

基于 Radon-分数阶傅里叶变换的 雷达动目标检测方法

陈小龙¹, 刘宁波², 王国庆², 关 键¹

(1. 海军航空工程学院电子信息工程系, 山东烟台 264001; 2. 海军航空工程学院信息融合研究所, 山东烟台, 264001)

摘 要: 长时间相参积累技术是提高雷达对微弱运动目标探测能力的重要手段之一, 本文在分析动目标回波信号距离和多普勒徙动的基础上, 提出基于 Radon-分数阶傅里叶变换(RFRFT)的长时间相参积累方法. 该方法根据预先设定的运动参数搜索范围, 提取位于距离-慢时间二维平面中的目标观测值, 然后在 FRFT 域进行匹配和积累, 并通过构建的 RFRFT 域检测单元图实现对非匀速运动目标的检测. 该方法能够同时补偿距离和多普勒徙动, 有效抑制背景杂波和噪声, 提高积累增益. 仿真结果表明本文方法具有在强杂波中检测微弱动目标的能力.

关键词: 动目标检测; 距离徙动; 多普勒徙动; 长时间相参积累; Radon-分数阶傅里叶变换 (RFRFT)

中图分类号: TN959.1+7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2014)06-1074-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.06.006

Radar Detection Method for Moving Target Based on Radon-Fourier Fractional Fourier Transform

CHEN Xiao-long¹, LIU Ning-bo², WANG Guo-qing², GUAN Jian¹

(1. Department of Electronic and Information Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai, Shandong 264001, China;

2. Institute of Information Fusion, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai, Shandong 264001, China)

Abstract: Long-time coherent integration technique is one of the most important methods for the improvement of radar detection ability of weak moving target. Based on the analysis of range and Doppler migrations of a moving target, a long-time coherent integration method via Radon-fractional Fourier transform (RFRFT) is proposed. The target's observation values in the range-slow time plane are firstly extracted according to the searching area of the preset motion parameters. Then the observation values are matched and accumulated by FRFT and a nonuniformly moving target can be declared by the detection map in the RFRFT domain. The proposed method can compensate the across range unit and Doppler frequency migration effects simultaneously. In addition, the background clutter and noise can be well suppressed, which increases the integration gain. Simulation results show that the proposed method has the ability of detecting weak moving target under strong clutter environment.

Key words: moving target detection; across range unit; doppler frequency migration; long-time coherent integration; Radon-fractional Fourier transform (RFRFT)

1 引言

稳健和有效的雷达动目标检测始终是雷达信号处理领域的难题^[1]. 目标探测的复杂性不仅来自于目标本身, 而且受到电磁环境和杂波背景的影响, 具有低可观测特性的运动目标种类很多^[2]: 小尺寸目标、隐身目标、远距离目标以及高速高机动目标等. 其共同点是, 目标距离和多普勒分辨单元中的信杂(噪)比(Signal-to-Clutter/Noise Ratio, SCR/SNR)都很低, 难以对抗杂波及电子

干扰等, 降低了雷达的检测性能. 通常可延长信号积累时间以增加目标能量, 进一步提高信号的 SCR/SNR^[3]. 根据是否利用信号的相位信息, 可将脉冲积累分为非相参和相参积累. 前者包括包络补偿法、动态规划法、最大似然法和 Hough 变换(HT)法^[4]等, 易于工程实现, 但积累增益差, 不适于复杂环境下动目标的检测. 相参积累技术利用目标运动产生的多普勒信息, 可获得更高的积累增益, 目前该技术主要存在以下两个难题: 一方面由于雷达距离分辨力的不断提高和目标的运动, 回波包络

在不同脉冲周期之间走动,产生距离徙动(Across Range Walk, ARU)^[5],使目标能量在距离向分散;另一方面目标的匀加速运动、高阶运动以及转动等使回波信号具有时变特性并表现为高阶相位形式,导致多普勒频率跨越(Doppler Frequency Migration, DFM)多个单元^[6],降低了相参积累增益。

针对距离徙动补偿,经典的包络相关法在低 SCR/SNR 情况下由于相邻回波相关性较差而无法获得较好的包络对齐效果^[7];Keystone 变换(KT)^[8]能够补偿距离走动,广义二阶 KT 也能够进行距离弯曲校正,但在多普勒模糊的情况下补偿性能严重下降;Radon-傅里叶变换法^[5](Radon-Fourier Transform, RFT)解决了距离徙动与相位调制耦合的问题,很好地将 MTD、HT 和 Radon 变换统一起来,但仅适于匀速运动目标,且算法复杂度较高。针对多普勒徙动补偿,现有的方法包括 De-chirp 法、Chirp-傅里叶变换法^[9]、多项式相位法和分数阶傅里叶变换法(Fractional Fourier Transform, FRFT)^[10]等,但补偿性能均受信号长度的限制。目前,如何在复杂背景下有效地同步完成距离和多普勒徙动补偿成为长时间相参积累的关键问题。本文借鉴文献[5]的思想,结合 RFT 与 FRFT 的优势,提出一种新的雷达动目标检测方法,该方法利用动目标回波的幅度和相位信息,采用 Radon-分数阶傅里叶变换(Radon-FRFT, RFRFT)同时补偿长时间积累过程中的距离和多普勒徙动,有效抑制背景杂波和噪声,提高积累增益,从而可进一步提升雷达对微弱动目标检测能力,仿真结果验证了该方法的有效性。

