

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.11.008

引用格式:李斌,黄银和,吴刚,等.随机 PRI 的 LPI 波形相参积累[J].电讯技术,2014,54(11):1499-1504. [LI Bin, HUANG Yin-he, WU Gang, et al. Coherent Accumulation of LPI Waveform with Random PRI[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(11):1499-1504.]

随机 PRI 的 LPI 波形相参积累*

李斌**,黄银和,吴刚,雷志勇

(南京电子技术研究所,南京 210039)

摘要:随机脉冲重复频率(PRI)脉冲波形能够增加电子支援措施(ESM)利用重频分选侦收雷达辐射源信号的难度,提高雷达复杂对抗环境下的抗侦收能力。利用非均匀离散傅里叶变换(NUDFT)对这种低截获概率(LPI)波形进行脉冲多普勒(PD)处理时,距离模糊引起目标所处距离门走动,导致目标能量分散至多个模糊距离单元。为此,提出一种基于时间窗口的离散傅里叶变换(TWDFT)算法,实现了距离模糊条件下目标能量的相参积累。对 TWDFT 算法和加权副瓣抑制的性能进行了分析。仿真结果表明,基于 TWDFT 的 PD 处理在距离模糊时不存在目标能量分散问题,通过优化波形设计能够改善加权后目标主副瓣比。

关键词:电子对抗;LPI 波形;相参积累;随机 PRI 波形;距离模糊

中图分类号:TN957.51 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2014)11-1499-06

Coherent Accumulation of LPI Waveform with Random PRI

LI Bin, HUANG Yin-he, WU Gang, LEI Zhi-yong

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210039, China)

Abstract: Random PRI (Pulse Repetition Interval) pulse waveform can increase the difficulty of radar emitter interception for ESM (Electronic Support Measures) using PRI sorting and improve the ability of anti-interception under complex countermeasure environment. Range ambiguity will cause the migration of target range-gate and lead to target energy dispersion across multiple ambiguous range units, while using NUDFT (Non-Uniform Discrete Fourier Transform) algorithm to process this LPI (Low Probability of Intercept) waveform. This paper presents a time-window based DFT algorithm (TWDFT), which implements the coherent accumulation of target energy under the condition of range ambiguity. With this algorithm, the coherent accumulation of target energy is implemented under the condition of range ambiguity. The principle of the algorithm and performance of weighted side lobe reducing is analyzed. Experimental results show that there is no target energy dispersion in TWDFT-based PD (Pulse Doppler) processing with range ambiguity. Optimizing the waveform design can improve the weighted main-to-side ratio.

Key words: electronic countermeasure; LPI waveform; coherent accumulation; random PRI waveform; range ambiguity

1 引言

现代脉冲多普勒(PD)雷达面临来自电子支援措施(ESM)系统的威胁。ESM 对辐射源测量电子

参数(方向、重频、脉宽等)进行分选、配对,形成完整的辐射源描述字。电子对抗装置(ECM)据此配置干扰策略以对抗 PD 雷达的探测。

* 收稿日期:2014-07-01;修回日期:2014-09-15 Received date:2014-07-01;Revised date:2014-09-15

** 通讯作者:mathticer@hotmail.com Corresponding author:mathticer@hotmail.com

脉冲重复频率(PRI)是雷达辐射源电子参数的关键特征。PRI 参差滑变时,ESM 系统无法通过重频实现对脉冲辐射源配对,这增加了电子战系统侦察、截获、测量、分析、识别的复杂程度。因此,随机 PRI 脉冲波形能够有效提升 PD 雷达复杂电磁环境下的对抗能力。然而,随机 PRI 脉冲波形在实际应用中面临如下问题:一是针对随机 PRI 脉冲波形,非均匀离散傅里叶变换(NUDFT)算法在距离模糊条件下导致目标能量分散至多个模糊距离单元,检测概率降低;二是随机 PRI 脉冲回波在时域上是非均匀采样,使用均匀窗函数无法有效抑制目标多普勒副瓣^[1]。

