

# 距离模糊的机载非正侧面阵雷达 杂波谱补偿新方法

刘锦辉, 廖桂生, 李 明

(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室, 陕西西安 710071)

**摘 要:** 机载非正侧面阵雷达地面近程杂波分布具有距离依赖性, 使得杂波多普勒在空时平面上分布展宽; 当存在距离模糊时, 近程杂波和远程杂波混在一起, 现有的补偿方法在对近程杂波进行补偿的同时, 使得远程杂波的空时分布也发生改变, 这严重影响空时自适应处理(STAP)的性能. 针对该问题, 本文提出了一种基于 RBC 方法的距离模糊杂波补偿方法, 该方法增加了对远程杂波数据的约束保护, 使得该方法在补偿近程杂波距离依赖性的同时, 能够保证远程杂波的空时分布不发生改变; 并且当存在阵元误差时, 该方法依然能够获得良好的补偿性能. 计算机仿真结果验证了本文方法的有效性.

**关键词:** 距离模糊; 机载非正侧面阵; 基于配准的方法; 阵元误差

**中图分类号:** TN959.73      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2011) 09-2060-07

## A Clutter Spectrum Compensation Method for Non Side-Looking Airborne Radar with Range Ambiguity

LIU Jin-hui, LIAO Gui-sheng, LI Ming

(National Lab of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

**Abstract:** The ground clutter of the non side-looking airborne radar (non-SLAR) is range-dependent, which makes the ground clutter Doppler distribution widen in the space-time domain. When the range ambiguity is considered, the short and far slant range clutters are mixed. Although the existing range-dependence compensation methods can mitigate the range-dependence of the short slant range clutter, they change the space-time distribution of the far slant range clutter. It severely decreases the performance of the space-time adaptive processing (STAP). We propose a range ambiguity clutter compensation method which adds the constraint protection of the far slant range clutter based on the registration-based method (RBC). When the proposed method is applied to the range ambiguity clutter, it can not only mitigate the range dependence of the short slant range clutter, but also keep the distribution of the far slant range clutter unchanged. Moreover, the proposed method can achieve good performance when the antenna error exists in the clutter data. The computer simulation results show the validity of the proposed method.

**Key words:** range ambiguity; non side-looking airborne radar; registration-based method; antenna error

## 1 引言

空时自适应处理技术(STAP)<sup>[1~4]</sup>常用来抑制地面杂波, 检测地面慢速运动目标, 其处理性能的优劣与杂波协方差矩阵估计的准确性密切相关. 但是, 在机载非正侧面阵雷达中, 由于地面近程杂波数据的空时分布具有距离依赖性<sup>[4,5]</sup>, 导致临近距离单元的杂波不满足独立同分布条件, 进而无法从杂波样本来准确估计待检测距离单元的杂波协方差矩阵, 致使 STAP 的杂波抑制性能严重下降.

针对机载非正侧面阵雷达地面杂波的距离依赖性问题, 国内外学者进行了大量的研究. 杂波距离依赖性补偿方法主要有多普勒搬移法<sup>[6]</sup>(DW); 角度多普勒补偿法<sup>[7]</sup>(ADC); 自适应角度多普勒补偿法<sup>[8]</sup>(A<sup>2</sup>DC); 这些方法以待检测距离单元杂波数据作为参考样本, 通过多普勒域或波束域对待检测单元的临近距离单元进行补偿, 使得临近单元杂波的空时分布与待检测单元趋于一致, 然而这些方法只对主杂波点进行单点补偿. 基于配准的补偿方法<sup>[9]</sup>(RBC)是近几年提出的一种新的全谱域补偿方法; 该方法根据杂波谱的先验信息通过原

始回波数据构造出杂波分布的相关矩阵,然后通过构造的相关矩阵来获得变换矩阵作用于训练距离单元的样本数据,使得训练距离单元和参考距离单元的杂波数据的统计特性趋于一致,从而实现对地面杂波距离依赖性的全谱域补偿。

当机载非正侧面阵雷达接收的回波数据存在距离模糊时,近程杂波与远程杂波混在一起,使用上述的几种方法对杂波数据进行补偿,在对近程杂波进行补偿同时,会影响到远程杂波的空时分布,导致这些方法不能应用。文献[10,11]提出了俯仰三维天线自适应处理来解决杂波距离模糊问题,但是该方法所需独立分布样本数大,并且运算量巨大。本文在均匀线阵下提出了一种基于 RBC 方法的距离模糊杂波补偿方法,该方法增加了对远程杂波数据的约束保护,使得该方法在补偿近程杂波距离依赖性的同时,能够保证远程杂波的空时分布不发生改变;并且当存在阵元误差时,该方法依然能够获得良好的补偿性能。计算机仿真结果验证了本文方法的有效性。

