

基于局域模板的 STAP 非均匀检测器*

陈宇翔,高立宁

(北京理工大学 雷达技术研究所,北京 100081)

摘要:分析了 STAP(Space Time Adaptive Processing)中强干扰目标影响传统非均匀检测器性能的机理,针对强干扰目标引起的非均匀检测器性能下降和传统自适应功率剩余(APR)方法运算量大的问题,提出了一种基于局域模板的非均匀检测器(Local Template NHD,LT-NHD)。该方法不需要进行协方差矩阵求逆的耗时运算,便能获得较高的运算效率;此外,其检测不易受训练样本中的强目标样本影响,能获得比传统方法更为鲁棒的检测性能。实测数据实验验证了本文方法的有效性。

关键词:STAP; 非均匀检测器; 局域模板

中图分类号:TN957 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2013)03-0132-06

Nonhomogeneous detector for STAP based on local template technique

CHEN Yuxiang, GAO Lining

(Radar Research Laboratory, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract:The key mechanism of strong target influence over the STAP nonhomogeneous detector was analyzed. Then, considering the declining performance of nonhomogeneous detector with strong interference targets, and the high computational complexity of traditional APR method, a new nonhomogeneous detector based on local template was presented. Compared with the traditional methods, the method proposed can obtain high computational efficiency and more robust detection performance. Finally, experiments with the actual data proved the effectiveness of the proposed model.

Key words:STAP(Space Time Adaptive Processing); nonhomogeneous detector; local template

机载预警雷达通常工作在极其复杂的电磁环境中,其主要任务是检测强杂波和干扰背景下的低速、弱小目标,这要求雷达系统能做到实时的杂波和干扰抑制。STAP 由于具有同时在空域和时域抑制杂波的能力,近年来成为机载雷达抑制杂波的关键技术。机载雷达 STAP 方法是通过训练样本估计杂波或者干扰的协方差矩阵,继而进行自适应权值求解,最终达到抑制杂波和干扰的目的。在协方差矩阵的估计过程中,要假设所有参加训练的数据样本满足独立同分布(IID)^[1-3]的条件才能获得理想的性能,一旦训练样本中包含干扰目标,就会使杂波协方差矩阵的估计出现偏差。如果干扰目标的方向非常接近真实目标方向,会造成信号相消,导致自适应方向图主瓣畸变,影响目标的检测性能。这时候就必须通过非均匀检测方法剔除包含干扰目标的训练样本,提高协方差矩阵估计的精度,改善 STAP 性能。

最为常用非均匀检测器有两类,它们分别是

广义内积非均匀检测器(GIP-NHD)^[4-6]和自适应功率剩余非均匀检测器(APR-NHD)^[7-10]。由于 APR 方法的检测统计量具有相干积累的形式,因此其对干扰目标的检测性能应该优于 GIP 法。但是传统的 APR-NHD,在样本中包含有存在指向误差(与期望导向矢量失配)的强干扰目标信号时,会导致 APR-NHD 的自适应方向图主瓣严重畸变,影响 APR-NHD 的干扰目标检测性能。针对这个问题,文献[11]基于对角加载的原理提出了一种稳健的 APR 方法,但是该方法并没有考虑传统 APR 方法运算量较大的问题。

本文针对已有方法的不足提出了一种基于局域模板的非均匀检测方法(Local Template NHD, LT-NHD),该非均匀检测方法不仅不会受到训练样本中强干扰目标的干扰,而且还有较高的运算效率。最后通过著名的 MCARM 数据^[12-15]验证了本文方法的有效性。

* 收稿日期:2012-09-25

基金项目:国家自然科学基金重点项目(61032009)

作者简介:陈宇翔(1985—),男,湖南南县人,博士,E-mail:chenyuxiang@bit.edu.cn;

