

文章编号:1004-9037(2013)02-0219-07

基于修正 STAP 的高速空中机动目标检测方法

贾琼琼 吴仁彪 李海

(中国民航大学天津市智能信号与图像处理重点实验室,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导致其多普勒频率随时间变化(即多普勒走动)。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;对距离走动校正后的数据进行修正 STAP,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;最后进行常规空时二维波束形成来实现目标能量积累。仿真结果证明了该方法的有效性。

关键词:机载雷达;动目标检测;Keystone 变换;空时自适应处理

中图分类号:TN957

文献标志码:A

Detection of Fast Air Maneuvering Targets via Modified STAP

Jia Qionqiong, Wu Renbiao, Li Hai

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

Abstract: Space-time adaptive processing (STAP) is an effective method for moving target detection in airborne radar. However, fast velocity of air target induces serious range walk and Doppler ambiguity. To make things worse, acceleration of the target will result in Doppler spread. Due to the range walk and Doppler spread of maneuvering air target, the performance of the conventional STAP degrades dramatically. To detect the above mentioned fast air maneuvering targets, a new method is proposed, which removes the clutter before Keystone formatting, hence the effects of Keystone formatting for the ambiguity targets' range walk compensation on the clutter distributions and further on the performance of STAP are avoided. Doppler spread of the target is compensated by the estimated acceleration by a modified optimum adaptive processor. 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; moving target detection; Keystone formatting; space-time adaptive processing (STAP)

引 言

机载预警雷达,是预警机主要的传感器和情报来源。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(本文仅考虑存在

径向加速度的情况)目标检测问题。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的强地杂波中,仅用单个通道接收下来的回波信号(时域采样信号)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^[1-10]。(2)目标的高速运动会引起严重的距离走动,这会

导致目标积累效果下降^[11]。(3)目标的径向加速度引起的二次相位项会对回波信号产生时变调制(即产生多普勒走动),此时如果仍采用传统的相参积累方法处理线性调频信号(Linear frequency modulated, LFM)必然也会导致积累效果严重下降。

相位中心偏置天线(Displaced phase center antenna, DPCA)技术是同时利用多个通道接收的空时采样信号进行处理的方法,然而它容易受通道误差等各种非理想因素影响^[1-4]。Brennan 等人^[5]提出了用空时二维采样信号进行自适应处理的方法(即 STAP 技术),其核心思想是利用杂波的空时耦合特性自适应地调节二维滤波器的响应滤除杂波,并保证对目标有足够的增益,它在一定程度上补偿了误差所造成的影响,大大改善了杂波抑制效果^[1-10]。

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。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(包括地杂波)的线性距离走动,被广泛应用于雷达地面动目标成像^[12-18]以及微弱目标检测领域^[11,19]。

文献[20~22]在杂波不存在距离走动的前提下将 Keystone 变换与 STAP 相结合来实现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,径向加速度引起的二次相位项会对回波信号产生时变调制,此时文献[20~24]方法的检测性能将大大下降。针对目标存在多普勒走动时的目标检测,文献[23]提出了一种有效的方法,采用修正的导向矢量对多普勒走动项进行补偿,能够在目标存在多普勒走动的情况下,获得满意的动目标检测结果。但是该方法只针对目标低速运动(即不发生距离走动)的情况下适用。为了实现这类目标的有效检测,本文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,然后利用修正匹配滤波估计出目标加速度,接着根据所估计出的加速度对多普勒走动项进行补偿,最后进行常规空时二维波束形成实现目标能量积累。该

方法不但避免了直接利用 Keystone 变换校正存在多普勒模糊的高速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^[22],而且补偿了由于目标加速度所造成的多普勒走动项,从而实现目标能量的有效积累。通过仿真实验验证了该方法的有效性。

1 问题描述

1.1 理想情况下的数据模型

考虑机载平台上沿航向方向放置的 N 元均匀线阵(Uniform linear array, ULA),阵元间距为 $d=0.5\lambda$, λ 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做一个如下的 $N \times K$ 矩阵^[1]

