

## 机载雷达高速空中微弱动目标检测新方法

吴仁彪<sup>\*①②</sup> 贾琼琼<sup>①</sup> 李海<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(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)

<sup>②</sup>(深圳大学 ATR 国防科技重点实验室智能信息处理研究室 深圳 518060)

**摘要:** 该文分析了机载雷达高速微弱空中动目标检测问题, 指出直接对总回波数据进行 Keystone 变换校正存在多普勒模糊的动目标的距离走动时, 会导致杂波脊展宽、杂波自由度增加从而降低 STAP 性能。为了解决这一问题, 该文提出了一种新方法, 该方法首先进行杂波抑制, 然后利用 Keystone 变换校正目标距离走动, 最后对目标距离走动校正后的数据进行常规空时 2 维波束形成实现目标积累, 从而避免目标与杂波模糊数不同时, 直接对回波数据进行 Keystone 变换校正动目标距离走动的同时影响杂波分布特性进而降低 STAP 性能的问题。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; 杂波自由度; Keystone 变换; 空时自适应处理

中图分类号: TN 959.73

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)06-1459-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.01131

## Detection of Fast Moving Dim Targets on Airborne Radar via STAP

Wu Ren-biao<sup>①②</sup> Jia Qiong-qiong<sup>①</sup> Li Hai<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(Tianjin Key Laboratory for Advanced Signal Processing, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

<sup>②</sup>(Intelligent Information Institute of ATR Lab, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

**Abstract:** The impacts of Keystone formatting on SATP are first analyzed. Conclusions are obtained from the study that Keystone formatting degrades the performance of STAP by broadening the clutter ridge and increasing the number of clutter degree of freedom. Based on the above reasons, a novel STAP method is proposed for the detection of fast air moving dim targets when the clutter has no range walk, which removes the clutter firstly, then Keystone formatting is applied for the target's range walk compensation, finally, target is accumulated by conventional space-time beamforming. Hence, the effects of Keystone formatting on the clutter distributions and further on the performance of STAP are avoided. Therefore the good detection performance of fast air moving dim target can be achieved. Effectiveness of the new method is verified via simulation examples.

**Key words:** Airborne radar; Moving target detection; Degree Of Freedom (DOF) of clutter; Keystone formatting; Space-Time Adaptive Processing (STAP)

### 1 引言

STAP 是一种新的有效的机载雷达地杂波抑制手段<sup>[1-4]</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)。然而, 现代隐身技术的日益成熟使得空中动目标的雷达散射截面减小了 1~2 个数量级<sup>[5]</sup>, 为了实现这类目标的检测必须进行长时间相参积累。在此情况下目标会发生严重的距离走动, 这会导致积累效果下

降。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的线性距离走动, 被广泛应用于雷达地面动目标成像<sup>[6-16]</sup>以及微弱目标检测领域<sup>[5,7-20]</sup>。

将 Keystone 变换与 STAP 相结合为高速微弱空中动目标的检测提供了一条可能的途径<sup>[21]</sup>。但是, 由于高速空中动目标存在多普勒模糊, 在杂波不存在多普勒模糊的情况下会导致目标和杂波的模糊数不同, 此时利用 Keystone 变换校正目标距离走动的同时会影响杂波空时 2 维特性, 进而降低 STAP 性能。这个问题我们未见有公开报导。

针对上述问题, 在假设杂波不存在距离走动的前提下, 本文首先分析了 Keystone 变换对 STAP

2010-10-20 收到, 2011-02-18 改回

国家自然科学基金(60736009), 深圳大学 ATR 国防科技重点实验室开放基金和中央高校基本科研业务费(ZXH2009D018)联合资助课题

\*通信作者: 吴仁彪 rbwu@cauc.edu.cn

性能的影响,并提出了一种新的高速微弱空中动目标检测方法,该方法在目标距离走动校正之前进行杂波抑制,从而避免了上述问题。最后,通过仿真实验验证了该方法的有效性。

## 2 Keystone 变换原理

令  $t_k$  表示慢时间,  $\hat{t} = t - t_k$  表示快时间,  $p(\cdot)$  为回波包络,  $f_c$  为载波频率,  $A_s$  为点目标回波的幅度。假设目标在 CPI 内做匀速直线运动,则目标与雷达之间的瞬时距离  $R_s(t_k) = R_{s0} + V_s t_k$ ,  $R_{s0}$  为 0 时刻目标与雷达之间的距离,  $V_s$  为目标运动速度。则点目标的基带回波为

$$s_s(\hat{t}, t_k) = \tilde{A}_s p\left(\hat{t} - \frac{2R_{s0}}{c} - \frac{2V_s t_k}{c}\right) \cdot e^{-j\frac{4\pi}{c}V_s f_c t_k} \quad (1)$$

