

基于 STAP 的电离层杂波抑制方法

张鑫¹, 毛滔², 邓维波¹

(1. 哈尔滨工业大学电子与信息工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;
2. 海军司令部第四部, 北京 100841)

摘要: 高频地波超视距雷达能够完成视距外的海洋环境监测以及目标检测与跟踪,但是电离层杂波的存在会使高频地波超视距雷达的目标检测和跟踪等性能严重降低,特别是当目标方位与电离层杂波方位一致或相近时,目标检测难度大大增加。利用实测数据分析了电离层杂波的相关性,根据电离层杂波的特点,提出了基于空时自适应处理方法抑制电离层杂波,并通过实测数据,验证了方法的有效性。

关键词: 高频地波超视距雷达; 相关性; 空时自适应处理; 杂波抑制

中图分类号: TN 911.7

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1001-506X.2013.06.08

Ionospheric clutter suppression method based on STAP

ZHANG Xin¹, MAO Tao², DENG Wei-bo¹

(1. School of Electronics and Information Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
2. The Fourth Department of Headquarters of Navy, Beijing 100841, China)

Abstract: The high frequency surface wave radar (HFSWR) can accomplish the marine environmental monitoring, targets detecting and tracking over the horizon. Due to the ionospheric clutter, the performance is reduced seriously. Especially, the detection of the target is more difficult when the direction of arrival (DOA) of the target is approximately with the ionospheric clutter. The correlation of the ionospheric clutter is analyzed by utilizing the measured data. According to these characteristics, a method is proposed to suppress the ionospheric clutter based on space time adaptive processing (STAP), and it is proved by utilizing the measured data.

Keywords: high frequency surface wave radar (HFSWR); correlation; space time adaptive processing (STAP); clutter suppression

0 引言

高频地波超视距雷达(high frequency surface wave radar, HFSWR)依靠高频垂直极化电磁波能够沿海洋表面绕射传播的机理,实现对海面舰船目标和低空飞行目标的超视距探测。因其探测范围大、作用距离广、全天候等特点成为世界各国的研究热点之一。一般来说,影响高频地波雷达对目标探测性能的因素主要有海杂波、电离层杂波、电台干扰和环境噪声等^[1]。其中,由于电离层运动的不规律性,不同的地理位置、不同的季节、不同的时间,电离层的运动状态都不相同,至今仍没有公认的结论来描述电离层。电离层状态变化的复杂性使得电离层杂波的特性非常复杂,至今为止,如何抑制电离层杂波,实现受电离层杂波污染区域内的目标探测问题一直是研究的热点问题^[2]。

HFSWR 的信号处理需要进行较长时间的脉冲积累,

在这个积累的过程中,电离层是快速变化的,而且变化是不规律的,这就导致信号处理后电离层杂波覆盖的多普勒单元很多。如果有目标淹没在电离层杂波中,应用时域或频域自适应滤波目标也很难被检测出来;此外,由于 HFSWR 的阵列孔径相比于信号波长较小,导致波束很宽,而电离层自身的片状结构也会导致回波处理后电离层杂波会占据较宽的角度范围。E 层电离层杂波具有一定的方向性^[3-4],当目标方位与电离层杂波方向不一致时,应用自适应旁瓣对消的方法可以很好地抑制电离层杂波^[5]。对于目标方位与电离层杂波方向一致的情况,自适应旁瓣对消的方法就无能为力了,因此当目标方位与电离层杂波方向相近或一致时,无论是时域还是空域,都不能利用单一维度对电离层杂波进行抑制。而空时自适应处理(space time adaptive processing, STAP)可以有效解决这一问题。STAP 是于 20 世纪 70 年代提出的^[6],目前已成为世界主流研究方向,在机

