

低信噪比下离散频率编码波形脉冲信号联合积累检测算法

魏 嵩^① 张 磊^{*①} 马 岩^② 钟卫军^③

^①(中山大学电子与通信工程学院 深圳 518107)

^②(北京跟踪与通信技术研究所 北京 100094)

^③(西安卫星测量中心 西安 710071)

摘 要: 雷达电子侦察环境下, 非合作目标发射的离散频率编码(DFC)波形信号具有低截获、抗干扰的特性, 在低信噪比(SNR)条件下传统方法难以实现波形的稳健积累及准确的脉冲检测, 容易造成数据漏检与情报缺失。针对以上问题, 该文提出一种联合的积累检测算法, 该算法通过相关积累和非相干积累的联合处理实现了低信噪比下稳健脉冲信号包络的获取, 并利用双向恒虚警(CFAR)检测和脉冲沿判决准则抑制了突跳噪声对脉冲检测的影响, 实现了准确而稳健的脉冲到达时间和脉冲宽度的估计。相比于常规算法, 该文在不需要任何先验信息的条件下能够实现离散频率编码波形信号的准确检测, 检测虚警率低且具有良好的稳健性。仿真实验验证了所提算法的有效性和稳健性。

关键词: 脉冲检测; 参数估计; 相关积累; 恒虚警; 离散频率编码信号

中图分类号: TN95; TN911.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2023)03-0977-10

DOI: [10.11999/JEIT211619](https://doi.org/10.11999/JEIT211619)

Robust Joint Accumulation and Detection for Discrete Frequency Coded Waveform Signals at Low Signal-to-Noise Ratio

WEI Song^① ZHANG Lei^① MA Yan^② ZHONG Weijun^③

^①(School of Electronics and Communication Engineering, Shenzhen Campus of Sun Yat-sen University, Shenzhen 518107, China)

^②(Beijing Institute of Tracking Telemetry and Telecommunication, Beijing 100094, China)

^③(Xi'an Satellite Control Center, Xi'an 710071, China)

Abstract: In the radar electronic reconnaissance environment, the Discrete Frequency Coded (DFC) waveform signals emitted by non-cooperative targets with low probability of interception and anti-interference is hard to be accumulated and detected under low Signal-to-Noise Ratio (SNR) conditions. Consequently, a joint accumulation and detection algorithm is proposed in this paper. First, correlated accumulation and incoherent accumulation are jointly used to obtain signal envelopes from low SNR environments. Then, the bi-directional Constant False Alarm Rate (CFAR) threshold and pulse edge decision criteria are used to detect pulses and estimate accurate time of arrival and pulse width. Compared with conventional algorithms, the proposed algorithm could realize the accurate detection of discrete frequency coded waveform signals without any prior information, with low detection false alarm rate and good robustness. Simulation experiments verify the effectiveness and robustness of the algorithm in this paper.

Key words: Pulse detection; Parameter estimation; Correlated accumulation; Constant False Alarm Rate (CFAR); Discrete Frequency Coded (DFC) signal

收稿日期: 2021-12-31; 改回日期: 2022-05-10; 网络出版: 2022-06-13

*通信作者: 张磊 zhanglei57@mail.sysu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(62101603)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (62101603)

1 引言

近年来,随着雷达技术在军事领域的发展与广泛应用,雷达电子战博弈对抗愈演愈烈。在这个过程中,目标辐射源工作波形信号的有效侦察检测将为己方提供可靠的军事情报、战场态势感知,在赢得雷达电磁频谱的主动权和控制权上发挥了重要作用^[1,2]。在雷达电子侦察处理中,对于接收到的目标辐射源雷达信号,检测并准确提取脉冲的到达时间(Time Of Arrival, TOA)和脉冲宽度(Pulse Width, PW)对目标雷达的工作特性、工作状态和工作任务的分析具有重要意义。然而,随着具有低截获(Low Probability of Interception, LPI)特性的离散频率编码(Discrete Frequency Coded, DFC)^[3]波形信号在雷达电子战中的广泛应用,雷达信号侦察检测的准确性和稳健性受到了严重的影响。为了保证雷达电子战中情报信息的准确获取,如何在非合作侦察环境下对DFC波形信号脉冲实现准确检测成为当前雷达电子战中亟需解决的问题。

针对复杂调制波形信号的检测,基于时频域的检测和能量检测法是两种主流的处理方式。在时频域处理中,小波变换是一种经典的算法,Ehara等人^[4]首先提出了基于小波变换的弱信号检测方法,简涛等人^[5]又对近年来利用小波变换对信号检测的方法进行了总结分析。Liu等人^[6]提出了利用崔威廉斯分布的LPI信号检测方法,这种方法能够很好地应用于单频或线性调频信号(Linear Frequency Modulation, LFM)波形的检测,但是对低信噪比下的离散频率编码信号的检测性能较差。另外,短时傅里叶变换(Short Time Fourier Transform, STFT)^[7]和魏格纳分布(Wigner-Ville Distribution, WVD)^[8,9]及其衍生算法也在离散频率编码波形信号的检测和参数估计方面表现出了良好的性能。在时频分析的基础上,又有诸多学者结合机器学习方法实现了智能化的信号检测处理,扩展了时频分析在信号检测和参数估计上的应用,蒋伊琳等人^[10]提出了一种基于卷积神经网络的方法,实现了多种具有LPI特性波形信号的准确检测,王令欢等人^[11]则利用支持向量聚类实现了低信噪比下LFM信号的检测。基于以上研究分析可知,基于时频域的方法在复杂波形信号的检测上得到了有效的应用,并且由于机器学习方法的引入更是增强了其信号检测及识别能力,当前已成为一种主流的复杂波形信号检测方法。但是,基于时频域的方法受信噪比影响严重,在低信噪比下难以获得准确的波形时频分布,而在实际雷达电子战中,信号侦察属于非合作接收,侦察接收机的天线往往都只能对准目标辐射源

的发射天线副瓣,而副瓣的能量增益较低,则低信噪比就成为侦察接收信号的常态,这也就说明了基于时频域的方法并不能完全适用于侦察信号的检测处理。另外,基于机器学习的信号检测识别方法,需要通过大量的样本数据来构建并训练模型,这在缺乏先验信息的雷达侦察环境下是难以实现的,故这类方法也并不能很好地应用于雷达电子战的侦察环境下。