其中  $\tilde{A}_s = A_s e^{-j(4\pi/c)f_c R_{s0}}$  为一复常数,从式(1)可以看出,对于不同的发射脉冲,目标回波信号峰值位置不同,即产生了距离走动。将  $s_s(\hat{t}, t_k)$  从快时间域变换到距离频率域,得

$$S_s(f, t_k) = \tilde{A}_s P(f) e^{-j\frac{4\pi}{c}f R_{s0}} e^{-j\frac{4\pi}{c}(f_c + f)V_s t_k} \quad (2)$$

式中  $P(f)$  为  $p(\hat{t})$  的傅里叶变换,距离走动表现为第 2 个指数项中  $f$  与  $t_k$  的耦合。

定义一个虚拟时间  $\eta_k$ , 所谓的 Keystone 变换就是进行尺度变换<sup>[6]</sup>。

$$t_k = \frac{f_c}{f_c + f} \eta_k \quad (3)$$

代入式(2)有如下结果:

$$S'_s(f, \eta_k) = \tilde{A}_s P(f) e^{-j\frac{4\pi}{c}f R_{s0}} e^{-j\frac{4\pi}{c}V_s f_c \eta_k} \quad (4)$$

从式(4)可以看出,快时间频率与慢时间之间的耦合已消除,也就是说距离走动得到了校正。

如果目标存在多普勒模糊,必须根据多普勒频率的模糊程度对 Keystone 变换公式进行修正。Keystone 变换前目标的多普勒频率用  $f_{du}$  表示,则  $f_{du}$  与模糊后的多普勒频率  $f_d$  有如下关系:

$$f_{du} = f_d + Ff_r = \frac{2V_{s0}(f + f_c)}{c} + \frac{2V_{sF}(f + f_c)}{c} \quad (5)$$

其中  $F$  为模糊数,  $f_r$  为脉冲重复频率,  $V_s = V_{s0} + V_{sF}$ 。对式(4)进行修正就可以得到存在多普勒模糊情况下的 Keystone 变换。

$$S''_s(f, \eta_k) = e^{-j2\pi\frac{f}{f+f_c}kF} S'_s(f, \eta_k) \quad (6)$$

## 3 Keystone 变换对 STAP 性能的影响

本节首先介绍空-时2维数据模型,然后分析目标存在多普勒模糊(也就是本文所重点研究的高速空中微弱动目标)时Keystone变换对STAP的影响。

### 3.1 空-时2维数据模型

考虑机载平台上沿航向方向放置的  $N$  元均匀线阵,阵元间距为  $d = 0.5\lambda$ ,  $\lambda$  为工作波长,一个 CPI 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  $N \times K$  的矩阵为

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1K} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2K} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N1} & x_{N2} & \cdots & x_{NK} \end{bmatrix} \quad (7)$$

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 3 维数据矩阵。将式(7)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

$$\mathbf{x}_{\text{pri}} = \mathbf{x}_s + \mathbf{x}_c + \mathbf{x}_n \quad (8)$$

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:

$$\mathbf{x}_s = b_s \mathbf{a}(u_s, v_s) \quad (9)$$

$b_s$  为目标回波复幅度,为一复标量,  $\mathbf{a}(u_s, v_s)$  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。其中空时导向矢量  $\mathbf{a}(u_s, v_s)$  有如下形式:

$$\mathbf{a}(u, v) = \mathbf{a}(v) \otimes \mathbf{a}(u) \quad (10)$$

$\otimes$  表示 Kronecker 积,  $\mathbf{a}(v)$  为时域导向矢量,  $\mathbf{a}(u)$  为空域导向矢量。

当目标存在距离走动时,包含目标回波的一次数据记为

$$\tilde{\mathbf{x}}_{\text{pri}} = b_s \tilde{\mathbf{a}}(u_s, v_s) + \mathbf{x}_c + \mathbf{x}_n \quad (11)$$