载雷达系统中主要应用于均匀杂波和非均匀杂波的抑制^[7-10]。此外,在机载共形天线^[11]、星载雷达、通信、声纳、导航、语音麦克风阵列等多种军用/民用领域也得到应用^[12-14]。在高频地波雷达领域,澳大利亚、加拿大等国家已经开展了相应的研究,并获得了大批的数据和实验结果^[15-18]。文献[18]依据高频地波雷达中的电波传播理论建立了较符合加拿大本地电离层杂波特性的角度-多普勒二维数学模型,并分析了几种经典的 STAP 方法,并在此基础上,有学者提出了一些改进算法^[19]。局域联合处理(joint domain localised, JDL)方法是经典 STAP 方法的一种,它具有计算量小的特点^[20]。但 JDL 是一种统计类的 STAP 方法,它的杂波抑制性能依赖于训练样本的相关性,对于相关性强的训练样本,杂波抑制性能较好。然而文献[18]没有明确指出在何种条件下可以应用 STAP 方法抑制电离层杂波。

本文结合 JDL 方法的原理特点,在理论上分析了 HFSWR 系统中电离层杂波的距离相关性,针对距离相关性强的电离层杂波,给出了一种适用于 HFSWR 系统的 JDL 改进方法,该方法不但对电离层杂波有很好的抑制作用,同时还解决了目标方向与电离层杂波方向相同或相近时的杂波抑制问题以及目标检测问题。

1 HFSWR 杂波特性分析

由于 HFSWR 发射天线阵的非理想性,除了绝大部分能量沿海面传播外,还有一部分能量离开海面射向空中,在一定条件下,这部分能量被电离层直接反射,又被非理想的接收天线阵所接收,从而形成了电离层杂波。由于电离层的分层不均匀结构、非平稳特性以及传播模式,决定了电离层杂波干扰的复杂性。因此,对电离层杂波的抑制是高频地波雷达研制中的一个技术难点。电离层杂波干扰抑制技术及效果在很大程度上依赖于对电离层杂波特性的理解^[2]。

1.1 电离层杂波的空时特性

首先对电离层杂波的空时特性进行分析。将回波信号进行距离处理、速度处理和数字波束形成,在一个距离单元内得到回波的角度-多普勒功率谱如图 1 所示。在多普勒速度为±32 km/h 的两条谱线为一阶海杂波,在一阶海杂波谱线中间散落的“条状点”为疑似目标。

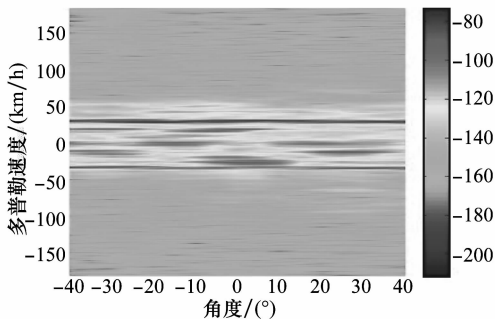


图 1 角度-多普勒功率谱

对于受电离层影响的区域,雷达系统实测数据经过距离压缩、速度处理和数字波束形成,得到的处理结果如图 2 所示。由处理结果可知,在 144 ~162 km 范围内存在很强的 E 层电离层杂波,并且 E 层电离层杂波出现在 20°~30° 范围内,利用文献[3]中的方法分析该条状电离层杂波的方向性,结果如图 3 所示。可以看出,条状电离层杂波具有很强的方向性,这也印证了文献[3]的结论。图 4 为图 3 的局部放大图。虽然条状电离层杂波的方向性很强,但是在多普勒速度为[-60 km/h, -50 km/h]的局部范围内,其杂波的来波方向并不是一个恒定的值,而是随多普勒速度变化的,即空时耦合性。通过对不同的实测数据进行类似的分析,其中的电离层杂波在某些局部范围内均表现出一定的空时耦合性,因此在表现出空时耦合性的电离层杂波范围内应用 STAP 方法可以得到更好的杂波抑制效果,并且更有利于目标的检测。

