

基于 Keystone 变换的警戒雷达信号处理

张卫杰, 高昭昭, 许 博, 高尚伟

(电子信息控制重点实验室, 四川 成都 610036)

摘要: 增加积累时间是提高检测微弱目标能力的一种重要手段。为了实现警戒雷达对高速运动微弱目标的探测, 提出了一种新的雷达信号处理方法。利用 Keystone 变换补偿长时间积累和目标高速运动导致的跨距离单元走动, 使目标能量得到有效积累, 并通过数据融合解多普勒模糊, 实现对目标的有效检测和参数估计。该方法可以用于对不同距离和速度的多个目标长时间相参积累和检测, 同时, 随着脉冲积累个数的增加, 提高了测速精度。多目标仿真的结果验证了该方法的有效性。

关键词: 警戒雷达; Keystone 变换; 微弱目标探测; 距离走动

中图分类号: TN 95

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2011.09.17

Novel signal processing method for surveillance radar based on Keystone transform

ZHANG Wei-jie, GAO Zhao-zhao, XU Bo, GAO Shang-wei

(Science and Technology on Electronic Information Control Laboratory, Chengdu 610036, China)

Abstract: The improvement of the capability to detect dim targets is commonly realized by long-term accumulation. In order to detect those high speed targets, a novel radar signal processing method based on Keystone transform for surveillance radar is presented, which is able to compensate the range migration effect caused by long dwell time and high speed motion of targets. The target energy is accumulated effectively, and Doppler ambiguity is solved by data fusion. Finally, the target detection and parameter estimation are implemented. The proposed method can be used to detect multiple dim targets with different ranges and velocities by long-term coherent accumulation. Meanwhile, the speed measurement resolution is improved significantly with the number of pulses increased. Multi-target simulation results illustrate the effectivity of the proposed method.

Keywords: surveillance radar; Keystone transform; dim target detection; range migration

0 引言

随着隐身技术的日趋成熟, 飞机、导弹等目标的雷达散射截面(radar cross section, RCS)减小了一到两个数量级, 使现有远程警戒系统的探测能力急剧下降。为了提高对远程微弱目标的检测能力, 雷达系统通常采用增加积累时间作为一种重要手段。但是, 随着积累时间增加和目标的高速运动, 目标回波出现了跨距离单元走动现象。如果在相参积累时间内, 目标的距离走动超过半个距离单元, 目标能量就不能得到有效积累。为此, 研究者提出了多种跨距离补偿方法。文献[1-2]根据图像处理方法提出了基于 Hough 变换的长时间积累检测方法, 该方法利用目标回波在距离-时间-空间呈一条直线的特性, 通过 Hough 变换沿直线实现积累, 但该方法无法利用回波相位关系实现相参积累。文献[3-7]将 Keystone 变换引入机载雷达和弹载

雷达的目标检测领域, 文献[8-10]将 Keystone 变换用于弹道导弹探测, 均通过补偿目标的跨距离单元走动, 实现了长时间相参积累。

本文将 Keystone 变换引入警戒雷达信号处理, 提出了新的处理流程, 利用 Keystone 变换校正目标距离徙动, 并进行相参积累, 达到提高信噪比的目的; 然后采用数据融合和恒虚警检测, 实现对多个不同距离和速度的微弱目标的探测, 同时, 随着脉冲积累个数的增加, 提高了测速精度; 最后通过仿真验证了方法的可行性。

1 Keystone 变换原理

Keystone 变换已成功应用于合成孔径雷达和逆合成孔径雷达运动目标检测与成像^[11-17], 可以在保持回波相位的同时, 补偿目标的跨距离单元走动, 从而为匹配滤波后的多普勒处理奠定了基础, 其基本原理如下^[11]。

收稿日期: 2010-08-23; 修回日期: 2011-04-26。

基金项目: 国家重点实验室基金(9140C1004070904)资助课题

作者简介: 张卫杰(1971-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为雷达信号处理、电子信息截获与控制。E-mail: arrow_zh@163.com

