

基于快速 Radon-Fourier 变换的雷达高速目标检测

吴兆平* 符渭波 苏涛 郑纪彬

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

摘要: Radon-Fourier 变换(RFT)是一种根据目标的运动参数对位于距离-慢时间平面中的目标轨迹进行积分来积累雷达目标能量的方法。该文针对 RFT 算法的运算量大和未插值时由量化误差引起能量积累损失这两个问题,提出一种基于 Chirp-Z 变换(CZT)的快速 RFT 算法,该算法在频域实现,并将其实现过程和 CZT 算法结合在一起,成功的解决了以上问题。另外,在不增加运算量的前提下,该方法还能通过补偿目标的多普勒频率来消除匹配滤波损失。实验结果表明在理想情况下该方法的目标能量积累性能接近理论最优值。

关键词: 目标检测; 相参积累; 距离走动; Chirp-Z 变换(CZT); 多普勒敏感

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)08-1866-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.01180

High Speed Radar Target Detection Based on Fast Radon-Fourier Transform

Wu Zhao-ping Fu Wei-bo Su Tao Zheng Ji-bin

(National Lab of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Radon-Fourier Transform (RFT) is a kind of method which integrates radar target energy by integrating the target track in range-slow time domain according to the target motion parameters. Considering the two issues of high computation cost of RFT and the energy lose caused by quantization error without interpolation, a fast RFT method based on Chirp-Z Transform (CZT) is proposed, which implements in frequency domain, and combines its implement process and CZT algorithm together to solve the above issues successfully. In addition, the method can also eliminate the loss of match filtering by compensating the Doppler frequency of target without increasing the computation cost. The experiment results show that the integration performance of this method can almost achieve the optimal one under ideal condition.

Key words: Target detection; Coherent integration; Range migration; Chirp-Z Transform (CZT); Doppler sensitive

1 引言

在相参多普勒雷达信号积累中,高速目标运动引起的距离走动严重影响对目标的能量积累和检测^[1-3],因此,必须减小或消除距离走动对目标能量积累的影响。

近几年来,研究目标包络距离走动问题的雷达信号积累方法有很多,其中的积分类^[4-10]方法是一个研究热点。积分类方法有 Hough 变换^[4,5]、Radon 变换^[6]等方法,还有文献[7-10]提出的通过对由目标运动参数决定的直线进行积分的方法,其中文献[4-7]和文献[7-10]的积累方式分别是非相参和相参积累,而文献[7,8]所提的非相参/相参 Hough 变换的方法可看作是文献[9,10]提出的 Radon-Fourier 变换(RFT)方法的特例。实际上,RFT 方法是一种多

普勒滤波器,既避免了补偿类方法对目标距离走动的校正,又能将传统的动目标检测(MTD),Hough 变换和 Radon 变换等方法统一起来^[9,10],是一种优秀的积累方法。但在 RFT 类方法中,其被积直线是采用时域移位或寻址运算提取出来的,由于脉冲压缩后的目标能量有时会分散在两个相邻的距离单元中,且移位或寻址方法的偏移量通常为整数,因此,在未进行插值的情况下,提取出来的直线虽然包含大部分的目标能量,但仍会有一部分能量损失,我们将这部分能量损失称为由量化误差引起的能量积累损失。另外,该类方法的运算量较大,如果通过插值方法来减小上述的能量损失,则会进一步增大算法实现的复杂度和运算量。

为了解决 RFT 算法的运算量大和在未插值时的能量损失的问题,本文提出了一种基于 CZT 变换的快速 RFT 算法。相比于文献[7-10]中的方法,在未插值时,所提方法不但解决了由量化误差引起的

2011-11-14 收到,2012-04-06 改回

国家自然科学基金(60901065,61001204)资助课题

*通信作者: 吴兆平 wzpzi@yahoo.cn

能量损失并大大降低了运算量, 还可在不增加运算量的情况下通过补偿目标回波的脉内多普勒频率来消除其对匹配滤波的影响。实验结果表明, 在理想情况下, 该算法能有效地将目标能量通过相参方式积累到一点, 接近理论积累效果。

