

文章编号:1004-9037(2012)02-0125-06

# 一种时域滑窗多普勒后处理的STAP方法

姜 晖<sup>1</sup> 廖桂生<sup>2</sup>

(1. 西安邮电学院通信与信息工程学院,西安,710121;

2. 西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室,西安,710071)

**摘要:**一般的多普勒后处理方法忽视了相邻多普勒通道间数据的相关性,这将造成杂波协方差矩阵估计的不准,因此本文提出了一种联合相邻多普勒通道信息的空时自适应处理方法。该方法先通过时域滑窗后滤波的处理方式来降低杂波的自由度,再利用相邻多普勒门上数据相关性进行联合处理,最终构造出新的杂波协方差矩阵。该方法在提高时域自适应能力的同时减轻了空域杂波相消的负担,提高了处理器的性能,并消除因信息泄露带来的影响,以达到有效抑制地杂波的目的。通过对仿真和实测数据处理,证明了该方法的有效性。

**关键词:**机载相控阵雷达;降维;多普勒通道

中图分类号:TN959.73

文献标识码:A

## STAP Method After Time-Delay Taps and Doppler Filtering

Jiang Hui<sup>1</sup>, Liao Guisheng<sup>2</sup>

(1. School of Communications and Information Engineering, Xi'an University of Post and Telecommunication, Xi'an, 710121, China;

2. National Key Lab of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an, 710071, China)

**Abstract:** In post-Doppler processing methods of space-time adaptive processing (STAP) available, the correlation between the channels is ignored, thus leading to the inaccurate estimation of covariance matrix of clutter. Hence, a new post-Doppler processing STAP method is proposed to solve the problem. The method firstly reduces the degree of freedom (DOF) of clutter by time-delay filtering. Then, the method makes full use of the correlation among the adjacent Doppler bins to construct a new covariance matrix. It improves the ability of adaptation in the time domain and releases the burden of clutter suppression in the spacing domain, eliminates the influence of diffuse information on covariance matrix, and combines the multi-Doppler bins followed by the clutter suppression. Thereby, the proposed method can effectively suppress clutter. Finally, the measured data is processed by the method. Analysis results show that the method improves the processing of effectiveness.

**Key words:** airborne phased array radar; reduced rank (RR); Doppler channel

## 引 言

空时自适应处理技术在空域和时域中同时进行自适应滤波,能够有效地抑制杂波,尽管空时自适应处理具有非常好的性能,但是在实际应用中存在着许多的困难:运算量大;在相控阵体制下如何保持众

多单元一致性的前提下实现超低副瓣;在实际应用中无法准确地估计杂波协方差矩阵。这些难题均造成了最优处理的不现实性,为了克服上述两个问题,降维技术<sup>[1-9]</sup>在空时自适应处理(Space-time adaptive processing, STAP)算法得到了广泛的应用。

在各种降维方法中由Brennan<sup>[3]</sup>提出的先滑窗再时空联合处理方法(FSA),虽然该方法可用较

少的时域自由度和较多的空域自由度执行空时联合自适应处理,但是它对接收到的数据仍然有很高的要求,在特定的情况下难以获得足够的样本,于是人们对其提出了改进,如子阵处理的方法,在延迟的通道中只选用部分的输出,同时对其采取时域加窗处理。这些改进方法虽然在杂波抑制能力上取得了一定的提高,但在延迟通道中选取的输出数据过少,时域的自适应能力将会变差。另外,由于时域的深加权也会对系统的稳定性造成一定影响。同时,人们在采用各种降维方法对数据进行处理时,一般都未将多普勒通道信息的相关性考虑在内,这就进一步增加了杂波协方差矩阵估计的不准确。因此,为了更好地估计杂波协方差矩阵,本文利用相邻多普勒门的信息进行杂波协方差矩阵估计,提出了一种联合多普勒门的空时自适应处理方法,将这个思想应用到 FSA 方法中就形成了 JDFSA 方法,该方法能够利用较多的多普勒通道进行联合处理,以获得较强的杂波抑制的能力。