## 2 杂波模型

在机载雷达系统中,当雷达工作中、高脉冲重复频率时,雷达接收的回波数据常会存在距离模糊。图 1 给出了考虑距离模糊的单基非正侧面阵雷达的距离单元模型。载机  $R$  以  $V_R$  的速度沿  $X$  轴方向飞行;平面阵天线  $A$  的轴向与载机  $R$  速度方向夹角为  $\theta_p$ ,当  $\theta_p$  不为零时,机载雷达为非正侧面阵雷达。

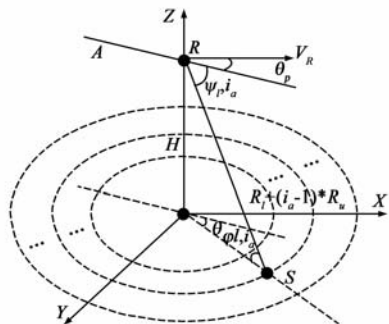


图1 单基非正侧面阵雷达距离单元

机载雷达杂波数据是按照等距离单元进行接收的。假定第  $l$  个距离单元的斜距为  $R_l$ , 在考虑距离模糊时,第  $l$  个距离环上的第  $i_a$  次距离模糊所对应的斜距  $R_{l, i_a}$  可表示为:

$$R_{l, i_a} = R_l + (i_a - 1) * R_u = \tau_l * c + (i_a - 1) * R_u, i_a = 1 \cdots N_a \quad (1)$$

其中,  $\tau_l$  为第  $l$  个距离单元采样时间;  $R_u$  为机载雷达的最大不模糊距离,其大小为  $\frac{c}{2f_{\text{prf}}}$ ,  $f_{\text{prf}}$  为脉冲重复频率,  $c$  为光速;  $N_a$  为距离模糊数,它由雷达最大作用距离和

$R_u$  共同确定,文献[2]中有详细介绍。

在斜距为  $R_{l, i_a}$  的距离环上的散射点  $S$ , 它与天线阵面  $A$  所夹的空域锥角为  $\phi_{l, i_a}$ . 该散射点  $S$  所对应的空域角频率  $f_{sl, i_a}$  和归一化的多普勒频率  $f_{dl, i_a}$  分别为:

$$f_{sl, i_a} = \frac{d}{\lambda} \cos \phi_{l, i_a} = \frac{d}{\lambda} \cos \theta \cos \phi_{l, i_a} \quad (2)$$

$$f_{dl, i_a} = \frac{2V_R}{\lambda f_{\text{prf}}} \cos(\theta + \theta_p) \cos \phi_{l, i_a} \quad (3)$$

其中,  $\theta$  和  $\phi_{l, i_a}$  为散射点  $S$  处的方位角和俯仰角;  $d$  为接收天线的阵元间距;  $\lambda$  为发射信号的波长. 在考虑地球半径影响的情况下,  $\phi_{l, i_a}$  可表示为:

$$\phi_{l, i_a} = \arcsin \left( \frac{H}{R_{l, i_a}} + \frac{(R_{l, i_a}^2 - H^2)}{2R_{l, i_a}(R_e + H)} \right), i_a = 1, \cdots, N_a \quad (4)$$

由式(3)通过数学变换可以得出空域锥角和归一化的多普勒频率之间的关系:

$$\begin{aligned} & \left( \frac{f_{\text{prf}}}{2f_{\text{dm}}} \right)^2 \left( \frac{2f_{dl, i_a}}{f_{\text{prf}}} \right)^2 + \cos^2 \phi_{l, i_a} \\ & - 2 \left( \frac{f_{\text{prf}}}{2f_{\text{dm}}} \right) \left( \frac{2f_{dl, i_a}}{f_{\text{prf}}} \right) \cos \theta_p \cos \phi_{l, i_a} \\ & = \cos^2 \phi_{l, i_a} \sin^2 \theta_p \end{aligned} \quad (5)$$

其中,  $f_{\text{dm}}$  为杂波的最大多普勒频率,其大小为  $\frac{2V_R}{\lambda}$ .

由式(5)可知,机载非正侧面阵雷达的杂波空域锥角和多普勒频率之间的呈现斜椭圆分布,它的焦距随着俯仰角发生变化. 方位多普勒图常用来描述杂波空域锥角和多普勒频率分布随斜距变化的规律. 图 2 给出了机载非正侧面阵雷达不同距离单元的地面杂波方位多普勒图。

从图 2 可知,杂波的方位多普勒分布随着斜距变化而变化,这种现象称为杂波分布的距离依赖性;杂波的方位多普勒分布在近程随斜距变化非常剧烈,这主要是由于杂波距离环的俯仰角在近程变化剧烈所致. 另外,当  $f_{\text{prf}} = 2500\text{Hz}$  时,最大不模糊距离为 60km,图 2 给出斜距为 7.5km 的距离单元和它的两个模糊斜距 (67.5km 和 127.5km) 所对应的方位多普勒图. 从图中可以看出,距离模糊的杂波数据由近程杂波和远程杂波混在一起,近程杂波和远程杂波空时分布差异很大,杂波距离依赖性主要表现在近程杂波中,远程杂波的距离依赖性非常小。

