

# 机载前向阵雷达近程杂波频移补偿

曹建蜀, 汪学刚

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

【摘要】基于机载前向阵雷达在近距离地面目标检测时,杂波在距离上将呈现严重的非平稳性,提出了一种向量相似度准则,从杂波样本数据中计算补偿量的多普勒频移补偿方法。利用该方法对不同距离的杂波数据进行相应的频移变换预处理后,能有效改善近程地杂波的非平稳性。该算法在脉冲域和多普勒域中等效,适合并行运算,具有实现简单的优点。仿真结果表明经此方法预处理后的空时自适应滤波,能显著提高系统的性能改善因子。

关键词 机载前向阵雷达; 空时二维自适应处理; 杂波抑制; 多普勒频移补偿  
中图分类号 TN958.92 文献标识码 A

## Doppler Compensation in Airborne Forward-Looking Radar for Ground Short Range Clutter

CAO Jian-shu, WANG Xue-gang

(School of Electronic Engineering, Univ. of Elec. Sci. & Tech. of China Chengdu 610054)

**Abstract** In the ground short range target detection of airborne forward-looking arrays, the clutter Doppler frequency highly depends on range. A Doppler compensation method based on vector similarity criteria is proposed, which can estimate the compensation values from the received clutter data. The Doppler compensation, as a pre-processing of space time adaptive processing (STAP) corresponding to clutter data of various range bins, can be utilized for efficient solution of the ground short range clutter nonhomogeneous problem. The method in the pulse domain has the same impact as in Doppler domain and is suitable for parallel implementation; moreover, it has the advantage of low complexity. The simulation shows that a high performance improvement factor can be obtained when it is applied to the pre-processing of STAP.

**Key words** airborne forward-looking radar; STAP; clutter suppression; Doppler compensation

机载前向阵雷达地面杂波谱在空时二维平面上的分布随距离变化而变化。远程杂波谱结构随距离变化缓慢,基本上认为一致,可以直接利用空时自适应处理来抑制杂波<sup>[1-4]</sup>。但是,近程杂波谱结构随距离变化而快速变化,直接空时自适应处理难以有效抑制杂波。

根据近程杂波谱分布特点,通过对不同距离的杂波数据进行相应的多普勒频移补偿预处理,可以减少杂波在距离上的非平稳性。尤其当雷达(例如机载预警雷达)波束的俯仰方向有效孔径较大,主瓣杂波在各距离单元上都较强时,频移变换有明显补偿作用。文献[5]中提出了一种基于理论计算公式直接计算补偿量的方法。但实际工作中雷达参数存在误差,计算的补偿量与杂波数据不匹配,会造成较大的补偿误差,降低杂波抑制性能。

本文从另外的角度出发,提出一种根据向量相似度准则的基于杂波数据的频移补偿算法,给出其在脉冲域和多普勒域中的实现过程。

### 1 近程杂波谱结构特点

如图1所示,设载机水平飞行,速度向量为 $B$ ,雷达波长为 $\lambda$ ,天线轴与速度方向夹角为 $\alpha$ ,散射体相对于天线轴的扫描锥角为 $\psi$ ,杂波散射体相对于天线的轴向方位角和俯仰角分别为 $\theta$ 和 $\varphi$ 。则该散射体回波的多普勒频率 $f_d$ 为:

$$f_d = \frac{2V}{\lambda} \cos(\theta + \alpha) \cos(\varphi) = \frac{2V}{\lambda} [\cos(\psi) \cos(\alpha) - \sqrt{\cos^2(\varphi) - \cos^2(\psi)} \sin(\alpha)] \quad (1)$$

式中  $\cos(\psi) = \cos(\theta) \cos(\varphi)$ 。当  $\alpha = -\pi/2$  时, 天线阵面垂直于速度  $V$  方向, 此时雷达阵面即为前向阵, 式(1)变为:

$$f_d = \frac{2V}{\lambda} \sqrt{\cos^2(\varphi) - \cos^2(\psi)} \quad (2)$$

设载机高度为  $h$ , 地球曲率半径为  $R_e$ , 则散射体与天线间斜距  $r$  与俯仰角  $\varphi$  的关系为:

$$\varphi = \sin^{-1} \left( \frac{h}{r} + \frac{r^2 - h^2}{2r(R_e + h)} \right) \quad (3)$$

综合式(2)、(3)可知, 对于近距离段, 前向阵雷达在相同  $\psi$  下的  $f_d$  随斜距  $r$  变小而快速变小, 不同距离环的杂波二维分布互不相同, 难以进行自适应滤波。如图2所示, 图中,  $V=150$  m/s,  $h=6000$  m,  $\lambda=0.1$  m,  $f_c=1300$  Hz: 虚线和实线分别为10 km和30 km距离环对应的归一化杂波谱图, 杂波多普勒频率存在多重模糊。10~30 km距离间的杂波分布位于两者之间。

