

基于空时导向约束的天基雷达离散旁瓣杂波判别方法

王伟伟* 段崇棣 张欣 李渝 杨晓超

(西安空间无线电技术研究所 西安 710100)

摘要: 由于天基雷达覆盖范围广,大量强离散杂波(小型岛礁、陆地铁塔等)会从天线旁瓣进入雷达系统,其多普勒特征与目标相同,极易造成虚警。针对以上问题,该文提出基于空时导向约束的天基雷达离散旁瓣杂波判别方法,该方法首先选取空时自适应处理(STAP)杂波抑制后检测到的潜在“目标”(包含真实目标与离散旁瓣杂波)距离多普勒单元及其附近单元;然后根据杂波多普勒频率与空间角度的耦合关系获得各杂波单元对应的空时导向矢量;最后利用获得新的导向矢量构成的滤波器再次对“目标”距离多普勒单元及其附近单元进行滤波处理,此时真实目标信杂噪比会大幅度降低,而离散旁瓣杂波信杂噪比变化不大,从而实现离散旁瓣杂波的判别。理论分析及机载实测数据处理证明该方法具有良好的稳健性和可靠性。

关键词: 天基预警雷达; 离散旁瓣杂波; 空时自适应处理; 空时导向矢量

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2020)11-2592-08

DOI: 10.11999/JEIT190562

A Discrete Side-lobe Clutter Recognition Method Using Space-time Steering Vectors for Space Based Radar System

WANG Weiwei DUAN Chongdi ZHANG Xin LI Yu YANG Xiaochao

(Xi'an Institute of Space Radio Technology, Xi'an 710100, China)

Abstract: On account of the large coverage of space based radar, a lot of discrete strong side-lobe clutter, which shares familiar Doppler feature with the real moving targets, can be received by the radar system and hence results in false alarms. For this problem, a discrete side-lobe clutter recognition method using space-time steering vectors for space based radar system is proposed. In this method, the “Suspected targets”, including both the real moving targets and discrete side-lobe clutter, are detected after suppressing clutter by employing the Space-Time Adaptive Processing (STAP). The range-Doppler cells where “suspected targets” located in or around are selected. Afterwards, the space time steering vectors of them are obtained based on the coupling relationship between Doppler frequencies and space angles of clutter. Lastly, the above range-Doppler cells are processed again by the adaptive processing filters which are derived from the new space-time steering vectors. Obviously, the signal-clutter-noise ratio of real moving target will be reduced significantly, while it will not change much for the discrete side-lobe clutter. Therefore, the discrete side-lobe clutter can be identified by using the proposed method. Theoretical analyses and multi-channel airborne radar experiments demonstrate the effectiveness and stability of this method.

Key words: Space based early warning radar; Discrete side-lobe clutter; Space-Time Adaptive Processing (STAP); Space-time steering vector

1 引言

天基雷达处于下视工作状态且平台速度快,存在杂波能量强、杂波谱严重展宽的问题,因此天基

雷达必须具备对抗强大的地海杂波^[1]。但是实际上,雷达杂波除了地/海分布式杂波外,由于天基雷达可视范围极大,由大量孤立的强散射点(如海面舰船、小型岛礁、陆地铁塔、电线杆等)产生的离散杂波极易从天线的旁瓣进入雷达系统。一方面由于天基雷达平台存在高速运动,虽然以上孤立散射点本身运动速度较慢或静止不动,但是仍与雷达平台存在相对运动,这些孤立散射点的回波一旦从天线的旁瓣进入,其多普勒频率会远离主瓣杂波多

收稿日期: 2019-07-25; 改回日期: 2020-06-08; 网络出版: 2020-07-13

*通信作者: 王伟伟 www_xidian@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61701395, 61871138, 41806211)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61701395, 61871138, 41806211)

普勒频率范围, 而进入真实运动目标所处的多普勒频率范围内, 造成从多普勒频率上与真实运动目标无法区分; 另一方面天基雷达进行空中目标搜索时相参积累时间极短, 导致以上强孤立散射点物理尺寸通常远小于雷达方位分辨率, 且其后向散射强度高, 从多普勒域波形上呈现为能量高于周围多普勒单元的点目标, 造成从多普勒波形上与真实目标十分类似。因此离散旁瓣杂波的多普勒频率范围和多普勒波形特征与真实运动目标基本相同, 极易造成虚警^[2]。基于阵列的空时自适应处理(Space-Time Adaptive Processing, STAP)技术, 虽然具有良好的杂波抑制能力, 但是对于离散旁瓣杂波抑制具有较大难度, 主要原因在于: 空时自适应处理的性能主要依赖于回波中独立同分布样本的挑选, 为降低非均匀样本对杂波抑制的影响, 这些强的孤立散射点回波样本在样本筛选过程中会被剔除掉^[9-10], 造成这些孤立散射点难以被STAP技术抑制干净, 成为剩余的离散旁瓣杂波, 造成虚警。因此针对离散旁瓣杂波需要进行识别并剔除。