假设杂波无距离走动,故  $\mathbf{x}_c$  和  $\mathbf{x}_n$  保持不变,而  $\tilde{\mathbf{a}}(u_s, v_s) = \tilde{\mathbf{a}}(v) \otimes \mathbf{a}(u)$  是存在距离走动的目标导向矢量,其中空域导向矢量  $\mathbf{a}(u)$  保持不变,  $\tilde{\mathbf{a}}(v)$  为考虑目标距离走动后的时域导向矢量。

令  $A_{ci}$  表示第  $i$  个杂波散射点回波的幅度,  $\psi_{ci}$  为第  $i$  个杂波散射点与天线相位中心之间的夹角,  $V_p$  为载机速度。假设载机在 CPI 内沿航向做匀速直线运动,则载机与第  $i$  个杂波散射点之间的斜距可表示为  $R_{ci}(t_k) = R_{ci0} + V_p t_k \cos \psi_{ci}$ , 当杂波的最大走动量  $R_{c\max}$  与雷达距离分辨率  $\Delta R$  满足  $R_{c\max} = 2V_p \times (K - 1) \times T / c \leq \Delta R / 2$  时,可以不考虑杂波距离走动的影响<sup>[11]</sup>, 此时,由所有杂波散射点叠加而成的杂波基带回波信号可以写成

$$s_c(\hat{t}, t_k) \simeq \sum_{i=1}^{N_c} A_{ci} \cdot p\left(\hat{t} - \frac{2R_{ci0}}{c}\right) \cdot e^{-j2\pi f_c(2R_{ci0}/c + 2V_p(\cos\psi_{ci})t_k/c)} \quad (12)$$

雷达接收到包含目标和杂波的总的回波数据可由式(1)和式(12)的和得到。

$$s(\hat{t}, t_k) = s_s(\hat{t}, t_k) + s_c(\hat{t}, t_k) \quad (13)$$

### 3.2 目标存在多普勒模糊时Keystone对STAP的影响

对包含目标和杂波的数据进行Keystone变换, 首先将式(13)变换到距离频域得

$$S(f, t_k) = \tilde{A}_s P(f) e^{-j\frac{4\pi}{c}fR_{s0}} e^{-j\frac{4\pi}{c}(f_c+f)V_s t_k} + \sum_{i=1}^{N_c} \tilde{A}_{ci} P(f) e^{-j\frac{4\pi}{c}fR_{ci0}} e^{-j\frac{4\pi}{c}f_c V_p t_k \cos\psi_{ci}} \quad (14)$$

$\tilde{A}_{ci} = A_{ci} e^{-j(4\pi/c)f_c R_{ci0}}$  为复常数。进行如式(6)所示的Keystone变换:

$$S''(f, \eta_k) = \tilde{A}_s P(f) e^{-j\frac{4\pi}{c}fR_{s0}} e^{-j\frac{4\pi}{c}f_c V_s \eta_k} + \sum_{i=1}^{N_c} \tilde{A}_{ci} P(f) e^{-j\frac{4\pi}{c}fR_{ci0}} e^{-j\frac{4\pi}{c}V_p(f-f)\eta_k \cos\psi_{ci}} \cdot e^{-j\frac{4\pi}{c}f_c V_p \eta_k} \quad (15)$$

忽略掉小于半个距离单元的走动项得

$$S''(f, \eta_k) \simeq \tilde{A}_s P(f) e^{-j\frac{4\pi}{c}fR_{s0}} e^{-j\frac{4\pi}{c}f_c V_s \eta_k} + \sum_{i=1}^{N_c} \tilde{A}_{ci} P(f) e^{-j\frac{4\pi}{c}fR_{ci0}} e^{-j\frac{4\pi}{c}V_p f_c \eta_k \cos\psi_{ci}} \cdot e^{-j\frac{4\pi}{c}f_c V_p \eta_k} \quad (16)$$