一些学者对随机 PRI 波形在雷达中的应用进行了相关研究。Mark W. Maier^[1]提出 NUDFT 算法解决了无距离模糊条件下目标能量的相参积累。M. Modarres-Hashemi等^[2]通过分析随机 PRI 雷达信号的低检测概率(LPD)性能,指出随机 PRI 信号与周期信号相比具有更高的安全性。Jen-tsai K^[3-4]等采用不同的插值和优化准则发展了非均匀快速傅里叶变换(NUFFT),有效提高 NUDFT 算法的运算速度和测量精度方面的性能差异,指出 NUFFT 算法的运算量优于 NUDFT 算法。刘振^[6]等研究了在目标距离和速度都不模糊的情况下随机 PRI 脉冲雷达的动目标检测技术,部分解决了传统算法中的粗糙损失和杂波抑制问题。罗长胜^[7]等将脉冲相似度引入随机 PRI 脉冲信号的分选,取得 95% 以上的分选准确率。

本文针对具有低截获概率(LPI)性能的随机 PRI 脉冲波形,提出一种目标能量相参积累算法——TWDF(Time Window DFT)算法,通过在相干处理间隔(CPI)内抽取相参脉冲片段,实现距离模糊条件下目标能量的相参积累。最后,本文仿真分析了随机 PRI 脉冲波形的加权副瓣抑制性能,指出优化波形设计能够改善加权后目标主副瓣比。

2 随机 PRI 脉冲信号

发射相参脉冲串信号 $s(t)$ 有 M 个时宽为 t_p 的线性频率调制脉冲,每个脉冲的起始时刻为 $t_i(m)$ ($m=1,2,\cdots,M$),则随机 PRI 脉冲发射信号表示为

$$s(t)=\sum_{m=1}^M A \operatorname{rect}\left(\frac{t-t_i(m)}{t_p}\right) \exp \left[j \pi B t_p\left(\frac{t-t_i(m)}{t_p}\right)^2 \right] \quad (1)$$

其中,线性频率调制的中心频率为零, A 是脉冲信号幅度, B 是脉冲信号调制带宽,矩形脉冲信号为

$$\operatorname{rect}\left(\frac{t}{t_p}\right)=\begin{cases} 1, & -t_p / 2 \leq t \leq t_p / 2 \\ 0, & \text { 其他 } \end{cases} \quad (2)$$

起始时间 $t_i(m)$ 表示为 ($m=1,2,\cdots,M$):

$$t_i(m)=\sum_{u=1}^m T_{u-1}\left(T_0=0\right) \quad (3)$$

其中, $T_u(u=0,1,\cdots,m-1)$ 是服从某种离散型随机分布的脉冲间隔。为保证回波采样的相参性, T_u 和 t_p 取采样周期 t_s 的正整数倍。当 $T_1=T_2=\cdots=T_{m-1}=\bar{T}$ 时, $s(t)$ 与均匀周期脉冲信号等价。

假设目标时延为 τ ,多普勒频移为 f_d ,传输功率损耗为 L ,则回波信号为

$$s_R(t)=\sqrt{L} s(t-\tau) \exp [j 2 \pi f_d(t-\tau)] \quad (4)$$

假设回波信号幅度 $A'=\sqrt{L} \cdot A f_d \ll B$,在经过时域采样、脉冲压缩后,离散回波信号表示为

$$s_{cR}(n)=\sum_{m=1}^M A' \sqrt{B t_p} \frac{\sin [\pi B\left(n t_s-t_i(m)-\tau\right)]}{\pi B\left(n t_s-t_i(m)-\tau\right)} \cdot \exp (j 2 \pi f_d t_i(m)), n=1,2,3 \cdots \quad (5)$$

第 m 个子脉冲、第 k 个距离门的目標响应表示为

$$s_{scR}[m, k]=\sum_{n=1}^M A' \sqrt{B t_p} \cdot \frac{\sin [\pi B\left(t_i(m)+k t_s+t_p-t_i(n)-\tau\right)]}{\pi B\left(t_i(m)+k t_s+t_p-t_i(n)-\tau\right)} \cdot \exp (j 2 \pi f_d t_i(n)), m=1,2, \cdots, M \quad (6)$$