目前尚无在轨运行的天基预警雷达, 对于机载雷达系统, 目前的离散旁瓣杂波剔除典型方法主要包括两种: 保护通道法^[11,12]和检波后时间灵敏度控制(Sensitivity Time Control, STC)法^[2]。保护通道法通过比较两个并行接收通道的输出, 一个与主天线相连接, 另外一个与保护天线连接, 其中要求保护天线的主瓣波束为宽波束, 主瓣方向图增益高于主天线的旁瓣。分别对两幅天线接收到的回波进行恒虚警检测, 对二者中检测到的目标进行比对, 如果保护通道的回波强则为离散旁瓣杂波, 反之为真实目标。该方法在机载雷达高速目标监视具有良好的适用性, 但是对于天基雷达并不适用, 主要原因在于天基雷达主瓣波束完全指向地球, 杂波能量强, 在进行杂波抑制前难以识别离散旁瓣杂波, 甚至会造成目标信号被误认杂波而被剔除的情况(保护通道内的旁瓣杂波会高于杂波抑制后的目标信号)。检波后STC处理的工作过程为: 首先对所有检测到的目标进行距离解模糊处理, 然后补偿距离引起的回波强度变化, 再次设计检测门限, 小于门限的为离散旁瓣杂波, 反之为目标。该方法主要适用于特殊的机载雷达应用背景, 其认为相同距离下, 雷达的低旁瓣设计足以抵消目标RCS比离散旁瓣杂波弱的劣势, 因此只要将距离引起的回波幅度变化补偿掉即可。由于天基雷达主瓣波束的距离变化与机载雷达相比很小, 因此该方法对于天基雷达并不适用。

针对以上问题, 本文提出基于空时导向约束的

天基雷达离散旁瓣杂波判别方法, 该方法基于离散旁瓣杂波空间角度与多普勒频率之间存在明确的耦合关系, 来实现离散旁瓣杂波的识别。该方法建立在前期STAP杂波抑制基础上, 实现简单, 计算复杂度低, 且具有良好的稳健性和可靠性。

2 天基雷达杂波模型及问题描述

天基预警雷达主瓣波束指向地球, 回波数据中一方面存在强地海分布式杂波, 另一方面由于其覆盖范围广, 大量由孤立散射体产生的强离散旁瓣杂波会从天线旁瓣进入雷达接收系统, 如图1所示。

图1示意了天线阵面与杂波散射点的几何关系, 卫星平台速度为 V 与地面平行; 雷达发射信号波长为 λ ; 卫星速度与天线阵面之间的夹角为 θ_p , 天线阵列与杂波之间的俯仰角为 φ , 方位角为 θ ; ψ 是天线阵列与杂波之间的空间锥角, 满足 $\cos\psi = \cos\theta\cos\varphi$ 。

由图1所示, 天线阵元数目为 N , 阵元间距为 d , 一个相参处理间隔(Coherent Process Interval, CPI) T_0 内的脉冲数目为 K , 对于第 l 距离门, 第 n 个阵元在第 k 个积累脉冲下接收的地/海杂波数据 C_{kn} 可以表示为

$$C_{kn} = \sum_{i=1}^M F(\theta_i, \varphi_{(l)}, R_l, T_0) \sigma(\theta_i, \varphi_{(l)}) \cdot \exp(j(n-1)w_s(\theta_i, \varphi_{(l)}) + j(k-1)w_t(\theta_i, \varphi_{(l)})) \quad (1)$$

其中, $\varphi_{(l)}$ 为第 l 个距离单元的高低角, θ_i 表示某个距离单元第 i 个方位角; M 为当前距离门散射点的个数; 假设雷达工作波长为 λ , 雷达脉冲重复频率为 f_r , 则 $w_s(\theta_i, \varphi_{(l)}) = \frac{2\pi d}{\lambda} \cos\theta_i \cos\varphi_{(l)}$, 为空间角

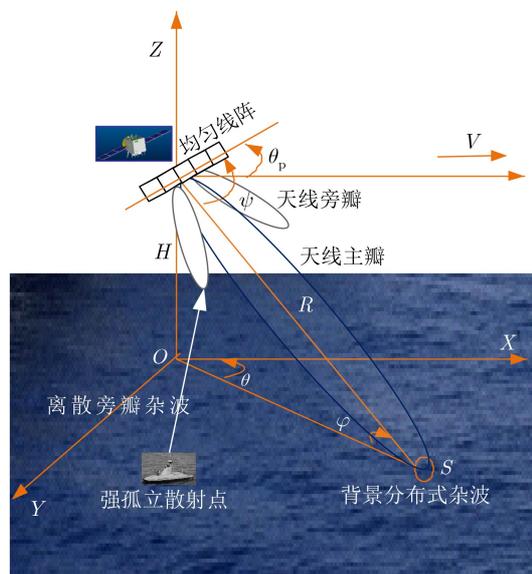


图1 天基雷达回波示意图

频率; $w_t(\theta_i, \varphi_{(l)}) = \frac{4\pi V}{\lambda f_r} \cos(\theta_i + \theta_p) \cos\varphi_{(l)}$, 为时间角频率; $F(\theta_i, \varphi_{(l)}, R_l, T_0)$ 为与雷达发射功率、收发方向图、相参积累时间、雷达与杂波散射点距离等有关的参数。 $\sigma(\theta_i, \varphi_{(l)})$ 为第 i 个散射点对应的杂波雷达截面积。