2 RFT 算法的基本原理

2.1 一般的脉冲多普勒雷达信号处理流程

假设雷达发射信号为 $q(t)$, 暂不考虑脉内多普勒频率的影响, 则在一个相参积累间隔(CPI)内雷达接收的第 m 个回波基带信号为

$$s_r(t, t_m) = \sum_i A_i q[t - 2r_i(t_m)/c] \exp(-j4\pi f_c r_i(t_m)/c) \quad (1)$$

其中 $r_i(t_m) = v_i t_m + r_{i0}$, t 和 t_m 分别为快时间和慢时间, $t_m = mT$, T 为脉冲重复周期, f_c 为载波频率, c 为光速, A_i 为第 i 个点目标的回波幅度, $r_i(t_m)$ 和 r_{i0} 分别为 t_m 和 t_0 时刻目标 i 相对雷达的径向距离。通过傅里叶变换将式(1)中的变量 t 转换到频域为

$$S_r(f, t_m) = P(f) \sum_i A_i \exp(-j4\pi(f + f_c)(r_{i0} + v_i t_m)/c) \quad (2)$$

其中 $P(f)$ 表示 $q(t)$ 的傅里叶变换, $S_r(f, t_m)$ 是 $s_r(t, t_m)$ 的频域形式。为了便于了解, 本文采用小写 s 表示时域雷达回波信号, 采用大写 S 表示信号 s 的频域形式。式(2)乘以频域脉冲压缩系数 $P^*(f)$ 得

$$S'_r(f, t_m) = |P(f)|^2 \sum_i A_i \exp(-j4\pi f r_{i0}/c) \cdot \exp(-j4\pi f v_i t_m/c) \exp(-j4\pi f_c (r_{i0} + v_i t_m)) \quad (3)$$

将式(3)转换到时域为

$$s_{MP}(t, t_m) = \sum_i A_i \text{sinc}[t - 2r_i(t_m)/c] \cdot \exp[-j4\pi f_c (r_{i0} + v_i t_m)/c] \quad (4)$$

式(4)中的目标包络走动实际上是由式(3)中的指数项 $\exp(-j4\pi f v_i t_m/c)$ 引起。采用傅里叶变换在慢时间上对式(4)进行积累, 实现对目标能量的相参积累。

$$s_p(r, v) = \int s_{MP}(t, t_m) \exp(-j4\pi v t_m/\lambda) dt_m \quad (5)$$

式(2)–式(5)为传统的基于频域匹配滤波技术的动目标检测(MTD)过程。

2.2 RFT 算法的基本原理

式(4)中的目标包络走动如图 1 中的斜线所示, 该斜线由参数 (r_{i0}, v_i) 决定。利用目标匀速运动使得回波脉间具有固定的相位差 $\exp(-j4\pi v_i T/\lambda)$ 这个关系, 对位于该直线上的数据, 可通过傅里叶变换(FT)求取频点 $f_{di} = 2v_i/\lambda$ (速度 v_i) 的幅度进行能量积累^[7–10], 即

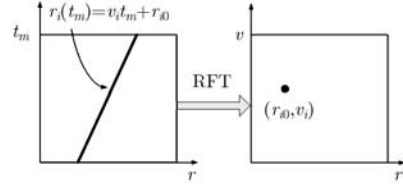


图 1 RFT 变换示意图

$$s_p(r_{i0}, v_i) = \int s_{MP} [2(v_i t_m + r_{i0})/c, t_m] \cdot \exp(-j4\pi v_i t_m/\lambda) dt_m \quad (6)$$

式(6)仅对参数为 (r_{i0}, v_i) 的直线进行积累, 实际处理中需要按照一定的步长对目标的所有可能参数进行搜索, 此时, 式(6)变为

$$s_p(r, v) = \int s_{MP} [2(v t_m + r)/c, t_m] \exp(-j4\pi v t_m/\lambda) dt_m \quad (7)$$