距离门 k 满足条件 $t_i(m)+k t_s+t_p \leq t_i(m+1)$ 。

3 基于 NUDFT 算法的相参积累

3.1 基本原理

随机 PRI 脉冲发射信号的回波数据是非均匀的,使用离散傅里叶变换进行相参积累的表达式为

$$y(f, k)=\sum_{m=1}^M s_{scR}[m, k] \exp (-j 2 \pi f t_i(m)) \quad (7)$$

其中, f 表示测试频率,一个 CPI 内的回波脉冲数为 M 。公式(7)定义了 NUDFT 算法。

第 m 个发射脉冲在第 l 个脉冲接收周期内返回,它在当前接收周期上的时间延迟为 R_l 。时延为 τ 的目标在无距离模糊时满足 $l=m, R_l=\tau$ 。设目标所处距离门为 $k_l:k_l t_s+t_p=R_l=\tau$,则

$$k_l=\frac{\tau-t_p}{t_s} \quad (8)$$

如果只取 sinc 函数的主瓣,目标距离门 k_l 处的相参积累结果表示为

$$y(f, k_t) = \sum_{m=1}^M [A' \sqrt{Bt_p} \exp(j2\pi f_d t_t(m))] \cdot \exp(-j2\pi f t_t(m)) \tag{9}$$

当 $f = f_d$ 时,相参积累增益达到最大值为 $A'M\sqrt{Bt_p}$ 。

3.2 距离模糊

定义回波脉冲的模糊重数为 $C(m)$ ($m = 1, 2, \dots, M, C(m) = 0, 1, 2, \dots$), $C(m)$ 等于 0 表示无距离模糊。目标回波脉冲位置表示为

$$\begin{cases} l = m + C(m) \\ R_l = \tau - D(m) \end{cases} \tag{10}$$

其中, $D(m)$ 满足

$$D(m) = \begin{cases} 0, & C(m) = 0 \\ \sum_{k=m+1}^{m+C(m)} T_{k-1}, & C(m) \geq 1 \end{cases} \tag{11}$$

目标所处距离门 k_t 满足 $k_t t_s + t_p = R_l = \tau - D(m)$, 则

$$k_t = -\frac{1}{t_s} D(m) + \frac{\tau - t_p}{t_s} \tag{12}$$

其中, k_t 的取值由目标时延 τ 和发射波形 PRI 的取值决定。有距离模糊时, k_t 随回波脉冲的变化而变化, 导致 NUDFT 处理后目标能量分散到多个模糊距离单元, 信杂噪比降低。

4 基于 TWDFFT 算法的相参积累

4.1 基本原理

本文设计了一种改进的相参积累算法, 能够消除距离模糊中目标所处距离门 k_t 随回波脉冲的变化 (如图 1 所示)。设时间窗口的距离门延迟量是 k_d , 第 m ($m = 1, 2, \dots, M$) 回波脉冲的时间窗口起始时间 $t_b(m)$ 表示为: $t_b(m) = t_t(m) + t_p + k_d t_s$ 。设一次相参处理的期望观测距离为 L , 则时间窗口的宽度 t_{len} 可确定为 $t_{len} = 2L/c$, 其中 c 是电磁波传播速度。一组固定的 k_d 和 t_{len} 取值可确定 M 个时间窗口。利用这 M 个时间窗口进行接下来的 TWDFFT 运算, 如果没有观测到相参目标回波, 就增加 k_d 的取值重新进行计算。这一滑动迭代过程直到发现目标信号或 $t_b(m)$ 相对 $t_t(m)$ 足够大 (可以确定没有目标回波信号) 为止。



图 1 TWDFFT 算法框图

Fig. 1 Block diagram of TWDFFT algorithm

对于一组固定的 k_d 和 t_{len} , 可以将其确定的 M 个时间窗口组合成矩阵形式:

$$\begin{cases} \mathbf{W} = [w(1) \quad w(2) \quad \cdots \quad w(M)]^T \\ w(m) = \sum_{k_l=1}^{t_{len}/t_s} \delta(n - t_b(m)/t_s - k_l), n \in Z \end{cases} \tag{13}$$

其中, $m = 1, 2, \dots, M, n = 0, 1, 2, \dots; \delta(n) = \begin{cases} 1, & n=0 \\ 0, & n \neq 0 \end{cases}$ 为单位抽样序列。将抽样时间窗口矩阵