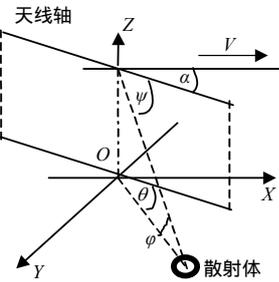


图1 雷达和散射体的几何关系图

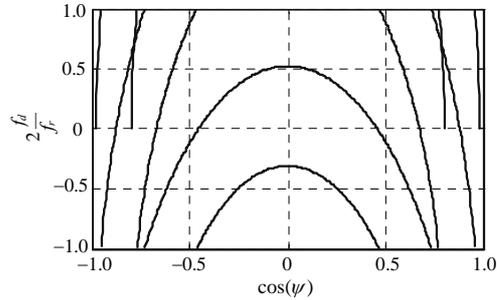


图2 归一化二维地杂波分布示意图

另一方面, 由式(2)可知, 杂波的二维谱( $f_d$ ,  $\cos(\psi)$ )均呈半椭圆分布, 不同距离的杂波分布曲线的曲率虽然互不相同, 但形状有很强的相似性。并且机载前向阵雷达多采用中低脉冲重复频率工作, 防止距离模糊发生。因此, 本文以某一距离为参考单元, 所有其余距离的杂波数据相对参考单元进行各自不同的多普勒频移变换, 使之与参考单元的杂波尽量相似, 彼此相互靠近。这样, 各距离的杂波谱结构总体上趋向一致, 杂波能量分布相对集中, 减少了杂波在距离上的非平稳性。然后将通过频移变换预处理过的各距离单元的杂波数据用于自适应滤波, 提高杂波的抑制性能。如果检测到目标信号, 则该目标信号的多普勒频率要校正, 减去相应的频移量。

## 2 基于向量相似度准则的频移补偿方法

对空时二维处理而言, 空间可以构成阵元域和波束域, 时间可以构成脉冲域和多普勒域。阵元域、脉冲域经傅氏变换后形成波束域、多普勒域。多普勒频移补偿可以在脉冲域或多普勒域进行。

设天线为水平排列的  $N$  元等效线阵。  $K$  为采样脉冲数, 参考距离单元为  $i$ , 待补偿距离单元为  $j$ 。在阵元-脉冲域中, 设任意第  $l$  个距离单元第  $n$  个阵元第  $k$  次快拍的数据为  $x_l(n, k)$ , 第  $n$  个阵元的数据矢量为  $\mathbf{X}_{l(t)}(n) = [x_l(n, 1), x_l(n, 2), \dots, x_l(n, K)]^T$ 。

则距离单元  $i, j$  的杂波数据矢量可分别表示为  $\mathbf{X}_i = [\mathbf{X}_{i(t)}^T(1), \mathbf{X}_{i(t)}^T(2), \dots, \mathbf{X}_{i(t)}^T(N)]^T$ ,  $\mathbf{X}_j = [\mathbf{X}_{j(t)}^T(1), \mathbf{X}_{j(t)}^T(2), \dots, \mathbf{X}_{j(t)}^T(N)]^T$ 。

设频移补偿量为  $\beta$ , 补偿矩阵  $\mathbf{A} = \text{diag}[\mathbf{D}, \mathbf{D}, \dots, \mathbf{D}]_{N \times N}$ , 其中对角矩阵  $\mathbf{D} = \text{diag}[1, e^{j\beta}, \dots, e^{j(K-1)\beta}]_{N \times N}$ , 则补偿结果为  $\mathbf{A}\mathbf{X}_j$ 。

在阵元-多普勒域中, 设  $\mathbf{X}_i, \mathbf{X}_j$  时域FFT结果分别为  $\mathbf{Y}_{i,t}$  和  $\mathbf{Y}_{j,t}$ ,  $\mathbf{Y}_{j,t}$  在多普勒通道中循环移位  $k_0$  步的结果为  $\mathbf{Y}_{j,t,k_0}$ 。

在波束-多普勒域中, 设  $\mathbf{X}_i, \mathbf{X}_j$  空时二维FFT结果分别为  $\mathbf{Y}_i$  和  $\mathbf{Y}_j$ ,  $\mathbf{Y}_j$  在多普勒通道中循环移位  $k_0$  步的

