

# 机载雷达高速空中机动目标检测新方法

吴仁彪, 贾琼琼, 李 海, 王冬梅

(中国民航大学智能信号与图像处理天津市重点实验室, 天津 300300)

**摘 要:** 空时自适应处理(Space-Time Adaptive Processing, STAP)是一种有效的机载雷达运动目标检测方法. 空中目标的高速运动会导致其回波产生严重的距离走动和多普勒模糊, 并且目标作加速运动时还会引起多普勒走动. 为了有效检测上述目标, 本文提出了一种新方法, 该方法在目标距离走动校正之前首先进行杂波抑制, 避免了直接利用Keystone变换校正存在多普勒模糊的运动目标距离走动时影响杂波分布特性、进而降低STAP性能的问题; 然后对距离走动校正后的数据进行Wigner-Hough变换, 估计出目标的加速度, 并根据估计值对多普勒走动项进行补偿, 从而使目标能量能够得到有效积累; 最后进行运动目标检测. 仿真结果证明了该方法的有效性.

**关键词:** 机载雷达; 空时自适应处理; 动目标检测; Keystone变换; Wigner-Hough变换

**中图分类号:** TN957      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2013)01-0086-05

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>      **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.01.016

## Detection of Fast Air Maneuvering Targets via STAP

WU Ren-biao, JIA Qiong-qiong, LI Hai, WANG Dong-mei

(Tianjin Key Laboratory for Advanced Signal Processing, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

**Abstract:** Space-time adaptive processing is an effective method for moving target detection in airborne radar. However, high speed of air targets induce serious range walk and Doppler ambiguity. To make things worse, acceleration of the target will result in Doppler spread. To detect the above mentioned fast air maneuvering targets, a new method is proposed in this paper, which removes the clutter before Keystone formatting, hence the effects of Keystone formatting for the ambiguous targets' range walk compensation on the clutter distribution and further on the performance of STAP can be avoided. The Doppler spread of the target is compensated by the estimated acceleration via Wigner-Hough transform. Therefore, good detection performance of fast air maneuvering targets can be achieved. Effectiveness of the new method is verified via simulation examples.

**Key words:** airborne radar; space-time adaptive processing; moving target detection; Keystone formatting; Wigner-Hough transform

## 1 引言

在信息技术日益发展的现代战争中, 预警雷达发挥着重要作用. 本文以相控阵机载预警雷达为背景, 主要研究高速空中机动目标检测问题(本文仅考虑存在径向加速度的情况). 检测这类目标面临的主要难题有: (1) 机载预警雷达下视工作时微弱目标信号往往淹没于因平台运动使多普勒谱展宽了的强地杂波中, 仅用单个通道接收下来的回波信号进行多普勒处理的方法不能抑制与动目标相同多普勒频率的地物杂波<sup>[1~5]</sup>; (2) 目标的高速运动会引起严重的距离走动和多普勒模糊<sup>[6]</sup>; (3) 目标的径向加速度会使回波信号产生多普勒走动.

STAP是一种有效的机载雷达地杂波抑制手段<sup>[1~5]</sup>. 但是传统的STAP方法都是假设在相干处理时间(Coherent Processing Interval, CPI)内目标处于固定的距离单元(即不发生距离走动). 因此, 必须设法对目标距离走动进行校正以提高动目标检测性能. 常用的距离走动校正方法有互相关法、最小熵法、谱峰跟踪法等<sup>[7~10]</sup>, 但其仅适用于回波信噪比较高的场合, 在低信噪比情况下由于相邻回波相关性较差而无法获得较好的距离走动校正效果. Keystone变换可以在目标运动速度未知的情况下统一校正多个目标的线性距离走动, 被广泛应用于雷达地面动目标成像<sup>[11~13]</sup>以及微弱目标检测领域<sup>[6, 14]</sup>.