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

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(即一次数据)可写成

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

式中 \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

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

式中 b_s 为目标回波复幅度, $\mathbf{a}(u_s, v_s)$ 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 $v_s = 2\pi f_d / f_r$, ψ_s 表示目标来向角。其中空时导向矢量 $\mathbf{a}(u_s, v_s)$ 有如下形式

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

式中 \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。

1.2 机动目标数据模型

空中目标的高速运动会导致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,还会导致多普勒走动。此时,将包含目

标回波的一次数据记为

$$\tilde{\mathbf{x}}_{\text{pri}} = b_s \tilde{\mathbf{a}}(u_s, v_s) + \mathbf{x}_c + \mathbf{x}_n \quad (5)$$

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^[21]),此时,杂波数据与目标不存在距离走动时相同,即式(5) \mathbf{x}_c 和 \mathbf{x}_n 的分布特性与式(2)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

$$\tilde{\mathbf{a}}(u_s, v_s) = \tilde{\mathbf{a}}(v_s, a_s) \otimes \mathbf{a}(u_s) \quad (6)$$

式中空域导向矢量 $\mathbf{a}(u_s)$ 保持不变,为了得到 $\tilde{\mathbf{a}}(v_s)$,现考虑机动目标的时域回波模型,假设运动点目标的基带回波信号为

$$s_s(\hat{t}, t_k) = A_s p(\hat{t} - \tau_s) e^{-j2\pi f_c \tau_s} \quad (7)$$

式中 $t_k = kT (k=0, \dots, K-1)$ 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

$$R_s(t_k) = R_{s0} + V_s t_k + \frac{1}{2} a_s t_k^2 \quad (8)$$

式中: 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(8)代入式(7)可得

$$s_s(\hat{t}, t_k) = A_s p \left[\hat{t} - 2 \left[\frac{R_{s0} + V_s t_k + \frac{1}{2} a_s t_k^2}{c} \right] \right] e^{-j2\pi f_c 2 \left(\frac{R_{s0} + V_s t_k + \frac{1}{2} a_s t_k^2}{c} \right)} \quad (9)$$

式中 $\tilde{A}_s = A_s e^{-j\frac{4\pi}{c} f_c R_{s0}}$ 为一复常数,从式(9)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(包括一阶线性距离走动和二阶距离弯曲)。目标的多普勒频率记为 f_{sd}

$$f_{\text{sd}} = -\frac{2}{\lambda} \frac{dR_s(t_k)}{dt_k} = -\frac{2}{\lambda} (V_s + a_s t_k) \quad (10)$$

由以上分析可知

$$\tilde{\mathbf{a}}(v_s) = \begin{bmatrix} \xi_0 \\ \xi_1 e^{-jv_s} e^{-j\pi f_c a_s T^2} \\ \vdots \\ \xi_{K-1} e^{-j(K-1)v_s} e^{-j\pi f_c a_s [(K-1)T]^2} \end{bmatrix}^T \quad (11)$$

可以看出,当目标作匀加速直线运动时,目标时域导向矢量会发生变化,不利于目标能量积累。

2 高速空中机动目标检测新方法

高速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^[21],因此本节提出了一种新方法,该方法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修正匹配滤波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。

2.1 杂波抑制原理

对干扰协方差矩阵 \mathbf{R} 进行特征分解

$$\mathbf{R} = \sum_{l=1}^{NK} \lambda_l \mathbf{u}_l \mathbf{u}_l^H = \sum_{l=1}^Q \lambda_l \mathbf{u}_l \mathbf{u}_l^H + \sigma^2 \sum_{l=Q+1}^{NK} \mathbf{u}_l \mathbf{u}_l^H \quad (12)$$