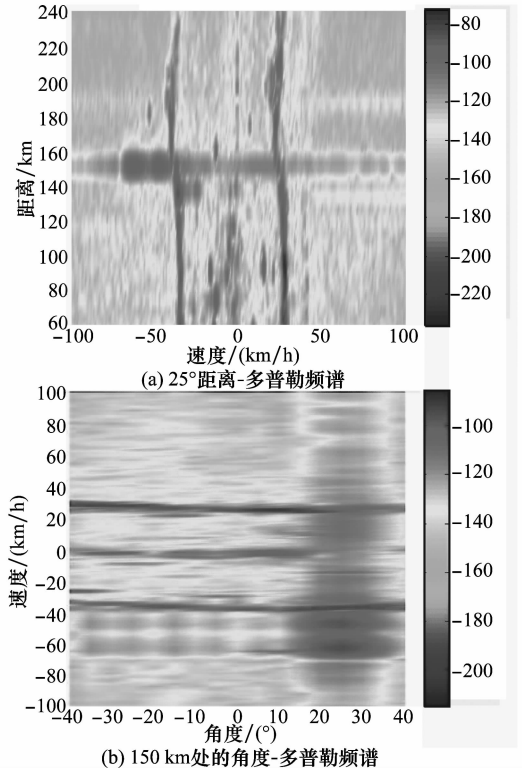


图 2 HFSWR 实测数据

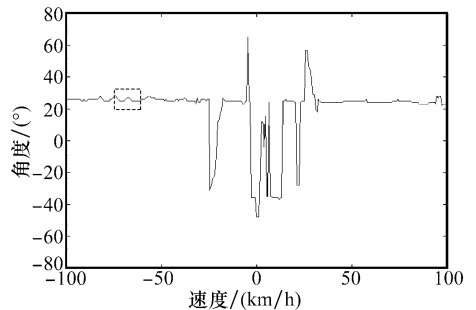


图 3 150 km 处杂波的角度-多普勒关系

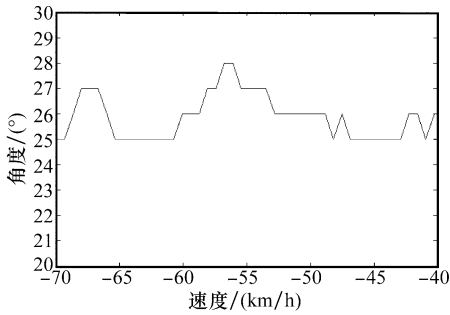


图 4 150 km 处杂波角度-多普勒关系的局部放大

1.2 电离层杂波的相关性分析

特征向量可以表示空间某一区域内的目标、杂波、干扰、噪声的特性,利用这一物理意义,分析电离层杂波的距离相关性。在一个距离单元上,选择 4 个多普勒单元和 3 个角度单元构成的空时杂波区域来计算协方差矩阵,这样,通过特征分解可以得到 12 个特征向量。那么哪个或者哪些特征向量可以代表此杂波区域的特性呢?这就需要分别计算它们的贡献值。

计算贡献值及分析相关性的方法如下。

步骤 1 计算空时杂波区域的空时协方差矩阵 R_x ;

步骤 2 对 R_x 进行特征分解,得到 12 个特征值 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{12}$ 以及相对应的 12 个特征向量 V_1, V_2, \dots, V_{12} ;

步骤 3 计算各个特征向量的贡献值 $\lambda_i (V_i, X) (i=1, 2, \dots, 12)$;

步骤 4 观察各特征向量的贡献值,选出贡献值较大的特征向量代表该空时杂波区域的特性,由于 HFSWR 中杂波是多种多样的,在一个空时杂波区域内可能同时存在多种杂波干扰,对于受多种杂波影响的区域,贡献值较大的特征向量可能不止一个,那么就用它们的矢量和来代表该空时杂波区域的特性;

步骤 5 按照步骤 1~步骤 4 的方法,在相邻的距离单元内,分别得到可以代表相应的空时杂波区域的特征向量;

步骤 6 对步骤 5 中得到的一组特征向量计算它们的相关性。

以高频电台干扰为例,验证上述方法的合理性。高频电台发射多为水平极化,但经过电离层信道后,两种极化(水平、垂直)分量都有,其中的垂直分量被 HFSWR 接收,形成了一种非蓄意的干扰。高频电台干扰是一个窄带谱,能量通常集中在一个窄的频带内,并且具有明显的方向性。在电台干扰方向的距离-多普勒谱上表现为在一个较窄的多普勒范围内,贯穿几乎全部的距离范围。由于高频电台要求在不同距离的用户都能接收到信号,因此对 HFSWR 而言,高频电台干扰在距离上应表现出很强的相关性。

