

文章编号: 2095-4980(2016)02-0299-07

频域切变 Radon-Fourier 变换算法及其对微弱目标的检测

陈 潜^{1,2}, 刘俊豪^{2*}, 王海涛²

(1.北京理工大学 信息与电子学院, 北京 100081; 2.上海无线电设备研究所, 上海 200090)

摘 要: 针对Radon-Fourier变换(RFT)在进行高速微弱目标检测过程中运算量大和实时处理问题, 提出频域切变RFT(FSRFT)算法, 其在不失积累增益和检测性能的情况下, 简化处理过程并降低运算量, 且所提方法适合于雷达跟踪过程中的滑窗处理和并行运算。仿真实验结果表明, 理想情况下, FSRFT方法的相参积累检测性能接近理论值, 并行处理运算量较现有快速方法降低一个数量级。

关键词: 微弱目标; 长时间相参积累; 频域切变; Radon-Fourier 变换; 目标检测

中图分类号: TN957

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201602.0299

Frequency Shear Radon-Fourier Transform and detection for high-speed weak targets

CHEN Qian^{1,2}, LIU Junhao^{2*}, WANG Haitao²

(1.School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2.Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 200090, China)

Abstract: In the detection of the high-speed and weak targets, Radon-Fourier Transform(RFT) may encounter the problems of heavy computational quantity and real-time processing. To solve the problems, the Frequency Shear Radon-Fourier Transform(FSRFT) is proposed, which simplifies process and decreases computation effectively under the same integration gain and detection performance, and is beneficial to sliding window process and parallel computing for radar tracking as well. The experiment results show that the detection performance can almost achieve the theoretical value under ideal condition, and the parallel processing capability is lower by one order of magnitude than the existing fast methods.

Key words: weak targets; long term coherent integration; frequency shear; Radon-Fourier Transform; target detection

随着雷达隐身技术的发展, 目标的雷达截面积(Radar Cross Section, RCS)大幅下降, 使得雷达目标回波信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)降低, 雷达作用距离减小。通过增加信号积累时间, 以提高回波信号 SNR, 是提高对隐身等微弱目标检测能力的有效手段^[1-3]。其中长时间非相参积累方法, 如检测前跟踪算法(Detect-Before-Track, TBD)^[4]由于没有利用脉冲间相位信息, 效果不如相参类方法。但在长时间相参积累处理中, 目标运动引起的跨距离走动会影响积累增益, 尤其是高分辨力雷达时, 距离走动的影响更加严重, 必须进行跨距离单元补偿。跨距离单元补偿方法主要可分 2 类: 一类是对脉压后距离-脉冲域的回波信号通过包络平移或扩展, 实现跨距离单元补偿。此类方法直接在距离维度上实现包络平移补偿^[5], 但需要进行距离维插值操作以提高补偿精确度, 算法运算量较大。另一类补偿方法是在距离-脉冲维信号的相应变换域进行跨距离单元补偿。如 Keystone 变换可以在未知目标运动参数的情况下, 实现对目标包络轨迹的统一校正^[6-7], 但多普勒模糊时, 需要对多普勒模糊数进行专门补偿, 难以实现对不同模糊数目标的同时相参积累。文献[8-10]提出相参 Radon 变换, 通过对包络轨迹的旋转校正, 进而实现回波能量的相参积累。但在旋转过程存在插值导致的积累损失和旁瓣, 严重影响检测性能。文献[11-12]提出 Radon-Fourier 变换(RFT), 实现回波信号在参数空间的聚焦, 但其在时域采用寻址移位的方法,

收稿日期: 2014-10-29; 修回日期: 2015-01-16

基金项目: 上海市自然科学基金资助项目(15ZR1439500)

* 通信作者: 刘俊豪 email:ljhtn@sina.com

导致运算量大。文献[13-14]中提出 CZT-RFT(Chirp-Z Transform RFT)实现快速运算,但是 CZT 过程在慢时间维进行,不便于雷达数据的滑窗处理,当雷达转入跟踪状态时,不利于数据率的提高。

