

直接数据域的自适应匹配滤波方法

杨志伟¹, 廖桂生¹, 贺 顺^{1,2}, 曾 操¹

(1. 西安电子科技大学雷达信号处理国防科技重点实验室, 陕西西安 710071;

2. 西安科技大学通信学院, 陕西西安 710054)

摘 要: 研究机载预警雷达非平稳杂波抑制问题. 在获得单个距离门回波数据的最小均方谱分布基础上, 利用最小二乘方法和 *clearing* 技术拟合杂波谱分布特性并重构无空时孔径损失的杂波子空间, 采用自适应匹配滤波方法检测运动目标. 能有效解决传统直接数据域方法存在的空时孔径损失和传统统计空时自适应处理 (STAP) 方法在非平稳杂波环境存在的性能严重下降, 仿真结果表明本文方法能获得良好的动目标检测性能.

关键词: 机载预警雷达; 地面运动目标检测; 空时自适应处理; 杂波抑制

中图分类号: TN957.52 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 07-1616-05

Direct Data Domain Approach with Adaptive Match Filter

YANG Zhi-wei¹, LIAO Gui-sheng¹, HE Shun^{1,2}, ZENG Cao¹

(1. National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;

2. Communication and Information Engineering College, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: This paper describes a new non-stationary clutter mitigation method. The approach, called as D³AMF, is performed in three stages, i.e. sub-aperture space-time spectral estimation using only a single range bin, full-dimension space-time spectral reconstruction with least-square fitting and *clearing*, target detection with adaptive match filtering. An important feature of the proposed method is its ability to extract requisite implementation information from the data itself and without sacrificing space-time aperture. A preliminary result against an airborne simulation data demonstrates the effectiveness of the proposed method.

Key words: airborne early warning radar; ground moving target indication; STAP; clutter mitigation

1 引言

机载预警雷达检测地面运动目标面临的主要难题是如何有效抑制场景杂波. 从多普勒域上看, 动目标多普勒频率往往落在展宽的杂波多普勒谱内, 脉冲多普勒处理分离目标与杂波的方法不再奏效. 利用空间自由度和时间自由度的空时自适应处理 (STAP) 方法能有效提高杂波抑制性能, 获得较好的最小可检测速度 (MDV). 最小方差准则下的最优 STAP 方法需要准确已知待检测距离单元的空时相关矩阵, 而实际工作环境中通常利用临近距离门的回波数据 (训练样本) 进行估计, 这就要求训练样本满足独立同分布特性. 文献 [1] 指出独立同分布样本数大于 2 倍系统自由度时空自适应处理器的性能损失相对最优处理而言不超过 3dB. 杂波分布的非均匀 (例如地理环境的空间变化, 人造强散射目标、照射遮挡等) 以及空时谱分布特性依赖距离单元 (例如非正侧视阵、双基/多基雷达观察构形) 等因素导致背景统计信

息的估计是有偏的, 严重恶化传统 STAP 方法的杂波抑制性能.

针对杂波分布非均匀问题, 非均匀检测 (NHD)^[2] 通过某种度量 (例如广义内积、关联维数等) 从训练样本中检测出非均匀样本. 不过 NHD 需要在所谓“均匀”样本基础上对剩余样本进行筛选, 存在统计模型误差问题. 文献 [3] 通过选择具有较强功率的距离门回波数据构成训练样本, 潜在地会导致滤波器凹口展宽和不能有效剔除训练样本中的强目标信号. 文献 [4, 5] 结合功率挑选和相位挑选获取功率足够强、相位分布接近杂波相位分布的回波数据构成训练样本, 能够剔除训练样本中的强目标信号, 但同样存在滤波器凹口展宽问题. 杂波谱对齐^[6~9] (例如多普勒移位、高价多普勒移位、自适应多普勒补偿、角度-多普勒补偿、自适应角度-多普勒补偿、尺度变换等) 和时变加权^[10] (即采用线性模型近似随着距离单元变化的最优自适应权矢量) 是解决杂波空时谱分布特性依赖距离单元的有效手段, 但它们均没有考虑杂