## 1 空时二维自适应处理

空时二维自适应信号处理的思想是 Brennan<sup>[3]</sup> 首先提出用于机载雷达中,其实质是将一维空域滤波技术推广到时间与空间二维域中,提出了自适应雷达理论,并在高斯杂波背景加确知信号的模型下,根据似然比检测理论导出一种空时二维联合自适应处理结构。

设雷达天线由  $N$  个阵元组成,一个相干处理脉冲内有  $K$  个脉冲,将第  $n$  个阵元的第  $k$  次采样的数据记为  $x_{nk}$ 。设  $H_0, H_1$  分别代表无目标、有目标,在此假设下接收数据可写为

$$x_{nk} = \begin{cases} c + n & \text{假设为 } H_0 \\ bS + c + n & \text{假设为 } H_1 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $b$  为回波的幅度;  $c, n$  分别为杂波和热噪声。式(1)可写为

$$\mathbf{x} = [x_{11} \ x_{21} \ \cdots \ x_{n1} \ x_{12} \ \cdots \ x_{nk}]^T$$

$$\mathbf{S} \text{ 为空时信号导向矢量}$$

$$\mathbf{S} = \mathbf{S}_s \otimes \mathbf{S}_t \quad (2)$$

式中:符号  $\otimes$  为 kronecker 积;  $\mathbf{S}_s, \mathbf{S}_t$  分别是空间和时域导向矢量,  $\mathbf{S}_t(f_{dk}) = [1 \ e^{jf_{dk}} \ \cdots \ e^{j(K-1)f_{dk}}]^T$ ,  $\mathbf{S}_s(\psi_0) = [1 \ e^{j\cos\psi_0} \ \cdots \ e^{j(N-1)\cos\psi_0}]^T$ , 其中  $f_{dk}, \psi_0$  为时间归一化频率和空域锥角。

根据线性约束最小方差准则对此数据求解最优权,即求解如下式的线性约束

$$\begin{cases} \min_{\mathbf{w}} & \mathbf{W}^H \mathbf{R}_x \mathbf{W} \\ \text{s. t.} & \mathbf{W}^H \mathbf{S} = 1 \end{cases} \quad (3)$$

式中  $\mathbf{R}_x$  为杂波协方差矩阵。

可得到最优权

$$\mathbf{W}_{\text{opt}} = \frac{\mathbf{R}_x^{-1} \mathbf{S}}{\mathbf{S}^H \mathbf{R}_x^{-1} \mathbf{S}} \quad (4)$$

其改善因子为

$$\text{IF} = \frac{\text{SCNR}_{\text{out}}}{\text{SCNR}_{\text{in}}} = \mathbf{S}^H \mathbf{R}_x^{-1} \mathbf{S} (\text{CNR}_{\text{in}} + 1) \sigma_{\text{in}}^2 \quad (5)$$

式中:  $\sigma_{\text{in}}^2$  为输入的噪声功率;  $\text{CNR}_{\text{in}}$  为输入杂噪比。

## 2 FSA 处理方法

直接使用全维空时自适应处理方法对接收数据进行消杂处理可达到最优,但在实际中无法实现。因此提出各种降维处理方法对数据进行处理,使得运算量在降低的同时性能达到准最优。在这些方法中 FSA 的原理图如图 1 所示。

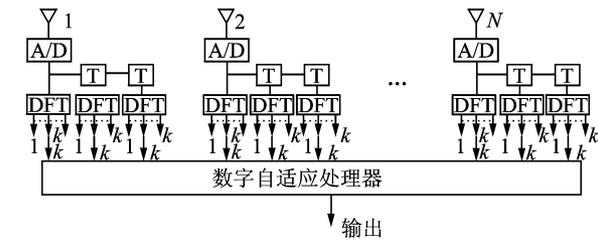


图 1 FSA 方法原理图

该方法先通过时域滑窗滤波处理,降低了每一个多普勒通道的杂波自由度,这样可以用较少的时域自由度和较多的空域自由度参与时空联合处理。

假设在一个 CPI 内的脉冲数是  $K+2$  个,对每个空域通道进行 3 次  $K$  点离散傅里叶变换 (Discrete Fourier transform, DFT),每次参加的序列在时间上滑动一个脉冲,空时自适应处理是针对一个多普勒通道的输出进行处理。设  $X(n, i) (i=1, 2, 3)$  分别表示在第  $n (n=1, \dots, N)$  个空域通道中接收的不滑动、滑一个脉冲、滑两个脉冲的数据矢量