针对上述问题,本文从信号空间平移旋转的角度出发,通过对平移过程物理意义的分析,提出频域切变 RFT(FSRFT),并通过仿真实验对算法的有效性和检测性能进行验证。

1 信号模型

假设雷达发射线性调频(Linear Frequency Modulation, LFM)脉冲信号,其基带数学表达式为:

$$p(t) = \text{rect}(t/T_p) \exp(j\pi\gamma t^2) \quad (1)$$

式中: T_p 为脉冲时宽; γ 为调频率; $\text{rect}(\square)$ 为矩形窗函数。

对单点目标回波信号,相参处理间隔(Coherent Process Interval, CPI)内雷达接收到的第 m 个回波基带信号为:

$$s_r(t, t_m) = A_r p(t - 2r(t_m)/c) \exp(-j4\pi f_c r(t_m)/c) \quad (2)$$

式中: A_r 为目标回波幅度; t 和 t_m 分别为快时间和慢时间($t_m = mT_r$, T_r 为脉冲重复间隔); f_c 为载波频率; c 为光速; $r(t_m) = r_0 + v_0 t_m$, r_0 和 $r(t_m)$ 分别为起始和 t_m 时刻目标与雷达的径向距离, v_0 为目标与雷达的径向速度。

对式(2)进行匹配滤波,得到

$$s_{r,M}(t, t_m) = A_l B \text{sinc}[B(t - 2r(t_m)/c)] \exp(-j4\pi f_c v_0 t_m / c) \quad (3)$$

式中: $A_l = A_r \exp(-j4\pi f_c r_0 / c)$; B 为 LFM 信号带宽。

传统的动目标检测(Motion Target Detection, MTD)技术假设 CPI 内目标在同一个距离单元,故慢时间维傅里叶变换即得到相参积累结果:

$$S_p(t, v) = \int s_{r,M}(t, t_m) \exp(j4\pi v t_m / \lambda) dt_m \quad (4)$$

式中: λ 为波长; $S_p(t, v)$ 为距离-多普勒域的相参积累结果。

但在长时间相参积累处理过程中,由式(3)可知,基带回波通过脉冲压缩后其包络为 sinc 函数,且中心在 $2r(t_m)/c$ 处,因此不同的脉冲对应的中心不同,在 CPI 内相对运动引起的中心延时变化超过一个距离分辨单元时,即发生了跨距离单元走动。

2 FSRFT 算法

2.1 RFT 原理

式(3)的包络轨迹 $r(t_m)$ 如图 1 左图的斜线所示,其由参数 (r_0, v_0) 决定。RFT 利用速度与多普勒相位的关系进行相位补偿,并沿运动轨迹进行积累,由于在检测前目标参数未知,需要对其进行搜索,并且 r_0 与 r_T (轨迹 $r(t_m)$ 在 r 轴的截距)只是定义的起始时刻不同,搜索过程中统一用 r 表示,因此 RFT 的标准表示形式为:

$$S_p(r, v) = \int s_{r,M}(2r(t_m)/c, t_m) \exp(j4\pi v t_m / \lambda) dt_m \quad (5)$$

式(5)实现了 r - t_m 平面上的运动轨迹到参数空间 (r, v) 的映射。RFT 实现的原始方法是采用寻址移位的方法对轨迹参数进行搜索,或者采用 Radon 变换对原始信号空间绕中心进行旋转,然后沿慢时间进行多普勒滤波,实现相参积累。

Radon 变换旋转过程如图 1 所示,在 r - t_m 平面,设目标支撑区中心到轨迹的垂直距离为 ρ_0 , ρ_0 到 r 轴的夹角为 θ_0 , 且有 $\theta_0 \in [-\pi/2, \pi/2]$, 因此 $\theta_0 = \arctan(v_0)$ 且 $\rho_0 = r_T \cos \theta_0$, (r, t_m) 坐标轴与 (ρ, s) 坐标轴的转换关系为:

$$\begin{bmatrix} r \\ t_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \rho \\ s \end{bmatrix} \quad (6)$$

