

基于俯仰维信息的机载雷达非均匀杂波抑制方法

段克清^{1,2}, 谢文冲², 陈 辉², 王永良²

(1. 国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073; 2. 空军雷达学院雷达兵器运用工程军队重点实验室, 湖北武汉 430019)

摘 要: 针对机载雷达天线非正侧放置导致的非均匀杂波抑制问题, 从利用阵面俯仰维信息的角度出发给出了一类解决方法. 本文首先分析了机载雷达阵面非正侧放置情况下待检测距离单元的杂波构成, 得到由俯仰副瓣引入的近程杂波是导致杂波非均匀的关键因素这一结论; 然后给出了利用俯仰自适应波束形成级联两维空时自适应处理(2D STAP)方法来抑制非均匀杂波, 同时从本质上阐述了俯仰-方位-多普勒 3D STAP 方法在非均匀杂波环境下具有良好杂波抑制性能的内在机理. 最后通过仿真验证表明, 利用俯仰维信息类 STAP 方法在非正侧阵导致的非均匀杂波环境下具有良好的杂波抑制性能.

关键词: 机载雷达; 非均匀杂波; 俯仰维信息; 空时自适应处理

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 03-0585-06

Elevation-Based Methods for Nonhomogeneous Clutter Suppression in Airborne Radar

DUAN Ke-qing^{1,2}, XIE Wen-chong², CHEN Hui², WANG Yong-liang²

(1. School of Electronic Science and Engineering, NUDT, Changsha, Hunan 410073, China;

2. Key Research Lab, Air Force Radar Academy, Wuhan, Hubei 430019, China)

Abstract: For suppression of nonhomogeneous clutter which is induced by array's non-side looking placement in airborne radar, this paper presents a class of STAP methods using array elevation information. Firstly, we analyzed the clutter components of the tested range cell for non-side looking array, and put forward the idea that near clutter induced by sidelobe of elevation leads to the clutter range dependence. Then the conclusion is achieved that the elevation information of antennas help to suppress the nonhomogeneous clutter based on above analysis, and a hybrid STAP method for nonhomogeneous clutter suppression is presented. Furthermore, we present the internal mechanism of how 3D STAP effectively solve the range dependent clutter nonhomogeneity problem. Finally, the simulation results illustrate the effectiveness of the elevation-based STAP methods for nonhomogeneous clutter suppression.

Key words: airborne radar; nonhomogeneous clutter; elevation information; space-time adaptive processing

1 引言

机载雷达中, 除正侧放置线(面)阵外, 其它形式的放置阵面均会导致杂波多普勒频率随距离变化而变化, 即杂波距离相关非均匀问题. 在这种情况下, STAP 技术中用于估计杂波协方差矩阵的独立同分布(IID)训练样本数往往无法满足 RMB 准则^[1], 从而导致杂波抑制性能的急剧下降. 目前国内外解决杂波距离相关性非均匀问题主要有两大类方法, 一是通过减少对 IID 训练样本的需求来缓解均匀样本需求量大与可利用均匀样本数少之间的矛盾^[2-4], 这类方法只能在某种程度上缓解非均匀杂波抑制问题, 并不能从根本上去解决; 二是通过多普勒补偿方法将距离相关性非均匀杂波补偿为均匀

杂波^[5-7], 理想情况下, 这类方法可有效解决杂波距离相关性, 但在实际处理中, 由于不可避免的惯导系统误差以及阵元误差、通道误差和速度失配等因素引起的导向矢量失配问题使得该类方法的补偿精度受到影响. 此外, 存在距离模糊情况下该类方法非均匀杂波抑制效果较差.