高立宁(通信作者),男,讲师,,博士后,E-mail:gaolining@bit.edu.cn

1 强干扰目标对 APR 的影响分析

在给出本文方法之前,先对强干扰目标影响 APR-NHD 性能的机理进行分析,这一小节通过理论推导和数据仿真相结合的方式进行说明。

这里先给出目标样本的表示形式,用 S_{iu} 表示干扰目标的方向(空时二维导向矢量), σ_{iu}^2 表示干扰目标的功率,则训练样本 X_l 表示如下

$$X_l = \sigma_{iu} S_{iu} + n_l \quad (1)$$

其中 n_l 为样本中的均匀杂波和噪声。当备选的训练样本中含有干扰目标时,定义此时的样本协方差矩阵为

$$\hat{R}_{L+0} = R_h + \sigma_{iu}^2 S_{iu} S_{iu}^H \quad (2)$$

其中

$$\sigma_{iu}^2 = \frac{1}{L+O} \sigma_{iuo}^2 \quad (3)$$

重写 APR 的统计量

$$\eta_{APR}(X_l, \hat{R}_{L+0}) = |S^H \hat{R}_{L+0}^{-1} X_l|^2 \quad (4)$$

令

$$W = \frac{\hat{R}_{L+0}^{-1} S}{S^H \hat{R}_{L+0}^{-1} S} = \frac{1}{\mu} \hat{R}_{L+0}^{-1} S \quad (5)$$

则式(4)可以改写为

$$\begin{aligned} \eta_{APR}(X_l, \hat{R}_{L+0}) &= |S^H \hat{R}_{L+0}^{-1} X_l|^2 \\ &= \frac{1}{\mu^2} |W^H X_l|^2 \\ &= \frac{1}{\mu^2} |\sigma_{iu} W^H S_{iu} + W^H n_l|^2 \end{aligned} \quad (6)$$

由于 W 是

$$\begin{cases} \min_W W^H \hat{R}_{L+0} W \\ \text{s. t. } W^H S = 1 \end{cases} \quad (7)$$

的最优解。根据自适应波束形成的原理,当 $S_{iu} \neq S$ 时, W 会将 S_{iu} 对应的信号加以抑制,使得 $W^H S_{iu} \approx 0$, 此时的干扰目标将被抑制,APR-NHD 的输出为残留的杂波。而且如果 σ_{iu} 值越大,则导致自适应方向图的零陷越深,这样不仅强干扰目标本身很难被检出,还会影响到 S 邻近方向的其他弱功率干扰目标的剔除,最终影响 STAP 的检测性能。

通过式(6)可以看出,APR-NHD 的输出不仅与干扰目标的功率有关,还与干扰目标的导向矢量 S_{iu} 和待检测方向的导向矢量 S 之间的相对位置(即角度的偏移量和多普勒频率的偏移量)有关。下面将给出这几个参数与 APR-NHD 输出的对应关系。为了便于评价 NHD 对干扰目标的检测性能,定义 NHD 输出的干杂噪比指标如下

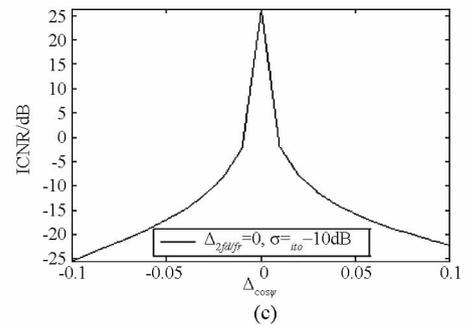
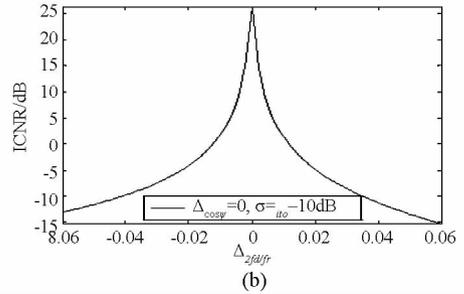
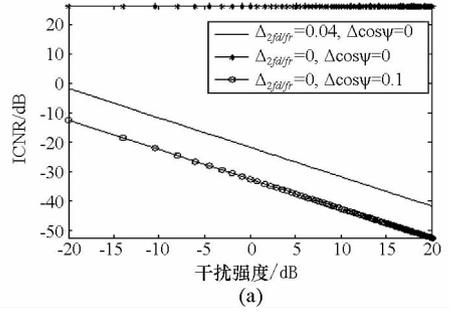


