

基于空时内插的端射阵机载雷达杂波补偿新方法

李永伟* 谢文冲

(空军预警学院雷达兵器运用工程军队重点实验室 武汉 430019)

摘要: 端射阵天线因其低风阻和高增益特性而特别适用于机载雷达的前后向补盲, 而天线的前后视放置则不可避免地要面临杂波的距离非平稳问题。该文基于端射阵机载雷达杂波谱特性, 针对传统空时内插法(STINT)不能直接适用于距离模糊情况下端射阵杂波补偿这一情况, 提出一种基于空时内插的端射阵杂波补偿新方法。该方法充分考虑了各距离门的模糊杂波, 以远程平稳杂波脊主瓣区所对应的圆弧为插值参考子空间并细化了动目标约束的约束对象, 实现了对距离模糊情况下端射阵非平稳杂波的有效补偿。计算机仿真结果验证了该文方法的有效性。

关键词: 端射阵; 空时内插; 非平稳杂波补偿; 动目标约束; 距离模糊

中图分类号: TN957

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)09-2115-08

DOI: 10.11999/JEIT181131

A Novel Clutter Spectrum Compensation Method for End-fire Array Airborne Radar Based on Space-time Interpolation

LI Yongwei XIE Wenchong

(Key Research Laboratory, Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China)

Abstract: End-fire array antenna is extremely suitable for forward-looking or backward-looking blind compensation of airborne radar due to its low wind resistance and high-gain characteristics, while the forward-looking or backward-looking placement of antenna can not avoid the problem of range-dependent clutter. In this paper, in view of the fact that the conventional Space-Time INterpolation Technique(STINT) can not be directly applied to end-fire array clutter compensation in range ambiguity situation, a novel method of end-fire array clutter compensation based on space-time interpolation is proposed based on the characteristics of clutter spectrum for end-fire array airborne radar. The method takes full account of the ambiguous clutter of each range gate and takes the arc corresponding to the main lobe of the long-range stationary clutter ridge as the interpolation reference subspace. Furthermore, it also refines the constrained object of moving target constraints, which achieves effective compensation for the non-stationary clutter of end-fire array in range ambiguity situation. Computer simulation results verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: End-fire array; Space-time interpolation; Non-stationary clutter compensation; Moving target constraint; Range ambiguity

1 引言

与传统侧射阵列天线相比, 端射阵列天线^[1-4]的最大辐射方向指向阵列排布的轴向而非法向, 因此在最大辐射方向的方向系数不再与等效口径尺寸成正比, 这有效地解决了侧射阵列口径尺寸较大导致风阻较大的问题, 因而特别适用于机载雷达的前后向补盲^[1]。而用于补盲的端射阵通常呈前后视放

置, 因而与传统前后视侧射阵机载雷达一样, 不可避免地要面临杂波的距离非平稳问题。常规的空时自适应处理技术^[5,6](Space-Time Adaptive Processing, STAP)能够较好抑制杂波的前提是能较准确估计出待检测距离单元的杂波协方差矩阵, 而杂波的距离非平稳性则使得不同距离单元间的训练样本不再满足独立同分布条件, 因而直接利用最大似然方法估计的杂波协方差矩阵将会与待检测单元的杂波统计特性失配, 致使常规STAP方法的杂波抑制性能严重恶化^[7]。

针对杂波的距离非平稳问题, 国内外学者进行了大量的研究。杂波距离非平稳性补偿方法主要有多普勒补偿法^[8](Doppler Warping, DW)、角度-多

收稿日期: 2018-12-06; 改回日期: 2019-05-16; 网络出版: 2019-05-24

*通信作者: 李永伟 1030490032@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金(61102169)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61102169)

普勒补偿法^[9](Angle-Doppler Compensation, ADC)、自适应角度-多普勒补偿法^[10-12](Adaptive ADC, A²DC)、基于配准补偿(Registration-Based Compensation, RBC)的方法^[13,14]以及空时内插方法^[15-18](Space-Time INterpolation Technique, STINT)等。这些方法在无距离模糊时有着良好的效果,而当存在距离模糊时,由于同一距离门近程非平稳杂波与远程平稳杂波模糊在一起,使用上述方法在对近程非平稳杂波进行补偿的同时,会影响到远程杂波的空时分布,从而导致上述方法性能严重下降。文献^[17]对文献^[15]中适用于双基地的STINT进行了进一步的改进,使其在单基地非正侧视阵情况下也具有良好的杂波距离依赖性补偿效果,然而经初步仿真研究表明,该方法对于端射阵机载雷达却效果不佳,而且没有考虑到距离模糊的情况。