$$\mathbf{X}(n, 1) = [x_{n1} \ x_{n2} \ \cdots \ x_{nK}]^H \quad (6)$$

$$\mathbf{X}(n, 2) = [x_{n2} \ x_{n3} \ \cdots \ x_{nK+1}]^H \quad (7)$$

$$\mathbf{X}(n, 3) = [x_{n3} \ x_{n4} \ \cdots \ x_{nK+2}]^H \quad (8)$$

经过 DFT 后,第  $k$  个多普勒滤波器 ( $T_k$ ) 的输出为

$$y_{ink} = T_k^H \mathbf{X}(n, i) \quad i = 1, 2, 3 \quad (9)$$

形成  $N$  个通道的输出可写为

$$\mathbf{Y}_{ik} = [y_{i1k} \ y_{i2k} \ \cdots \ y_{iNk}]^H \quad (10)$$

最终形成的处理数据是

$$\mathbf{B}(r_n, f_{dk}) = [\mathbf{Y}_{1k}^H(r_n, f_{dk}) \ \mathbf{Y}_{2k}^H(r_n, f_{dk}) \ \mathbf{Y}_{3k}^H(r_n, f_{dk})]^H \quad (11)$$

FSA 方法的空时二维导向矢量为

$$\mathbf{S}_{F\$A} = \mathbf{g} \otimes \mathbf{S}_s(\psi_0) \quad (12)$$

式中:  $\mathbf{g} = (1, g_1, g_2)^\top$ ,  $g_1 = \frac{\mathbf{W}_{ik}^H \mathbf{S}_t(f_{dk})}{\mathbf{W}_{ik}^H \mathbf{S}_t(f_{dk}) e^{j\pi f_{dk}}}$ ,  $g_2 = \frac{\mathbf{W}_{ik}^H \mathbf{S}_t(f_{dk})}{\mathbf{W}_{ik}^H \mathbf{S}_t(f_{dk}) e^{j2\pi f_{dk}}}$ ,  $\mathbf{W}_{ik}$  是对应于第  $k$  个多普勒通道所加的自适应权矢量。求解类似于式(3)的最优问题, 可得最优权

$$\mathbf{W}_{\text{opt}} = \frac{\mathbf{R}_{B_k}^{-1} \mathbf{S}_{F\$A}}{\mathbf{S}_{F\$A}^H \mathbf{R}_{B_k}^{-1} \mathbf{S}_{F\$A}} \quad (13)$$

式中  $\mathbf{R}_{B_k} = E[\mathbf{B}_k \mathbf{B}_k^H]$ 。

最后, 其改善因子为

$$\text{IF} = \mathbf{S}_{F\$A}^H \mathbf{R}_{B_k}^{-1} \mathbf{S}_{F\$A} (\text{CNR}_{\text{in}} + 1) \sigma_{\text{in}}^2 \quad (14)$$

这种方法虽然在理论上可以取得较好的结果, 但考虑到实际的数据处理中相邻多普勒通道具有一定的相关性, 直接估计杂波协方差矩阵后进行杂波相消时, 会使目标信息有所损耗, 降低了目标的检测性能。因此, 在构成杂波协方差矩阵时, 必须考虑相邻多普勒通道数据的相关性, 这就引出了本文的 JDF \$ A 处理方法。

