

一种波束域的高速空中动目标检测及参数估计方法

贾琼琼, 吴仁彪

(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: Keystone 变换所需的插值运算存在计算量大的问题, 尤其是用于空时自适应处理 (Space-Time Adaptive Processing, STAP) 时需要对每个阵元接收的数据分别进行 Keystone 变换, 给工程实现带来了困难. 为了解决这一问题, 提出了一种在波束域进行 Keystone 变换校正目标距离走动的新方法, 该方法将传统的对每个阵元数据的 Keystone 变换转换为在波束域进行 Keystone 变换, 从而将 N 个阵元对应的 N 次 Keystone 变换转换为只在主波束内进行一次 Keystone 变换, 这样做使算法的主要运算量降低为原来的 $1/N$. 然后将压缩感知 (Compressed Sensing, CS) 理论用于空时自适应处理的目标参数估计, 取得了良好的估计性能. 最后通过仿真实验验证了本文方法的有效性.

关键词: 机载雷达; 空时自适应处理; 动目标检测; Keystone 变换; 压缩感知

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2014)01-0014-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.01.003

Detection and Parameter Estimation of Fast Moving Air Targets in Beamspace

JIA Qiong-qiong, WU Ren-biao

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

Abstract: Computation burden and the processing complexity of interpolation operation are the problems Keystone formatting faces. Especially in STAP, where Keystone formatting should be applied to each of the element, which makes it unfeasible for real time processing. Based on these, a new practical method with low computation burden is given, which removes the clutter firstly, and a space domain beam forming is done; after that, Keystone formatting is applied to the beam domain data for range walk compensation. By the proposed method, only one Keystone formatting is needed compared with the KF-STAP method, therefore, the computation burden can be reduced dramatically. Besides, a compressed sensing (CS) based targets' parameter estimation method is proposed for the targets' velocity estimation of STAP. Effectiveness of the proposed methods is verified via simulation examples.

Key words: airborne radar; space-time adaptive processing (STAP); moving target detection; keystone formatting; compressed sensing (CS)

1 引言

STAP 是一种新的有效的机载雷达地杂波抑制手段^[1-4]. 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 $1 \sim 2$ 个数量级^[5]. 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^[6-10] 以及微弱目标检测领域^[5, 11-18].

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^[15]. 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二维特性, 进而降低 STAP 性能. 针对这一问题, 文献^[16-18]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, 从而避免了上述问题 (该方法记为 KF-STAP). 但是, 为了实现对空时二维目标进行距离走动校正, KF-STAP 方法需要对每个阵元

的数据分别进行 Keystone 变换,众所周知,Keystone 变换所需要的插值计算的运算量是非常大的,因此该方法对每个阵元数据分别进行 Keystone 变换无疑使整个算法的运算量大大增加,尤其是阵元数较大时该方法的计算量将严重影响算法的处理速度,不利于实时处理。

针对上述问题,本文提出了一种在波束域进行目标距离走动校正的新方法,该方法将对每个阵元数据的 Keystone 变换转换为在波束域进行 Keystone 变换,这样原来的 N 次 Keystone 变换转换为只在主波束内进行一次 Keystone 变换,从而使算法的主要运算量降低为原来的 $1/N$ 。由于波束域和阵元域具有等价关系,因此在波束域进行 Keystone 变换不会引入额外性能损失。同时,本文将压缩感知技术引入,用于实现 STAP 中目标参数的有效估计。最后,通过仿真实验验证了本文方法的有效性。

2 空-时二维数据模型

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 $d = 0.5\lambda$, λ 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 \mathbf{X} 。

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:

$$\mathbf{x}_{\text{pri}} = \mathbf{x}_s + \mathbf{x}_c + \mathbf{x}_n \quad (1)$$

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:

$$\mathbf{x}_s = b_s \mathbf{a}(u_s, v_s) \quad (2)$$

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 表示波束主瓣指向。其中空时导向矢量 $\mathbf{a}(u_s, v_s)$ 有如下形式:

$$\mathbf{a}(u, v) = \mathbf{a}(v) \otimes \mathbf{a}(u) \quad (3)$$

\otimes 表示 Kronecker 积, $\mathbf{a}(v) = [1 \quad e^{-jv} \quad \dots \quad e^{-j(K-1)v}]^T$ 为时域导向矢量, $\mathbf{a}(u) = [1 \quad e^{-ju} \quad \dots \quad e^{-j(N-1)u}]^T$ 为空域导向矢量,这里 T 表示转置运算。参考单元的数据(二次数据)记为:

$$\mathbf{x}_{\text{sec}} = \mathbf{x}_c + \mathbf{x}_n \quad (4)$$

当目标存在距离走动时,包含目标回波的一次数据记为:

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

$\tilde{\mathbf{a}}(u_s, v_s) = \tilde{\mathbf{a}}(v_s) \otimes \mathbf{a}(u_s)$ 是存在距离走动的目标导向矢量,其中空域导向矢量 $\mathbf{a}(u_s)$ 保持不变, $\tilde{\mathbf{a}}(v_s)$ 为考虑目标距离走动的时域导向矢量。由于目标存在距离走动时,其回波会分散在若干个相邻的距离单元,为了加以区分,将目标回波 0 时刻所在距离单元数据记为 $\tilde{\mathbf{x}}_{\text{pri}_0}$,其余时刻目标所在单元数据均记为 $\tilde{\mathbf{x}}_{\text{pri}_r}$ 。为了得到 $\tilde{\mathbf{a}}(v)$ 的具体形式,下面分析雷达时域回波信号。

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:

$$s_s(\hat{t}, t_k) = \tilde{A}_s p\left(\hat{t} - \frac{2R_{s0}}{c} - \frac{2V_s t_k}{c}\right) \cdot e^{-j\frac{4\pi}{c} V_s f_c t_k} \quad (6)$$

其中 $\tilde{A}_s = A_s e^{-j\frac{4\pi}{c} R_{s0}}$ 为一复常数,从式(6)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。由归一化时间频率及式(6)可以看出:

$$\tilde{\mathbf{a}}(v_s) = \begin{bmatrix} 1 \frac{p\left(\hat{t} - \frac{2R_{s0}}{c} - \frac{2V_s T}{c}\right)}{p\left(\hat{t} - \frac{2R_{s0}}{c}\right)} e^{-jv_s} \quad \dots \\ \frac{p\left(\hat{t} - \frac{2R_{s0}}{c} - \frac{2V_s(K-1)T}{c}\right)}{p\left(\hat{t} - \frac{2R_{s0}}{c}\right)} e^{-j(K-1)v_s} \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

3 Keystone 变换原理

本节简要介绍其基本原理。为了进行 Keystone 变换校正目标距离走动,首先将式(6)中 $s_s(\hat{t}, t_k)$ 从快时间域变换到距离频率域,得:

$$S_s(f, t_k) = \tilde{A}_s P(f) e^{-j\frac{4\pi}{c} R_{s0}} e^{-j\frac{4\pi}{c} (f_c + f) V_s t_k} \quad (8)$$

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 η_k , 所谓的 Keystone 变换就是进行尺度变换 $t_k = f_c / (f_c + f) \eta_k$ [6], 将其代入式(8)有如下结果:

$$\begin{aligned} S'_s(f, \eta_k) &= S_s\left(f, \frac{f_c}{f_c + f} \eta_k\right) \\ &= \tilde{A}_s P(f) e^{-j\frac{4\pi}{c} R_{s0}} e^{-j\frac{4\pi}{c} V_s f \eta_k} \end{aligned} \quad (9)$$

从式(9)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:

$$f_{du} = f_d + Ff_r = \frac{2V_{s0}(f + f_c)}{c} + \frac{2V_{sF}(f + f_c)}{c} \quad (10)$$

其中 F 为模糊数, f_r 为脉冲重复频率, $V_s = V_{s0} + V_{sF}$, V_{s0} 和 V_{sF} 分别为 f_d 和 Ff_r 对应的速度. 对式(9)进行修正就可以得到目标存在多普勒模糊情况下的 Keystone 变换:

$$S'_s(f, \eta_k) = e^{-j2\pi \frac{f}{f_c + f} k F} S_s \left(f, \frac{f_c}{f_c + f} \eta_k \right) \quad (11)$$

可以将式(9)看成是式(11)当模糊数 $F = 0$ 时的特例.