波分布的非均匀问题.事实上,非均匀杂波将导致杂波谱对齐更加困难(杂波空时谱分布特性与观察结构和杂波功率分布有关)和时变加权方法失效(线性模型不能够描述随着距离单元变化的非均匀杂波分布特性).从原理上讲,在满足空时均匀采样前提下,利用待检测距离单元回波数据直接估计杂波空时相关矩阵的直接数据域方法^[11]能够解决 STAP 所面临的杂波非平稳问题,但是该方法牺牲了空时孔径,性能损失通常大于 3dB,并且对通道响应误差和目标指向误差敏感.

本文重点研究机载预警雷达面临的非平稳杂波抑制问题.在获得单个距离门回波数据的最小均方空时谱分布基础上,结合最小二乘方法和 clearing 技术拟合杂波谱分布特性并重构无空时孔径损失的杂波子空间,然后采用自适应匹配滤波方法进行杂波抑制和动目标检测.仿真数据处理表明本文方法能有效解决传统直接数据域方法存在的空时孔径损失问题和传统统计空时自适应处理(STAP)方法在非平稳杂波环境存在的性能严重下降问题,具有良好的动目标检测性能.

2 信号模型

不失一般性,我们以机载预警雷达非正侧视观察体现杂波的距离依赖性.图 1 是观察示意,其中 v 表示载机的速度, h 为载机高度, α 和 β 分别表示杂波相对阵面的方位角和俯仰角, φ 表示速度方向相对阵面的偏航角, d_m 表示通道 m 与参考通道的阵面距离.

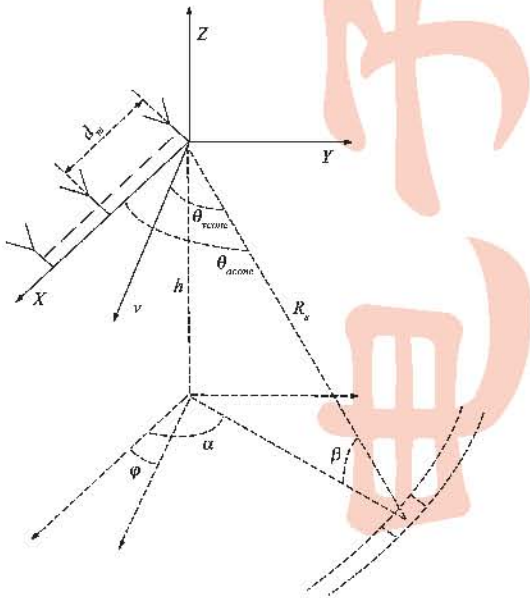


图1 非正侧视观察示意图

对均匀线阵而言有 $d_m = (m - 1) \cdot d$ 成立(d 表示通道间距),且给定方位角和俯仰角的杂波多普勒频率 f_d 和空间频率 f_{sp} 可表示为

$$f_{sp} = \frac{d}{\lambda} \mathbf{u}_a \cdot \mathbf{u}_{du} = \frac{d}{\lambda} \cos \alpha \cos \beta = \frac{d}{\lambda} \cos \theta_{acone}$$

和 $f_d = \frac{2v}{\lambda} \mathbf{u}_v \cdot \mathbf{u}_{du} = \frac{2v}{\lambda} \cos \beta \cos(\alpha - \varphi) = \frac{2v}{\lambda} \cos \theta_{vcone}$
进而有:

$$(f_d)^2 - \frac{4v \cos \varphi}{d} f_d f_{sp} + \left(\frac{2v}{d} f_{sp}\right)^2 = \left(\frac{2v}{\lambda} \sin \varphi \cos \beta\right)^2 \quad (1)$$