式(1)中的杂波散射点包括背景分布式杂波和离散杂波。与背景分布式杂波不同, 离散杂波主要为强孤立散射点回波, 物理尺寸通常小于或接近雷达分辨单元, 其一旦从天线旁瓣进入雷达接收机, 则成为“离散旁瓣杂波”。假设雷达主瓣波束宽度为 $\Delta\beta$, 指向空间锥角 ψ_0 ; 离散旁瓣杂波与主瓣波束空间锥角差异为 α , 则离散旁瓣杂波多普勒特征等效一个来自主瓣波束且径向速度处于式(2)区间范围的真实目标

$$V_{\text{tar}} \in \left[V \times \left(\cos\left(\psi_0 + \alpha - \frac{\Delta\beta}{2}\right) - \cos(\psi_0) \right), V \times \left(\cos\left(\psi_0 + \alpha + \frac{\Delta\beta}{2}\right) - \cos(\psi_0) \right) \right] \quad (2)$$

通过以上分析可知离散旁瓣杂波一方面强度通常远高于周围距离多普勒单元的分布式杂波; 另一方面其多普勒特征与真实目标相同, 因此极易造成虚警。

根据式(1)可知, 天基雷达任意距离门的杂波数据可表示为 $K \times N$ 维的矩阵, 其中第 l 个距离门的杂波回波数据可简化表示为

$$C_{K \times N} = \sum_{i=1}^M \rho_{nl}^{(i)} S_t^i(w_t) S_s^{iH}(w_s) \quad (3)$$

其中, $\rho_{nl}^{(i)} = F(\theta_i, \varphi_{(l)}, R_l, T_0) \sigma(\theta_i, \varphi_{(l)})$; $S_s^i(w_s)$, $S_t^i(w_t)$ 分别为第 i 个散射点的空域导向矢量与时域导向矢量, 且满足

$$S_s^i(w_s) = [1, \exp(jw_s(\theta_i, \varphi_{(l)})), \dots, \exp(j(N-1)w_s(\theta_i, \varphi_{(l)}))]^H \quad (4)$$

$$S_t^i(w_t) = [1, \exp(jw_t(\theta_i, \varphi_{(l)})), \dots, \exp(j(K-1)w_t(\theta_i, \varphi_{(l)}))]^H \quad (5)$$

同样按相同的矩阵结构, 运动目标的回波信号 S 也可以表示为一个 $K \times N$ 维的矩阵, 它也由其空域导向矢量和时域导向矢量所构成。假设接收回波数据为 X 则

$$X = C + S + N_0 \quad (6)$$

其中, N_0 为接收噪声。将 $K \times N$ 维的矩阵 X 由向量 x 表示

$$x = \text{Vec}(X) \quad (7)$$

其中, $\text{Vec}(\cdot)$ 表示对一个矩阵作如下操作: 将矩阵的第2列放在第1列的下面, 第3列放在第2列的下面, 依此类推将矩阵变换为一列矢量。

3 基于空时导向约束的天基雷达离散旁瓣杂波判别方法

天基雷达采用STAP技术进行杂波抑制, 为降低对独立同分布样本的需求及运算复杂度, 工程应用中通常采用降维STAP技术^[13]。不失一般性, 本文中采用降维后多普勒处理算法EFA算法进行背景分布式杂波抑制^[13]。

通过距离样本统计获得的杂波协方差矩阵估计。首先在待检测单元的邻近单元选取 L 个2维数据向量样本 x_l , $l=1, 2, \dots, L$ 。按照最大似然估计方法来计算杂波协方差矩阵 R_x 的估值 \hat{R}_x

$$\hat{R}_x = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L x_l x_l^H \quad (8)$$

由于强孤立散射点与背景分布式杂波不满足独立同分布, 一旦进入协方差矩阵估计过程, 会严重影响背景分布式杂波的抑制, 因此在协方差矩阵估计过程中, 需要进行样本筛选。然后利用估计的协方差矩阵获得最优滤波器权系数, 进行背景分布式杂波抑制

$$w_{\text{opt}} = \mu \hat{R}_x^{-1} s \quad (9)$$

其中, $\mu = \frac{1}{s^H \hat{R}_x^{-1} s}$, $S = S_s(w_s) \otimes S_t(w_t)$ 为待检测单元运动目标空时2维导向矢量的Kronecker积。

利用式(9)获得的滤波器可以完成背景分布式杂波抑制, 但是由于离散旁瓣杂波一方面回波功率高; 另一方面在样本筛选过程中被剔除, 因此STAP技术难以完成针对离散旁瓣杂波的有效抑制。而离散旁瓣杂波在距离多普勒平面内与真实目标表现几乎相同, 从而造成虚警。

因此需要进一步对检测到的“目标”进行判别, 剔除离散旁瓣杂波。假设检测到第 p ($p=1, 2, \dots, P$) 个“目标”(包含真实运动目标和离散旁瓣杂波)对应的信杂噪比为 SCNR_p , 假设选取以“目标”为中心的 Q 个距离单元和多普勒单元(通常选取 Q 为32个距离单元 \times 32个多普勒单元, 即可满足杂波功率或幅度均值估计精度要求^[14]), 其中第 q 个单元的多普勒频率为 $f_d^{p,q}$, $q(q=1, 2, \dots, Q)$ 则计算其对应的空间锥角