针对上述两类机载雷达非均匀杂波抑制方法存在的种种问题, 本文从利用俯仰维信息的角度出发研究了机载雷达非均匀杂波抑制问题. 目前, 国内外部分学者从机载雷达距离模糊杂波抑制的角度已经提出了利用阵列俯仰维信息参与 STAP 处理的诸多方法. 例如, Bird 在研究模糊杂波抑制问题时首次将俯仰向系统自由度引入到杂波抑制处理中^[8]来抑制模糊杂波, 之后 Klemm

进一步提出了 3D STAP 方法来抑制模糊杂波^[9], Hale 针对俯仰和 2D STAP 级联处理对模糊杂波的抑制展开了深入研究,但其并未考虑到主波束下视工作时俯仰向形成凹口导致的主波束波形畸变问题^[10,11]. Corbell 首次提出 3D STAP 方法对距离相关性非均匀杂波具有良好的抑制能力,但仅给出了仿真结果,并未揭示其本质原因^[12]. 上述方法都是利用俯仰维空域信息来对付距离模糊杂波为出发点的,并未对俯仰维信息给距离相关非均匀杂波抑制带来的好处进行分析,而 3D STAP 方法对非均匀杂波抑制带来的好处仅被作为一种附带现象给予阐述,并未从本质机理上给出解释. 文献[13]提出了利用阵面俯仰维信息进行空域预滤波实现对距离模糊情况下机载雷达近程杂波抑制的思想. 本课题组在文献[14]中从俯仰维信息对杂波协方差估计影响的角度讨论了 3D STAP 方法在非均匀杂波环境下的优势,初步阐述了 3D STAP 方法的非均匀杂波抑制机理.

本文对 MPRF/HPRF 工作模式下机载雷达待检测距离单元的杂波构成进行了分析,将待检测距离单元内主要杂波分量分为由俯仰副瓣引入的近程杂波、模糊回来的主瓣杂波及方位向副瓣杂波三部分,认为近程杂波分量是导致杂波非均匀的关键因素,并据此给出了一类非均匀杂波环境下 STAP 处理方法. 经仿真验证,该类方法可显著改善机载雷达距离相关性非均匀杂波抑制性能.

2 机载雷达杂波组成分析

如引言所述,目前机载雷达非均匀杂波补偿类方法^[5-7]仅在无距离模糊情况(即 LPRF 模式)下较为有效. 本文在第 3 节中提出的基于阵面俯仰维信息的非均匀杂波抑制方法不存在重复频率的限制. 为了更加清楚地说明本文所提方法的优越性,这里我们以机载预警雷达(AEW)空-空模式(一般工作于 MPRF/HPRF)为例进行阐述.

2.1 杂波数学模型

如图 1 所示,载机沿 X 轴方向以速度 V 匀速运动,天线安放角为 θ_p ,杂波散射体相对于天线轴向方位角为 θ_a ,俯仰角记为 φ ,锥角记为 ψ .

散射体对应的归一化多普勒频率为

$$\begin{aligned} \bar{f}_d &= \frac{2f_d}{f_r} \\ &= \frac{4V}{\lambda f_r} \cos(\theta_a + \theta_p) \cos(\varphi) = \frac{4V}{\lambda f_r} \\ &\quad \cdot (\cos\psi \cos\theta_p - \sin\theta_p \sqrt{\cos^2\varphi - \cos^2\psi}) \end{aligned} \quad (1)$$

其中, λ 为雷达工作波长. 可以看出,在阵面放置为非正侧阵即 $\theta_p \neq 0$ 情况下, \bar{f}_d 与 $\cos\psi$ 的关系随着俯仰角的变化而变化,也就是说杂波方位-多普勒杂波谱随距离

的变化而变化.

考虑到距离模糊,第 l 个待检测距离单元的杂波可表示为

$$\begin{aligned} c_l(n, k) &= \sum_{q=0}^Q \frac{g_n(\varphi_{lq})}{R_{lq}^2} \int_0^\pi F(\theta, \varphi_{lq}) \\ &\quad \cdot e^{j(n-1)\omega_s(\theta, \varphi_{lq}) + j(k-1)\omega_t(\theta, \varphi_{lq})} d\theta \\ n &= 0, 1, \dots, N-1; \quad k = 0, 1, \dots, K-1 \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $\theta = \theta_a + \theta_p$, $\omega_s(\theta, \varphi) = 2\pi d \cos\theta \cos\varphi / \lambda$, $\omega_t(\theta, \varphi) = 4\pi V \cos\theta \cos\varphi / \lambda / f_r$, $\varphi_{lq} = \sin^{-1}(H/R_{lq})$, $R_{lq} = R_l + q R_u$, $q = 0, 1, \dots, Q$. R_{lq} 为第 l 个距离单元对应第 q 个模糊距离环的斜距, R_u 为最大不模糊距离, N 表示接收阵元数, K 表示相干处理脉冲数.