2 动目标长时间积累回波信号模型

2.1 单频信号回波模型

设雷达发射恒定单频信号为

$$s_e(t) = A \exp[j(2\pi f_c t + \varphi_0)], 0 \leq t \leq T \quad (1)$$

其中, t 为脉内快时间, A 为幅度, f_c 为雷达载频, φ_0 为初始相位。则回波信号为

$$s_r(t) = A_r \exp[j(2\pi f_c(t - \tau) + \varphi_0 + \varphi_r)] \quad (2)$$

其中, τ 为发射和接收的时延, φ_r 为速度和加速度引起的相移。

以雷达为坐标原点建立直角坐标系,当目标朝向雷达做径向匀加速运动时,则径向距离可表示为

$$r_s(t_m) = r_0 - v_0 t_m - a_s t_m^2 / 2, t_m \in [-T_n/2, T_n/2] \quad (3)$$

其中, t_m 为脉间慢时间, $t_m = mT_r$, T_r 为脉冲重复周期, T_n 为积累时间, r_0 为初始距离, v_0 和 a_s 分别为目标的初速度和径向加速度。回波延迟 $\tau = 2r_s(t_m)/c$, c 代表光速,重新整理式(2)得到

$$s_r(t, t_m) = A_r \exp\left[j\left(2\pi f_c t + 2\pi \frac{2v_0}{\lambda} t_m + 2\pi \frac{a_s}{\lambda} t_m^2 - 4\pi f_c r_0 + \varphi_0 + \varphi_r\right)\right] \quad (4)$$

$\lambda = c/f_c$ 为雷达发射波长。根据瞬时频率的定义

$$f_d = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi}{dt} = f_c + f_0 + \mu_s t_m \quad (5)$$

其中, $f_0 = 2v_0/\lambda$ 为多普勒中心频率(Hz), $\mu_s = 2a_s/\lambda$ 为加速度引起的调频率(Hz/s)。

可见回波的频率与时间呈线性关系,可以看成(Linear Frequency Modulation, LFM)信号,经过混频处理并仅考虑目标速度 v_0 和加速度 a_s 的影响,则

$$s_r(t_m) = A_r \exp\left[2\pi j\left(f_0 t_m + \frac{1}{2} \mu_s t_m^2\right)\right] \quad (6)$$

2.2 LFM 信号回波模型

为了获得高分辨率和降低有效带宽,假设相参体制雷达发射 LFM 信号

$$s_e(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \exp\left\{j2\pi\left[f_c t + \frac{1}{2} k t^2\right]\right\} \quad (7)$$

式中, $\text{rect}(u) = \begin{cases} 1, & |u| \leq 1/2 \\ 0, & |u| > 1/2 \end{cases}$, T_p 为脉宽, $k = B/T_p$ 为调频率, B 为带宽。则 t 时刻接收并经过放大和限幅处理后得到的雷达回波信号表示为

$$s_r(t, t_m) = \sigma_r \text{rect}\left(\frac{t - \tau}{T_p}\right) \exp\left\{j2\pi\left[f_c(t - \tau) + \frac{k}{2}(t - \tau)^2\right]\right\} \quad (8)$$

式中, σ_r 为目标的散射截面积。回波信号经解调后的基带信号输出形式为

$$\begin{aligned} s_{IF}(t, t_m) &= s_r \cdot s_e^* \\ &= \sigma_r \text{rect}\left(\frac{t - \tau}{T_p}\right) \exp[-j\pi k(t - \tau)^2] \exp(j2\pi f_c \tau) \end{aligned} \quad (9)$$

式中, $*$ 表示复共轭运算。上式经过脉冲压缩运算后,改写为

$$s_{PC}(t, t_m) = A_r \text{sinc}[B(t - \tau)] \exp(-j2\pi f_c \tau) \quad (10)$$