式(7)即为文献[9,10]中的 RFT 变换的一种表示形式。

3 RFT 算法的快速实现算法

若采用文献[7–10]中的时域移位或寻址运算方法来提取式(7)中的被积直线, 这会引入由量化误差带来的能量损失, 且运算量很大。为了解决这两个问题, 并消除脉内多普勒频率对脉冲压缩的影响, 这里采用频域方法来实现 RFT 变换并给出其快速算法。

3.1 RFT 算法的频域实现算法

传统的基于频域脉冲压缩和快速傅里叶变换(FFT)的 MTD 算法流程如图 2(a)所示。本节结合频域匹配滤波技术, 提出一种计算式(7)的方法及其快速算法, 该方法不采用差值运算也能显著的减小由量化误差引起的积累损失。

首先, 在频域乘以式(3)中引起距离走动的指数项的共轭 $\exp(j4\pi f v_i t_m/c)$, 将 $t - t_m$ 平面中斜率为 v 的直线校正为垂直于 t 轴的直线^[1], 然后通过 FT 变换求频点 $f_{di} = 2v_i/\lambda$ (速度 v_i) 的幅度进行相参积累, 该过程可表示为

$$s'_{MP}(t, t_m) = \int S'_r(f, t_m) \exp(j4\pi f v_i t_m/c) \exp(j2\pi f t) df \quad (8a)$$

$$s_p(r, v) = \int s'_{MP}(t, t_m) \exp(-j4\pi v t_m/\lambda) dt_m \quad (8b)$$

其中式(8a)补偿引起距离走动的相位并通过逆傅里叶变换(IFT)将频域数据转换到时域; 式(8b)采用 FT 变换对校正后的直线进行积累。结合式(3), 式(4)和式(8), 形成的处理流程过程如图 2(b)所示。

由于 FT 变换为线性变换, 可将式(8a)和式(8b)中的傅里叶变换调换次序, 形成如图 2(c)的处理流

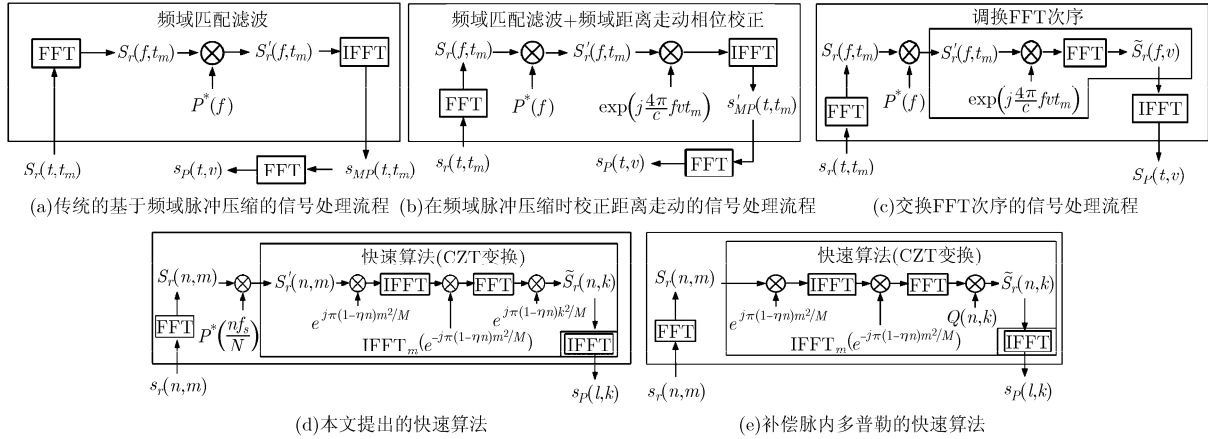


图2 不同积累方式下的信号处理流程图

程, 其表达式为

$$\tilde{S}_r(f, v) = \int S'_r(f, t_m) \exp(j4\pi f v t_m / c) \cdot \exp(-j4\pi v t_m / \lambda) dt_m \quad (9a)$$

$$s_p(t, v) = \int \tilde{S}_r(f, v) \exp(j2\pi f t) df \quad (9b)$$

其中式(9a)将频域脉压系数相乘、频域距离走动相位补偿和相参积累过程融合到一起; 式(9b)为通过IFT变换将频域信号转换到时域。

3.2 RFT算法的快速实现算法

式(9)的离散形式为

$$\tilde{S}_r(n, k) = \sum_{m=1}^M S'_r(n, m) \exp[-j2\pi(1 - \eta n)mk/M] \quad (10a)$$

$$s_p(l, k) = \sum_{n=1}^N \left\{ \tilde{S}_r(n, k) \exp(j2\pi nl/N) \right\} \quad (10b)$$