利用 Radon 变换对角度进行遍历,将目标轨迹 $s_{r,M}(t, t_m)$ 围绕目标支撑区中心顺时针旋转 θ 后补偿多普勒相位并积分,得到 RFT 相参积累结果,该过程可表示为:

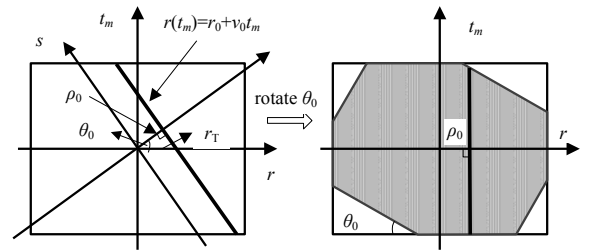


Fig.1 Target's support region of Radon-transform rotate process
图 1 Radon 变换旋转过程目标支撑区

$$S_p(\rho, f_d) = \iint_{s_{r,M}} (r, t_m) \delta(\rho - r \cos \theta - t_m \sin \theta) \exp(j4\pi v t_m / \lambda) dr dt_m = \int_{s_{r,M}} (\rho \cos \theta - t_m \sin \theta, \rho \sin \theta + t_m \cos \theta) \exp(-j2\pi f_d t_m) dt_m \quad (7)$$

式中: $\theta = \arctan v$; $f_d = -2v/\lambda$; $S_p(\rho, f_d)$ 为 ρ - f_d 参数空间相参积累结果。

因此, RFT 的一种基本实现方法是对速度 v 对应的角度 θ 进行遍历, 得到每个角度对应的极距-多普勒(ρ - f_d)空间, 然后对这些空间的峰值进行选大、恒虚警处理(Constant False Alarm Rate, CFAR), 从而得到最大峰值对应的极距和多普勒频率。

2.2 FSRFT

原始 RFT 实现过程中, 速度的搜索范围决定了角度的遍历过程, 按步长量化搜索存在量化误差。而如果采用 Radon 旋转方法旋转后, 坐标位置可能不为整数, 需要对新坐标进行插值, 从而导致运算量大和插值旁瓣。下面对旋转矩阵进行分析, 将快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)实现图像的快速、高质量旋转^[15]应用到 RFT 中。对式(6)中旋转矩阵分解得

$$\begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\tan(\theta/2) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \sin \theta & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -\tan(\theta/2) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

由式(8)可知, 信号空间的旋转变换可分解成 3 个一维切变过程, 而每一次切变过程可以通过傅里叶变换(FT)实现。将原始信号空间看作二维函数 $f(x, y)$, 并设 N 和 M 分别为行(x)和列(y)单元数, u 和 v 分别是 x 和 y 的频域形式。利用 FT 的性质, 信号空间围绕中心旋转 θ 过程可描述如下。首先进行行方向切变变换:

$$M_x(x, y) = \text{IFFT}_u \{ Q_1(u, y) \text{FFT}_x \{ f(x, y) \} \} \quad (9)$$

$$Q_1(u, y) = \exp \left[\frac{j2\pi(u - N/2)a(y - M/2)}{N} \right] \quad (10)$$

式中 $a = -\tan(\theta/2)$ 。然后对 $M_x(x, y)$ 进行列方向变换:

$$M_{yx}(x, y) = \text{IFFT}_v \{ Q_2(x, v) \text{FFT}_y \{ M_x(x, y) \} \} \quad (11)$$

$$Q_2(x, v) = \exp \left[\frac{j2\pi(v - M/2)b(x - N/2)}{M} \right] \quad (12)$$

式中 $b = \sin \theta$ 。最后再对 $M_{yx}(x, y)$ 进行行方向变换:

$$M_{yxx}(x, y) = \text{IFFT}_u \{ Q_1(u, y) \text{FFT}_x \{ M_{yx}(x, y) \} \} \quad (13)$$

上述 3 次切变平移得到信号空间的 θ 角度旋转。而对于匀速运动或者运动速度变化引起的距离弯曲小于 1 个距离分辨力时, 可认为包络仍为一维直线, 因此, 仅行切变平移即可使轨迹沿脉冲维对齐, 这样式(6)表示的旋转过程简化为行切变过程, 即

$$\begin{bmatrix} r \\ t_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \tan \theta \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \rho \\ s \end{bmatrix} \quad (14)$$