其中 λ 表示工作波长, $\mathbf{u}_{du} = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta \\ \sin \alpha \cos \beta \\ -\sin \beta \end{bmatrix}$, $\mathbf{u}_a = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$ 和 $\mathbf{u}_v = \begin{bmatrix} \cos \varphi \\ \sin \varphi \\ 0 \end{bmatrix}$ 分别表示阵面到杂波的单位方向矢量、等效线阵单位方向矢量和载机速度单位矢量, θ_{vcone} 和 θ_{acone} 分别表示载机速度矢量和阵列方向矢量相对杂波的空间锥角.对正侧视观察而言($\varphi = 0$),有 $f_d/f_{sp} = 2v/d$ 成立,即杂波多普勒频率和空间频率的对应关系与观察距离无关;非正侧视观察($\varphi \neq 0$)时, f_d 和 f_{sp} 为二次曲线分布,与俯仰角有关,即具有距离依赖性.

假设通道数 M , 相干积累脉冲数 N , 给定距离单元的雷达回波数据可表示为:

$$H_0: \mathbf{x} = \sum_{i=1}^N \mathbf{g}_i \cdot \gamma_i \cdot (\mathbf{s}_i^t \otimes \mathbf{s}_i^s) + \mathbf{x}_j + \mathbf{n} \quad (2)$$

$$H_1: \mathbf{x} = \sum_{i=1}^N \mathbf{g}_i \cdot \gamma_i \cdot (\mathbf{s}_i^t \otimes \mathbf{s}_i^s) + \mathbf{x}_j + \mathbf{x}_s + \mathbf{n}$$

其中 H_0 假设表示该距离单元回波不包含动目标信号, H_1 假设与之相反; N_c 表示该距离单元接收回波的等效杂波地块数, \mathbf{g}_i 和 γ_i 分别表示第 i 个杂波地块的等效增益和等效后向散射系数,

$$\mathbf{s}_i^t = [1 \quad \cdots \quad \exp(j\phi_i^t(N-1))]^T \quad \text{和}$$

$$\mathbf{s}_i^s = [1 \quad \cdots \quad \exp(j\phi_i^s(M-1))]^T$$

表示第 i 个杂波地块的时域导向矢量和空域导向矢量

$$(\phi_i^t = \frac{2\pi \cdot 2v}{\lambda f_r} \cos \theta_{vcone}^i, \phi_i^s = \frac{2\pi d}{\lambda} \cos \theta_{acone}^i);$$

θ_{vcone}^i 和 θ_{acone}^i 表示第 i 个杂波地块的速度锥角和阵列锥角, f_r 表示脉冲重复频率; \otimes 表示 Kronecker 积, T 表示转置; \mathbf{x}_j 表示干扰信号, \mathbf{x}_s 表示动目标信号, \mathbf{n} 表示加性高斯白噪声.假设径向速度为 v_r 的动目标位于第 k 个杂波地块,则动目标时域导向矢量与该杂波地块存在差异,空域导向矢量保持一致,即

$$\phi_{at} = \frac{2\pi \cdot 2v}{\lambda f_r} \cos \theta_{vcone}^k + \frac{2\pi \cdot 2v_r}{\lambda f_r}, \phi_{as} = \frac{2\pi d}{\lambda} \cos \theta_{acone}^k.$$

正是由于动目标与杂波在空时二维域上可区分, STAP 方法才能够在主瓣杂波区检测出动目标.

3 非平稳杂波抑制

根据上述信号模型,假设待检测距离单元动目标的空时导向矢量可表示为

$$a_{\alpha} = s_t \otimes s_s (s_t = [1 \cdots \exp(j\phi_{\alpha}(N-1))]^T,$$

$$s_s = [1 \cdots \exp(j\phi_{\alpha}(M-1))]^T).$$

基于线性约束最小方差准则的最优权矢量可表示为 $w_{opt} = R^{-1}a_{\alpha}/(a_{\alpha}^*R^{-1}a_{\alpha})$ (*表示共轭转置, R 表示待检测单元在 H_0 假设下的数据相关矩阵). 工程上通常利用

$$\hat{R} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K x_k x_k^*$$

进行估计(K 为训练样本数, x_k 表示第 k 个训练样本), 自适应权矢量 $w_{opt} = \hat{R}^{-1}a_{\alpha}/(a_{\alpha}^*\hat{R}^{-1}a_{\alpha})$.