由上式可知,由于目标的运动,目标的峰值位置会随慢时间变化而偏移,产生距离徙动和距离弯曲,并且随雷达的距离分辨率和目标运动加速度的增大而显著增加。根据 Weierstrass 近似原理,运动目标的回波信号可由足够阶次的多项式相位信号近似表示^[2],而运动状态比较复杂的目标在有限的观测时间范围内,常可用 LFM 信号作为其一阶近似,其多普勒频移为

$$f_d = \frac{2}{\lambda} \frac{dr_s(t_m)}{dt_m} = f_0 + \mu_s t_m \quad (11)$$

因此,匀加速运动或高阶运动目标回波可近似为 LFM 信号,远距离动目标或高速目标,在长时间积累时,其回波多普勒仍会随时间变化,具有时变特性,仍可表示为 LFM 信号。由此,机动目标回波包络中的时延与复指数函数的多普勒相位调制,产生距离和多普勒徙动。

3 Radon-分数阶傅里叶变换原理及特性

式(10)中的距离走动如图 1 中的点斜线所示,该斜线

由目标初速度和起始距离决定,可在斜线上通过傅里叶变换将目标能量相参积累起来,得到式的 RFT 表达式^[5]

$$S_{\text{RFT}} = \int s_{\text{PC}}[2(r_0 + vt_m)/c, t_m] e^{-j2\pi f_d t_m} dt_m \quad (12)$$

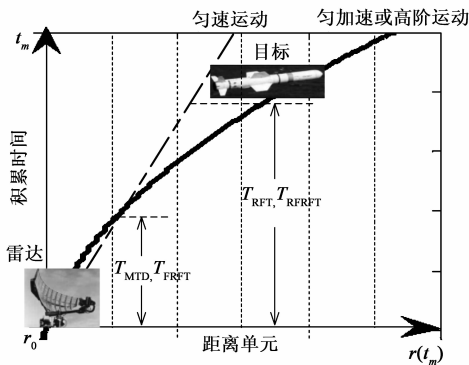


图1 几种相参积累方法比较示意图

由式(12)可知,MTI是RFT的一种特例,RFT所需脉冲数不受距离单元的限制,可大大延长相参积累时间.然而,在实际应用中,目标的加速、减速或高阶运动使距离发生弯曲,限制沿直线搜索的RFT有效积累时间 T_{RFT} ;同时,由于多普勒的展宽,导致目标回波失配于RFT的搜索参数,积累增益下降.由动目标雷达回波模型可知,多普勒徙动的原因实际上是在慢时间上增加了一个二次相位,因此需要对RFT的积累结果进行二次相位补偿,然后通过某种方法实现LFM信号能量的积累.作为傅里叶变换的广义形式,FRFT通过旋转时频平面,在最佳变化域积累非平稳信号能量.但是,FRFT的积累时间 T_{FRFT} 同样受到距离单元的限制.

基于上述考虑,提出一种新的动目标长时间相参积累方法.假设 $f(t, r_s) \in C$ 是定义在 (t, r_s) 平面的二维复函数,由目标初始距离、速度和加速度确定的参数化曲线 $r_s = r_0 + vt + at^2/2$,用于搜索此平面内的任意一条曲线,代表匀加速或高阶运动,则连续RFRFT定义为 $G_r(\alpha, u) = F^\alpha[x(t, r)](u)$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} x(t, r_0 - vt - at^2/2) K_\alpha(u, t) dt \quad (13)$$

式中, $\alpha = p\pi/2$ 为旋转角度, p 为变换阶数, $K_\alpha(u, t)$ 为核函数

$$K_\alpha(t, u) = \begin{cases} A_\alpha \exp\left\{j\left[\frac{1}{2}t^2 \cot\alpha - ut \csc\alpha + \frac{1}{2}u^2 \cot\alpha\right]\right\}, & \alpha \neq n\pi \\ \delta[u - (-1)^n t], & \alpha = n\pi \end{cases} \quad (14)$$

式中, $A_\alpha = \sqrt{(1 - j \cot\alpha)/2\pi}$,RFRFT的变换阶数 p 由量纲归一化处理后的搜索加速度确定^[11].

由式(13)可知,RFRFT为线性变换,不存在交叉项的影响.由图1可知:(1)RFRFT结合了RFT和FRFT的优点,在获得长积累时间的同时,适合处理非平稳和时

变信号;(2)RFRFT的核函数能够补偿由目标高阶运动导致的回波脉间的相位起伏和变化;(3)RFRFT可看作是一种广义的多普勒滤波器组,不同滤波器组由变换阶数确定.