### 3 JDF \$ A 方法

现对某实测数据进行脉压, 假定相邻的多普勒单元不具有相关性, 目标只存在于待检测单元内, 即在图2中所示的单元1内, 利用周围的单元进行杂波相消, 可以获得较好的结果, 其脉压如图3(a)所示。但因为F \$ A方法中进行DFT后, 每次针对的是一个多普勒通道的输出做自适应处理, 这种方法加大了空域杂波相消的负担, 而且相邻的多普勒门上的信息具有相关性, 即单元1内的目标信息就被扩展, 在2或3单元内都可能含有目标信息, 其脉压如图3(b)所示。

从图3(b)中可以看出, 此时的脉压将会产生偏差, 这时使用相邻单元的数据估计杂波协方差矩阵后进行杂波相消, 就会导致目标信息损失。因此, 在形成训练数据时必须考虑相邻多普勒门的信息, 积累目标信息的能量。

在文中提出的方法首先在每个空域通道进行多普勒滤波, 将空时全分布的杂波进行局部化处理, 接着利用相邻的若干个多普勒通道<sup>[10-12]</sup>的数据进行联合处理, 从而对杂波进行消除, 这样的结构

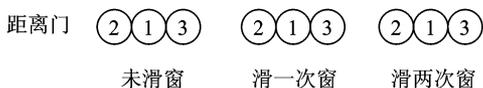
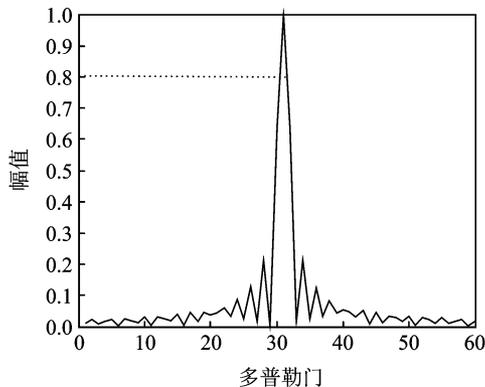
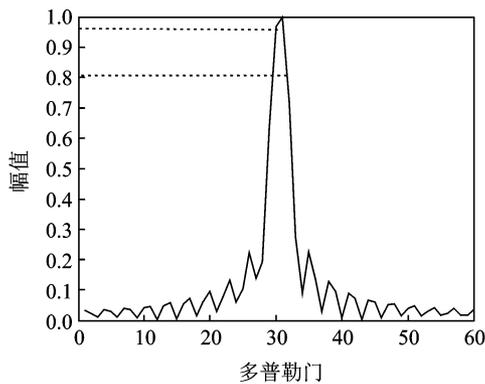


图2 某距离单元的相邻多普勒通道图



(a) 理想条件下方位向的脉压响应



(b) 存在误差条件下方位向的脉压响应

图3 脉压响应图

可以在有效抑制杂波的同时降低空域抑制杂波的复杂度, 及其原理图如图4所示。

经过DFT后形成的  $N$  个通道的第  $k, k-1, k+1$  个多普勒滤波器输出

$$\mathbf{Y}_{ik} = [\mathcal{Y}_{i1k} \quad \mathcal{Y}_{i2k} \quad \cdots \quad \mathcal{Y}_{iNk}]^H \quad (15)$$

$$\mathbf{Y}_{i(k-1)} = [\mathcal{Y}_{i1(k-1)} \quad \mathcal{Y}_{i2(k-1)} \quad \cdots \quad \mathcal{Y}_{iN(k-1)}]^H \quad (16)$$

$$\mathbf{Y}_{i(k+1)} = [\mathcal{Y}_{i1(k+1)} \quad \mathcal{Y}_{i2(k+1)} \quad \cdots \quad \mathcal{Y}_{iN(k+1)}]^H \quad (17)$$

由于在DFT后的输出中是联合3个多普勒通道进行处理来对消杂波, 因此取第  $k, k-1, k+1$  个多普勒通道的数据构成的时空数据矢量为

$$\mathbf{Z}_k = [\mathbf{Y}_{1k}^H \quad \mathbf{Y}_{2k}^H \quad \mathbf{Y}_{3k}^H \quad \mathbf{Y}_{1(k-1)}^H \quad \mathbf{Y}_{2(k-1)}^H \quad \mathbf{Y}_{3(k-1)}^H \quad \mathbf{Y}_{1(k+1)}^H \quad \mathbf{Y}_{2(k+1)}^H \quad \mathbf{Y}_{3(k+1)}^H]^H \quad (18)$$