相比于时频域的信号检测方法,能量检测法是一种常用的信号盲检测手段,并且具有简单易于实施的优点。为了避免噪声对脉冲信号检测的影响,在经过能量检测前需要通过一定的积累手段来提高待处理信号的信噪比,进而获得信号准确而稳健的检测和参数估计结果。在传统的雷达信号处理中,非相干积累和相干积累是常用的信号积累手段^[12],具有良好的信号积累效果。然而,这类算法需要在已知脉冲重复间隔(Pulse Repetition Interval, PRI)的条件下对信号进行分组然后实现积累。很明显,在非合作条件下侦察接收信号的PRI是难以事先获取的,故这种积累方法并不能直接应用于侦察环境下的非合作目标接收信号。除了非相干积累和相干积累以外,相关积累^[13-15]是一种有效的脉冲自积累手段,这种算法基于脉冲信号之间具有相关性,而信号和噪声、噪声和噪声之间不具备相关性的特点,在不需要任何先验信息可以直接对低信噪比的脉冲信号进行积累以提高信噪比,获得良好的脉冲包络,这种积累方法在面对单载频信号和LFM时具有良好的性能表现。但是,由于DFC信号具有复杂的脉内频率调制方式,相关积累算法在面对这种波形信号时的积累效果表现并不理想。在能量检测法中,信号积累是为了获得良好的脉冲包络,而为了实现信号的准确检测则需要一定的信号检测手段,常用的检测手段是有固定门限的检测方法和恒虚警(Constant False Alarm Rate, CFAR)的检测方法^[12,16-18]。其中,固定门限的方法易于实施却无法应对多种复杂情况,其在雷达电子侦察环境下的应用范围受限,而CFAR检测方法能够根据接收数据中的噪声或杂波特性自适应地调整检测门限,实现稳健的脉冲检测,但是这种方法对于低信噪比下DFC波形信号的检测仍旧存在一定的局限性。

因此,为解决雷达电子侦察环境下DFC波形信号难以检测的问题,本文在相关积累算法的基础上,根据DFC波形信号的特征提出了一种非相干积累-相关积累联合的积累算法,然后在CFAR脉冲检测结果的基础上提出了一种脉冲沿的判决准则以抑制突跳噪声对脉冲检测的影响,最后通过仿真

实验验证了该算法对于低信噪比下DFC波形信号检测和参数估计的准确性与稳健性,具有一定的实际应用价值。

2 电子侦察信号积累检测

2.1 相关积累

在实际雷达电子侦察中,接收信号如式(1)所示,接收机接收到的数据同时包含了信号和噪声两个分量。

$$\mathbf{f}(t) = \mathbf{s}(t) + \mathbf{w}(t) = A \cdot e^{j(2\pi f_c t + \theta(t))} + \mathbf{w}(t) \quad (1)$$

其中, $\mathbf{s}(t)$ 表示信号分量, A 是信号幅度, f_c 表示信号载频, $\theta(t)$ 表示信号相位调制函数, $\mathbf{w}(t)$ 表示高斯白噪声,其均值为0,方差为 σ^2 。

对于侦察接收机来说,信号和噪声的先验信息是未知的,相关积累可以在不知道先验信息的情况下利用信号之间的相关性以及信号与噪声,噪声与噪声不相关的特性对侦察信号中的脉冲部分进行有效积累,进而提高数据的信噪比,为侦察信号中的脉冲数据检测和参数估计带来了诸多好处,其计算公式为

$$\begin{aligned} \mathbf{r}(k) &= \frac{1}{N} \sum_{i=k}^{k+N-1} \mathbf{f}(i) \cdot \mathbf{f}^*(i-\tau) \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=k}^{k+N-1} (\mathbf{s}(i) + \mathbf{w}(i)) \cdot (\mathbf{s}^*(i-\tau) + \mathbf{w}^*(i-\tau)) \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=k}^{k+N-1} A^2 e^{j\theta(i)} \\ &\quad + \frac{1}{N} \sum_{i=k}^{k+N-1} \left[A \cdot e^{j(2\pi f_c i + \theta(i))} \mathbf{w}^*(i-\tau) \right. \\ &\quad \left. + A \cdot e^{j(2\pi f_c (i-\tau) + \theta(i-\tau))} \mathbf{w}(i) + \mathbf{w}(i) \mathbf{w}^*(i-\tau) \right] \\ &= \mathbf{s}_r(k) + \mathbf{w}_r(k) \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $\mathbf{r}(k)$ 表示信号 $\mathbf{s}(t)$ 在时刻 k 的相关积累结果, N 为信号截取窗长度, i 是窗长 N 内的时间自变量, $\mathbf{f}(i)$ 表示时刻 i 的数据, $\mathbf{f}^*(i-\tau)$ 表示 $\mathbf{f}(i)$ 在固定时延 τ 处数据的共轭, $\Delta\theta(i) = 2\pi f_c \tau + \theta(i) - \theta(i-\tau)$ 表示信号分量的相位差分结果, $\mathbf{s}_r(k)$ 表示时刻 k 相关积累结果的信号分量, $\mathbf{w}_r(k)$ 表示时刻 k 相关积累结果含噪声项的分量。

根据中心极限定理可知,当 N 取值较大时, $\mathbf{w}_r(k)$ 可看作近似于高斯分布的,其均值为0,方差为 $\sigma_r^2 = (2A^2\sigma^2 + \sigma^4)/N$ 。 $\mathbf{s}_r(k)$ 可以看作不同相位项信号的叠加积累,且当相位差分结果 $\Delta\theta(i)$ 相同时, $\mathbf{s}_r(k)$ 内能够满足同相相加达到最大。当信号和噪声平均功率不变时,噪声项 $\mathbf{w}_r(k)$ 的特性是不变的,此时信号相关积累结果性能仅由 $\mathbf{s}_r(k)$

中相位差分项 $\Delta\theta(i)$ 决定。信号波形的不同会引起相位差分项 $\Delta\theta(i)$ 特性的不同,进而影响相关积累的性能。当信号分量 $\mathbf{s}_r(k)$ 满足同相相加时,信噪比增益能够达到最大,此时相关积累结果 $\mathbf{r}(k)$ 的信噪比可表示为

$$\begin{aligned} \text{SNR}_r &= \frac{P_s}{P_w} = \frac{NA^4}{(2A^2\sigma^2 + \sigma^4)} = \frac{NA^2}{(2A^2 + \sigma^2)} \cdot \frac{A^2}{\sigma^2} \\ &= \frac{NA^2}{(2A^2 + \sigma^2)} \cdot \text{SNR}_0 \end{aligned} \quad (3)$$

其中, P_s 为相关积累后信号平均功率, P_w 表示相关积累后噪声平均功率, $\text{SNR}_0 = A^2/\sigma^2$ 表示输入信号的信噪比。

