

端射阵机载雷达距离模糊非平稳杂波补偿方法

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, 湖北武汉 430019)

摘 要: 端射阵天线是指波束指向垂直于阵列法线方向的一类特殊雷达天线, 由于其具有低剖面 and 定向辐射特性, 因而特别适合用于机载雷达的补盲. 由于端射阵通常呈前视放置, 因而与传统前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. 本文基于端射阵机载雷达杂波谱特性, 提出了一种距离模糊下端射阵近程杂波补偿新方法. 该方法以最远可检测距离单元为参考单元并增加了动目标约束保护条件, 克服了存在距离模糊时基于杂波谱配准 (Registration-Based Compensation, RBC) 原理的传统补偿方法存在的目标相消以及计算量大的问题; 同时针对可能存在的目标约束失配问题, 进一步提出了基于虚拟波束的扩展补偿方法. 计算机仿真结果验证了本文方法的有效性.

关键词: 端射阵; 距离模糊; 非平稳杂波补偿; 动目标约束; 虚拟波束

中图分类号: TN959.73

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2020)03-0486-08

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

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.03.010

A Non-stationary Clutter Spectrum Compensation Method for End-Fire Array Airborne Radar with Range Ambiguity

LI Yong-wei, XIE Wen-chong

(Radar Weapon Application Engineering Military Key Research Laboratory, Air Force Early Warning Academy, Wuhan, Hubei 430019, China)

Abstract: End-fire array antenna is a kind of special radar antenna with beam pointing perpendicular to the normal direction of the array. Because of its low profile and directional radiation characteristics, it is especially suitable for blind compensation of airborne radar. As end-fire array is usually placed forward-looking, it inevitably faces the problem of non-stationary clutter which just likes traditional forward-look side-fire array. Based on the clutter spectrum characteristics of end-fire array airborne radar, a novel short-range non-stationary clutter compensation method for end-fire array with range ambiguity is proposed in this paper. The farthest detectable range unit is taken as the reference unit and the constraint protection condition is added to the moving target in this method, which overcomes the disadvantage of target cancellation and large computation of the traditional compensation method based on RBC (Registration-Based Compensation) principle with range ambiguity. At the same time, aiming at the problem of the target constraint mismatch, an extended compensation method based on virtual beam is proposed. The computer simulation results verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: end-fire array; range ambiguity; non-stationary clutter compensation; moving target constraint; virtual beam

1 引言

端射阵天线是指最大辐射方向指向阵列排布轴向的一类天线. 由于端射阵在最大辐射方向的方向系数不再与等效口径尺寸成正比, 这便有效地解决了侧射阵阵因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]. 而端射阵机载雷达的实际工程应用首要解决的问题就是杂波抑制的问

题, 由于端射阵通常呈前视阵放置, 因而与传统前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方法 (Space-Time Adaptive Processing, STAP) 虽然对平稳杂波有着良好的抑制效果, 但杂波的距离非平稳问题则会导致其无法在待检测距离单元杂波处形成深而窄的凹口, 使得杂波抑制性能大幅下降而无法检测运动目标^[2-4].

针对传统侧射前视阵的杂波距离非平稳问题, 国

内外学者进行了大量研究. 杂波距离非平稳性补偿方法主要有:(1)1 维多普勒补偿类方法^[5] (Doppler Warping, DW), 该类方法的原理是仅通过多普勒频率域进行杂波非平稳性补偿;(2)2 维补偿类方法, 包括:角度-多普勒补偿法^[6] (Angle-Doppler Compensation, ADC)、自适应角度多普勒补偿法^[7] (Adaptive ADC, A²DC)、基于配准的补偿方法^[8] (Registration-Based Compensation, RBC) 等, 该类方法的原理是通过角度-多普勒 2 维域实现对杂波非平稳性的补偿, 但与其它补偿类方法不同的是, RBC 方法可实现杂波谱的全频域全方位精准补偿, 因而补偿效果更优;(3)空时内插法^[9] (Space-Time Interpolation Technique, STINT), 该类方法的原理是以低自由度的杂波子空间为参考子空间, 通过变换矩阵将所有距离单元的样本数据映射到参考杂波子空间中, 以消除杂波非平稳性. 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杂波与远程杂波混在一起, 使用上述的几种方法在对近程非平稳杂波进行补偿同时, 会影响到远程杂波的空时分布, 从而导致上述方法失效. 文献[10]提出了一种基于 RBC 原理的改进方法, 能够在补偿近程非平稳杂波的同时, 还能够保证远程模糊杂波数据的平稳性. 经初步仿真分析表明, 文献[10]所提方法在端射阵机载雷达存在距离模糊时亦具有较好的距离依赖性补偿效果. 然而该方法存在以下缺点:(1)该方法需重构和计算出每个距离门的杂波协方差矩阵与补偿变换矩阵, 计算量大且存在重构误差;(2)该方法以最远训练单元作为参考单元, 当参考单元模糊杂波脊不能完全重合时, 补偿效果变差;(3)该方法在补偿的过程中会引起目标回波的搬移或相消, 不利于后续对目标的有效检测. 而文献[11]虽然在基于 RBC 原理补偿方法的基础上对目标保护约束的问题进行了研究, 但是却并没有考虑存在距离模糊的情况.