图1 APR-NHD 的输出 ICNR 曲线图

Fig. 1 The ICNR curve of APR-NHD

$$ICNR = \frac{Power_{it_cell}}{\text{mean}([Power_{ref_cell}])} \quad (8)$$

它表示的是 NHD 输出的干扰目标功率与其邻近参考单元平均功率的比值,这个指标在一定程度上表征了非均匀检测器对干扰目标的检测性能。

在图1的数据仿真中,角度偏移量用 $\Delta_{cos\psi}$ 表示,多普勒频率偏移用 $\Delta_{2fd/fr}$ 表示。这里选取了著名的 MCARM 实测数据中 195 到 391 号距离单元,第一行阵元前 8 个脉冲数据。在 313 号距离门插入了一个干扰目标,通过观察干扰目标所在距离门输出的 ICNR 来分析强干扰目标对非均匀检测器的性能影响。图1(a)中给出了在角度、多普勒频率偏移量固定的情况下,干扰目标的强度变化时其自身 ICNR 曲线。图1(b)中给出了在目标幅度、角度偏移量固定的情况下,干扰目标的多普勒偏移量变化时其自身的 ICNR 曲线。图1(c)中给出了在目标幅度、多普勒偏移量固定的情况下,干扰目标的角度偏移量变化时其自身的 ICNR 曲线。总的来说,图中的数值结果表明:当角度、多普勒的偏移量越小

时, ICNR 会越大, 也即非均匀检测器的性能越好; 而随着偏移量和干扰目标功率的增加, 非均匀检测器的性能逐渐下降。

2 基于局域模板的非均匀检测方法

通过考察角度 - 多普勒域的局域范围内的功率分布特性发现, 在包含强目标的数据样本中, 对于角度 - 多普勒域中目标所在的局域, 功率分布会呈现一定的规律; 而在没有目标或者包含微弱目标的数据样本中, 角度 - 多普勒域中局域功率的分布更多的是呈现出随机性, 受杂波分布的影响比较大。本文从杂波、目标的局域功率分布特性的差异入手, 提出一种基于局域模板的干扰目标检测方法。该方法的流程如图 2 所示。

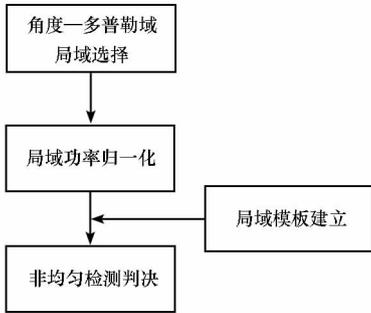


图 2 基于局域模板的非均匀检测器框图
Fig. 2 The frame of nonhomogeneous detector based local template

2.1 局域选择

由于将数据变换到角度 - 多普勒域后有一个明显优势: 杂波按多普勒频率和角度局域化了, 每个角度 - 多普勒波束体现了某个多普勒频率在某个空域角度上的回波功率。因此本文方法首先将空时二维数据变换到角度 - 多普勒域。变换过程可以表示为

$$Y_{LPR} = T^H X = \sigma_{ii} \begin{bmatrix} \vdots \\ S_i^H(f_n - \Delta f_i) S_{ii}(f_{i0}) \\ S_i^H(f_n) S_{ii}(f_{i0}) \\ S_i^H(f_n + \Delta f_i) S_{ii}(f_{i0}) \\ \vdots \\ \vdots \\ S_s^H(f_m - \Delta f_s) S_{ii}(f_{s0}) \\ S_s^H(f_m) S_{ii}(f_{s0}) \\ S_s^H(f_m + \Delta f_s) S_{ii}(f_{s0}) \\ \vdots \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} \vdots \\ S_s^H(f_m) S_{ii}(f_{s0}) \\ S_s^H(f_m + \Delta f_s) S_{ii}(f_{s0}) \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中的 T 表示空时二维数据的域变换矩阵, 需要注意的是上式中忽略了噪声项。