式中: $\lambda_l (l=1, 2, \dots, Q)$ 代表杂波特征值, σ^2 代表其余的 $NK-Q$ 个噪声特征值, $(\cdot)^H$ 表示共轭转置运算。与杂波特征值对应的特征向量 $\mathbf{u}_l (l=1, 2, \dots, Q)$ 张成杂波子空间 $\mathbf{U}_c = \text{span}\{\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_Q\}$, 杂波子空间的正交补空间的投影矩阵为^[1]

$$\mathbf{P}_c^\perp = \mathbf{I} - \mathbf{U}_c \mathbf{U}_c^H \quad (13)$$

不难证明, $\lim_{n \rightarrow \infty} \sigma^{2n} \mathbf{R}^{-n} = \mathbf{P}_c^\perp$, 且当 $\lambda_l \gg \sigma^2 (l=1, 2, \dots, Q)$ 时, $\mathbf{P}_c^\perp \approx \mathbf{R}^{-1}$ 。本文利用 \mathbf{R}^{-1} 近似代替 \mathbf{P}_c^\perp 对回波数据进行杂波抑制,运算简单,并且也回避了投影矩阵求解过程中阶数(Q)的选取问题。实际中 \mathbf{R} 需要根据参考单元的数据估计得到,这些参考单元的选择必须满足独立同分布(Independent and identically distributed, IID)的条件,将估计得到的杂波协方差矩阵记为 $\hat{\mathbf{R}}$ 。杂波抑制后的数据记为 \mathbf{x}_{proj}

$$\mathbf{x}_{\text{proj}} = \hat{\mathbf{R}}^{-1} \cdot \mathbf{x}_{\text{pri}} \quad (14)$$

2.2 距离走动校正原理

对杂波抑制后的数据进行 Keystone 变换校正目标距离走动,首先将式(9)从快时间域变换到距离频率域,得

$$S_s(f, t_k) = A_s P(f) \cdot \exp \left(-\frac{4\pi(f + f_c)}{c} \left(R_{s0} - \frac{4\pi(f + f_c)}{c} V_s t_k - \frac{4\pi(f + f_c)}{c} \frac{a_s t_k^2}{2} \right) \right) \quad (15)$$

式中 $P(f)$ 为 $p(\hat{t})$ 的傅里叶变换。式(15)的指数相位中第 1 项为常数项,它不影响后面的处理,第 2 项为距离走动项和多普勒偏移项,第 3 项为距离弯曲项和多普勒走动项。当第 3 项中的距离弯曲项可以忽略时,式(15)可以写成

$$S_s(f, t_k) = A_s P(f) \cdot \exp \left(-\frac{4\pi(f + f_c)}{c} \right)$$

$$R_{s0} - \frac{4\pi(f + f_c)V_s t_k}{c} - \frac{4\pi f_c a_s t_k^2}{2c} \quad (16)$$

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

$$f_d = f_{d0} + Ff_r \quad (17)$$

式中 F 为模糊数。定义一个虚拟时间 η_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 变换公式如下

$$S''_s(f, \eta_k) = e^{-j2\pi \frac{f_c}{f+f_c} kF} S'_s(f, \eta_k) = e^{-j2\pi \frac{f_c}{f+f_c} kF} S_s\left(f, \frac{f_c}{f_c + f} \eta_k\right) \quad (18)$$

从式(18)可以看出,当动目标多普勒模糊数 F 取不同值时,意味着 Keystone 变换有不同的修正项

$e^{-j2\pi \frac{f_c}{f+f_c} kF}$ 。将式(18)变换回快时间域可得

$$s''_s(\hat{t}, \eta_k) = \tilde{A}_s p\left(\hat{t} - \frac{2R_{s0}}{c}\right) \cdot e^{-j2\pi f_c V_s \eta_k} e^{-j\pi f_c a_s \eta_k^2} \quad (19)$$

从式(19)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(20)中目标信号变成线性调制频率(Linear modulated frequency, LMF)信号。此时将一次数据记为 \mathbf{x}_{proj}^K ,其中上标 K 表示经过 Keystone 变换。

2.3 多普勒走动项补偿原理

文献[19~20]中,目标距离走动校正后,直接进行常规空时二维波束形成能够有效地实现目标能量积累。但是,当目标机动飞行时,加速度引起的多普勒走动项使得上述方法不再适用。为此,本文采用修正的匹配滤波(即在常规匹配滤波器导向矢量中加入加速度项)对机动目标进行匹配检测,从而可以获得目标加速度估值。根据所获得的加速度值便可以补偿目标的多普勒走动。