图 5 给出了 HFSWR 波束指向为 20° 时的距离-多普勒谱。可以看出多普勒速度为 89 km/h,距离在 80 km 以上存

在明显的高频电台干扰。利用特征向量分析高频电台干扰的距离相关性如图 6 所示。可以看出,在高频电台干扰明显占优的距离范围(80 ~ 171 km, 198 ~ 350 km)相关性系数均大于 0.95,表现出很强的距离相关性;在 171 ~ 198 km 范围内,由于同时存在高频电台干扰和电离层杂波,距离相关性略微变差。由此证明利用特征向量分析杂波的相关性是合理的。

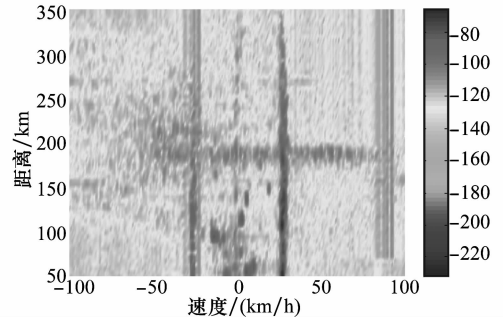


图 5 HFSWR 实测数据 2(20°方向的距离-多普勒频谱)

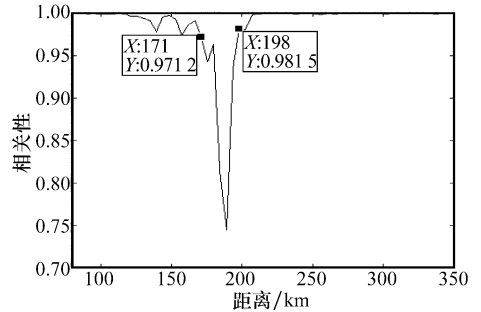


图 6 电台干扰的距离相关性

下面分析电离层杂波的距离相关性。

选择以 55 km/h 为中心的 4 个多普勒单元、以 25° 为中心的 3 个角度单元组成的杂波单元,分析其距离相关性,如图 7 所示。从分析得到的相关性曲线可知,在 E 层电离层杂波占优的距离范围(144 ~ 162 km)内,相关性很强。经过对多批实测数据进行同样的分析,均可以得到相同的结论,即这种条状电离层杂波在距离上表现出很强的相关性,其相关系数可以达到 0.8 以上。

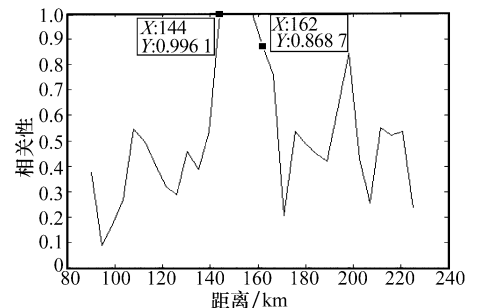


图 7 E 层电离层杂波的距离相关性

2 适用于 HFSWR 的 JDL 方法

理想的全空时自适应处理方法要求回波数据样本满足两个条件:①杂波样本服从独立同分布;②杂波样本数不小于二倍的杂波自由度^[21]。

HFSWR 系统中,由于回波复杂,很难满足独立同分布的条件。此外,较长的积累时间使得杂波自由度很大,也就需要大量的杂波样本,这在实际系统中也是很难满足的。降维 STAP 相比于全空时自适应处理方法具有计算量小的优点,因此成为空时自适应处理方法的研究重点。

JDL 是降维 STAP 方法的一种经典的统计类方法。它通过一个变换矩阵 \mathbf{T} ,降低杂波自由度,再利用距离上的信息进行统计,估计出杂波的协方差矩阵,从而求得最优空时权向量。该方法既解决了样本数有限的问题,又降低了计算量,但是对样本数据的相关性要求较高。根据上文对 E 层电离层杂波距离相关性的分析,E 层电离层杂波具有很强的距离相关性,因此可以应用 JDL 方法对 E 层电离层杂波进行抑制。