其中 $n = 1, 2, \dots, N$, $m = 1, 2, \dots, M$, $l = 1, 2, \dots, L$, $k = 1, 2, \dots, K$, 它们分别为变量 f , t_m , t 和 v (f_d) 的离散形式, $\eta = \lambda B / (Nc)$, B 为带宽, 一般设置 $N = L$, $K = M$, 保证 RFT 算法距离和速度分辨率和传统 MTD 方法的相同。

直接计算式(10a)的运算量很大, 仔细观察式(10a)发现, 其运算过程和线性调频 Z 变换(CZT)的形式相同。对于变量 m , $S'_r(n, m)$ 的 CZT 表达式为

$$\begin{aligned} \tilde{S}_r(n, k) &= \sum_{m=1}^M S'_r(n, m) \exp(-j2\pi amk/M) \\ &= e^{j\pi ak^2/M} \sum_{m=1}^M \left\{ S'_r(n, m) \exp(j\pi am^2/M) \right\} \\ &\quad \cdot \exp(-j\pi a(k-m)^2/M) \end{aligned} \quad (11)$$

其中 a 是一个系数。如果 $a = 1 - \eta n$, 则式(11)和式(10a)完全相同。这样, 式(10a)可以通过 CZT 变换实现。结合图 2(c), 本文提出方法快速算法如图 2(d)所示。其中, 图 2(d)中的 $s_r(n, m)$ 和 $s_p(l, k)$ 分别为

$s_r(t, t_m)$ 和 $s_p(t, v)$ 的离散形式。实际上, 图 2(d)中的频域脉压系数 $P^*(nf_s/N)$ 可以和 CZT 变换的乘法因子 $\exp(j\pi(1 - \eta n)m^2/M)$ 合并起来, 这样可以再减少 MN 次复乘运算。

3.3 补偿脉内多普勒效应的 RFT 算法及其快速算法

对于相位编码等多普勒较敏感的信号而言, 高速目标产生的脉内多普勒效应会导致目标回波脉冲压缩后的峰值展宽, 幅度下降, 甚至峰值的位置也会发生移位^[12]。当考虑目标的脉内多普勒频率时, 式(1)变为

$$\begin{aligned} s_r(t, t_m) &= \sum_i A_i q(t - 2r_i(t_m)/c) \\ &\quad \cdot \exp[-j4\pi f_c r_i(t_m)/c] \exp[-j4\pi f_c v_i t/c] \end{aligned} \quad (12)$$

其频域形式为

$$\begin{aligned} S_r(f, t_m) &= \sum_i A_i P(f - f_{di}) \exp[-j4\pi(f - f_{di})r_i(t_m)/c] \\ &\quad \cdot \exp[-j4\pi f_c r_i(t_m)/c] \end{aligned} \quad (13)$$

此时, 频域脉冲压缩的系数应该为 $P(f - f_{di})$ 的共轭转置, 即 $P^H(f - f_{di})$, 才能补偿掉脉内多普勒效应对脉冲压缩的影响。

若采用在频域改变脉冲压缩系数来校正脉内多普勒效应的影响, 则先要根据补偿速度 v 对应的脉冲压缩系数 $P^H(f - f_d)$ 对 M 个回波脉冲进行脉冲压缩来补偿脉内多普勒频率, 然后再进行相参积累, 这种方法的运算量大。根据 FFT 为线性变换这个特性, 可先采用 CZT 变换可将 M 个回波脉冲的能量按速度分别相参积累到对应的速度单元中, 然后根据每个速度单元 f_d 对应的脉冲压缩系数 $P^H(f - f_d)$ 对该单元的数据进行脉冲压缩, 相比于先脉冲压缩再积累的方法, 这种方法可将运算量降低 M 倍。另外, 将脉冲压缩移到 CZT 变换后, 实际上每个搜索速度对应的脉冲压缩系数 $P^H(f - f_d)$ 可以和图 2(d)中 CZT 变换的乘法因子 $\exp(j\pi(1 - \eta n)k^2/M)$ 融合到