本文基于端射阵机载雷达杂波谱特性提出了一种近程非平稳杂波补偿新方法. 该方法相对于基于 RBC 原理的方法而言进一步降低了计算量, 并克服了由于参考单元的选取不当引起的性能下降的问题; 兼顾考虑了距离模糊和目标数据的约束保护问题, 使得该方法在补偿近程杂波距离依赖性的同时, 能够保证目标数据和远程平稳杂波数据的空时分布不发生改变; 并且当存在目标约束失配时, 该方法依然能够获得较稳定的杂波抑制性能. 计算机仿真结果验证了本文方法的有效性.

2 端射阵机载雷达杂波谱特性

2.1 杂波模型

如图 1, 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. 图 1 中, θ 为方位角 (即阵列行子阵与杂波块之间的夹角), 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^[12].

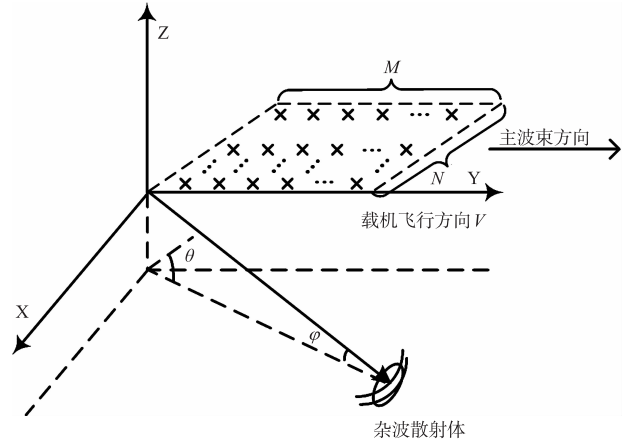


图1 端射阵机载雷达阵列几何关系

设接收天线通道数 (列子阵数) 为 N , 相干处理脉冲数为 K , 收发波束指向确定, 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

$$\mathbf{X}_c = \sum_{i_a=1}^{N_a} \sum_{i_r=1}^{N_c} A(\theta_i, \varphi_{i_a}) \mathbf{S}_s(\theta_i, \varphi_{i_a}) \otimes \mathbf{S}_t(\theta_i, \varphi_{i_a}) \quad (1)$$

其中 \otimes 为 Kronecker 积, $A(\theta_i, \varphi_{i_a})$ 为杂波点 $(\theta_i, \varphi_{i_a})$ 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散射体的数目.

$$\mathbf{S}_s(\theta_i, \varphi_{i_a}) = [1 \quad e^{j\omega_s(\theta_i, \varphi_{i_a})} \quad \dots \quad e^{j(N-1)\omega_s(\theta_i, \varphi_{i_a})}] \quad (2)$$

$$\mathbf{S}_t(\theta_i, \varphi_{i_a}) = [1 \quad e^{j\omega_t(\theta_i, \varphi_{i_a})} \quad \dots \quad e^{j(K-1)\omega_t(\theta_i, \varphi_{i_a})}] \quad (3)$$

分别为空域导向矢量和时域导向矢量, ω_s 、 ω_t 分别为空域角频率和时域角频率, 具体表达式为

$$\omega_s(\theta_i, \varphi_{i_a}) = \frac{2\pi d}{\lambda} \cos\theta_i \cos\varphi_{i_a} \quad (4)$$

$$\omega_t(\theta_i, \varphi_{i_a}) = \frac{4\pi V}{\lambda f_r} \sin\theta_i \cos\varphi_{i_a} \quad (5)$$

其中 f_r 为脉冲重复频率, V 为载机速度.

2.2 存在距离模糊时的杂波谱特性

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 $d_y = \lambda/4$ ^[13] (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). 为了与实际工程应用相符, 本节在仿真时假设端射阵为 16 行 8 列, 呈前视阵放置^[1]. 接收天线采用 20dB 切比雪夫加权, 接收机噪声系数 3.5dB, 带宽 3MHz, 距离门宽度 50m. 其它仿真参数见表 1.

表 1 仿真参数设置

仿真参数	数值
$\theta_0/(\circ)$	90
$\varphi_0/(\circ)$	0
K	8
$d_x(\text{m})$	0.115
$d_y(\text{m})$	0.058
$\lambda(\text{m})$	0.23
$V/(\text{m/s})$	140
$f_i(\text{Hz})$	2 435
$H(\text{km})$	8
$R_{\max}(\text{km})$	368
$P_i(\text{kw})$	200

图 2 给出了端射阵机载雷达在 135km 处(约第 300 距离门)无距离模糊时的杂波功率谱,图 3~4 则给出了雷达在 135km 处存在距离模糊时的真实杂波功率谱和估计杂波功率谱,图 5 给出了存在距离模糊时的杂波距离-多普勒谱。