记 $n=0, 1, \dots, N-1$, $l=0, 1, \dots, L-1$ 分别为信号空间的行(距离维(t))及其频域(f)的离散表示, 并记 $m=0, 1, \dots, M-1$, $k=0, 1, \dots, K-1$ 分别为慢时间(t_m)及其频域(f_d)的离散表示, 且 $N=L, M=K$, 则对原始信号平面 $s_{r,M}(n, m)$ 围绕中心进行切变及相参积累过程可表示为:

$$S_\theta(n, k) = \sum_{m=0}^{M-1} s_{r,M}(n + m \tan(\theta), m) \exp(-j2\pi km/M) = \sum_{m=0}^{M-1} \left\{ \text{IFFT}_l \{ Q_\theta(l, m) \text{FFT}_l \{ s_{r,M}(n, m) \} \} \right\} \exp(-j2\pi km/M) = \text{FFT}_2 \left\{ \text{IFFT}_l \{ Q_\theta(l, m) \text{FFT}_l \{ s_{r,M}(n, m) \} \} \right\} \quad (15)$$

式中: $S_\theta(n, k)$ 为切变 θ 角度时的相参积累结果; FT_1 表示快时间维操作; FT_2 表示慢时间维操作; 且 $Q_\theta(l, m)$ 为:

$$Q_\theta(l, m) = \exp \left[\frac{j2\pi(l - N/2)(m - M/2) \tan \theta}{N} \right] \quad (16)$$

量化后目标支撑区中 θ 与 v 的关系为:

$$\theta = \arctan \left(\frac{v T_r}{\Delta R} \right) \quad (17)$$

式中 ΔR 为距离分辨力。

上述过程是在快时间频域利用切变方法对包络进行对齐, 进而实现 RFT 算法, 因此称之为 FSRFT, 切变角度为 θ_0 时的目标支撑区如图 2 所示。

在 FSRFT 过程中, 角度搜索步进 $\Delta\theta$ 所对应的速度搜索间隔 Δv , 其设置与以下因素有关。一方面, Δv 在积累时间内的距离变化不超过 1 个距离分辨单元, 当相参积累时间 MT_r 确定后, 速度搜索步进 $\Delta v = \Delta R / (MT_r)$ 。另一方面, 在雷达低重频方式且存在速度模糊时, 设盲速为 $v_b = \lambda / (2T_r)$, 则一次相参处理的速度分析范围为 $[\tilde{v}, \tilde{v} + v_b]$ (其中 $\tilde{v}$ 为当前速度), 而当速度不模糊时, 要求速度搜索步进 $\Delta v < v_b$ 。因此, Δv 设置为:

$$\Delta v = \min \left\{ \frac{\Delta R}{MT_r}, \frac{\lambda}{2T_r} \right\} \quad (18)$$

因此角度搜索步进为:

$$\Delta\theta = \arctan \left(\frac{(\tilde{v} + \Delta v)T_r}{\Delta R} \right) - \arctan \left(\frac{\tilde{v}T_r}{\Delta R} \right) \quad (19)$$

切变旋转相当于实现包络沿脉冲维的对齐, 然后利用 FFT 进行多普勒滤波, 得到距离-多普勒 (r - f_d) 平面, 并且峰值位置对应起始距离和速度。将匹配系数与切变过程系数合并, 进行一次切变角度的相参处理过程如图 3 所示, 图中 $P^*(l)$ 为脉压频域匹配系数。