文献[15,16]在杂波不存在距离走动的前提下将 Keystone 变换与 STAP 相结合分别实现了无多普勒模糊和存在多普勒模糊的高速微弱空中动目标的检测,并获得了良好的检测性能.但是,它们仅仅针对的是匀速运动的高速目标,当目标作机动飞行时,径向加速度导致回波信号产生多普勒走动,此时文献[15,16]方法的检测性能将大大降低.为了实现这类目标的有效检测,本文将 Keystone 变换、Wigner-Hough 变换<sup>[17]</sup>和 STAP 进行巧妙地结合,提出了一种用于机载相控阵预警雷达实现高速空中机动目标检测的新方法,其主要思想是先对回波数据进行杂波抑制,再利用 Keystone 变换校正目标距离走动,然后利用 Wigner-Hough 变换估计出目标的加速度.为了提高 Wigner-Hough 变换估计加速度的精度,本文在进行加速度估计之前首先进行空域波束形成以提高信噪比;接着根据所估计出的加速度对多普勒走动项进行补偿,从而为目标的有效积累检测提供了有效条件.仿真实验验证了该方法的有效性.

## 2 问题描述

本节首先给出理想情况下(目标不存在距离走动和多普勒走动)的回波数据模型,然后给出目标作高速机动运动时引起距离走动及多普勒走动情况下的回波数据模型.

### 2.1 理想情况下的数据模型

考虑机载平台上沿航向放置的  $N$  元均匀线阵,阵元间距为  $d = 0.5\lambda$ ,  $\lambda$  为工作波长,一个相干处理时间内发射  $K$  个脉冲,  $x_{nk}$  为第  $n$  个阵元在第  $k$  个脉冲上对应的复采样值,则每一距离门上的接收数据可以写作一个如下式的  $N \times K$  维矩阵<sup>[1]</sup>:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1K} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2K} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{N1} & x_{N2} & \cdots & x_{NK} \end{bmatrix} \quad (1)$$

假设在每个脉冲重复间隔内沿距离向的采样点数为  $L$ ,则一个 CPI 的接收数据形成了一个  $N \times K \times L$  的三维数据块.将式(1)中的数据矩阵  $\mathbf{X}$  按列排成一个  $NK \times 1$  的列向量,可记为  $\mathbf{x} = \text{vec}(\mathbf{X})$ ,就形成了一个空时快拍数据.假定单个距离门内最多存在一个目标,待检测单元的空时快拍(Primary data,即一次数据)可写成:

$$\mathbf{x}_{pri} = \mathbf{x}_s + \mathbf{x}_c + \mathbf{x}_n \quad (2)$$

其中  $\mathbf{x}_s$ 、 $\mathbf{x}_c$  和  $\mathbf{x}_n$  分别表示目标、杂波和噪声成分.  $\mathbf{x}_s$  可表示为如下形式:

$$\mathbf{x}_s = b_s \mathbf{a}(u_s, v_s) \quad (3)$$

$b_s$  为目标回波复幅度,为一复常数,  $\mathbf{a}(u_s, v_s)$  为目标空时导向矢量,其归一化空间频率和时间频率分别为  $u_s$

$= 2\pi d \cos \psi_s / \lambda$  和  $v_s = 2\pi f_d / f_r$ ,  $\psi_s$  表示目标来向角.空时导向矢量  $\mathbf{a}(u_s, v_s)$  有如下形式:

$$\mathbf{a}(u_s, v_s) = \mathbf{a}(v_s) \otimes \mathbf{a}(u_s) \quad (4)$$

$\otimes$  表示 Kronecker 积,时域导向矢量  $\mathbf{a}(v_s) = [1 \ e^{-jv_s} \ \cdots \ e^{-j(K-1)v_s}]^T$  为  $K \times 1$  维列向量,空域导向矢量  $\mathbf{a}(u_s) = [1 \ e^{-ju_s} \ \cdots \ e^{-j(N-1)u_s}]^T$  为  $N \times 1$  维列向量,  $(\cdot)^T$  表示转置运算.同样,参考单元的空时快拍(Secondary data,即二次数据)可写成:

$$\mathbf{x}_{sec} = \mathbf{x}_c + \mathbf{x}_n \quad (5)$$

### 2.2 机动目标数据模型

空中目标的高速运动会使其回波处于不同的距离分辨单元,即产生了距离走动;并且,目标机动飞行时,还会导致一个 CPI 内回波的多普勒频率随时间变化.此时,将包含目标回波的一次数据记为如下形式:

$$\tilde{\mathbf{x}}_{pri} = b_s \tilde{\mathbf{a}}(u_s, v_s) + \mathbf{x}_c + \mathbf{x}_n \quad (6)$$