结果为  $Y_{j,k_0}$ 。

由矩阵理论知向量间的相似程度可以用向量相似度度量, 向量相似度常用向量间的Euclidean距离表示, 距离越小, 表示向量间越相似。并且, 在多普勒域中频移变换就是多普勒通道的循环移位。令  $k_0 = \beta K / 2\pi$  表示与频移补偿量  $\beta$  相对应的多普勒通道的循环移位置, 因此在波束-多普勒域中频移补偿的判断准则表示为:

$$\min_{k_0} \|Y_{j,k_0} - Y_i\|_2^2。$$

由傅里叶变换矩阵  $F$  的性质:  $F^H F = MI$  (其中, “H” 表示复共轭转置;  $M$  为矩阵  $F$  的维数;  $I$  为单位矩阵) 和  $\|\bullet\|_2$  范数的定义可证:

$$\min_{\beta} \|AX_j - X_i\|_2^2 = \min_{k_0} \|Y_{j,t,k_0} - Y_{i,t}\|_2^2 = \min_{k_0} \|Y_{j,k_0} - Y_i\|_2^2$$

因此, 对应的阵元-多普勒域和阵元-脉冲域中频移补偿的判断准则分别为:

$$\min_{k_0} \|Y_{j,t,k_0} - Y_{i,t}\|_2^2 \quad \text{和} \quad \min_{\beta} \|AX_j - X_i\|_2^2$$

在阵元-多普勒域有:

$$\min_{k_0} \|Y_{j,t,k_0} - Y_{i,t}\|_2^2 = \max_{k_0} (\text{Re}(Y_{j,t,k_0}^H Y_{i,t})) \quad (4)$$

在波束-多普勒域中有:

$$\min_{k_0} \|Y_{j,k_0} - Y_i\|_2^2 = \max_{k_0} (\text{Re}(Y_{j,k_0}^H Y_i)) \quad (5)$$

由式(4)和(5)可知, 多普勒域中频移补偿量计算是一个在多普勒通道中  $K$  次循环相关的过程: 固定  $Y_i$  (或  $Y_{i,t}$ ) 不变, 对  $Y_j$  (或  $Y_{j,t}$ ) 作多普勒通道循环移位, 每移位一次, 计算一次与  $Y_i$  (或  $Y_{i,t}$ ) 的内积。

其中, 内积实部最大值时的循环步数, 就是所求的频移补偿移位置  $k_0$ 。完成以上  $K$  次循环相关, 有  $NK \times K$  次复数乘法, 这些乘法互不依赖, 可以并行处理。并且, 对  $Y_j$  (或  $Y_{j,t}$ ) 作多普勒通道  $k_0$  次循环移位, 就完成了对数据的频移补偿操作。而在实际硬件系统中, 只要将循环寻址的首地址指向  $k_0$  处即可, 而不需数据的实际搬移。在阵元-脉冲域中

$$\begin{aligned} \min_{\beta} \|AX_j - X_i\|_2^2 &= \max_{\beta} (\text{Re}(X_j^H A^H X_i)) = \max_{\beta} (\text{Re}[\sum_{n=1}^N X_{j(t)}^H(n) D^H X_{i(t)}(n)]) = \\ &= \max_{\beta} (\text{Re}\{\sum_{k=1}^K [\sum_{n=1}^N x_j^*(n,k) x_i(n,k)] e^{-j(k-1)\beta}\}) = \max_{\beta} (\text{Re}[\sum_{k=1}^K y(k) e^{-j(k-1)\beta}]) \end{aligned} \quad (6)$$

其中:

$$y(k) = \sum_{n=1}^N x_j^*(n,k) x_i(n,k) \quad (7)$$

由式(6)和(7)可知, 在脉冲域中频移补偿量计算过程如下: 首先对  $X_j$  取共轭  $X_j^*$ , 然后与  $X_i$  对应元素相乘(Hadamard积), 再将乘积结果中属于同一次快拍的  $N$  个元素相加得  $y(k)$ , 再对  $K$  个  $y(k)$  作傅里叶变换, 结果中最大实部者对应的角频率即所求。对于一个距离单元的补偿量计算, 有  $NK$  次复数乘法, 这些乘法互不依赖, 可以并行处理。对于补偿矩阵  $A$  中的对角元素, 可以事先计算, 通过查表法快速得出。频移补偿  $AX_j$  的  $KN$  次复数相乘也可并行进行。由此可见, 其在实际系统中的实现并不困难。