由式(5)可知  $V_{sF} = Ff_c/2(f+f_c)$ , 将其代入式(16)可得

$$S''(f, \eta_k) \simeq \tilde{A}_s P(f) e^{-j\frac{4\pi}{c}fR_{s0}} e^{-j\frac{4\pi}{c}f_c V_s \eta_k} + \sum_{i=1}^{N_c} \tilde{A}_{ci} P(f) e^{-j\frac{4\pi}{c}fR_{ci0}} e^{-j\frac{4\pi}{c}V_p f_c \eta_k \cos\psi_{ci}} \cdot e^{-j\frac{4\pi}{c}f_c \frac{Ff_c}{2(f+f_c)} \eta_k} \quad (17)$$

当满足  $f \ll f_c$  时, 可利用近似关系  $1/(f_c+f) \simeq 1/f_c - f/f_c^2$ , 并将结果变换回快时间域得

$$s''(\hat{t}, \eta_k) \simeq \tilde{A}_s \cdot p\left(\hat{t} - \frac{2R_{s0}}{c}\right) \cdot e^{-j2\pi f_c V_s \eta_k} + \sum_{i=1}^{N_c} \tilde{A}_{ci} \cdot p\left(\hat{t} - \frac{2R_{ci0}}{c} + \frac{Ff_r}{f_c} \eta_k\right) \cdot e^{-j\frac{4\pi}{c}V_p f_c \eta_k \cos\psi_{ci}} \quad (18)$$

从式(18)可以看出, 当目标存在多普勒模糊时, Keystone变换校正目标距离走动的同时会导致杂

波产生了新的距离走动, 且目标模糊数越大这一走动就更加严重。Keystone变换对杂波的这一影响会导致杂波的空时耦合特性受到影响。当杂波特性受到影响时, STAP性能将会受到相应的损失<sup>[1-4]</sup>。并且, 为了有效地抑制地杂波, 自适应系统的自由度必须大于杂波自由度。因此, 当杂波空时耦合特性受到影响而导致杂波自由度增加时, 必须增加系统自由度来满足杂波抑制的要求。

## 4 高速空中动目标检测新方法

从上一节的分析可知, 高速微弱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变换校正存在多普勒模糊的动目标距离走动时会影响杂波特性进而降低后续STAP处理性能。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变换校正存在多普勒模糊的动目标距离走动, 从而避免了上述问题。图1为所提新方法流程图, 具体可描述如下:

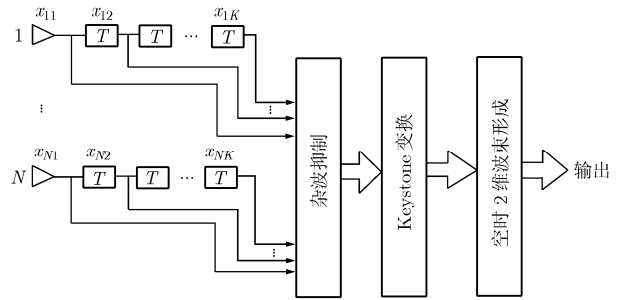


图1 本文方法实现框图

步骤1 对雷达接收到的总回波数据进行杂波抑制。

这里给出本文杂波抑制的原理。假设干扰协方差矩阵为  $\mathbf{R}$ , 对  $\mathbf{R}$  进行特征分解可得到如下形式:

$$\mathbf{R} = \sum_{l=1}^{NK} \lambda_l \mathbf{u}_l \mathbf{u}_l^H = \sum_{l=1}^Q \lambda_l \mathbf{u}_l \mathbf{u}_l^H + \sigma^2 \sum_{l=Q+1}^{NK} \mathbf{u}_l \mathbf{u}_l^H \quad (19)$$

式(19)中  $\lambda_l$  ( $l=1, 2, \dots, Q$ ) 代表杂波特征值,  $\sigma^2$  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  $\mathbf{U}_c = \text{span}\{\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_Q\}$ 。则杂波子空间的正交补空间的投影矩阵为<sup>[1]</sup>

$$\mathbf{P}_c^\perp = \mathbf{I} - \mathbf{U}_c \mathbf{U}_c^H \quad (20)$$

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

干扰协方差矩阵  $\mathbf{R}$  通常未知, 需要根据满足独立同分布条件的参考单元的数据估计得到, 本文正是利用估计得到的干扰空时 2 维协方差矩阵  $\hat{\mathbf{R}}$  的逆矩阵  $\hat{\mathbf{R}}^{-1}$  来实现杂波抑制的。