针对这一情况,本文基于端射阵机载雷达杂波谱特性对文献^[17]所提基于STINT的杂波补偿方法进行了进一步改进,提出了一种适用于端射阵机载雷达的非平稳杂波补偿新方法。本方法以端射阵远程平稳杂波脊主瓣区所对应的圆弧作为空时插值的参考子空间,在插值过程中充分考虑了各个距离门的模糊杂波;同时进一步细化了目标保护的约束对象,减少了实际应用中由于约束不当可能引起的补偿效果欠佳问题,并降低了计算量。本方法相对于传统STINT而言不仅显著改善了其用于端射阵的杂波抑制性能,而且在存在距离模糊时依然保持着良好效果。

2 端射阵机载雷达杂波特性

2.1 杂波模型

端射阵机载雷达阵列几何关系如图1所示,设载机以速度 V 作匀速直线飞行,天线为 M 行 N 列的矩形前向平放阵列,其中列子阵为端射单元,阵元列间间距为 d_x ,行间间距为 d_y ,工作波长为 λ 。阵面法线垂直于载机飞行方向,各列子阵与飞行方向平行, θ 为方位角(即阵列行子阵投影与杂波块之间

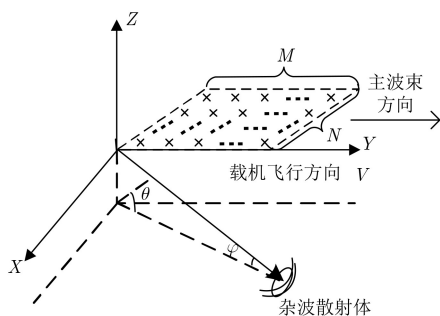


图1 端射阵机载雷达阵列几何关系

的夹角), φ 为俯仰角,假设天线主瓣指向 (θ_0, φ_0) ,阵列采用可分离加权。

设列子阵和行子阵权分别为 I_m 和 I_n ($m = 1, 2, \dots, M; n = 1, 2, \dots, N$)。由图1的几何关系可以得到端射阵的收发方向图函数为

$$F(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M I_n I_m \exp \left\{ j \frac{2\pi}{\lambda} \left[(m-1) \cdot d_y (\cos \varphi \sin \theta - 1) + (n-1) \cdot d_x (\cos \varphi \cos \theta - \cos \varphi_0 \cos \theta_0) \right] \right\} \quad (1)$$

设接收天线通道数(列子阵数)为 N ,相干处理脉冲数为 K ,则雷达接收到的某个距离环上的空时采样杂波回波信号表示为

$$\mathbf{X}_c = \sum_{i_a=1}^{N_a} \sum_{i=1}^{N_c} A(\theta_i, \varphi_{i_a}) \mathbf{S}_S(\theta_i, \varphi_{i_a}) \otimes \mathbf{S}_T(\theta_i, \varphi_{i_a}) \quad (2)$$

其中, \otimes 为Kronecker积, $A(\theta_i, \varphi_{i_a})$ 为杂波点处杂波幅度, N_a 为距离模糊数, N_c 为某一等距离环内包含的杂波块的数目, $\mathbf{S}_S(\theta_i, \varphi_{i_a})$ 与 $\mathbf{S}_T(\theta_i, \varphi_{i_a})$ 分别为空域导向矢量和时域导向矢量,其具体表达式与侧射前视阵相同,故不再赘述。

由式(2)可知,端射阵机载雷达杂波谱模型在数学形式上与侧射阵机载雷达并未有何不同,但是由于端射阵阵列处于平放状态,这势必会导致端射阵的天线方向图函数(见式(1))与侧射阵存在区别,从而影响杂波谱模型中的幅度项 $A(\theta_i, \varphi_{i_a})$ 导致杂波功率分布与侧射阵存在较大差异。同时由图1易推知端射阵机载雷达的杂波空时分布轨迹也同样为一椭圆,与侧射阵不同的是,由于端射阵阵列平放,故其无后向反射遮挡作用,其杂波轨迹为一整个椭圆而非半个。

2.2 杂波谱特性

根据上述杂波回波模型,对机载端射阵雷达杂波谱进行仿真。由于端射阵无后向遮挡反射效应,为消除后向栅瓣,令行间间距 $d_y = \lambda/4$ ^[2](虽然行间间距为 $\lambda/4$ 能够消除后向栅瓣,但是后向俯仰副瓣依然存在)。接收天线采用20 dB切比雪夫加权,接收机噪声系数为3.5 dB,带宽为3 MHz,距离门宽度为50 m。其它仿真参数见表1。

图2给出了端射阵机载雷达杂波的角度-多普勒轨迹随距离分布图,可以看出,端射阵杂波轨迹为一正椭圆且随距离的变化而变化,与侧射阵一样在近程呈现出严重的非平稳性;但当距离超过40 km(即5倍载机高度)时,杂波轨迹逐渐收敛趋于平稳,因此可以将模糊后距离超过5倍载机高度的杂波近似视为平稳杂波。

表 1 仿真参数设置

仿真参数	$\theta_0(^{\circ})$	$\varphi_0(^{\circ})$	M	N	K	d_x (m)	d_y (m)	λ (m)	V (m/s)	f_r (Hz)	H (km)	R_{max} (km)
数值	90	0	16	8	8	0.115	0.058	0.23	140	2435	8	368

