

雷达系统高机动目标检测的能量积累方法研究^①

李 淦^② 黄普明 林晨晨

(西安空间无线电技术研究所 西安 710100)

摘要 研究了雷达系统检测和跟踪微弱目标的能量积累方法的性能,高速、变加速的机动性较强的目标在积累时间内不仅会出现距离徙动和多普勒模糊,不同时间段能量聚焦点还会发生偏移,因而传统的 Keystone 变换或者一般的频域补偿方法已不适合高机动目标能量的积累的问题,提出了一种结合先验信息进行实时补偿的频域滤波方法。该方法一方面利用不同参数构成的频域补偿函数消除距离徙动和多普勒模糊,参数的估计通过一步预测、精确搜索方法结合先验信息完成;另一方面根据不同脉冲时刻参数的变化对聚焦位置平移实现不同时间段的能量积累。仿真结果表明该方法能有效解决高机动目标的能量积累问题。

关键词 能量积累, 高机动目标, 频域滤波, 先验信息, 一步预测

0 引言

雷达系统^[1,2]对弹道导弹、隐形飞机等这类具有低信噪比、高机动性特点的微弱目标,仅仅靠杂波抑制^[3]、去噪声等手段无法实现有效的检测。一种可行的方案是通过能量积累^[4-6]提高信噪比^[7],但对于高机动微弱目标,能量积累的同时会出现距离徙动^[8,9]和多普勒模糊^[10],而且徙动量和模糊数会随着目标运动参数变化,最终导致不同时间段的能量无法聚焦。分数阶 Fourier 变换^[11]利用不同信号在分数阶 Fourier 域上的不同聚集位置,可以实现信号的分离和参数的估计,但对于长时间的能量积累,这一时频变换所需存储空间庞大,无法应用于实际的目标能量相干积累中。包络补偿是有效的能量相干积累手段,谱峰跟踪法^[12]可以根据信号的相关性对包络进行平移,然而微弱目标的回波相关性较差,导致包络无法精确对齐。动态规划^[13]和粒子滤波^[14]作为典型的检测前跟踪算法,非常适合微弱目

标的能量积累,但动态规划要求帧间转移步长不变,对于机动性较强的目标能量积累效果较差,粒子滤波方法虽然解决了此问题,但需要引入大量的粒子跟踪目标轨迹,因此算法的计算复杂度较高。Keystone 变换^[15,16]在成像、能量积累等多领域广泛应用,它可以矫正距离徙动,在目标平稳运动时有较好的能量聚焦效果。但对于高机动性目标,加速度引起的距离弯曲无法用 Keystone 变换消除,同时,Keystone 变换需要插值操作,大大影响了算法的性能。文献[17]提出了一种二维频域滤波算法,在补偿距离徙动和距离弯曲时,所用到的补偿函数只需预先知道加速度信息,通过精确一维搜索,匀加速运动目标可以在积累时间内精确聚焦,这种方法没有涉及插值操作,所以在能量聚焦的同时可以降低计算复杂度,然而当目标加速度等参数变化时,补偿函数不再适用,能量无法准确积累。本文在文献[17]的基础上,改进了算法模型,提出了一种结合先验信息进行实时补偿的频域滤波方法,该新的方法同样不需要插值操作,并且在目标参数变化时可以精确聚焦,

^① 国家自然科学基金(61101127)资助项目。

^② 男,1988 年生,博士生;研究方向:动目标检测与跟踪;联系人,E-mail: ly_504china@163.com
(收稿日期:2015-05-05)

具有较好的应用前景。

1 回波信号模型

假设雷达发射脉冲为线性调频信号,则相干检测后的二维时域回波信号为

$$\begin{aligned} s_1(t, t_m) &= w_r(t)w_a(t_m) \exp\left(j\pi K(t - \frac{2R(t_m)}{c})^2\right) \\ &\times \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda}R(t_m)\right) \end{aligned} \quad (1)$$

其中 t 为快时间, t_m 为慢时间, λ 为载波波长, $w_r(t)$ 和 $w_a(t_m)$ 分别为距离窗函数和方位窗函数, $R(t_m)$ 为 t_m 时刻目标到雷达的径向距离。

经过距离频域脉冲压缩后, 对应时域信号可表示为

$$\begin{aligned} s_2(t, t_m) &= A \operatorname{sinc}\left(f_r\left(t - \frac{2R(t_m)}{c}\right)\right) \\ &\times w_a(t_m) \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda}R(t_m)\right) \end{aligned} \quad (2)$$

