

Keystone 变换对空时自适应处理性能的影响分析

贾琼琼 吴仁彪 李 海

(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: 高速平台检测高速空中动目标面临严重的杂波和目标距离走动, 如何有效校正距离走动是目标检测的根本。本文首先研究雷达处于高速平台时 keystone 变换校正空中动目标距离走动的同时对杂波特性的影响, 进而分析其对空时自适应处理(Space-time adaptive processing, STAP)的影响。通过研究表明: 当目标不存在多普勒模糊时, keystone 变换可同时校正目标和杂波的距离走动, 从而为取得良好的 STAP 性能提供了前提; 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使杂波部分产生新的走动分量, 最终降低 STAP 性能。分析结果为如何更好地实现高速平台高速空中动目标检测问题提供了理论参考。

关键词: 机载/星载雷达; keystone 变换; 空时自适应处理; 动目标检测; 杂波走动

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2013)12-1624-08

Analysis of the Effects of Keystone Formatting on Space-Time Adaptive Processing

JIA Qiong-qiong WU Ren-biao LI Hai

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

Abstract: Range walk of clutter and target are the most serious problems when detect high speed target from high speed platform. So, range walk compensation are needed for better detection result. Keystone formatting is widely used for range walk compensation because of its capable of compensating multiple targets' range walk simultaneously without a prior knowledge on the motion parameters. The effects of keystone formatting on the clutter distributions and on the performance of STAP are studied in this paper. We concluded that keystone formatting can compensate the range walk of both the target and clutter when the target is ambiguity-free. However, when the target is Doppler ambiguous, range walk compensation of the target by keystone formatting induces new range walk to the clutter, which will affect the distribution of the clutter and further degrade the STAP performance. The above conclusions are helpful in deriving better methods for the detection of fast air moving targets on high speed platform.

Key words: airborne/spaceborne radar; keystone formatting; space-time adaptive processing (STAP); moving target detection; clutter walk

1 引言

传统的 STAP 处理一般是建立在相干处理时间

(Coherent Processing Interval, CPI)内目标和杂波无距离走动的前提下。高速平台对高速空中动目标进行检测时,为了提高微弱目标的检测性能,需要

增加目标的照射时间,即延长相干处理时间。这是由于 STAP 最大改善因子与相干处理脉冲数成正比。然而延长相干处理时间时,平台的高速运动会导致杂波产生距离走动,并且目标与平台之间的高速运动还会导致目标产生严重的距离走动,这些都不利于 STAP 处理。因此,必须考虑校正目标和杂波距离走动来提高动目标检测性能。

Keystone 变换可以在目标运动速度未知的前提下实现距离走动校正,从而得到广泛应用^[4-12]。将 keystone 与 STAP 结合可实现高速空中动目标检测,然而高速空中动目标存在严重的速度模糊,当目标与杂波模糊数不同时,keystone 变换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 STAP 性能。文献[13-14]在假设杂波不存在距离走动的前提下(雷达平台运动速度较低时,杂波距离走动可以忽略),分析了 keystone 变换对 STAP 性能的影响,但是,文献[13-14]仅考虑杂波无走动的情况,当雷达平台处于高速运动状态时,杂波无走动的假设将不再合理,为此本文从理论推导及实验仿真两个角度分析了杂波存在距离走动情况下 keystone 变换对 STAP 性能的影响。

通过研究表明,当目标和杂波都不存在多普勒模糊时,keystone 变换可以统一校正杂波和目标的距离走动,从而改善因杂波和目标距离走动导致的 STAP 性能损失;当目标和杂波多普勒模糊数不同时(杂波不存在多普勒模糊,而高速空中动目标通常不可避免的会产生多普勒模糊),keystone 变换校正目标距离走动时会使杂波部分产生新的距离走动分量,这一分量会导致杂波脊展宽、杂波自由度增加。分析结果为如何更好地实现高速平台高速空中动目标检测问题提供了重要的理论参考。

2 空时自适应处理简介

这里首先给出当目标和杂波不存在距离走动时,雷达接收到的数据形式,随后给出目标和杂波存在距离走动时的数据模型。

对于高速平台上间距为 $d=0.5\lambda$ 正侧视 N 元均匀线阵, λ 为工作波长,相干处理脉冲数为 K , x_{nk} 表

示第 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表示为 $N \times K$ 的矩阵^[1]:

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

若每个脉冲重复间隔内沿距离向的采样点数为 L ,则一个次相干处理时间内的接收数据可写一个 $N \times K \times L$ 的三维数据矩阵。将(1)式中的数据矩阵 \mathbf{X} 按列排成一个 $NK \times 1$ 的列向量,可记为 $\mathbf{x} = \text{vec}(\mathbf{X})$,称为一个空时快拍。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:

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

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:

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

b_s 为目标回波复幅度, $\mathbf{a}(u_s, \nu_s)$ 表示目标空时导向矢量,对应的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 $\nu_s = 2\pi f_d / f_r$, f_r 为脉冲重复频率, ψ_s 为目标来向角, f_d 为目标多普勒频率。其中 $\mathbf{a}(u_s, \nu_s)$ 有如下形式:

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

式(4)中 \otimes 表示 Kronecker 积, $K \times 1$ 维时域导向矢量表示为 $\mathbf{a}(\nu_s) = [1 \ e^{j\nu_s} \ \cdots \ e^{j(K-1)\nu_s}]^T$, $N \times 1$ 维空域导向矢量表示为 $\mathbf{a}(u_s) = [1 \ e^{ju_s} \ \cdots \ e^{j(N-1)u_s}]^T$, $(\cdot)^T$ 表示转置运算。由所有杂波散射点的回波叠加构成总的杂波数据:

$$\mathbf{x}_c = \sum_{i=1}^{N_c} b_{ci} \mathbf{a}(u_{ci}, \nu_{ci}) \quad (5)$$

其中 b_{ci} 为第 i 个杂波散射点回波复幅度, $\mathbf{a}(u_{ci}, \nu_{ci})$ 为第 i 个杂波散射点空时导向矢量,对应的 $u_{ci} = 2\pi d \cos \psi_i / \lambda$ 和 $\nu_{ci} = 4\pi V_p \cos \psi_i / \lambda f_r$ 。类似地,参考单元的空时快拍(即二次数据)可写成:

$$\mathbf{x}_{sec} = \mathbf{x}_c + \mathbf{x}_n \quad (6)$$

随着相干处理时间的延长以及雷达平台运动速度的增大,必须考虑距离走动的影响。目标和杂波均存在距离走动时的一次数据可表示为:

$$\tilde{\mathbf{x}}_p = b_s \tilde{\mathbf{a}}(u_s, \nu_s) + \sum_{i=1}^{N_c} b_{ci} \tilde{\mathbf{a}}(u_{ci}, \nu_{ci}) + \mathbf{x}_n \quad (7)$$

$\tilde{\mathbf{a}}(u_s, \nu_s)$ 和 $\tilde{\mathbf{a}}(u_{ci}, \nu_{ci})$ 分别是存在距离走动的目标和杂波导向矢量, 有如下形式:

$$\tilde{\mathbf{a}}(u, \nu) = \tilde{\mathbf{a}}(\nu) \otimes \mathbf{a}(u) \quad (8)$$

其中空域导向矢量 $\mathbf{a}(u)$ 保持不变, $\tilde{\mathbf{a}}(\nu) = [\xi_0 \ \xi_1 e^{j\nu} \ \cdots \ \xi_{K-1} e^{j(K-1)\nu}]^T$ 为考虑目标距离走动后的 $K \times 1$ 维时域导向矢量, 系数 $\xi_k (k=0, \dots, K-1)$ 是由于距离走动的影响, 对于待测单元来说, 不同发射脉冲回波幅度不同(目标回波峰值位置出现在不同的距离单元)。此时, 参考单元的空时快拍可写成:

$$\tilde{\mathbf{x}}_s = \sum_{i=1}^{N_c} b_{ci} \tilde{\mathbf{a}}(u_{ci}, \nu_{ci}) + \mathbf{x}_n \quad (9)$$

STAP 是在保证对目标有足够增益的同时, 利用杂波的空时耦合特性自适应的调节二维滤波器的响应滤除杂波。STAP 最优处理器的权矢量:

$$\mathbf{w} = \mu \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}(u_s, \nu_s) \quad (10)$$

式中 μ 为常数, \mathbf{R} 为干扰(杂波+噪声)协方差矩阵。实际情况中, \mathbf{R} 通常未知, 需要根据参考单元数据进行估计, 将估计得到的协方差矩阵记为 $\hat{\mathbf{R}}$ 。能够用来估计杂波协方差矩阵的参考单元数据必须满足独立同分布的条件; 同时根据“Brennan-Reed 法则”^[15], 为了将由协方差矩阵估计误差所导致的性能损失限制在 3dB 内, 要求参考单元数目 N_s 至少取 2 倍的系统自由度。因此, 若杂波自由度增加时, 所需要的参考单元的数目也必须成比例增加。然而, 实际环境中, 满足条件的参考单元的样本通常是有限的。

3 Keystone 变换及其对 STAP 的影响

本节首先简要介绍 keystone 变换原理; 然后分析目标不存在多普勒模糊时 keystone 变换对 STAP 性能的影响; 进而分析目标存在多普勒模糊时, keystone 变换对 STAP 性能的影响。