4 新方法原理介绍

图1为所提新方法流程图,具体可描述如下:

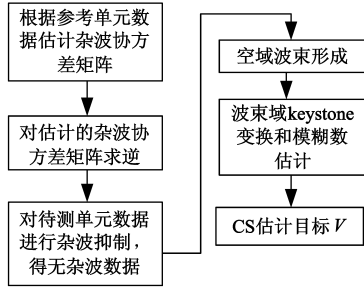


图1 本文方法实现框图

步骤1 利用参考单元的样本数据估计杂波协方差矩阵 \mathbf{R} , 估计得到的协方差矩阵记为 $\hat{\mathbf{R}}^{[3]}$;

步骤2 进行杂波抑制;

本文是利用步骤1估计得到的 $\hat{\mathbf{R}}$ 的逆矩阵 $\hat{\mathbf{R}}^{-1}$ 来实现杂波抑制的^[1,16~18], 则:

$$\tilde{\mathbf{X}}_{\text{pri}_0_s} = \begin{bmatrix} \xi_1 & \xi_2 e^{-j\frac{4\pi}{c} V_s T} & \cdots & \xi_K e^{-j\frac{4\pi}{c} V_s f_c (K-1) T} \\ \xi_1 e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} d \cos \varphi} & \xi_2 e^{-j\frac{4\pi}{c} V_s f_c T} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} d \cos \varphi} & \cdots & \xi_K e^{-j\frac{4\pi}{c} V_s f_c (K-1) T} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} d \cos \varphi} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \xi_1 e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} d (N-1) \cos \varphi} & \xi_2 e^{-j\frac{4\pi}{c} V_s f_c T} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} d (N-1) \cos \varphi} & \cdots & \xi_K e^{-j\frac{4\pi}{c} V_s f_c (K-1) T} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} d (N-1) \cos \varphi} \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中 $\xi_k = \tilde{A}_s p \left(\hat{t} - \frac{2R_{s0}}{c} - \frac{2V_s t_k}{c} \right)$, $k = 1, 2, \dots, K$. 则

$\tilde{\mathbf{X}}_{\text{pri}_0}$ 与 $\tilde{\mathbf{X}}_{\text{pri}_0_s}$ 有如下关系:

$$\tilde{\mathbf{X}}_{\text{pri}_0} = \tilde{\mathbf{X}}_{\text{pri}_0_s} + \mathbf{X}_n \quad (15)$$

其中 \mathbf{X}_n 表示高斯白噪声, 波束形成以及后续的距离走动校正后噪声分布特性不变, 因此我们在推导中可将其隐去.

波束形成的原理如下: 沿天线波束主瓣所指方向 ψ_s 对杂波抑制后的数据进行空域波束形成, 即与 ψ_s 方向的空域导向矢量 $\mathbf{a}(u_s)$ 进行匹配滤波:

$$\tilde{\mathbf{y}}_{\text{pri}_0_{BF}} = [\mathbf{a}(u_s)]^H \tilde{\mathbf{X}}_{\text{pri}_0} \quad (16)$$

式中 $[\cdot]^H$ 表示共轭转置运算, $\tilde{\mathbf{y}}_{\text{pri}_0_{BF}}$ 为 $K \times 1$ 维行向量. 则 $\tilde{\mathbf{y}}_{\text{pri}_0_{BF}}$ 有如下形式:

$$\tilde{\mathbf{y}}_{\text{pri}_0_{BF}} = \left[\xi_1 \quad \xi_2 e^{-j\frac{4\pi}{c} V_s f_c T} \quad \cdots \quad \xi_K e^{-j\frac{4\pi}{c} V_s f_c (K-1) T} \right]^T \quad (17)$$

$$\tilde{\mathbf{x}}_{\text{pri}_0} = \hat{\mathbf{R}}^{-1} \tilde{\mathbf{x}}_{\text{pri}_0}$$

$$\tilde{\mathbf{x}}_{\text{pri}_r} = \hat{\mathbf{R}}^{-1} \tilde{\mathbf{x}}_{\text{pri}_r} \quad (12)$$

上式中 $\tilde{\mathbf{x}}_{\text{pri}_0}$ 和 $\tilde{\mathbf{x}}_{\text{pri}_r}$ 分别是待检测单元的原始数据及杂波抑制后数据; $\tilde{\mathbf{x}}_{\text{pri}_r}$ 和 $\tilde{\mathbf{x}}_{\text{pri}_r}$ 分别为参考单元的原始数据及杂波抑制后数据.