修正匹配滤波器的权矢量 $\hat{\mathbf{s}}$ 定义为

$$\hat{\mathbf{s}} = \mathbf{a}(u_0, v_0, \gamma) = \mathbf{a}(u_0) \otimes \mathbf{a}(v_0, \gamma) \quad (20)$$

式中 $\mathbf{a}(v_0, \gamma)$ 为修正的时域导向矢量

$$\mathbf{a}(v_0, \gamma) = \mathbf{a}(v_0) \odot \mathbf{a}(\gamma) \quad (21)$$

式中 $\mathbf{a}(v_0)$ 为初速度对应的时域导向矢量部分, $\mathbf{a}(\gamma)$ 为加速度对应的时域导向矢量部分

$$\mathbf{a}(\gamma) = [1 e^{-j\frac{4\pi\gamma T}{\lambda f_r}} \dots e^{-j(K-1)^2 \frac{4\pi\gamma T}{\lambda f_r}}]^T \quad (22)$$

则修正的匹配滤波器输出为

$$y = \hat{\mathbf{s}}^H \mathbf{x}_{proj}^K \quad (23)$$

图 1 为本文所提新方法流程图,具体步骤可归纳如下:

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

(2) 对抑制杂波后的数据进行 Keystone 变换校正目标距离走动;

(3) 对步骤(2)的结果进行修正匹配滤波处理估计目标加速度,并根据所估计的加速度值补偿目标的多普勒走动项;

(4) 对经上述处理后的空时二维数据乘以 $(\mathbf{a}(u_s, v_s))^H$,即进行常规空时二维波束形成,实现目标能量积累。

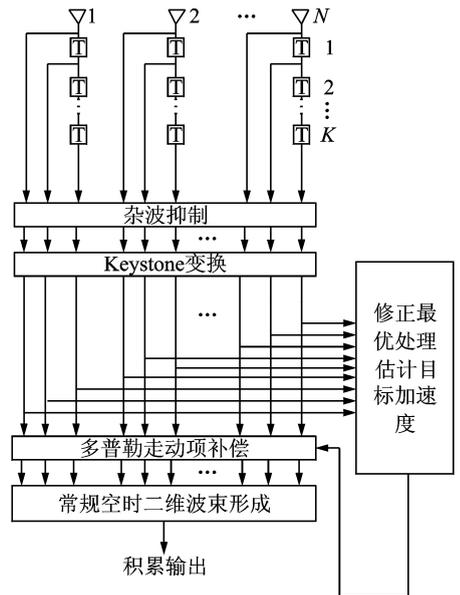


图 1 本文方法实现框图

3 仿真实验

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 $\lambda=0.23$ m,相干处理脉冲数 $K=64$,载机速度 $V_p=140$ m/s,输入信噪比(Signal-to-noise ratio, SNR)为 -10 dB,杂噪比(Clutter-to-noise ratio, CNR)为 60 dB,载机高度 $H=8000$ m,发射脉冲重复频率 $f_r=2434.8$ Hz,雷达距离分辨率为 $\Delta R=10$ m,目标运动加速度为 $a_s=1000$ m/s²。根据上述参数计算可知,在相干处理时间内杂波的最大走动量为 $R_{max}=3.6$ m $<$ $\Delta R/2$,可以忽略掉杂

波走动的影响。

图 2 给出了目标速度为 910 m/s,对应的多普勒模糊数为 3 时不同情况下回波数据的功率谱。图 2 中 x 横轴表示模糊后的归一化多普勒频率, y 轴为空域锥角余弦, z 轴表示功率值。图 2(a)为总