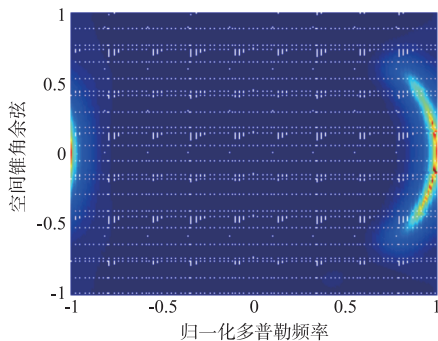


图2 无距离模糊135km处杂波功率谱

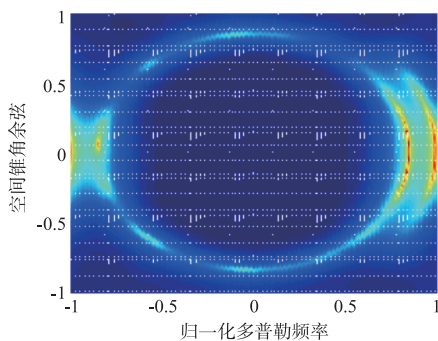


图3 存在距离模糊135km处真实杂波功率谱

由于距离模糊的存在,与当前距离处于同一距离单元的远程非平稳杂波将会叠加进来,使得杂波谱进一步复杂化,杂波频谱范围变宽,如图 2 和图 3. 由于后向近程俯仰副瓣的存在,端射阵机载雷达的近程杂波轨迹为一个整圆,而远程副瓣较低,杂波轨迹为一段圆

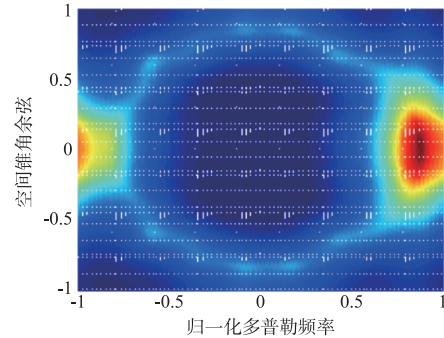


图4 存在距离模糊135km处估计杂波功率谱

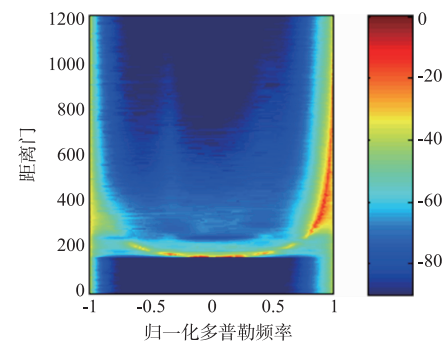


图5 存在距离模糊时的杂波距离-多普勒谱

弧,杂波功率则主要集中分布在主瓣区,如图 3 和图 5. 由于近程杂波距离依赖性的存在,使得用于估计杂波协方差矩阵的训练样本的杂波谱都随着距离变化而变化,导致估计形成的杂波谱在空时二维谱上严重展宽,与真实杂波谱存在较大差距,如图 3 和图 4,这将使得传统 STAP 技术的杂波抑制性能大幅下降。

由图 5 可知,在第 160~800 个距离门,也就是在近程 8~40km 范围内杂波谱中心频率随距离变化明显,而超过第 800 个距离门后杂波谱中心频率趋于稳定. 因此模糊后距离超过 40km(即 5 倍载机高度)的杂波我们可以将其近似视为平稳杂波. 为了方便下文描述,我们把最大不模糊距离所在的距离单元(图 5 中的第 1200 个距离门)称为最远可检测距离单元。

3 端射阵距离模糊杂波谱补偿新方法

3.1 基本原理

3.1.1 训练单元补偿

对于某个待检测距离单元,通过最大似然估计可得其对应的杂波协方差矩阵

$$\mathbf{R} = \left(\sum_{l=1}^L \mathbf{X}_l \mathbf{X}_l^H \right) / L \quad (6)$$

其中 L 为训练单元数, \mathbf{X}_l 为第 $l(l=1,2,\dots,L)$ 个参与训练的单元对应的杂波回波数据. 由于距离模糊的存在, \mathbf{X}_l 中既包含着远程平稳杂波数据,同时也包含着模糊进来的近程非平稳杂波数据,因此杂波回波数据 \mathbf{X}_l 之间

不满足独立同分布条件,通过式(6)估计出来的杂波协方差若直接用于自适应处理则会获得宽且浅的杂波凹口,达不到抑制杂波的目的。

由于远程距离门各模糊杂波脊叠加在一起,可近似看成平稳杂波,因此可选用最远可检测距离门作为参考距离门,并通过变换矩阵 \mathbf{T} 使得变换后每个训练单元的杂波特性都能跟最远可检测距离单元的统计特性趋于一致,实现对近程模糊杂波的补偿. 假设最远可检测距离门对应的杂波协方差矩阵为 \mathbf{R}_{\max} , 由于最远可检测距离门处于远程平稳杂波区,因而 \mathbf{R}_{\max} 可直接通过最大似然估计得到. 则变换矩阵可通过下式求得

$$\min_{\mathbf{T}} \|\mathbf{T}^H \mathbf{R} \mathbf{T} - \mathbf{R}_{\max}\|_2 \quad (7)$$

由于 \mathbf{R}_{\max} 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(7)在对近程杂波向远程杂波进行配准的同时,亦不会改变远程杂波的空时分布. 由文献[14]可知,式(7)的优化问题可以转化为

$$\min_{\mathbf{T}} \|\mathbf{T}^H \mathbf{V} \mathbf{A}^{1/2} - \mathbf{V}_{\max} \mathbf{A}_{\max}^{1/2}\|_2 \quad (8)$$

其中 \mathbf{V} 和 \mathbf{A} 为 \mathbf{R} 特征分解得到的特征矢量矩阵和特征值矩阵; \mathbf{V}_{\max} 和 \mathbf{A}_{\max} 为 \mathbf{R}_{\max} 特征分解得到的特征矢量矩阵和特征值矩阵,为了保证 \mathbf{A} 可逆,需对其进行对角加载.