3.1 Keystone 变换原理

点目标的基带回波信号为:

$$s_p(\hat{t}, t_k) = A_s p(\hat{t} - \tau) e^{-j2\pi f_c \tau} \quad (11)$$

其中 $\hat{t} = t - t_k$ 为快时间, $p(\cdot)$ 为发射波形, f_c 为载波频

率, T 为发射脉冲重复周期, A_s 为点目标回波的幅度, $\tau = 2R(t_k)/c$ 为回波时延, c 是光速, V_p 表示载机平台的速度, V_s 表示目标相对于飞机径向的速度, $t_k = kT, (k=0, \dots, K-1)$ 表示慢时间, R_{s0} 表示载机平台和目标的初始距离, 则目标与雷达之间的瞬时距离 $R(t_k) = R_0 + V_s t_k$, 故式(11)可以写成:

$$s_s(\hat{t}, t_k) = \tilde{A}_s p\left(\hat{t} - \frac{2R_{s0}}{c} - \frac{2V_s t_k}{c}\right) e^{-j\frac{4\pi}{c} V_s f_c t_k} \quad (12)$$

其中 $\tilde{A}_s = A_s e^{-j\frac{4\pi}{c} R_{s0}}$ 。将 $s_s(\hat{t}, t_k)$ 从快时间域变换到距离频率域, 得:

$$S_s(f, t_k) = \tilde{A}_s P(f) e^{-j\frac{4\pi}{c} R_{s0} f} e^{-j\frac{4\pi}{c} (f_c + f) V_s t_k} \quad (13)$$

上式中 $P(f)$ 为 $p(\hat{t})$ 的傅里叶变换, 距离走动表现为第二个指数项中快时间频率 f 与慢时间 t_k 的耦合。

这里定义 η_k 为虚拟时间, keystone 变换即进行如下式的尺度变换^[4-8]:

$$t_k = \frac{f_c}{f_c + f} \eta_k \quad (14)$$

从而有 $f_c \eta_k = (f_c + f) t_k$, 代入(13)式有如下结果:

$$\begin{aligned} S_{s\eta}(f, \eta_k) &= S_s\left(f, \frac{f_c}{f_c + f} \eta_k\right) \\ &= \tilde{A}_s P(f) e^{-j\frac{4\pi}{c} R_{s0} f} e^{-j\frac{4\pi}{c} V_s f_c \eta_k} \end{aligned} \quad (15)$$

式(15)的第二个指数项中快时间频率 f 与慢时间 η_k 不再耦合, 从而消除了目标的距离走动。最后, 将式(15)沿距离频域作逆傅里叶变换到快时间域得:

$$s_{s\eta}(\hat{t}, \eta_k) = \tilde{A}_s p\left(\hat{t} - \frac{2R_{s0}}{c}\right) e^{-j2\pi f_c V_s \eta_k} \quad (16)$$

从(16)式可以看出, 距离走动得以校正。

如果目标不存在多普勒模糊, 则通过上述处理可准确完成 keystone 变换。但是如果出现多普勒模糊, 必须根据其多普勒频率的模糊程度对 keystone 变换算法进行修正。keystone 变换前目标的多普勒频率用 f_{du} (下标 u 表示无模糊) 表示, 则 f_{du} 与模糊后的多普勒频率 f_d 有如下关系:

$$f_{du} = f_d + F f_r = \frac{2V_{s0}(f + f_c)}{c} + \frac{2V_{sF}(f + f_c)}{c} \quad (17)$$

其中 F 为模糊数, $V_s = V_{s0} + V_{sF}$ 。这里给出存在多普勒模糊情况下的 keystone 变换公式:

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

3.2 目标不存在多普勒模糊

由所有杂波散射点叠加而成的杂波基带回波信号为:

$$s_c(\hat{t}, t_k) = \sum_{i=1}^{N_c} A_{ci} P(\hat{t} - \tau_{ci}) e^{-j2\pi f_c \tau_{ci}} \quad (19)$$

其中 N_c 为总的杂波散射点的个数, A_{ci} 为第 i 个杂波散射点回波的幅度, $\tau_{ci} = 2R_{ci}(t_k)/c$ 为第 i 个杂波散射点回波时延, 载机在 CPI 内沿航向做匀速直线运动, 即:

$$R_{ci}(t_k) = R_{ci0} + V_p \cos \psi_i t_k \quad (20)$$

ψ_i 为第 i 个杂波散射点与天线相位中心之间的夹角, 则(19)式可以写成:

$$s_c(\hat{t}, t_k) = \sum_{i=1}^{N_c} A_{ci} P \left(\hat{t} - \frac{2R_{ci0}}{c} - \frac{2V_p \cos \psi_i t_k}{c} \right) e^{-j2\pi f_c \tau_{ci}} \quad (21)$$

从(21)式可以看出, 对于不同的发射脉冲, 第 i 个杂波散射点的回波信号峰值位置 $2R_{ci0}/c + 2V_p \cos \psi_i t_k/c$, 杂波走动会对杂波的空时相关性产生不良影响, 进而也会影响 STAP 处理。