假设杂波无距离走动(载机运动速度不是很高时这一假设是合理的<sup>[16]</sup>),故  $\mathbf{x}_c$  和  $\mathbf{x}_n$  保持不变,而  $\tilde{\mathbf{a}}(u_s, v_s)$  是存在距离走动和多普勒走动的目标导向矢量,有如下形式:

$$\tilde{\mathbf{a}}(u_s, v_s) = \mathbf{b}(v_s, a_s) \otimes \mathbf{a}(u_s) \quad (7)$$

其中空域导向矢量  $\mathbf{a}(u_s)$  保持不变,  $\mathbf{b}(v_s, a_s)$  为考虑目标距离走动和多普勒走动后的  $K \times 1$  维时域导向矢量,有如下形式:

$$\mathbf{b}(v_s, a_s) = [\xi_0 \ \xi_1 e^{-jv_s} e^{-j\pi f_d a_s T^2} \ \cdots \ \xi_{K-1} e^{-j(K-1)v_s} e^{-j\pi f_d a_s [(K-1)T]^2}]^T \quad (8)$$

其中  $\xi_0, \xi_1, \dots, \xi_{K-1}$  为距离走动所引起的目标导向矢量畸变.可以看出,当目标作匀加速直线运动时,距离走动和多普勒走动将会影响目标的时域导向矢量,进而严重影响目标积累性能.

## 3 新方法原理

高速空中动目标存在严重的速度模糊,此时直接对回波数据进行 Keystone 变换的方法在校正目标距离走动的同时会对杂波特性产生影响进而降低后续 STAP 处理性能<sup>[18]</sup>,因此本文首先对回波数据进行杂波抑制,然后利用 Keystone 变换校正目标距离走动,从而避免了上述问题.并且对距离走动校正之后的数据进行 Wigner-Hough 变换估计出目标的加速度,然后根据估计值对由加速度所引起的多普勒走动项进行补偿,最后进行目标积累检测.下面介绍其原理.

### 3.1 杂波抑制原理

将杂波协方差矩阵记为  $\mathbf{R}$ ,本文利用  $\mathbf{R}^{-1}$  近似代替投影矩阵实现杂波抑制,运算简单,并且也回避了投影矩阵求解过程中阶数的选取问题<sup>[1,16]</sup>.

### 3.2 距离走动校正原理

假设运动点目标的基带回波信号为:

$$s_s(\hat{t}, t_k) = A_s p(\hat{t} - \tau_s) e^{-j2\pi f_c \tau_s} \quad (9)$$

其中  $t_k = kT$ , ( $k = 0, \dots, K-1$ ) 为慢时间,  $T$  为雷达发射脉冲重复周期.  $\hat{t} = t - t_k$  为快时间,  $p(\cdot)$  为回波包络,  $f_c$  为载波频率,  $A_s$  为点目标回波的幅度,  $\tau_s = 2R_s(t_k)/c$  为回波时延,  $R_s(t_k)$  为目标与雷达之间的瞬时距离. 假设目标在 CPI 内做匀加速直线运动, 则:

$$R_s(t_k) = R_{s0} + V_s t_k + \frac{1}{2} a_s t_k^2 \quad (10)$$

$R_{s0}$  为 0 时刻目标与雷达之间的距离,  $V_s$  为目标运动速度,  $a_s$  为目标运动的加速度. 将式(10)代入式(9)可得:

$$s_s(\hat{t}, t_k) = A_s \cdot p \left( \hat{t} - 2 \left( \frac{R_{s0} + V_s t_k + \frac{1}{2} a_s t_k^2}{c} \right) \right) \cdot e^{-j2\pi f_c \left( \frac{R_{s0} + V_s t_k + \frac{1}{2} a_s t_k^2}{c} \right)} \quad (11)$$

其中  $\tilde{A}_s = A_s e^{-j\frac{4\pi}{c} f_c R_{s0}}$  为一复常数. 从式(11)可以看出, 对于不同的发射脉冲, 目标回波信号峰值位置  $2R_{s0}/c + 2V_s kT/c + a_s(kT)^2/2c$  不同, 即产生了距离徙动.