### 3 计算机仿真

仿真参数如下: 设机载前向阵为  $4 \times 24$  的等效线阵, 即阵元数  $N=24$ 。采样脉冲数  $K=32$ , 载波波长  $\lambda=0.1$  m, 半波长等阵元间距。载机高度  $h=6000$  m, 脉冲重复频率  $f_p=1300$  Hz, 载机速度  $V=150$  m/s, 波束锥角指向  $\cos(\psi_0)=0.2452$ , 输入杂噪比  $CNR_i=60$  dB, 发射天线切比雪夫加权, 方位向  $-40$  dB, 俯仰向  $-20$  dB。距离范围  $10 \sim 30$  km, 频移补偿参考距离单元为  $18.75$  km。详细杂波模型参见<sup>[6-7]</sup>。

图3表示经本文方法得到的各距离单元对应的多普勒频移补偿量。由图可见, 距离越近频移补偿值相差越大, 这与机载前向阵雷达近程杂波谱结构随距离减小而快速变化的性质一致。图4为杂波数据在不同的预处理情况下, 采用3DT降维算法时的空时自适应滤波性能改善因子图<sup>[8-9]</sup>。虚线表示未进行频移补偿时的结

果,主杂波区很宽,杂波抑制性能差。实线表示经本文方法频移补偿后的结果,主杂波区明显变窄,主杂波区邻近区域有大约60 dB的性能改善,接近最优性能(最大改善因子为 $CNR_i \times NK=88.8$  dB)。 $+$ 号实线表示有参数误差时由理论公式<sup>[5]</sup>补偿后的结果(假设理论参数 $V=165$  m/s,  $h=6\ 060$  m,  $\lambda=0.098$  m,而实际参数同仿真条件),与本文中方法比较,其主杂波区展宽,性能曲线凹口扩展,杂波抑制能力下降。

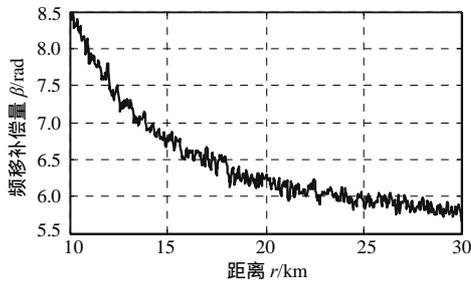


图3 各距离单元的多普勒频移补偿量图

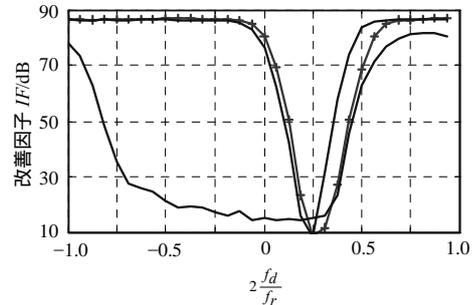


图4 三种情况下的性能改善因子图

## 4 结束语

对于机载前向阵雷达,通过多普勒频移补偿预处理,能有效改善近程杂波距离上的非平稳性,提高空时自适应滤波性能。本文提出的基于向量相似度准则,从样本数据中估计频移补偿量的方法,在脉冲域与多普勒域中完全等价。补偿量估计过程中的复数乘法可并行计算,并且频移补偿实现快速简单。与直接从理论公式计算补偿量的方法相比,它可以克服后者对雷达参数误差敏感的缺点,自适应调整各距离单元杂波的频移补偿量。

## 参 考 文 献

- [1] Klemm R. Adaptive airborne MTI: comparison of sideways and forward looking radar[C]// IEEE National Radar Conference - Proceedings. Alexandria: [s.n.], 1995:614-618.
- [2] Richardson P G, Hayward S D. Adaptive space time processing for forward looking radar[C]// IEEE National Radar Conference -Proceedings. Alexandria: [s.n.], 1995: 629-634.
- [3] Klemm R. STAP for circular forward looking array antennas[C]// IEE Conference Publication. Edinburgh: [s.n.], 1997: 300-304.
- [4] Wang Y L, Bao Z, Peng Y N. STAP with medium PRF mode for non-side-looking airborne Radar[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2000, 36(2): 609-620.
- [5] 王 彤, 保 铮, 廖桂生. 机载火控雷达近距离地面慢速目标检测[J]. 电子学报, 2001, 29(6): 721-725.
- [6] 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.
- [7] Klemm R. Adaptive clutter suppression for airborne phased array radars[J]. IEE Proceedings, Part F: Communications, Radar and Signal Processing, 1983, 130(1): 125-132.
- [8] 保 铮, 张玉洪, 廖桂生. 机载雷达空时二维信号处理(1)[J]. 现代雷达, 1994, 16(1): 38-48.
- [9] 保 铮, 张玉洪, 廖桂生. 机载雷达空时二维信号处理(2)[J]. 现代雷达, 1994, 16(2): 17-27.

编 辑 徐安玉