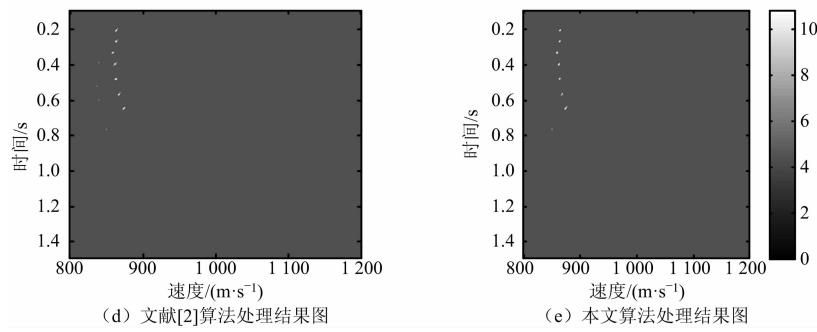


图 7 7 连发弹丸回波数据处理结果图

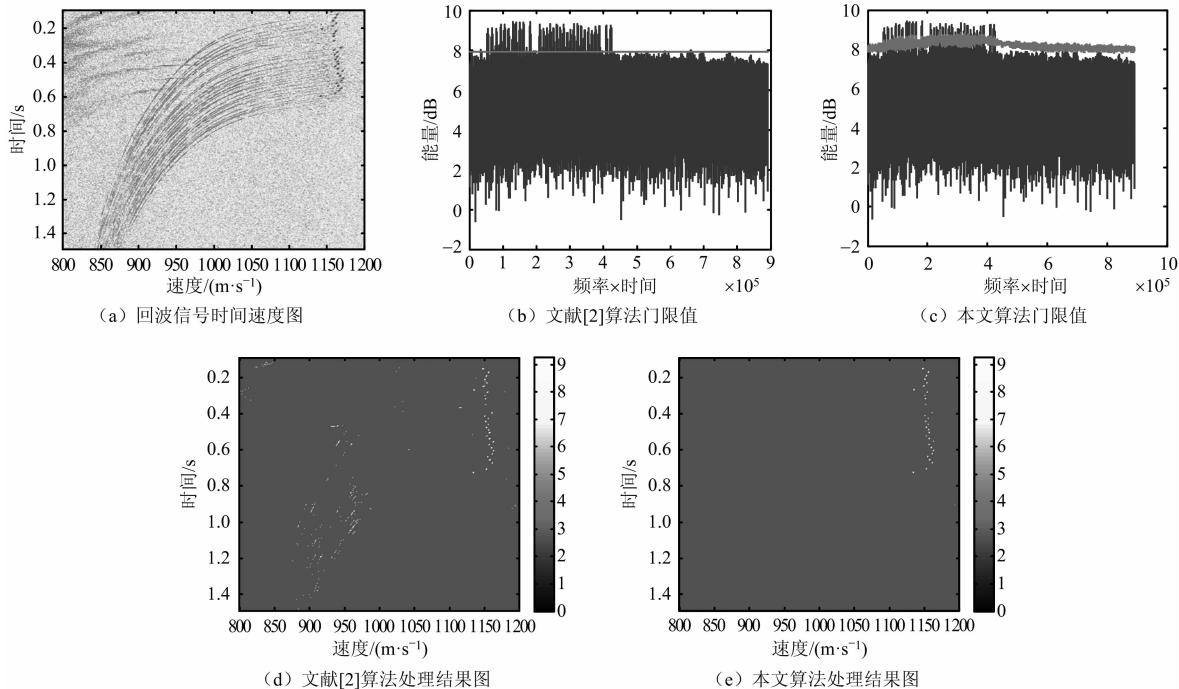


图 8 32 连发弹丸回波数据处理结果图

表 1 列出了两种检测算法的性能指标,从表 1 可以看出,文献[2]的算法虽然准确检测出了 7 连发弹丸数据中的目标,但是该算法自适应性较差,当缺少先验经验时恒虚警门限无法得到准确的杂波背景估计,会产生大量虚警,对后续弹迹拟合等数据处理效果造成严重的影响。本文提出的自适应恒虚警算法对 3 组实测回波数据处理均得到了

表 1 两种算法对实测数据检测性能指标对比

数据	算法	漏检数	正检数	虚警数	品质因子	高斯噪声	伪码	卡瓣干扰
3 连发弹丸数据	文献[2]算法	3	0	1	0.000 0	无	无	存在
	本文算法	0	3	0	1.000 0	无	无	无
7 连发弹丸数据	文献[2]算法	0	7	3	0.700 0	无	少量	无
	本文算法	0	7	0	1.000 0	无	无	无
32 连发弹丸数据	文献[2]算法	0	32	29	0.524 5	存在	存在	存在
	本文算法	0	32	0	1.000 0	无	无	无

很好的检测效果,可以有效地抑制卡瓣频谱的干扰影响,为后续的数据处理奠定了很好的基础。

4 结束语

本文提出了一种非平稳复杂环境下自适应恒虚警检测算法。该方法采用二阶统计假设与 Shapiro-Wilk 检验的方法,无需杂波背景先验信息,自适应地得到正态分布的杂波背景,提高了对不同回波数据的适应性,增强了在非平稳强干扰环境中的恒虚警检测效果。并且在超高射速弹丸多目标检测中,结合频域加窗处理的方法实现了复杂背景下的多目标检测。实测数据的处理结果表明,该算法相比于当前的恒虚警算法,具有更强的适应性和检测效果。

(下转第 342 页)