步骤3 对抑制杂波后的数据进行空域波束形成, 实现目标空域积累;

首先将 $NK \times 1$ 维列向量 $\tilde{\mathbf{x}}_{\text{pri}_0}$, $\tilde{\mathbf{x}}_{\text{pri}_r}$ 转换为 $N \times K$ 数据矩阵 $\tilde{\mathbf{X}}_{\text{pri}_0}$, $\tilde{\mathbf{X}}_{\text{pri}_r}$, $\tilde{\mathbf{X}}_{\text{pri}_0}$, $\tilde{\mathbf{X}}_{\text{pri}_r}$ 与式(1)中 \mathbf{X} 具有相同的结构, 二者差别在于 $\tilde{\mathbf{X}}_{\text{pri}_0}$, $\tilde{\mathbf{X}}_{\text{pri}_r}$ 不再包含杂波成分.

第2节式(6)给出了目标回波沿快时间-慢时间的信号形式, 为了进一步说明本文进行空域波束形成的原理, 这里给出相控阵雷达接收目标回波沿快时间-慢时间-空间的信号形式:

$$s_s(\hat{t}, t_k, D_n) = \tilde{A}_s p \left(\hat{t} - \frac{2R_{s0}}{c} - \frac{2V_s t_k}{c} \right) e^{-j\frac{4\pi}{c} V_s f_c t_k} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} d D_n \cos \varphi} \quad (13)$$

其中 $D_n = 0, 1, 2, \dots, N-1$, 表示第 $D_n + 1$ 个阵元接收的数据, 此时存在距离走动的空时二维目标数据(目标0时刻所在距离单元为例, 其余单元类似处理)记为:

其中 $\xi_k = \tilde{A}_s p \left(\hat{t} - \frac{2R_{s0}}{c} - \frac{2V_s t_k}{c} \right)$, $k = 1, 2, \dots, K$. 对所有

$\tilde{\mathbf{y}}_{\text{pri}_r}$ 也进行空域波束形成得到数据 $\tilde{\mathbf{y}}_{\text{pri}_r_{BF}}$, 并将 $\tilde{\mathbf{y}}_{\text{pri}_0_{BF}}$ 和各参考单元的 $\tilde{\mathbf{y}}_{\text{pri}_r_{BF}}$ 按顺序组合在一起, 得到 $L \times K$ 维矩阵 (L 表示快时间采样点数), 记为 \mathbf{Y} 或 $\mathbf{Y}(\hat{t}, t_k)$, 其各行数据表示沿慢时间采样, 各列数据为沿快时间的采样所得, 则 $\mathbf{Y}(\hat{t}, t_k)$ 的形式与式(6)相同.

步骤4 在波束域进行 Keystone 变换校正目标距离走动;

为了进行 Keystone 变换校正目标距离走动, 首先将 \mathbf{Y} 沿快时间做傅里叶变换, 将变换结果记为 γ , 则 γ 的第 l 行第 k 列元素可写为:

$$\gamma(f_l, t_k) = \tilde{A}_s P(f_l) e^{-j\frac{4\pi}{c} f_l R_{s0}} e^{-j\frac{4\pi}{c} (f_c + f_l) V_s t_k} \quad (18)$$

其中 f_l , $l = 1, 2, \dots, L$ 表示快时间频率 f 的 L 个采样点. 由于目标模糊数是未知, 此时本文首先对式(18)目标进

行如式(9)的变量代换,结果如下:

$$\gamma'(f_l, t_k) = \tilde{A}_s P(f) e^{-j\frac{4\pi}{c} R_0} e^{-j\frac{4\pi}{c} V_s \eta_k} e^{-j2\pi \frac{Ff}{c} f \eta_k} \quad (19)$$

上式中第 3 个指数项表示由模糊的速度 $V_{sF} = \frac{Ff_c}{2(f+f_c)}$ 所引起的距离走动. 为了实现剩余部分距离走动校正, 我们根据常规空中动目标的速度范围构造一个模糊数集合 $\Gamma = [F_1, F_2, \dots, F_M]$, 并构造如下代价函数实现目标多普勒模糊数估计:

$$\hat{F} = \max_{F=F_1, F_2, \dots, F_M} \arg(\max(\text{FFT}_{\eta}(\text{IFFT}_f(\gamma'(H)^F))) \quad (20)$$

上式中 H 为剩余距离走动校正矩阵, H 的第 l 行第 k 列元素可表示为 $H(f_l, \eta_k) = e^{-j2\pi(\frac{f}{c})f\eta_k}$, 当 F 取不同值时 $(H)^F$ 表示分别针对不同的模糊数补偿属于该模糊数的目标的距离走动. $\text{IFFT}_f(\cdot)$ 表示沿快时间频域进行逆傅里叶变换, 将数据变换回快时间域. $\text{FFT}_{\eta}(\cdot)$ 表示沿慢时间维进行傅里叶变换, 其目的是实现目标相干积累.