一起, 形成一个乘法因子 $Q(n, k)$, 这相当于没有增加图 2(d) 的运算量就可完成对目标多普勒效应的补偿。其信号处理流程图如图 2(e) 所示, 其中 $Q(n, k)$ 的表达式如式 (15) 所示。

4 多普勒频率欠采样时的 RFT 算法

对高速目标而言, 雷达重复频率对目标多普勒频率的采样一般为欠采样, 即

$$f_d = k_d f_r + \tilde{f}_d, \quad |\tilde{f}_d| \leq f_r/2 \quad (14)$$

其中 f_r 为雷达的重复频率, k_d 为整数, 表示目标多普勒频率的模糊数。此时, 采用一次 CZT 变换计算式 (10a) 的速度搜索范围大小为 $\lambda f_r/2$ 。若目标的最大速度 $v_{\max} = \lambda(K_{\max} f_r + \tilde{f}_d)/2$, K_{\max} 为目标最大速度的多普勒频率模糊数, 则需要对式 (10a) 进行 $2K_{\max} + 1$ 次计算。在对式 (10a) 进行第 i 次计算时, $i = -K_{\max}, \dots, -1, 0, 1, \dots, K_{\max}$, 需要先对 $S'_r(n, m)$ 乘以补偿因子 $\exp(j2\pi inm\lambda B/(Nc))$ 来补偿由模糊数等于 i 时由多普勒频率引起的距离走动。

对于图 2(e) 的处理流程而言, 在第 i 次计算时, 采用 CZT 变换积累后的 K 个速度单元中第 k 个速度对应的脉冲压缩系数的离散形式为 $P^H \{nf_s/N - [i \cdot f_r + (k - K/2)f_r/K]\}$, 则图 2(e) 中 $Q(n, k)$ 的表达式为

$$Q(n, k) = \exp\left(j\pi(1 - \eta n)k^2/M\right) P^H \cdot \left\{nf_s/N - \left[i \cdot f_r + \left(k - K/2\right)f_r/K\right]\right\} \quad (15)$$

在 $2K_{\max} + 1$ 次补偿中, 当补偿模糊数等于目标的多普勒模糊数时, 目标的积累结果最大, 因此, 需要对 $2K_{\max} + 1$ 次积累结果中进行选大处理^[9]。

5 所提算法的运算量分析

本节对文献[9,10]中的 RFT 算法、本文所提的频域 RFT 算法及其快速算法的运算量进行分析和比较。

设目标的速度范围为 $[-K_{\max}(\lambda f_r/2), K_{\max}(\lambda f_r/2)]$, 若文献[9,10]中的地址索引方法的速度分辨率和本文方法的相同, 都为 $\lambda f_r/(2M)$, 则其需要 $(2K_{\max} + 1)M$ 次搜索, 一次速度补偿的复乘次数为 NM , 因此, 原始的 RFT 算法的复乘次数为 $(2K_{\max} + 1) \cdot NM^2$;

如第 2.2 节和第 3 节所述, 需对式 (10a) 进行 $2K_{\max} + 1$ 次运算才能完成对整个速度范围的处理, 式 (10a) 的一次运算的复乘次数为 NM^2 , 则通过直接计算式 (10a) 来实现 RFT 运算需要的复乘次数为 $(2K_{\max} + 1)NM^2$;

如图 2(d) 所示, 采用 CZT 算法计算式 (10a) 所需 2 次 FFT 运算和 3 次矩阵相乘运算, 其中, 一次

FFT 运算和矩阵相乘分别需要 $NM \log_2(M)/2$ 和 NM 次复乘, 因此, 通过 CZT 算法计算式 (10a) 需要的复乘次数为 $(2K_{\max} + 1)[3 + \log_2(M)]NM$ 。