假设各个模糊距离单元的回波信号之间互不相关,则第 l 个距离单元的杂波协方差矩阵可表示为 $R = \sum_{q=0}^Q R_q$, 其中 R_q 表示第 q 个模糊距离单元的杂波协方差矩阵.

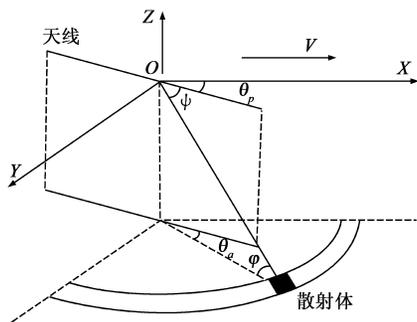


图1 杂波模型几何关系图

2.2 杂波组成

天线在方位-俯仰平面内的强增益呈“十字型”结构,杂波分量主要是由“十字型”对应方位-俯仰角区域引入. 因此,杂波主要由三部分组成,分别为方位主波束对应俯仰副瓣引入的近程杂波 C_1 、主瓣杂波 C_2 和俯仰主波束对应方位副瓣杂波 C_3 , 其对应杂波协方差矩阵分别记为 R_1 、 R_2 和 R_3 , 具体关系如下

$$R = R_1 + R_2 + R_3 \quad (3)$$

图 2 为杂波组成示意图,其中图 2(a)为某近距离单元方位-多普勒杂波功率谱,图 2(b)为杂波距离-多普勒功率谱图. 在图 2 中我们分别给出了各杂波组成成份在方位-多普勒和距离-多普勒平面的分布示意图,可以看出,只有杂波分量 C_1 的多普勒特性随着待检测距离单元的变化而变化的. 因此公式(3)可以表述为

$$R = R_{\text{非均匀}} + R_{\text{均匀}} \quad (4)$$

其中, $R_{\text{非均匀}} = R_1$, $R_{\text{均匀}} = R_2 + R_3$.

通过本节分析,我们可以得到如下重要结论:由俯仰副瓣引入的近程杂波 C_1 是导致杂波非均匀的主要因素,因此可利用阵列俯仰向自由度在俯仰副瓣处

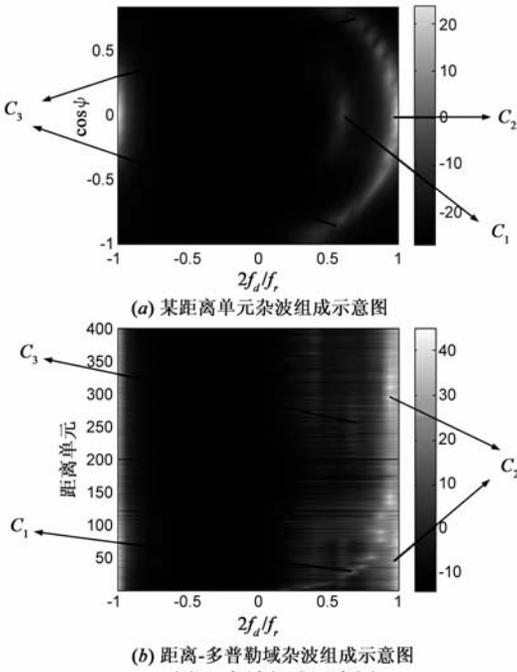


图2 杂波组成示意图

形成凹口实现对机载雷达非均匀杂波分量的抑制。

3 基于阵面俯仰维信息的非均匀杂波抑制方法

与传统的方位-脉冲空时二维数据结构不同,增加了俯仰维接收子阵(阵元)时接收回波相应增加了俯仰维数据,空时二维导向矢量 S 也由原来的方位-脉冲空时二维导向矢量拓展为三维导向矢量,具体定义如下:

$$S = S_t \otimes S_a \otimes S_e \quad (5)$$

其中, S_e 为 $M \times 1$ 维俯仰向导向矢量, S_a 为 $N \times 1$ 维方位向导向矢量, S_t 为 $K \times 1$ 维时域导向矢量. 三个导向矢量分别定义为

$$S_e(\varphi) = [1 \quad e^{j2\pi V_{as}} \quad \dots \quad e^{j2\pi(M-1)V_{as}}]^T \quad (6)$$

$$S_a(\theta, \varphi) = [1 \quad e^{j2\pi V_{as}} \quad \dots \quad e^{j2\pi(N-1)V_{as}}]^T \quad (7)$$

$$S_t(\theta, \varphi) = [1 \quad e^{j2\pi \bar{f}_d} \quad \dots \quad e^{j2\pi(K-1)\bar{f}_d}]^T \quad (8)$$