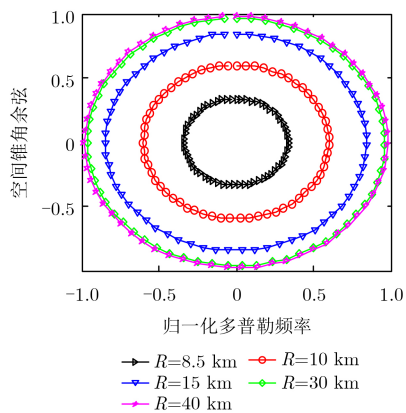
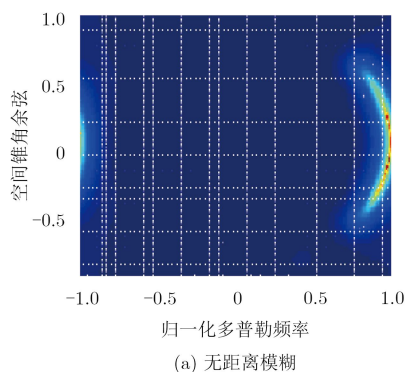
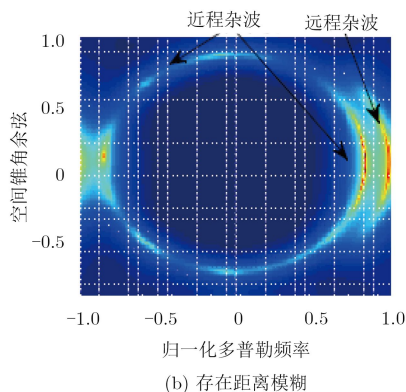


图 2 杂波轨迹随距离分布

由图3可知，由于后向俯仰副瓣的存在，端射阵杂波功率在近程分布于整个轨迹上，但在远程却集中分布于主瓣区，其它区域功率几乎与噪声相当；同时距离模糊使得近程非平稳杂波叠加进来，导致了杂波谱的进一步复杂化，补偿难度加大。由图4可知，即使存在距离模糊，远程平稳杂波回波功率也主要集中分布在方位角 $60^{\circ}\sim 120^{\circ}$ 区域，这可为3.2节插值参考子空间的选取提供参考。

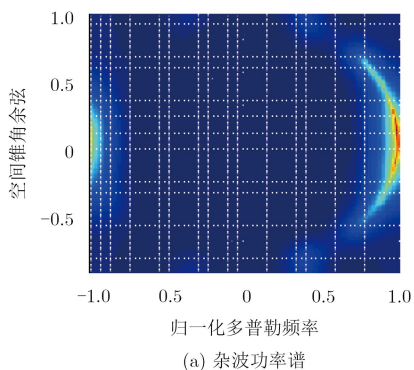


(a) 无距离模糊

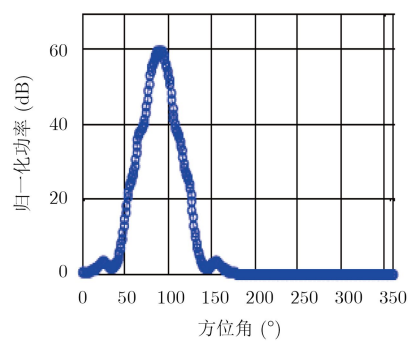


(b) 存在距离模糊

图 3 真实杂波功率谱($R=135$ km)



(a) 杂波功率谱



(b) 杂波功率随方位角分布

图 4 远程平稳杂波功率谱($R=60$ km)

3 基于空时插值的补偿新方法

3.1 空时插值方法

文献[17]中STINT原理示意图如图5所示，针对第 $l(l = 1, 2, \dots, L, L$ 为训练样本数)个待补偿距离单元，首先通过载机的飞行参数等先验信息计算出参考距离单元和第 l 个待补偿距离单元对应的杂波轨迹所处位置；而后在各杂波轨迹上均匀取 $J(J \geq NK)$ 个点构造参考距离单元的空时导向矢量矩阵 \mathbf{V}_R 和第 l 个待补偿距离单元的空时导向矢量矩阵 \mathbf{V}_{Nl} ；最后通过式(3)的优化表达式求解空时插值变换矩阵 \mathbf{T}_l

$$\min_{\mathbf{T}_l} \|\mathbf{T}_l^H \mathbf{V}_{Nl} - \mathbf{V}_R\|_2, \text{ s.t. } \mathbf{T}_l^H \mathbf{V}_T = \mathbf{V}_T \quad (3)$$