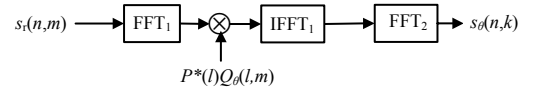


Fig.3 Coherent process of FSRFT for each angle search
图 3 频域切变 RFT 一次角度搜索的相参处理过程

2.3 FSRFT 算法运算量

计算从基带信号快时间频域 $s_r(f, t_m)$ 至得到积累峰值过程中复数乘法运算次数。每个脉冲距离单元数为 N 点, 相参积累脉冲数为 M (N 和 M 为 2 的整数次幂), FSRFT 算法需要对角度进行搜索, 设角度搜索次数为 θ , 则复数乘法运算次数为:

$$O = \theta NM (1 + 0.5 \log_2 N + 0.5 \log_2 M) \quad (20)$$

FSRFT 算法搜索到目标后进行跟踪, 此时无需角度搜索, 而是对每一个接收脉冲在距离维进行切变处理。只需对新采集的 M' 个脉冲进行处理, 无需再对先前经过切变处理的信号进行处理, 故跟踪滑窗处理过程的复数乘法运算次数为:

$$\bar{O} = N [M' (1 + 0.5 \log_2 N) + 0.5 M \log_2 M] \quad (21)$$

3 FSRFT 对微弱目标的检测

高速微弱运动目标存在严重的速度模糊问题, 如 Keystone 方法^[7]需要对模糊数进行搜索, FSRFT 方法虽然避免了对多普勒模糊数的搜索, 但需对目标轨迹角度进行搜索。通过分析, 角度搜索中补偿系数可以合并到匹配滤波过程中, 因此简化了处理过程, 降低了运算量, 在跟踪过程中运算量降低更为明显。

图 4 给出了 FSRFT 对微弱目标检测和参数估计过程的流程图, 具体步骤如下:

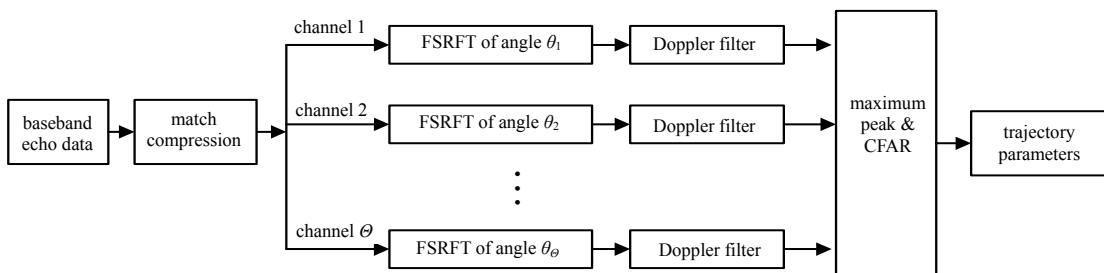


Fig.4 FSRFT weak targets detection process
图 4 FSRFT 微弱目标检测流程图

- 1) 对回波数据进行预处理, 即对数据下变频然后进行匹配压缩, 得到 $r-t_m$ 域;
- 2) 根据运动目标的先验知识, 确定目标的速度区间, 从而得到频域切变的角范围并进行量化 $(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_\theta)$;
- 3) 为达到实时检测的目的, 对量化的角度进行多通道并行处理, 每个通道完成一个切变角的 FSRFT 变换, 然后对多个脉冲的 FSRFT 结果进行多普勒滤波;
- 4) 对所有通道的结果进行选大和 CFAR 处理, 得到目标峰值对应的角度和距离信息, 从而得到目标的轨迹。当进入跟踪阶段时, 记录检测阶段的通道数, 此时跟踪过程只在该通道内进行即可。

4 仿真与分析

目标和雷达参数: 设单点目标初始距离 15 km, 以速度 2 000 m/s 向雷达运动, 雷达载频 10 GHz, 信号带宽 $B=10$ MHz, 时宽 $T_p=20 \mu\text{s}$, 复采样频率 $f_s=10$ MHz, 重频 $f_r=2$ kHz, 相参积累脉冲数 $M=1\ 024$, 且距离门单元数 $N=256$ 。

由以上参数可知, 相参积累时间 0.512 s, 距离分辨力 $\Delta R=15$ m, 多普勒模糊数为 66, 跨距离单元数为 68, 因此对应的轨迹斜率角度为 $\arctan(68/1\ 024)=3.80^\circ$ 。设速度的搜索范围为 500 m/s~2 500 m/s, 则多普勒模糊数的范围为 16~83, 角度搜索范围为 $0.95^\circ\sim 4.75^\circ$ 。此时角度的搜索次数与多普勒模糊数搜索次数相同, 即为 67(包括无模糊时)次。