假设雷达发射一组线性调频脉冲信号为

$$s_r(t) = p(t - nT_1) \exp\{-j2\pi f_c(t - nT_1)\}$$

式中, $p(t) = \exp(-j\pi b t^2) \text{rect}(t/T_p)$, t 为时间, b 为调频斜率, T_p 为脉宽; n 为整数; T_1 为脉冲重复间隔; f_c 为载频。

如果在脉冲宽度时间内, 目标 RCS 没有明显变化, 且目标运动距离没有超过一个距离分辨单元, 则脉冲串被距离为 $R(t)$ 的运动目标反射, 得到一个二维数据 $s(\tau, t_n)$, 其中, $\tau = t - nT_1$, 称为快时间, $t_n = nT_1$, 称为慢时间。经过雷达接收和下变频得到

$$s(\tau, t_n) = Ap \left[\tau - \frac{2R(t_n)}{c} \right] \exp \left[j \frac{4\pi f_c}{c} R(t_n) \right] \quad (1)$$

式中, c 为光速; A 为回波信号幅度。

对式(1)沿着快时间维作傅里叶变换, 得

$$S(f, t_n) = AP(f) \exp \left[j \frac{4\pi}{c} (f + f_c) R(t_n) \right] \quad (2)$$

式中, $P(f)$ 是 $p(\tau)$ 的傅里叶变换。假设目标在照射期间强度没有变化, 且可看作是距离 $R(t_n)$ 的 Q 个运动散射点的组合, 则式(2)简化为

$$S(f, t_n) = P(f) \sum_{q=1}^Q A_q \exp \left[j \frac{4\pi}{c} (f + f_c) R_q(t_n) \right] \quad (3)$$

对 $R_q(t_n)$ 在 $t_n=0$ 作 Taylor 级数展开为

$$R_q(t_n) = r_q + \dot{r}_q t_n + \frac{\ddot{r}_q}{2} t_n^2 + \dots$$

式中, $r_q = R_q(0)$; $\dot{r}_q = \dot{R}_q(0)$ 。

于是有

$$S(f, t_n) = P(f) \sum_{q=1}^Q A_q \cdot \exp \left\{ j \frac{4\pi}{c} (f + f_c) [r_q + \dot{r}_q t_n + \Phi_q(t_n)] \right\} \quad (4)$$

式中, $\Phi_q(t_n)$ 包含了 $R_q(t_n)$ 的 Taylor 级数展开引入的二次项和高阶项。其中, 相位项 $\exp \left\{ j \frac{4\pi \dot{r}_q t_n}{c} (f + f_c) \right\}$ 反映了目标运动产生线性距离徙动时, 距离和多普勒频率之间的相互耦合。

通常情况下, 在高分辨率雷达或者对高速运动目标探测中, 必须对该相位项进行补偿。然而, 针对微弱运动目标信号检测时, 虽然目标运动产生的距离徙动量 R_Δ 满足 $\pi BR_\Delta / C \ll 1$ 的条件, 但是为了完全获得处理增益, 也需要对距离徙动进行补偿。

作如下变量代换:

$$t_n = mf_c / (f + f_c) \quad (5)$$

在新的 (f, m) 域, 式(4)变为

$$S(f, m) = P(f) \sum_{q=1}^Q A_q \exp \left\{ j \frac{4\pi}{c} \left[(f + f_c) r_q + \dot{r}_q f_c m + (f + f_c) \Phi_q \left(\frac{f_c m}{f + f_c} \right) \right] \right\} \quad (6)$$

假设 Φ_q 只包含二次项, 定义 Δ_q 为二次相位估计值与真值之间的差异, 当 $\Delta_q T^2 < 2C/f_c$, 且 $BT_0 \gg 1$ 时, 可以忽略高