同理, 可得最优权

$$\mathbf{W}_{\text{kopt}} = \mu \mathbf{R}_{Z_k}^{-1} \mathbf{S}_{\text{JDF\$A}} \quad (19)$$

式中:  $\mu = 1/(\mathbf{S}_{\text{JDF\$A}}^H \mathbf{R}_{Z_k}^{-1} \mathbf{S}_{\text{JDF\$A}})$ ;  $\mathbf{R}_{Z_k} = E[\mathbf{Z}_k \mathbf{Z}_k^H]$ ;  $\mathbf{S}_{\text{JDF\$A}} = \mathbf{S}_1 \otimes \mathbf{S}_2 \otimes \mathbf{S}_3$ ,  $\otimes$  为 Kronecker 积,  $\mathbf{S}_1 = (1 \quad e^{-j\pi f_{dk}} \quad e^{-j2\pi f_{dk}})^\top$ ,  $\mathbf{S}_2(\psi_0) = [(1 \quad e^{j\cos(\psi_0)} \quad \cdots \quad e^{j\cos(\psi_0)(N-1)})^\top]^\top$ ,  $\mathbf{S}_3 = (1 \quad D_1 \quad D_2)^\top$ ,  $D_1 = \frac{\mathbf{W}_{ik-1}^H \mathbf{S}_t(f_{dk})}{\mathbf{W}_{ik}^H \mathbf{S}_t(f_{dk})}$ ,  $D_2 = \frac{\mathbf{W}_{ik+1}^H \mathbf{S}_t(f_{dk})}{\mathbf{W}_{ik}^H \mathbf{S}_t(f_{dk})}$ ,  $\mathbf{W}_{im}$  ( $m = k, k-1, k+1$ ) 分别是第  $k, k-1, k+1$  个多普勒通道所加的

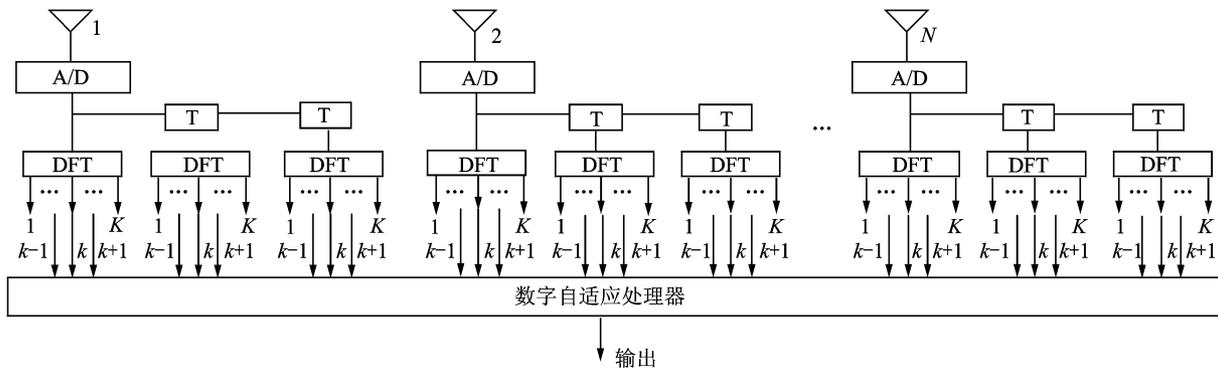


图4 JDFSA方法原理图

自适应权矢量。

最后,可得到改善因子

$$IF(k) = \mathbf{S}_{\text{JDFSA}}^H \mathbf{R}_k^{-1} \mathbf{S}_{\text{JDFSA}} (\text{CNR}_{\text{in}} + 1) \sigma_{\text{in}}^2 \quad (20)$$