4 基于RFRFT的雷达动目标检测方法

4.1 相参积累时间影响因素

目标发生距离和多普勒徙动会明显制约雷达对动目标回波的有效积累时间.由文献[5]可知,相参积累时间与最小相参积累增益、加速度和天线波束驻留时间有关.RFT的推导是以目标做匀速运动为假设前提的,因此,RFT算法要求在相参积累时间内,由目标可能的最大加速度 a_{max} 引起的多普勒扩散量不大于多普勒分辨单元,同时距离弯曲不大于距离分辨单元.

$$\begin{cases} \Delta f_{\text{max}}(t) |_{t \in [-T_n/2, T_n/2]} = \frac{2a_{\text{max}} T_n}{\lambda} \leq \frac{1}{T_n} \\ \Delta r_{\text{max}}(t) |_{t \in [-T_n/2, T_n/2]} = \frac{1}{2} a_{\text{max}} \left(\frac{T_n}{2}\right)^2 \leq \frac{c}{2B} \end{cases} \quad (15)$$

由上式得到

$$\begin{cases} T_n \leq T_{a, \text{Doppler}} = \sqrt{\frac{\lambda}{2a_{\text{max}}}} \\ T_n \leq T_{a, \text{curvature}} = \sqrt{\frac{4c}{a_{\text{max}} B}} \end{cases} \quad (16)$$

其中, $T_{a, \text{Doppler}}$ 一般小于 $T_{a, \text{curvature}}$.

RFRFT相比于RFT的相参积累时间大大增加,仅受最小相参积累增益所需时间 $T_{\text{SNR}_{\text{req}}}$ 和天线波束驻留时间 T_{dwell} 的限制.设脉间相参积累时间 T_n 和相参积累脉冲数 N_p 的关系为 $T_n = N_p T_r$, $T_n \in [T_{\text{SNR}_{\text{req}}}, T_{\text{dwell}}]$,其中, $T_{\text{SNR}_{\text{req}}} = 10^{G/10} T_r$, G 定义为相参积累改善增益^[5].当雷达天线为机械扫描时,

$$T_{\text{dwell}} = \frac{\theta_{a,0.5}}{\Omega_a \cos\beta} \quad (17)$$

式中, $\theta_{a,0.5}$ 为半功率天线方位波束宽度($^\circ$), Ω_a 为天线方位扫描速度($^\circ$)/s, β 为目标仰角($^\circ$).当雷达天线扫描方式为相扫,波束指向可任意控制,此时 T_{dwell} 仅由预置值决定,而与波束宽度无关.

4.2 算法流程

图2给出了基于RFRFT的动目标长时间相参积累方法流程图,共分如下四个步骤:

步骤1 雷达回波距离向解调、脉压,完成脉内积累.

在相参雷达接收端,将雷达回波数据进行距离向和方位向采样,对距离向的雷达回波数据进行解调和脉压处理,得到 $s_{\text{PC}}(t, t_m)$.存储处理后的距离-时间(方位)二维数据矩阵 $S_{N \times M} = s_{\text{PC}}(i, j)$, $i = 1, 2, \dots, N, j =$

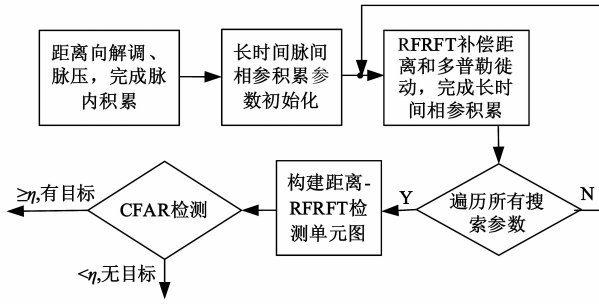


图2 基于RFRFT的动目标长时间相参积累方法流程图

$1, 2, \dots, M, N$ 为脉冲数, M 为距离单元数。

步骤2 长时间脉间相参积累参数初始化

根据雷达系统参数和波束驻留时间,确定脉间相参积累时间 T_n 、积累脉冲数 N_p 、距离搜索范围 $[r_1, r_2]$ 和间隔 Δr ,根据待检测目标的类型和运动状态,确定预期补偿的初速度搜索范围 $[-v_{\max}, v_{\max}]$ 和间隔 Δv ,加速度搜索范围 $[-a_{\max}, a_{\max}]$ 和间隔 Δa ,其中, T_n 按照 4.1 节所给方法确定.距离搜索范围 $[r_1, r_2]$ 需覆盖目标探测区域,搜索间隔与雷达距离分辨单元相同。

步骤3 采用 RFRFT 补偿距离和多普勒徙动,完成长时间脉间相参积累

根据搜索距离、搜索初速度和搜索加速度确定待搜索的目标运动点迹

$$r(t_m) = r_i - v_j t_m - a_k t_m^2 / 2 \quad (18)$$

式中, $t_m = nT_r$, $n = 1, 2, \dots, N_p$, $r_i \in [r_1, r_2]$, $i = 1, 2, \dots, N_r$, $v_j \in [-v_{\max}, v_{\max}]$, $j = 1, 2, \dots, N_v$, $a_k \in [-a_{\max}, a_{\max}]$, $k = 1, 2, \dots, N_a$. 在距离-慢时间(方位)二维数据矩阵 $S_{N_r \times M}$ 中抽取长时间相参积累所需的数据矢量 $X_{1 \times N_p} = s_{PC} \left(n, \left| \frac{r(nT_r) - r_1}{\rho_r} \right| \right)$. 对数据矢量 $X_{1 \times N_p}$ 按照式(13)的定义进行 RFRFT 运算,同时补偿距离徙动和多普勒徙动,实现对运动目标能量的长时间相参积累.运动目标的加速度和初速度 (a_k, v_j) 分别对应 RFRFT 域中的坐标 (p_k, u_j) .