由式(3)可知,当原始数据中信号和噪声的平均功率不变时,其相关积累结果的信噪比增益只和窗长 N 的大小有关,且窗长 N 越大信噪比提升效果越好。

2.2 CFAR脉冲检测

CFAR检测是致力于在噪声干扰环境下提供可预知检测的技术,常规的CFAR检测主要是对检测单元附近的噪声电平进行估计,根据噪声电平估计值设置信号检测门限,再将检测门限与检测单元中的信号电平进行比较,进而判断是否存在脉冲信号。根据CFAR检测的机理可知,该信号检测方法的检测门限是随处理信号位置的变化而变化的,且信号的检测门限是由其周围单元的噪声电平所决定的,这就证明了CFAR检测对信号的突变比较敏感,这一点非常适用于信号脉冲沿的准确检测。如图1所示,CFAR检测的滑窗包括检测单元、保护单元和参考单元,其中参与检测单元阈值计算的只有参考单元,保护单元的作用是防止参考单元中出现目标点,否则会过度抬高检测门限。

CFAR检测通过对参考单元内的样本数据进行估计设定检测判决门限以判断检测单元内是否存在目标,其检测判决门限 D_{th} 可表示为

$$D_{th} = a \cdot X \quad (4)$$

其中, a 为CFAR检测的门限系数, X 为参考单元内的样本均值。

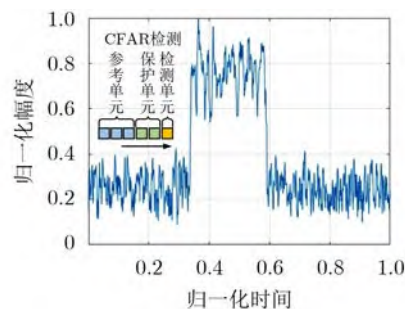


图1 CFAR检测示意图

假设虚警率为 P_{fa} , 参考单元个数为 M , 则有

$$a = M \cdot (P_{fa}^{-1/M} - 1) \quad (5)$$

$$X = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M x_i \quad (6)$$

其中, x_i 为参考单元内时刻 i 的样本值。

将式(5)和式(6)代入式(4), 得到检测单元的恒虚警判决门限 D_{th} 为

$$D_{th} = a \cdot X = (P_{fa}^{-1/M} - 1) \cdot \sum_{i=1}^M x_i \quad (7)$$

将式(7)求得的检测判决门限 D_{th} 与检测单元幅度进行比较, 从而做出脉冲有无的判决。基于CFAR的脉冲沿检测能够有效地获得脉冲沿的起跳位置, 相比于传统能量检测法中固定门限检测具有更加灵活的特性, 面对不同的数据具有一定的自适应性。

2.3 DFC波形信号积累与检测

DFC波形信号具有复杂的脉内调制特性, 一个脉冲信号可看作由多个单频码片信号组合而成, 其中每个码片信号具有不同的载频以及各个码片信号按照伪随机编码的方式进行排列。DFC波形信号的频率在时间上不连续, 存在明显的跳变呈现出明显的台阶形, 其脉冲内的时频分布示意图如图2所示, 数学表达式^[3]如式(8)所示。

$$s_{DFC}(t) = A \cdot \sum_{k=1}^{N_c} \text{rect}\left(\frac{t - kt_k}{t_k}\right) \cdot e^{j2\pi f_k(t - kt_k)} \quad (8)$$

其中, A 为信号幅度, N_c 为DFC信号中码片信号的个数, t_k 为第 k 个码片信号的时间宽度, f_k 为第 k 个码片信号的频率。

根据2.1节的分析可知, 相关积累信号分量 $s_r(k)$ 的相位差 $\Delta\theta(i)$ 将会直接影响信号的积累效果, 只有满足相位差相同时才能够保证同相相加实现最佳的积累。然而, 如图2所示, DFC波形信号中存在多个正交的频率分量, 当进行相关积累时多频分量

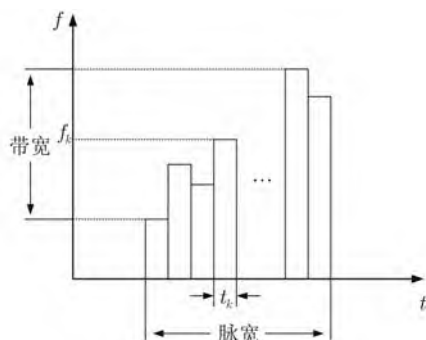


图2 DFC波形信号的时频分布示意图

会使得不同时刻的相位差 $\Delta\theta(i)$ 不同, 信号分量 $s_r(k)$ 也就难以满足同相相加的特性。因此, 相关积累在面对DFC波形信号时很可能存在效果不佳的情况。接下来对DFC波形信号的相关积累结果进行理论分析, 假设一个相关积累窗长 N 内只存在两个频率分量, 一个窗长所截取的信号可表示为式(9)的形式。

$$s_N(t) = e^{j2\pi f_t t} = \begin{cases} e^{j2\pi f_1 t}, & 0 \leq t \leq t_0 \\ e^{j2\pi f_2 t}, & t_0 < t \leq T \end{cases} \quad (9)$$

其中, f_t 表示不同时间对应的频率, t_0 为发生频率跳变的时刻, T 为截取信号的时间长度。

那么相关积累时的信号分量就可表示为

$$\begin{aligned} s_r(k) &= \frac{1}{N} \sum_{i=k}^{k+N-1} s(i) \cdot s^*(i + \tau) \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=k}^{k+N-1} \begin{cases} A^2 e^{-j2\pi f_1 \tau}, & 0 \leq i \leq t_0 - \tau \\ A^2 e^{j2\pi f_1 i - j2\pi f_2(i+\tau)}, & t_0 - \tau < i \leq t_0 \\ A^2 e^{-j2\pi f_2 \tau}, & t_0 < i \leq T - \tau \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

从式(10)可以看出, 此时DFC波形信号在任意时刻 k 的相关积累结果的信号分量同时存在3个相位分量。一般来说, 相关时延 τ 取值较小, 在计算过程中常常可以将中间的相位分量忽略, 那么此时 $s_r(k)$ 内就可看作两个具有不同相位分量的信号求和, 其信号叠加示意图如图3(a)所示, 其中, x, y 坐标轴表示信号的向量空间, φ 表示积累后的等效向量角。

然而, 当目标发射信号为单频信号 $s(t) = A \cdot e^{j2\pi f_c t}$ 时, 信号的相位差分结果 $\Delta\theta(i) = 2\pi f_c \tau$ 是不随时间 i 变化的常量, 相关积累时信号分量可看作同相相加的, 如图3(b)所示, 单频信号的相关积累的信号分量 $s_r(k) = A^2 e^{j\varphi}$, 其中 φ 为信号在时刻 k 相关积累结果的同相叠加相位。当目标雷达发射调频斜率为 γ 的LFM信号 $s(t) = A \cdot e^{j2\pi(f_c t + \frac{1}{2}\gamma t^2)}$ 时, 其相位差分结果为 $\Delta\theta_{LFM}(i) = 2\pi f_c \tau + 2\pi\gamma i\tau - \pi\gamma\tau^2$, 在一个相关积累窗内由 $\gamma i\tau$ 项引起的相位差是连续的且差异较小, 则LFM信号相关积累时信号分量可看作近似同相相加的, 如图3(c)所示, LFM信号的相关积累信号分量 $s_r(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=k}^{k+N-1} A^2 e^{j\Delta\theta_{LFM}(i)} \approx A^2 e^{j\varphi}$ 。