雷达接收到包含目标和杂波的总的回波数据可由(12)式和(19)式的和得到:

$$s_{sum}(\hat{t}, t_k) = s_s(\hat{t}, t_k) + s_c(\hat{t}, t_k) = A_s P(\hat{t} - \tau) e^{-j2\pi f_c \tau} + \sum_{i=1}^{N_c} A_{ci} P(\hat{t} - \tau_{ci}) e^{-j2\pi f_c \tau_{ci}} \quad (22)$$

为了进行 keystone 变换, 首先将 $s_{sum}(\hat{t}, t_k)$ 变换到距离频率域, 得:

$$\begin{aligned} S_{sum}(f, t_k) &= S_s(f, t_k) + S_c(f, t_k) \\ &= \tilde{A}_s P(f) e^{-j\frac{4\pi}{c} R_0} e^{-j\frac{4\pi}{c} (f_c + f) V_p t_k} \\ &+ \sum_{i=1}^{N_c} \tilde{A}_{ci} P(f) e^{-j\frac{4\pi}{c} R_{ci0}} e^{-j\frac{4\pi}{c} (f_c + f) V_p \cos \psi_i t_k} \end{aligned} \quad (23)$$

由于 STAP 性能与杂波空时耦合特性直接相关, 故这里先分析 keystone 变换对杂波空时二维分布特性的影响。当目标和杂波都不存在多普勒模糊时, 对(23)式进行 keystone 变换可得:

$$\begin{aligned} S_{sum\eta}(f, \eta_k) &= S_{s\eta}(f, \eta_k) + S_{c\eta}(f, \eta_k) \\ &= \tilde{A}_s P(f) e^{-j\frac{4\pi}{c} R_0} e^{-j\frac{4\pi}{c} f V_p \eta_k} \\ &+ \sum_{i=1}^{N_c} \tilde{A}_{ci} P(f) e^{-j\frac{4\pi}{c} R_{ci0}} e^{-j\frac{4\pi}{c} f V_p \cos \psi_i \eta_k} \end{aligned} \quad (24)$$

将(24)式变换回快时间域有如下结果:

$$\begin{aligned} s_{sum\eta}(\hat{t}, \eta_k) &= s_{s\eta}(\hat{t}, \eta_k) + s_{c\eta}(\hat{t}, \eta_k) \\ &= \tilde{A}_s P(\hat{t} - \frac{2R_0}{c}) e^{-j\frac{4\pi}{c} f V_p \eta_k} \\ &+ \sum_{i=1}^{N_c} \tilde{A}_{ci} P(\hat{t} - \frac{2R_{ci0}}{c}) e^{-j\frac{4\pi}{c} f V_p \cos \psi_i \eta_k} \end{aligned} \quad (25)$$

可见, 目标和杂波均不存在多普勒模糊时, keystone 变换同时校正了目标和杂波距离走动, 从而为 STAP 的目标积累和杂波抑制提供了良好的前提条件。

3.3 目标存在多普勒模糊

当目标存在多普勒模糊时, 必须根据目标的模糊数利用公式(18)实现目标距离走动校正, 此时由于杂波不存在多普勒模糊, 故相当于杂波和目标的模糊数不同的情况, 进行 keystone 变换校正目标距离走动:

$$\begin{aligned} S_{sum\eta}(f, \eta_k) &= e^{-j2\pi \frac{f_c}{f_c + f} kF} S_s \left(f, \frac{f_c}{f_c + f} \eta_k \right) + e^{-j2\pi \frac{f_c}{f_c + f} kF} S_c \left(f, \frac{f_c}{f_c + f} \eta_k \right) \\ &\approx \tilde{A}_s P(f) e^{-j\frac{4\pi}{c} R_0} e^{-j\frac{4\pi}{c} f V_p \eta_k} \\ &+ \sum_{i=1}^{N_c} \tilde{A}_{ci} P(f) e^{-j\frac{4\pi}{c} R_{ci0}} e^{-j\frac{4\pi}{c} V_p \cos \psi_i f \eta_k} e^{-j\frac{4\pi}{c} f V_p f \eta_k} \end{aligned} \quad (26)$$

另外, 由(17)式可得:

$$V_{sF} = \frac{Ff_c}{2(f+f_c)} \quad (27)$$

将(27)式代入(26)式可得:

$$\begin{aligned} S_{sum\eta}(f, \eta_k) &\approx \tilde{A}_s P(f) e^{-j\frac{4\pi}{c} R_0} e^{-j\frac{4\pi}{c} f V_p \eta_k} \\ &+ \sum_{i=1}^{N_c} \tilde{A}_{ci} P(f) e^{-j\frac{4\pi}{c} R_{ci0}} e^{-j\frac{4\pi}{c} V_p \cos \psi_i f \eta_k} e^{-j\frac{4\pi}{c} \frac{Ff_c}{2(f+f_c)} \eta_k} \end{aligned} \quad (28)$$