步骤4 遍历所有搜索参数,构建距离-RFRFT 域检测单元图,判决目标的有无

遍历所有参数的搜索范围,重复步骤 3,得到不同搜索距离 r_i 条件下,二维参数平面 (p, u) 的幅值最大值,并记录对应的坐标

$$(p_{i_0}, u_{i_0}) = \arg \max_{p, u} |G_{r_i}(p, u)| \quad (19)$$

进而形成 $N_r \times N_r$ 维距离-RFRFT 域检测单元图 $G[r_i, (p_{i_0}, u_{i_0})]$, $i = 1, 2, \dots, N_r$,幅值为 $|G_{r_i}(p_{i_0}, u_{i_0})|$.

将 $G[r_i, (p_{i_0}, u_{i_0})]$ 的幅值作为检测统计量,并与给定虚警概率下的自适应门限比较

$$\left| G[r_i, (p_{i_0}, u_{i_0})] \right| \begin{matrix} \geq H_1 \\ \leq H_0 \end{matrix} \eta \quad (20)$$

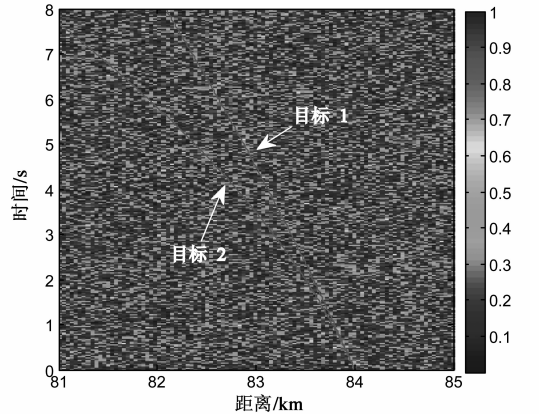
式中, η 为检测门限。

5 实验结果与分析

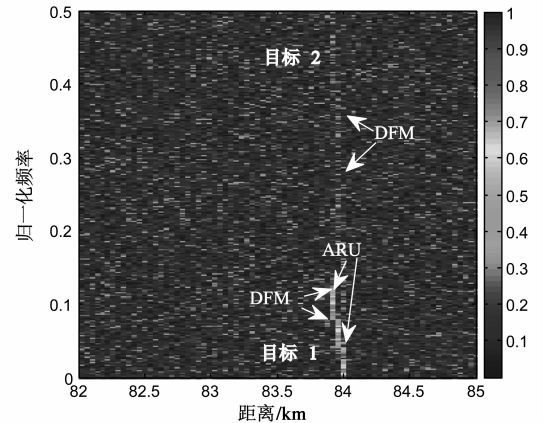
分别设置两种观测环境:(1)仿真的对空雷达探测空中低可观测飞行目标;(2)采用某 S 波段雷达实测数据检测海面远距离运动货船,同时,将所提方法与 MTD、FRFT 以及 RFT 长时间相参积累检测方法相比较.所用雷达均假设为带有相控阵天线的试验雷达或者天线工作在驻留模式,保证较长的观测时间。

5.1 仿真数据分析

雷达和目标的仿真参数设置如表 1 所示,由于目标距离远,导致脉压后的信噪比较低,分别为 -5 dB 和 -8 dB.图 3 给出了噪声背景下空中机动目标雷达回波信号分布图,在 84 km 处出现两个目标,由于噪声功率水平高于目标信号能量,导致目标的运动轨迹模糊.根据表 1 的目标运动参数,得到曲线标记的目标真实运动轨迹,目标 1 和 2 分别跨越 48 和 80 个距离单元,而加速度导致距离弯曲.图 3(b)进一步给出了积累时间 $T_n = 0.512$ s 的距离-多普勒能量分布图,可以看出,通过短时间的相参积累,目标能量有所提高,能够在噪声背景中发现目标,但此时目标能量仍扩散在多个距离和多



(a) 距离-时间分布图(红色曲线表示目标实际运动轨迹)



(b) 距离-多普勒分布图($T_n=0.512$ s)

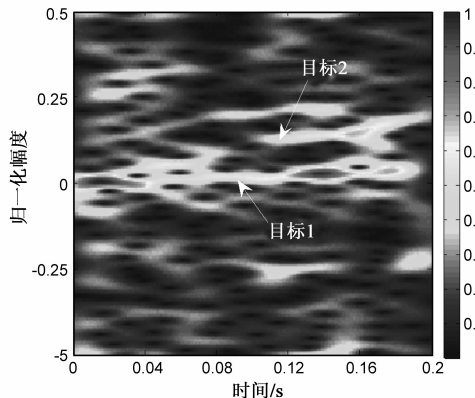
图3 噪声背景下空中机动目标雷达回波信号分布图

普勒单元,产生 ARU 和 DFM 效应.同时,由于目标 2 具有高机动特性,加重了 DFM 效应.