求解式(8)可得

$$\mathbf{T} = \mathbf{V} \mathbf{A}^{-1/2} \mathbf{A}_{\max}^{1/2} \mathbf{V}_{\max}^H \quad (9)$$

将求解得到的 \mathbf{T} 作用于除待检测距离单元之外的所有参与估计其协方差矩阵的训练距离单元回波数据,可以保证训练距离单元和参考距离单元杂波数据统计特性趋于一致,实现对训练单元杂波数据距离依赖性的补偿. 补偿后的训练单元数据为

$$\mathbf{Y}_l = \mathbf{T}^H \mathbf{X}_l \quad (10)$$

3.1.2 待检测单元补偿

由于待检测距离单元的雷达回波数据中可能包含运动目标,若直接使用 3.1.1 节所求变换矩阵进行杂波谱补偿,会使得目标数据产生搬移或者相消. 因此在求解对待检测距离单元进行补偿变换的矩阵 \mathbf{T}' 时需添加对运动目标信息保护的约束,使得在补偿待检测距离单元杂波距离依赖性的同时,对运动目标信息进行保护.

由于运动目标检测主要关心的是主波束内是否存在运动目标,因此运动目标空域指向可用主波束指向 (θ_0, φ_0) 表示;由于运动目标的多普勒信息无法获取,为避免将主杂波当成目标,可在待检测距离单元杂波脊之外的多普勒域上取 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

$$\mathbf{V}_T = [\hat{\mathbf{S}}_1^H \quad \hat{\mathbf{S}}_2^H \quad \cdots \quad \hat{\mathbf{S}}_P^H] \quad (11)$$

其中 $\hat{\mathbf{S}}_m (m=1, 2, \dots, P)$ 为第 m 个目标约束取样点对应的空时导向矢量,且

$$\hat{\mathbf{S}}_m = (1, e^{j\omega_{dm}}, \dots, e^{j(K-1)\omega_{dm}}) \otimes (1, e^{j\omega_{d0}}, \dots, e^{j(N-1)\omega_{d0}}) \quad (12)$$

式中 ω_{d0} 为目标方向 (θ_0, φ_0) 的归一化空域角频率, ω_{dm} 是第 m 个目标约束点所对应的归一化多普勒频率.

则综合考虑待检测单元的依赖性补偿和目标约束,可构造以下目标函数求解 \mathbf{T}'

$$\begin{cases} \min_{\mathbf{T}'} \|\mathbf{T}'^H \mathbf{V} \mathbf{A}^{1/2} - \mathbf{V}_{\max} \mathbf{A}_{\max}^{1/2}\|_2 \\ \text{s. t. } \mathbf{T}'^H \mathbf{V}_T = \mathbf{V}_T \end{cases} \quad (13)$$

式(13)是一个优化问题,具体求解过程及结果见文献[8].

通过式(13)求解的变换矩阵 \mathbf{T}' 在对距离模糊的某待检测杂波数据 \mathbf{X}_0 进行距离依赖性补偿的同时,还可对主波束内的运动目标信息进行保护.

则补偿后的待检测单元数据和估计得到的杂波协方差矩阵分别为

$$\mathbf{Y}_0 = \mathbf{T}'^H \mathbf{X}_0 \quad (14)$$

$$\tilde{\mathbf{R}} = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \mathbf{Y}_l \mathbf{Y}_l^H \quad (15)$$

使用式(15)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,整个处理过程如图 6. 通过本文方法处理后,杂波回波的距离依赖性能得到有效的抑制,并且包含在杂波中的运动目标信息能够得到有效保护.

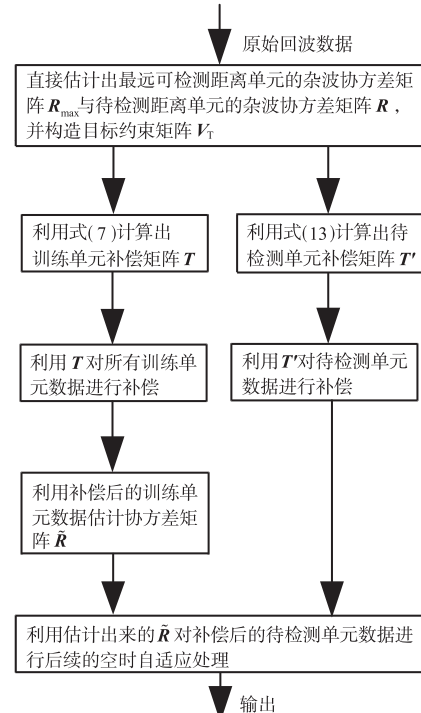


图6 本文方法处理流程图

3.2 杂波补偿机理分析

与基于 RBC 原理的补偿方法不同的是,针对某一个待检测距离单元,本文方法只需一个变换矩阵 \mathbf{T} 便可实现对所有训练单元的补偿,而式(7)只能说明补偿

后通过估计得到的杂波协方差矩阵 $\tilde{\mathbf{R}}$ 的统计特性趋于 \mathbf{R}_{\max} , 其具体的实现机理以及对于每个训练单元补偿后的统计特性并未做出合理说明. 为了进一步揭示其补偿机理, 验证本文方法的合理性, 做如下推证.