步骤 2 对抑制杂波后的数据进行 Keystone 变换校正目标距离走动。

步骤 3 对距离走动校正后的空时 2 维数据乘以  $(\mathbf{a}(u_s, v_s))^H$  进行常规空时 2 维波束形成, 实现目标积累。

### 5 仿真分析

本节将首先通过仿真实验验证Keystone变换对杂波的影响, 进而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  $V_p = 140 \text{ m/s}$ , 输入信噪比为  $-10 \text{ dB}$ , 杂噪比为  $60 \text{ dB}$ ,

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  $\Delta R = 10 \text{ m}$ 。

图 2 比较了不同情况下机载相控阵雷达杂波谱。图 2(a)为理想情况下杂波最小方差谱, 图 2(b), 2(c)和 2(d)分别是目标多普勒模糊数为 1, 2 和 3 的情况下经过 Keystone 变换后的杂波谱。从图 2 可以看出, 理想情况下杂波在空时 2 维平面上是沿对角线分布的一条理想的杂波脊, 经过有模糊的 Keystone 变换之后杂波脊被展宽, 并且模糊数越大变换后杂波脊的展宽也越严重。这一实验结果与文中理论分析一致。杂波脊展宽会导致空时 2 维平面内目标落入杂波内的概率增加, 不利于动目标检测。目标存在多普勒模糊、并且模糊后的多普勒频率接近零(这里指归一化多普勒频率)时, 其被检测到的可能性就会降低, 并且目标模糊数越大, 影响的零频附近的范围也就越广。

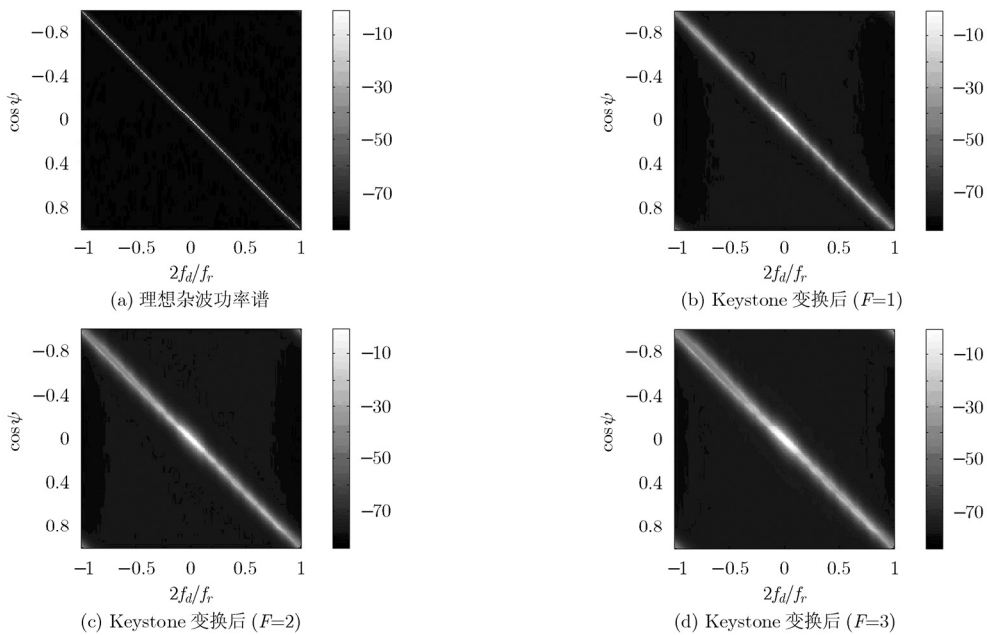


图 2 Keystone 变换前后杂波功率谱的空时 2 维分布

图 3 比较了 Keystone 变换前后杂波的特征谱分布情况。“Keystone 变换前”表示理想情况下杂波特征谱; “Keystone 变换后 ( $F=1$ )”, “Keystone 变换后 ( $F=2$ )”和 “Keystone 变换后 ( $F=3$ )”分别表示经过模糊数为 1, 2 和 3 的 Keystone 变换之后杂波特征谱。从图 3 可以看出, 理想情况下杂波自由度为  $N + K - 1 = 79$ , 而经过模糊数为 1 的 Keystone 变换之后杂波自由度明显增加; 随着目标多普勒模糊数的增加, Keystone 变换后杂波自由度增加的更多。