综上, 前两者的运算量相同, 本文快速算法的运算量和它们的比值为 $H = [3 + \log_2(M)]/M$, 令 $K_{\max} = 8$, $N = 1024$, 图 3(a) 和 3(b) 分别给出了三者的运算量和比值 H 随速度搜索次数的变化曲线, 这里的速度搜索次数为 $(2K_{\max} + 1)M$ 。通过图 3 可见, 相比原始算法的运算量, 所提快速算法的运算量明显减小。

6 实验和分析

本节采用 M 序列码信号对所提算法进行检验, 通过 2000 次蒙特卡洛(MC)实验给出该算法检测性能曲线图。

目标和雷达参数: 雷达波长 $\gamma = 0.3$ m, 信号带宽 $B = 4$ MHz, 时宽 $127 \mu\text{s}$, 采样率 $f_s = 4$ MHz, 重频 PRF = 1 kHz, 积累脉冲数 $M = 512$ 。3 个目标的径向速度分别为 $v_1 = 700$ m/s, $v_2 = 750$ m/s 和 $v_3 = 800$ m/s。

由以上参数可知, 3 个目标的多普勒频率对应的模糊数均为 4。

实验 1 雷达发射信号为 M 序列码, 码元个数为 511, 实验结果如图 4 所示。其中, 图 4(a) 画出了目标的距离单元走动情况, 目标 1, 目标 2 和目标 3 分别走动 9.6, 10.2 和 10.9 个距离单元; 图 4(b) 为直接采用 MTD 方法的积累结果, 明显可见目标包络的距离走动使得目标能量扩散在多个距离单元中; 图 4(c) 和图 4(d) 分别为校正多普勒模糊数正好等于目标实际模糊数时, 未补偿和补偿脉内多普勒频率的 RFT 算法的积累结果, 可见 RFT 算法能将走动的目标包络相参地积累到以其速度和距离为参数的一个点上。通过比较两图中目标的幅度可知, 未补偿脉内多普勒频率的目标峰值相比补偿脉内多普勒频率后的积累峰值有所下降, 下降约 6 dB 左右, 这是由脉内多普勒效应引起的脉冲压缩损失引起的, 严重影响目标能量的积累效果, 因此, 在采用相位编码信号时, 目标速度较高时必须补偿 M 序列码的脉内多普勒频率。图 4(e) 为对 $(2K_{\max} + 1)$ 次并行积累结果中的相同距离和速度单元进行选大后的结果, 其结果中的最大值和图 4(c) 中的目标最大值相同, 这表明选大处理能将 $(2K_{\max} + 1)$ 次积累中的最优结果选择出来。图 4(e) 中的目标峰值周围存在一些旁瓣, 这是由补偿多普勒模糊数不等于实际目标的多普勒模糊数引起的。在工程应用中, 可采用聚心、左右平均选大恒虚警检测等方法来减小其

