

一种基于空时内插的双基地机载雷达杂波抑制方法

彭晓瑞 谢文冲 王永良

(空军雷达学院雷达兵器与运用工程军队重点实验室 武汉 430019)

摘要: 杂波非均匀是双基地机载雷达杂波抑制面临的一大难题, 直接制约着常规 STAP 方法的杂波抑制性能。该文提出了一种改进的联合空时内插方法(ImSTINT)。相对于传统的联合空时内插方法, ImSTINT 方法映射变换后的子空间杂波自由度更小, 因此能够彻底消除非均匀杂波对双基地机载雷达杂波抑制性能的影响。此外, 该方法具有更快的收敛速度和更好的主杂波抑制性能。

关键词: 双基地雷达; 杂波非均匀; 联合空时内插; 子空间杂波自由度

中图分类号: TN959.73

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)07-1697-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00975

Improved Joint Space-Time Interpolation Technique for Bistatic Airborne Radar

Peng Xiao-rui Xie Wen-chong Wang Yong-liang

(Key Research Lab, Wuhan Radar Academy, Wuhan 430019, China)

Abstract: One of the tough task that airborne bistatic radar faced is the extensive existing non-stationary of bistatic clutter which will degrades the performance of STAP remarkably. A novel bistatic modified technique named Improved joint Space-Time INterpolation Technique (ImSTINT) is introduced in this paper. Compared with traditional space-time interpolation techniques, ImSTINT minimizes the degrees of freedom of subspace clutter after transformation to the utter most, and thus eliminates the influence of non-stationary of clutter on clutter suppression in airborne bistatic radar system. Furthermore, ImSTINT has faster convergence rate and better suppression performance against mainlobe clutter.

Key words: Bistatic radar; Non-stationary of clutter; Joint Space-Time INterpolation Technique (STINT); Degrees of freedom of subspace clutter

1 引言

与单基地机载雷达相比, 双基地机载雷达采用收发系统分置, 具有优良的四抗性能(抗隐身技术, 抗高空超低空突防, 抗反辐射导弹, 抗综合电子干扰), 受到了广泛的重视。但是双基地机载雷达所面临的实际杂波环境往往是非均匀的, 主要与双基地机载雷达的配置方式、天线放置形式、天线阵列形式以及载机的偏航与横滚等因素有关, 因此杂波非均匀(现象)是双基地机载雷达所固有的^[1]。传统 STAP 方法在杂波抑制过程中需要利用与待检测距离单元相邻的满足独立同分布(I.I.D)条件的训练样本估计杂波协方差矩阵^[2]。对于双基地机载雷达, 杂波非均匀使得不同距离单元间的训练样本不再满足 I.I.D 条件, 从而导致所估计的杂波协方差矩阵有偏,

致使传统 STAP 方法的杂波抑制性能严重下降。

目前关于双基地机载雷达 STAP 杂波抑制方法, 主要可以分为两类: 补偿类和内插变换类。补偿类 STAP 方法以待检测距离单元样本为参考, 通过多普勒域或波束域对训练样本进行补偿, 消除杂波非均匀现象。典型的补偿类 STAP 方法包括: 多普勒频移补偿法(DW); 角度-多普勒频移补偿法(ADC); 自适应角度-多普勒补偿法(A²DC); 高阶多普勒频移补偿法(HODW); 功率谱谱配准法^[3]。补偿类 STAP 方法固有缺点是当双基地机载雷达平台惯导系统提供的系统运动参数或通过估计得到的系统运动参数存在误差时, 补偿精度严重下降。内插变换类 STAP 方法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, 以消除杂波非均匀。典型的内插变换类 STAP 方法包括: 最小方差内插方法(MVDR)与联合空时内插方法(STINT)。内插变换类 STAP 方法对所有距离单元的样本数据进行变换, 其杂波抑制性能与系统参数的精度无关, 将从根本上解决双基地机载雷达的杂波非均匀问题。

2009-07-07 收到, 2010-01-11 改回

国家杰出青年基金(62925005)和国家自然科学基金重点项目(6073009)资助课题

通信作者: 彭晓瑞 ringregreen@sina.com

本文从内插变换类 STAP 方法的研究角度出发,提出一种改进联合空时内插方法(ImSTINT)。与现有的内插变换类方法相比,ImSTINT 方法具有更好的杂波抑制性能和更快的收敛速度。