阶相位项的影响, 从而消除了线性距离徙动引起的距离和多普勒频率之间的耦合。经过脉压和相参积累, 得到输出结果为

$$S(\rho, f_d) = BT_p \sum_{q=1}^Q \left\{ A'_q \text{sinc} \left[\frac{2\pi B}{c} (\rho - r_q) \right] \cdot \text{sinc} \left[\pi T_p \left(f_d - \frac{2\dot{r}_q f_c}{c} \right) \right] \right\} \quad (7)$$

2 基于 Keystone 变换的警戒雷达处理方法

2.1 基于 Keystone 变换的目标检测方法

设警戒雷达系统发射的一组线性调频信号由 N 个 Chirp 子脉冲组成, 其中第 $n(n=0, 1, \dots, N-1)$ 个子脉冲可写为

$$\mu_n(\hat{t}) = p(\hat{t}) e^{j2\pi f_c \hat{t}} \quad (8)$$

式中, $p(\hat{t}) = A \text{rect}(\hat{t}/T_p) e^{j\pi b \hat{t}^2}$ 为 Chirp 子脉冲, $\hat{t} = t - t_n$, $t_n = nT_r$ 为第 n 个子脉冲的发射时间, T_r 为脉冲重复周期。

假设距离接收站 R_0 处, 有一径向运动速度为 v 的点目标, 则雷达接收到目标回波, 经天线接收和下变频, 可以表示为

$$s(t) = A \left(t - nT_r - \frac{2R(t)}{c} \right) p \left(t - nT_r - \frac{2R(t)}{c} \right) \cdot \exp \left\{ -j4\pi f_c \frac{R(t)}{c} \right\} + w(t) \quad (9)$$

式中, $R = R_0 + vt$; f_c 是载频; $w(t)$ 为复白噪声信号; $A(t)$ 为与目标 RCS 对应的信号幅度。

为简化分析, 假设在观测时间内, 目标 RCS 变化不大, 式(9)表示成一个二维数据为

$$s(\tau, n) = w(\tau, n) + A \exp \left(-j4\pi \frac{f_c R_0}{c} \right) \cdot \sum_{n=0}^{N-1} \left\{ g \left[\tau - \frac{2}{c} (R_0 + vnT_r) \right] u_n \left[\tau - \frac{2}{c} (R_0 + vnT_r) \right] \cdot \exp \left[-j \frac{2\pi}{c} f_d n T_r \right] \right\} \quad (10)$$

式中, $g(t)$ 为矩形窗函数, 代表采样距离波门。

对 τ 作傅里叶变换, 得到

$$S(f, n) = P(f, n) \exp \{-j4\pi(f + f_c)(R_0 + vnT_r)\} + W(f, n) \quad (11)$$

作 Keystone 变换, 根据式(5)对 n 进行尺度变换, 得到

$$S(f, m) = P \left(f, \frac{mf_c}{f + f_c} \right) \exp \{-j4\pi(f + f_c)R_0\} \cdot \exp \left\{ -j2\pi f_d \frac{f_c}{f + f_c} m T_r \right\} + W \left(f, \frac{mf_c}{f + f_c} \right) \quad (12)$$

由于 n 是离散变量, 需要采用 sinc 插值实现 Keystone 变换。通常情况下, 考虑目标径向速度可能很高, 存在多普勒模糊, 需要在匹配滤波之前求解多普勒模糊, 定义多普勒模糊数 k 为

$$f_u = k \cdot f_r + f_d, \quad f_d \in [-f_{\text{PRF}}/2, f_{\text{PRF}}/2]$$

式中, f_u 为解模糊后的多普勒频率; 在远程警戒雷达中, $f_r = 1/T_r$ 。

此时,Keystone 变换公式可以写为

$$S_k(f, m) = \exp\left(-j2\pi k f_r \frac{f_c}{f_c + f} m T_r\right) \cdot \sum_l S(f, l) \cdot \text{sinc}\left[m \frac{f_c}{f_c + f} - l\right] \quad (13)$$