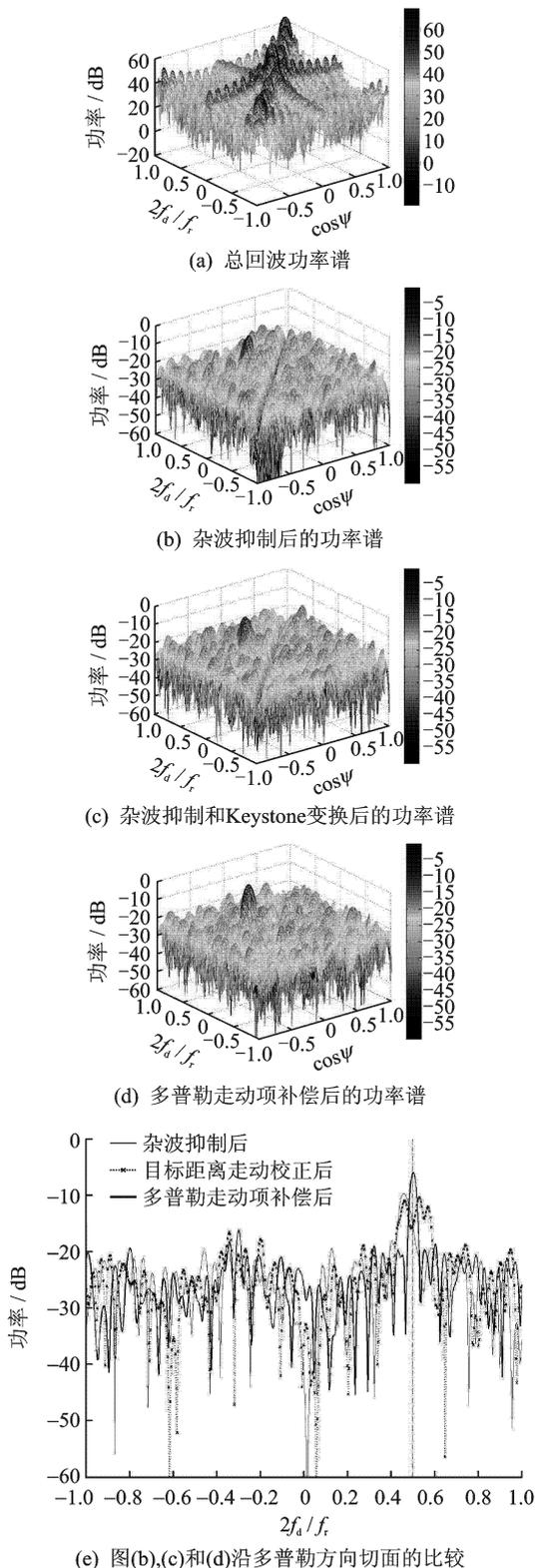


图 2 $V_s=910$ m/s 时回波数据的功率谱

回波功率谱;图 2(b)为经过本文所述方法抑制杂波后的功率谱;图 2(c)为经过 Keystone 变换校正目标距离走动后的功率谱;图 2(d)为经过本文所述多普勒走动项补偿后的功率谱。从图 2(b)可以看出,尽管杂波被抑制,但是距离走动和多普勒走动项会导致目标主瓣展宽,目标能量非常微弱;经过 Keystone 变换校正目标距离走动后,目标回波被校正到同一距离单元,但是由于多普勒走动项的影响,目标仍未得到有效积累,如图 2(c);经过对由加速度引起的多普勒走动项进行补偿后能量得到了有效的积累,多普勒分辨率显著提高,如图 2(d)。图 2(e)沿多普勒方向分别取图 2(b),2(c),2(d)的一个切面对比,可以更加明显地看出,经过目标距离走动校正后,目标能量并未提高,但是目标信号形式发生了变化,变成一个线性调频信号的形式;经过多普勒走动项补偿后,目标能量显著增加,多普勒分辨率也大大提高。

图 3 比较了不同处理方法目标能量积累效果。其中两个目标速度分别为 854 m/s 和 910 m/s,对应的多普勒频率(有模糊的归一化多普勒频率)分别为 0.1 和 0.5。“直接最优处理”是直接经最优处理器处理的目标能量积累效果;“KF+OAP”指先进行 Keystone 变换校正目标距离走动,再进行杂波抑制,最后利用修正最优处理器估计目标加速度并对其进行补偿;“新方法”是经本文所提方法处理后的目标能量积累效果。可以看出“直接最优处理”不能积累任何一个目标,这正是目标距离走动所导致的结果;“KF+OAP”可以有效积累目标 2,但不能积累目标 1,这是由于目标存在多普勒模糊时,Keystone 变换校正目标距离走动的同时导致杂波脊展宽和杂波抑制性能下降,且目标 1 处于展宽后的杂波脊上,因此不能被检测到;然而“本文方法”对两个目标均能够有效积累。