2 机载双基地雷达杂波建模

假设一双基地预警雷达系统如图 1 所示。令 L (双基地基线)为接收机与发射机之间的斜距,使 L 的投影 D 始终处于 Y 轴上, R_{Sr}, R_{St} 分别为接收发射载机与杂波点之间的斜距; V_r, V_t 分别为接收与发射载机飞行速度; H_r, H_t 分别为接收和发射载机高度; θ_{ar}, θ_{at} 分别为接收与发射载机航向与 X 轴正向之间的夹角; θ_{rp}, θ_{tp} 分别为接收与发射天线偏航角; φ_r, φ_t 分别为接收与发射波束下视角; θ_r, θ_t 分别为接收与发射波束方位角。 γ 为双基地角(接收斜距与发射斜距之间的夹角)。假设发射机的脉冲重复频率为 f_r ; 工作波长为 λ ; 一个相干处理时间内发射 M 个脉冲; 接收载机和发射载机天线均采用阵元数为 N 的均匀线阵, 阵元间距分别为 d_r, d_t 。

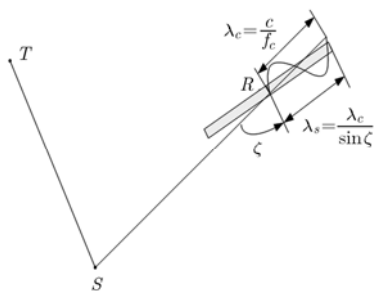


图 1 机载双基地雷达杂波回波空域频率

如图 1 可得, 机载双基地雷达固定地物回波的空域频率为

$$f_s = 1/\lambda_s = \sin \varsigma / \lambda_c \quad (1)$$

其中 ς 是接收天线与波前方向之间的夹角。

如图 2 可得, 机载双基地雷达固定地物回波多普勒频移为

$$f_d = \frac{1}{\lambda f_r} [V_r \cos(\theta_r + \theta_{rp}) \cos \varphi_r + V_t \cos(\theta_t + \theta_{at}) \cos \varphi_t] \quad (2)$$

其中各参数由下列方程组确定:

$$\theta_r = \begin{cases} \frac{\pi}{2} - \arccos \left[\frac{D^2 + R_{Gr}^2 - (R_{St}^2 - H_t^2)}{2DR_{Gr}} \right] \\ -\theta_{at} - \theta_{rp}, \theta_t - \theta_{tp} - \theta_{at} \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \right) \\ \arccos \left[\frac{D^2 + R_{Gr}^2 - (R_{St}^2 - H_t^2)}{2DR_{Gr}} \right] \\ -\theta_{at} - \theta_{rp}, \theta_t - \theta_{tp} - \theta_{at} \in \left(\frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2} \right) \end{cases} \quad (3)$$