为了校正目标距离走动, 首先将式(11)从快时间域变换到距离频率域, 得:

$$S_s(f, t_k) = A_s P(f) e^{-\frac{4\pi(f+f_c)}{c} R_{s0} - \frac{4\pi(f+f_c)}{c} V_s t_k - \frac{4\pi(f+f_c) a_s t_k^2}{c} \cdot \frac{1}{2}} \quad (12)$$

式中  $P(f)$  为  $p(\hat{t})$  的傅里叶变换. 上式的指数相位中第一项为常数项, 第二项为距离走动项和多普勒偏移项, 第三项为距离弯曲项和多普勒走动项. 当第三项中的距离弯曲项可以忽略时, 式(12)可以写成:

$$S_s(f, t_k) = A_s P(f) e^{-\frac{4\pi(f+f_c)}{c} R_{s0} - \frac{4\pi(f+f_c)}{c} V_s t_k - \frac{4\pi f_c a_s t_k^2}{c} \cdot \frac{1}{2}} \quad (13)$$

对于存在多普勒模糊的高速目标, Keystone 变换与多普勒频率的模糊程度有关, 目标的多普勒频率用  $f_d$  表示, 则  $f_d$  与模糊后的多普勒频率  $f_{d0}$  有如下关系:

$$f_d = f_{d0} + Ff \quad (14)$$

其中  $F$  为模糊数. 定义一个虚拟时间  $\eta_k$ , 令  $(f_c + f) t_k = f_c \eta_k$ , 目标存在多普勒模糊情况下的 Keystone 变换为:

$$S_s'(f, \eta_k) = e^{-j2\pi \frac{f}{f_c + f} kF} S_s'(f, \eta_k) \quad (15)$$

从式(15)可以看出, 当目标多普勒模糊数  $F$  取不同值时, 意味着 Keystone 变换有不同的修正项  $\exp(-j2\pi$

$\frac{f}{f_c + f} kF)$ . 将式(15)变换回快时间域可得:

$$s_s'(\hat{t}, \eta_k) = \hat{A}_s p(\hat{t} - \frac{2R_{s0}}{c}) e^{-j2\pi f_c V_s \eta_k} e^{-j\pi f_c a_s \eta_k^2} \quad (16)$$

从式(16)可以看出, 对于不同发射脉冲, 目标回波信号峰值的位置始终是  $2R_{s0}/c$ , 它只与初始时刻目标的位

置有关, 也就是说 Keystone 变换把原本位于不同距离单元的回波校正到同一距离单元, 补偿了距离走动, 此时式(16)中目标信号变成线性调频(Linear Frequency Modulated, LFM)信号.

### 3.3 多普勒走动项补偿原理

任意能量有限信号  $x(t)$  的 Wigner-Ville (WVD) 变换可表示为:

$$W(t, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t + \frac{\tau}{2}) x^*(t - \frac{\tau}{2}) e^{-j2\pi\omega\tau} d\tau \quad (17)$$

式中  $*$  表示复共轭. WVD 将一维时间信号  $x(t)$  变换到二维时频平面  $t - \omega$ , 在二维时频平面上, 理想的 LMF 信号的 WVD 为一条直线. Hough 变换实际上就是沿  $t - \omega$  平面上的直线积分, 在标准参数化方式下, Hough 变换的表达式为:

$$\rho = t \cos\theta + \omega \sin\theta, \quad \rho \geq 0, 0 \leq \theta \leq \pi \quad (18)$$

它将  $t - \omega$  平面上直线上的所有点能量叠加, 因此在  $\rho - \theta$  平面上将出现相应的峰值. 在时频平面上用  $\omega$  的截距  $\omega_0$  和斜率  $m$  为参数表示直线, 当沿  $\omega = \omega_0 + mt$  积分时, 可将积分路径参数  $(\rho, \theta)$  替换成  $(\omega_0, m)$ . 对于给定的能量有限信号  $x(t)$ , 定义 Wigner-Hough 变换为时域  $t$  到参数域  $(\rho, \theta)$  的映射为:

$$WH(\rho, \theta) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} W(t, \omega) \delta(\omega - \omega_0 - mt) d\omega dt \quad (19)$$

式(19)表明, 若信号  $x(t)$  是参数  $\omega_0$  和  $m$  的 LMF 信号, 则积分值最大. 当参数偏离  $\omega_0$  和  $m$  时, 积分值迅速减小. 因此可据此原理实现式(16)中 LMF 信号的加速度估计.

但是需要注意的是, 在杂波抑制后, 由于信噪比 (Signal-to-Noise Ratio, SNR) 较低, 目标仍淹没于噪声中, 直接进行 Wigner-Hough 变换估计加速度的估值误差较大. 为此, 本文将  $N$  个阵元接收到的、并经过杂波抑制后的数据进行空域波束形成, 这一过程使得目标信号得到了积累, 从而使 SNR 提高  $10\log_{10} NdB$ .