假设雷达系统的情况是这样的:由 N 个阵元组成的均匀线阵,阵列间距为 d ,一个积累周期内包含 M 个脉冲,脉冲重复周期为 T ,系统采样率为 f_s 。对于一个给定的距离门, N 个阵元得到的采样数据构成一个 N 维的向量,每个阵元在一个积累周期内的数据构成一个 M 维的向量,这样在一个距离门内就构成了一个 $N \times M$ 维的空时快拍矩阵。

$$\mathbf{X}_l = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \cdots & x_{1,M} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \cdots & x_{2,M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N,1} & x_{N,2} & \cdots & x_{N,M} \end{bmatrix} \quad (1)$$

按照同样的矩阵结构,目标信号 \mathbf{S} 可以写成 $N \times M$ 维的矩阵,它由空间导向矢量 $\mathbf{a}(\phi_i)$ 和时间导向矢量 $\mathbf{b}(f_i)$ 构成。

$$\mathbf{a}(\phi_i) = [1 \ Z_s \ Z_s^2 \ \cdots \ Z_s^{N-1}]^T \quad (2)$$

$$\mathbf{b}(f_i) = [1 \ Z_t \ Z_t^2 \ \cdots \ Z_t^{M-1}]^T \quad (3)$$

式中, $Z_s = e^{j2\pi \frac{d}{\lambda} \sin \phi_i}$; $Z_t = e^{j2\pi \frac{f_i}{f_s}}$

那么,信号 \mathbf{S} 就可以表示为

$$\mathbf{S} = \mathbf{a}(\phi_i) \mathbf{b}^T(f_i) \quad (4)$$

定义空时指向向量为

$$\mathbf{v}(\phi_i, f_i) = \mathbf{b}(f_i) \otimes \mathbf{a}(\phi_i) \quad (5)$$

为了便于后面的计算,对 \mathbf{X} 和 \mathbf{S} 做拉直处理,即

$$\mathbf{X}_l = \text{Vec}(\mathbf{X}_l) \mathbf{S} = \text{Vec}(\mathbf{S}) \quad (6)$$

JDL 算法通过一个变换矩阵 \mathbf{T} 将采样数据变换到所关心的区域,称为局部处理区域(local process region, LPR),以实现降维。因此,如何选择变换矩阵 \mathbf{T} 成为影响 JDL 算法性能的决定性因素。正如上文中提到的,文献[22]对如

何选择局部处理区域进行了讨论:在 JDL 算法中,局部处理区域选择得越大越有利于杂波的抑制,但是同时也增加了的计算量。在 HFSWR 系统中,综合考虑杂波抑制效果和计算量两方面问题,局部处理区域选择 3 个角度单元、4 个多普勒单元较为合适;此外,为了保证训练样本中尽可能少的保留目标信息,选择一个频率保护单元。

本文综合考虑上述两种观点,对局部处理单元进行优化,从而使 JDL 方法更加适用于 HFSWR 系统。

改进的 JDL 算法的变换矩阵 \mathbf{T} 可以表示为

$$\mathbf{T} = [\mathbf{b}(f_{-2}) \ \mathbf{b}(f_0) \ \mathbf{b}(f_2) \ \mathbf{b}(f_3)] \otimes [\mathbf{a}(\varphi_{-1}) \ \mathbf{a}(\varphi_0) \ \mathbf{a}(\varphi_1)] \quad (7)$$

这样,降维后的采样数据和空时指向向量可以表示为

$$\tilde{\mathbf{X}}_l = \mathbf{T}^H \cdot \mathbf{X}_l, \tilde{\mathbf{v}} = \mathbf{T}^H \cdot \mathbf{v} \quad (8)$$