其中, 定义 $V_{as} = (d/\lambda) \cos \psi$, $V_{as} = (d/\lambda) \sin \varphi$, $\bar{f}_d = 2V \cos \theta \cos \varphi / (f_r/\lambda)$, “T”表示矩阵转置运算, 雷达接收回波数据 X 为 $MNK \times 1$ 维矢量。

3.1 级联方法

首先通过俯仰向子阵(或阵元)进行自适应波束形成抑制近程非均匀杂波分量(这里的自适应并非依数据自适应,而是指俯仰向所形成的凹口随距离单元变化而变化,在距离上是自适应的),然后采用方位-多普勒 2D STAP 处理抑制剩余杂波. 图 3 为级联处理结构框图。

关于 2D STAP 方法的文献已经很多,不再赘述,这里重点对级联方法中俯仰波束形成部分进行研究. 在

Hale 的文献[10]给出的俯仰波束形成公式中,通过在各模糊距离环形成俯仰向凹口来抑制模糊杂波. 而在 AEW 雷达中,由于平视或下视工作,雷达主波束往往和各模糊距离单元俯仰角间隔很小,如下图 4 所示,这就导致在模糊距离单元处形成凹口时引起主瓣发生偏移和畸变,造成目标损失. 因此该文献给出的俯仰波束形成公式仅适用于雷达工作于上视模式,即在有限的俯仰自由度情况下保证各模糊距离单元形成凹口的同时不影响主波束. 本文重点研究的是 AEW 雷达工作于平视或下视模式情况,考虑到主波束俯仰角与大多数模糊距离单元俯仰角之间的间隔较小,为避免形成俯仰凹口导致主瓣畸变,俯仰自适应波束形成公式定义如下:

$$W_e = T_e^{-1} S_e(\varphi_l) \quad (9)$$

其中, $S_e(\varphi_l)$ 表示目标俯仰向导向矢量, T_e 控制在待检测距离单元对应的近程俯仰副瓣杂波处形成凹口,具体定义如下

$$T_e = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P S_e(\varphi_p) S_e(\varphi_p)^H + \sigma^2 I \quad (10)$$

$$\varphi_p = \beta_p \varphi_l, \beta_p \in R \quad (11)$$

$$\varphi_l = \sin^{-1} \left(\frac{H}{R_l} \right) \quad (12)$$

其中, φ_l 为近程杂波对应俯仰角, P 定义凹口宽度, P 越大凹口越宽,比如取 $P = 3, \beta = \{0.98, 1, 1.02\}$, 则 $\varphi_p = \{0.98\varphi_l, \varphi_l, 1.02\varphi_l\}$; σ^2 表示噪声幅度,这里为对角加载量;俯仰凹口的宽度应该与杂波距离相关,距离越近,凹口越宽;距离越远,凹口越窄。



图3 级联处理结构框图

在俯仰向进行杂波抑制后,再进行方位-多普勒联合自适应处理来抑制剩余杂波,因此级联方法自适应权值可表达为

$$W = W_e T W_{2D} \quad (13)$$

其中, T 为降维矩阵, W_{2D} 为方位-多普勒空时自适应权值。

图 4 为仿真回波数据中前三个 R_u 内包含的不同距离单元与对应波束俯仰角的关系. 由图 4 可以看出模糊距离单元的俯仰角随着距离的增大逐渐接近零,而 AEW 雷达的波束主瓣一般均接近于零,因此在实际工程中要考虑到俯仰向形成凹口处距主瓣太近引起的主瓣畸变问题. 实际上,俯仰角越大,杂波非均匀就越严重;俯仰角越小,即越靠近俯仰主瓣,杂波越趋向均匀. 因此,可采用分段处理方式,即在近程非均匀