其中 A 为目标信号压缩后的幅度, f_r 为发射信号的带宽。

应用驻相原理, 式(2)变换到二维频域并经过距离压缩后可得

$$\begin{aligned} S(f, f_a) &= |P(f)|^2 w_a\left(-\frac{cf_a}{2(f+f_c)a} - \frac{v}{a}\right) \\ &\exp\left(j\frac{\pi}{2a}4vf_a\right) \times \exp\left(-j\frac{4\pi}{c}f\left(R_0 - \frac{v^2}{2a}\right)\right) \\ &\times \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda}\left(R_0 - \frac{v^2}{2a}\right)\right) \end{aligned} \quad (3)$$

其中 f 表示距离频域, f_a 是方位频域, R_0 为目标到雷达的初始斜距, a 为目标加速度。以上推导为加速度等参数恒定时的模型, 具体步骤可参考文献[13]。下面对目标做变加速直线运动的模型进行改进。

2 频域补偿方法

目标在高机动运行中, 不同时间段有着不同的速度和加速度, 为了方便距离徙动和多普勒模糊的矫正, 雷达发射端的信号载频和脉冲频率等参数也会根据目标运动参数进行实时的调整, 达到精确聚

焦、积累能量的目的。在式(3)中引入脉冲数和多普勒模糊将二维频域信号变为

$$\begin{aligned} S(f(i), f_a(i)) &= \\ &|P(f(i))|^2 w_a\left(-\frac{c(f_a(i) + MPRF(i))}{2(f(i) + f_c(i))a(i)} - \frac{v}{a(i)}\right) \\ &\times \exp\left(j\frac{\pi}{2a(i)}(4v(f_a(i) + MPRF(i)))\right) \\ &\times \exp\left(-j\frac{4\pi}{c}f(i)\left(R_0 - \frac{v^2}{2a(i)}\right)\right) \\ &\times \exp\left(-j4\pi\frac{f_c(i)}{c}\left(R_0 - \frac{v^2}{2a(i)}\right)\right) \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)表示第 i 个脉冲对应的二维频域函数, 其中 M 为多普勒模糊数的整数部分^[10], PRF 是脉冲频率(pulse recurrence frequency), 这样, 信号随着不同脉冲时刻变化, 我们可以得到不同脉冲时刻信号的二维频谱。

对多普勒模糊数补偿时, 基带频谱信号不一定落在某一个 PRF 中, 因此引入判别数 Δ , 如果二维信号频谱落入同一个 PRF 内, Δ 为 0, 否则 Δ 为 1。

为了保证基带信号落入整数 PRF 单元, 有利于模糊数补偿, 将式(1)变到距离频域后做如下操作:

$$\begin{aligned} S_1(f, t_m) &= \operatorname{FFT}[s_1(t, t_m), 1]w_a(t_m) \\ &\exp\left(j\Delta \frac{\pi}{f_c} \frac{PRF(f + f_c)}{f_c} t_m\right) \end{aligned} \quad (5)$$

当信号频谱不在整数 PRF 单元时, 以上操作使整个信号基带频谱向右平移了 $PRF/2$, 设 $S_1(f, t_m)$ 对应式(4)的二维频域信号的形式 $S_1(f(i), f_a(i))$, 则多普勒模糊补偿后的能量聚焦信号为

$$\begin{aligned} s_2(t, t_m) &= \operatorname{IFFT} 2\left[\sum_i \left(S_1(f(i), f_a(i)) \times W_r(f(i), f_a(i))\right.\right. \\ &\left.\left.\times \exp\left(-j\frac{\pi c(f_a(i) + MPRF(i))^2}{2a(i)(f(i) + f_c(i))}\right)\right]\right. \\ &= \sum_i \left(G(i) \operatorname{sinc}\left(f_r\left(t - \frac{2R_0}{c} + \frac{(v - \Delta cPRF(i)/4f_c(i))^2}{ca(i)}\right)\right)\right. \\ &\times \operatorname{sinc}\left(f_{ar}\left(t_m + \frac{(v - \Delta cPRF(i)/4f_c(i))}{a(i)}\right)\right) \\ &\times \exp\left(j2\pi MPRF(i) \frac{(v - \Delta cPRF(i)/4f_c(i))}{a(i)}\right) \\ &\left.\left.\times \exp\left(-j\frac{4\pi f_c(i)}{c}\left(R_0 - \frac{(v - \Delta cPRF(i)/4f_c(i))^2}{2a(i)}\right)\right)\right]\end{aligned} \quad (6)$$