式中, l 为插值运算取值范围,通常采用 8 点插值。

采用参考信号构建匹配滤波函数 $P^*(f, m)$,对插值数据进行匹配滤波和相参积累,得到

$$Y_k(r, f_d) = \text{FFT}\{\text{IFFT}\{S_k(f, m)P^*(f, m)\}\}$$

Keystone 变换在信号处理流程中的位置,可以根据发射信号形式进行调整。对于多普勒容限大的信号,Keystone 变换可以放在匹配滤波之后,减少运算量,提高运算速度;对于相位调制等多普勒容限小的信号,需要先对采样数据作 Keystone 变换,减少脉压损失。

2.2 基于 Keystone 变换的数据融合与检测

采用 Keystone 变换对数据预处理后,根据速度模糊数得到 $2k+1$ 个距离-多普勒相参积累结果,为了检测出不同速度的多个目标,需要对所有相参积累结果进行数据融合,为此提出两种不同的融合准则。

单元求和准则是将不同速度模糊参数得到的距离-多普勒相参积累结果互相叠加,可以表示为

$$Y_{\max}(r, f_d) = \sum_{i=-k}^k Y_i(r, f_d) \quad (14)$$

由于噪声的相关性要远低于目标的相关性,因此可以达到最大的信噪比,然而根据文献[18]对该准则的研究,指出单元求和方法是由广义似然比检测导出,在局部信噪比差异较大时,该准则检测性能比较差,且相加后的物理意义不太明确。

单元选大准则是在不同速度模糊参数得到的距离-多普勒相参积累结果中选取最大数值作为目标抽取的结果,可以表示为

$$Y_{\max}(r, f_d) = \max_{i=-k}^k \{Y_i(r, f_d)\} \quad (15)$$

单元选大准则可以使采样幅度损失降到最低,同时对噪声或杂波也进行了选大操作。由于远程警戒雷达采用低频段对空探测,噪声和杂波能量相对较弱,因此,采用单元选大原则是相参积累结果融合的一个有效方法。

完成数据融合后,采用单元平均恒虚警,根据虚警概率和检测概率计算门限 T_h ,得到检测结果,即

$$\Gamma = \begin{cases} 1, & Y_{\max}(r, f_d) > T_h \\ 0, & Y_{\max}(r, f_d) \leq T_h \end{cases} \quad (16)$$

在实际数据处理中,由于目标能量扩展,对于同一个目标可能产生多个检测结果,需要设置一个距离-多普勒窗再

次融合,得到最终结果输出。

2.3 基于 Keystone 变换的信号处理流程

综上所述,基于 Keystone 变换,远程警戒雷达新的信号处理流程归纳如下:

步骤 1 雷达系统发射信号并接收目标回波;

步骤 2 沿着距离向对快时间维进行傅里叶变换,将回波信号变换至快时间频域,即

$$S(f, n) = \text{FFT}\{s(t, n)\}$$

步骤 3 根据式(5)对信号 $S(f, n)$ 进行尺度变换,并利用式(13)在离散情况下进行 sinc 插值,完成 Keystone 变换;

步骤 4 由于目标速度 v 为未知参数,故对应的多普勒模糊数 k 未知。因此,需要对所有可能的速度模糊数 $i = -k, -k+1, \dots, k-1, k$ 进行匹配滤波和相参处理,得到 $2k+1$ 帧距离-多普勒域相参积累结果。通常远程警戒雷达的带宽有限,载频较低,多普勒模糊数 k 取值范围有限,满足实时处理的要求;

步骤 5 根据单元选大准则对 $2k+1$ 帧距离-多普勒域相参积累结果进行数据融合;

步骤 6 采用单元平均恒虚警计算判决门限 T_h ,对数据融合结果进行检测判决;