假定机载非正侧面阵雷达具有  $N$  个接收通道,一个相干处理时间内有  $K$  个采样脉冲数. 杂波数据是按照等距离环接收的,第  $l$  个距离单元接收的回波数据  $X_l$  是在最大可检测距离以内的所有模糊距离单元数据迭加在一起;  $X_l$  是一个  $NK \times 1$  的矢量:

$$\mathbf{X}_l = \sum_{i_a=1}^{N_a} \int_0^\pi \beta_{l,i_a}(\theta) \mathbf{w}_{dl,i_a}(\theta) \otimes \mathbf{w}_{sl,i_a}(\theta) d\theta + \mathbf{n}_{l,i_a}, \quad l=1, \dots, L \quad (6)$$

其中,  $\otimes$  表示向量的 Kronecker 积;  $\beta_{l,i_a}(\theta)$  为第  $l$  个距离单元的第  $i_a$  次距离模糊所对应的距离环上杂波散射点  $S$  (方位角为  $\theta$ ) 的幅度;  $\mathbf{n}_{l,i_a}$  为第  $l$  个距离单元的第  $i_a$  次距离模糊所对应的距离环上的噪声矢量;  $L$  为接收的距离单元数目;  $\mathbf{w}_{dl,i_a}(\theta)$  和  $\mathbf{w}_{sl,i_a}(\theta)$  为散射点  $S$  对应的时域导向矢量和空域导向矢量, 它们分别为:

$$\mathbf{w}_{dl,i_a}(\theta) = [1, e^{j2\pi f_{dl,i_a}}, \dots, e^{j2\pi(K-1)f_{dl,i_a}}]^T \quad (7)$$

$$\mathbf{w}_{sl,i_a}(\theta) = [1, e^{j2\pi f_{sl,i_a}}, \dots, e^{j2\pi(N-1)f_{sl,i_a}}]^T \quad (8)$$

其中,  $(\cdot)^T$  代表转置运算.

$\beta_{l,i_a}(\theta)$  代表雷达方程中杂波散射点幅度, 它与杂波散射点的散射面积, 距离单元的斜距, 发射天线和接收天线的增益等因素有关.

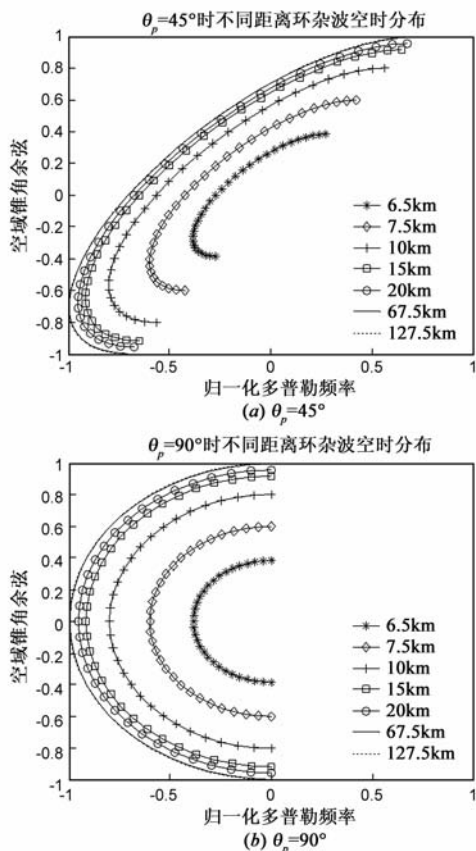


图2 不同距离上的方位多普勒图

### 3 距离模糊杂波谱补偿新方法

由杂波数据模型的表达式(6)可知, 在获取杂波散射点的幅度信息及其在空时平面的位置之后便可以实现对杂波数据的估计. RBC 方法通过对某一距离单元接收的回波数据进行子孔径平滑<sup>[12]</sup>, 从该距离单元获取足够多的样本, 估计出该距离单元的杂波协方差矩

阵; 然后, 在该距离单元的空时分布上取一些离散的点, 使用估计的协防矩阵计算这些点处的 Capon 谱, 以此作为这些点的幅度值, 按照式(6)对这些点进行求和实现对该距离单元数据的重构; RBC 方法通过重构的距离单元数据求解变换矩阵, 使得训练距离单元数据向参考距离单元配准, 实现对杂波距离依赖性的补偿. 然而, 当接收的回波数据存在距离模糊时, 由于远程杂波与近程杂波混在一起, RBC 方法估计的协方差矩阵只包含近程杂波信息, 未考虑远程杂波数据, 因此, 使用 RBC 方法求解的变换矩阵在对近程数据进行距离依赖性补偿的同时, 使得远程杂波数据空时分布发生改变. 本文在 RBC 方法的基础上, 考虑远程模糊距离单元杂波数据空时分布, 在重构的数据中增加远程模糊距离单元的杂波数据, 然后通过重构的数据求解变换矩阵, 对距离模糊的杂波数据进行补偿. 该方法在对近程杂波数据距离依赖性补偿的同时, 保证远程数据的空时分布不改变.