较严重距离单元实施俯仰自适应波束形成,而在靠近主瓣方位对应距离单元实施俯仰向常规波束形成。

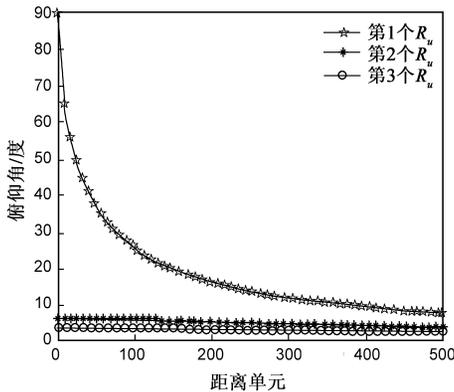
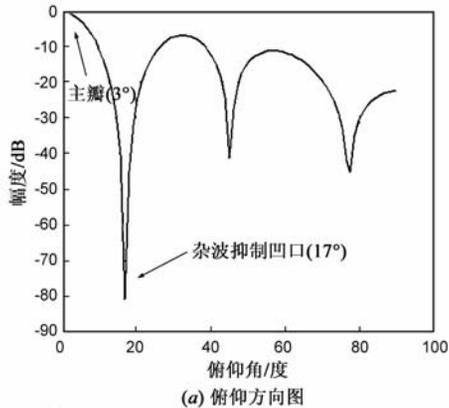
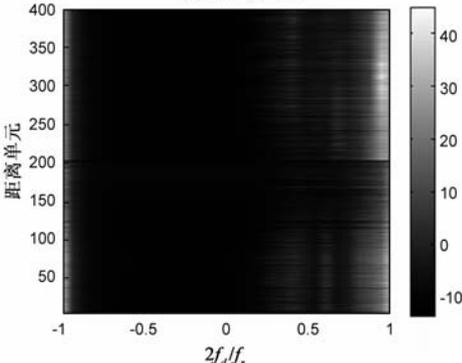


图4 距离单元与对应俯仰角关系图

图5为近程杂波抑制示意图.图5(a)为某距离单元近程杂波抑制俯仰方向图.图5(b)为通过俯仰自适应波束形成抑制近距非均匀杂波后剩余杂波距离-多普勒功率谱图.由图5可以看出,俯仰方向图在待检测对前200距离单元实行俯仰自适应波束形成后,杂波明显趋于均匀。



(a) 俯仰方向图



(b) 抑制近距杂波后剩余杂波距离-多普勒功率谱图

图5 近程杂波抑制示意图

3.2 3D STAP 方法

级联方法不考虑方位-多普勒杂波特性,直接在俯仰向形成凹口来消除非均匀杂波,因此需要较多俯仰自由度来形成理想凹口.如果将俯仰自适应波束形成

和方位-多普勒两维自适应处理结合起来,在俯仰-方位-多普勒域进行三维联合自适应处理,即3D STAP,那么俯仰向只需在检测到近程杂波对应多普勒通道时才形成凹口,这样可有效降低对俯仰向自由度的需求.同时,在检测主瓣杂波对应多普勒通道时,由于在方位向和俯仰向对杂波进行两维自适应“切割”,因此可大大提高主瓣杂波区的杂波抑制性能.3D STAP方法利用俯仰-方位-多普勒三维信息来形成自适应权值

$$W = \mu (T^H R T)^{-1} T^H S \quad (14)$$

其中, T 为降维矩阵, R 为待检测单元杂波协方差矩阵, S 为俯仰、方位和脉冲三维导向矢量, μ 为归一化因子.图6为3D STAP方法杂波抑制原理图。

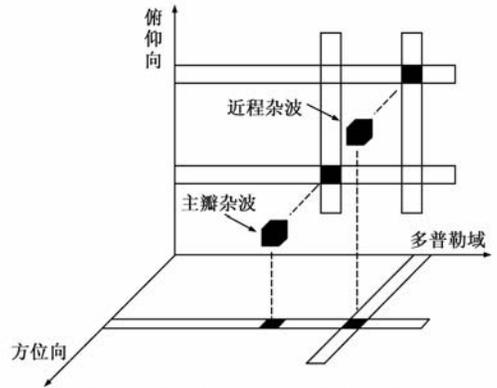


图6 3D STAP方法杂波抑制原理图

由图6可以看出,近程杂波和主瓣杂波在方位-多普勒平面上同处方位主波束方向,因此无法通过方位向空域自适应处理抑制近程杂波;增加了空域俯仰信息后,近程杂波在俯仰上位于俯仰波束副瓣方向,在俯仰维近程杂波和主瓣杂波得以区分,所以3D方法中俯仰-方位-多普勒联合自适应处理在保证主瓣方向无损失的同时可以将近程杂波抑制。