图 1 为本文所提新方法流程图, 具体步骤如下:

**步骤一** 利用估计得到的干扰空时二维协方差矩阵  $\hat{R}$  的逆矩阵  $\hat{R}^{-1}$  来对雷达接收到的总回波数据进行杂波抑制;

**步骤二** 对抑制杂波后的数据进行 Keystone 变换校正目标距离走动;

**步骤三** 对步骤二所得数据进行空域波束形成, 以提高 SNR, 为 Wigner-Hough 变换提供前提条件;

**步骤四** 对步骤三的结果进行 Wigner-Hough 变换估计目标加速度, 并根据所估计的目标加速度补偿步骤二处理后数据的多普勒走动项;

**步骤五** 对经上述处理后的空时二维数据乘以  $(a$

$(u_s, v_s)^H$  进行常规空时二维波束形成, 实现目标积累.

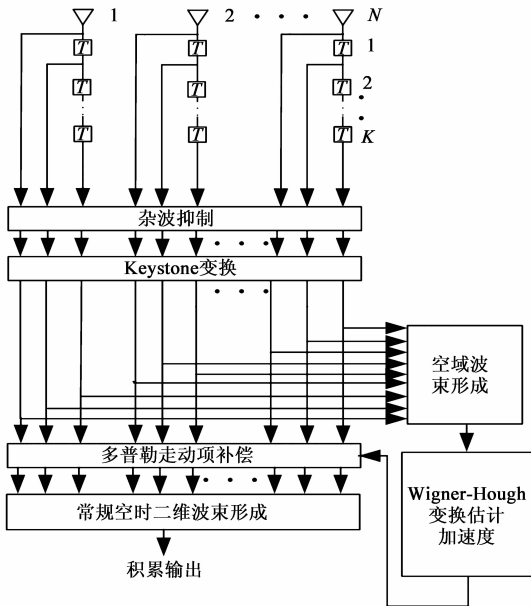


图1 本文方法实现框图

## 4 仿真分析

本节将通过仿真实验验证本文所提方法的有效性. 仿真参数设置: 天线阵为阵元数  $N = 16$  的正侧视理想均匀线阵, 阵元间距  $d = 0.5\lambda$ , 发射波长  $\lambda = 0.23\text{m}$ , 相干处理脉冲数  $K = 64$ , 载机速度  $V_p = 140\text{m/s}$ , 输入 SNR 为  $-10\text{dB}$ , 杂噪比 (Clutter-to-Noise Ratio, CNR) 为  $60\text{dB}$ , 载机高度  $H = 8000\text{m}$ , 发射脉冲重复频率  $f_r = 2434.8\text{Hz}$ , 雷达距离分辨率为  $\Delta R = 10\text{m}$ , 目标运动加速度为  $a_s = 1000\text{m/s}^2$ . 在相干处理时间内杂波的最大走动量为  $R_{\max} = 3.6\text{m} < \Delta R/2$ , 因此忽略掉杂波走动的影响是合理的.

图 2 比较了不同处理方法的目标积累效果. 其中图 2(a) 中目标速度为  $910\text{m/s}$ , 对应的多普勒频率 (模糊后、归一化) 频率为  $0.5$ , 图 2(b) 中目标速度为  $860\text{m/s}$ , 对应的多普勒频率为  $0.14$ . “直接最优处理” 是直接经最优处理器处理的目标积累效果, “KF + OAP + WH” 指先进行 Keystone 变换校正目标距离走动, 再进行杂波抑制, 最后利用 Wigner-Hough 变换估计目标加速度并对其进行补偿; “本文方法” 是经本文方法处理后的目标积累效果. 可以看出, 无论是图 2(a) 还是图 2(b) 中的目标, “直接最优处理” 都不能有效积累目标能量; 图 2(a) 中 “KF + OAP + WH” 与 “本文方法” 目标积累效果相当, 然而图 2(b) 中, “本文方法” 积累性能更好, “KF + OAP + WH” 目标能量不能够积累, 这正是由于目标存在多普勒模糊时 Keystone 变换校正目标距离走动时导致杂波脊展宽所造成的. 图 2(a) 中, 目标处于展宽后的杂波脊之外, 因此, 其能量能够得到积累, 而图 2(b) 中, 目标

处于展宽后的杂波脊上, 在进行杂波抑制时目标也被抑制掉. 由于目标距离走动的影响, “直接最优处理” 无论在哪种情况下目标能量都不能得到积累. 通过这一实验结果验证了本文方法能够避免直接利用 Keystone 变换校正存在多普勒模糊的动目标距离走动时影响杂波分布特性、进而降低 STAP 检测性能的问题.