#### 3.1 距离模糊的杂波协方差矩阵重构

机载雷达的第  $l$  个距离单元的杂波数据  $\mathbf{X}_l$  是一个  $NK \times 1$  的列矢量, 将其变换成矩阵  $\hat{\mathbf{X}}_l \in \mathbb{C}^{N \times K}$ :

$$\hat{\mathbf{X}}_l = \begin{bmatrix} x_{1,1} & \cdots & x_{1,K} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N,1} & \cdots & x_{N,K} \end{bmatrix}_{N \times K} \quad (9)$$

取空域子孔径为  $G$ , 时域子孔径为  $J$ , 对  $\hat{\mathbf{X}}_l$  进行空时子孔径平滑<sup>[12]</sup>, 可以得到  $(N-G+1)(K-J+1)$  个的矩阵  $\mathbf{Q}_{r,t} \in \mathbb{C}^{G \times J}$ :

$$\mathbf{Q}_{r,t} = \begin{bmatrix} x_{r,t} & \cdots & x_{r,t+J-1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{r+G-1,t} & \cdots & x_{r+G-1,t+J-1} \end{bmatrix}_{G \times J}, \quad (10)$$

$$r=1, \dots, N-G+1; \quad t=1, \dots, K-J+1$$

在对  $\mathbf{X}_l$  进行空时子孔径平滑后得到的样本数据都来自同一个距离单元, 因此这些样本数据不存在距离依赖性; 可以通过这些样本数据获得该距离单元在子孔径下的协方差矩阵估计  $\mathbf{R}_{sl} \in \mathbb{C}^{JG \times JG}$ :

$$\mathbf{R}_{sl} = \frac{1}{(N-G+1)(K-J+1)} \sum_{r=1}^{N-G+1} \sum_{t=1}^{K-J+1} \text{Vec}(\mathbf{Q}_{r,t}) \text{Vec}(\mathbf{Q}_{r,t})^H \quad (11)$$

其中,  $(\cdot)^H$  表示共轭转置;  $\text{Vec}(\cdot)$  是将矩阵做如下操作: 将矩阵的第二列放在第一列下面; 第三列放在第二列下面, 以此类推将矩阵变换成一个列矢量.

由于 RBC 方法在重构数据时, 只考虑第一个模糊单元数据 (近程杂波数据), 因此求解的变换矩阵会影响远程模糊距离单元数据的空时分布, 本文方法在重构数据时, 将远程数据考虑在内, 这样保证用重构数据求解的变换矩阵不改变远程数据的空时分布.

在第  $l$  个距离单元的第  $i_a$  次距离模糊所对应的距离环的角度多普勒分布曲线上均匀的取  $P$  个离散点 ( $P > 2NK$ )<sup>[13]</sup>,  $w_{sl,i_a,t}$  和  $w_{dl,i_a,t}$  分别为角度多普勒分布曲线上第  $t$  个离散点处的空域角频率和时域角频率 ( $t = 1 \cdots P$ ). 由于杂波的 Capon 谱能反应出杂波功率谱的强度, 因此, 可以使用 ( $w_{sl,i_a,t}, w_{dl,i_a,t}$ ) 点处杂波的 Capon 谱  $P(w_{sl,i_a,t}, w_{dl,i_a,t})$  来代表该点处的杂波散射系数来重构该点处的杂波数据.

$$P(w_{sl,i_a,t}, w_{dl,i_a,t}) = \frac{1}{\tilde{\mathbf{W}}^H(w_{sl,i_a,t}, w_{dl,i_a,t}) \mathbf{R}_{sl}^{-1} \tilde{\mathbf{W}}(w_{sl,i_a,t}, w_{dl,i_a,t})}, \quad t = 1, \cdots, P \quad (12)$$

其中,  $\tilde{\mathbf{W}}(w_{sl,i_a,t}, w_{dl,i_a,t}) \in C^{JG \times 1}$  为 ( $w_{sl,i_a,t}, w_{dl,i_a,t}$ ) 点处的子孔径平滑后的空时导向矢量:

$$\tilde{\mathbf{W}}(w_{sl,i_a,t}, w_{dl,i_a,t}) = (1, e^{jw_{dl,i_a,t}}, \cdots, e^{j(J-1)w_{dl,i_a,t}})^T \quad (13)$$

$$\otimes (1, e^{jw_{sl,i_a,t}}, \cdots, e^{j(G-1)w_{sl,i_a,t}})^T$$

由上面介绍的方法计算出的杂波散射系数可以重构出第  $l$  个距离单元的杂波数据  $\tilde{\mathbf{X}}_l \in C^{NK \times 1}$  及其协方差矩阵  $\tilde{\mathbf{R}}_l \in C^{NK \times NK}$ .