$$\cos \psi_{p,q} = \frac{\lambda f_d^{p,q}}{2V} \quad (10)$$

根据式(11)—式(13)计算确定其对应的空域角频率及空域导向矢量

$$w_s(\psi_{p,q}) = \frac{2\pi d}{\lambda} \cos(\psi_{p,q}) \quad (11)$$

$$S'_s(w_s(\psi_{p,q})) = [1, \exp(jw_s(\psi_{p,q})), \dots, \exp(j(N-1)w_s(\psi_{p,q}))]^H \quad (12)$$

$$s'_{p,q} = s'_s(w_s(\psi_{p,q})) \otimes s_t(w_t) \quad (13)$$

进一步计算新的滤波器权系数

$$w'_{p,q} = \mu \hat{R}_x^{-1} s'_{p,q} \quad (14)$$

其中， \hat{R}_x 与式(8)相同， $\mu = \frac{1}{s'^H_{p,q} \hat{R}_x^{-1} s'_{p,q}}$ 。

利用 $w'_{p,q}$ ($p = 1, 2, \dots, P; q = 1, 2, \dots, Q$)对其对应的距离多普勒单元再次进行滤波，计算滤波后“目标”信杂噪比 $SCNR'_p$ 。通过比较 $SCNR_p, SCNR'_p$ 数值的大小，即可剔除离散旁瓣杂波，确定真实目标

$$\text{“目标”} = \begin{cases} \text{真实运动目标, } SCNR_p \gg SCNR'_p \\ \text{离散旁瓣杂波, 其他} \end{cases} \quad (15)$$

该方法物理基础在于：如果检测到的“目标”为真实目标，则其一定位于天线主瓣方向；而第2次进行空时滤波时，其空域导向矢量指向天线旁瓣，因此此时真实目标信号会被抑制掉或造成幅度的极大衰落，而附近对应的背景杂波幅度会大幅度增加，从而使得信杂噪比极大降低，造成无法检测。而如果检测到“目标”为离散旁瓣杂波，其真实位置位于天线旁瓣，杂波抑制时由于空域导向矢量指向主瓣方向，因此除背景杂波外，对离散旁瓣杂波也会形成一定的抑制；而第2次滤波时，空域导向矢量即为杂波的空域导向矢量，离散旁瓣杂波及其背景杂波幅度均会相应增大，而信杂噪比变化不大。以上特征差异极为明显，从而可完成离散旁瓣杂波的可靠识别。

4 实测机载校飞数据处理

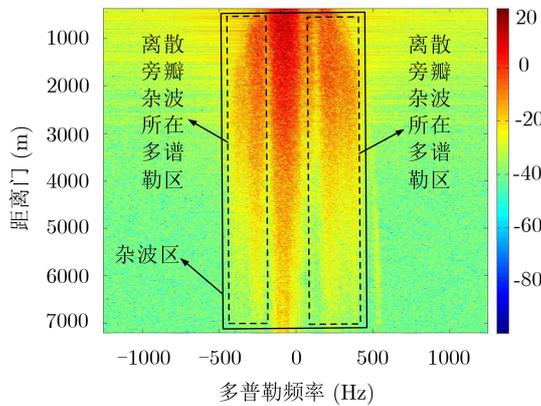
4.1 机载试验工作参数及数据分析

为验证本文所提方法的有效性，利用真实的机载校飞数据进行验证。机载雷达系统与天基雷达视角相同——雷达主瓣波束处于下视状态，雷达工作在L波段，采用相控阵体制天线，具备大范围扫描能力，天线全阵面发射，分为8个天线子阵沿方位向分别接收，雷达平台飞行高度为3300 m，配合靶机目标飞行高度为300 m。系统参数如表1所示。

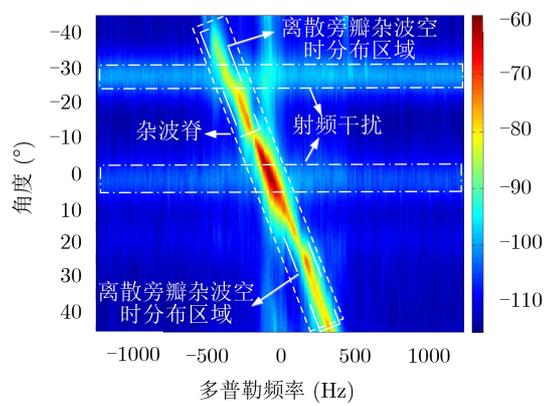
图2(a)显示了通道1的雷达原始回波数据经距离脉压及多普勒处理后的结果，如图所示此时目标靶机完全被杂波所淹没，无法检测。对于运动平台雷达杂波多普勒范围为 $[-2V/\lambda, 2V/\lambda]$ ，其中 V 为平台速度， λ 为雷达发射波长，其他区域为无杂波区，由图2(a)所示，此时杂波覆盖区域对应的多普勒范围为 $[-500 \text{ Hz}, 500 \text{ Hz}]$ (实线方框覆盖区域)，而其他区域为无杂波区；离散旁瓣杂波出现在该范围内天线旁瓣对应的多普勒区域(虚线方框覆盖区域)；而对于运动目标而言，其在多普勒的分布区域主要包括天线旁瓣对应的多普勒区域及无杂波区。因此对于目标和离散旁瓣杂波而言，均可能出现在天线旁瓣对应的多普勒区域，难以区分。由于此次试验为机载试验，飞机平台速度相对较慢，因此存在一定的无杂波区；实际上对于中低轨天基雷