其中， \mathbf{V}_T 为目标约束矩阵，用于在杂波补偿的过程中防止目标相消或搬移。

然而，该方法存在以下两点不足：

- (1) 该方法未考虑到存在距离模糊的情况，然而实际工程应用中预警机雷达一般工作中高频状态，距离模糊是难以避免的。

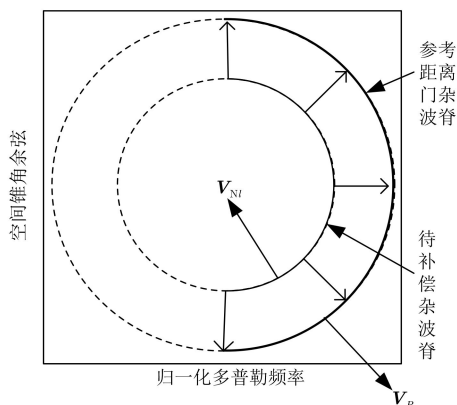


图5 传统STINT插值示意图

(2) 该方法对每个待补偿单元进行补偿时都添加了目标约束条件, 然而实际上感兴趣的目标只可能存在于待检测距离单元, 因此对除待检测单元之外的训练单元数据增加目标约束, 不仅加大了计算量, 而且还加大了训练单元中主杂波被部分保留下来从而影响杂波补偿效果的可能性。

3.2 本文方法

空时插值类方法的本质是将雷达回波中具有较大杂波自由度的杂波空间映射为具有较小杂波自由度的杂波子空间。对于侧射机载雷达而言, 各距离门杂波均分布于整个半圆轨迹上, 参考子空间选取为某一远程平稳杂波轨迹, 因而经插值补偿后, 谱重合度改善, 其杂波自由度也随之减少, 非平稳性得到补偿。而对于端射阵, 其杂波轨迹虽为一整椭圆(见图2), 但其在远程杂波却只分布在轨迹的主瓣区(见图4), 因而如果仍然将参考子空间选取为远程杂波轨迹, 则会将近程非平稳杂波映射到整个轨迹上, 谱重合度虽然能得到一定的改善, 但同时也使得补偿后杂波成分增加, 杂波自由度减少不明显, 导致上述方法效果变差。

为了解决这一问题, 使得空时插值方法能够更好地适用于端射阵, 同时克服文献[15]中方法本身存在的不足, 本节对其进行了改进, 具体过程见3.2.1节和3.2.2节。

3.2.1 导向矢量矩阵提取

针对第 l 个训练单元, 利用先验信息计算出其各模糊距离杂波脊的空时分布, 并在各杂波脊上均匀取 $J(J \geq NK)$ 个点, 构造第 i_a 次模糊杂波对应的空时导向矢量采样矩阵 \mathbf{V}_{l,i_a}

$$\mathbf{V}_{l,i_a} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{i_a,1}^T & \mathbf{v}_{i_a,2}^T & \cdots & \mathbf{v}_{i_a,J}^T \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, $i_a = 1, 2, \dots, N_a$, N_a 为距离模糊数, $\mathbf{v}_{i_a,j}$ 为第 i_a 次模糊第 $j(j = 1, 2, \dots, J)$ 个采样点对应的空时导向矢量。

为了避免将近程杂波映射到远程轨迹无杂波区, 引起杂波成分的增加, 不妨选取远程平稳杂波脊主瓣区所对应的圆弧为空时插值的参考子空间。可令参考子空间

$$\Theta = [\mathbf{b}_1^T \quad \mathbf{b}_2^T \quad \cdots \quad \mathbf{b}_j^T] \quad (5)$$

其中, \mathbf{b}_j 为参考子空间第 j 个采样点对应的空时导向矢量, 其具体表达式为

$$\mathbf{b}_j = \begin{bmatrix} 1 & e^{j\omega_s(\theta_j, \varphi_{MN_a})} & \cdots & e^{j(N-1)\omega_s(\theta_j, \varphi_{MN_a})} \end{bmatrix} \\ \otimes \begin{bmatrix} 1 & e^{j\omega_t(\theta_j, \varphi_{MN_a})} & \cdots & e^{j(K-1)\omega_t(\theta_j, \varphi_{MN_a})} \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中, θ_j 为沿 $(\pi/3, 2\pi/3)$ 均匀选取的第 j 个点对应的方位角, φ_{MN_a} 为最远可检测距离单元第 N_a 次模糊对应的俯仰角。

由于动目标的多普勒信息无法获取, 为避免将主杂波当成目标, 可在待补偿距离单元杂波脊之外的目标波束对应的多普勒域上取 P 个离散的多普勒频率点, 构造运动目标空时导向矢量矩阵 \mathbf{V}_T 来约束运动目标, 即

$$\mathbf{V}_T = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{S}}_1^T & \tilde{\mathbf{S}}_2^T & \cdots & \tilde{\mathbf{S}}_P^T \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中, $\tilde{\mathbf{S}}_t(t = 1, 2, \dots, P)$ 为第 t 个目标约束点所对应的空时导向矢量, 具体导向矢量采样提取示意图如图6。