$\mathbf{W}$ 与离散回波信号 $s_{cR}(n)$ (如公式 (5)) 相乘, 抽取包含相参脉冲的回波子脉冲片段, 即

$$\mathbf{S}_{cw} = [s_{cw}(1) \quad s_{cw}(2) \quad \cdots \quad s_{cw}(M)]^T \tag{14}$$

$$s_{cw}(m) = w(m) s_{cR}(n) =$$

$$\sum_{k_l=1}^{t_{len}/t_s} s_{cR}(n) \delta(n - t_b(m)/t_s - k_l), \quad n = 0, 1, 2, \dots \tag{15}$$

假设当前时间窗口组中包含相参目标回波, 将公式 (5) 代入公式 (15), 对确定的时间窗口, 第 m 个回波脉冲、第 k_l 个距离门的回波采样数据表示为

$$s_{cw}[m, k_l] = \sum_{n=1}^M A' \sqrt{Bt_p} \cdot \frac{\sin[\pi B(t_b(m) + k_l t_s - t_t(n) - \tau)]}{\pi B(t_b(m) + k_l t_s - t_t(n) - \tau)} \cdot \exp(j2\pi f_d t_t(n)) \tag{16}$$

其中, $k_l = 1, 2, \dots, t_{len}/t_s$ 。当 $k_d = 0, t_{len} = (t_t(m+1) - t_t(m) - t_p)/t_s$ 时, 公式 (16) 所示回波采样数据与公式 (6) 等价。

对相同距离门的 $s_{cw}[m, k_l]$ 进行 DFT 变换, 则相参积累的结果 $\mathbf{Y}_{cw}(f)$ 表示为

$$\mathbf{Y}_{cw}(f) = [y_{cw}(f, 1) \quad y_{cw}(f, 2) \quad \cdots \quad y_{cw}(f, t_{len}/t_s)]^T \tag{17}$$

其中,

$$y_{cw}(f, k_l) = \sum_{m=1}^M s_{cw}[m, k_l] \exp(-j2\pi f t_b(m)) \tag{18}$$

其中, $k_l = 1, 2, \dots, t_{len}/t_s$ 。公式 (18) 定义了时间窗口离散傅里叶变换 (TWDFFT) 算法。

对包含相参目标回波的时间窗口, 目标所处距离门 k_t 满足 $k_t t_s + t_p + k_d t_s = \tau$, 则

$$k_t = -k_d + \frac{\tau - t_p}{t_s} \tag{19}$$

其中, k_t 的取值由目标时延 τ 和时间窗口距离门延迟量 k_d 决定。当 k_d 固定时, M 个时间窗口中的目标响应在距离门上对齐且彼此相参, 使用公式 (19) 后可获得最大积累增益。

4.2 目标参数的补偿

使用 TWDFFT 算法时,时间窗口在距离门上滑动,距离-多普勒谱上获得的目标距离发生偏移。可以通过在距离测量值上累加时间窗口的延迟量,实现对距离偏移的补偿。TWDFFT 处理后目标所处距离门为 k_l ,多普勒频率为 f_l ,则目标的真实距离 R 和多普勒速度 v 为

$$\begin{cases} R=2c(k_l t_s+t_p+k_d t_s) \\ v=\lambda f_l/2 \end{cases} \tag{20}$$

其中, c 为雷达发射脉冲的传播速度, t_s 为雷达接收机的采样周期, λ 为雷达发射脉冲的发射波长, k_d 为相应时间窗口在距离门上的延迟量。

4.3 降低副瓣的加权方法

PD 雷达中,相参积累算法通过在各个子脉冲上加权实现对目标多普勒副瓣的抑制。设加权系数为 $w_d(m)$ ($m=1,2,\cdots,M$),使用 TWDFFT 算法进行加权相参积累的过程表示为

$$y_{cw}(f,k_l)=\sum_{m=1}^M w_d(m)s_{cw}[m,k_l]\exp(-j2\pi f t_b(m)) \tag{21}$$

只考虑 sinc 函数的主瓣,定义 $s_{cw}[m,k_l]=C_{k_l}\exp(j2\pi f_d t_b(m))$, C_{k_l} 表示当前时间窗口距离门 k_l 处的回波数据幅度,则周期回波脉冲采样数据 $s_n[m,k_l]=C_{k_l}\exp(j2\pi f_d(m-1)\bar{T})$ 。假设 $t_{b\Delta}(m)=\sum_{k=1}^M(T_m-\bar{T}_m)+t_p+k_d t_s$ ($m=1,2,\cdots,M,\Delta T_0=0$),取 $f=\frac{n-1}{MT}$ (n 为整数),则公式(21)可表示为

$$y_{cw}(n,k_l)=\text{FFT}[w_d(m)s_n[m,k_l]\exp(j2\pi t_{b\Delta}(m)(f_d-f))] \tag{22}$$