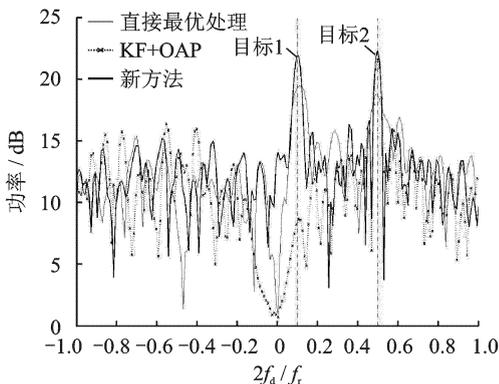


图 3 目标能量积累效果比较

图 4 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。图 4 只给出了目标速度取正值的结果,当目标速度取负值时的结果与正值部分关于 $V_s=0$ 对称。“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含义同图 3。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”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。

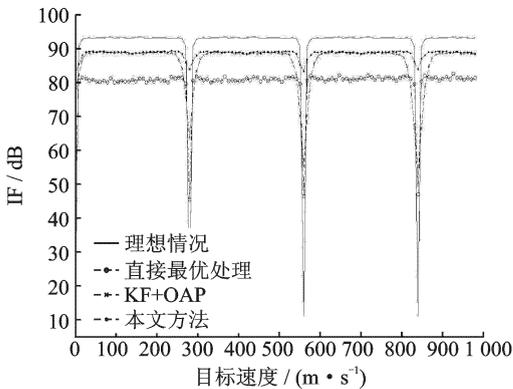


图 4 不同处理方法改善因子比较

4 结束语

本文提出了一种先进行杂波抑制,再进行 Keystone 变换校正目标距离走动的新方法,从而避免了目标存在多普勒模糊时 Keystone 变换影响杂波分布特性,进而降低 STAP 性能的问题;然后利用修正匹配滤波器估计出目标的加速度,并根据所估计的值补偿目标加速度所引起的多普勒走动项;最后进行常规空时二维波束形成实现目标积累。仿真实验证明,当杂波不存在距离走动时,该方法较之传统方法性能显著提高。另外需要说明的是,本文方法只针对载机运动速度较低以及单目标(或模糊数相同的多个目标)的情况有效,当载机运动速度较高时会导致杂波也产生距离走动,这就需要进一步校正杂波距离走动;当存在多个模糊数

不同的目标时,可采用基于 Clean 思想的方法,逐个校正并检测各模糊数不同的目标。

参考文献:

- [1] Klemm R K. 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及实现[D]. 西安:西安电子科技大学,1993:9-21.
Wu Renbiao. Space-time adaptive processing for airborne phased array radar: theory and implementation [D]. Xi'an, China: Xidian University, 1993:9-21.
- [3] Wang H S C. Mainlobe clutter cancellation by DPCA for space-based radars [J]. 1991 IEEE Aerospace Applications Conference Digest, 1991, 28 (33): 1-128.
- [4] 王永良,彭应宁. 空时自适应信号处理[M]. 北京:清华大学出版社,2000:26-43.
Wang Yongliang, Peng Yingning. Space time adaptive processing [M]. Beijing: Tsinghua University Press,2000:26-43.
- [5] Brennan L E, Reed I S. Theory of adaptive radar [J]. IEEE Trans on Aerosp Electron Syst, 1973, 9: 237-252.
- [6] Klemm R. Introduction to space-time adaptive processing [J]. Electronics & Communication Engineering Journal, 1999, 2(5):5-12.
- [7] Ward J. Space-time adaptive processing for airborne radar[R]. Technical Report 1015, MIT Lincoln laboratory, 1994.
- [8] Dipietro R C. Extended factored space-time processing for airborne radar systems [C]// Proceeding of the 26th Asilomar Conference on Signal, System, and Computers. 1992: 425-430.
- [9] 保铮,廖桂生,吴仁彪,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, 1993,2(1): 1-7.
Bao Zheng, Liao Guisheng, Wu Renbiao, et al. Adaptive spatial-temporal processing for airborne radars [J]. Acta Electronica Sinica, 1993, 2(1): 1-7.
- [10] Barbarossa Sergio, Farina Alfonso. Space-time-frequency processing of synthetic aperture radar signal [J]. IEEE Trans Aerospace and Electronic Systems, 1999, 30(2):341-358.
- [11] 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 Shunsheng, Zeng Tao, Xing Mengdao. Weak