$$\tilde{\mathbf{X}}_l = \sum_{i_a=1}^{N_a} \sum_{t=1}^P P(w_{sl,i_a,t}, w_{dl,i_a,t}) \mathbf{W}(w_{sl,i_a,t}, w_{dl,i_a,t}) \quad (14)$$

$$\tilde{\mathbf{R}}_l = \sum_{i_a=1}^{N_a} \sum_{t=1}^P \left| P(w_{sl,i_a,t}, w_{dl,i_a,t}) \right|^2 \mathbf{W}(w_{sl,i_a,t}, w_{dl,i_a,t}) \cdot \mathbf{W}^H(w_{sl,i_a,t}, w_{dl,i_a,t}) \quad (15)$$

其中,  $\mathbf{W}(w_{sl,i_a,t}, w_{dl,i_a,t}) \in C^{NK \times 1}$  为空时平面上离散点 ( $w_{sl,i_a,t}, w_{dl,i_a,t}$ ) 的空时导向矢量.

$$\mathbf{W}(w_{sk,i,t}, w_{dk,i,t}) = (1, e^{jw_{dk,i,t}}, \cdots, e^{j(K-1)w_{dk,i,t}})^T \quad (16)$$

$$\otimes (1, e^{jw_{sk,i,t}}, \cdots, e^{j(N-1)w_{sk,i,t}})^T$$

### 3.2 距离模糊的杂波谱补偿新方法

按照 3.1 节的步骤可以使用原始的回波数据重构出每一个距离单元的杂波数据和协方差矩阵. 重构的杂波数据中将近程杂波和远程杂波都考虑进来, 然而由于远程数据的距离依赖性很小, 空时分布变化很小, 考虑到计算量, 在实际重构数据时, 只对模糊距离单元的前两个模糊距离数据进行重构, 这样保证重构的数据将近程杂波和远程杂波都考虑进来同时, 降低运算量.

文献[14]已经证明, 杂波的空时统计特性反应在杂波协方差矩阵上, 由于远程杂波的距离依赖性很小, 因此, 选择第  $L$  个距离单元作为参考距离单元,  $\tilde{\mathbf{R}}_L$  为通过式(15)重构的第  $L$  个距离单元的协方差矩阵. 变换矩阵  $\mathbf{T}_l \in C^{NK \times NK}$  使得第  $l$  个距离单元与参考距离单元的杂波数据统计特性趋于一致.

$$\min_{\mathbf{T}_l} \|\mathbf{T}_l \tilde{\mathbf{R}}_l \mathbf{T}_l^H - \tilde{\mathbf{R}}_L\|_2 \quad (17)$$

由于  $\tilde{\mathbf{R}}_l$  中同时考虑了距离模糊时近程杂波数据和远程杂波数据, 式(17)在对近程杂波向远程杂波进行配准的同时, 能够对远程杂波的进行约束保护, 可以保证变换矩阵  $\mathbf{T}_l$  在补偿近程杂波距离依赖性的同时, 不改变远程杂波的空时分布. 由文献[14]可知, 式(17)的优化问题可以转化为式(18):

$$\min_{\mathbf{T}_l} \|\mathbf{T}_l \mathbf{V}_l \mathbf{\Lambda}_l^{1/2} - \mathbf{V}_L \mathbf{\Lambda}_L^{1/2}\|_2 \quad (18)$$

其中,  $\|\cdot\|_2$  是矩阵的 2-范数;  $\mathbf{V}_L \in C^{NK \times NK}$  和  $\mathbf{\Lambda}_L \in C^{NK \times NK}$  为  $\tilde{\mathbf{R}}_L$  特征值分解得到的特征矢量矩阵和特征值矩阵;  $\mathbf{V}_l \in C^{NK \times NK}$  和  $\mathbf{\Lambda}_l \in C^{NK \times NK}$  为  $\tilde{\mathbf{R}}_l$  特征值分解得到的特征矢量矩阵和特征值矩阵.

式(18)是一个优化问题, 可以通过特征值分解的方法求解:

$$\mathbf{T}_l = \mathbf{V}_L \mathbf{\Lambda}_L^{1/2} \mathbf{\Lambda}_l^{-1/2} \mathbf{V}_l^H \quad (19)$$

其中, 为了保证  $\mathbf{\Lambda}_l$  可逆, 需对其进行对角加载.

通过式(19)求解的  $\mathbf{T}_l$  能够对距离模糊的杂波数据进行距离依赖性补偿, 保证训练距离单元数据和参考距离单元数据的统计特性趋于一致.

使用  $\mathbf{T}_l$  对接收数据进行处理, 得到的数据  $\mathbf{Y}_l \in C^{NK \times 1}$  为:

$$\mathbf{Y}_l = \mathbf{T}_l \mathbf{X}_l, \quad l = 1, \cdots, L-1 \quad (20)$$

处理后的统计协方差矩阵  $\mathbf{R}_L \in C^{NK \times NK}$  为:

$$\mathbf{R}_L = \left( \sum_{l=1}^{L-1} \mathbf{Y}_l \mathbf{Y}_l^H + \mathbf{X}_L \mathbf{X}_L^H \right) / L \quad (21)$$

使用式(21)获得的杂波协方差矩阵对补偿后的杂波进行空时自适应处理, 便可以实现对地面杂波的抑制. 限于篇幅, 本文不做讨论.