其中 $G(i)$ 为脉冲 i 对应的增益, f_{ar} 为多普勒带宽。由式(6)知距离频率和多普勒频率已经不存在耦合, 目标的能量得到积累。但不同脉冲时刻的聚焦

点位置与脉冲频率、加速度和载频有关,仍需进行一定的平移操作完成所有脉冲时刻能量的聚焦。

设脉冲 j 所在聚焦位置为最终聚焦中心,对于脉冲 i ,令

$$M_1(i) = \frac{2R_0}{c} - \frac{(v - \Delta cPRF(i)/4f_c(i))^2}{ca(i)}$$

$$M_2(i) = -\frac{(v - \Delta cPRF(i)/4f_c(i))}{a(i)}$$

考虑到目标聚焦点能量的扩散效应,通过将脉冲 i 所在快时间域聚焦坐标为中心的 5×5 区域向左平移 $M_1(i) - M_1(j)$,慢时间域聚焦坐标为中心的 5×5 区域向左平移 $M_2(i) - M_2(j)$,可以使不同脉冲对应能量信号聚焦在一点。频域补偿方法流程图如图 1 所示。

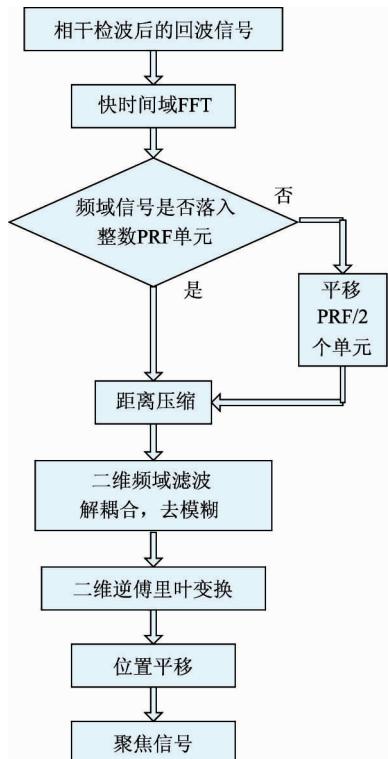


图 1 频域补偿方法流程图

3 不同时间段能量积累方法

为了能使不同时间段的能量得到积累,我们需要提前知道参数对聚焦位置的影响,并进行搬移。信号载频和脉冲频率是发射端已知的,加速度通过一维精确搜索可以获得,因此所有的参数均可视为先验信息。如果一段短时间内目标参数没有变化或变

化非常小,则直接对能量进行积累,然而随着积累时间的增加,目标速度、加速度等参数不再是一定值,需要调整各个参数分段积累以适应目标的高机动性,本节通过观测信息进行一步预测来估计目标的运动状态,图 2 是不同时间段根据先验信息对积累的能量进行平移聚焦的示意图。

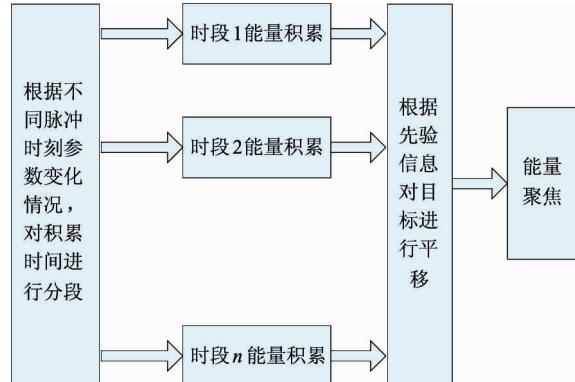


图 2 不同时间段能量积累示意图

3.1 参数对能量积累的影响

由式(6)知,如果不同时间段对应的能量聚焦位置不同,需要一定的搬移才能完成不同时间段能量的聚焦。假设目标做变加速直线运动,雷达及目标仿真参数如表 1 所示,表 2、表 3、表 4 分别显示了脉冲频率、载频和加速度对能量积累位置的影响。