表 1 机载雷达系统参数

主要系统参数	参数值
波段	L
信号带宽(MHz)	10
脉冲重复频率(Hz)	2500
雷达平台高度(m)	3300
目标靶机高度(m)	300
接收通道数目	8



(a) 通道1距离多普勒域数据(取分贝显示)



(b) 机载多通道雷达回波的空时谱分布(取分贝显示)

图 2 雷达真实回波数据分析

达而言, 卫星平台速度极快, 一般空中/海面/地面目标很难进入无杂波区, 因此其在多普勒区域的分布与离散旁瓣杂波是完全重叠的。

图2(b)显示了此组实测数据的空时谱分布。根据第2节分析, 对于离散旁瓣杂波, 虽然其与背景分布式杂波存在一定的差异, 但是其空时谱分布一致, 离散旁瓣杂波处于杂波脊中的天线方位旁瓣部分(图2(b)白色虚线方框区域)。而目标由于存在自身运动, 其在空时平面的分布处于天线主瓣波束内的非杂波脊的波束主瓣区域。本文方法正是基于以上空时谱分布差异, 实现真实运动目标与离散旁瓣杂波的识别。此外由于此次试验电磁环境较为复杂, 存在来自不同方向的窄带射频干扰, 如图中点划线标注部分, 射频干扰主要来自 -28° 和 0° 附近。

4.2 背景分布式杂波抑制及目标检测

本文采用相邻3多普勒通道的EFA算法进行杂波抑制, 然后进行恒虚警检测。EFA算法空时自适应滤波器响应如图3(a)所示, 沿杂波脊方向形成滤波器凹口; 同时在来自 -28° 左右天线旁瓣方向的射频干扰也形成滤波器凹口, 从而对干扰可形成有效抑制; 而来自 0° 附近方向的射频干扰, 由于其来自天线的主瓣波束附近, 不能利用空时自适应处理进行有效滤除, 但是由于该射频干扰功率较低, 且不会在距离多普勒域内形成有效积累, 因此未对目标检测造成影响。图3(b)显示了主瓣波束角度滤波器响应的1维切片, 可以看出滤波器对主瓣杂波区域可以形成高达50 dB的凹口, 从而可以有效滤除背景杂波。图3(c)显示了滤波器沿着空域方向的1维切片, 可以看出在发射波束方向形成最高增益, 在 -28° 附近射频干扰方向形成凹口, 比滤波器峰值增益低20 dB以上。

但是对于离散旁瓣杂波一方面由于其向后散射强度大; 另一方面为降低非均匀杂波对背景杂波协方差矩阵估计的影响需要进行样本筛选, 剔除非均匀样本^[15]; 因此会造出离散旁瓣杂波无法被有效抑制。

空时自适应滤波器背景杂波抑制处理结果图4所示, 由图可见对比无杂波区, 背景杂波基本抑制到噪声水平, 在距离多普勒可检测到3个“目标”, 其对应的“目标”距离、多普勒频率及输出信杂噪比如表2所示。

由于此次试验中只有1个合作靶机目标, 而试验中检测到的3个“目标”, 可能存在其他非合作目标或离散旁瓣杂波, 因此需要识别并剔除离散旁瓣杂波。

注: 需要指出的是, 如无特殊说明本节表中显示的距离并非“目标”与雷达之间的真实距离, 真实距离需要在表中距离基础上加上回波采集时延对应的距离3 km。

4.3 离散旁瓣杂波判别

为验证本文所提方法的有效性和稳健性, 分别采用保护通道法和本文提出的方法进行离散旁瓣杂波和真实目标的判别。

(1)保护通道法数据处理: 首先采用传统保护通道法进行离散旁瓣杂波判别。保护通道法实现的重要条件在于: 保护通道的主瓣波束宽度远高于主通道的主瓣波束宽度; 而保护通道的主瓣波束增益应低于主通道的主瓣波束增益, 高于主通道的旁瓣波束增益(如图5所示)^[11,12]。

虽然真实运动目标和离散旁瓣杂波均出现在天线旁瓣对应的多普勒区域, 但真实目标处于主天线的主瓣波束, 而离散旁瓣杂波处于主天线的旁瓣波束内。由图5易知, 真实目标与离散旁瓣杂波判别准则如下:

(a)对于真实运动目标, 主天线内的目标幅度大于保护天线;

(b)对于离散旁瓣杂波, 主天线内的目标幅度小于保护天线。

试验采用8个通道中的第1个通道作为保护通道, 8个通道合成通道为主通道。其中保护通道波束宽度为合成通道的8倍; 保护通道主瓣增益比合成主通道主瓣增益低9 dB左右, 而比合成通道的旁