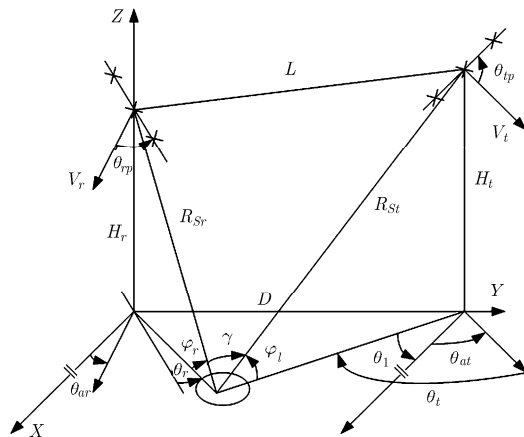


图 2 机载双基地雷达几何配置

通过以上方程, 就建立了多种体制下任意几何配置、载机任意飞行方向、天线任意安置条件下机载双基地雷达地杂波数学模型。显然, 配置方式难以计数, 为了分析的方便, 本文选择图 3(a)和图 4(a)所示两种典型配置进行仿真, 其中‘ T ’, ‘ R ’分别代表发射载机与接收载机, 箭头方向代表载机运动方向, 两种配置方式下发射机和接收机均平行飞行, 不同的是配置方式 1 发射机和接收机同向飞行, 配置 2 则是异向飞行。图 3 与图 4 同时给出了两种典型双基地机载雷达的配置方式下双基地机载雷达的等接收锥角线、等多普勒线和杂波功率谱的空时分布, 白色线条代表等接收锥角线, 背景灰度轮廓线代表地面等多普勒线, 不同的灰度代表不同的等多普勒频率。从图中可以发现, 在双基地机载雷达的以上两种典型配置方式下, 由于等接收锥角线与地面等多普勒线无法重合, 导致了杂波回波的空域角频率与时域角频率不满足线性关系, 因而杂波谱在空时 2 维平面上呈非线性分布。在大多数配置方式下, 双基地机载雷达的杂波自由度会远远大于单基地机载雷达的杂波自由度。

3 双基地杂波的距离非均匀现象

由空域频率的式(1)和时域频率的式(2)可见, 二者与距离均有关系。下面我们在 4 维空间观察杂波非均匀现象。图 5(a)和图 5(b)分别给出了配置方式 1 和配置方式 2 的双基地机载雷达杂波 4 维方位-多普勒(4D DD)曲线^[4]。图中, $V_z = \sin \varphi_r$, $V_d = f_d / f_r$, $V_x = \cos \varphi_r \cos(\theta_r + \theta_{ar} + \theta_{rp})$, $V_y = \cos \varphi_r \cdot \sin(\theta_r + \theta_{ar} + \theta_{rp})$ 。不同的灰度值代表不同的距离(单位为 km)。从图中可以发现, 4D DD 曲线随着距离的变化而变化, 呈现出杂波非均匀现象, 具有一种向外“膨胀”的趋势, 在近距离时杂波非均匀现象比远距离时明显; 同时, 在不同的配置方式下,