由输出信杂噪比最大准则,得到最优权的表达式为

$$\mathbf{W}_{opt} = \hat{\mathbf{R}}^{-1} \cdot \tilde{\mathbf{v}} \quad (9)$$

式中, $\hat{\mathbf{R}}$ 为杂波和干扰的协方差矩阵,表示为

$$\hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{K} \sum_0^{K-1} \tilde{\mathbf{X}}_l \tilde{\mathbf{X}}_l^H \quad (10)$$

式中, $K \geq 2\eta_a \eta_d$, $\eta_a = 3$, $\eta_d = 4$ 。

3 应用 JDL 方法处理结果

HFSWR 不可能获得宽的信号带宽,因此其距离分辨力较差,一般在 km 量级,而它的角度分辨力也很差。因此,对目标的分辨主要是靠多普勒速度分辨来实现。

从前文中对 JDL 方法的描述中可以知道,JDL 算法的核心问题是估计出的协方差矩阵 $\hat{\mathbf{R}}$ 是否能准确地代表待检测单元的杂波特性。如果用于估计协方差矩阵的训练数据样本 $\tilde{\mathbf{X}}_l$ 在距离上表现出很好的相关性,那么,估计出的协方差矩阵 $\hat{\mathbf{R}}$ 就可以很好地代表待检测单元的杂波特性,由此协方差矩阵求得的最优权向量就可以很好地抑制杂波。

结合第 2 节中分析的实测中频数据,E 层电离层杂波在多普勒速度为 $[-60 \text{ km/h}, -50 \text{ km/h}]$,角度为 $[25^\circ, 28^\circ]$ 范围内存在空时耦合性。如果目标恰好出现在这个范围内,且能量较小,应用数字波束形成以及恒虚警处理都不能检测出目标。此外,由于杂波的空时耦合性,单纯地应用一维杂波抑制方法或者空时级联的方法,都不能很好地抑制杂波、检测目标,此时正是发挥 JDL 方法优势的时候。在该片电离层杂波中加入一个仿真目标,应用 JDL 方法进行处理。目标参数信息如表 1 所示,其中目标方位与电离层杂波的来波方位很接近。

表 1 仿真目标参数

距离/(km)	多普勒速度/(km/h)	方位/(°)	目标强度/dB
150	-55	25	-115

计算待检测单元的特征向量贡献值和统计出的协方差矩阵的特征向量的贡献值,如图 8 所示。分别取出贡献值

最大的特征向量计算它们的相关系数,其相关系数为 0.804 2。可以认为,统计出的协方差矩阵可以体现出待检测单元的杂波特性。

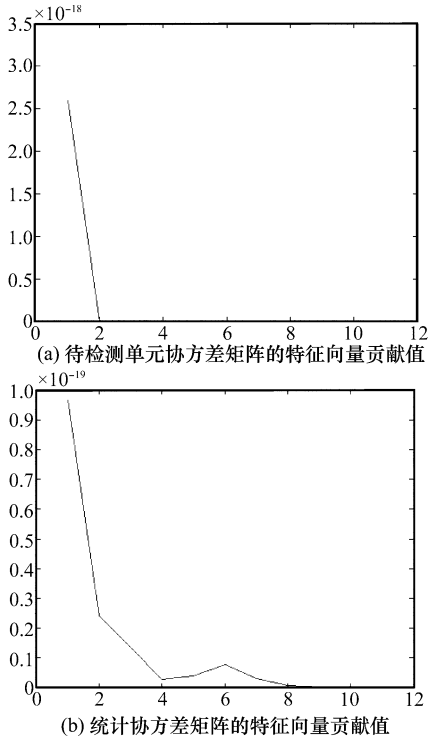


图 8 特征向量贡献值

改进的 JDL 方法与一维自适应波束形成处理方法得到的信噪比损失如图 9 所示。由于电离层杂波在局部具有空时耦合性,应用自适应波束形成会产生比较宽的零陷,而应用改进的 JDL 方法虽然零陷的深度有所减弱,但是零陷的宽度要更窄一些,更有利于目标方位与电离层杂波的方位相近时的检测。