如果杂波分布特性依赖训练样本, 原则上只能根据待检测单元的回波数据估计相关矩阵. 在满足空时均匀采样条件下, 通过空时子孔径平滑处理能够估计出背景统计信息. 首先将待检测单元的回波数据重排为:

$$x = \begin{bmatrix} x(1,1) & \cdots & x(1,N) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x(M,1) & \cdots & x(M,N) \end{bmatrix}_{M \times N} \quad (3)$$

假设空域和时域子孔径大小分别为 P 和 L , 则位于 (p, l) 的空时子孔径数据矢量可表示为

$$x_{vec}(p, l) = \begin{bmatrix} x(p, l) & \cdots & x(p, L+l-1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x(p+p-1, l) & \cdots & x(p+p-1, L+l-1) \end{bmatrix}_{P \times L}$$

($vec(\cdot)$ 表示沿着列的方向将矩阵转化成列矢量, $p=1, \dots, M-P+1$ 和 $l=1, \dots, N-L+1$).

沿着空间和时间滑动获得的子孔径数据具有相同的分布特性, 因此待检测单元的空时子孔径数据相关矩阵采用 $\hat{R}_{sub} = E(x_{vec}(p, l)x_{vec}^*(p, l))$ 进行估计. 若采用前向或后向平滑方式, 可利用的空时子孔径数据样本数为 $(M-P+1) \cdot (N-L+1)$; 采用前后向平滑方式样本数可加倍.

待检测单元回波数据的空时功率谱分布根据下式估计:

$$P(\phi_t, \phi_s) = \frac{1}{a_{sub}^*(\phi_t, \phi_s)\hat{R}_{sub}^{-1}a_{sub}(\phi_t, \phi_s)}$$

$$a_{sub}(\phi_t, \phi_s) = [1 \cdots \exp(j\phi_t(L-1))]^T \otimes [1 \cdots \exp(j\phi_s(P-1))]^T \quad (4)$$

根据第二节的信号模型可知: 杂波的空时功率谱沿曲线分布; 动目标或孤立干扰的空时功率谱为离散点谱, 且在二维平面内任意分布. 假定感兴趣的动目标位于波束主瓣内, 则在空域波束旁瓣区的任和离散谱点均可视为干扰. 只要能够辨别出空时功率谱的离散谱点, 就能达到动目标检测目的. 一方面有限空时孔径将导致靠近主杂波区的微弱目标被淹没, 难以有效检

测其离散谱点; 另一方面对单个距离单元的回波数据采用空时子孔径平滑技术能估计出数据相关矩阵, 但损失了空时孔径. 针对上述问题, 我们提出直接数据域的自适应匹配子空间滤波方法(简称 D^3AMF), 具体流程如下图 2 所示.

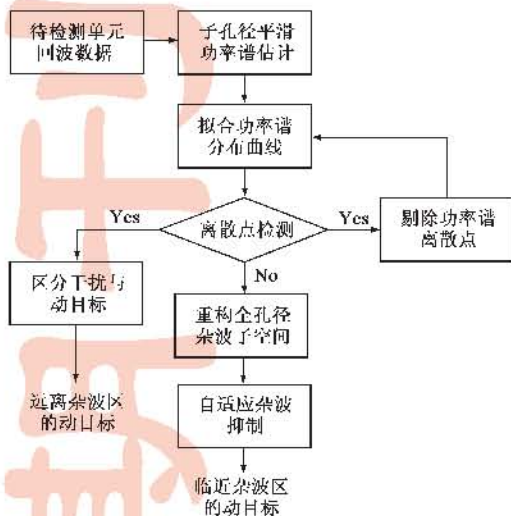


图2 D^3AMF 流程图

假设 $\{P(\phi_t^k, \phi_s^q) | \phi_t^k \in [-\pi, \pi], \phi_s^q \in [-\pi, \pi]\}$ 表示对 $P(\phi_t, \phi_s)$ 进行恒虚警检测所获得的功率谱分布点集, 若待检测单元不包含动目标信号, 则所有 (ϕ_t^k, ϕ_s^q) 都满足