对上式利用近似关系 $\frac{1}{f_c + f} \approx \frac{1}{f_c} - \frac{f}{f_c^2}$, ($f \ll f_c$) 可得如下结果:

$$\begin{aligned} S_{sum\eta}(f, \eta_k) &\approx \tilde{A}_s P(f) e^{-j\frac{4\pi}{c} R_0} e^{-j\frac{4\pi}{c} f V_p \eta_k} \\ &+ \sum_{i=1}^{N_c} \tilde{A}_{ci} P(f) e^{-j\frac{4\pi}{c} R_{ci0}} e^{-j\frac{4\pi}{c} V_p \cos \psi_i f \eta_k} e^{-j2\pi Ff \eta_k} e^{j2\pi Ff_c / f \eta_k} \end{aligned} \quad (29)$$

将(29)式变换回快时间域得:

$$s_{sum}(\hat{t}, \eta_k) \approx \bar{A}_s p \left(\hat{t} - \frac{2R_0}{c} \right) e^{-j2\pi f_r V_r \eta_k} + \sum_{i=1}^{N_c} A_{ci} p \left(\hat{t} - \frac{2R_{ci0}}{c} + \frac{Ff_r}{f_c} \eta_k \right) e^{-j\frac{4\pi V_r}{c} \cos \psi_{f_r} \eta_k} \quad (30)$$

从(30)式可以看出,当对存在多普勒模糊的目标进行 keystone 变换时会导致杂波产生了新的距离走动(Ff_r/f_c) η_k ,且这一走动与目标多普勒模糊数成正比。

以上我们从理论分析的角度研究了 keystone 变换对 STAP 性能的影响,表明了目标不存在多普勒模糊时 keystone 变换可同时校正目标和杂波距离走动,从而保证了 STAP 性能;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将会导致杂波产生新的距离走动,不利于 STAP 处理。

4 仿真分析

本节将通过仿真实验分析 keystone 变换对杂波的影响。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 $V_p=140\text{m/s}$,杂噪比 (clutter-to-noise ratio, CNR) 为 60dB,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 $\Delta R=1\text{m}$ 。

图1比较了不同情况下杂波功率谱,其中杂波脊的斜率 $\beta=1$ 。其中图1(a)为理想情况下的杂波谱,在空时平面上是沿对角线分布的一条理想脊线;图1(b)是将杂波走动考虑在内的情况,此时理想的杂波脊出现了展宽现象,并且由于两侧的相对

运动量较大导致对应的距离走动量也较大,因此展宽就更明显;图1(c)为 keystone 变换校正杂波距离走动后的结果,此时主瓣杂波及其附近大范围内都有明显的改善(杂波脊比图1(b)窄),但是在靠近两侧的地方校正效果不理想,这一现象将通过另外的实验进行分析。图1(d)为目标多普勒模糊数为1的情况下经过 keystone 变换后杂波的功率谱,此时杂波脊明显展宽,这一实验结果验证了前一小节理论分析。杂波脊展宽会导致空时二维平面内目标与杂波重合的概率增加,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。

为了分析图1(c)中在靠近两侧的地方校正结果很不理想的现象,对靠近两侧的单个杂波散射点进行实验分析,结果如图2所示。图2(a)为 $2f_d/f_r = \pm 1$ 处的某一散射点进行 keystone 变换后的轨迹,可以看出,除了校正后的目标轨迹之外还出现了一条与目标原来走动趋势大致相同的线,这里将其称为“伪迹”,它的出现是由于 keystone 变换的“半盲速点”效应^[16]引起的,这正是图1(c)中 keystone 变换后杂波脊两侧会出现不理想效果的原因。为了进一步证实这一结论,再沿两侧逐渐向中间的位置取点进行实验, $2f_d/f_r = \pm 0.7$ 附近处的杂波散射点结果如图2(b)所示,此时“伪迹”变得微弱, $2f_d/f_r = \pm 0.5$ 附近处的杂波散射点结果如图2(c)所示,此时几乎不存在“伪迹”,这与图1(c)中 keystone 变换后校正效果逐渐变好的现象吻合。

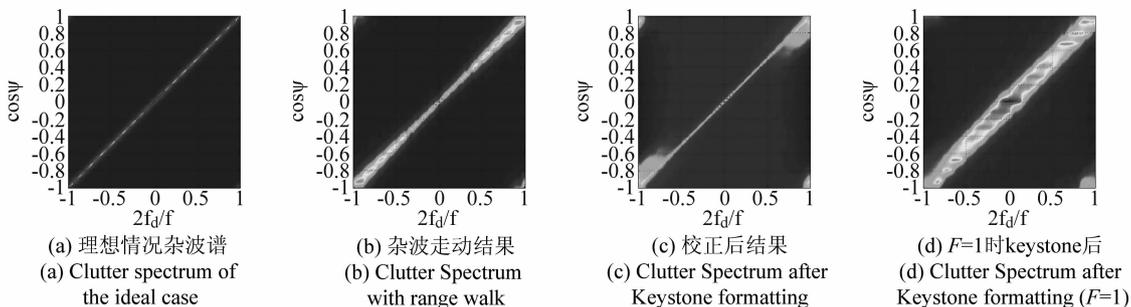


图1 不同情况下杂波功率谱比较($\beta=1$)