4 仿真实验

表1为本文仿真实验中所采用仿真参数.本仿真实验中阵面放置为非正侧阵的特殊形式—前向阵;在最大探测距离内共6个距离环,即杂波模糊5次;俯仰角为3°情况下主瓣接地位置在第3个距离环内。

表1 仿真参数

方位向阵元数 (N)	8	最大探测距离	400km
俯仰向阵元数 (M)	8	主波束俯仰角 (ψ_0)	3°
相邻阵元间隔 (d)	0.5λ	主波束方位角 (θ_0)	0°
阵元后向衰减系数	90dB	载机速度 (V)	120m/s
阵元发射加权	Chebyshev	脉冲重复频率 (f_r)	1984Hz
阵元接收加权	Chebyshev	相干脉冲数 (K)	8
工作频率 (f_0)	1.24GHz	接收机瞬时带宽 (B)	2.5MHz
载机高度 (H)	9000m	发射功率 (P_t)	1.5kW

信杂噪比损失定义如下:

$$\text{SCNR}_{\text{loss}} = \frac{|\mathbf{W}^H \mathbf{S}|^2}{\mathbf{W}^H \mathbf{R} \mathbf{W}} \frac{1}{\mathbf{S}^H \mathbf{S}} \quad (15)$$

其中,对于级联方法, \mathbf{W} 为级联处理权值, $\mathbf{S} = (\mathbf{W}_e \mathbf{T})^H \mathbf{S}_{2D}$ 为导向矢量, $\mathbf{S}_{2D} = \text{kron}(\mathbf{S}_t, \mathbf{S}_a)$, \mathbf{R} 为待检测距离单元杂波协方差矩阵;对于3D STAP方法, \mathbf{W} 为3D自适应处理权值, $\mathbf{S} = \text{kron}(\mathbf{S}_t, \mathbf{S}_a, \mathbf{S}_e)$.

4.1 级联方法性能分析

图7为采用级联方法处理时信杂噪比损失图,其中,图7(a)为不采用分段处理情况;图7(b)为采用分段处理情况.由图7(a)可以看出,如果各距离单元均采用俯仰自适应波束形成,随着距离的增加,虽然主杂波区杂波抑制性能逐渐提升,但旁瓣杂波区杂波抑制性

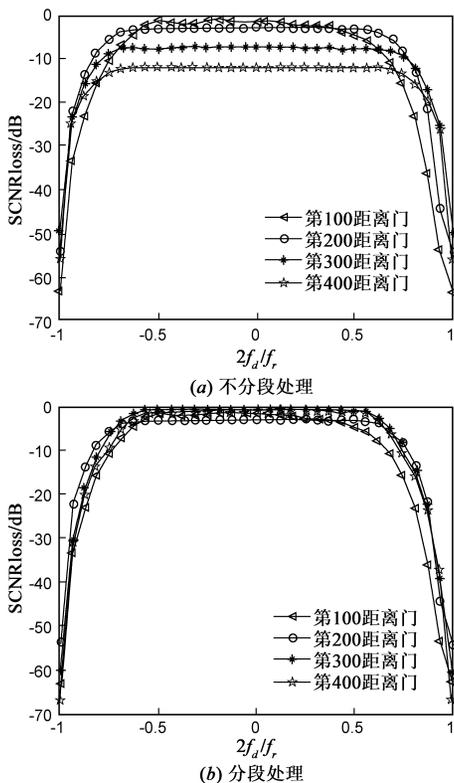


图7 信杂噪比损失图

能却急剧下降;由图7(b)可以看出,如果采用分段处理,随着距离的增加,旁瓣杂波区杂波抑制性能损失在3dB以内,同时保证在主杂波区具有良好的杂波抑制性能.