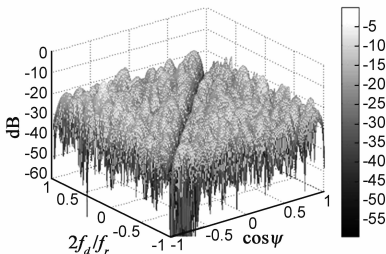
根据式(20)可估计得到目标的多普勒模糊数 \hat{F} , 与 \hat{F} 对应的距离走动校正结果记为 \mathbf{Y}_{KF} , 此时目标所在距离单元数据 \mathbf{y}_{KF} 有如下形式:

$$\mathbf{y}_{KF} = \left[\tilde{A}_s p\left(\hat{t} - \frac{2R_{s0}}{c}\right) \tilde{A}_s p\left(\hat{t} - \frac{2R_{s0}}{c}\right) e^{-j\frac{4\pi}{c} V_s f_c T} \dots \tilde{A}_s p\left(\hat{t} - \frac{2R_{s0}}{c}\right) e^{-j\frac{4\pi}{c} V_s f_c (K-1) T} \right]^T \quad (21)$$

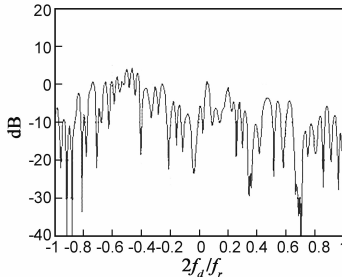
步骤 5 利用 CS 技术对距离走动校正后的数据估计目标多普勒频率参数.

本文利用压缩感知的目的在于估计出目标的多普勒频率值, 由于目标信号在多普勒域是稀疏的(这里只考虑匀速目标), 那么对目标信号的重构转化为重构多普勒域的目标导向矢量, 从而可利用基追踪求索(Basis-Pursuit, BP)等一系列方法将多普勒估计问题转化为一个字典选择问题. 为了构造基字典, 首先将多普勒轴进行离散化处理, 假设将多普勒轴等分为 αK 个离散的频率单元 $\{f_{d1}, f_{d2}, \dots, f_{d\alpha K}\}$. 考虑将各个感兴趣的多普勒频点处的复幅度看作一个稀疏信号, 各频点处的多普勒矢量构成一个冗余字典:

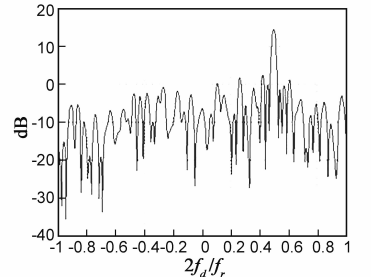
$$\Psi_v = [\mathbf{a}(v_1) \quad \mathbf{a}(v_2) \quad \dots \quad \mathbf{a}(v_{\alpha K})] \quad (22)$$



(a) 杂波抑制后的数据



(b) 波束形成后的结果



(c) 波束域Keystone后

图2 不同情况下回波数据的功率谱

式中 $v_j = 2\pi f_{dj}/f_r, j = 1, 2, \dots, \alpha K$. 步骤 4 所得的数据 \mathbf{y}_{KF} 即为观测数据, \mathbf{y}_{KF} 可用基字典 Ψ_v 表示为:

$$\mathbf{y}_{KF} = \Psi_v \boldsymbol{\alpha} + \mathbf{n} \quad (23)$$

由于这里的观测数据是待测单元内波束主瓣方向的数据, 所以可以认为数据中只包含一个目标的回波, 因此系数向量 $\boldsymbol{\alpha}$ 大部分元素都为 0 或近似为 0, 只有 1 个元素绝对值大于 0. $\boldsymbol{\alpha}$ 可通过如下的约束方程来求解:

$$\min(\|\boldsymbol{\alpha}\|_1), \text{ 且 } \|\mathbf{y}_{KF} - \Psi_v \boldsymbol{\alpha}\|_2 \leq \eta \quad (24)$$