假设第 1 个训练距离门杂波回波数据 \mathbf{X}_1 所形成的杂波协方差矩阵为 \mathbf{R}_1 , 利用式(9)可得

$$\mathbf{TR}_1\mathbf{T}^H = (\mathbf{V}_{\max}\mathbf{A}_{\max}^{1/2}\mathbf{A}^{-1/2}\mathbf{V}^H)\mathbf{R}_1(\mathbf{V}\mathbf{A}^{-1/2}\mathbf{A}_{\max}^{1/2}\mathbf{V}_{\max}^H) \quad (16)$$

由于 \mathbf{R}_1 由单一距离门数据形成, 则其秩为 1, 且

$$\mathbf{R}_1 = \lambda_1 \mathbf{u}_1 \mathbf{u}_1^H \quad (17)$$

其中 λ_1 为 \mathbf{R}_1 的大特征值, \mathbf{u}_1 则为 λ_1 对应的特征基矢量. 由于 \mathbf{R} 由不同 \mathbf{R}_i 求平均得到, \mathbf{V} 和 \mathbf{A} 为 \mathbf{R} 特征分解得到的特征矢量矩阵和特征值矩阵, 则

$$\mathbf{V} = [\mathbf{u}_1 \quad \mathbf{u}_2 \quad \cdots \quad \mathbf{u}_{NK}] \quad (18)$$

$$\mathbf{A}^{-1/2} = \text{diag}[1/\sqrt{\lambda_1} \quad 1/\sqrt{\lambda_2} \quad \cdots \quad 1/\sqrt{\lambda_{NK}}] \quad (19)$$

其中 $\lambda_n, \mathbf{u}_n (n=1, 2, \dots, NK)$ 分别为 \mathbf{R} 的各特征值和对应的特征矢量. 同理,

$$\mathbf{V}_{\max} = [\mathbf{v}_1 \quad \mathbf{v}_2 \quad \cdots \quad \mathbf{v}_{NK}] \quad (20)$$

$$\mathbf{A}_{\max}^{1/2} = \text{diag}[\sqrt{\beta_1} \quad \sqrt{\beta_2} \quad \cdots \quad \sqrt{\beta_{NK}}] \quad (21)$$

其中 $\beta_n, \mathbf{v}_n (n=1, 2, \dots, NK)$ 分别为 \mathbf{R}_{\max} 的各特征值和对应的特征矢量.

将式(17)~(21)代入式(16), 由于不同特征基矢量之间相互正交, 则化简可得

$$\mathbf{TR}_1\mathbf{T}^H = \beta_1 \mathbf{v}_1 \mathbf{v}_1^H = \tilde{\mathbf{R}}_1 \quad (22)$$

其中 $\tilde{\mathbf{R}}_1$ 为用于估计最远可检测距离单元的协方差矩阵 \mathbf{R}_{\max} 的第 1 个训练样本数据 $\tilde{\mathbf{X}}_1$ 所形成的协方差矩阵. 同理可证

$$\mathbf{TR}_i\mathbf{T}^H = \tilde{\mathbf{R}}_i \quad (23)$$

亦即

$$\mathbf{TX}_i = \tilde{\mathbf{X}}_i \quad (24)$$

式(24)说明, 同一个变换矩阵 \mathbf{T} 通过作用在不同训练单元数据 \mathbf{X}_i 上, 使得每个训练单元数据的统计特性都趋于远程相对应的距离门的平稳杂波数据 $\tilde{\mathbf{X}}_i$, 从而实现了对杂波非平稳性的补偿.

3.3 目标约束失配情况下的扩展补偿方法

在实际工程应用中, 运动目标可能并非严格位于约束波束(主波束指向)处, 即存在目标约束失配. 此时, 目标信息不能完全被约束, 空时自适应权值中的预设导向矢量也与目标真实导向矢量不匹配, 目标能量无法被有效积累, 这将导致信杂噪比(Signal to Clutter Noise Ratio, SCNR)损失. 为了解决上述问题, 本节对 3.1 节所提方法进行进一步扩展, 其基本思想是除了在空域主波束处 (θ_0, φ_0) 形成目标约束波束外, 还在主波束左右各形成 G 个相邻辅助虚拟约束波束, $2G+1$ 个波束共同完成对主

波束 3dB 宽度的覆盖, 可克服因目标约束失配而引起的 SCNR 损失问题. 其目标约束采样点选取示意图如图 7, 扩展补偿方法原理结构示意图如图 8.