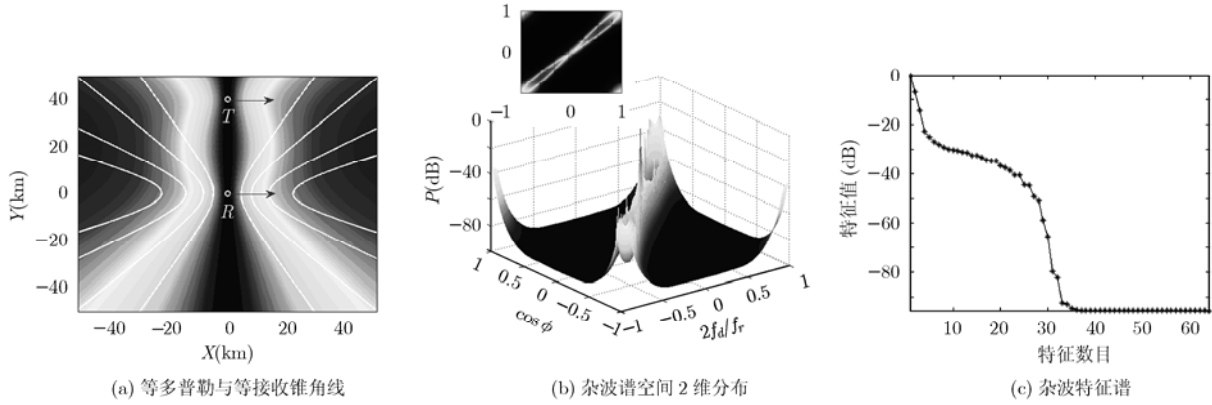


图 3 配置方式 1 杂波等多普勒与等接收锥角线、杂波谱空时 2 维分布和杂波特征谱

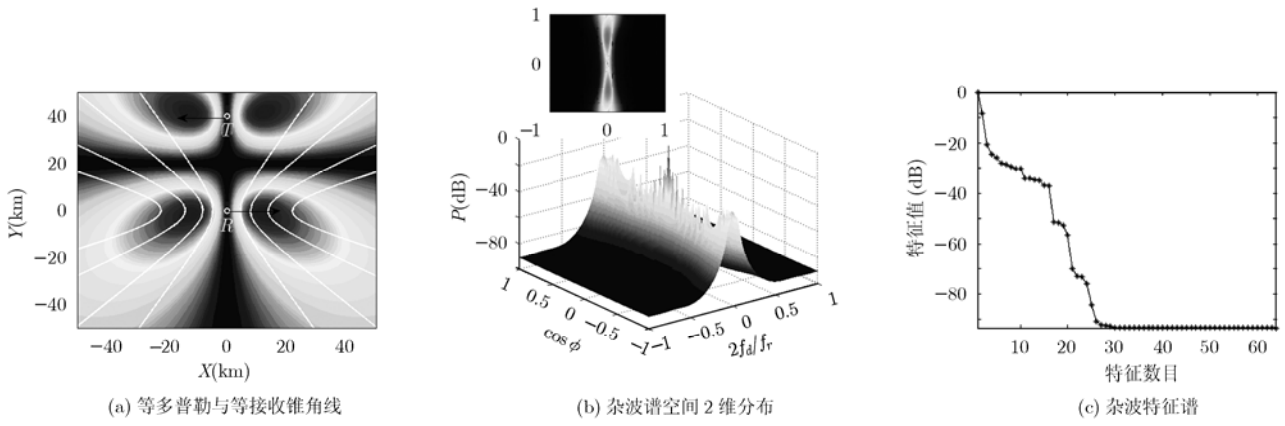


图 4 配置方式 2 杂波等多普勒与等接收锥角线、杂波谱空时 2 维分布和杂波特征谱

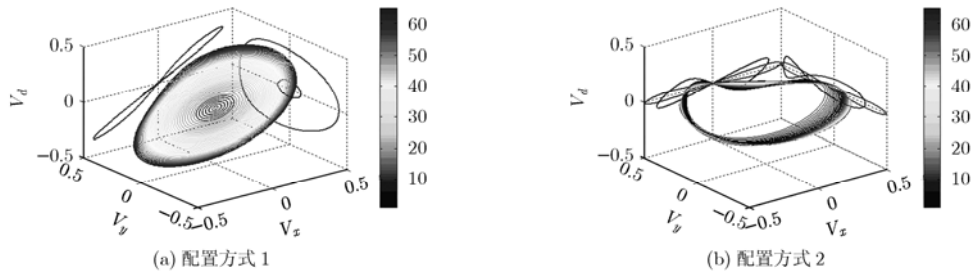


图 5 两种配置方式下 4 维距离-多普勒曲线

4D DD 曲线的分布方式与变化率不同，说明双基地机载雷达杂波移动非均匀的严重程度与不同配置方式关系密切，这一点对方法的鲁棒性提出了更高的要求，要求方法对不同的配置方式产生的杂波非均匀均能够有效地进行补偿。

4 传统内插变换类 STAP 方法

传统内插变换类 STAP 方法主要包括 MVDR 方法与 STINT 方法，下面对以上两种方法的基本原理进行简单介绍。

MVDR 方法^[5]的基本思想是以待检测距离单元对应的杂波子空间为参考，将训练样本通过变换矩

阵 T_{MVDR} 映射到参考杂波子空间中，实现对杂波非均匀的补偿。

MVDR 方法的参考杂波子空间的杂波自由度可由下式估计得到

$$\rho_{MVDR} = 2 \times [(X_{ap}^r + X_{ap}^t) \times B_S + Y_{ap}^t \times B_S + 1] \quad (4)$$

其中 $X_{ap}^r = [(N - 1) + (M - 1)\beta_r]d_r$ ， $X_{ap}^t = (M - 1)\beta_t d_t \times |\cos(\theta_{at} - \theta_{ar} - \theta_{rp})|$ ， $Y_{ap}^t = (M - 1)\beta_t d_t \times |\sin(\theta_{at} - \theta_{ar} - \theta_{rp})|$ ， $B_S = 2 \cos \phi_r / \lambda$ ， $\beta_r = V_r T_r / d_r$ ， $\beta_t = V_t T_t / d_t$ 。

STINT 方法^[6]的基本思想与 MVDR 方法相同。二者存在 3 点区别：(1)STINT 方法的参考杂波子空间为单基地机载雷达正侧面阵情况下的杂波空间，

(2)STINT 方法需要对包含待检测距离单元样本在内的所有样本进行映射变换,而 MVDR 方法仅需要对训练样本进行映射变换;(3)STINT 方法给变换矩阵 $\mathbf{T}_{\text{STINT}}$ 加以约束,使得变换前后待检测距离单元中可能包含的目标信号空间保持不变,而 MVDR 方法不存在此约束。