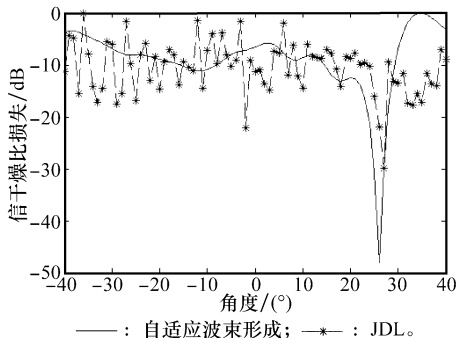


图 9 信噪比损失

应用改进的 JDL 方法进行处理,得到的距离-多普勒频谱和目标所在距离单元的多普勒速度剖面图如图 10 所示,其中箭头所示位置为目标位置。应用常规处理方法,即距离上的匹配滤波、多普勒速度处理和数据波束形成级联处理,目标被淹没在电离层杂波中;由于目标与杂波方位相近,应用自适应波束形成方法,在对消掉杂波的同时,目标

也被对消掉了;应用改进的 JDL 方法,电离层杂波得到有效的抑制的同时,原本淹没在电离层杂波内的仿真目标也被检测出来。

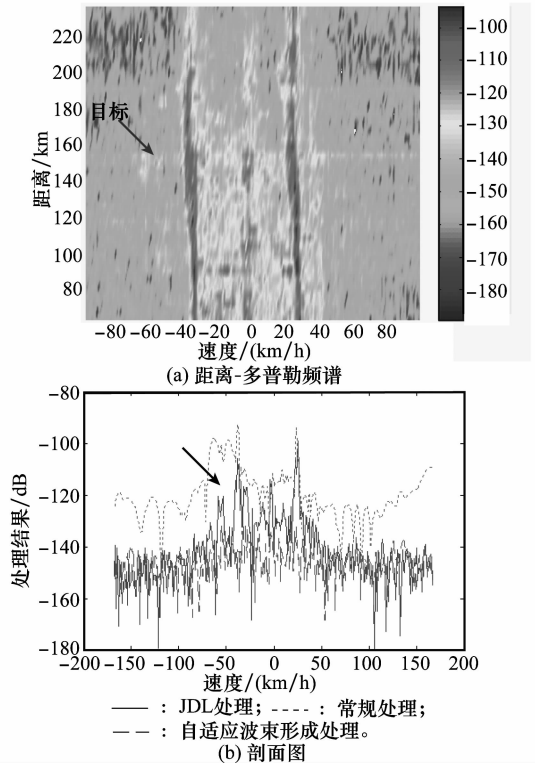


图 10 改进的 JDL 方法处理后结果

因此,当目标方位与电离层杂波方向一致或接近时,应用改进的 JDL 方法抑制电离层杂波、检测目标具有很好的效果。

4 结 论

本文针对高频地波超视距雷达中电离层杂波背景,结合 STAP 方法的原理,分析了电离层杂波的特性,认为当电离层杂波在局部具有一定的空时耦合特性,并且距离相关性很好,相比于频域或空域的自适应处理,应用统计类的 STAP 方法(如 JDL 方法)可以得到更好的杂波抑制效果。本文只对条状的电离层杂波进行分析及抑制性能仿真,而实际系统中电离层杂波的种类是复杂多样的,其特性也不尽相同,因此对电离层杂波特性进行全面的分析将是下一步研究的重点,并继续研究抑制的方法。

参考文献:

[1] Mao T, Xia W M, Qu C P, et al. A study on characteristics and applications of HF ground wave OTH radar[J]. *Modern Radar*, 2009, 31(3):7-10. (毛滔,夏卫民,曲翠萍,等. 高频地波超视距雷达特点及应用研究[J]. 现代雷达, 2009, 31(3):7-10.)

[2] Zhou W Y, Jiao P N. *Over the horizon radar* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008: 226-228.