本方法对接收到的数据先通过滑窗再时域滤波处理后再联合相邻多普勒通道进行对消杂波,当待测样本中存在着各种干扰,通过对接收到的数据先通过滑窗处理增加样本数,随后对杂波进行窄带滤波处理,再使用相邻的多普勒通道进行联合处理来对消杂波,这样的结构可以在有效抑制杂波的同时降低空域抑制杂波的负担,提高时域抑制杂波的能力。

## 4 仿真实验结果

### 4.1 仿真数据

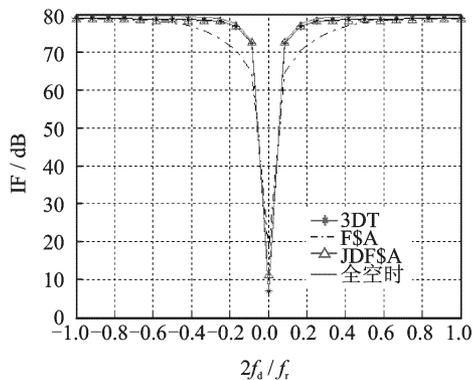
本节利用仿真数据来验证本文的方法,天线子阵数为8,采样快拍次数为12,信号波长0.32 m,载机速度120 m/s,脉冲重复频率1 500 Hz,载机高度6 000 m。

假设当为理想条件下的改善因子如图5(a)所示,JDFSA与3DT方法的改善性能相当,好于FSA方法。

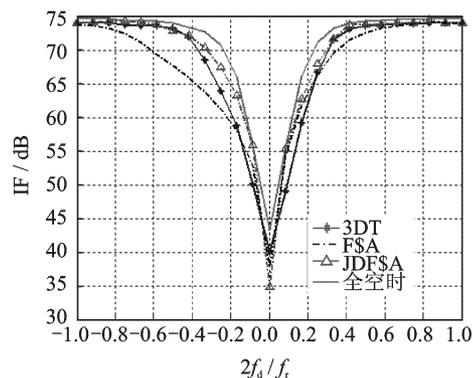
当存在5%阵元误差,其幅度误差服从正态分布,相位误差服从均匀分布,杂波起伏5%时,其改善因子如图5(b)所示。杂波起伏导致主杂波谱的展宽,引起了性能凹口的展宽,JDFSA方法在主杂区域明显地好于3DT和FSA方法。

现假定现有一个阵元幅相误差为5%,载机偏航5°,杂波起伏为5%的情况下,理论杂波模型仿真如图6(a)所示。偏航引起了杂波谱的弯曲,这造成了性能凹口整体右移,现用全空时方法、FSA方法、3DT方法和JDFSA方法对杂波进行处理后得到了它们的改善因子图,如图6(b)所示。

从图6可以看出JDFSA算法在主杂波区域内



(a) 无误差



(b) 5%阵元误差和杂波起伏

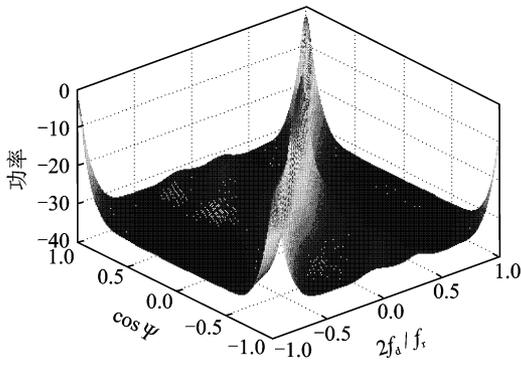
图5 改善因子图

的性能更加接近于全空时算法,而FSA算法的性能明显下降,说明了JDFSA的性能是优于FSA算法。

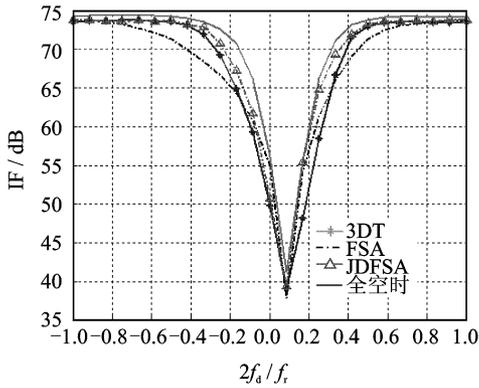
### 4.2 实测数据

以某机载三通道雷达系统为例验证JDFSA方法的有效性。雷达工作于X波段,且为正侧视,载机高度约为5 000 m,天线子孔径间距约0.6 m,脉冲重复频率1 000 Hz,载机速度约为115~145 m/s。