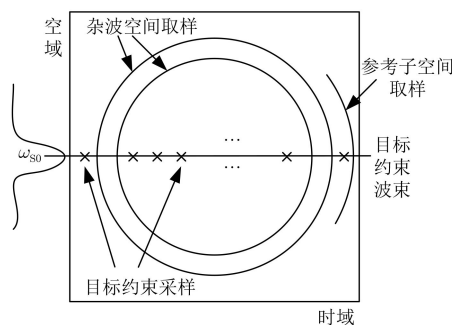


图6 导向矢量矩阵提取示意图

3.2.2 杂波数据插值变换

由于感兴趣的目标只可能存在于待检测距离单元, 因而只需将目标约束条件加在待检测单元的插值变换矩阵中即可, 既减少了计算量, 又可避免因其他距离门约束不当而将主杂波成分保留下来引起的干扰, 即

$$\min_{\mathbf{T}_0} \|\mathbf{T}_0^H \mathbf{V}_{S0} - \Theta\|_2, \text{ s.t. } \mathbf{T}_0^H \mathbf{V}_T = \mathbf{V}_T \quad (8)$$

其中

$$\mathbf{V}_{S0} = \sum_{i_a=1}^{N_a} \mathbf{V}_{0,i_a} \quad (9)$$

为待检测距离单元各模糊距离空时导向矢量采样矩阵之和， $\mathbf{V}_{0_{i_a}}$ 为待检测距离单元第 i_a 次模糊对应的空时导向矢量矩阵， \mathbf{T}_0 为待检测单元插值变换矩阵， \mathbf{T}_0 求取过程及结果见文献[15]。

而对于训练单元，插值变换矩阵 \mathbf{T}_l 则可直接由式(10)求得

$$\min_{\mathbf{T}_l} \|\mathbf{T}_l^H \mathbf{V}_{Sl} - \Theta\|_2 \quad (10)$$

解得

$$\mathbf{T}_l = \Theta^H (\mathbf{V}_{Sl}^+)^H \quad (11)$$

其中， \mathbf{V}_{Sl} 为第 l 个训练单元各模糊距离空时导向矢量采样矩阵之和， $(\bullet)^+$ 表示伪逆运算。将求解得到的 \mathbf{T}_l 作用于第 l 个训练单元回波数据 \mathbf{X}_l ，可得

$$\mathbf{Y}_l = \mathbf{T}_l^H \mathbf{X}_l \quad (12)$$

则插值补偿后的待检测单元数据和插值补偿后估计得到的杂波协方差矩阵分别为

$$\mathbf{Y}_0 = \mathbf{T}_0^H \mathbf{X}_0 \quad (13)$$

$$\tilde{\mathbf{R}} = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \mathbf{Y}_l \mathbf{Y}_l^H \quad (14)$$

利用式(14)获得补偿后的杂波协方差矩阵，可直接进行后续的空时自适应处理，限于篇幅，本文对STAP算法原理不再做介绍。

4 计算机仿真验证

本节通过计算机仿真对本文所提方法的杂波补偿效果和抑制性能进行验证。仿真中假设目标归一化空间频率为0，归一化多普勒频率为0.6，不考虑各种非理想因素，空时处理均采用3DT方法。其它仿真参数见表1。

由图7(a)、图8(a)可知，无论是否存在模糊，未经补偿的杂波功率谱都展宽严重，且目标几乎淹没在杂波中，若直接进行空时自适应处理，将得到宽且浅的杂波抑制凹口，难以有效抑制杂波。由图7可以看出，不存在距离模糊时，传统STINT与本文方法皆能使得杂波谱变窄，杂波非平稳性得到补偿，目标信息被保留下来，但是传统STINT使得原本无杂波分布的副瓣区出现杂波，杂波成分相对于真实情况有所增加；而经本文方法补偿后其杂波功率谱相对于传统STINT补偿后更窄，与真实杂波功率谱(见图3(a))几乎一致。由图8可以看出，当存在距离模糊时，传统STINT由于没有充分考虑到各距离门的模糊杂波，在对近程非平稳杂波进行补偿变换的同时也对与近程杂波数据处于相同模糊距离门的远程平稳杂波数据进行了相同的变换补偿，因而使得原本无需补偿的远程平稳杂波数据的空时分布被破坏，从而导致补偿效果严重恶化；而本文方法由于充分考虑了各距离门的模糊杂波，对每个距