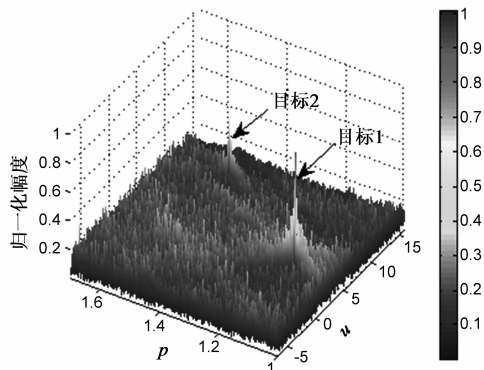
表 1 空中飞行目标仿真参数

雷达	数值	目标 1	数值	目标 2	数值
发射频率(GHz)	3.0	v_1 (m/s)	200	v_2 (m/s)	200
波长(m)	0.1	a_1 (m/s ²)	10	a_2 (m/s ²)	50
脉冲重复周期(ms)	1	r_0 (km)	84	r_0 (km)	84
带宽(MHz)	3.75	SNR ₁ (dB)	-5	SNR ₂ (dB)	-8

图 4 比较了本文算法与 MTD 对目标能量的积累能力.由图 4(a)可以看出,由于积累时间有限,使得积累增益得不到明显改善,说明基于一个距离单元内不同脉冲回波多普勒滤波器组的 MTD 方法无法完全匹配脉冲的二次相位项,目标 2 能量受噪声干扰严重.图 4(b)为 RFRFT 算法处理结果,在距离 84km 处的 RFRFT 域形成明显峰值,并未发生多普勒扩散,而峰值位置体现两个目标不同的初始速度值.通过对比,可以看出所提方法能够有效提高雷达对远程高速、微弱目标的探测能力,同时,由于积累脉冲数量的增加,使雷达的多普勒分辨率大大提高,目标运动参数的估计精度也随之提高.



(a) 同一距离单元雷达回波的时频分布($T_n=0.2s$)



(b) ARU和DFM补偿后回波的RFRFT谱($r_0=84km, T_n=1s$)

图 4 噪声背景下空中机动目标MTD和RFRFT方法处理结果

5.2 实测数据分析

S 波段雷达数据采集时的风向风速为东南风 3~4

级,海况等级约为 3 级,数据和环境说明如表 2 所示.图 5 给出了雷达回波的距离-多普勒分布图,可以发现在 74nmile 处存在微弱运动目标,尽管目标本身体积较大,但由于距离较远,动目标回波被海杂波和噪声所遮蔽,目标在距离和多普勒维能量分布不集中,说明目标做非匀速运动,产生了距离和多普勒走动.

表 2 S 波段雷达海杂波数据说明

观测范围 (nmile)	掠射角 (°)	采样距离 分辨率(m)	采样 频率(Hz)	观测 方向	显著波 高(m)	目标
65-76	<1	5	600	顺风向	1.2	货船