表 1 仿真参数设置

参数	大小
初始距离	200km
初始速度	100m/s
载频	5.5GHz
信号带宽	40MHz
脉宽	2μs
距离采样频率	60MHz
加速度	30m/s ²
积累时间	1s

过高的 PRF 会引起回波重叠,导致距离向模糊,过低的 PRF 会因其远小于多普勒带宽导致方位向模糊,因此参数 PRF 需根据目标运动状态进行调节,而且不同的 PRF 会影响目标在快时间域和慢时间域的能量聚焦点位置,根据第 2 节中聚焦中心

$M_1(i)$ 和 $M_2(i)$ 的表达式, PRF 增大会使快时间域和慢时间域的聚焦坐标右移,如表 2 所示。

表 2 PRF 对聚焦位置的影响

PRF	2500	2750
距离单元(km)	130	148
脉冲数	748	1173

参数调节时载频不能过大,因为随着载频增大,多普勒调频率相应增大,最终引起多普勒带宽的增加,此时, PRF 单元宽度无法包含整个多普勒频谱,导致能量损失,如表 3 所示。

表 3 载频对聚焦位置的影响

载频(GHz)	6	6.5
距离单元(km)	147	131
脉冲数	1245	874

表 3 的仿真数据说明载频作用不同于 PRF, 大的载频聚焦位置在快时间域和慢时间域的坐标反而小, $M_1(i)$ 和 $M_2(i)$ 的表达式也验证了这一点。仿真中脉冲重复频率 3000Hz, 其余参数设置与表 1 设置相同。

表 4 对比了不同加速度对积累位置的影响, 相比 PRF 和载频, 加速度对聚焦慢时间域位置影响较

大,这是因为在 $M_2(i)$ 的表达式中, 加速度对分子中速度变量也有影响。仿真中脉冲重复频率 3000Hz, 其余参数设置与表 1 相同。

表 4 加速度对聚焦位置的影响

加速度(m/s^2)	25	35
距离单元(km)	162	152
脉冲数	380	2399

3.2 目标运动状态的估计

3.1 节仿真分析了不同参数对能量聚焦的影响,但参数的调整还需预先知道目标运动状态。容积卡尔曼滤波(cubature Kalman filtering, CKF)算法^[18]是一种非线性滤波方法,适合机动运动目标的跟踪,预测精度与无迹卡尔曼滤波(unscented Kalman filtering, UKF)接近,计算复杂度却低于无迹卡尔曼滤波。为了保证目标运动参数估计的实时性,本文利用 CKF 算法引入观测信息进行一步预测,估计不同脉冲时刻的目标运动参数。图 3 为 400 个脉冲时间内目标速度和加速度估计误差,由于直接观测信息为距离信息,估计的速度参数有一定的误差,加速度参数有较大的误差,仿真中目标起始速度为 100m/s, 加速度在 $15m/s^2$ 到 $80m/s^2$ 之间随机变化,其余参数设置与表 1 设置相同。

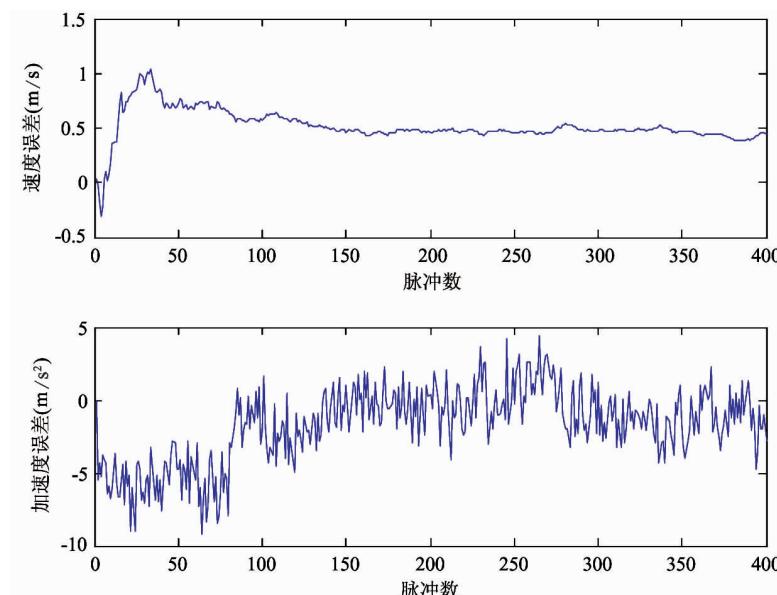


图 3 速度和加速度估计误差

为了降低目标运动状态的估计误差,需对加速度进行精确搜索,通过引入 CKF 算法,加速度搜索范围可以限定在较小的区间,从而大幅度地降低了计算量,同时得到高精度的估计加速度。图 4 是目标真实加速度为 30m/s^2 时的仿真搜索结果,可以看出,上面的加速度预测方法有效解决了加速度的实时估计问题。