其中 $\|\cdot\|_2$ 表示 l_2 范数, η 表示稀疏恢复所允许的误差限. 这里 l_2 范数的约束使得 $\|\mathbf{y}_{KF} - \Psi_v \boldsymbol{\alpha}\|_2$ 的残余成分尽可能小, l_1 范数的约束 $\min(\|\boldsymbol{\alpha}\|_1)$ 目的在于使恢复信号尽可能稀疏. 对于式(24)求解得系数向量 $\boldsymbol{\alpha}$, $\boldsymbol{\alpha}$ 中非零元素对应的多普勒频率即为我们所要估计的目标的多普勒频率值. 如果将估计得到的多普勒频率记为 \hat{f}_d , 进一步可根据如下关系式: $\hat{V} = \lambda f_r \hat{f}_d / 4 + \hat{F} c f_r / 2 f_c$ 得到目标速度的估计值.

5 仿真分析

本节将通过仿真实验验证本文方法的有效性. 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 -10dB , 杂噪比为 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 $\Delta R = 10\text{m}$.

图 2 给出了目标速度为 910m/s 时, 不同情况下回波的功率谱分布情况, 其中图 2(a) 为回波数据经杂波抑制后的功率谱, 图 2(b) 为空域波束形成后的功率谱, 图 2(c) 为波束域 Keystone 变换校正距离走动后的功率谱. 从图 2(a) 可以看出, 虽然杂波已被抑制(强杂波脊消除), 但是目标回波仍然淹没在噪声中; 经空域波束形成后, 相当于对目标回波进行了空域积累, 但是仍然看不出目标, 如图 2(b); 而经过波束域距离走动校正后, 从图 2(c) 可以看出目标能量得到显著积累.

图 3 比较了不同处理方法的检测性能. 图 3 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; “KF-STAP”是经文献[17]所提方法处理的改善因子曲线; “BF-KF-STAP”是经本文方法处理的改善因子曲线. 从图 3 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

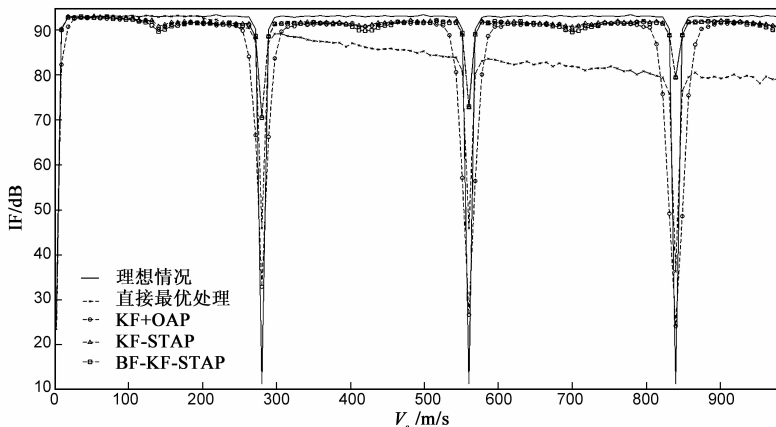


图3 不同处理方法的改善因子比较

图 4 给出了目标速度为 910m/s 时, 目标多普勒模糊数估计结果的代价函数曲线, 可以看出, 代价函数在 $F = 3$ 时取最大值, 从而验证了本文所构造的代价函数能够很好的估计出目标多普勒模糊数. 图 5 给出了目标速度估计的均方根误差 (MNSE) 随 SNR 的变化曲线, 其中“一个阵元数据估计”是指对每个阵元的数据分别进行 Keystone 变换, 然后任取一个阵元数据利用 CS 进行目标速度估计的性能曲线. 从图 5 可以看出, 当 SNR 较小时两种方法的速度估计均方根误差均较大, 随着 SNR 的增加, “本文方法”的目标速度估计性能显著提高, 估计性能基本接近克拉美-罗界 (Cramer-Rao Bound, CRB), 而“一个阵元数据估计”的性能仍然较差.

CRB)^[19], 而“一个阵元数据估计”的性能仍然较差.