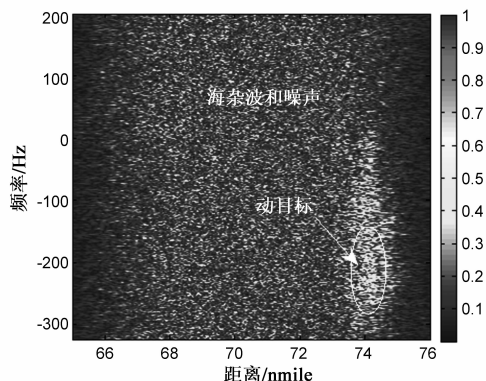


图 5 S 波段雷达回波距离-多普勒分布图

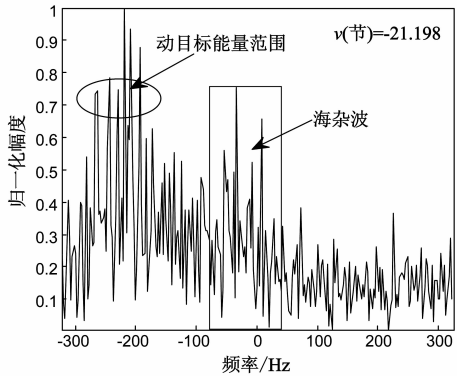
图 6(a)是 MTD 方法的目标检测结果,在频域中目标频谱展宽,与杂波峰值相近.将回波信号转换至 FRFT 域,峰值集中在 $p = 1.03$ 附近,对应调频率为 200Hz/s.通过搜索最佳旋转角度,得到目标在最佳 FRFT 域的幅值图,如图 6(b)所示.虽然结果优于 MTD,但由于杂波中混有频谱均匀分布的噪声,并且目标加速度较小,旋转角度也较小,检测结果中的虚警仍然很高.采用 RFT 方法对动目标信号进行 ARU 补偿,通过预先设置的搜索参数,得到 $r_0 = 74.14nmile$ 处目标峰值最大.比较图 6(b)和图 6(c),可以发现,尽管积累时间大大延长,但 RFT 的积累增益改善并不明显,这是因为多普勒谱的展宽随时间的延长而越发明显,导致目标能量分散到不同的多普勒单元中.因此,当目标做非匀速运动时,RFT 算法性能下降.通过搜索不同距离单元的变换域峰值,构建距离-RFRFT 域检测单元图,发现 $r_0 = 74.2nmile$ 处峰值最大.由图 6(d)可知,RFRFT 将走动的目标包络和频谱相参地积累到以其加速度和速度为参数的一个峰值点上,同时在最佳变换域海杂波和噪声得以很好地抑制,大大提高了系统的检测性能.

5.3 检测性能分析

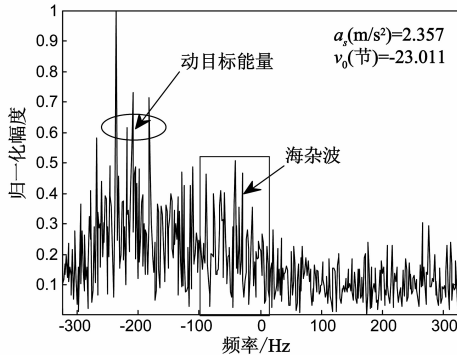
在噪声背景下进行 Monte Carlo 仿真分析与验证,得到图 7 所示的目标发现概率与 SCR 的关系曲线.可以看出:(1)MTD 和 FRFT 检测方法的积累脉冲数有限,当 SNR 低于 -10dB 时,检测概率急剧下降,信号幅值被

噪声淹没,而 RFT 和 RFRFT 在 -10dB 也能达到较好的检测性能;(2)达到相同的检测概率($P_d = 0.8$),RFRFT 相对于 RFT 算法,对 SNR 的需求降低 3dB 左右;(3)随

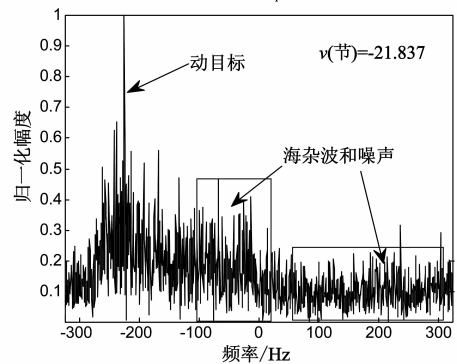
着 SNR 的提高,RFT 算法的检测性能却增加缓慢,尤其是与 FRFT 算法的检测性能曲线存在交叉,这是因为 RFT 未补偿多普勒徙动,SNR 增加的同时,多普勒谱展宽越明显,导致目标能量发散,从而进一步验证了图 6 (b)和图 6(c)的结果。



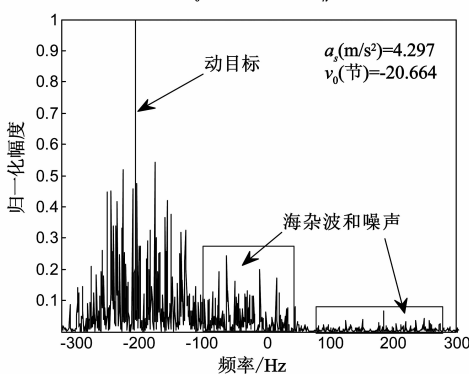
(a) MTD方法 ($r_0=74\text{nmile}, T_n=0.5\text{s}$)



(b) FRFT方法 ($r_0=74\text{nmile}, p_{\text{opt}}=1.032, T_n=0.5\text{s}$)



(c) RFT方法 ($r_0=74.14\text{nmile}, T_n=3.5\text{s}$)



(d) RFRFT方法 ($r_0=74.20\text{nm}, p_{\text{opt}}=1.128, T_n=3.5\text{s}$)

图6 海面微弱动目标MTD、FRFT、RFT和RFRFT方法检测结果比较

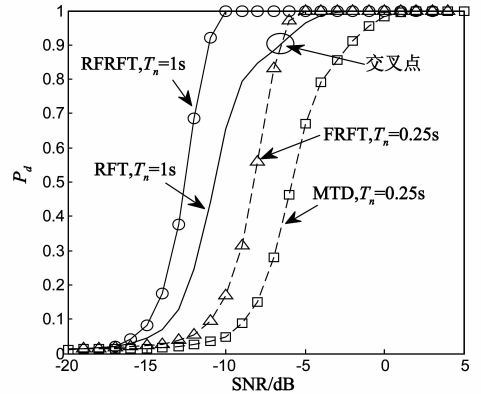


图7 不同相参积累方法检测性能比较($P_{fa}=10^{-4}$)