通过与单频信号和LFM信号相关积累的向量叠加示意图对比可以看出, 在一个相关积累窗内DFC波形信号存在多个频率分量, 其信号积累结果会存在明显的能量衰减, 且相关积累窗内含有的信号频率分量越多, 这个衰减越严重。本文用衰减因子 μ ($0 < \mu < 1$)来表示信号积累结果的衰减度, 则DFC波形信号的积累结果可表示为 $s_r(k) = \mu A^2 e^{j\varphi}$, 则式(3)也就可以改写为

$$\text{SNR}_r^{(\text{DFC})} = \frac{P_s}{P_w} = \frac{\mu^2 N A^2}{(2A^2 + \sigma^2)} \cdot \text{SNR}_0 \quad (11)$$

对于常规波形信号来说, 相关积累能够有效地实现信号积累, 可以从被噪声淹没的环境中获得高信噪比的脉冲包络, 然后通过CFAR检测能够实现准确的脉冲提取, 并且由于存在噪声项方差 $\sigma_r = (2A^2\sigma^2 + \sigma^4)/N$, 故窗长 N 越大信噪比提升效果越明显。然而, 根据式(11)可知, DFC波形信号的相关积累性能同时受衰减因子 μ 和窗长 N 的影响, DFC波形信号的相关积累在窗长较短时不能有效地降低噪声项的平均功率导致信号包络和噪声区分不明显, 而在窗长较长时又由于多频率分量的影响导致衰减因子 μ 作用更明显, 进而造成积累结果信号包络的恶化, 将严重影响CFAR对噪声门限电平的估计和后续脉冲的检测与提取, 极大地限制了作战侦察环境下的目标雷达信号参数特征信息的获取。

3 低信噪比下DFC波形信号联合积累检测算法

本文针对传统相关积累算法在面对DFC波形信号时积累性能不佳的问题, 基于DFC波形信号在短窗长下积累信噪比差, 长窗长下积累包络不稳

健的特征, 引入了相关积累和非相干积累联合的积累算法, 有效地提高了DFC波形信号的信噪比及其包络稳健性, 实现了低信噪比下非合作目标的DFC波形脉冲信号积累, 并通过双向恒虚警检测手段^[18]和脉冲沿判决准则获得了稳健的脉冲TOA和PW的估计。本算法实现了低信噪比条件下DFC波形信号的稳健检测与参数提取, 其算法的流程图如图4所示。

3.1 DFC波形信号联合积累方法

为了同时获得短窗长下的脉冲包络稳健度和长窗长下的信噪比增益, 本文算法在相关积累的基础上引入了非相干积累, 通过对多帧相关积累结果的叠加, 有效地中和两种窗长下的包络幅度问题, 在一定程度上获得了同时具有低的噪声平均功率和稳健的信号包络的积累结果。

在本算法中, 选取 M 个不同的相关积累窗长 ($N_1, N_2, \dots, N_{M_1}, \dots, N_M$), 其中前 M_1 个选择较短的窗长, 使其能够尽量满足在一个窗长内只有一个频率分量, 后 $M - M_1$ 个选择较大的窗长, 以保证相关积累结果噪声项平均功率能够有效降低。然后, 根据式(2)分别利用这 M 个窗长对接收到的低信噪比DFC波形信号进行相关积累, 在只截取一段接收数据的情况下就能够得到 M 帧不同窗长下的相关

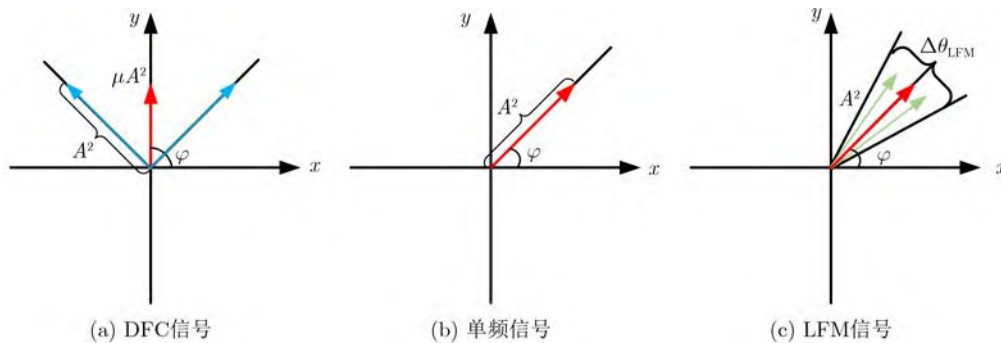


图3 各波形相关积累信号向量相加示意图

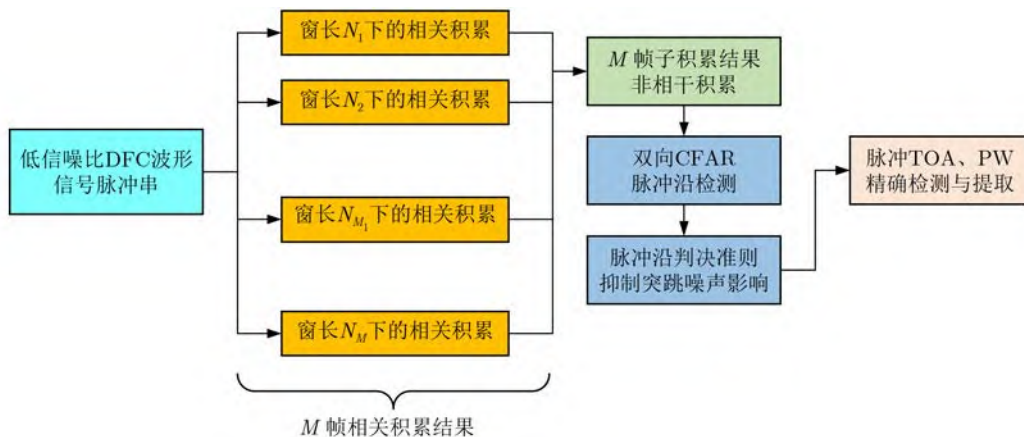


图4 低信噪比DFC波形信号脉冲积累检测算法流程

积累结果。此时,在 M 帧积累结果中,短窗长的积累结果具有包络稳健而噪声平均功率大的特点,长窗长的积累结果具有包络衰减明显而噪声平均功率小的特点。在对 M 帧积累结果进行非相干积累前,需要进行信号对齐处理以保证最佳的信号积累效果。根据式(2)的相关积累表达式可知,窗长 N 的数据截取方式会使得积累后的信号包络相比于原信号包络存在 N 点的前移,故对 M 帧不同窗长下的相关积累结果分别做 $N_m(1 \leq m \leq M)$ 点的移位处理,以实现 M 帧积累结果信号对齐处理。最后,对信号对齐后的 M 帧积累结果进行包络积累,通过非相干积累提高信号的信噪比以及降低信号的包络衰减,如式(10)所示

$$F(t) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M |f_r^{N_m}(t)| \quad (12)$$