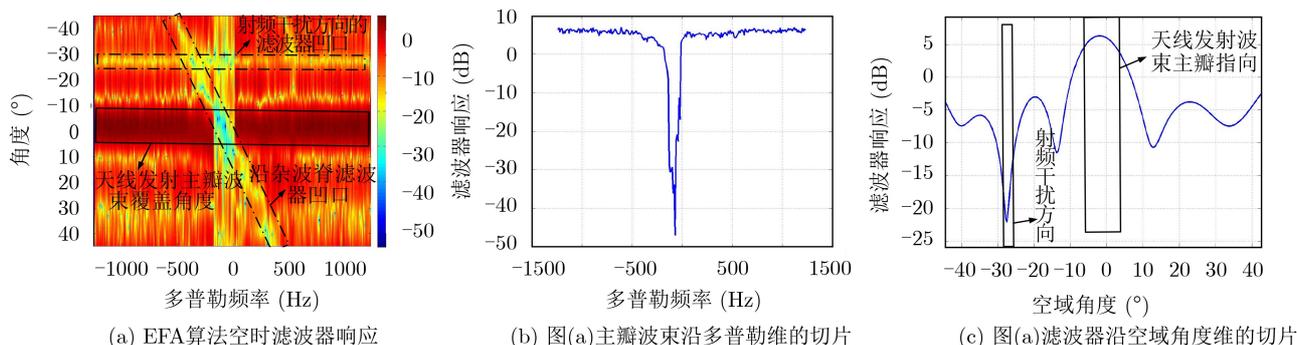


图3 EFA算法空时滤波器响应

瓣增益高5 dB以上；因此满足保护通道法的应用条件。STAP杂波抑制后检测到“目标”的幅度及其在对应的保护通道中的幅度如表3所示。

根据表3所示，此时保护通道的所有“目标”幅度均高于主通道，因此均为离散旁瓣杂波应予以剔除。由于此次试验为配合目标试验，目标靶机与雷达平台飞行轨迹通过GPS进行了严格同步(如图6所示)，检测到的目标中必定包含真实目标。

通过上述试验结果可知，保护通道法实际上出现了判断错误造成了真实目标的漏警。分析主要原因在于，保护通道法通常不考虑背景杂波的影响，而试验中为了与天基雷达进行等效，雷达波束主瓣

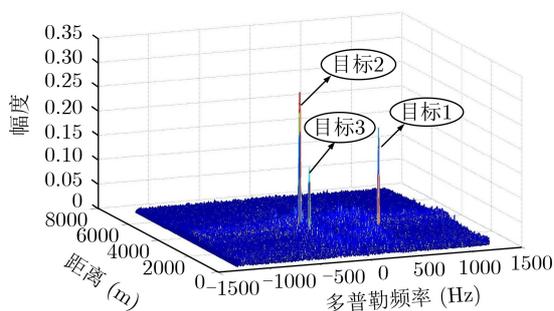


图4 STAP杂波抑制后“目标”检测结果

表2 “目标”检测结果

序号	距离(m)	多普勒频率(Hz)	输出信杂噪比(dB)
1	1578	330	22.8
2	2907	-270	23.6
3	2268	-260	21.7

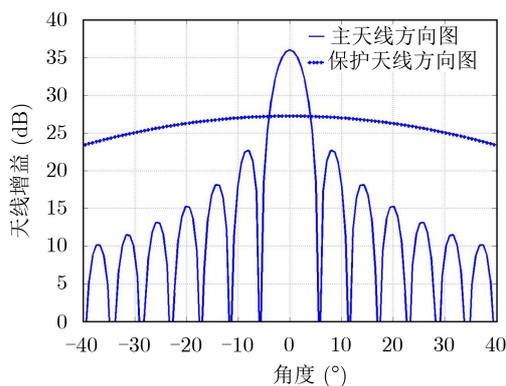


图5 保护天线方向图与主天线方向图关系示意

表3 保护通道与合通道“目标”幅度对比

序号	主通道幅度	保护通道幅度
1	0.22	0.76
2	0.25	0.73
3	0.17	0.56

完全处于下视状态，背景杂波回波功率大，对判别造成影响。经过推导可知，对于保护通道法，在背景杂波条件下，真实目标不会被误判为离散旁瓣杂波的条件应满足式(16)

$$\frac{|F_m^{(T)}(\psi_1)F_g^{(R)}(\psi_1)\sigma_{bc}(\psi_1)+F_m^{(T)}(\psi_0)F_g^{(R)}(\psi_0)RCS_{tar}|}{|F_m^{(T)}(\psi_0)F_m^{(R)}(\psi_0)RCS_{tar}|} < 1 \quad (16)$$

其中， ψ_0 为雷达发射主瓣波束对应的空间锥角； $\psi_1 = \arccos\left(\frac{V\cos(\psi_0)+V_r}{V}\right)$ ，为与目标竞争的背景杂波对应的空间锥角， V 为平台速度， V_r 为目标与雷达之间的径向速度； $F_m^{(T)}$ 、 $F_m^{(R)}$ 分别表示主通道的发射和接收方向图， $F_g^{(R)}$ 表示保护通道的接收方向图；目标雷达截面积表示为 RCS_{tar} 。

同样假设空间锥角 ψ_2 处存在1个离散旁瓣杂波，则对于保护通道法，在背景杂波条件下，离散旁瓣杂波不会被误判为真实运动目标的条件应满足式(17)

$$\frac{|F_g^{(R)}(\psi_2)(\sigma_{bc}(\psi_2)+RCS_{DSC}(\psi_2))|}{|F_m^{(R)}(\psi_2)RCS_{DSC}(\psi_2)|} > 1 \quad (17)$$