其中,FFT[·]表示 M 点快速傅里叶变换。

根据公式(22),目标主瓣峰值处 f 等于 f_d ,峰值大小与信号 PRI 的取值(即 $t_{b\Delta}(m)$)无关;目标副瓣区 f 与 f_d 存在差异,副瓣电平随相位差 $2\pi t_{b\Delta}(m)(f_d-f)$ 的变化而变化。因此,目标主副瓣比(MSR)不仅受限于加权深度,而且与发射信号 PRI 的取值分布有关。通过随机 PRI 脉冲波形的优化设计可以获得优良的目标 MSR。波形设计问题将另文讨论。

5 仿真与分析

5.1 相参积累性能

本节采用仿真实验数据,对比 NUDFT 算法和 TWDFFT 算法在不同距离模糊条件下对目标能量的相参积累性能。实验中 M 个回波脉冲的间隔 T_m ($m=1,2,\cdots,M-1$)在区间 $[(1-\sigma)\bar{T},(1+\sigma)\bar{T}]$ 上服从

均匀分布。其中, $\bar{T}$ 表示平均 PRI, σ 表示随机变量 T_m 的变化率,满足 $0\leq\sigma<1$ 。

假设平均 PRF 为 300 Hz,平均 PRI 约为 3.33 ms,无距离模糊, B 为 2 MHz, f_s 为 3 MHz,目标 f_d 取 100 Hz,SNR 为 0, $\sigma=0.2$,不加窗。仿真结果见图 2,可见无距离模糊时 NUDFT 算法与 TWDFFT 算法性能等价,可准确测得目标速度和距离,无相参积累增益损失。

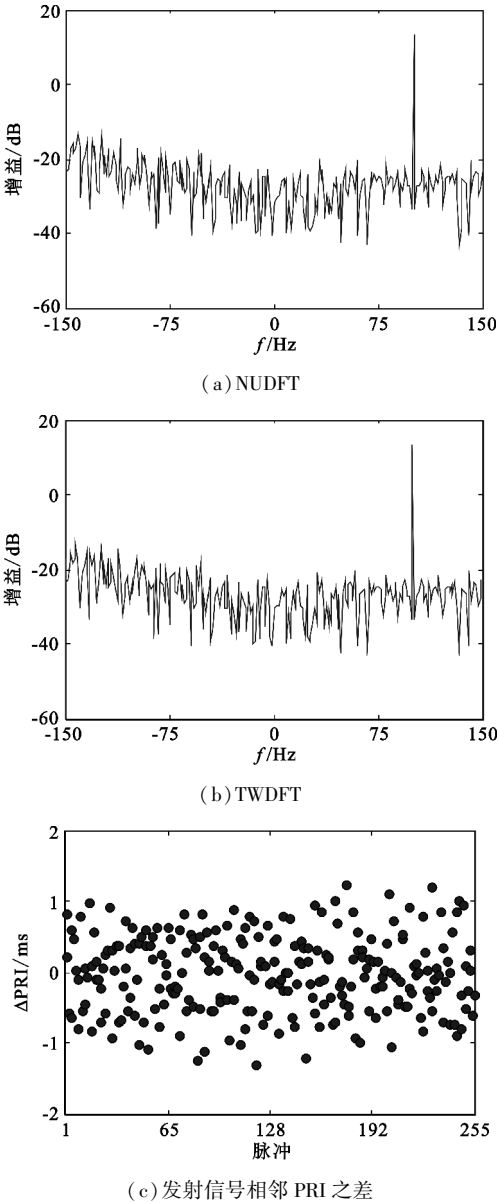


图 2 无距离模糊、随机 PRI 脉冲信号的相参积累
Fig.2 The coherent accumulation of random PRI pulse waveform without range ambiguity