$$\left(\frac{f_r}{2\pi} \phi_t^k\right)^2 - \frac{f_r v \cos \varphi}{\pi^2 d} \phi_t^k \phi_s^q + \left(\frac{v}{\pi d} \phi_s^q\right)^2 = \left(\frac{2v}{\lambda} \sin \varphi \cos \beta\right)^2$$

考虑到观察几何构型参数和平台运动参数存在误差以及动目标信号影响, 本文采用最小二乘方法和 clearing 技术拟合杂波的功率谱分布曲线. 换言之, 在获得的初始功率谱分布点集上利用最小二乘方法拟合二次曲线, 然后计算点集中所有的点与拟合曲线的距离并选择距离超过给定检测门限的点构成待检测的离散点集(可能包含远离杂波区的动目标), 对剔除离散点后的剩余点重复进行最小二乘拟合和 clearing 操作, 直至无离散点检出. 一旦拟合出待检测单元的杂波功率谱分布 $\{\hat{P}_c(\phi_t^{kc}, \phi_s^{qc}) | \phi_t^{kc} \in [-\pi, \pi], \phi_s^{qc} \in [-\pi, \pi]\}$, 重构的全孔径杂波空时导向矢量可表示为 $a(\phi_t^{kc}, \phi_s^{qc}) = \hat{s}_t^{kc} \otimes \hat{s}_s^{qc}$ (时域导向矢量 $\hat{s}_t^{kc} = [1 \cdots \exp(j\phi_t^{kc}(N-1))]^T$, 空域导向矢量 $\hat{s}_s^{qc} = [1 \cdots \exp(j\phi_s^{qc}(M-1))]^T$). 自适应权矢量按照下式计算:

$$w = \frac{\hat{R}_c^{-1}a_{\alpha}}{(a_{\alpha}^*\hat{R}_c^{-1}a_{\alpha})}$$

$$\hat{R}_c = \sum \hat{P}_c(\phi_t^{kc}, \phi_s^{qc}) \hat{a}(\phi_t^{kc}, \phi_s^{qc}) \hat{a}^*(\phi_t^{kc}, \phi_s^{qc}) + \sigma_n^2 I \quad (5)$$

其中 $\hat{\sigma}_n^2$ 表示估计的噪声功率, I 为单位矩阵. 可以发现:估计的待检测单元数据相关矩阵由噪声空间和拟合重构的杂波空间组成,不存在空时孔径损失且不需要利用其它距离单元的回波数据,因此本文提出 D^3AMF 方法有望获得较好的非平稳杂波抑制性能.

4 仿真结果

本节通过计算机仿真验证 D^3AMF 方法的有效性. 系统参数如下:工作波长 0.13m(S 波段)、平台高度 8km、载机速度 90m/s、发射信号带宽 5MHz、天线具有二维波束扫描能力(方位和俯仰均采用 -30dB Taylor 权进行加权处理)且观察斜距范围 10km~250km、单个接收通道的 $CNR = 20\text{dB}$ 、方位通道数 11、相干积累脉冲数 22、脉冲重复频率选择保证主瓣距离和多普勒无模糊、偏航角 90° 、空域和时域子孔径大小分别为 6 和 10. 下图给出空时子孔径平滑后不同距离单元的典型杂波谱,其中 R_s 表示斜距、 $f_m = 2f_{sp}$ 和 $f_{dv} = 2f_d/f_r$ 分别表示归一化空间频率和多普勒频率. 图中对不同距离单元已经将其多普勒中心移至零频. 显然杂波的空时谱分布依赖观察斜距,特别在近距离区,分布特性随着距离变化更为显著. 一般而言,在观察斜距大于 5 倍平台高度后杂波谱分布特性随着距离变化才比较缓慢.