其中, $f_r^{N_m}(t)$ 表示信号 $f(t)$ 在窗长为 N_m 条件下的相关积累结果, $|\cdot|$ 表示取模。

在式(10)的 M 帧积累结果的叠加中,在任意时刻 k 信号分量的叠加可以写为

$$S(k) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M |s_r^{N_m}(k)| = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \mu_m A^2 = \frac{(\mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_M)}{M} A^2 \quad (13)$$

其中, $s_r^{N_m}(k)$ 表示在窗长为 N_m 条件下的相关积累结果的信号分量, μ_m 表示窗长为 N_m 条件下的信号能量衰减因子。

从式(11)的信号分量幅度叠加结果可以看出,多帧相关积累结果的信号分量进行非相干积累能够对衰减因子 μ 进行平均,中和了不同窗长下的衰减因子,进而获得较为稳健的脉冲信号包络。并且,在非相干积累过程中噪声项的幅度是随机叠加的,各帧中的相关积累结果的噪声项幅度无法实现有效的积累,这也为数据信噪比的提升提供了有效的帮助。

3.2 基于双向CFAR和脉冲沿判决准则的联合检测方法

本文算法在获得高信噪比且稳健的信号包络后,通过双向的单元平均恒虚警(Cell Averaging CFAR, CA-CFAR)实现了信号脉冲前后沿的检测,并采用脉冲沿判决准则有效地抑制了突跳噪声对信号检测的影响,最终得到了信号准确的TOA和PW估计结果,信号检测判决的示意图如图5所示。

由于积累的脉冲包络具有一定的宽度,且存在明显的信号前后脉冲沿,故本文算法采用前向CFAR和后向CFAR分别从信号数据的前端和后端进行检测,

通过两次CFAR操作分别得到脉冲信号上升沿和下降沿的检测值。理论上,当CFAR中的检测单元幅度大于检测阈值时即可认为出现了信号的脉冲沿。然而由于信号本身处于低信噪比环境下,经过积累处理后的数据也并不能完全排除噪声的影响,突跳噪声会突然越过门限而造成信号脉冲沿的错误估计,所以对超过检测门限的这部分还需要进行进一步判决以排除噪声的影响。

脉冲信号前后沿引起的超过检测门限和噪声突跳引起的超过检测门限的最大区别就是,信号的脉冲沿是持续上升或持续下降的,而噪声的突跳仅仅在一瞬间的长度,那么就可以在上述检测的基础上引入弱信号积累判决准则^[18],即当检测单元连续 l 次超过检测门限时才认为是成功检测到了信号的脉冲沿。在信号的检测过程中,每次检测都可看作相互独立的,根据概率论知识可知,连续 l 次发生虚警的概率可表示为虚警概率 P_{fa} 的 l 次累乘结果 P_{fa}^l 。又因为虚警率 $P_{fa} \in (0, 1)$,则虚警联合概率 P_{fa}^l 将十分接近于零,近乎为不可能事件。故当检测单元连续 l 次超过检测门限时,认为成功检测到了信号的脉冲沿,并将这 l 个检测单元中的第1个点标记为信号的脉冲沿起始点 p_s 。

进一步地,对于脉冲信号的TOA和PW的估计来说必须判断脉冲的上升沿和下降沿后才能得到正确的估计参数,而CFAR检测和弱信号积累判决准则只能检测信号的脉冲沿,而无法判断是信号的上升沿还是下降沿。本算法将从脉冲沿起始点 p_s 开始 l 次连续越过门限的数据段的1阶差分作为判决门限来实现对信号的脉冲沿进行判决,其门限表达式如式(16)所示。

$$J_{th} = \sum_{i=0}^{l-1} F(t_{i+1}) - F(t_i) \quad (14)$$

其中, $F(t_i)$ 表示 t_i 时刻的数据幅度值。

对于脉冲上升沿来说,其信号幅度总体是上升的,1阶差分必然是大于0的值;同理,脉冲下降

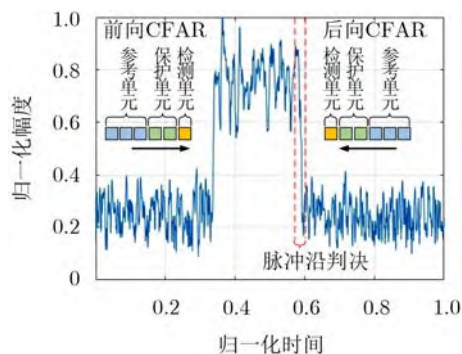


图5 信号检测判决示意图

沿的一阶差分必然是小于0的值。通过对门限 J_{th} 的正负判决就可以得到所检测到的是上升沿还是下降沿,并只取前向CFAR的上升沿检测结果和后向CFAR的下降沿检测结果。相比于瞬间越过门限的突跳噪声而言,脉冲由于具有较明显的脉宽宽度所以总是以一对脉冲沿的形式出现的,故本文算法以同时检测到上升沿和下降沿两个脉冲沿为基准确定脉冲信号的位置,进一步地抑制了突跳噪声在脉冲沿检测中的影响,保证了信号检测和特征参数估计的稳健性。

将基于以上准则检测到的脉冲上升沿和下降沿的采样点分别记为 T_{TOA} 和 T_{TOE} ,若信号的采样率为 F_s ,那么信号的脉冲到达时间和脉冲宽度估计值可表示为

$$E_{TOA} = T_{TOA} / F_s \quad (15)$$

$$E_{PW} = (T_{TOA} - T_{TOE}) / F_s \quad (16)$$

4 实验验证与分析

本节通过仿真实验对本文算法的性能进行了验证分析,首先在低信噪比条件下验证了本文算法相对于传统算法在积累提升上的有效性,然后通过仿真不同DFC雷达波形信号在多个信噪比条件下的TOA和PW检测结果验证了本文算法在多种信噪比条件下积累检测的稳健性,本文实验中仿真DFC雷达波形信号的基础参数如表1所示。