图7是FSA方法和JDFSA方法分别在理想



(a) 杂波谱



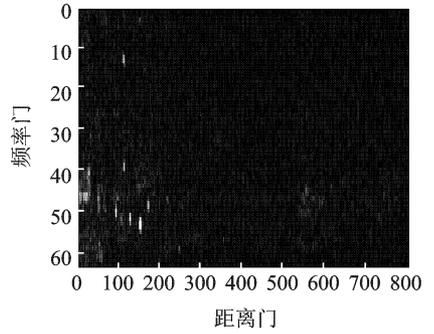
(b) 改善因子图

图6 5%幅相误差、杂波起伏和载机偏航

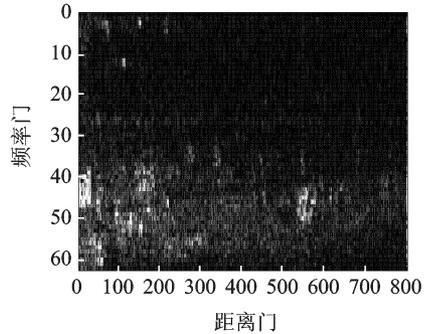
条件下和在距离向上存在配准误差条件下的多普勒束锐化(Doppler beam sharpening, DBS)图。

在理想条件下用FSA方法处理实测数据可以看到在第12个频率门,第110个距离门处的一个比较弱的目标就被明显地消弱了,而用JDFSA方法没有发生如此的情况。当存在距离误差时,在第40~60的多普勒通及第0~300的距离门处,用FSA方法消杂后目标基本上被淹没在杂波中,用JDFSA方法处理后目标的能量仍然高于周围的杂波能量。

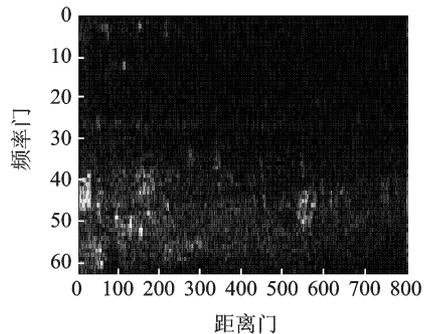
在第50个多普勒通道中加上3个目标,它们分别在260,310,360距离门上,径向速度的变化区间



(b) JDFSA输出DBS(无误差)



(c) FSA输出DBS(存在距离误差)



(d) JDFSA输出DBS(存在距离误差)

图7 输出的DBS

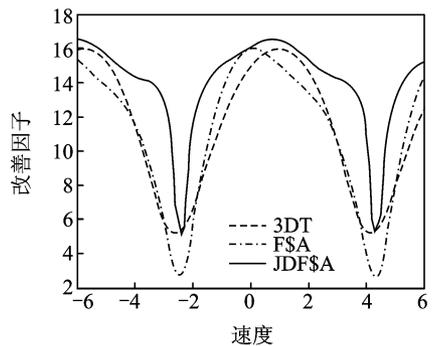
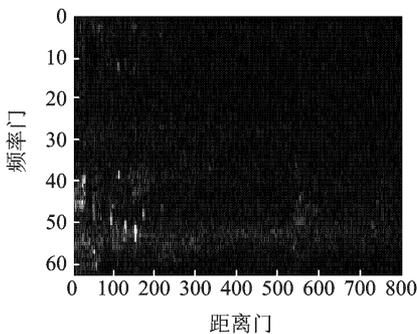