假设平均 PRF 为 1 500 Hz,平均 PRI 约为 0.667 ms,存在距离模糊,其他仿真条件不变。仿真结果见图 3,可见距离模糊时,NUDFT 算法无法实现目标参数的测量;TWDFFT 算法能够实现目标能量的

相参积累,准确测量目标速度和距离。

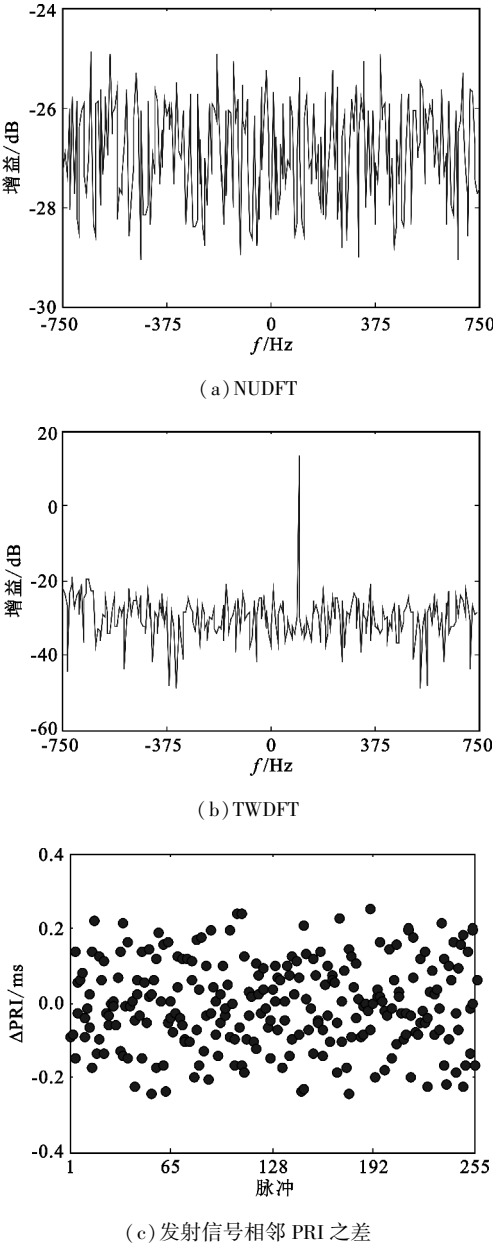


图 3 有距离模糊、随机 PRI 脉冲信号的相参积累
Fig.3 The coherent accumulation of random PRI pulse waveform with range ambiguity

5.2 加权降低副瓣

本节通过仿真数据,分析加权深度与发射脉冲 PRI 取值在 TWDFT 算法中对副瓣抑制性能(目标 MSR)的影响。假设无距离模糊,目标 f_d 取 100 Hz,使用 4 种不同发射脉冲信号进行仿真,其中 $\sigma=0.1$ 的随机 PRI 信号任取两组不同 PRI 取值。仿真结果见图 4,可见目标的 MSR 随加权深度增加而增加;加权深度确定时,波形的 PRI 变化会导致目标 MSR 变化。从仿真结果可见,加权深度为 40 dB 时,对应

于 $\sigma=0.1$ 、第 1 组 PRI 取值的脉冲信号,目标 MSR 为 40.64 dB,即存在特定 PRI 取值使目标 MSR 优于加权深度。因此,通过优化波形设计能够改善加权后目标 MSR。上述仿真结果验证了 4.3 节的理论分析。