4.1 算法有效性验证

首先,设置仿真信号信噪比 $SNR = -5$ dB,信噪比定义如式(19)所示,DFC波形脉内为10个码元信号。

$$SNR = 10 \lg \frac{P_s}{P_n} \quad (17)$$

其中, P_s 表示脉冲信号的平均功率, P_n 表示噪声的平均功率。

其次,本实验取传统相关积累算法的窗长分别为32点和1024点,并取窗长点数为从32开始以32点为间隔至1024点截止作为本文联合积累算法的窗长集 N_s 对仿真信号分别进行积累,其积累结果分别

如图6(a)、图6(b)和图6(c)所示。然后,针对3种积累结果分别采用传统CFAR检测手段和本文提出的双向CFAR-脉冲判决准则的联合检测方法进行脉冲沿的检测,其检测结果如图6(d)至图6(i)所示。

从仿真结果可以看出,在 $SNR = -5$ dB的条件下,脉冲已经被淹没在了噪声中,通过一定的积累手段能够实现信号包络的提取,从积累结果可以看出,信号相关积累结果整体的噪声水平会随着窗长的增大而减小,但是窗长越大DFC波形信号的脉内衰减越明显。本文积累算法有效地结合了短窗长和长窗长两种积累结果的特点,在降低噪声平均功率的同时稳健了信号包络。从图6(d)至图6(f)的传统CFAR检测结果可以看出,CFAR检测并不能有效地分辨信号的脉冲前后沿,并且由于突跳噪声的存在其检测结果会存在大量的误检,影响真实信号脉冲的检测。在本文所提出的联合检测算法下,在双向CFAR的基础上通过脉冲沿判决准则能够有效地抑制突跳噪声对脉冲沿检测的影响,降低了误检的概率,在图6(g)至图6(i)的检测结果中噪声部分的误检率相对于传统CFAR检测得到了有效的降低。但是,在窗长较短时信号积累效果不佳会导致检测算法难以准确确定脉冲沿的位置,如图6(g)所示。而当窗长较长时,DFC波形信号的脉内衰减又会影响信号脉冲沿的判断,造成如图6(h)所示的误检。最终,只有在本文联合积累检测算法下,DFC波形信号才获得了有效而准确的检测,如图6(i)所示,本文算法通过联合积累在信噪比提升的同时保证了稳健的DFC波形信号的包络,并利用双向CFAR和脉冲沿判决准则实现了脉冲沿的准确检测和估计。本文联合积累检测算法的信号TOA估计结果为23.83 μs ,信号的PW估计结果为30.15 μs ,且检测结果中不存在任何误检,实验结果证明本文DFC波形积累检测算法在低信噪比环境下具有良好的积累效果和检测性能。

4.2 多信噪比条件下脉冲检测性能分析

为了进一步验证本文算法对DFC波形信号的积累和检测效果,调整4.1节的信噪比环境,以基于短时傅里叶变换(Short Time Fourier Transform, STFT)的时频分析检测方法和固定窗长的相关积累方法对比,验证本文联合积累方法在多种信噪比条件下的稳健性。设信噪比从 -12 dB开始以每1 dB的间隔变化到21 dB,对DFC信号分别以64点、512点、1024点的窗长进行传统相关积累和以窗长集为 N_s 的联合积累,并利用本文提出的联合检测算法估计脉冲的TOA和PW,然后对DFC信号进行STFT,通过时频分析结果估计脉冲的TOA和PW。

表 1 仿真DFC雷达信号波形参数

参数名称	参数值
采样率	300 MHz
脉冲重复时间	120 μs
脉冲宽度	30 μs
起始频率	10 MHz
带宽	120 MHz
脉冲到达时间	24 μs

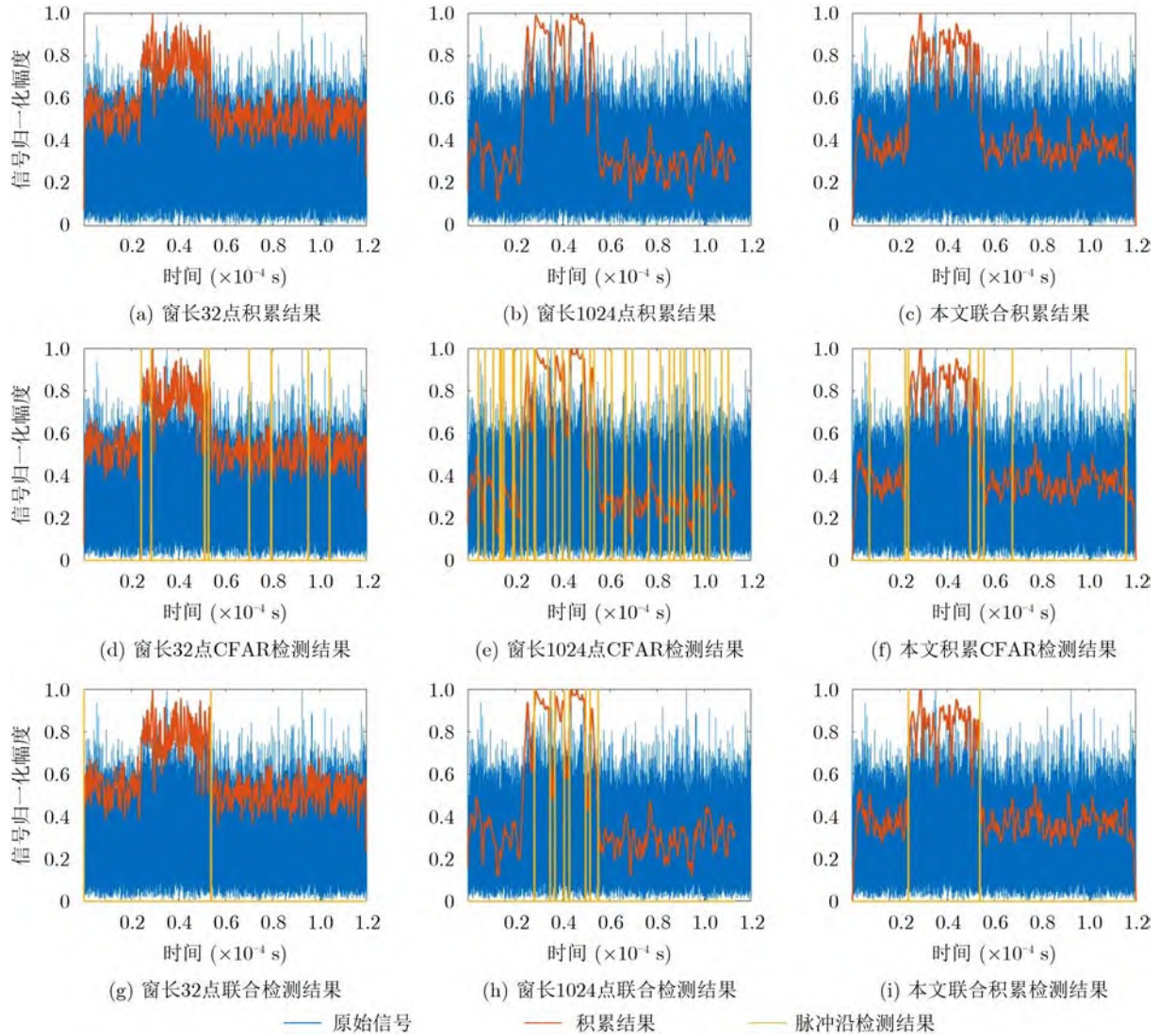


图6 DFC波形信号积累检测结果

在本实验中,取脉冲检测的TOA和PW的估计结果与仿真真值的均方根误差(Root-Mean-Square Error, RMSE)作为算法性能的评价指标, RMSE的计算如式(18)所示,并取 $\delta_{thr} = 2 \mu s$ 为误差门限,超过误差门限的检测精度认为是不合应用要求的。经过500次统计独立实验,多种信噪比条件下的TOA和PW检测性能曲线如图7所示。