图8 第50多普勒通道的统计改善因子

是-6~6 m/s,其性能改善因子如图8所示。从图8可以看出,FSA方法和3DT方法的性能是整体相当的,而本文提出的JDFSA方法在整体改善性能要好于FSA方法和3DT方法。



(a) FSA输出DBS(无误差)

## 5 结束语

对于 FSA 方法,当存在大量强而分布宽的杂波从主瓣进入系统时,就会加大空域杂波抑制的负担,自适应性能就会降低,加之相邻多普勒通道的信息具有一定的相关性,因此本文采取 JDFSA 方法,利用相邻的多普勒通道进行联合处理,这样可以获得较强的杂波抑制能力,增强了抗干扰的能力。通过对仿真和实测数据的处理,验证了该方法的有效性。

### 参考文献:

- [1] Goldstein J S, Reed I S. Reduced rank adaptive filtering[J]. IEEE Trans on SP, 1997, 45(2): 493-496.
- [2] Haimovich A M. The eigencanceler: adaptive radar by eigenanalysis methods[J]. IEEE Trans on SP, 1991, 9(1):76-84.
- [3] Brennan L E, Piwinski D J, Standaher F M. Comparison of space-time adaptive processing approaches using experimental airborne radar data [C]// The Record of 1993 IEEE National Radar Conf Massachusetts, USA; IEEE, 1993. 176-181.
- [4] Melvin W L. A STAP overview [J]. IEEE Trans on AES Magazine, 2004, 19(1): 19-35.
- [5] Greve S D, Ries P. Framework and taxonomy for radar space-time adaptive processing (STAP) method [J]. IEEE Trans on AES, 2007, 43(3): 1084-1099.
- [6] Klemm R. Adaptive airborne MTI with two-dimensional motion compensation[J]. IEE Proceedings F Radar and Signal Processing, 1991, 138(6): 551-558.
- [7] 李明, 廖桂生, 周争光. 基于导数更新的机载前视阵雷达降维 STAP 方法[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(9):2031-2036.  
Li Ming, Liao Guisheng, Zhou Zhengguang. Reduced dimension of derivative based updating STAP algorithm for airborne forward looking radar [J].

Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(9): 2031-2036.

- [8] 李彩彩, 廖桂生, 朱圣棋, 等. 一种多普勒后处理的 STAP 方法研究[J]. 西安电子科技大学学报, 2009, 36(2):240-244.  
Li Caicai, Liao Guisheng, Zhu Shengqi, et al. Study of a post-Doppler processing STAP method [J]. Journal of Xidian University, 2009, 36(2):240-244.
  - [9] 向聪, 冯大政, 和洁. 机载雷达三维空时两级降维自适应处理[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(8):1869-1873.  
Xiang Cong, Feng Dazheng, He Jie. Three-dimensional spatial-temporal two-step dimension-reduced adaptive processing for airborne radar [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(8):1869-1873.
  - [10] 保铮, 张玉洪, 廖桂生, 等. 机载雷达空时二维信号处理(1)[J]. 现代雷达, 1994, 16(1): 38-48.  
Bao Zheng, Zhang Yuhong, Liao Guisheng, et al. Space-time signal processing for airborne radars (1) [J]. Modern Radar, 1994, 16(1):38-48.
  - [11] 保铮, 张玉洪, 廖桂生, 等. 机载雷达空时二维信号处理(2)[J]. 现代雷达, 1994, 16(2):17-27.  
Bao Zheng, Zhang Yuhong, Liao Guisheng, et al. Space-time signal processing for airborne radars (2) [J]. Modern Radar, 1994, 16(2):17-27.
  - [12] 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 Guisheng, Wu Renbiao. 2-D temporal-spatial adaptive clutter suppression for phased array airborne radars [J]. Acta Electronica Sinica, 1993, 21(9):1-7.
- 作者简介:**姜晖(1976-),男,博士,研究方向:阵列信号处理, E-mail: jh02-76@126.com; 廖桂生(1963-),男,教授,博士生导师,研究方向:分布式小卫星雷达系统、阵列信号处理、智能天线、空时二维信号处理以及地面运动目标检测等。