步骤 7 以最大幅度检测单元为中心,设置固定距离-多普勒窗再次融合,得到最终检测结果。

3 仿真结果

在本节中,通过多目标仿真说明本文所述基于 Keystone 变换的信号处理流程的性能。

警戒雷达参数设置:载频为 100 MHz,发射信号带宽为 5 MHz,占空比为 20%,采样频率为 10 MHz,重复频率为 1 000 Hz,回波信号积累 1 024 个脉冲,虚警概率为 $P_{fa} = 10^{-6}$,检测门限系数为 4,融合距离-多普勒窗为 8×8 。

目标仿真参数设置:仿真噪声方差为 1,均值为 0,3 个目标的信噪比均为 -20 dB,向雷达匀速飞行,起始距离分别为 83 000 m、83 000 m、82 000 m。目标 2 径向速度 v_2 保持 300 m/s,模拟高亚音速目标;目标 1 和目标 3 的径向速度 v_1 、 v_3 相等,分别设为 200 m/s、600 m/s、1 000 m/s 和 2 000 m/s,模拟低速飞行小目标,超音速小目标,高速目标和超高速目标。

经过 50 次循环仿真,估计目标位置中心和速度的平均值如表 1 所示。由表 1 可知,本文方法的测距误差、测速误差的均值和方差很小,测距和测速精度满足警戒系统要求。

表 1 目标参数设置和估计结果

		目标 1	目标 2	目标 3						
理论值	距离中心/m	82 898	82 693	82 488	81 976	82 846	81 898	81 693	81 488	80 976
	速度/(m/s)	200	600	1 000	2 000	300	200	600	1 000	2 000
本文方法 估计值	测距/m	82 910	82 710	82 505	81 995	82 865	81 920	81 710	81 500	80 990
	测速/(m/s)	202.1	602.1	1 002.0	2 001.0	301.8	202.1	602.1	1 002.0	2 001.0

图 1~图 4 是目标 1 和目标 3 径向速度分别为 200 m/s、600 m/s、1 000 m/s 和 2 000 m/s 时的相参处理结果。可以看出,采用常规方法,在低速情况下,只能勉强探测到目标;在高速情况下,目标 1 和目标 3 由于存在较大的距离走动,不能进行有效的相参积累,无法准确探测。而采用本文处理方法在同等条件下均可检测出 3 个目标,得到准确参数。

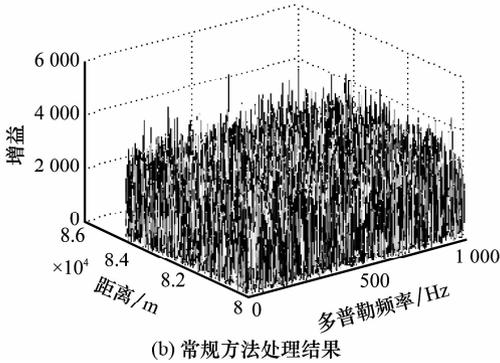
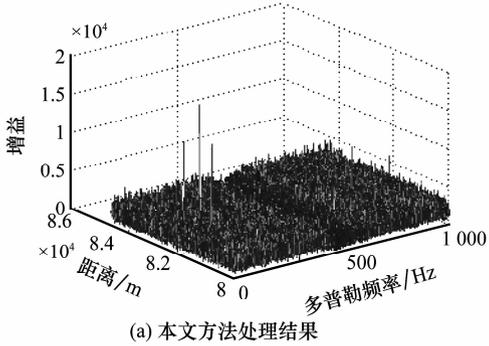


图 1 多目标相参积累结果 ($v_1=v_3=200$ m/s, $v_2=300$ m/s)