其中， RCS_{DSC} 表示离散旁瓣杂波的雷达截面积。易知当不考虑背景杂波，即 $\sigma_{bc}(\psi_1)=0$ 时，式(16)、式(17)分别退化为 $F_g^{(R)}(\psi_0) < F_m^{(R)}(\psi_0)$ 和 $F_g^{(R)}(\psi_2) > F_m^{(R)}(\psi_2)$ ，显然对于保护通道法一定满足该条件。对于天基雷达由于主瓣波束指向地球，受强背景杂波影响，当不满足式(16)、式(17)时，会造成误判。

(2)基于空时导向约束的离散旁瓣杂波判别方法数据处理：下面采用本文所提方法对检测到的3个“目标”进行判别分析。根据本文第3节，首先假设检测得到的“目标”均为离散旁瓣杂波，分别对各个“目标”多普勒单元及附近单元计算空域导向矢量，然后重新获得新的滤波器权系数，并利用各自的滤波器分别对3个“目标”距离多普勒单元

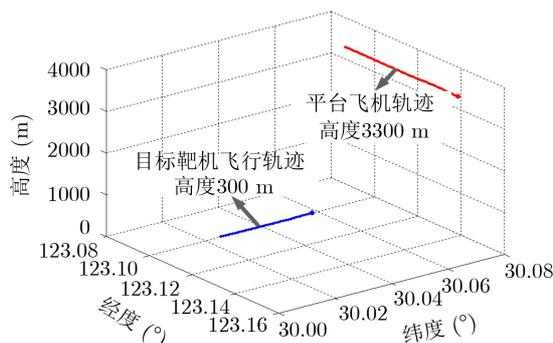


图6 GPS记录的雷达平台飞机与目标靶机飞行轨迹

及其附近单元重新进行滤波处理(需要指出的是, 兼顾算法性能和计算复杂度, 对检测到的“目标”及其附近距离多普勒单元进行第2次滤波时, 选取“目标”周围距离多普勒单元数目只需要 32×32 个即可, 而无需对所有距离多普勒单元进行再次滤波)。处理结果如表4所示。

将表4与表2对比, 可知检测到的“目标1”和“目标2”, 经过再次自适应滤波后, 其输出信杂噪比变化不大, 仍然超过检测门限。而“目标3”经过再次自适应滤波后, 输出信杂噪比降低超过35 dB, 由于信杂噪比过低造成无法检测。分析主要原因在于: 利用空时自适应处理进行杂波抑制时, 对于真实运动目标而言, 输出为最优信杂噪比。对于离散旁瓣杂波虽然杂波抑制后高于背景噪声, 但同样形成了一定的能量损失。当按照多普勒与空域角度的空时耦合关系进行再次滤波时, 真实目标空域导向矢量存在失配, 此时真实目标会被抑制掉, 背景杂波会升高, 从而造成目标信杂噪比的大幅降低; 对于离散旁瓣杂波, 第2次滤波的滤波器空时响应与离散旁瓣杂波及背景杂波空时谱的分布是完全匹配的, 因此离散旁瓣杂波与周围单元的背景杂波的能量均会大幅度增加, 输出信杂噪比变化不大(如图7所示)。从而可有效识别并剔除离散旁瓣杂波。根据式(15)可以判断, 只有“目标3”为真实目标, 其他2个均为离散旁瓣杂波。

此次试验为配合目标飞行试验, 数据处理结果与目标靶机GPS提供的信息完全匹配, 离散旁瓣杂

表4 重新滤波后的“目标”参数

序号	距离(m)	多普勒频率(Hz)	输出信杂噪比(dB)
1	1578	330	18.5
2	2907	-270	19.2
3	2268	-260	-17.1

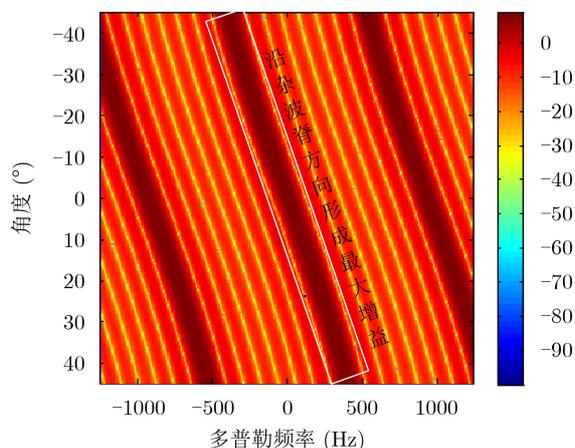


图7 第2次滤波的滤波器响应

波为从天线旁瓣进入雷达接收系统的舰船目标回波, 从而证明了方法的有效性。通过与传统保护通道法相对比, 本文方法不受天基雷达强背景杂波的影响, 具有更为良好的稳健性和适用性。

5 结束语

本文针对离散旁瓣杂波对天基预警雷达空中活动目标监视造成的虚警问题, 提出基于空时导向约束的天基雷达离散旁瓣杂波判别方法, 利用离散旁瓣杂波多普勒频率与空间角度的耦合关系实现真实目标与离散旁瓣杂波的识别。通过理论分析及实测数据处理证明本文方法具有稳健性高、计算复杂度低的优良特性。