4.2 3D STAP方法性能分析

本文中自适应匹配滤波器(AMF)方法(也称估计协方差矩阵最优处理器)为例对3D STAP方法进行仿真验证,该方法由于需要 $2(N+K-1)$ 的训练样本,因此杂波抑制性能易受非均匀杂波环境影响.

图8为采用3D AMF方法俯仰向取不同阵元数时第100个距离单元的信杂噪比损失图.由图8可以看出,俯仰向阵元数取4时杂波抑制性能最好,也就是说在3D STAP方法中,并非俯仰自由度越多杂波抑制性能越好.这是由于随着俯仰自由度 M 的增加,3D STAP方法系统自由度呈 M^3 倍增长,那么AMF方法对均匀样本数的需求也呈 M^3 倍增长.如果均匀样本数严重不足,那么估计的杂波协方差矩阵因误差太大无法在杂波区形成理想凹口,从而降低了杂波抑制性能.因此,3D STAP方法中需折衷考虑俯仰向自由度大小.

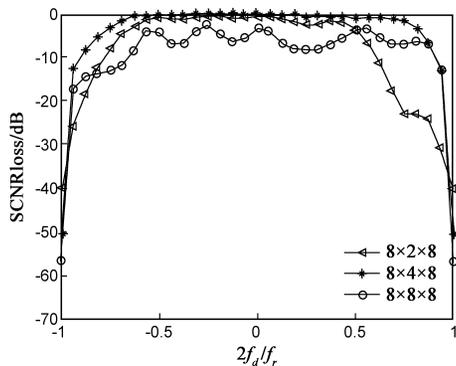


图8 3D AMF不同俯仰自由度情况下信杂噪比损失图

4.3 距离-多普勒信杂噪比损失比较

本小节对2D AMF方法、级联AMF方法和3D AMF方法杂波抑制性能进行比较,其中,级联AMF方法中前200距离单元实施俯仰自适应波束形成,后200距离单元实施俯仰常规波束形成;3D AMF方法中俯仰向阵元

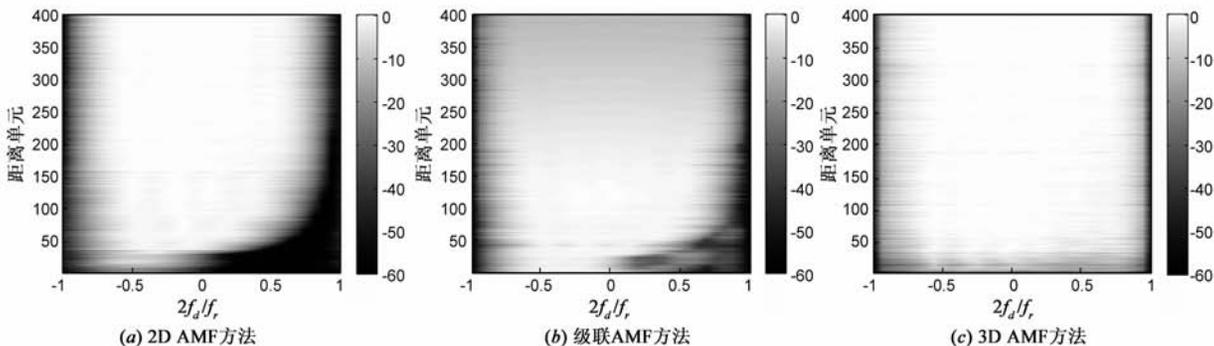


图9 距离-多普勒信杂噪比损失图

数取 4.

图 9(a)和(c)分别为分别采用 2D AMF、级联 AMF 和 3D AMF 方法的距离-多普勒信杂噪比损失图.由图 9 可以看出,在存在距离相关非均匀情况下,级联 AMF 方法的杂波抑制性能要优于 2D AMF 方法,3D AMF 方法的杂波抑制性能要优于级联 AMF 方法;同时,3D AMF 方法在主瓣杂波区的杂波抑制性能要优于 2D AMF 方法和级联 AMF 方法.