Fig. 1 Clutter Spectrums in different cases($\beta=1$)

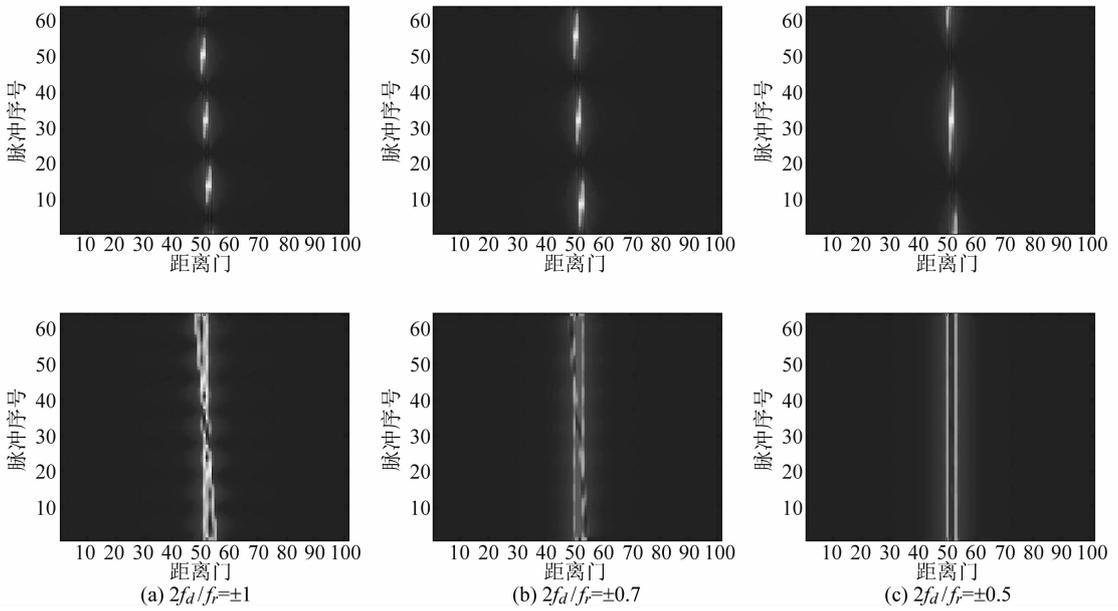


图 2 不同位置杂波散射点 keystone 变换结果对比

Fig. 2 Comparison of keystone performance for clutter patch in different position

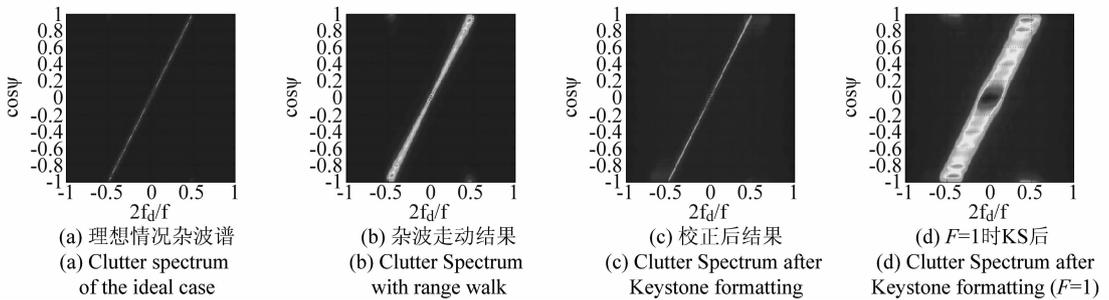


图 3 不同情况下杂波功率谱比较($\beta=2$)

Fig. 3 Clutter Spectrums in different cases($\beta=2$)

图 3 是载机速度 $V_p = 70\text{m/s}$ 、 $\beta=2$ 的情况,图 3 (a)—图 3(d)各图所代表的含义与图 1(a)—图 1(d)对应相同。此时 $2f_d/f_r = (-0.5 \sim 0.5)$ 之间,从图 3(c)可以看出整个杂波脊都能被很好的校正。

图 4 是 keystone 变换前后杂波的特征谱分布情况(与图 1 中 $\beta=1$ 的情况对应),其中杂波自由度对应着杂波大特征值的数目。“理想情况”指杂波不存在距离走动情况下的杂波特征谱;“杂波走动”是考虑杂波距离走动后的情况;“杂波走动 KF 后($F=0$)”表示 keystone 变换校正杂波距离走动后的结果;“杂波走动 KF 后($F=1$)”是当目标模糊数为 1 时,为了校正目标距离走动,进行模糊数为 1 的 keystone 变换后杂波特征谱。可以看出,“理想情况”杂波自由度为 $N+K-1=79$;当杂波存在距离走动时杂波的自由度有