2.2 局域功率归一化

考虑到真实场景中的杂波环境比较复杂, 杂波沿距离有可能剧烈变化。为了消除这种功率非均匀情况带来的影响, 这里对每个距离门的局域波束的功率进行归一化, 表达式如下

$$Y_{LPR-norm} = Y_{LPR} / \max(Y_{LPR}) \quad (10)$$

2.3 局域模板建立

根据局域选取的维度建立 $\eta_s \times \eta_i$ 的检测模板, 这里综合考虑运算量和鲁棒性的因素, 选取 3×3 的模板, 如图 3 所示。

A_{11}	A_{12}	A_{13}
A_{21}	A_{22}	A_{23}
A_{31}	A_{32}	A_{33}

图 3 局域模板示意图
Fig. 3 The figure of local template

式中 A_n 为模板系数, 根据域变换导向矢量特性的不同, 系数选择也会稍有区别。当我们在式 (9) 中的时域导向矢量采用傅立叶系数, 而空域导向矢量分别使用实测导向矢量和理想的傅立叶系数时, 使用的模板系数会有如图 4 的区别。处理 MCARM 数据时使用的就是实测的空域导向矢量。值得注意的是, 这里的模板系数的总和为零, 它对应的是完全理想的均匀杂波区的非均匀检测器, 输出为 0。

-1	2	-1	-1	-1	-1
-1	2	-1	-1	8	-1
-1	2	-1	-1	-1	-1

图 4 不同空域导向矢量情况下使用的模板系数
Fig. 4 The template coefficient in different conditions

2.4 非均匀检测判决

在定义非均匀检测的检验判决量之前, 先给出局域中各个波束的功率输出表达式, 如图 5 所示。那么 LT-NHD 的检验判决量可以表示为

$$Out_{NHD} = \sum_{m=1}^{\eta_s} \sum_{n=1}^{\eta_i} A_{mn} \rho_{mn} \quad (11)$$

可以根据 Out_{NHD} 的大小来判断样本是否含有

干扰目标,对于不含干扰目标的均匀杂波样本来说,其输出应该是均值近似为零的随机序列。而对于包含目标的单个样本来说,其输出应该随多普勒通道间的信杂噪比决定,并随着信杂噪比的增加而收敛。包含强干扰目标样本的 Out_{NHD} 应该明显高于不含干扰目标的样本。

ρ_{11}	ρ_{12}	ρ_{13}
ρ_{21}	ρ_{22}	ρ_{23}
ρ_{31}	ρ_{32}	ρ_{33}

图5 局域波束归一化功率

Fig. 5 Normalized power of local beam

2.5 时间复杂度分析

为了便于比较 LT-NHD 与 APR-NHD 的时间复杂度,这里认为这两种方法的局域变换时间复杂度相当,令自由度为 N_{DOF} ,LT-NHD 每个步骤的时间复杂度如表 1 所示。

表 1 LT-NHD 的时间复杂度

Tab. 1 Time complexity of LT-NHD

步骤		时间复杂度
局域功率	求最大值	$O(N_{DOF})$
归一化	乘加	$2O(N_{DOF})$
非均匀检测输出		$O(N_{DOF})$
总计		$4O(N_{DOF})$

对于常规的 APR-NHD 来说,每一次求解非均匀检测判决量的运算过程,如果直接用矩阵求逆计算,复杂度约为 $O(N_{DOF}^3)$,如果能够采用递推更新的方法计算,复杂度能降为 $O(N_{DOF}^2)$ 。图 6 给出了三种情况下时间复杂度随系统自由度的变化情况,可以看出,当系统自由度大于 4 时,LT-NHD 方法的优势开始体现,随着系统自由度的增加,其优势越发明显。如此看来,LT-NHD 能够有效减小干扰目标检测这个环节的运算量。

3 数据实验

LT-NHD 作为一种新的非均匀检测器,我们认为它不仅具备传统非均匀检测器的基本功能,并且还要能够克服以上提到的传统非均匀检测器的不足。本节的实验数据来源为著名的 MCARM 数据,实验的内容可以分为两部分,第