$$\delta_{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{x=1}^n (\hat{p}_x - p_0)^2} \quad (18)$$

其中, n 表示实验次数, \hat{p}_x 表示第 x 次实验的参数估计结果, p_0 表示参数真值。

通过图7的仿真实验结果可以看出,首先,基于STFT的时频分析检测法在 $SNR > 0$ dB的条件下表现出了良好的TOA和PW估计性能,其估计精度要明显优于相关积累的检测结果,然而随着信噪比的降低,该方法的检测误差陡然上升,严重偏离了

误差门限,因此时频分析检测法在低信噪比的实际作战环境下难以取得有效的估计结果。其次,相关积累的窗长大小对信号的积累检测性能也有着明显的影响。在积累窗长为64的条件下,当信噪比条件良好时,信号的TOA和PW都具有良好的估计精度,而当信噪比降低至 -5 dB时,该窗长下的积累结果检测性能开始失效,误差逐渐升高。由式(3)可知,相关积累的信噪比增益与窗长大小成正比,在低信噪比条件下短窗长的积累难以获得有效的积累结果,进而降低了信号的被检测概率和参数估计精度。在积累窗长为512的条件下,由于获得了更好的相关积累增益,因此在低信噪比下表现出了更稳健的检测性能,其TOA和PW的检测性能在 -6 dB才开始失效。然而,对于DFC信号而言,由于DFC信号的相关积累存在如式(11)所述的积累包络衰减,该衰减严重影响着信号的脉冲沿检测和参数估计,并且,衰减会随着窗长的增大而增大,故在高

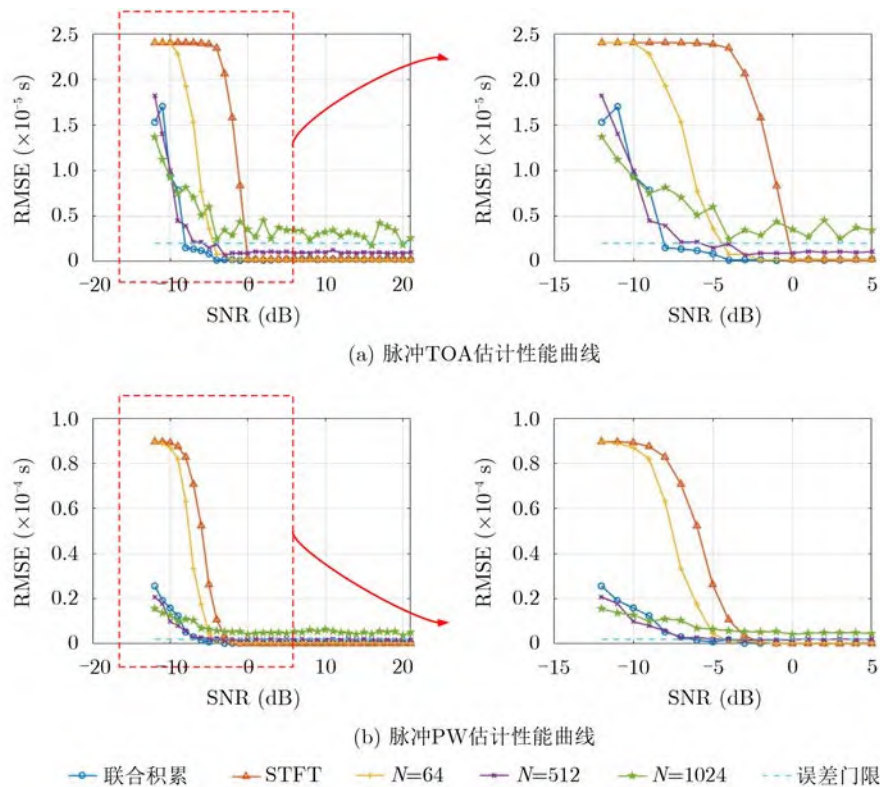


图7 多种信噪比下脉冲积累检测性能对比曲线

信噪比条件下窗长为512的检测精度反而不如窗长为64的检测精度。同时,这种衰减也造成了在积累窗长为1024的条件下,无论何种信噪比条件下都难以达到有效的估计精度。

本文所提出的DFC波形信号联合积累方法通过多帧相关积累结果进行非相干叠加的方式,有效地将大窗长相关积累良好的信噪比提升能力和小窗长积累包络的稳健性结合在了一起,保证了多种信噪比条件下的脉冲包络积累性能。本文的联合积累方法在高信噪比条件下保持了和短窗长积累、时频分析法相似的高精度参数估计,而在低信噪比条件其TOA检测精度和PW检测精度分别在-9 dB和-7 dB才开始失效,相比之下,本文算法在DFC波形信号的盲检测上表现出了更强的鲁棒性,在实际雷达电子战的应用中具有更高的实用价值和意义。

5 结束语

DFC波形信号由于其优异的性能在雷达电子战场下具有广泛的应用前景,对低信噪比下该波形信号的准确检测提取具有重要军事意义,本文根据DFC波形信号特征提出了一种相关积累和非相干积累联合的积累手段,并通过双向CFAR和脉冲沿判决准则实现了脉冲沿和TOA、PW的准确估计,并给出了理论推导和分析。通过对比实验验证分析了本文积累算法获得DFC波形信号包络的性能以

及脉冲检测性能,说明了本文算法在实际应用中的可行性。同时在多种信噪比条件下验证了本文积累算法对DFC波形信号检测的鲁棒性,为雷达电子侦察低信噪比环境下的DFC波形信号检测提供了重要技术途径,为战场环境下的情报信息获取提供了方法支撑。