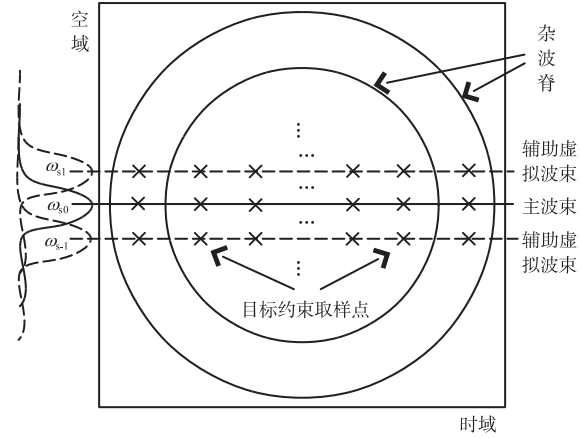


图7 目标约束点选取示意图

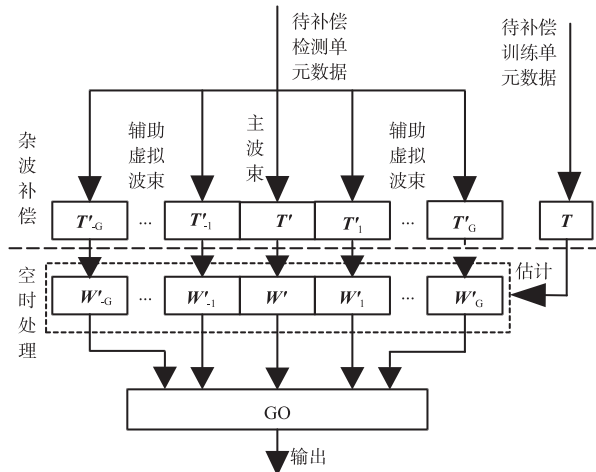


图8 扩展补偿方法结构示意图

3.4 与基于 RBC 原理方法的比较

综上所述, 与基于 RBC 原理的杂波补偿方法相比, 本文方法具有以下优点:

(1) 基于 RBC 原理的方法需要载机系统的飞行参数与位置信息等作为先验知识来重构杂波的协方差矩阵, 而本文方法无矩阵重构过程, 因而不需要飞行参数与位置信息等作为先验知识, 鲁棒性好.

(2) 针对某一个待检测距离单元, 基于 RBC 原理的方法选取最远训练单元作为参考单元, 而当最远训练单元同样处于非平稳杂波区时, 补偿效果会受到影响; 本文方法以最远可检测距离单元作为参考单元, 对于通常工作于中重复频率的机载预警雷达而言, 最远可检测距离单元处的杂波一般处于平稳区, 可克服这一缺点.

(3) 针对某一个待检测距离单元, 基于 RBC 原理的方法对于每一个训练单元均需计算出一个补偿矩阵 \mathbf{T}_i 使得训练单元杂波统计特性趋近于参考单元; 而本文

方法对于所有的训练单元都用同一个变换矩阵 T 进行变换,显著降低了计算量。

(4)基于 RBC 原理的方法在进行杂波补偿的同时会引起包含在待检测单元数据中的目标信息产生搬移或相消.文献[11]虽考虑了目标约束问题,但由于目标只可能存在于待检测单元,其对每个训练单元的补偿矩阵中都增加了目标保护约束,不仅大大增加了计算量,而且还可能使得训练单元中的干扰成分被保留下来影响后续的目标检测;而本文方法仅仅在对待检测距离单元进行补偿时添加了目标约束条件,可在补偿杂波的同时保证目标的空时分布不发生改变。

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.补偿效果仿真中目标归一化空间频率为 0,归一化多普勒频率为 0.6;杂波抑制性能仿真中除协方差矩阵已知情况采用全维空时处理,其余均采用 3DT 方法.其它仿真参数见表 1.同时为了方便比较,本节也给出了基于 RBC 原理的补偿方法的仿真结果。

4.1 杂波补偿效果

图 9~11 给出了 135km 处未经过补偿以及分别经过 RBC 方法和本文方法补偿后的杂波功率谱.由图 9 可以看出,未经补偿的杂波功率谱展宽严重,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 10 可以看出,经过基于 RBC 原理的方法补偿后,杂波功率谱均明显变窄,谱重合度大大改善,但副瓣电平相对于理想情况(见图 2)大大抬高且目标消失不见,仍然无法实现对目标的检测.由图 11 可以看出,经本文方法补偿后杂波谱基本与理想情况一致,且保留了目标信息,有利于后续的目标检测。

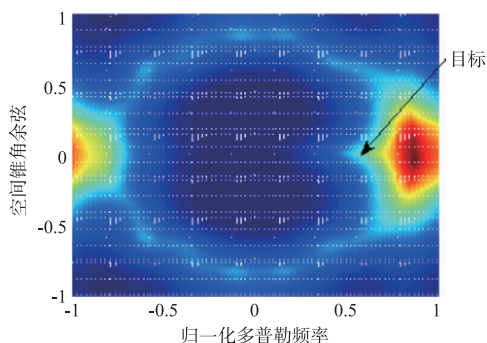


图9 补偿前包含目标的杂波功率谱

4.2 杂波抑制性能

4.2.1 理想情况

图 12 给出了理想情况下距离模糊杂波 SCNR 损失

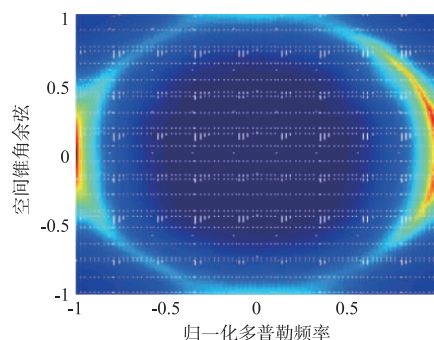


图10 RBC方法补偿后功率谱

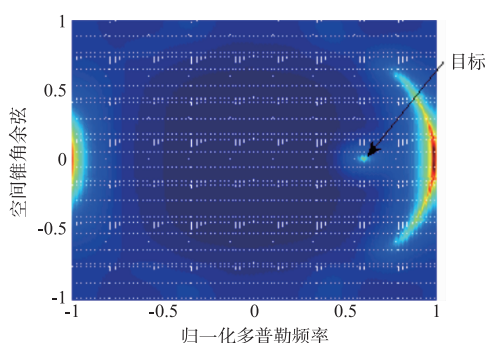


图11 本文方法补偿后功率谱

比较图(由于基于 RBC 原理的补偿方法会引起目标相消或搬移,故不再给出仿真结果).由图 12 可知,在理想情况下,经本文方法补偿后的杂波凹口变窄,杂波抑制性能相对于直接采样矩阵求逆处理(Sample Matrix Inverse, SMI)而言尤其在主瓣区有着显著的改善效果。