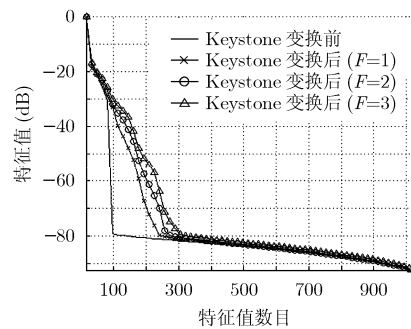


图 3 不同情况下杂波特征谱比较

图4比较了不同处理方法的检测性能。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(Optimum Adaptive Processor, OAP)的改善因子曲线,它可以作为最佳性能的上界;“直接最优处理”是指当目标存在距离走动时直接经OAP处理的改善因子曲线;“KF+OAP”指先进行Keystone变换校正目标距离走动,再进行OAP处理的改善因子曲线;“本文方法”是经本文方法处理的改善因子曲线。从图4可以看出,当目标速度处于 $V_s = 0 \text{ m/s} \sim 140 \text{ m/s}$ 范围内时,不存在多普勒模糊,并且由于运动速度较小故距离走动的影响基本可以忽略,此时直接进行空时最优处理器处理便可以达到很好的性能。但是,随着目标速度的增大,目标距离走动的影响逐渐变大,若不考虑这一影响将会导致严重的性能损失,如“直接最优处理”;而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;“本文

方法”在整个区间内基本上都能达到与“理想情况”相当的性能,并且随着模糊数的增加,“本文方法”在主瓣杂波上的性能逐渐变好,出现这一反常现象是由于随着目标多普勒模糊数的增大距离走动也就更严重,目标主瓣展宽的现象也就更严重,这就意味着在进行杂波抑制时只有很少量的目标能量被当做干扰抑制掉,而其余大部分能量不受影响,经后续的距离走动校正及空时2维积累这部分能量得到了有效的积累,因而能够获得较高的增益。

## 6 结束语

本文通过研究分析了发现,直接对总回波数据进行Keystone变换校正存在多普勒模糊的动目标距离走动时会影响杂波分布特性,导致杂波脊展宽、杂波自由度增加,进而会降低STAP性能。为了解决这一问题,本文提出了一种新的高速空中微弱动目标检测方法,该方法首先对回波数据进行杂波抑制,对杂波抑制后的数据进行Keystone变换来校正存在多普勒模糊的动目标距离走动,从而避免了上述问题。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。

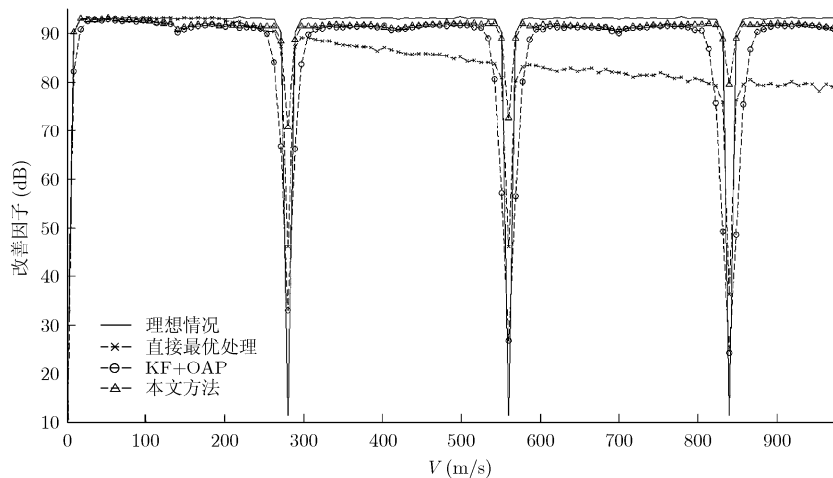


图4 不同处理方法改善因子比较

## 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]. [博士论文], 西安电子科技大学, 1993.  
Wu Ren-biao. Space-time adaptive processing for airborne phased array radar: theory and implementation [D]. [Ph. D. dissertation], Xidian University, 1993.
- [3] Brennan L E and Reed I S. Theory of adaptive radar [J]. *IEEE Transactions on Aerospace Electron System*, 1973, 9(2): 237-252.
- [4] 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, 21(9): 1-7.  
Bao Zheng, Liao Gui-sheng, and Wu Ren-biao, *et al.*. Adaptive spatial-temporal processing for airborne radars [J]. *Acta Electronica Sinica*, 1993, 21(9): 1-7.
- [5] 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, and Xing Meng-dao. Weak target detection based on Keystone transform [J]. *Acta*