所增加(如“杂波走动”);对杂波距离走动进行校正后,较之校正之前杂波自由度有所减少,如图中“杂波走动 KF 后($F=0$)”;进行有模糊的 keystone 变换后,杂波自由度显著增加,如图中“杂波走动 KF 后($F=1$)”。

图 5 是 keystone 变换前后杂波的特征谱分布情况(与图 3 中 $\beta=2$ 的情况对应),各曲线代表的含义同图 4。可以看出“杂波走动 KF 后($F=0$)”杂波自由度比“杂波走动”的情况显著减少,基本上与“理想情况”相当;“杂波走动 KF 后($F=1$)”的情况下,杂波自由度明显增多。

根据自适应处理理论,只有当系统自由度大于杂波自由度时,自适应处理算法才能有效抑制杂波。因此,keystone 变换使杂波自由度的增加会对系统自由度提出更高的要求。

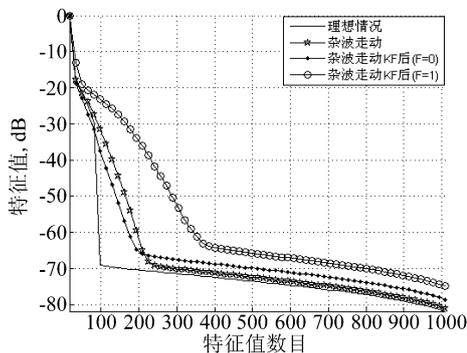
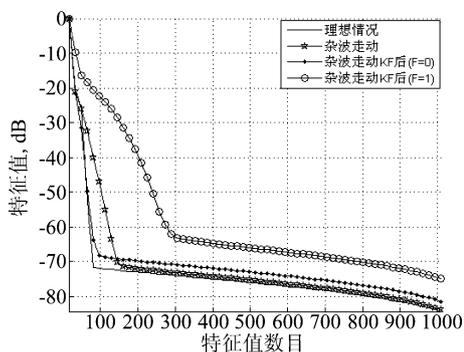
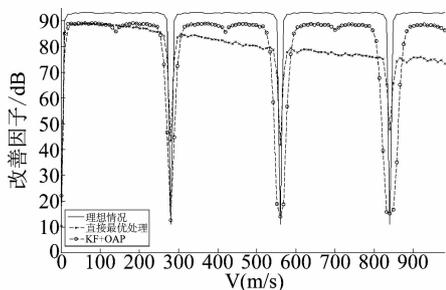
图4 不同情况下杂波特征谱比较($\beta=1$)Fig. 4 Comparison of clutter eigenspectra ($\beta=1$)图5 不同情况下杂波特征谱比较($\beta=2$)Fig. 5 Comparison of clutter eigenspectra ($\beta=2$)

图6 不同处理方法改善因子比较

Fig. 6 Comparison of the IF for different methods

图6 对比较了不同处理方法的改善因子,横轴表示目标运动速度,纵轴表示各方法对应的改善因子值。图中“理想情况”指目标和杂波均不存在距离走动时最优处理器的改善因子曲线,这里作为处理性能的上限;“直接最优处理”指目标和杂波都存在距离走动情况下,不进行距离走动校正,直接利用最优处理器处理的性能曲线;“KF+OAP”是在目标和杂波都存在距离走动的情况下先进行 keystone 变换校正目标距离走动,然后经过最优处理后的结果。从图6可以看出,当目标不存在多普勒模糊时,keystone 变换同时实现了目标和杂波的距离走动校

正,即在实现目标有效积累的同时提高了杂波空时耦合特性(使由于杂波距离走动导致展宽的杂波脊变窄,从而使主瓣杂波附近目标检测性能提高),因此所有范围内“KF+OAP”的性能都优于“直接最优处理”;当目标存在多普勒模糊时,“KF+OAP”主瓣杂波附近出现了严重的性能损失,这正是由于在目标存在多普勒模糊时 keystone 变换导致杂波脊展宽所造成的。其中“理想情况”在非杂波区性能最好,这是由于理想情况下目标和杂波均不存在距离走动,因此在积累的过程中不存在性能损失,而“直接最优处理”在此区域由于距离走动的影响会导致严重的性能损失;而“KF+OAP”虽然经过目标距离走动校正,但是校正过程并不能保证目标能量可以完全得到校正,所以也存在损失。

由上面的仿真分析可见,当目标存在多普勒模糊时,keystone 变换在校正目标距离走动的同时会导致杂波空时耦合特性遭到破坏,导致杂波脊展宽,杂波自由度增加,杂波脊的展宽进一步降低了 STAP 性能,这将进一步导致主瓣杂波附近大范围内 STAP 性能降低。