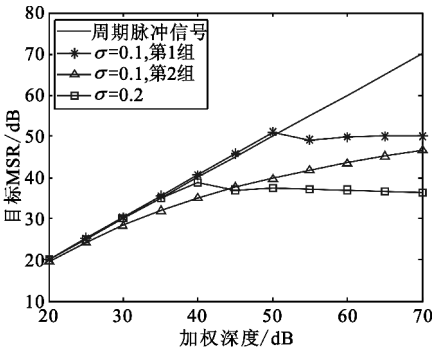


图 4 目标 MSR 的变化
Fig.4 The change of target MSR

6 结束语

使用 NUDFT 算法对随机 PRI 脉冲波形进行脉冲多普勒处理时,距离模糊引起目标所处距离门走动,导致目标能量分散至多个模糊距离单元;同时,随机 PRI 脉冲波形会导致均匀窗函数的旁瓣抑制性能下降。针对这些问题,本文首先提出 TWDFT 算法,通过时间窗口在 CPI 内滑动搜索相参脉冲信号,实现了距离模糊条件下目标能量的相参积累;其次,仿真分析了 TWDFT 算法的加权副瓣抑制性能,指出通过优化波形设计能够改善加权后目标主副瓣比。本文提出的算法和思路使随机 PRI 脉冲波形能有效应用于现代 PD 雷达体制,改善雷达复杂对抗环境下的抗侦收能力。对加权后目标 MSR 的仿真结果表明,不同的脉冲波形参数会造成加权后目标主副瓣比的起伏,故需要进一步研究随机 PRI 脉冲波形参数的设计和优化问题。

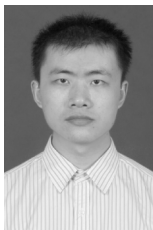
参考文献:

[1] Maier M W. Non-uniform PRI pulse-Doppler radar[C]// Proceedings of Twenty-Fifth Southeastern Symposium on System Theory. Tuscaloosa, AL: IEEE, 1993: 164-168.
[2] Modarres-hashemi M, Nayebi M M. LPD feature improvement in radom PRF radar signals[J]. IEE Proceedings—Radar, Sonar and Navigation, 2004, 151(4): 225-230.
[3] Jen-tsay K, Hsin-ying L. Improved Accuracy Factors for the Nonuniform Fast Fourier Transform (NUFFT) Algorithm[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Let-

ters,2009,19(1):3-5.

- [4] Jacob M. Optimized Least-Square Nonuniform Fast Fourier Transform[J]. IEEE Transactions on Signal Processing,2009,57(6):2165-2177.
- [5] Li Juan,Chen Zhuming. Research on Radom PRI PD radar target velocity estimate based on NUFFT[C]// Proceedings of 2011 IEEE CIE International Conference on Radar. Chengdu:IEEE,2011:1801-1803.
- [6] 刘振,魏玺章,黎湘,等. 基于改进 CS 的随机 PRI 雷达精确测速及杂波抑制算法[J]. 国防科技大学学报,2013,35(3):114-118.
- LIU Zhen,WEI Xi-zhang,LI Xiang,et al. Precise velocity measurement and clutter suppression in random pulse repetition interval radar based on improved compressed sensing[J]. Journal of National University of Defense Technology,2013,35(3):114-118. (in Chinese)
- [7] 罗长胜,吴华,程嗣怡. 一种对重频调制与抖动信号的 PRI 变换分选新方法[J]. 电讯技术,2012,52(9):1492-1496.
- LUO Chang-sheng, WU Hua, CHENG Si-yi. A New Method for Sorting PRI Modulated and Jittered Pulse Signal Based on PRI Transformation[J]. Telecommunication Engineering,2012,52(9):1492-1496. (in Chinese)

作者简介:



李 斌(1989—),男,江苏徐州人,硕士研究生,主要研究方向为雷达信号处理;

LI Bin was born in Xuzhou, Jiangsu Province, in 1989. He is now a graduate student. His research concerns radar signal processing.

Email:mathticer@hotmail.com

黄银和(1966—),男,江苏南京人,研究员,主要从事雷达系统设计及信号处理方面的研究;

HUANG Yin-he was born in Nanjing, Jiangsu Province, in 1966. He is now a senior engineer of professor. His research concerns radar system design and signal processing.

吴 刚(1973—),男,福建人,研究员,主要从事雷达系统设计及信号处理方面的研究;

WU Gang was born in Fujian Province, in 1973. He is now a senior engineer of professor. His research concerns radar system design and signal processing.

雷志勇(1975—),男,湖北随州人,高级工程师,主要从事雷达系统设计及信号处理方面的研究。

LEI Zhi-yong was born in Suizhou, Hubei Province, in 1975. He is now a senior engineer. His research concerns radar system design and signal processing.