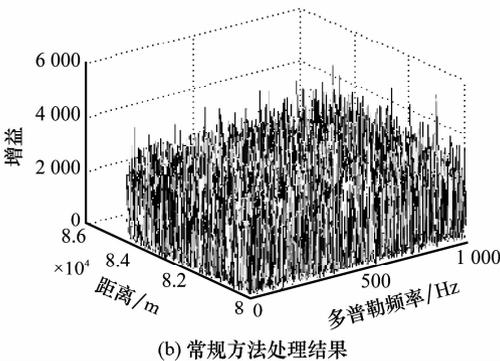
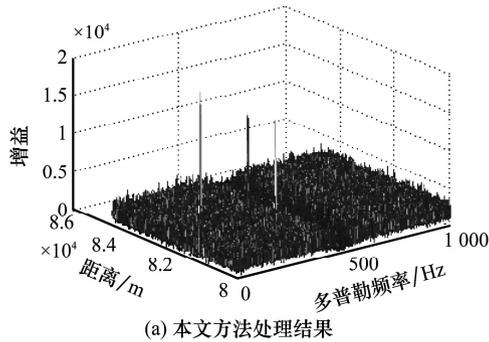


图 2 多目标相参积累结果 ($v_1=v_3=600$ m/s, $v_2=300$ m/s)

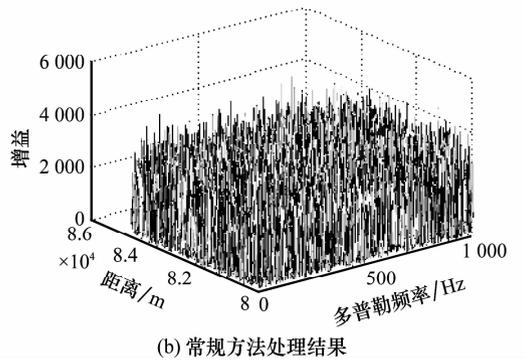
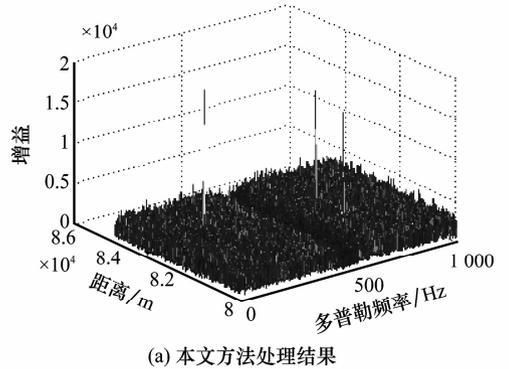


图 3 多目标相参积累结果 ($v_1=v_3=1000$ m/s, $v_2=300$ m/s)

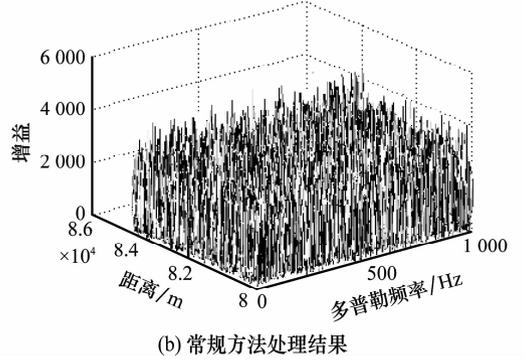
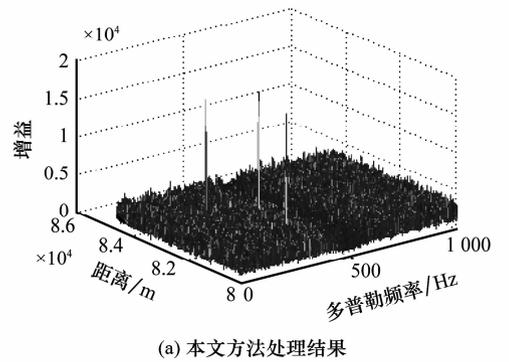


图 4 多目标相参积累结果 ($v_1=v_3=2000$ m/s, $v_2=300$ m/s)