STINT 方法的参考杂波子空间的杂波自由度可由 Brennan 准则估计得到,即

$$\rho_{\text{STINT}} = [(N-1) + (M-1)\beta_r] \quad (5)$$

5 改进联合空时内插方法(ImSTINT)

通过对传统内插变换类方法的分析可以看到,内插变换类方法的特点是选择合适的杂波子空间作为映射的参考杂波子空间,将双基地机载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。在这里,不妨将这种映射的思想进一步推广,将参考杂波子空间定义为 $\Theta_G = [(\mathbf{1} \otimes \omega_s^1, \mathbf{1} \otimes \omega_s^2, \dots, \mathbf{1} \otimes \omega_s^{N_c})] \in \mathbf{C}^{MN \times N_c}$, 其中 $\mathbf{1} = [1, 1, \dots, 1]^T \in \mathbf{C}^{M \times 1}$, 即将单基地地基雷达的杂波空间作为参考杂波子空间,这样将最大限度地降低参考杂波子空间的杂波自由度。其变换矩阵 $\mathbf{T}_{\text{ImSTINT}}$ 的表达式为

$$\mathbf{T}_{\text{ImSTINT}} = \mathbf{Q}_s \mathbf{Q}_s^H + \mathbf{Q}_c \mathbf{A}^\dagger (\Theta_G^H - \Theta^H \mathbf{Q}_s \mathbf{Q}_s^H) \quad (6)$$

其中 \mathbf{Q}_s 表示目标信号空间, \mathbf{Q}_c 正交于 \mathbf{Q}_s , $\mathbf{A} = \Theta^H \mathbf{Q}_c$ 。本文将所提方法记为 ImSTINT。其推导过程与 STINT 方法类似,本文不再赘述。

由于 ImSTINT 方法的参考杂波子空间为单基地地基雷达的杂波空间,因此杂波不存在空时耦合

性,故映射后的杂波子空间的杂波自由度为

$$\rho_{\text{ImSTINT}} = N \quad (7)$$

现在以配置 1 为例,说明映射前后的杂波谱的空时 2 维分布情况。图 6(a)给出了双基地机载雷达待检测距离单元真实的杂波空时分布。图 6(b)给出了传统 STAP 方法采取距离向样本求平均得到的杂波空时分布,相对于真实的杂波空时分布,其存在明显的“膨胀”现象。原因是因为双基地机载雷达存在杂波非均匀,对应于不同的距离,杂波在空时 2 维平面上的分布不同,距离向上的平均,必然导致杂波区的扩展,压缩清晰区的范围。图 6(c), 6(d) 和 6(e) 分别是 MVDR 方法、STINT 方法和 ImSTINT 方法经过内插变换后得到的杂波空时分布。从图中可以看出, MVDR 方法是将“膨胀”的杂波子空间压缩为被检测单元的杂波子空间; STINT 方法是将“膨胀”的杂波子空间压缩为单基地正侧面阵配置方式下的杂波子空间; ImSTINT 则是将“膨胀”的杂波子空间去除空时“耦合”,以进一步的降低杂波自由度。图 6(f)给出了变换后的自由度比较。其中, Uncompensated 代表由距离向平均得到的估计协方差矩阵。从图 6(f)中可以看出, ImSTINT 变换后具有最小的杂波自由度。从理论上由式(4), 式(5)与式(7)可见,经 ImSTINT 方法变换后的杂波子空间具有比经过 STINT 变换后的杂波子空间更少的自由度。降低变换后杂波协方差矩阵的自由度这一思想,对进一步研究杂波非均匀条件下杂波抑制方法有着重要的指导作用。