6 结论

本文在动目标信号模型的基础上,结合 RFT 和 FRFT 提出 RFRFT 长时间积累检测方法,能够同时补偿距离和多普勒徙动,使相参积累时间不受距离走动、距离弯曲和多普勒分辨率的限制,提高了积累增益,仿真和实测数据表明 RFRFT 实质上是一种带有变换阶数的广义多普勒滤波器组,相比 RFT 方法,能够更好地抑制背景杂波和噪声,并能显著提高雷达对非匀速机动目标的积累检测性能。

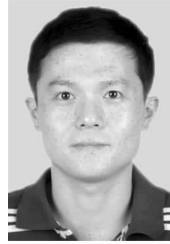
参考文献

- [1] Mengdao Xing, Junhai Su, et al. New parameter estimation and detection algorithm for high speed small target[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(1): 214 - 224.
- [2] 陈小龙, 关键, 等. 分数阶 Fourier 变换在动目标检测和识别中的应用: 回顾和展望[J]. 信号处理, 2013, 29(1): 85 - 97.
Chen Xiaolong, Guan Jian, et al. Application of fractional Fourier transform in moving target detection and recognition: development and prospect [J]. Journal of Signal Processing, 2013, 29(1): 85 - 97. (in Chinese)
- [3] 吴孙勇, 廖桂生, 等. 提高雷达机动目标检测性能的二维频率域匹配方法[J]. 电子学报, 2012, 40(12): 2415 - 2420.
Wu Sunyong, Liao Guisheng, et al. A new method for radar maneuvering target detection based on matched filtering in two-dimensional frequency domain [J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(12): 2415 - 2420. (in Chinese)
- [4] B D Carlson, E D Evans, et al. Search radar detection and track

with the Hough transform Part I: System concept [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1994, 30(1): 102 - 108.

- [5] Jia Xu, Ji Yu, et al. Radon-Fourier transform for radar target detection, I: generalized Doppler filter bank [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(2): 1186 - 1202.
- [6] R Tao, N Zhang, et al. Analysing and compensating the effects of range and Doppler frequency migrations in linear frequency modulation pulse compression radar [J]. IET Radar, Sonar and Navigation, 2011, 5(1): 12 - 22.
- [7] 王俊, 张守宏. 微弱目标积累检测的包络移动补偿方法 [J]. 电子学报, 2000, 28(12): 56 - 59.
Wang Jun, Zhang Shouhong. Study on the motion compensation of range migration for weak moving target detection [J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(12): 56 - 59. (in Chinese)
- [8] 周峰, 李亚超, 等. 一种单通道 SAR 地面运动目标成像和运动参数估计方法 [J]. 电子学报, 2007, 35(3): 543 - 548.
Zhou Feng, Li Yachao, et al. An effective approach to ground moving target imaging and motion parameter estimation for single channel SAR system [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(3): 543 - 548. (in Chinese)
- [9] Xiang-gen Xia. Discrete chirp-Fourier transform and its application to chirp rate estimation [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2000, 48(11): 3122 - 3133.
- [10] Xiaolong Chen, Jian Guan, et al. Detection of low observable moving target in sea clutter via fractal characteristics in FRFT domain [J]. IET Radar, Sonar and Navigation, 2013, 7(6): 635 - 651.
- [11] Xiaolong Chen, Jian Guan, et al. Detection and extraction of target with micromotion in spiky sea clutter via short-time fractional Fourier transform [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(2): 1002 - 1018.

作者简介



陈小龙 男, 1985 年生于山东烟台. 海军航空工程学院博士生. 硕士论文获全军优秀硕士论文奖. 研究方向包括微多普勒分析, 时频信号分析和海杂波中微弱目标检测.
E-mail: cxlxl209@163.com



刘宁波 男, 1983 年生于山东烟台. 海军航空工程学院信息融合研究所讲师, 博士. 研究方向包括分形信号处理, 海杂波中微弱目标检测.



王国庆 男, 1980 年生于山东安丘. 海军航空工程学院信息融合研究所讲师, 博士. 研究方向为雷达信号处理.



关键 男, 1968 年生于辽宁锦州. 海军航空工程学院电子信息工程系教授, 博士生导师. 获全国优秀博士学位论文奖, 新世纪百千万人才工程国家级人选, “泰山学者”特聘教授. 研究方向包括雷达目标检测与跟踪、侦察图像处理和信息融合.
E-mail: guanjian96@tsinghua.org.cn