5 结论

本文针对机载雷达距离相关非均匀杂波抑制问题展开了研究,给出了一类非均匀杂波抑制方法.不同于传统的减少训练样本需求类方法和杂波多普勒补偿类方法,该类方法中阵列俯仰维信息参与自适应处理,实现从俯仰上将导致距离相关非均匀的杂波分量剔除,主要包括俯仰自适应级联 2D STAP 和 3D STAP 两种方法.经过仿真验证,基于阵列俯仰维信息的 STAP 方法对于距离相关非均匀杂波具有良好的抑制能力.其中,级联方法的杂波抑制性能比 3D STAP 方法差,但运算量相对较小,适合于工程应用;3D STAP 方法的抑制性能最好,运算量却较大,目前并不适合工程上应用,但具有理论参考价值.

本文重点从理论上阐述了俯仰向信息的利用对距离相关非均匀杂波抑制的好处,在后续工作中,关于级联方法中阵列误差和通道误差等非理想阵列因素对俯仰凹口形成的影响、分段处理的细化和 3D STAP 采用降维方法后如何确定最佳俯仰自由度都值得进一步研究.

参考文献

- [1] Reed I D, Mallett J D, Brennan L E. Rapid convergence rate in adaptive arrays [J]. IEEE Trans on AES, 1974, 10(6): 853 - 863.
- [2] Roman J R, Rangaswamy M, Davis D W, et al. Parametric adaptive matched filter for airborne radar applications [J]. IEEE Trans on AES, 2000, 36(2): 677 - 692.
- [3] Befgin J S, Teixeira C M, Techau P M, et al. Improved clutter mitigation performance using knowledge-aided space-time adaptive processing [J]. IEEE Trans on AES, 2006, 42(3): 997 - 1009.
- [4] Goldstein J S, Reed I S, Scharf L L. A multistage representation of the Wiener filter based on orthogonal projections [J]. IEEE Trans on IT, 1998, 44(7): 2943 - 2959.
- [5] Kreyenkamp O, Klemm R. Doppler compensation in forward-looking STAP radar [J]. IEE Proceedings on Radar, Sonar, and Navigation, 2001, 148(5): 253 - 258.
- [6] Lapierre F D, Ries P, 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.

- [7] 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 Wen-chong, Wang Yong-liang. Study on clutter suppression approach to airborne phased radar with non-sidelooking arrays based on CMT [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(3): 441 - 444. (in Chinese)
- [8] Bird J S, Bridgewater A W. Performance of space-based radar in the presence of earth clutter [J]. IEE Proceedings on Radar, Sonar, and Navigation, 1984, 131(5): 491 - 500.
- [9] Klemm R. Principles of Space-Time Adaptive Processing [M]. London: the Institution of Electrical Engineers, 1998, 293 - 304.
- [10] Hale T B, Temple M, Wicks M. Clutter suppression using elevation interferometry fused with space-time adaptive processing [J]. IEE Electronic Letters, 2001, 37(12): 793 - 794.
- [11] Hale T B, Temple M, Wicks M. Two-stage Hybrid Space-time Adaptive Processing in Radar and Communication Systems [P]. United States Patent: 6252540, 2001 - 06.
- [12] Corbell P M, Perez J J, Rangaswamy Muralidhar. Enhancing GMTI performance in non-stationary clutter using 3D STAP [A]. Radar Conference, 2007 IEEE [C]. Boston, MA, USA: IEEE, 2007. 647 - 652.
- [13] Meng Xiangdong, Wang Tong, Wu Jianxin, et al. Short-range clutter suppression for airborne radar by utilizing prefiltering in elevation [J]. IEEE Geoscience and Remoting Letters, 2009, 6(2): 268 - 272.
- [14] 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 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)

作者简介



段克清 男, 1981 年 12 月生于河北石家庄, 现为国防科技大学信号与信息处理专业博士生, 已在国内外期刊和会议发表论文数篇. 研究方向为空时自适应信号处理和合成孔径雷达成像等. E-mail: duankeqing2005@sina.com

谢文冲 男, 1978 年 9 月生于山西省万荣县, 博士, 2006 年获国防科技大学信号与信息处理专业工学博士学位, 现为空军雷达学院雷达兵器运用工程军队重点实验室讲师. 已在《IEEE GRS Letters》、《Signal Processing》、《中国科学》和《电子学报》等国内外刊物及学术会议上发表学术论文 50 余篇, 研究方向为机载雷达信号处理和空时自适应信号处理等. E-mail: xwch1978@yahoo.com.cn