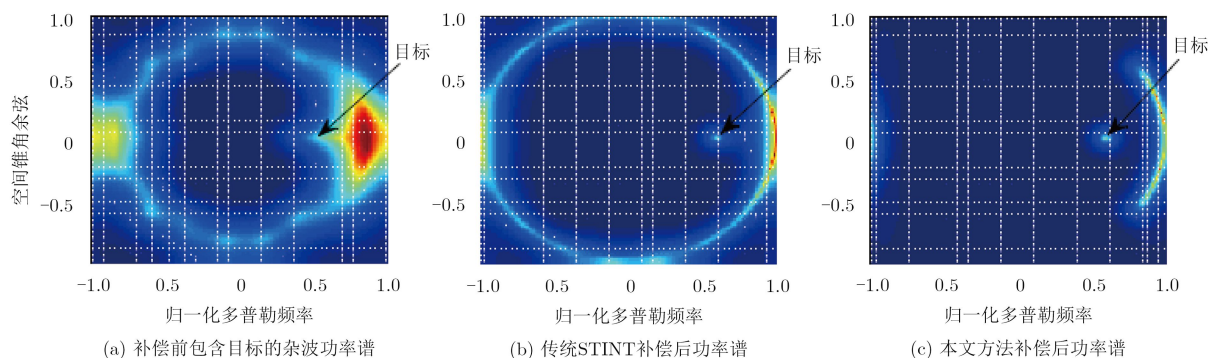


图7 无距离模糊情况下各方法补偿后功率谱($R=15$ km)

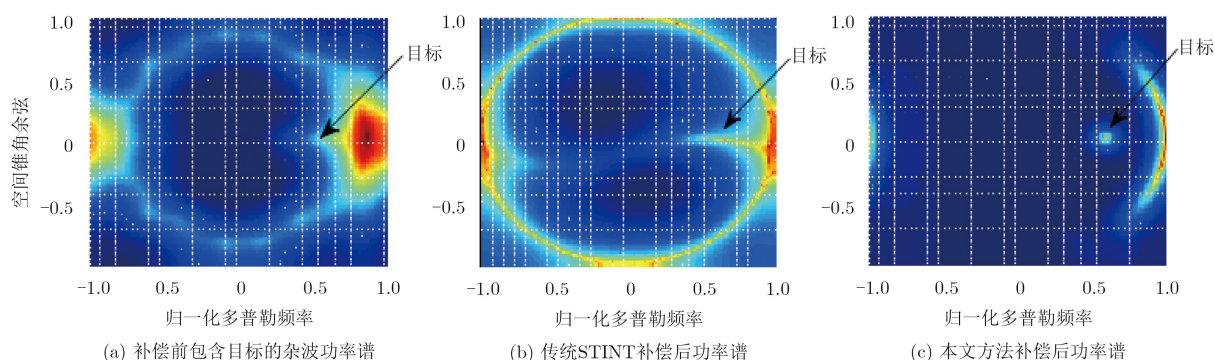


图8 存在距离模糊情况下各方法补偿后功率谱($R=135$ km)

离门的各模糊杂波都进行各自不同的补偿变换，使得所有距离门的杂波都能向远程平稳杂波靠齐，因而仍然可以保持着较好的补偿效果。

图9是经各种方法补偿后杂波特征谱比较图。无距离模糊时，经两种方法补偿后杂波自由度相对于直接矩阵求逆(Sample Matrix Inverse, SMI)而言均有一定的减少，但经传统STINT补偿后的杂波自由度仍然远远大于本文方法。这是由于传统STINT虽然使得杂波谱变窄，这在一定程度上可以显著降低杂波自由度，然而其也使得原本无杂波分布的副瓣区出现杂波，杂波成分相对于真实情况有所增加，这又在一定程度上导致了杂波自由度的增加，两者共同作用则使得杂波自由度降幅不如本文方法。而当存在距离模糊时，由于传统STINT破坏了远程平稳杂波的空时分布，因而使得杂波自由度不减反增，而经过本文方法插值变换后杂波空间仍然保持着较小的自由度，几乎达到了Brennan准则下的最小值，实现了空时插值类方法降低杂波自由度的目的。

图10给出了经各种方法处理后信杂噪比损失比较图。由图10可知，不考虑距离模糊时，两种方法相对于SMI而言均有较大幅度的杂波抑制性能改善，但是本文方法在主瓣区性能要明显优于传统STINT，这是由于经本文方法补偿后其杂波谱更窄，

目标落入主杂波区的概率更小一些；而当考虑距离模糊时，由于传统STINT破坏了远程平稳杂波的空时结构，导致补偿后形成的空时杂波凹口与待检测距离单元杂波功率谱严重失配，使得杂波抑制性能恶化严重甚至远不如SMI处理；而本文方法由于充分考虑了模糊杂波，不存在杂波凹口失配问题，因而依然保持着良好的性能，尤其对于主瓣杂波附近的慢动目标，其性能改善是十分显著的。

5 结束语

针对传统STINT不能直接适用于存在距离模糊条件下端射阵机载雷达杂波补偿情况，本文基于端射阵机载雷达杂波谱特性，提出了一种基于STINT的端射阵非平稳杂波补偿新方法。本方法充分考虑了各个距离门的模糊杂波，克服了传统STINT只能适用于无模糊情况的缺陷；并以远程平稳杂波脊主瓣区所对应的圆弧作为插值参考子空间，同时还进一步细化了目标保护约束条件的添加问题，实现了对距离模糊情况下端射阵非平稳杂波的有效补偿。计算机仿真结果表明，所提方法较好地解决了端射阵机载雷达的近程非平稳杂波补偿问题。但由于本方法需要通过一定的先验知识准确计算出各模糊杂波轨迹的空时位置，因而在实际工程应用中，各种先验数据不可避免的测量误差势必会对该方法性能产生一定的影响。