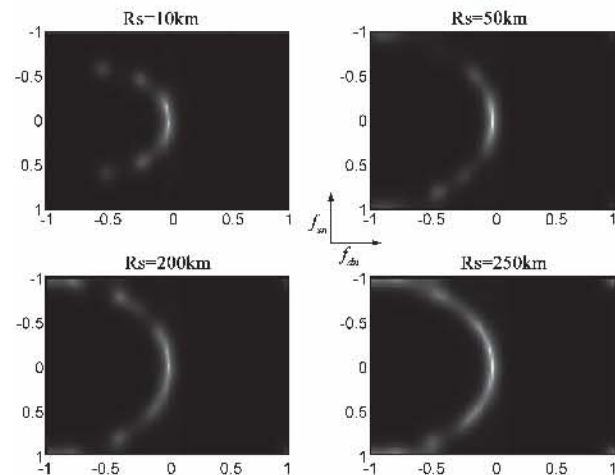


图3 不同距离门的杂波空时谱

下面进一步给出本文处理方法与传统统计 STAP 处理(利用邻近距离门回波估计待检测单元的相关矩阵)、直接数据域处理方法(D^3LS)以及最优处理的自适应处理损失(自适应处理与最优处理的输出信于噪比

之比,即 $L_s = \frac{SINR|w = \hat{w}_{opt}}{SINR|w = w_{opt}}$). 待检测距离单元观察斜距 50km 且包含归一化多普勒频率为 -0.3 的运动目标,单个接收通道的 $SCR = -10\text{dB}$,其它仿真条件与图 3 相同. 图 4 给出了理想情况下的处理损失,图 5 是通

道存在 10% 幅度误差和 0.1 弧度相位误差下通过 1000 次蒙特卡罗实验所获得的处理损失. 可以发现:本文方法由于采用了杂波功率谱拟合与重构两个步骤,相比 D^3LS 方法而言对通道幅度/相位误差更为稳健,同时几乎没有空时孔径损失;相比传统 STAP 处理而言能获得更窄的处理损失凹口,即具有更好的杂波抑制和动目标检测性能.

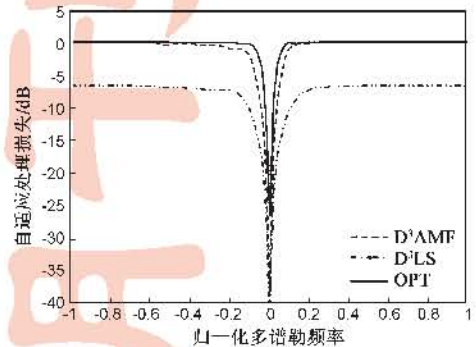


图4 理想情况下的自适应处理损失

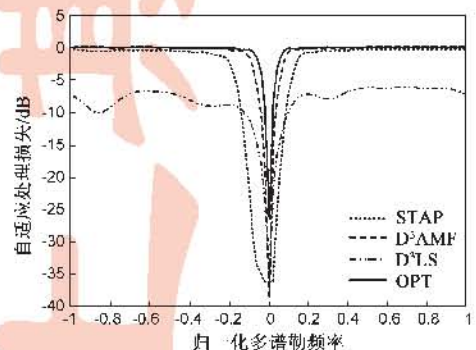


图5 存在通道幅度/相位误差下的自适应处理损失

5 结论

非正侧视或双基/多基雷达观察构形下杂波空时谱分布特性依赖距离单元是导致传统统计 STAP 方法性能下降的主要因素. 本文通过在获得单个距离门回波数据的最小均方空时谱分布基础上拟合杂波谱分布和重构杂波全维空间,有效解决了传统直接数据域方法存在的空时孔径损失和传统统计 STAP 方法性能恶化问题. 仿真结果表明文中方法对通道响应误差稳健,能有效抑制非平稳杂波.