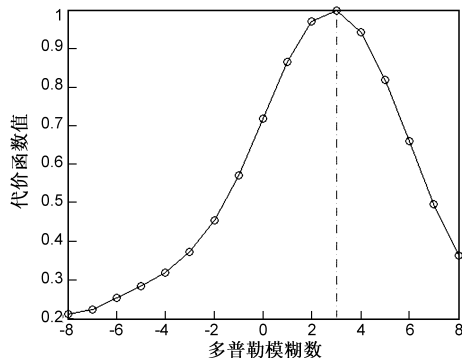


图5 目标速度估计性能随SNR变化

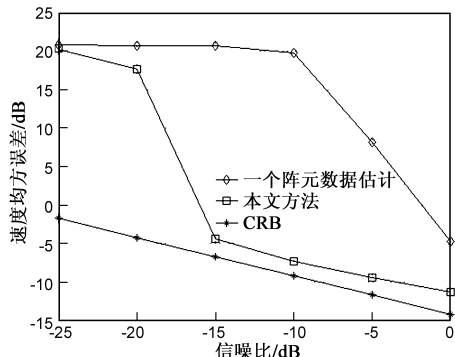


图4 多普勒模糊数估计的代价函数图

6 结束语

本文针对机载相控阵雷达高速空中动目标检测运算量大的问题, 提出了一种在波束域进行目标距离走动校正的新方法, 大大降低了运算量, 为实时处理提供了可能. 此外, 本文还将压缩感知技术引入进行机载相控阵雷达高速空中动目标参数估计, 取得了良好的估计性能.

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与实现[D]. 西安电子科技大学, 1993.
- [3] Brennan L E, Reed I S. Theory of adaptive radar[J]. IEEE Transaction on Aerospace Electron System, 1973, 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, 2(1): 1 - 7.
Bao Zheng, Liao Gui-sheng, et al. 2-D temporal-spatial adaptive clutter suppression for phased array airborne radars[J]. Acta Electronica Sinica, 1993, 2(1): 1 - 7. (in Chinese)
- [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, Xing Meng-dao. Weak target detection based on keystone transform[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(9): 1675 - 1678. (in Chinese)
- [6] 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.
- [7] Lü Xiao-lei, Xing Meng-dao, 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, 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, et al. Comparison of several methods for high speed detection target with narrow bandwidth[A]. Proceedings of the 2nd Asian-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar[C]. Xi'an, China: [s. n.], 2009. 767 - 770.
- [10] 苏军海, 等. 宽带机动目标检测[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(6): 1283 - 1287.
Su Jun-hai, et al. Wideband radar detection for maneuvering target[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2009, 31(6): 1283 - 1287. (in Chinese)
- [11] Zhang S, Zeng T, Long T, et al. Dim target detection based on keystone transformation[A]. Proceedings of IEEE 2005 International Radar Conference[C]. USA: IEEE, 2005. 889 - 894.
- [12] Wu Zhao-ping, He Xue-hui, Su Tao. Coherent integration detection of multiple high speed targets with range migration and Doppler spread [A]. Proceedings of 2009 IET International Radar Conference[C]. Guilin, China: [s. n.], 2009. 1 - 5.
- [13] Su J, Xing M, Wang G, et al. High-speed multi-target detection with narrowband radar[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2010, 4(4): 595 - 603.
- [14] 余吉, 许稼, 等. 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, 6(11): 454 - 458.
Yu Ji, Xu Jia, et al. 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)
- [15] Zhou Zhi, Su Zhi-gang, Wu Ren-biao. Method for detecting ground moving target with range migration[A]. Proceedings of the IET International Radar Conference[C]. Guilin, China: [s. n.], 2009. 1 - 4.
- [16] Wu R B, Jia Q Q, Li H. A novel STAP method for the detection of fast dim air moving targets[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Signal Processing (ICSP 2010) [C]. Beijing: IEEE, 2010. 2160 - 2163.
- [17] 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 - 1463.
Wu Ren-biao, Jia Qiong-qiong, Li Hai. Detection of fast moving dim targets on airborne radar via STAP[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(6): 1459 - 1463. (in Chinese)
- [18] 吴仁彪, 贾琼琼, 李海. 机载雷达高速空中机动目标检测新方法[J]. 电子学报, 2013, 41(1): 86 - 90.
Wu Ren-biao, Jia Qiong-qiong, Li Hai. Detection of fast air maneuvering targets via STAP[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(1): 86 - 90. (in Chinese)
- [19] Klemm R K. Cramer-Rao analysis of reduced order STAP processors[A]. The Record of the IEEE 2000 International Radar Conference[C]. Alexandria: IEEE, 2000. 584 - 589.

作者简介



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



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.