图 3 比较了不同处理方法的检测性能, 图中横轴表示目标速度, 纵轴表示改善因子. “理想情况” 指目标无距离走动的理想情况下 STAP 最优处理器处理的结果, 它可以作为最佳性能的上界; 其余各曲线所代表的处理方法同图 2. 可以看出, 在目标存在距离走动和多普勒走动的情况下, 若不考虑这些因素的影响将会导致严重的性能损失, 如 “直接最优处理”; 由于目标存在多普勒模糊时, 杂波和目标模糊数不同, 此时直接利用 Keystone 变换校正目标距离走动会导致杂波脊展宽, 这会降低主瓣杂波附近目标检测性能, 并且随着目标多普勒模糊数的增大, Keystone 变换导致杂波脊展宽更明显, 因此 “KF + OAP + WH” 在主瓣杂波附近出现严重的性能损失的区域也逐渐扩大; 而 “本文方法” 在整个区间内都能获得较好的性能.

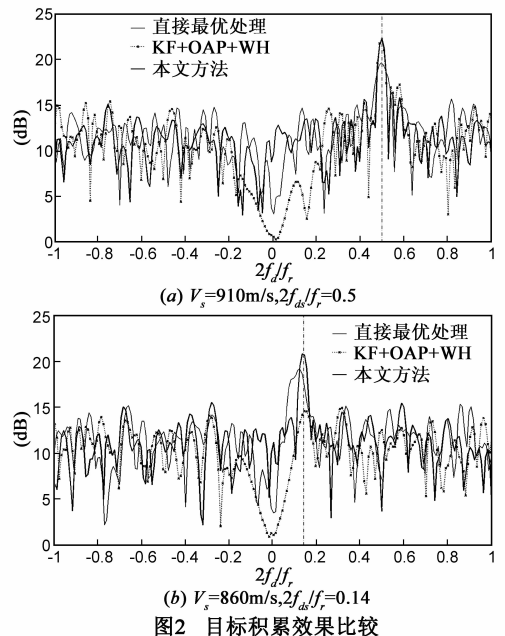


图2 目标积累效果比较

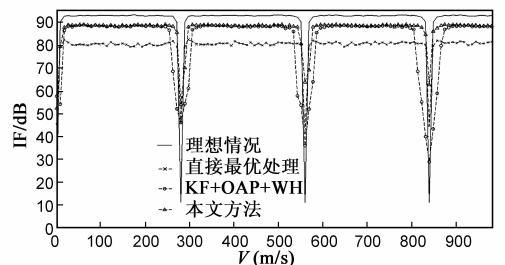


图3 不同处理方法的改善因子比较

## 5 结论

本文提出了一种检测高速空中机动目标的有效方法,该方法先进行杂波抑制,再进行 Keystone 变换校正目标距离走动,从而避免了目标存在多普勒模糊时 Keystone 变换对杂波分布特性的影响进而降低 STAP 性能的问题.为了利用 Wigner-Hough 变换获得更为精确的目标加速度估值,本文还在加速度估计前进行空域波束形成以提高 SNR.根据所估计的值补偿目标加速度所引起的多普勒走动项,从而使目标能量能够得到有效积累;最后进行目标积累检测.通过仿真分析发现,当杂波不存在距离走动时,该方法较之传统的其它方法性能显著提高.