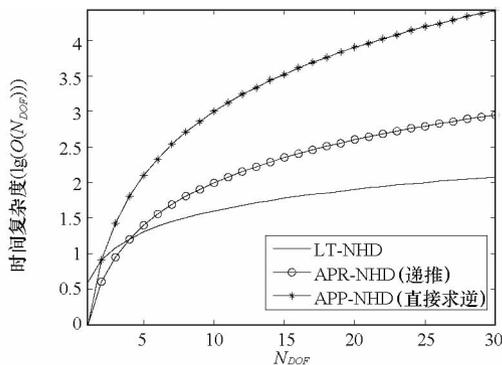


图 6 不同方法时间复杂度对比图

Fig. 6 The comparison of complexity in different methods

一部分是对基本功能的分析和验证,考察该非均匀检测器的基本特性;第二部分是针对本文方法是否能够解决传统方法的不足进行对比验证。

(1)实验 1:分析 LT-NHD 随干扰强度、角度、多普勒偏移的变化趋势

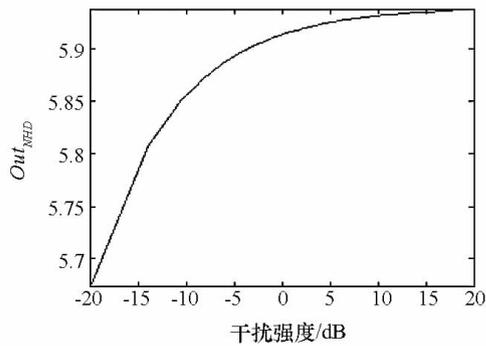
本实验首先考察了角度、多普勒方向没有偏移的情况下 LT-NHD 输出与干扰强度的关系,从图 7(a)中能够看出,随着干扰强度的逐渐增加,LT-NHD 输出渐渐地趋于收敛,这是由于局域范围内目标所在多普勒通道与邻近多普勒通道的功率比值逐渐趋近于无穷大,这与前面的分析是一致的。图 7(b)考察了 LT-NHD 输出与多普勒偏移量的关系,其中 $\Delta_{\cos\psi} = 0, \sigma_{iio} = -10\text{dB}$,LT-NHD 输出随着多普勒频率的偏移会有稍微的下降,这是由目标导向矢量与期望导向矢量匹配程度逐渐降低造成的,但理论上还是会明显高出杂波样本的 LT-NHD 输出。图 7(c)考察了 LT-NHD 输出与角度偏移量的关系,其中 $\Delta_{2/d/r} = 0, \sigma_{iio} = -10\text{dB}$,LT-NHD 输出随着角度的偏移也会有下降,这也是由目标导向矢量与期望导向矢量匹配程度逐渐降低造成的。

(2)实验 2:比较 LT-NHD 和 APR-NHD 对于干扰目标(无方向偏差)的检测性能

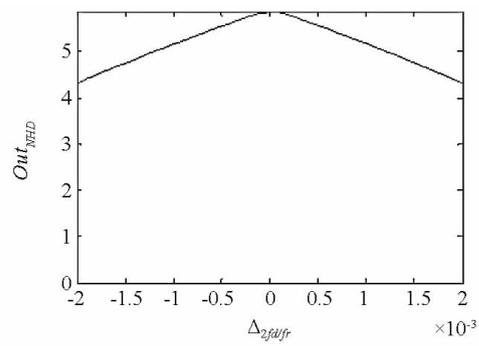
非均匀检测器的首要任务就是能够检测待检测方向上的干扰目标,排除其对真实目标检测的影响。LT-NHD 作为一种新的非均匀检测器,它也应该达到这个基本要求。本实验的目的就是检验 LT-NHD 对于干扰目标的检测性能,并与传统的 APR-NHD 进行比较。

在实测数据中插入的目标信息为:270,290,320,300 号距离门, $\sigma_{ii} = -10\text{dB}$,方向与待检测的方向一致。给出了两种方法的每个距离门的非均匀检测输出,上图对应 LT-NHD,下图对应 APR-NHD。从图 8 上可以看出两种方法的性能相当。