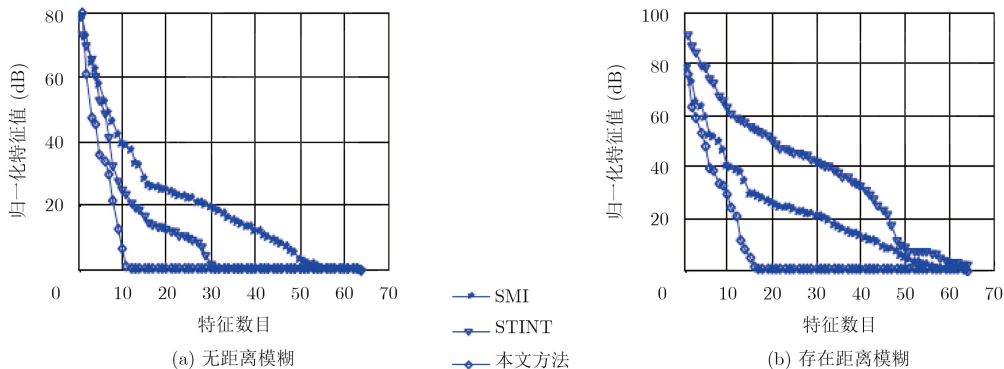


图9 各种方法补偿后杂波特征谱比较

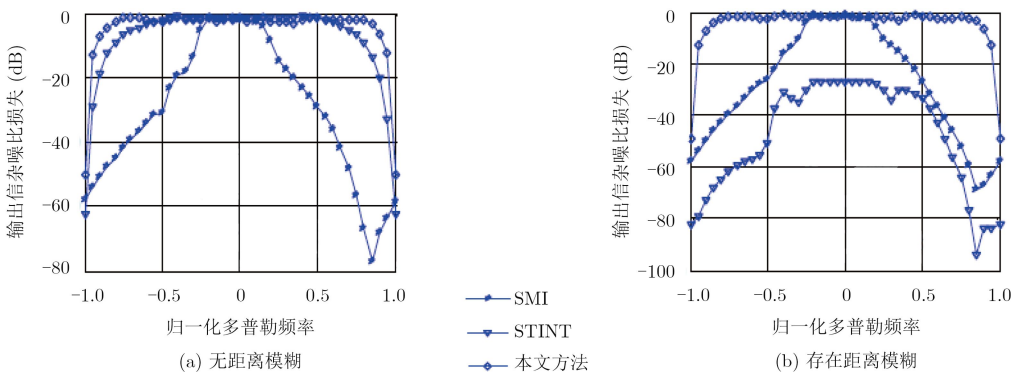


图10 各种方法处理后信杂噪比损失比较

参 考 文 献

- [1] 刘喜玲. 机载端射阵列天线的研究[D]. [硕士学位论文], 电子科技大学, 2015: 1–19.
LIU Xilin. Research of airborne end-fire antenna array[D]. [Master dissertation], University of Electronic Science and Technology of China, 2015: 1–19.
- [2] 常仁, 王小谟, 刘姜玲, 等. 数字端射阵列栅瓣抑制研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2014, 9(3): 287–290. doi: [10.3969/j.issn.1673-5692.2014.03.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-5692.2014.03.012).
CHANG Ren, WANG Xiaomo, LIU Jiangling, *et al.* The research of grating lobe suppression of digital end-fire antenna array[J]. *Journal of CAEIT*, 2014, 9(3): 287–290. doi: [10.3969/j.issn.1673-5692.2014.03.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-5692.2014.03.012).
- [3] 郭先松, 孔令兵, 刘小飞. 机载预警雷达天线发展趋势及关键技术[J]. 现代雷达, 2015, 37(12): 19–24. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2015.12.004](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2015.12.004).
GUO Xiansong, KONG Lingbing, and LIU Xiaofei. Development trend and key technology of airborne early-warning radar antenna[J]. *Modern Radar*, 2015, 37(12): 19–24. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2015.12.004](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2015.12.004).
- [4] ESHAGHI A, TAZLAUANU M, and SUPINSKI M. Wideband end-fire phased array for WiGig applications[C]. The IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, San Diego, USA, 2017: 2559–2560.
- [5] 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: 46–56.
WANG Yongliang and PENG Yingning. Space-time Adaptive Processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000: 46–56.
- [6] 谢文冲, 段克请, 王永良. 机载雷达空时自适应处理技术研究综述[J]. 雷达学报, 2017, 6(6): 575–586. doi: [10.12000/JR17073](https://doi.org/10.12000/JR17073).
XIE Wenchong, DUAN Keqing, and WANG Yongliang. Space time adaptive processing technique for airborne radar: An overview of its development and prospects[J]. *Journal of Radars*, 2017, 6(6): 575–586. doi: [10.12000/JR17073](https://doi.org/10.12000/JR17073).
- [7] 许华健, 杨志伟, 廖桂生, 等. 一种稳健的非均匀杂波协方差矩阵估计方法[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(5): 1036–1042. doi: [10.11999/JEIT160747](https://doi.org/10.11999/JEIT160747).
XU Huajian, YANG Zhiwei, LIAO Guisheng, *et al.* Robust approach for clutter covariance matrix estimation with STAP in heterogeneous environment[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(5): 1036–1042. doi: [10.11999/JEIT160747](https://doi.org/10.11999/JEIT160747).
- [8] BORSARI G K. Mitigating effects on STAP processing caused by an inclined array[C]. IEEE Radar Conference, RADARCON'98. Challenges in Radar Systems and Solutions, Dallas, USA, 1998: 135–140.
- [9] HIMED B, ZHANG Yuhong, and HAJJARI A. STAP with angle-Doppler compensation for bistatic airborne radar[C]. 2000 IEEE Radar Conference, Long Beach, USA, 2002: 311–317.
- [10] JAFFER A and HO P T. Adaptive angle-Doppler compensation techniques for bistatic STAP radars[R]. Final Technical Report, AFRL-SN-RS-TR-2005-398, 2005.
- [11] 赵军, 田斌, 朱岱寅. 基于PAST处理的机载双基雷达自适应角度-多普勒补偿算法[J]. 雷达学报, 2017, 6(6): 594–601. doi: [10.12000/JR17053](https://doi.org/10.12000/JR17053).
ZHAO Jun, TIAN Bin, and ZHU Daiyin. Adaptive angle-Doppler compensation method for airborne bistatic radar based on PAST[J]. *Journal of Radars*, 2017, 6(6): 594–601. doi: [10.12000/JR17053](https://doi.org/10.12000/JR17053).