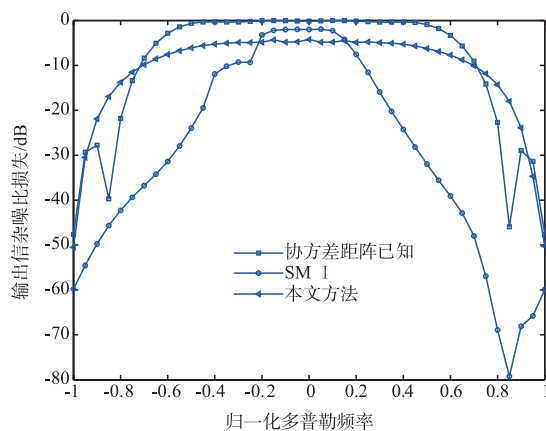


图12 理想情况下信杂噪比损失比较

4.2.2 存在误差情况

为了进一步研究分析本文方法对于误差的敏感程度,图 13 给出了存在各种误差下信杂噪比损失比较图.由图 13 可以看出,在存在各种误差情况下,本文方法依然保持着与协方差矩阵已知情况相差不大的杂波抑制性能,尤其是在存在阵元误差和通道误差情况下,杂波抑制性能几乎与理想情况一致,鲁棒性较好。

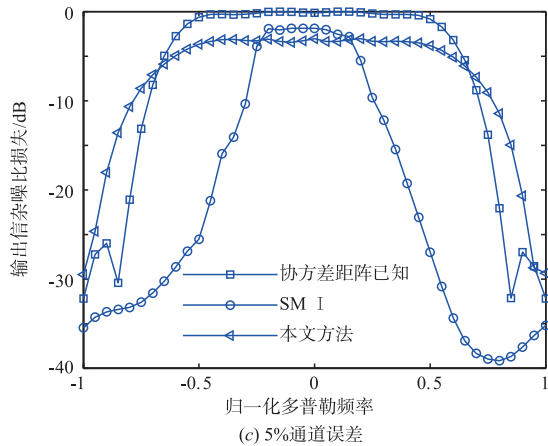
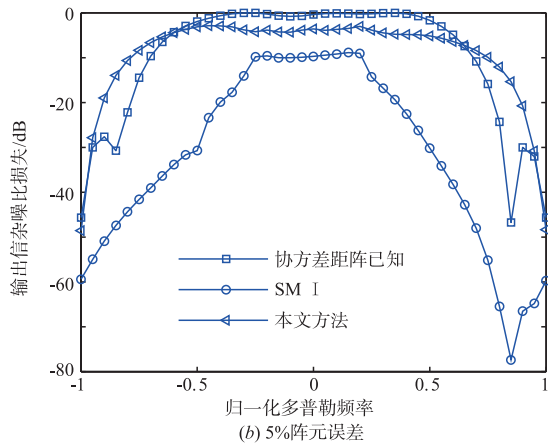
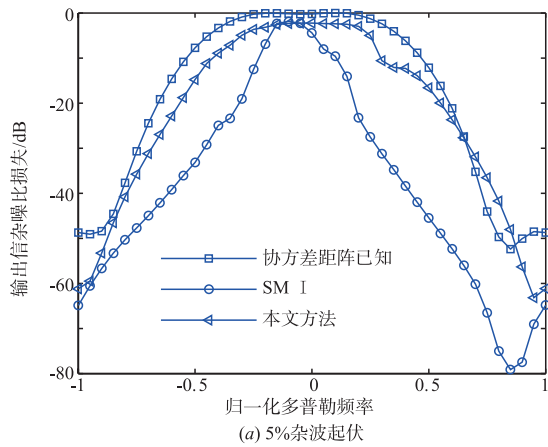


图13 存在误差情况下信噪比损失比较

4.2.3 目标约束失配情况

图 14 给出了经过本文方法补偿并经过空时自适应处理后的目标所在多普勒通道输出功率图. 仿真中假设目标回波位于第 64 个距离门, 失配时目标偏离主波束指向 0.2° . 从图中可以看出当目标与约束波束失配时, 输出的目标信号功率比匹配情况下要损失大约 15dB, 这将严重影响后续对目标的有效检测. 而经过 2.3 节扩展方法的改善后, 可将失配后的目标信号损失控制在 3 到 4dB 左右, 大大提高了目标约束的稳定性.