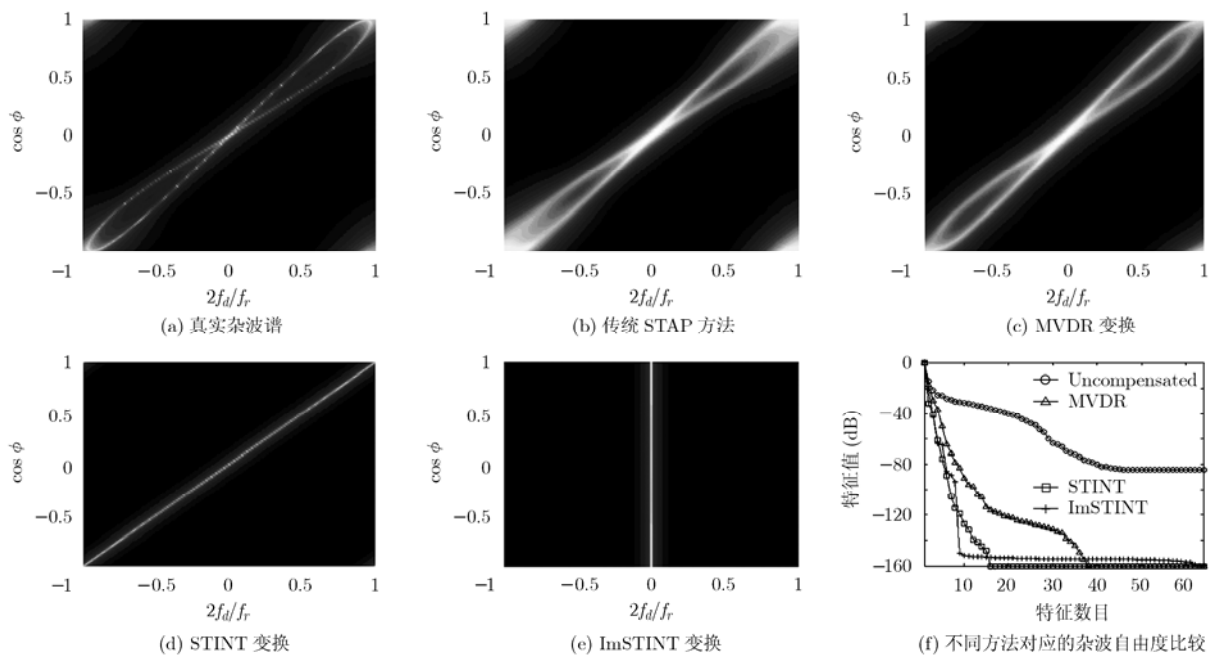


图 6 变换前后的杂波空时 2 维分布和杂波自由度

6 仿真分析

本文第 2 节建立了任意几何配置、载机任意飞行方向, 天线任意安置条件下的机载双基地雷达的杂波模型。在此杂波模型的基础上, 仿真参数选取如下: 雷达脉冲重复频率为 $f_r = 2434.8$ Hz, 工作波长为 $\lambda = 0.23$ m, 距离向分辨力为 150 m, 接收与发射天线均采用 8×8 的正侧面阵, 阵元间距为 $\lambda/2$, 接收天线行与列均采用 chebyshev 权, 分别为 40 dB 和 30 dB, 相干脉冲数为 $M = 8$, 接收机与发射机速度均为 140 m/s, 接收机与发射机高度均为 8 km; 基线长度为 40 km; 杂波反射率满足 Morchin 模型; 杂波类型为海杂波, 海情为 5 级, 海面风速为 10 m/s, 杂波强度为 60 dB; 杂波幅度起伏满足 Weibull 分布, 其分布尺度参数为 1.2, 分布形状参数为 1.8; 杂波相位起伏满足 $[-90^\circ, 90^\circ]$ 上的平均分布; 噪声为加性高斯白噪声。以下仿真均假设发射主波束偏扫方向与发射天线轴向间的夹角为 90° , 同时考虑背板效应。蒙特卡洛仿真次数为 100 次。以下仿真图中, IF 为改善因子(Improvement Factor)。

实验 1 不同内插变换类方法性能比较

图 7 中, Ideal 代表已知双基地机载雷达待检测距离单元真实的杂波空时分布; Uncompensated 表示已知由距离向平均得到的估计协方差矩阵。从仿真图 7 可以看出, 与未补偿的情况相比较, MVDR 方法, STINT 方法与 ImSTINT 方法在主杂波区的性能均有一定程度的改善。ImSTINT 方法由于参考杂波子空间具有更小的杂波自由度, 因而比 STINT 方法和 MVDR 方法具有更好的杂波抑制性能。同时, 随着配置方式的变化, MVDR 方法, STINT 方法与 ImSTINT 方法的性能都有所下降, MVDR 方法与 STINT 方法的性能有 5 dB 左右的下降, ImSTINT 方法的改善性能下降幅度较小, 因此具有更好的稳健性。