- [12] 贾逢德, 何子述, 李军, 等. 机载雷达平面阵前视杂波距离依赖性补偿[J]. 现代雷达, 2018, 40(7): 36–40. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2018.07.009](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2018.07.009).
JIA Fengde, HE Zishu, LI Jun, *et al.* Forward-looking clutter range-dependence compensation in planar array for airborne radar[J]. *Modern Radar*, 2018, 40(7): 36–40. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2018.07.009](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2018.07.009).
- [13] LAPIERRE F D and VERLY J G. Registration-based solutions to the range-dependence problem in STAP radars[C]. The 11th Adaptive Sensor Array Processing Workshop, Lexington, USA, 2003: 1–6.
- [14] 王娟, 王彤, 吴建新. 非正侧阵机载雷达杂波谱迭代自适应配准方法[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(4): 742–747. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2017.04.08](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2017.04.08).
WANG Juan, WANG Tong, and WU Jianxin. Registration-based compensation using iterative adaptive approach in non-side-looking airborne radar[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2017, 39(4): 742–747. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2017.04.08](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2017.04.08).
- [15] VARADARAJAN V and KROLIK J L. Joint space-time interpolation for distorted linear and bistatic array geometries[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2006, 54(3): 848–860. doi: [10.1109/TSP.2005.862941](https://doi.org/10.1109/TSP.2005.862941).
- [16] 彭晓瑞, 谢文冲, 王永良. 一种基于空时内插的双基地机载雷达杂波抑制方法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(7): 1697–1702. doi: [10.3724/SP.J.1146.2009.00975](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2009.00975).
PENG Xiaorui, XIE Wenchong, and WANG Yongliang. Improved joint space-time interpolation technique for bistatic airborne radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(7): 1697–1702. doi: [10.3724/SP.J.1146.2009.00975](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2009.00975).

- [17] 岳兵, 李明, 廖桂生. 基于空时插值的机载雷达杂波距离依赖性补偿方法[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(8): 1557–1561. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2010.08.01](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2010.08.01).
YUE Bing, LI Ming, and LIAO Guisheng. Compensation of clutter range dependence for airborne radar based on space-time interpolation[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2010, 32(8): 1557–1561. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2010.08.01](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2010.08.01).
[10.3724/SP.J.1146.2010.01133](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2010.01133).
- [18] 刘锦辉, 廖桂生, 李明. 机载前视阵雷达杂波谱空时分离插值方法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(9): 2120–2124. doi: [10.3724/SP.J.1146.2010.01133](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2010.01133).
LIU Jinhui, LIAO Guisheng, and LI Ming. Space-time separated interpretation method for forward-looking airborne radar clutter spectrum[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(9): 2120–2124. doi: [10.3724/SP.J.1146.2010.01133](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2010.01133).
- 李永伟: 男, 1994年生, 助教, 研究方向为空时自适应处理.
谢文冲: 男, 1978年生, 副教授, 研究方向为空时自适应处理、机载雷达信号处理和雷达系统.