为验证所提方法, 首先不加入噪声。对接收信号进行匹配压缩得到距离-慢时间($r-t_m$)域信号空间, 如图 5 所示, 图中可以看出包络轨迹存在严重的跨距离走动现象。图 6 为 MTD 的结果, 由于距离走动的影响, 积累能量分散在多个距离单元中。

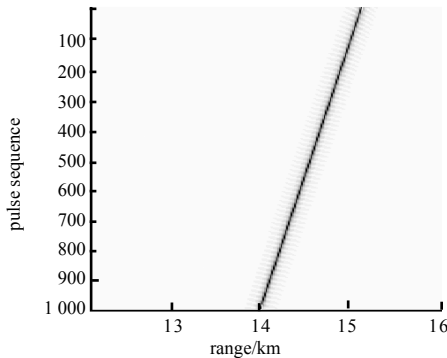


Fig.5 Echo envelope without noise after matched filter
图 5 匹配压缩后的包络轨迹

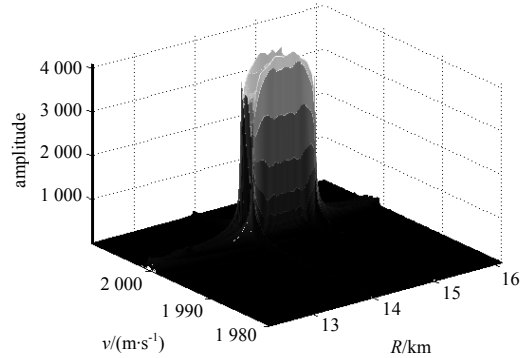


Fig.6 Results of conventional MTD method
图 6 传统 MTD 处理结果

利用本文所提的 FSRFT, 按照设计的角度间隔在搜索范围内进行遍历, 并将积累结果进行拼接, 得到 FSRFT 处理后主瓣附近的部分积累结果, 如图 7(a)所示, 图中的副瓣为盲速旁瓣。对所有搜索角度对应的距离-多普勒空间($r-f_d$)进行峰值选大处理, 并将角度轴对应变换到多普勒轴, 得到目标运动参数对应的($r-f_d$)参数空间, 如图 7(b)所示。对于微弱目标信号, 回波 SNR 极低, 这里将回波信号加入 $R_{\text{SN}}=-20$ dB 的高斯白噪声来模拟微弱目标信号, FSRFT 仿真结果如图 7(c)所示, 图中可以看出, 信号能量得到有效积累。

对比文献[11](Original RFT)、文献[14](CZT-RFT)和本文所提的 FSRFT 算法, 在相参积累过程中复数乘法运算量如表 1 所示。可以看出, 在运算量方面所提的 FSRFT 算法与 CZT-RFT 相比有所降低。而当目标搜索后转入跟踪状态, 此时 CZT-RFT 无需多普勒模糊搜索, 但仍需 1.101×10^7 的运算量; 而 FSRFT 算法无需切变角度的搜索, 并且滑窗处理过程无需对先前距离维切变数据再进行处理, 表 2 给出了不同滑窗间隔时 FSRFT 算法跟踪时的复数乘法运算量。从表 2 中可以看出, 在跟踪状态下, FSRFT 比 CZT-RFT 算法的运算量降低了一个数量级, 更适合较高数据率要求的使用场合。

表 1 搜索过程中复数乘法次数

Table1 Complex multiplication computation of the search process			
RFT methods	original RFT	CZT-RFT	FSRFT
multiplication($\times 10^8$)	183.4	7.487	1.783

表 2 FSRFT 跟踪状态时复数乘法次数

Table2 Complex multiplication of FSRFT in tracking status					
sliding window interval	M'	1	4	16	128
multiplication($\times 10^6$)		1.312	1.316	1.331	1.475