实验 2 ImSTINT 方法与典型补偿类方法性能比较

从图 8 中可见, 补偿类方法在主杂波区的性能改善有限而 ImSTINT 方法在两种典型配置方式下较补偿类方法有更好的性能, 具有更小的最小可检测速度(MDV)。图中, 在杂波的幅度起伏满足 Weibull 分布的假设下, 可以看到 DW 方法、ADC 方法与 HODW 方法等补偿类方法的性能较多普勒补偿前几无改善, 甚至在配置方式 1 下 HODW 方法的性能不及未补偿的性能, 说明补偿类方法在复杂双基地几何配置方式下性能较差, 即鲁棒性不强。

实验 3 不同内插变换方法性能与训练样本数

的关系比较

由图 9 可得, 在两种配置方式下, ImSTINT 方法均需要更少的训练样本数以估计杂波协方差矩阵, 更有利于减小杂波非均匀对方法性能的影响, 同时降低运算量, 以便系统的实时处理。在配置方式 1 下, ImSTINT 方法的性能趋于稳定性能时大约需要 15 个样本训练, STINT 方法大约需要 25 个训练样本, 而 MVDR 需要的训练样本数量更多。在训练样本数较少的情况下, ImSTINT 方法的改善因子比其他方法更高; 在配置方式 2 下, 所有方法的性能均有所下降, 趋于稳定性能时所需训练本样本数基本不变。同时可以看到, STINT 在训练样本数不足条件下性能损失较大。

实验 4 内插变换类方法与典型补偿类方法运算量比较如表 1 所示。

注: 本部分以一次复数乘法为一次运算; N_θ 为一个距离环上的采样点数, 本仿真取为 361; 在多普勒补偿类方法中, 运算量按照角度的估计时使用的 MUSIC 方法产生的运算量进行计算; 对于 STINT 方法和 ImSTINT 方法中涉及的 QR 分解, 其运算量按照修正 Gram-Schmith 方法的 QR 分解的运算量进行计算。

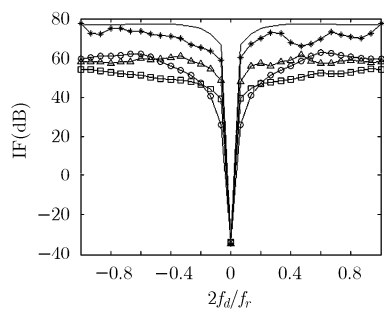
表 1 双基地机载雷达 STAP 方法运算量比较

方法	预处理的运算量	实例运算量
DW	$N^3 + (M+2) \times N^2$	1.84×10^4
多普勒补偿类	ADC $N^3 + M^3 + (M+2) \times N^2 + (N+2) \times M^2$	3.69×10^4
HODW	$[N^3 + M^3 + (M+2) \times N^2 + (N+2) \times M^2] \times N_\theta$	8.32×10^5
MVDR	$(MN)^3 + N_\theta \times (MN)^2$	1.74×10^6
内插变换类	STINT $(NM-1)^3 + (MN)^2 \times (2N_\theta + 1) + (3MN-1) \times N_\theta \times MN$	7.62×10^6
ImSTINT	$(NM-1)^3 + (MN)^2 \times (2N_\theta + 1) + 3(MN-1) \times N_\theta \times MN$	7.62×10^6

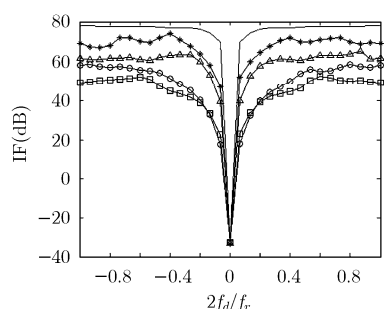
由表 1 可见, 内插变换类方法与多普勒补偿类方法相比较, 其劣势在于巨大的运算量, 与多普勒补偿类方法相比较, 其运算量要高 1, 2 个数量级, 这主要是由于当计算映射变换矩阵, 矩阵的计算涉及到矩阵求逆造成的。但随着硬件技术的发展和新的矩阵求逆方法的实现, 这一点已经渐渐得到解决。