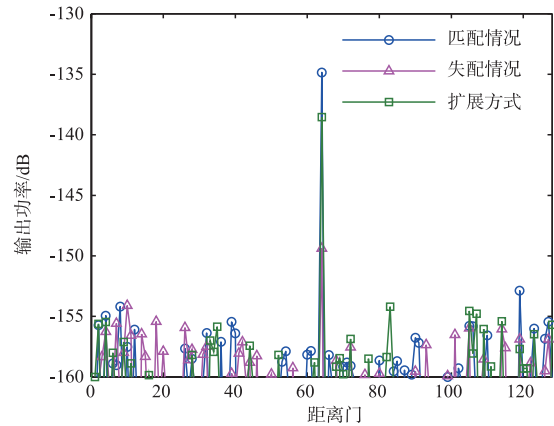


图14 失配情况输出功率比较

5 结论

本文基于端射阵机载雷达杂波的杂波谱特性, 针对基于 RBC 原理的补偿方法存在的目标相消、计算量大的问题, 提出了一种距离模糊下端射阵近程非平稳杂波补偿方法. 该方法以最远可检测距离单元为参考单元, 并在对待检测单元补偿过程中增加了目标约束保护条件. 同时, 针对实际工程中可能存在的目标约束失配问题提出了基于虚拟波束的扩展补偿方法. 所提方法在实现目标有效检测的同时显著降低了计算量. 然而该方法在主杂波区存在一定的性能损失, 并且当模糊杂波脊位置估计不准时易将杂波当成目标保留下来从而导致虚警, 这是本文方法的主要局限性, 需要在下一步工作中进行进一步的研究.

参考文献

- [1] 刘喜玲. 机载端射阵列天线的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015.
LIU X L. Research of Airborne End-Fire Antenna Array [D]. Xi'an: Xidian University, 2015. (in Chinese)
- [2] 谢文冲, 王永良. 基于 CMT 技术的非正侧面阵机载雷达杂波抑制方法研究[J]. 电子学报, 2007, 35(3): 441-444.
XIE W C, WANG Y L. Study on clutter suppression approach to airborne phased radar with non-sidelooking arrays based on CMT[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(3): 44-444. (in Chinese)
- [3] 高飞, 谢文冲, 王永良. 非均匀杂波环境 3D-STAP 方法研究[J]. 电子学报, 2009, 37(4): 868-872.
GAO F, XIE W C, WANG Y L. Research on 3D-STAP methods in non-stationary clutter[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(4): 868-872. (in Chinese)
- [4] 段克清, 谢文冲, 陈辉, 等. 基于俯仰维信息的机载雷达非均匀杂波抑制方法[J]. 电子学报, 2011, 39(3): 585

- 590.
DUAN K Q, XIE W C, CHEN H, et al. Elevation based methods for nonhomogeneous clutter suppression in airborne radar[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(3): 585 - 590. (in Chinese)
- [5] BORSARI G K. Mitigating effects on STAP processing caused by an inclined array[A]. Proceeding. of IEEE Radar Conference[C]. Dallas; IEEE, 1998. 135 - 140.
- [6] HIMED B, ZHANG Y H, HAJJARI A. STAP with angle-Doppler compensation for bistatic airborne radar[A]. Proceeding of IEEE Radar Conference [C]. Long Beach; IEEE, 2002. 311 - 317.
- [7] JAFFER A, Ho P T. Adaptive angle-Doppler compensation techniques for bistatic STAP radars [R]. OH, USA: AFRL, 2005.
- [8] LAPIERRE F D, VERLY J G. Registration-based solutions to the range-dependence problem in radar STAP[A]. Proceeding of the 11th Adaptive Sensor Array Processing Workshop[C]. Lexington; IEEE, 2003. 1 - 6.
- [9] VARADARAJAN V, 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.
- [10] 刘锦辉, 廖桂生, 李明. 距离模糊的机载非正侧面阵雷达杂波谱补偿新方法[J]. 电子学报, 2011, 39(9): 2060 - 2066.
- LIU J H, LIAO G S, LI M. A clutter spectrum compensation method for non-sidelooking airborne radar with range ambiguity[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(9): 2060 - 2066. (in Chinese)
- [11] 刘锦辉, 廖桂生, 李明. 对运动目标约束的机载前视阵雷达杂波谱补偿方法[J]. 电波科学学报, 2011, 26(5): 910 - 916.
- LIU J H, LIAO G S, LI M. Moving target constraint clutter compensation method for forward-looking airborne radar[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2011, 26(5): 910 - 916. (in Chinese)
- [12] 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.
- WANG Y L, PENG Y N. Space-time adaptive processing [M]. Beijing; Tsinghua University Press, 2000. (in Chinese)
- [13] YAO G W, XUE Z H, LIU Z K, et al. Design of high-directivity end-fire antenna array[A]. Proceeding. of International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology[C]. Nanjing; IEEE, 2008. 424 - 427.
- [14] LAPIERRE F D, VERLY J G. 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



李永伟 男, 1994 年出生于湖南耒阳. 2017 年获空军预警学院雷达工程专业工学学士学位. 现为空军预警学院信息与通信工程专业在读硕士研究生, 主要研究方向为空时自适应处理、机载雷达信号处理.
E-mail: liywei09@foxmail.com



谢文冲 男, 1978 年出生于山西运城. 2006 年获国防科技大学信息与通信工程专业工学博士学位, 现为空军预警学院雷达兵器运用工程军队重点实验室副教授、硕士研究生导师. 主要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.
E-mail: xwe1978@aliyun.com