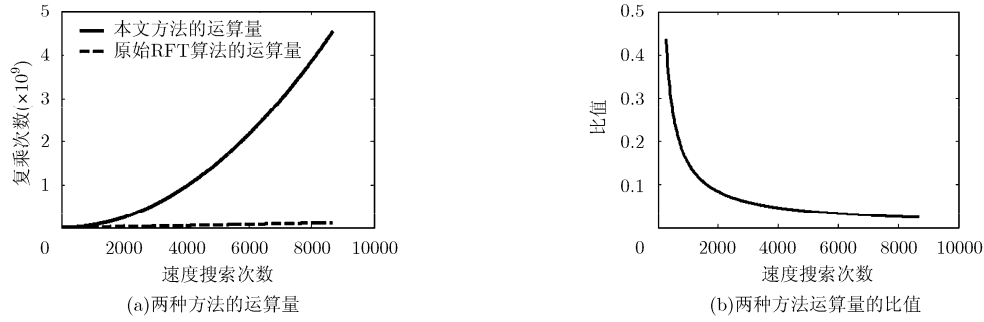


图 3 运算量随搜索次数的变换曲线图

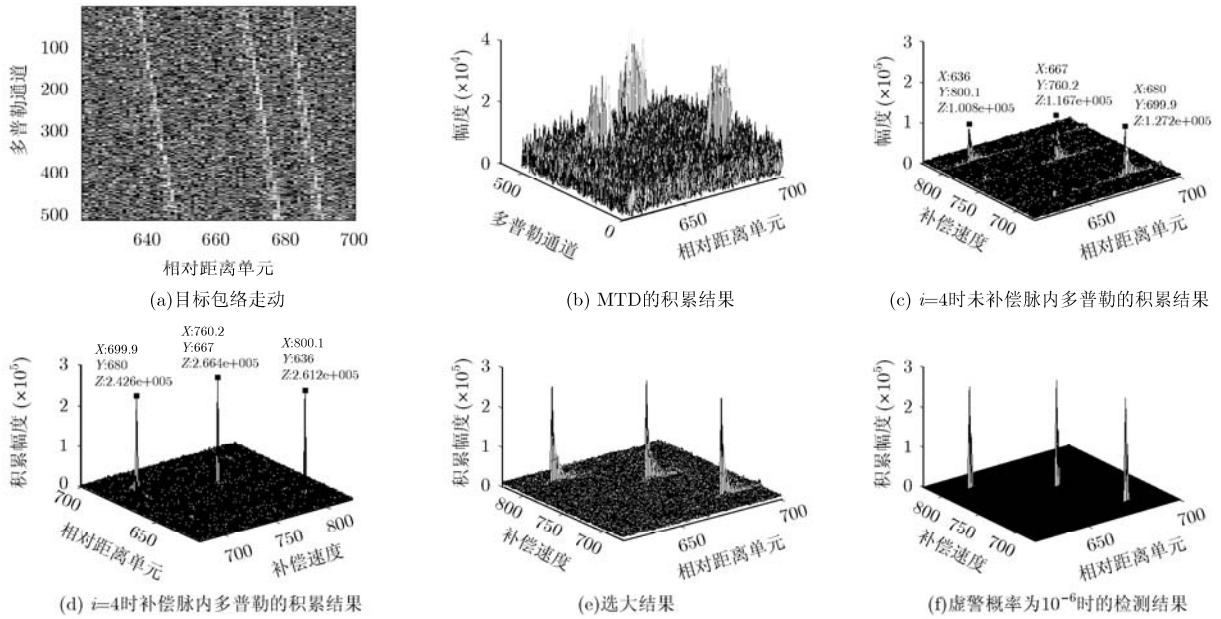


图 4 线性调频信号的快速 RFT 实验结果

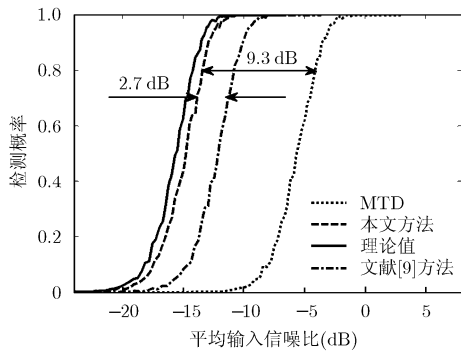


图 5 虚警概率为 10^{-6} 时目标 2 的检测概率图

对检测结果的影响。图 4(f)为采用左右平均选大恒虚警检测器的检测结果，可见，恒虚警处理可有效降低目标峰值周围旁瓣引起的虚警。

实验 2 图 5 以传统 MTD 积累的结果为参考，根据 2000 次 MC 实验结果画出了采用本文方法和文献[9]方法对目标 2 的检测性能曲线，其中，文献[9]的方法先采用寻址的方法将由参数决定的直线提取

出来，然后采用离散傅里叶变换进行相参积累，在此过程中并没有寻址后的数据进行插值，该处理会带来由量化误差引起的能量损失。在设置的仿真条件下，相比于本文方法其能量积累的损失约为 2.7 dB。