参考文献:

- [1] L E Brennan, I S Reed. Theory of adaptive radar[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1973, 9 (2):237 - 252.
- [2] Chen P. On Testing The Equality Of Covariance Matrices Under Singularity[R]. Report for AFOSR Summer Faculty Research Program, Rome Laboratory, Rome, NY, August 1994.

- [3] Rabideau D J, Steinhardt A O. Improved adaptive clutter cancellation through data-adaptive training[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1999, 35(3): 879 - 891.
- [4] Stephen M Kogon. Adaptive weight training for post-Doppler STAP algorithms in non-homogeneous clutter[A]. *Applications of Space-Time Adaptive Processing (Series 14, Chapter 11)* [M]. Institution of Electrical Engineers (IEE) Press, 2004. 359 - 374.
- [5] 曾操, 廖桂生, 杨志伟, 刘聪锋. 基于样本加权的三通道 SAR-GMTI 机载数据处理分析[J]. *电子学报*, 2009, 37(3): 506 - 512.
Zeng Cao, Liao Guisheng, Yang Zhiwei, Liu Congfeng. Airborne data processing and performance analysis based on three-aperture SAR-GMTI system using weighted sample[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2009, 37(3): 506 - 512. (in Chinese)
- [6] Kreyenkamp O, Klemm R. Doppler compensation in forward-looking STAP radar[J]. *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 2001, 148(5): 253 - 258.
- [7] B Himed, Y Zhang, A Hajjari. STAP with angle-Doppler compensation for bistatic airborne radars[A]. *Proceedings of the IEEE Radar Conference*[C]. NY, USA: IEEE Press, 2002. 311 - 317.
- [8] Lapiere F D, Verly J G, Droogenbroeck M V. New solutions to the problem of range dependence in bistatic STAP radars[A]. *Proceedings of the IEEE International Radar Conference*[C]. NY, USA: IEEE Press, 2003. 452 - 459.
- [9] Melvin W L, Davis M E. Adaptive cancellation method for geometry-induced non-stationary bi-static clutter environments[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2007, 43(2): 651 - 672.

- [10] Kogon S M, Zatman M A. Bistatic STAP for airborne radar systems[A]. *Proceedings of IEEE Sensor Array and Multi-channel Signal Processing Workshop (SAM)*[C]. Lexington, MA: IEEE Press, 2000. 256 - 260.
- [11] Sarkar T K, Wang H, Park S, et al. A deterministic least square approach to space-time adaptive processing[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation (AP)*, 2001, 49(1): 91 - 103.

作者简介:



杨志伟(通讯作者) 男, 博士, 1980 年出生于四川省南充市. 主持国防科技预研和国家自然科学基金各一项. 研究领域为: 天基预警、阵列信号处理和运动平台雷达动目标检测.
E-mail: zwyang@mail.xidian.edu.cn



廖桂生 男, 1963 年出生于广西壮族自治区桂林市. 现为西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室教授, 博士生导师, 中国电子学会高级会员, IEEE 会员. 主持和承担了国防“973”项目、国家“863”高技术项目、国防科技预研、国家自然科学基金等科研任务, 其中获省部级科技进步奖一等奖 1 项、二等奖 2 项、三等奖 1 项. 1999 年获教育部跨世纪优秀人才基金, 2004 年入选国家人事部颁发的首批“新世纪百千万人才工程国家级人选”, 2008 年获国家杰出青年科学基金. 在国内外发表学术论文 140 余篇. 现主要从事雷达探测系统信号处理, 包括空时自适应处理, 天基预警和阵列信号处理等研究领域. E-mail: gsliao@xidian.edu.cn