- target detection based on Keystone transform [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2005, 33(9):1675-1678.
- [12] Perry R P, Dipietro R C, Fante R L. SAR imaging of moving targets [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems*, 1999, 35(1):188-200.
- [13] 原浩娟,高梅国,姜伟,等. 基于 Knab 内插核的 Keystone 变换[J]. *数据采集与处理*, 2010, 25(4): 425-429.
Yuan Haojuan, Gao Meiguo, Jiang Wei, et al. Keystone transform Using Knab interpolation kernel[J]. *Journal of Data Acquisition & Processing*, 2010, 25(4): 425-429.
- [14] Xing Mengdao, Wu Renbiao. Migration through resolution cell compensation in ISAR imaging [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2004, 1(2):141-144.
- [15] Li Y, Wu R, Xing M, et al. Inverse synthetic aperture radar imaging of ship target with complex motion [J]. *IET Radar Sonar Navig*, 2008, 2(6):395-403.
- [16] Zhou F, Wu R, Xing M, et al. Approach for single channel SAR ground moving target imaging and motion parameter estimation [J]. *IET Radar Sonar Navig*, 2007, 1(1):59-66.
- [17] Fienup J R. Detecting moving targets in SAR imagery by focusing [J]. *IEEE Trans Aerosp Electron Syst*, 2001, 37(3): 794-809.
- [18] 朱圣棋,廖桂生,周争光,等. 机载双通道 SAR 地面慢速运动目标参数估计方法[J]. *系统工程与电子技术* 2009, 31(12):2048-2052.
Zhu Shengqi, Liao Guisheng, Zhou Zhengguang, et al. Approach to ground slowly moving target parameter estimation for airborne dual-channel SAR system [J]. *Systems Engineering and Electronic*, 2009, 31(12): 2048-2052.
- [19] Zhang S, Zeng T, Long T, et al. Dim target detection based on Keystone transformation [C]// *IEEE 2005 International Radar Conference*, 2005(9-12): 889-894.
- [20] Zhou Zhi, Su Zhigang, Wu Renbiao. Method for detecting ground moving target with range migration [C]// *IET International Radar Conference*. Guilin, China:[s. n.], 2009:1-4.
- [21] Wu Renbian, Jia Qionqiong, Li Hai. A novel STAP method for the detection of fast dim air moving targets[C]// *IEEE International Conference on Signal Processing*. Beijing, China: [s. n.], 2010: 2160-2163.
- [22] 吴仁彪,贾琼琼,李海. 机载雷达高速空中微弱动目标检测新方法[J]. *电子与信息学报*, 2011, 33(6): 1459-1464.
Wu Renbiao, Jia Qionqiong, Li Hai. Detection of fast moving dim targets on airborne radar via STAP [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(6):1459-1464.
- [23] 王冬梅. 机载雷达空中机动目标检测[D]. 北京:中国民航大学, 2010:27-33.
Wang Dongmei. Maneuvering target detection on the airborne radar [D]. Beijing: Civil Aviation University of China, 2010:27-33.
- [24] Jia Q Q, Wu R B, Li H. Impacts of Keystone formatting on space-time adaptive processing in airborne radar [C]// *IEEE International Conference on Signal Processing*. Beijing, China: [s. n.], 2010: 2164-2167.

作者简介:贾琼琼(1986-),女,硕士研究生,研究方向:雷达信号处理、空时自适应信号处理;吴仁彪(1966-),男,教授、博士生导师,研究方向:自适应信号处理,高分辨率雷达成像与自动目标识别,民航无线电干扰检测与自适应抑制,民航遥感信息处理与应用,E-mail:rbwu@vip.163.com;李海(1976-),男,副教授,研究方向:干涉合成孔径雷达信号处理、空时自适应信号处理。