## 4 计算机仿真

本文以  $\theta_p = 90^\circ$  时, 机载雷达回波数据为例进行研究, 仿真的参数如表 1 所示.

表 1 仿真参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
载机高度(km)	6	工作波长(m)	0.32
载机速度(m/s)	120	接收通道数	12
发射阵元数(行×列)	10×12	采样脉冲数	24
脉冲重复频率(Hz)	2500	阵元间距(m)	0.16
杂噪比(dB)	60	距离单元数目	500

按照公式(1)可知, 杂波的最大不模糊距离为 60km; 接收距离环的起始斜距为 6.5km; 距离分辨率为 20m; 杂波的距离模糊数  $N_a$  为 5; 参考距离单元取第 500 个距离单元.

图 3 给出了距离模糊的杂波功率谱以及使用 RBC 方法和本文所提出的方法处理后的功率谱. 由图 3(a) 可以看出, 杂波功率谱在空时平面上呈现出明显的散

开现象,这是由于距离模糊的近程杂波空时分布存在距离依赖性所致.杂波在空时平面上散开使得杂波附近的慢速目标无法检测;图 3(b)使用 RBC 补偿方法对距离模糊的杂波数据进行处理,杂波功率谱仍然有一定程度的散开;图 3(c)为使用本文方法处理的结果,与图 3(a)和图 3(b)相比较,杂波的功率谱分布明显变

窄,即杂波的距离依赖性明显的减弱,这有利于杂波周围慢速目标的检测,这说明本文的方法对距离模糊杂波距离依赖性处理的有效性.当阵元误差存在时,由于阵元误差导致天线的旁瓣电平抬高,对杂波空时分布产生扰动,导致杂波空时分布散开更加严重,存在阵元误差的处理结果见图 4.

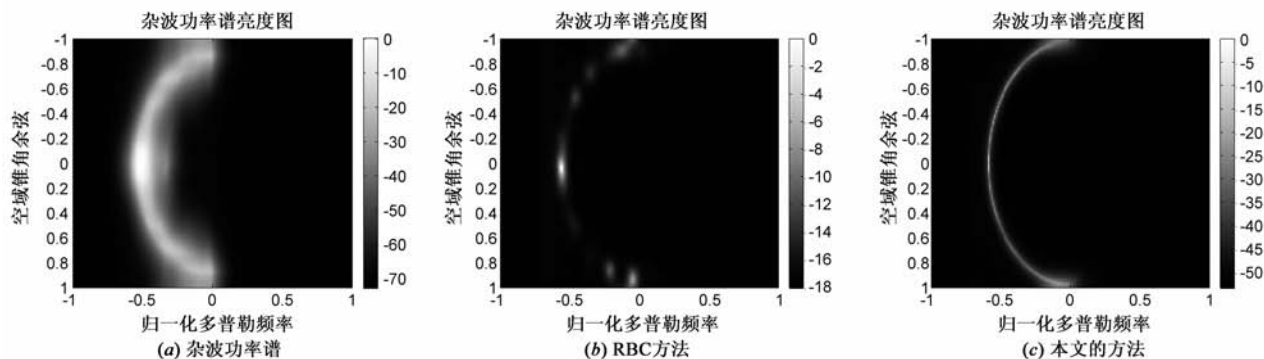


图3 杂波功率谱

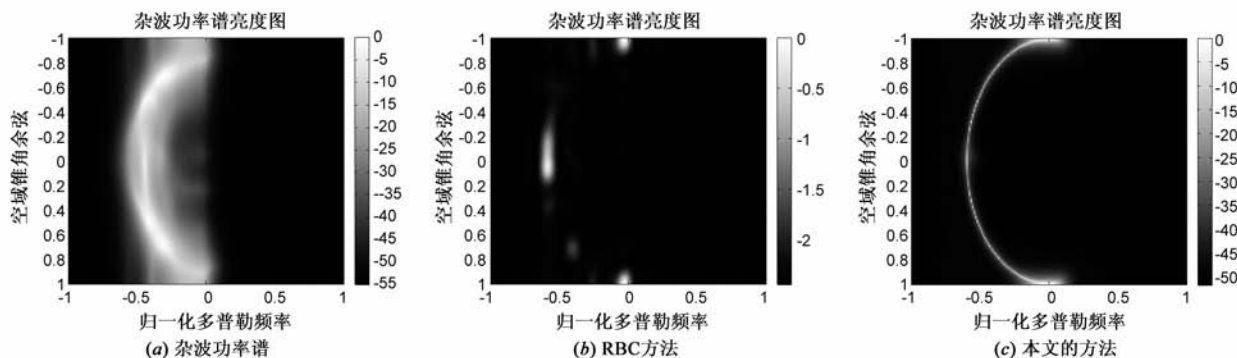
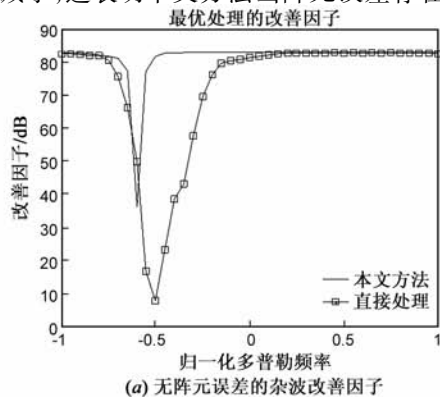