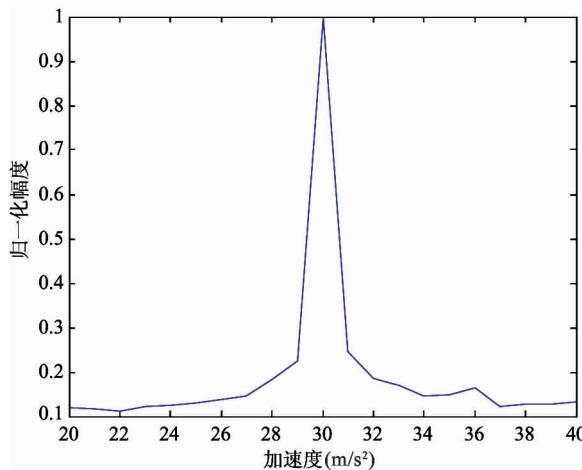


图 4 加速度的搜索

4 试验结果

本节采用 Matlab 软件仿真验证不同时间段能量积累方法的有效性。假设目标能量积累分三个阶段:第一阶段目标加速度为 30m/s^2 , PRF 为 3000Hz ;第二阶段目标加速度为 50m/s^2 , PRF 为 2000Hz ,第三阶段目标加速度为 80m/s^2 , PRF 为 1500Hz 。三个阶段能量积累时间均为 1s ,虚警概率为 10^{-6} ,其余仿真参数设置与表 1 中设置相同。选取第二阶段能量积累点为总的能量聚焦中心,根据估计的目标加速度和先验参数信息,对聚焦位置进行搬移,其中目标初始速度可以利用 3.2 节方法进行一次精确搜索得到。图 5 给出了二维频域补偿方法的示意图,首先对匹配滤波后的回波信号进行分段能量积累,能量聚集在不同的距离方位位置,然后利用本文所提算法解耦合、去模糊、距离方位压缩后可以得到不同阶段的能量聚焦点,最后通过平移操作完成能量聚

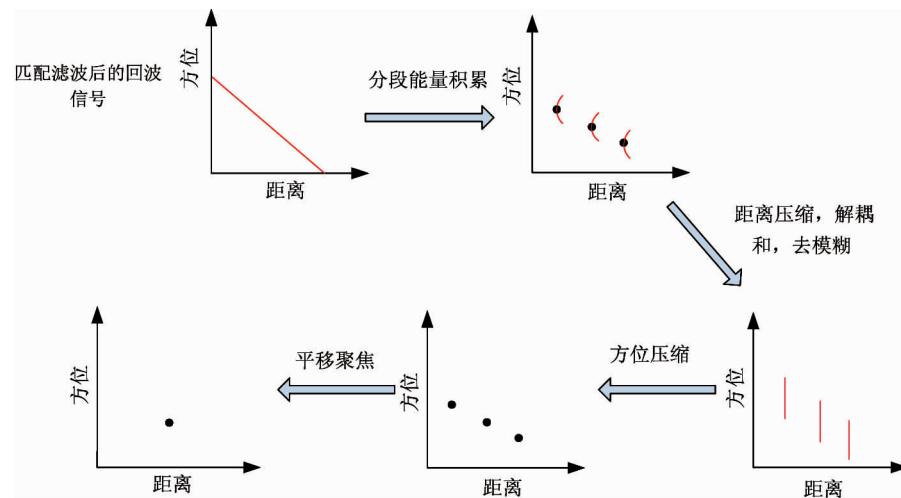


图 5 频域补偿方法示意图

焦。图 6 是经过聚焦位置平移后的能量分布图,由图中可以看出回波信号的能量得到了很好的积累。仿真中为了方便验证算法的性能,未考虑实际环境中信噪比的变化和能量积累时间的关系。理论上,在杂波干扰较强的区域可以通过延长能量积累时间提升算法性能,每一段的能量积累时间越长,算法检测性能越好。