5 结束语

本文通过理论分析和仿真实验两个角度研究 keystone 变换校正高速空中动目标距离走动的同时对杂波空时二维特性的影响,进而研究了其对 STAP 性能的影响,研究结果显示:在目标不存在多普勒模糊的情况下,keystone 变换能够同时实现目标和杂波距离走动校正,这为获得良好的 STAP 性能提供了前提;当目标存在多普勒模糊时,keystone 变换在校正目标距离走动时会展宽杂波脊、增大杂波自由度。杂波脊的展宽使得主瓣杂波附近 STAP 性能明显降低,而且随着目标与杂波模糊数差别的增加,STAP 性能降低的范围越大;杂波自由度的增加对 STAP 系统自由度提出了更高的要求,这进一步又对满足条件的参考单元数目有了更高要求。分析结果为如何更好地实现高速平台高速空中动目标检测问题提供了重要的理论参考。

参考文献

- [1] R. K. Klemm, Principles of Space-Time Adaptive Processing[M]. London: The Institution of Electrical Engi-

- neers, 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]:[博士学位论文]. 西安:西安电子科技大学,
1993.
Wu R. B. Space-time adaptive processing for airborne
phased array radar: theory and implementation[D]. Xi'
an: Xidian University, 1993. (in Chinese)
- [3] Brennan L E, Reed I S. Theory of adaptive radar[J].
IEEE Transaction on Aerospace Electron System, 1973,
9(2):237-252.
- [4] R. P. Perry, R. C. Dipietro, and R. L. Fante, SAR im-
aging of moving targets[J]. IEEE Transactions on Aero-
space and Electronics Systems, 1999,35(1):188-200.
- [5] Xing Mengdao, Wu Renbiao. Migration through resolu-
tion cell compensation in ISAR imaging[J]. IEEE Geo-
science and Remote sensing Letters, 2004, 1(2):
141-144.
- [6] 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.
- [7] Y. LI, R. Wu, M. Xing, Z. Bao. Inverse synthetic ap-
erture radar imaging of ship target with complex motion.
IET Radar Sonar Navig. ,2008, 2(6):395-403.
- [8] Xing Meng-dao, Jiang Xiu-wei, 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.
- [9] 朱圣棋,廖桂生,周争光,曲毅,刘向阳. 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 S. Q, Liao G. S. , Zhou Z. G, Qu Y. , Liu X. Y.
Approach to ground slowly moving target parameter esti-
mation for airborne dual-channel SAR system[J]. Sys-
tems Engineering and Electronic, 2009, 31(12): 2048-
2052. (in Chinese)
- [10] 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 S. S, Zeng T. , Xing M. D. Weak target detection
based on Keystone transform[J]. Acta Electronica Sini-
ca, 2005, 33(9):1675-1678. (in Chinese)
- [11] Zhang S, Zeng T, Long T. Dim Target Detection Based
on Keystone Transformation[C]. IEEE 2005 International
Radar Conference, May. 9-12, 2005: 889-894.
- [12] Zhou Z. , Su Z. G, Wu R. B. Method for Detecting
Ground Moving Target with Range Migration [C]. In:
IET International Radar Conference 2009:1-4.
- [13] 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. 电子与信息学报. 2011, 33(6):1459-1464.
Wu R. B. , Jia Q. Q, Li H. Detection of Fast Moving Dim
Targets on Airborne Radar via STAP. Journal of Electron-
ics & Information Technology, 2011, 33(6):1459-1464.
(in Chinese)
- [14] Jia Q Q, Wu R B, Li H. Impacts of Keystone formatting
on Space-time adaptive processing in airborne radar.
IEEE International Conference on Signal Processing. Bei-
jing, 2010. 2163-2167.
- [15] Reed I, Mallett J, Brennan I. Rapid convergence rate in
adaptive arrays [J]. IEEE Trans on AES, 1974, 6:
853-856.
- [16] 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. 雷达科学与技术, 2008, 6
(11):454-458.
Yu J, Xu J, Tang J, Peng Y. N. An improved Keystone-
transform based method for long-time coherent integration
of radar target [J]. Radar Science and Technology,
2008, 6(11):454-458. (in Chinese)

作者简介



贾琼琼 女,1986年1月出生于陕西。毕业于中国民航大学,获硕士学位。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。
E-mail:qiongjiawei@163.com



吴仁彪 男,1966年2月出生于湖北。毕业于西安电子科技大学,获博士学位。中国民航大学教授,博士生导师,民航特聘专家,研究方向为自适应信号处理,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 男,1976年8月出生于天津。毕业于西安电子科技大学,获博士学位。中国民航大学副教授,研究方向干涉合成孔径雷达信号处理和空时自适应信号处理。E-mail:lihai1976@sina.com