### 参考文献

- [1] R K Klemm. Principles of Space-Time Adaptive Processing [M]. London: The Institution of Electrical Engineers, 2002. 87 - 100.
- [2] 吴仁彪. 机载相控阵雷达空时二维自适应滤波的理论与实现[D]. [博士论文]. 西安: 西安电子科技大学, 1993.  
Wu Renbiao. Space-time adaptive processing for airborne phased array radar: theory and implementation [D]. [PhD Dissertation]. Xi'an: Xidian University, 1993. (in Chinese)
- [3] Brennan L E, Reed I S. Theory of adaptive radar [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1973, AES - 9(2): 237 - 252.
- [4] 保铮, 廖桂生, 等. 相控阵机载雷达杂波抑制的时-空二维自适应滤波[J]. 电子学报, 1993, 21(9): 1 - 7.  
Bao Zheng, Liao Gui-sheng, et al. Adaptive spatial-temporal processing for airborne radars [J]. Acta Electronica Sinica, 1993, 21(9): 1 - 7. (in Chinese)
- [5] Sergio Barbarossa, et al. Space-time-frequency processing of synthetic aperture radar signal [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1999, 30(2): 341 - 358.
- [6] 张顺生, 曾涛, 邢孟道. 基于 Keystone 变换的微弱目标检测[J]. 电子学报, 2005, 33(9): 1675 - 1678.  
Zhang Shun-sheng, Zeng Tao. Weak target detection based on Keystone transforms [J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(9): 1675 - 1678. (in Chinese)
- [7] Xu Rongqing, Cao Zhidao, Liu Yongtan. Method of precise motion compensation for ISAR [A]. Proceedings of SPIE [C]. USA, 1998, 1152: 288 - 295.
- [8] B C Flores. A Robust method for motion compensation of ISAR imager [A]. Proceedings of SPIE [C]. USA, 1991. 1607: 512 - 517.
- [9] B C Flores, A Martinez, C J Chen. Radial motion compensation based on adaptive profile estimation [A]. Proceedings of SPIE [C]. USA, 1995. 2562: 9 - 20.

- [10] 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, 2005, 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, 2005, 28(12): 55 - 59. (in Chinese)
- [11] R P Perry, R C Dipietro, R L Fante. SAR imaging of moving targets [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems, 1999, 35(1): 188 - 200.
- [12] Xing Mengdao, Wu Renbiao. Migration through resolution cell compensation in ISAR imaging [J]. IEEE Geosciences and Remote sensing Letters, 2004, 1(2): 141 - 144.
- [13] J R Fienup. Detecting moving targets in SAR imagery by focusing [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2001, 37(3): 794 - 809.
- [14] Zhang S, Zeng T, Long T, Yuan H. Dim target detection based on keystone transformation [A]. IEEE International Radar Conference [C]. USA: IEEE Press, 2005. 889 - 894.
- [15] Zhou Zhi, et al. Method for detecting ground moving target with range migration [A]. IEEE International Radar Conference [C]. USA: IEEE Press, 2009, 1 - 4.
- [16] 吴仁彪, 等. 机载雷达高速空中微弱目标检测新方法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(6): 1459 - 1464.  
Wu Renbiao, et al. Detection of fast moving dim targets on airborne radar via STAP [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(6): 1459 - 1464. (in Chinese)
- [17] S Barbarossa, A Zanalda. A combined wigner-ville and hough transform for cross-term suppression and optimal detection and parameter estimation [A]. Proceedings of ICASSP [C]. San-rancisco, CA, 1992. 173 - 176.
- [18] Jia Q Q, Wu R B, Li H. Impacts of keystone formatting on space-time adaptive processing in airborne radar [A]. Proceedings of IEEE International Conference on Signal Processing (ICSP) [C]. Beijing, 2010. 2039 - 2042.

### 作者简介

**吴仁彪** 男, 1966 年生于武汉市. 1994 年获西安电子科技大学博士学位, 后在西北工业大学做博士后, 1996 年至今先后到英国和美国以博士后和高级访问学者身份工作近 5 年. 现任中国民航大学副校长, 天津市智能信号与图像处理重点实验室主任, 天津市特聘教授, 博士生导师. 研究方向为阵列信号处理, 自适应阵列信号处理, 现代谱估计及其在雷达、通信、导航中的应用. 已出版学术专著 6 部, 共发表学术论文 300 余篇, 其中在国际刊物和重要国际会议发表论文 120 余篇, 被国际著名的检索工具 SCI 和 EI 收录 150 余篇. 2003 年国家杰出青年基金获得者.

E-mail: rbwu@cauc.edu.cn

**贾琼琼** 女. 1986 年 1 月出生于陕西. 2011 年毕业于中国民航大学通信与信息系统专业, 获硕士学位. 现为中国民航大学教师, 研究方向为雷达信号处理、空时自适应信号处理. 在国内外重要学术期刊和会议上共发表和录用学术论文 10 余篇.

E-mail: qqjia@cauc.edu.cn