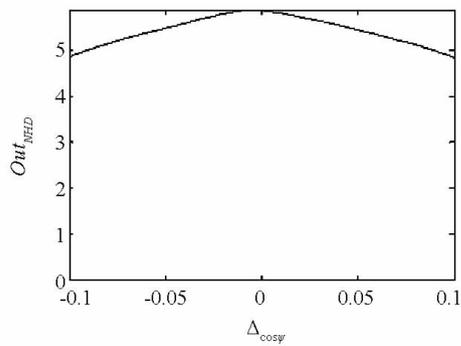
因此,我们可以得出:LT-NHD 已经具有传统非均匀检测器具有的基本功能。



(a)



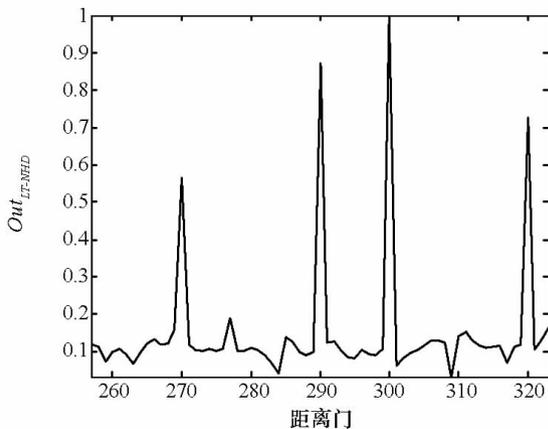
(b)



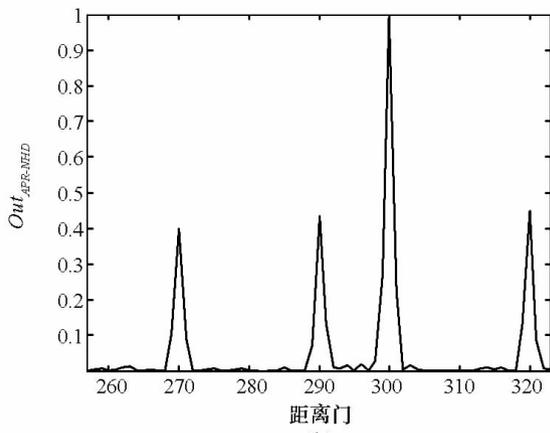
(c)

图 7 LT-NHD 的输出 ICNR 曲线图

Fig.7 The ICNR curve of LT-NHD



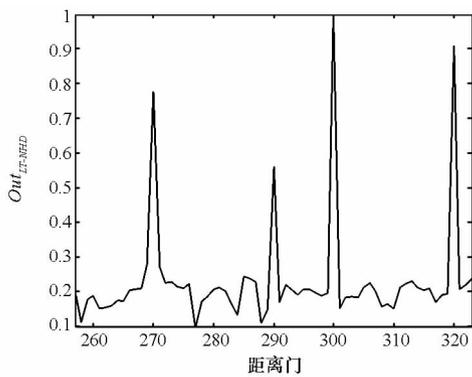
(a)



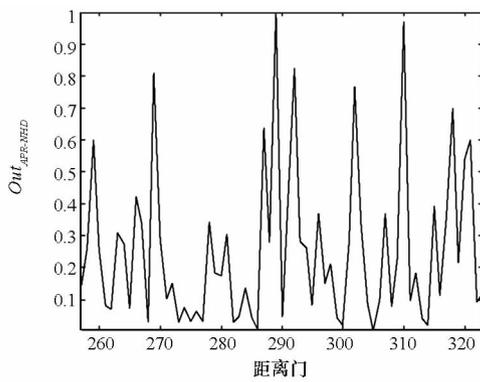
(b)

图 8 多个干扰目标(无方向偏差)情况下不同方法的检测性能比较

Fig.8 The detection performance comparison of different methods in multiple interference target (no direction deviation) situations



(a)



(b)

图 9 多个干扰目标(有方向偏差)情况下不同方法的检测性能比较

Fig.9 The detection performance comparison of different methods in multiple interference target (direction deviation) situations