- (周文瑜, 焦培南. 超视距雷达技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 226 - 228.)
- [3] Jiang W, Deng W B. Characteristic research of ionospheric clutter over the horizon HFSWR[C]//*Proc. of the IET International Radar Conference*, 2009: 1 - 8.
- [4] Jiang W, Deng W B, Shi J L. Characteristic study of ionospheric clutter in high-frequency over the horizon surface wave radar[C]//*Proc. of the IEEE Youth Conference on Information, Computing and Telecommunication*, 2009: 154 - 157.
- [5] Li L. Study on adaptive interference mitigation technique in high frequency surface wave radar[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007. (李雷. 高频雷达自适应抗干扰技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.)
- [6] Brennan L E, Reed I S. Theory of adaptive radar[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1973, 9(2): 237 - 252.
- [7] Bidon S, Besson O, Tournet J Y. Knowledge-aided STAP in heterogeneous clutter using a hierarchical Bayesian algorithm[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2011, 47(3): 1863 - 1879.
- [8] Zhu X M, Li J, Stoica P. Knowledge-aided space-time adaptive processing[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2011, 47(2): 1325 - 1336.
- [9] Wu J, Wang T, Meng X, et al. Clutter suppression for airborne non-sidelooking radar using ERCB-STAP algorithm[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2010, 4(4): 497 - 506.
- [10] Zheng Y R, Shao T, Blasch E. A fast-converging space-time adaptive processing algorithm for non-Gaussian clutter suppression[J]. *Digital Signal Processing*, 2012, 22(1): 74 - 86.
- [11] Duan K, Xie W C, Wang Y L. Analysis and suppression for nonstationary clutter in airborne conformal array radar[C]//*Proc. of the IEEE 10th International Conference on Signal*, 2010: 2087 - 2091.
- [12] Melvin W L. A STAP overview[J]. *IEEE Trans. on AES Magazine Special Tutorial Issue*, 2004, 19(1): 19 - 35.
- [13] Letestu F. Space-time-adaptive processing for navigation[C]//*Proc. of the International Radar Symposium*, 2011: 769 - 773.
- [14] Xie J H, Yuan Y S, Liu Y T. Suppression of sea clutter with orthogonal weighting for target detection in shipborne HFSWR[J]. *IEE Radar Sonar and Navigation*, 2002, 149(1): 39 - 44.
- [15] Fabrizio G, Holdsworth D, Farina A. Experimental HF radar trial of real-time STAP[C]//*Proc. of the Waveform Diversity and Design Conference*, 2007: 316 - 320.
- [16] Adve R S, Hale T E, Wicks M C. Practical joint domain localized adaptive processing in homogeneous and nonhomogeneous environments Part I: Homogeneous environments[J]. *IEE Radar Sonar and Navigation*, 2000, 147(2): 57 - 65.
- [17] Adve R S, Hale T E, Wicks M C. Practical joint domain localized adaptive processing in homogeneous and nonhomogeneous environments, part 2: Nonhomogeneous environments[J]. *IEE Radar Sonar and Navigation*, 2000, 147(2): 66 - 74.
- [18] Ravan M, Saleh O, Adve R S, et al. KB-STAP implementation for HFSWR (final report)[R]. Toronto: University of Toronto, 2008.
- [19] Saleh O, Adve R S, Riddolls R J. Fast fully adaptive processing: a multistage STAP approach[C]//*Proc. of the IEEE Radar Conference*, 2009: 1 - 6.
- [20] Wang H, Cai L J. On adaptive spatial-temporal processing for airborne surveillance radar systems[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1994, 30(3): 660 - 670.
- [21] Reed I S, Mallett J D, Brennan L E. Rapid convergence rate in adaptive arrays[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1974, 10(6): 853 - 863.
- [22] Wang Z Z. Research on STAP-based ionospheric clutter suppressing method in high frequency surface wave radar[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (王振中. 基于 STAP 的高频雷达电离层杂波抑制方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.)

作者简介:

张鑫(1986-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为阵列信号处理、空时自适应信号处理。

E-mail: zhangxinhit@hit.edu.cn

毛滔(1979-), 男, 博士, 主要研究方向为雷达系统、雷达信号处理。

E-mail: emailtomaotao@163.com

邓维波(1961-), 通讯作者, 男, 教授, 博士, 主要研究方向为阵列信号处理、目标识别。

E-mail: dengweibo@hit.edu.cn