- Electronica Sinica*, 2005, 33(9): 1675–1678.
- [6] Perry R P, Dipietro R C, and Fante R L. SAR imaging of moving targets [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems*, 1999, 35(1): 188–200.
- [7] Lü Xiao-lei, Xing Meng-dao, and Wan Chun-ru, *et al.* ISAR imaging of maneuvering targets based on the range centroid Doppler technique [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2010, 19(1): 141–153.
- [8] Zhu Dai-yin, Mao Xin-hua, and Li Yong, *et al.* Far-field limit of PFA for SAR moving target imaging [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2010, 46(2): 917–929.
- [9] Sun Guang-cai, Guo Rui, and Xing Meng-dao, *et al.* Comparison of several methods for high speed detection target with narrow bandwidth [C]. 2nd Asian-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, Xi'an, China, Oct. 26–30, 2009: 767–770.
- [10] 苏军海, 邢孟道, 保铮. 宽带机动目标检测[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(6): 1283–1287.  
Su Jun-hai, Xing Meng-dao, and Bao Zheng. Wideband radar detection for maneuvering target [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(6): 1283–1287.
- [11] Xing Meng-dao, Jiang Xiu-wei, and Wu Ren-biao, *et al.* Motion compensation for UAV SAR eased on raw radar data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(8): 2870–2883.
- [12] LI Y, Wu R, Xing M, and Bao Z. Inverse synthetic aperture radar imaging of ship target with complex motion [J]. *IET Radar Sonar Navigation*, 2008, 2(6): 395–403.
- [13] Zhou F, Wu R, Xing M, and Bao Z. Approach for single channel SAR ground moving target imaging and motion parameter estimation [J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2007, 1(1): 59–66.
- [14] Soumekh M and Himed B. Moving target detection and imaging using an X-band along-track monopulse SAR [J]. *IEEE Transactions on Aerospace Electronics Systems*, 2002, 38(1): 315–333.
- [15] Fienup J R. Detecting moving targets in SAR imagery by focusing [J]. *IEEE Transactions on Aerospace Electronics Systems*, 2001, 37(3): 794–809.
- [16] 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 Sheng-qi, Liao Gui-sheng, and Zhou Zheng-guang, *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.
- [17] Zhang S, Zeng T, and Long T, *et al.* Dim Target Detection Based on Keystone Transformation [C]. IEEE 2005 International Radar Conference, Virginia, USA, May 9–12, 2005: 889–894.
- [18] Wu Zhao-ping, He Xue-hui, and Su Tao. Coherent integration detection of multiple high speed targets with range migration and Doppler spread [C]. 2009 IET International Radar Conference, Guillin, China April 20–22, 2009: 1–5.
- [19] Su J, Xing M, and Wang G, *et al.* High-speed multi-target detection with narrowband radar [J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2010, 4(4): 595–603.
- [20] 余吉, 许稼, 汤俊, 彭应宁. 基于 Keystone 变换的改进雷达目标长时间积累[J]. 雷达科学与技术, 2008, 11(6): 454–458.  
Yu Ji, Xu Jia, and Tang Jun, *et al.* An improved Keystone-transform based method for long-time coherent integration of radar target [J]. *Radar Science and Technology*, 2008, 11(6): 454–458.
- [21] Zhou Zhi, Su Zhi-gang, and Wu Ren-biao. Method for detecting ground moving target with range migration [C]. IET International Radar Conference 2009, Guillin, China, April 20–22, 2009: 1–4.
- 吴仁彪: 男, 1966 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为自适应阵列信号处理、空时自适应处理、探地雷达信号处理等。
- 贾琼琼: 女, 1986 年生, 硕士生, 研究方向为机载雷达空中动目标检测算法研究。
- 李海: 男, 1976 年生, 讲师, 博士, 研究方向为干涉合成孔径雷达信号处理和空时自适应信号处理。