(3)实验 3:比较 LT-NHD 和 APR-NHD 对于干扰目标(有方向偏差)的检测性能

在前面我们指出了 APR-NHD 在面对导向矢量失配的强干扰目标时有些无能为力。需要指出的是,这里讨论的偏差最大值应远小于 STAP 算法处理中的频率分辨率和角度分辨率。因此对于

LT-NHD,我们也有必要考察其在面对导向矢量失配的干扰目标时的性能。图9中给出了数据处理结果。其中,干扰目标的距离分别为270,290,320,300号距离门, $\sigma_{ii} = -10\text{dB}$, $\Delta_{\cos\theta} = 0.1$, $\Delta_{2fd/fr} = 0.02$ 。在这种情况下,传统的APR-NHD基本已经失效,LT-NHD的检测性能则可以保持得比较好。由此我们可以得出:有偏差的强干扰目标对LT-NHD的检测性能不会造成明显的影响,LT-NHD较APR-NHD有更好的鲁棒性。

4 结论

本文针对非均匀环境下干扰目标的检测方法展开研究,首先分析了导向矢量失配的强干扰目标影响APR-NHD性能的机理,然后针对在强干扰目标的导向矢量失配时非均匀检测器性能显著下降的问题,在进一步考虑减小传统非均匀检测器运算量的基础上,提出了一种基于局域模板的非均匀检测器:不需要进行协方差矩阵求逆的耗时运算,从而能获得较高的运算效率;其检测不受训练样本中的强目标样本影响,能获得比传统方法更为鲁棒的检测性能。上述方法最后通过实测数据进行了验证。

参考文献 (References)

- [1] Reed I S, Mallett J D, Brennan L E. Theory of adaptive radar [J]. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 1973, 9(2):237-251.
- [2] 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.
- [3] Brennan L E, Mallett J D, Reed I S. Adaptive arrays in airborne MTI radar [J]. IEEE Trans. on Antennas and Propagation, 1976, 24(5): 607-615.
- [4] Chen P. On testing the equality of covariance matrices under singularity[R]. Report for AFOSR Summer Faculty Research Program. Rome, NY: Rome Laboratory, 1994.
- [5] Chen P. Partitioning procedure in radar signal processing problems [R]. Final Report for AFOSR Summer Faculty Research Program, Rome Laboratory, Rome, NY, August 1995.
- [6] Melvin W L, Wicks M C, Brown R D, Assessment of multichannel airborne radar measurements for analysis and design of space-time processing architecture and algorithms [C]//Proceedings of IEEE National Radar Conf., An Arbor, MI, May 1996: 130-135.
- [7] Adve R S, Hale T B, Wicks M C. Practical joint domain localized adaptive processing in homogeneous and nonhomogeneous environments. 2. Nonhomogeneous environments [C]//IEEE Proceedings, Radar, Sonar, Navigation, 2000,147(2): 66-74.
- [8] Blunt S D, Gerlach K. Efficient robust AMF using the FRACTA algorithm[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2005,41(2): 537-548.
- [9] Gerlach K. Efficient reiterative censoring of robust STAP using the FRACTA algorithm [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Radar, 2003:57-61.
- [10] Gerlach K, Blunt S, Picciolo M. Robust adaptive matched filtering using the FRACTA algorithm[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2004,40(3):929-945.
- [11] Cao J S, Wang X G. A robust method for censoring the interference-targets[C]//Proceedings of International Conference on Communications, Circuits and Systems (ICCCAS07), Fukuoka, Japan, July, 2007, 1:362-365.
- [12] Little M O, Berry W P. Real-time multichannel airborne radar measurements[C]//Proceedings of IEEE International Conference Radar Syracuse, New York, 1997.
- [13] Yang Z. A STAP approach to estimate drift angle and aircraft velocity[C]//Proceedings of IEEE Radar Conference, 2006.
- [14] Picciolo M L, Gerlach K. A robust loaded reiterative median cascaded canceller[C]//Proceedings of IEEE Radar Conference, 2004, 249-254.
- [15] Bertacca M. Airborne radar STAP using long-memory clutter models[C]//Proceedings of IEEE Radar Conference, 2008:1-6.