设目标包络走动距离单元数为 D ，对于不做距离走动补偿的 MTD 积累结果而言，目标能量会扩散在 D 个距离单元中。假设 D 个距离单元中单个距离单元中目标积累后的幅度为 a ，则在距离走动被完全补偿的理想情况下，相参积累后的目标幅度为 Da 。因此，理想情况下(距离走动正好被完全补偿)的 RFT 积累相比传统的 MTD 算法可将目标信噪比提高 $G_{\text{snr}} = 10 \times \lg(D)$ dB。在设置的仿真参数下，目标 2 的距离走动点数为 10.2，此时， $G_{\text{snr}} = 10.08$ dB。从图 5 可知，本文方法相比于传统 MTD 方法将目标的最小可检测信噪比提高了约 9.3 dB，很接近理论值，这说明在目标径向匀速运动时，本文算法的积累性能几乎达到理论最优值。

7 结束语

本文提出了一种 RFT 算法的快速实现方法, 该方法不但初步解决了原始方法中由量化误差引起的能量损失和算法运算量较大这两个问题, 而且在不断增加运算量的条件下消除了脉内多普勒效应对匹配滤波的影响, 大大提高了目标的信噪比。仿真实验证实了算法的有效性。

参考文献

- [1] 张顺生, 曾涛. 基于 keystone 变换的微弱目标检测[J]. 电子学报, 2005, 33(6): 1675-1678.
Zhang Shun-sheng and Zeng Tao. Weak target detection based on keystone transform[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2005, 33(6): 1675-1678.
- [2] 吴兆平, 何学辉, 苏涛. 带有距离走动和多普勒扩散的高速运动目标检测[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2010, 31(4): 476-480.
Wu Zhao-ping, He Xue-hui, and Su Tao. Detecting multiple high speed targets using range migration and Doppler spread[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2010, 31(4): 476-480.
- [3] 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.
- [4] Mo L, Wu S L, and Li H. Radar detection of range migrated weak target through long-term integration[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2003, 12(4): 539-544.
- [5] Moyer L R, Spak J, and Lamanna P. A multi-dimensional Hough transform-based track-before-detect technique for detecting weak targets in strong clutter backgrounds[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2011, 47(4): 3062-3068.
- [6] 苏军海, 李亚超, 邢孟道, 等. 采用 Radon 模糊变换的宽带雷达多目标检测方法[J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(4): 85-89.
Su Jun-hai, Li Ya-chao, Xing Meng-dao, et al. A wideband radar detection method for multi-target using radon ambiguity transform[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2009, 43(4): 85-89.
- [7] 曾建奎, 何子述, 刘红明. 一种基于改进 Hough 变换的雷达检测方法[J]. 电波科学学报, 2008, 23(5): 838-840, 904.
Zeng Jian-kui, He Zi-shu, and Liu Hong-ming. Improved detection algorithm for radar based on Hough transform[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2008, 23(5): 838-840, 904.
- [8] Zeng Jian-kui, He Zi-shu, Sellathurai M, et al. Modified Hough transform for searching radar detection[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2008, 5(4): 683-686.
- [9] 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): 1183-1202.
- [10] Xu J, Yu J, Peng Y, 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.
- [11] Li J, Liu H, and He Z. A practical method for range migration compensation in Chirp radar[J]. *Progress In Electromagnetics Research M*, 2009, 7(2): 15-28.
- [12] 胡英辉, 郑远, 耿旭朴, 等. 相位编码信号的多普勒补偿[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(11): 2596-2599.
Hu Ying-hui, Zheng Yuan, Geng Xu-pu, et al. Doppler Compensation for phase-coded signals[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(11): 2596-2599.

吴兆平: 男, 1984 年生, 博士生, 研究方向为雷达信号长时间积累、高速实时信号处理、雷达目标检测与跟踪。

符渭波: 男, 1981 年生, 博士生, 研究方向为阵列信号处理、MIMO 雷达 DOA 估计。

苏涛: 男, 1968 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达领域的高速实时信号处理、雷达系统技术。

郑纪彬: 男, 1986 年生, 博士生, 研究方向为高速信号处理及宽带雷达目标检测。