图 7 为经过 30 次蒙特卡罗仿真得到的信噪比与检测概率关系的统计结果。图中对比了本文方法、文献[12]方法以及不同阶段能量积累算法的性能,可以看出,本文方法的能量积累检测概率明显高于单阶段能量积累方法。另一方面,对于相同的检测概率,本文方法相比文献[12]方法可以使信噪比最大降低约 6dB 。

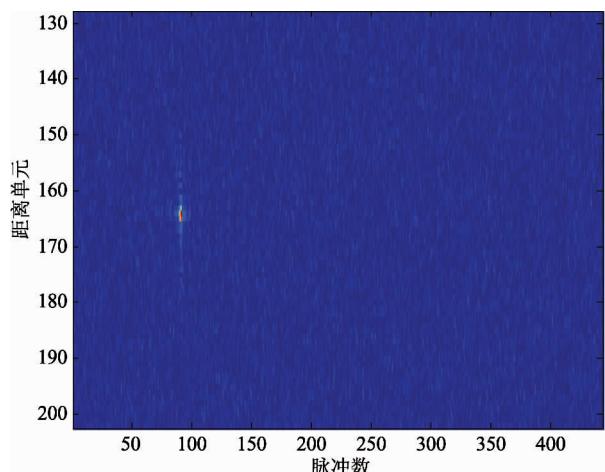


图 6 经过平移操作后的能量分布

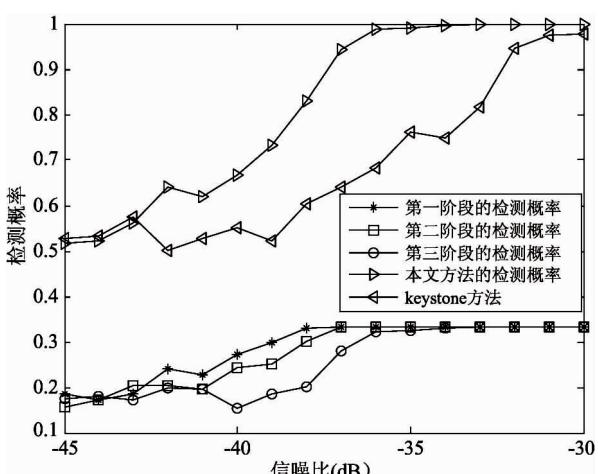


图 7 信噪比与检测概率的关系

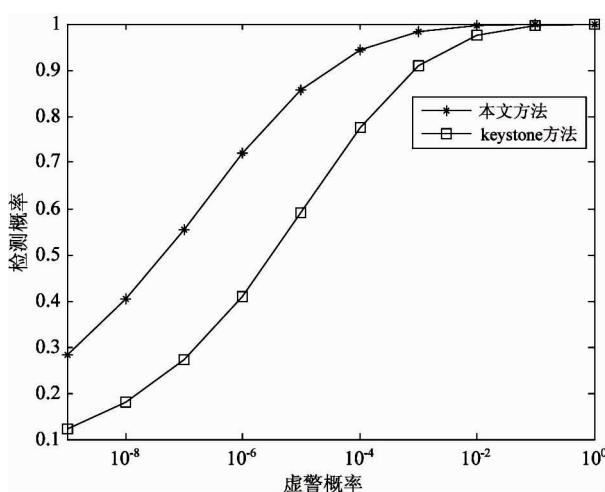


图 8 ROC 曲线

图 8 给出了当信噪比为 -40dB 条件下两种方法的接收机工作特性(ROC)曲线。可以看出经过

三个阶段能量积累,本文方法在相同的信噪比或者虚警概率条件下得到的检测概率明显高于文献[12]所提方法。

5 结论

高机动微弱目标的能量积累受到多种参数的影响,为了积累不同数据段的目标能量,本文提出了一种结合先验信息进行实时补偿的频域滤波方法:首先通过频域补偿消除距离徙动和多普勒模糊,然后引入一步预测和精确搜索获取目标运动参数,最后结合先验信息对不同时间段目标能量积累位置进行平移。由于补偿方法没有涉及传统插值操作,且精确搜索范围经过一步预测限定在有限区间,因此本文方法可以较好地满足实时估计要求。不同方法的仿真结果对比表明,本文所提方法能有效去除距离徙动和多普勒模糊,在低信噪比、高机动运行环境下具有更好的检测性能。