4 结 论

常规警戒雷达对目标回波进行脉冲压缩和相参积累,存在积累时间有限,对高速运动、低 RCS 目标探测能力不

足的问题。本文方法将Keystone变换与现有警戒雷达信号处理技术相结合,提出了警戒雷达新的信号处理流程,可以补偿目标距离走动,实现对目标的长时间相参积累,有效提高警戒雷达对远程高速、微弱目标的探测能力。同时,由于积累脉冲数量增加,使系统的多普勒分辨率大大提高,系统测速精度随之提高。多目标仿真结果验证了本文所述处理流程的可行性和性能优越性。

参考文献:

- [1] Carlson B, Evans E, Wilson S. Search radar detection and track with the hough transform: system concept[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1994, 30(1): 102 - 108.
- [2] Mo L, Wu S L, Li H. Radar detection of range migrated weak target through long-term integration[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2003, 12(4): 539 - 544.
- [3] Buzzi S, Lops M, Venturino L. Track-before-detect procedures for early detection of moving target from airborne radars[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2005, 41(3): 937 - 954.
- [4] Li Y, Long T. A long-term coherent integration method of phase-coded pulse train[C]// *Proc. of the 9th International Conference on Signal Processing*, 2008: 2334 - 2337.
- [5] Zhang S S, Zhang W. Multiple targets' detection at the low SNR level based on Keystone transform[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2008, 37(supplement): 23 - 26.
- [6] Yuan H J, Gao M G, Wang S. Long-term integration algorithm using the HPRF stepped frequency waveform[C]// *Proc. of the 9th International Conference on Signal Processing*, 2008: 2310 - 2313.
- [7] Lou Y, Liu G M, Gao M G, et al. Long-term integration algorithm and system design using the stepped-frequency signal[C]// *Proc. of the International Conference on Information Engineering and Computer Science*, 2009: 1 - 4.
- [8] Sun Z Q, Yu Z, Li B Z. Research on application of Keystone transform in radar[C]// *Proc. of the 2nd International Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar*, 2009: 334 - 338.
- [9] Wang X H, Zhang X Y, Huang Z Q. Research on detection algorithm of high-speed and low-observable targets[C]// *Proc. of the IET International Radar Conference*, 2009: 1 - 4.
- [10] Su J, Xing M D, Wang G, et al. High-speed multi-target detection with narrowband radar[J]. *IET Radar, Sonar, and Navigation*, 2010, 4(4): 595 - 603.
- [11] Perry R P, DiPietro R C, Fante R L. Coherent integration with range migration using Keystone formatting[C]// *Proc. of the IEEE Radar Conference*, 2007: 863 - 868.
- [12] Zhu D Y, Li Y, Zhu Z D. A Keystone transform without interpolation for SAR ground moving-target imaging [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2007, 3(1): 18 - 22.
- [13] Li G, Xia X G, Peng Y N. Doppler Keystone transform: an approach suitable for parallel implementation of SAR moving target imaging[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2008, 5(4): 573 - 577.
- [14] Wang S Y, Su Z G, Wu R B. Modified range-Doppler imaging method for the high squint SAR[C]// *Proc. of the IEEE Radar Conference*, 2010: 1450 - 1453.
- [15] 曹宇飞, 屈晓光, 黄培康. 基于Keystone变换的宽带雷达精确测速[J]. *系统工程与电子技术*, 2009, 31(1): 1 - 4. (Cao Y F, Qu X G, Huang P K. Accurate velocity measurement method for wideband radar based on Keystone transform[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2009, 31(1): 1 - 4.)
- [16] Zhang L, He X H. Approach for airborne radar ISAR imaging of ship target based on generalized Keystone transform[C]// *Proc. of the 10th IEEE International Conference on Signal Processing*, 2010: 2137 - 2141.
- [17] Lü X L, Xing M D, Wan C R, et al. ISAR Imaging of maneuvering targets based on the range centroid Doppler technique[J]. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2010, 19(1): 141 - 153.
- [18] Guan J, Peng Y N, He Y, et al. Three types of distributed CFAR detection based on local test statistic[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2002, 38(1): 278 - 288.