图4 5%阵元误差的杂波功率谱

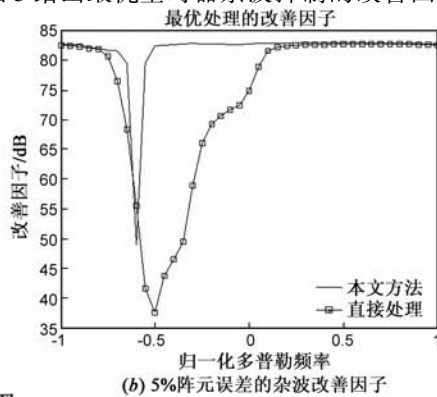
图 4 给出了当存在 5% 阵元误差情况下,距离模糊的杂波功率谱以及使用 RBC 方法和本文的方法处理后的杂波功率谱.由图 4.(a)可以看出,由于阵元误差的存在,旁瓣杂波的幅度明显提高,距离依赖性也非常严重;与图 4(a)和图 4(b)相比,图 4(c)使用本文的方法处理后的杂波功率谱变“细”,这说明杂波数据的距离依赖性减小,这表明本文方法当阵元误差存在时,对距

离模糊地杂波距离依赖性补偿的有效性.使用本文方法补偿后的杂波数据来估计协方差矩阵,有利于空时滤波器形成窄的凹口来抑制杂波,提高杂波抑制性能.杂波抑制性能通常使用空时处理器的改善因子来描述,图 5 给出使用本文方法对杂波抑制性能的改善情况.

图 5 给出最优空时器杂波抑制的改善因子.由图 5



(a) 无阵元误差的杂波改善因子



(b) 5%阵元误差的杂波改善因子

图5 改善因子图

(a)可知,补偿后杂波的改善因子与未补偿直接处理相比较,主杂波区的凹口变窄,杂波多普勒展宽减小;归一化多普勒频率在  $-0.4$  到  $0$  区间,与直接处理相比,本文方法有  $10\text{dB}$  到  $40\text{dB}$  的改善,这说明本文方法能够有效地提高距离模糊的杂波抑制性能;图 5(b)中,由于阵元误差导致旁瓣杂波电平抬高,杂波多普勒展宽更加严重,这导致未补偿直接进行空时处理的杂波在主杂波区的凹口与图 5(a)相比,明显变宽,经过本文方法处理过后,主杂波区的凹口变窄,这说明,在阵元误差存在时,本文方法仍然能够有效的降低距离模糊杂波

的距离依赖性。

图 6 给出使用降维 3DT 方法<sup>[2]</sup>处理后的杂波距离多普勒图.由图可以看出,由于距离依赖性的存在,主杂波多普勒谱发生展宽,分布在  $-450\text{Hz}$  到  $-800\text{Hz}$ ,并且当阵元误差存在时,由于旁瓣电平太高,主杂波多普勒展宽更加严重,分布在  $0\text{Hz}$  到  $-800\text{Hz}$ ;使用本文方法处理后的杂波数据多普勒展宽明显减小,主杂波集中分布在  $-750\text{Hz}$  左右,这充分说明本文方法对于距离模糊杂波距离依赖性补偿的有效性,并且当存在阵元误差时,该方法依然能够获得理想的补偿效果。