7 结论

本文在机载双基地雷达杂波模型的基础上, 研究了双基地机载雷达的杂波抑制问题。研究表明,



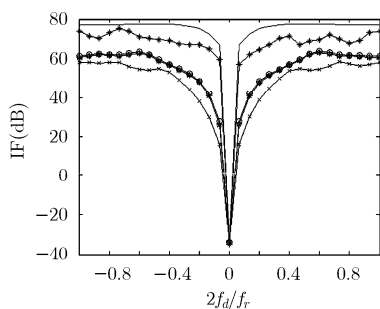
(a) 配置 1



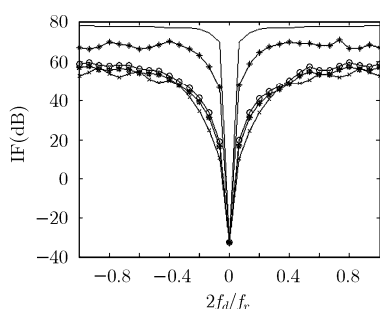
(b) 配置 2

— ideal ▲ STINT
 ○ Uncompensated * ImSTINT
 □ MVDR

图 7 两种典型配置方式下
内插变换类方法的性能曲线



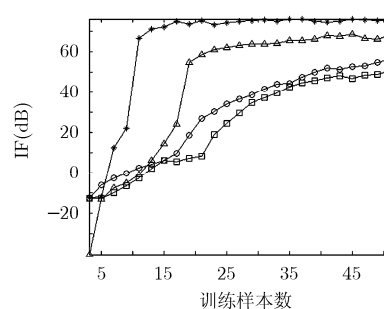
(a) 配置 1



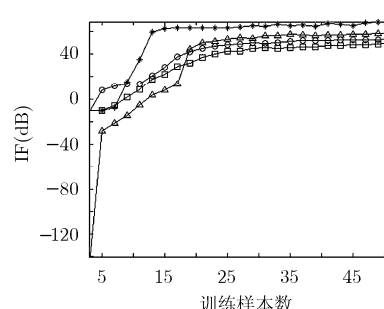
(b) 配置 2

— ideal ▲ STINT
 ○ Uncompensated * ImSTINT
 + DW * ADC
 × HODW

图 8 两种典型配置下
补偿类方法的性能比较



(a) 配置 1



(b) 配置 2

○ Uncompensated ▲ STINT
 □ MVDR * ImSTINT

图 9 两种典型配置下方法
性能与训练样本数的关系比较

双基地机载雷达杂波回波的非均匀性与其配置有很大的关系。本文以降低变换后杂波子空间自由度为指导思想,提出了一种改进联合空时内插方法(ImSTINT),理论推导和仿真证明,该方法相对于传统的内插变换类 STAP 方法,其具有更好的杂波抑制性能和更快的收敛速度,较好地解决了双基地机载雷达的杂波非均匀问题。

参 考 文 献

- [1] 吴洪. 非均匀杂波环境下相控阵机载雷达 STAP 技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.
- [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: 46-49.
- [3] Stoica P, Li J, and Zhu X M, *et al.*. On using priori knowledge in space-time adaptive processing [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2008, 56(6): 2598-2602.
- [4] Neyt X, Lapiere F D, and Verly J G. Fundamentals of spatial and Doppler frequencies in radar STAP [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2008, 44(3): 1118-1134.
- [5] Melvin W L and Davis M E. Adaptive cancellation method for geometry-induced non-stationary bistatic clutter environments [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2007, 43(2): 651-672.
- [6] Varadarajan V and Krolik J L. Joint space-time interpolation for distorted linear and bistatic array geometries [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2006, 56(3): 848-860.

彭晓瑞: 男, 1984 年生, 硕士生, 研究方向为空时自适应信号处理.

谢文冲: 男, 1978 年生, 讲师, 博士, 研究方向为雷达信号处理和空时自适应信号处理.

王永良: 男, 1965 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达信号处理、阵列信号处理和自适应信号处理等.