参考文献

- [1] 丁鹭飞,耿富录. 雷达原理. 西安:西安电子科技大学出版社,1984. 263-322
- [2] 何友,关键,彭应宁等. 雷达自动检测与 CFAR 处理. 北京:清华大学出版社,1999
- [3] 钱江,吕孝雷,李凉海等. 机载三通道 SAR/GMTI 快速目标运动参数估计. 西安电子科技大学学报,2010, 37(2): 235-241
- [4] Lu X F, Chen X L, Huang X B, et al. Doppler ambiguity correction using energy. IET Radar Conference 2013, Xi'an, China, April 14-16, 2013
- [5] 朱永峰,李为民. Chirp 雷达对高速运动目标有效相参积累的算法研究. 系统工程与电子技术, 2004, 26(10): 1396-1399
- [6] 宋慧波,高梅国,田黎育. 雷达微弱信号检测算法中的恒虚警处理. 仪器仪表学报, 2006, 27(6): 1330-1342
- [7] Perry R P, DiPietro R C, Fante R L. Coherent integration with range migration using Keystone formatting. In: Proceedings of the IEEE International Radar Conference, Boston, USA, 2007. 863-868
- [8] Li Y, Zeng T, Long T, et al. Range migration compensation and Doppler ambiguity resolution by Keystone trans-

- form. In: Proceedings of the IEEE Conference on Radar, Shanghai, China, 2006. 1-4
- [9] Perry R P, Dipietro R C, Fante R L. SAR Imaging of Moving Target. *IEEE Trans on AES*, 1999, 35(1):188-200
- [10] Zhu S Q, Liao G S, Qu Y, et al. Ground Moving Targets Imaging Algorithm for Synthetic Aperture Radar. *IEEE Trans on Geosciences and Remote Sensing*, 2011, 49(1): 462-477
- [11] Tao R, Li Y L, Wang Y. Short-time fractional fourier transform and its application. *IEEE Trans on Signal Processing*, 2010, 58(5):2568-2580
- [12] Wang L, Zhu Z D. New range alignment algorithm for ISAR based on maximum modified kurtosis. *Journal of Nan-Jing University of Aeronautics&Astronautics*, 2006, 38(6):722-726
- [13] Ristic B, Farina A, Benvenuti D, et al. Performance bounds and comparison of nonlinear filters for tracking a ballistic object on reentry. *IET Proc Radar Sonar and Navigation*, 2003, 150(2): 65-70
- [14] Yue S, King L, Yang J, et al. A kalman filtering-based dynamic programming track-before-detect algorithm for turn target. In: Proceedings of the 2010 Internatinoal Conference on Communications, Circuits and Systems (ICCCAS), Chengdu, China, 2010. 449-452
- [15] Li G, Xia X G, Peng Y N. Doppler keystone transform: an approach suitable for parallel implementation of SAR moving target imaging. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2008, 5(4):573-577
- [16] 张顺生,曾涛. 基于 keystone 变换的微弱目标检测. 电子学报, 2005, 33(9):1675-1678
- [17] 吴孙勇, 廖桂生, 朱圣棋等. 提高雷达机动目标检测性能的二维频率域匹配方法. 电子学报, 2012, 40(12): 2415-2420
- [18] Ienkaran A, Simon H. Cubature kalman filter. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2009, 54(6):1254-1269

Research on energy accumulation for detection of highly maneuverable targets for radar systems

Li Yu, Huang Puming, Lin Chenchen

(Xi'an Institute of Space Radio Technology, Xi'an 710100)

Abstract

The performance of the energy accumulation means for radar systems' detecting and tracking weak targets was analyzed. Aiming at the problem that for more maneuverable targets with high-speed and variable acceleration, range migration and Doppler walk occur in the integration time, and the focus points of energy in different periods may shift, thus the traditional keystone transform or normal frequency compensation methods are not suitable for more maneuverable targets' energy accumulation, a frequency domain filtering method for realizing of real-time compensation based on prior information was proposed. The method can eliminate the range migration and Doppler walk by using the frequency domain compensation function composed of different parameters, in which parameters' estimation can be completed through the one-step prediction and the accurate searching combined with prior information. Moreover, it achieves the energy accumulation of different periods by shifting the focus position according to varying parameters. The simulation results show that the proposed method can solve the energy accumulation problem effectively.

Key words: energy accumulation, highly maneuverable target, frequency domain filtering, prior information, one-step prediction