参考文献

- [1] 鲍庆龙, 王森, 潘嘉蒙, 等. 非合作雷达辐射源目标探测系统关键技术分析[J]. 电波科学学报, 2020, 35(4): 496-503. doi: 10.13443/j.cjors.2020040702.
BAO Qinglong, WANG Sen, PAN Jiameng, et al. Key technology analysis of target detection system based on non-cooperative radar illuminator[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2020, 35(4): 496-503. doi: 10.13443/j.cjors.2020040702.
- [2] 胡新宇, 张铁军, 王昀. 低截获概率雷达信号侦察技术[J]. 航天电子对抗, 2020, 36(5): 40-43. doi: 10.16328/j.htdz8511.2020.05.009.
HU Xinyu, ZHANG Tiejun, and WANG Yun. Low probability of intercept radar signal reconnaissance technology[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2020, 36(5): 40-43. doi: 10.16328/j.htdz8511.2020.05.009.
- [3] BHATT T D, RAJAN E G, and RAO P V D S. Design of frequency-coded waveforms for target detection[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2008, 2(5): 388-394.
- [4] EHARA N, SASASE I, and MORI S. Weak radar signal detection based on wavelet transform[C]. ICASSP '94. IEEE

- International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Adelaide, Australia, 1994: II/377-II/380. doi: 10.1109/ICASSP.1994.389642.
- [5] 简涛, 何友, 苏峰, 等. 小波变换在雷达信号检测中的应用[J]. 海军航空工程学院学报, 2006, 21(1): 121-126. doi: 10.3969/j.issn.1673-1522.2006.01.006.
- JIAN Tao, HE You, SU Feng, *et al.* Overview on radar signal detection with wavelet transform[J]. *Journal of Naval Aeronautical Engineering Institute*, 2006, 21(1): 121-126. doi: 10.3969/j.issn.1673-1522.2006.01.006.
- [6] LIU Yongjian, XIAO Peng, WU Hongchao, *et al.* LPI radar signal detection based on radial integration of Choi-Williams time-frequency image[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2015, 26(5): 973-981. doi: 10.1109/JSEE.2015.00106.
- [7] KOOTSOOKOS P J, LOVELL B C, and BOASHASH B. A unified approach to the STFT, TFDs, and instantaneous frequency[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1992, 40(8): 1971-1982. doi: 10.1109/78.149998.
- [8] BARBAROSSA S and SCAGLIONE A. Parameter estimation of spread spectrum frequency-hopping signals using time-frequency distributions[C]. The First IEEE Signal Processing Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications, Paris, France, 1997: 213-216. doi: 10.1109/SPAWC.1997.630288.
- [9] LEI Yingke, ZHONG Zifa, and WU Yanhua. A parameter estimation algorithm for high-speed frequency-hopping signals based on RSPWVD[C]. 2007 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems, Xiamen, China, 2007: 392-395. doi: 10.1109/ISPACS.2007.4445906.
- [10] 蒋伊琳, 尹子茹, 宋宇. 基于卷积神经网络的低截获概率雷达信号检测算法[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(2): 718-725. doi: 10.11999/JEIT210132.
- JIANG Yilin, YIN Zirui, and SONG Yu. Low probability of intercept radar signal detection algorithm based on convolutional neural networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2022, 44(2): 718-725. doi: 10.11999/JEIT210132.
- [11] 王令欢, 马红光, 张欣豫, 等. 基于支持向量聚类的多分量线性调频信号检测[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(11): 2661-2664. doi: 10.3724/SP.J.1146.2006.00617.
- WANG Linghuan, MA Hongguang, ZHANG Xinyu, *et al.* Multi-component linear FM signal detection based on support vector clustering[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(11): 2661-2664. doi: 10.3724/SP.J.1146.2006.00617.
- [12] 陈伯孝. 现代雷达系统分析与设计[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2012: 314-317.
- CHEN Boxiao. Modern Radar System Analysis and Design[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2012: 314-317.
- [13] 姚山峰, 严航, 曾安军. 基于累积相关的雷达信号检测算法研究[J]. 电信技术研究, 2011(3): 29-35.
- YAO Shanfeng, YAN Hang, and ZENG Anjun. Research on radar signal detection algorithm based on cumulative correlation[J]. *Research on Telecommunication Technology*, 2011(3): 29-35.
- [14] 王芳, 王旭东, 潘明海. 一种实时雷达脉冲信号检测算法及其性能分析[J]. 现代电子技术, 2012, 35(7): 5-8. doi: 10.3969/j.issn.1004-373X.2012.07.002.
- WANG Fang, WANG Xudong, and PAN Minghai. A real-time radar pulse signal detection method and its performance analysis[J]. *Modern Electronics Technique*, 2012, 35(7): 5-8. doi: 10.3969/j.issn.1004-373X.2012.07.002.
- [15] 王启智, 岳玫君, 张锦中, 等. 基于多通道分段自相关的弱信号检测算法及实现[J]. 雷达与对抗, 2009(3): 28-32. doi: 10.19341/j.cnki.issn.1009-0401.2009.03.008.
- WANG Qizhi, YUE Meijun, ZHANG Jinzhong, *et al.* The algorithm and implementation based on multichannel sectional self-correlation for weak signal detection[J]. *Radar & Ecm*, 2009(3): 28-32. doi: 10.19341/j.cnki.issn.1009-0401.2009.03.008.
- [16] 赵树杰, 赵建勋. 信号检测与估计理论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 452-459.
- ZHAO Shujie and ZHAO Jianxun. Signal Detection and Estimation Theory[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 452-459.
- [17] 何友, 关键, 孟祥伟, 等. 雷达自动检测和CFAR处理方法综述[J]. 系统工程与电子技术, 2001, 23(1): 9-14, 85. doi: 10.3321/j.issn:1001-506X.2001.01.003.
- HE You, GUAN Jian, MENG Xiangwei, *et al.* Survey of automatic radar detection and CFAR processing[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2001, 23(1): 9-14, 85. doi: 10.3321/j.issn:1001-506X.2001.01.003.
- [18] 龚林, 浣沙, 张磊, 等. 基于二次统计CFAR处理的目标径向尺寸估计[J]. 电波科学学报, 2021, 36(4): 597-603. doi: 10.13443/j.cjors.2020011901.
- GONG Lin, HUAN Sha, ZHANG Lei, *et al.* Target length estimation based on quadratic statistical CFAR processing[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2021, 36(4): 597-603. doi: 10.13443/j.cjors.2020011901.
- 魏 嵩: 男, 博士生, 主要研究方向为雷达电子侦察信号分析与处理.
- 张 磊: 男, 教授, 主要研究方向为雷达SAR/ISAR成像与运动补偿.
- 马 岩: 男, 副研究员, 主要研究方向为光电信息处理与分析、目标特性与识别.
- 钟卫军: 男, 高级工程师, 主要研究方向为太空态势感知信息处理、目标特性与识别.

责任编辑: 马秀强