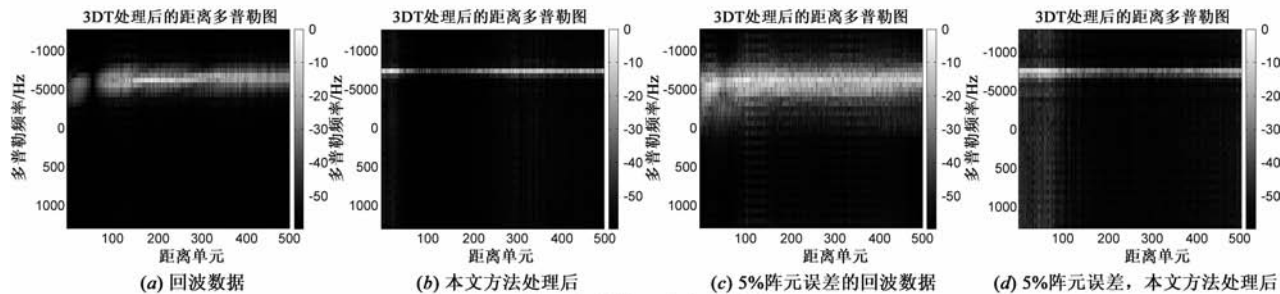


图6 杂波的距离多普勒图

## 5 结束语

本文对机载非正侧面阵雷达距离模糊的杂波空时分布进行分析,研究距离模糊下的杂波距离依赖性问题,然后在 RBC 方法基础上提出一种对距离模糊的机载非正侧面阵杂波数据进行距离依赖性补偿的新方法.研究表明,该方法能够对距离模糊下的杂波距离依赖性进行补偿,提高空时处理器的杂波抑制性能;并且,当存在阵元误差时,该方法依然能够获得好的杂波补偿性能.然而该补偿方法在主杂波区存在一定的性能损失,并且在目前的硬件条件下要达到实时处理有一定困难,这是本文方法的主要局限性,需要进一步的研究来改进。

## 参考文献

- [1] L E Brenna, I S Reed. Theory of adaptive radar[J]. IEEE Trans on AES, 1973, 9(2): 237 - 252.
- [2] 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 - 94.
- [3] J Wu, Wang T, X Meng, Z Bao. Clutter Suppression for airborne non-sidelooking radar using ERCB-STAP algorithm[J]. IET Radar, Sonar and Navigation, 2010, 4(4): 497 - 506.
- [4] 高飞, 谢文冲, 王永良. 非均匀杂波环境 3-D STAP 方法研究[J]. 电子学报, 2009, 37(4): 868 - 872.  
Gao Fei, Xie Wenchong, Wang Yongliang. Research on 3D-STAP methods in non-stationary clutter[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(4): 868 - 872. (in Chinese)

- [5] A K Shackelford, K Gerlach, S D Blunt. Partially adaptive STAP using the FRACTA algorithm[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electric Systems, 2009, 45(1): 58 - 69.
- [6] O Kreyenkamp, R Klemm. Doppler compensation in forward looking STAP radar[J]. Proc Inst Elect Eng Radar, Sonar and Navigation, 2001, 148(1): 596 - 608.
- [7] B Himed, Y A Zhang, Hajjari. STAP with angle-Doppler compensation for bistatic airborne radars[A]. Processing of 2002 IEEE Radar Conference[C]. USA: IEEE, 2002. 311 - 317.
- [8] W L Melvin, B Himed, M E Davis. Doubly adaptive bistatic clutter filtering[A]. IEEE National Radar Conference[C]. Huntsville: IEEE, 2003. 171 - 178.
- [9] F D Lapierre, M V Droogenbroeck, J G Verly. New Methods for Handling the Range Dependence of the Clutter Spectrum in Non-sidelooking Monostatic STAP Radars[A]. ICASSP[C]. Hong Kong: ICASSP, 2003. 73 - 76.
- [10] P M Corbell, T B Hale. 3-dimensional STAP performance analysis using the cross-spectral metric[A]. Proc IEEE Radar Conf[C]. Philadelphia: IEEE, 2004. 610 - 615.
- [11] T B Hale, M A Temple, J F Raquet, M E Oxley. Localized three dimensional adaptive spatial-temporal processing for airborne radar[J]. IEE Proceedings Radar, Sonar and Navigation, 2003, 150(1): 18 - 22.
- [12] S Pillai, Y Kim, J Guerci. Generalized forward/backward sub-aperture smoothing techniques for sample starved STAP[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2000, 48(12): 3569 - 3574.
- [13] Vijay Varadarajan, Jeffrey L, Krolik. Joint Space - Time Inter-

polarization for Distorted Linear and Bistatic Array Geometries [J]. IEEE Trans. on Signal Processing, 2006, 54(3): 848 – 860.

- [14] F D Lapierre, P Ries, J G Verly. Foundation for mitigating range dependence in radar space-time adaptive processing[J]. IET Radar, Sonar and Navigation, 2009, 3(1): 18 – 29.

#### 作者简介



刘锦辉 男, 1984 年 5 月出生于陕西省杨凌. 博士研究生. 主要研究方向为阵列信号处理和空时自适应处理.

E-mail: tntliu@126.com



廖桂生 男, 1963 年生于广西桂林. 现为西安电子科技大学信号与信息处理学科博士生导师, 国家杰出青年基金获得者, 长江学者特聘教授. 先后主持和承担了国防 973 项目课题、国家“863”高新技术项目、国防科技预研、国家自然科学基金等十余项科研任务. 目前主要研究方向为分布式小卫星雷达系统、阵列信号处理以及地面运动目标检测等. E-mail: gsliao@xidian.edu.cn



李明 男, 1984 年 12 月出生于陕西省咸阳. 博士研究生. 主要研究方向为阵列信号处理和空时自适应处理.

E-mail: liming19841218@126.com