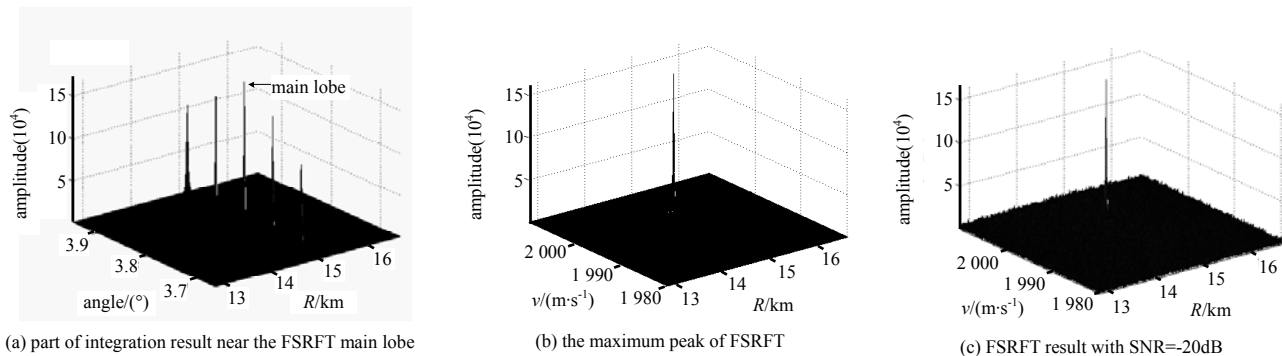


Fig.7 Coherent integrated results of frequency shear RFT

图 7 频域切变 RFT 相参积累结果

针对传统 MTD, CZT-RFT 和本文方法, 在虚警概率为 10^{-6} 时, 对不同 SNR 回波进行 1 000 次 Monte-Carlo 实验, 结果如图 8 所示。其中, MTD 的积累脉冲数对应的距离走动量刚好跨一个距离单元, 由设置的参数可知, 跨距离单元数为 68(18.33 dB), 积累能量分散在这些单元内。由图 8 可知, 在虚警率 10^{-6} , 检测概率为 0.8 时, 本文所提的 FSRFT 与 CZT-RFT 方法检测性能基本一致, 并且 FSRFT 比 MTD 方法提高了 18 dB, 接近理论值 18.33 dB, 显著提高了检测性能。

5 结论

本文将图像处理中 FFT 实现图像的高质量旋转用到 RFT 算法中, 提出了频域切变 RFT 算法, 实现高速微弱目标回波信号的长时间相参积累。所提方法处理过程简单, 补偿系数存储量少, 尤其是便于并行处理, 有利于雷达的检测与跟踪。并通过仿真实验验证了 FSRFT 算法的有效性和检测性能。

参考文献:

- [1] 保铮. 雷达信号的长时间积累[R]. 中国:第七届中国雷达学术年会特邀报告, 1999. (BAO Zheng. Long term integration of radar signal[R]. China: Specially Invited Report in the 7th Radar Conference of China, 1999.)
- [2] SKOLNIK M. Opportunities in radar-2002[J]. Electronics & Communication Engineering Journal, 2002, 14(6): 263–272.
- [3] 许稼, 彭应宁, 夏香根, 等. 空时频检测前聚焦雷达信号处理方法[J]. 雷达学报, 2014, 3(2): 129–141. (XU Jia, PENG Yingning, XIA Xianggen, et al. Radar signal processing method of space-time frequency focus-before-detects[J]. Journal of Radars, 2014, 3(2): 129–141.)
- [4] 朱洁丽, 汤俊. 检测前跟踪算法性能评估指标体系[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014, 12(5): 671–677. (ZHU Jieli, TANG Jun. Performance evaluation metrics for Track-Before-Detect algorithms[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014, 12(5): 671–677.)
- [5] 王俊, 张守宏. 微弱目标信号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.)
- [6] 战立晓, 汤子跃, 朱振波. 高机动小 RCS 目标长时间相参积累检测新方法[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(3): 511–516. (ZHAN Lixiao, TANG Ziyue, ZHU Zhenbo. Novel method of long term coherent integration detection for maneuvering small RCS targets[J]. Systems Engineering and Electronics, 2013, 35(3): 511–516.)
- [7] SU J, XING M, WANG G, et al. High-speed multi-target detection with narrowband radar[J]. IET Radar Sonar and Navigation, 2010, 4(4): 595–603.
- [8] CARRETERO-MOYA J, GISMERO-MENOYO J, ASENSIO-LOPEZ A, et al. Small-target detection in high-resolution heterogeneous sea-clutter: an empirical analysis[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(3): 1880–1898.
- [9] CARRETERO-MOYA J, GISMERO-MENOYO J, ASENSIO-LOPEZ A, et al. Application of the radon transform to detect small targets in sea clutter[J]. IET Radar Sonar & Navigation, 2009, 3(2): 155–166.