参考文献

- [1] 杨晓超, 王伟伟, 张欣, 等. 一种天基雷达等距离环杂波仿真方法[J]. 现代雷达, 2018, 40(4): 13-17, 49. doi: 10.16592/j.cnki.1004-7859.2018.04.003.
YANG Xiaochao, WANG Weiwei, ZHANG Xin, et al. A simulation method of space-based radar iso-range ring clutter[J]. *Modern Radar*, 2018, 40(4): 13-17, 49. doi: 10.16592/j.cnki.1004-7859.2018.04.003.
- [2] SKOLNIK M I, 南京电子技术研究所译. 雷达手册[M]. 3版. 北京: 电子工业出版社, 2010: 148-152.
SKOLNIK M I, Nanjing Institute of Electronic Technology. Radar Handbook[M]. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010: 148-152.
- [3] LI Huiyong, BAO Weiwei, HU Jinfeng, et al. A training samples selection method based on system identification for STAP[J]. *Signal Processing*, 2018, 142: 119-124. doi: 10.1016/j.sigpro.2017.07.008.
- [4] WU Yifeng, WANG Tong, WU Jianxin, et al. Robust training samples selection algorithm based on spectral similarity for space-time adaptive processing in heterogeneous interference environments[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2015, 9(7): 778-782. doi: 10.1049/iet-rsn.2014.0285.
- [5] SUN Guohao, HE Zishu, TONG Jun, et al. Knowledge-aided covariance matrix estimation via Kronecker product expansions for airborne STAP[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2018, 15(4): 527-531. doi: 10.1109/LGRS.2018.2799329.
- [6] 李永伟, 谢文冲. 基于空时内插的端射阵机载雷达杂波补偿新方法[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(9): 2115-2122. doi: 10.11999/JEIT181131.
LI Yongwei and XIE Wenchong. A novel clutter spectrum compensation method for end-fire array airborne radar based on space-time interpolation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(9): 2115-2122. doi: 10.11999/JEIT181131.

- [7] WEN Cai, PENG Jinye, ZHOU Yan, *et al.* Enhanced three-dimensional joint domain localized STAP for airborne FDA-MIMO radar under dense false-target jamming scenario[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(10): 4154–4166. doi: [10.1109/jsen.2018.2820905](https://doi.org/10.1109/jsen.2018.2820905).
- [8] 刘斌, 何广军, 冯有前, 等. 静态和差波束匹配的空时自适应处理方法[J]. 西安电子科技大学学报: 自然科学版, 2017, 44(3): 138–143, 169. doi: [10.3969/j.issn.1001-2400.2017.03.024](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-2400.2017.03.024).
LIU Bin, HE Guangjun, FENG Youqian, *et al.* Static sum-and-difference beam matched STAP method[J]. *Journal of Xidian University*, 2017, 44(3): 138–143, 169. doi: [10.3969/j.issn.1001-2400.2017.03.024](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-2400.2017.03.024).
- [9] XU Huajian, YANG Zhiwei, HE Shun, *et al.* A generalized sample weighting method in heterogeneous environment for space-time adaptive processing[J]. *Digital Signal Processing*, 2018, 72: 147–159. doi: [10.1016/j.dsp.2018.10.005](https://doi.org/10.1016/j.dsp.2018.10.005).
- [10] 侯静, 胡孟凯, 王子微. 一种改进的知识辅助MIMO雷达空时自适应处理方法[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(4): 795–800. doi: [10.11999/JEIT180557](https://doi.org/10.11999/JEIT180557).
HOU Jing, HU Mengkai, and WANG Ziwei. An improved knowledge-aided space-time adaptive signal processing algorithm for MIMO radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(4): 795–800. doi: [10.11999/JEIT180557](https://doi.org/10.11999/JEIT180557).
- [11] SHNIDMAN D A and TOUMODGE S S. Sidelobe blanking with integration and target fluctuation[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2002, 38(3): 1023–1037. doi: [10.1109/TAES.2002.1039418](https://doi.org/10.1109/TAES.2002.1039418).
- [12] NARASIMHAN R S, VENGADARAJAN A, and RAMAKRISHNAN K R. Mitigation of sidelobe clutter discrete using sidelobe blanking technique in airborne radars[C]. 2018 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, USA, 2018: 1–10.
- [13] BAO Zheng, WU Shunjun, LIAO Guisheng, *et al.* Review of reduced rank space-time adaptive processing for airborne radar[C]. International Radar Conference, Beijing, China, 1996: 766–769.
- [14] 何友, 关键, 孟祥伟, 等. 雷达目标检测与恒虚警处理[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2011: 40–50.
HE You, GUAN Jian, MENG Xiangwei, *et al.* Radar Target Detection and CFAR Processing[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2011: 40–50.
- [15] YANG Xiaopeng, LIU Yongxu, HU Xiaona, *et al.* Robust generalized inner products algorithm using prolate spheroidal wave functions[C]. 2012 IEEE Radar Conference, Atlanta, USA, 2012: 581–584.
- 王伟伟: 男, 1982年生, 高级工程师, 研究方向为天基雷达系统设计、阵列信号处理、SAR成像。
段崇棣: 男, 1971年生, 研究员, 研究方向为天基雷达系统设计、天基微波遥感技术。
张欣: 男, 1987年生, 工程师, 研究方向为星载SAR信号处理。
李渝: 男, 1989年生, 工程师, 研究方向为天基雷达微弱目标检测技术。
杨晓超: 男, 1983年生, 高级工程师, 研究方向为空时自适应处理技术、天基雷达设计。

责任编辑: 马秀强