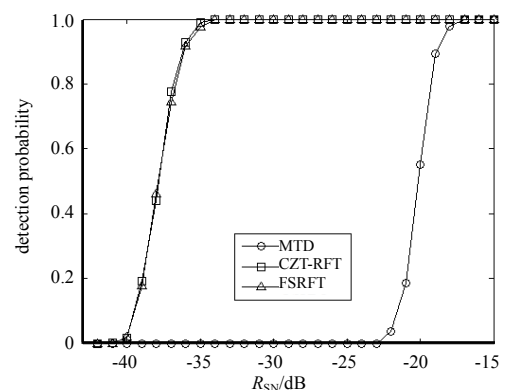


Fig.8 Detection probability curves vs. input SNR

图 8 目标的检测概率与输入 SNR 的关系曲线

- [10] CARRETERO-MOYA J, GISMERO-MENOYO J, ASENSIO-LOPEZ A, et al. A coherent radon transform for small target detection[C]// IEEE Radar Conference. Pasadena, CA: IEEE, 2009: 1-4.
- [11] XU J, YU J, PENG Y, 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.
- [12] XU J, YU J, PENG Y N, et al. Radon-Fourier Transform for radar target detection II: blind speed sidelobe suppression[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(4): 2473-2489.
- [13] XU J, YU J, PENG Y N, et al. Radon-Fourier Transform for radar target detection III: optimality and fast implementations[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2012, 48(2): 991-1004.
- [14] 吴兆平, 符渭波, 苏涛, 等. 基于快速 Radon-Fourier 变换的雷达高速目标检测[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(8): 1866-1871. (WU Zhaoping, FU Weibo, SU Tao, et al. High speed radar target detection based on fast Radon-Fourier Transform[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 34(8): 1866-1871.)
- [15] 汪国有, 项国平, 孙天春. 利用 FFT 实现图像的快速高质量旋转变换[J]. 华中科技大学学报, 2003, 31(4): 91-93. (WANG Guoyou, XIANG Guoping, SUN Tianchun. Algorithm for the rotation transformation of image by using FFT with fast and high quality[J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology, 2003, 31(4): 91-93.)

作者简介:



陈 潜(1975-), 男, 浙江省台州市人, 博士, 研究员, 主要研究方向为雷达系统、雷达信号处理.email: qian_ch@163.com.

刘俊豪(1988-), 男, 河南省平顶山市人, 硕士, 研究方向为雷达微弱目标检测.email: ljhtn@sina.com.

王海涛(1978-), 男, 山东省烟台市人, 高级工程师, 研究方向为太赫兹雷达技术、成像技术、高度表技术等.

(上接第 286 页)

- [10] GUO G D, FU Y, DYER C R, et al. Head pose estimation: Classification or regression?[C]// 19th International Conference on Pattern Recognition. Tampa, FL: IEEE, 2008: 1-4.

作者简介:



雷 欢(1990-), 女, 重庆市开县人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为模式识别、数字图像处理、视频编码.email: scu.leihuan@foxmail.com.

陈 虎(1981-), 男, 四川省绵阳市人, 讲师, 主要研究方向为模式识别、数字图像处理、视频编码技术、视觉合成以及智能交通等.

吴志红(1964-), 女, 北京市人, 副教授, 主要研究方向为数字图像处理、模式识别.email: wuzhihong@scu.edu.cn.