

文章编号: 2095-4980(2020)01-0123-06

基于两级检测的全距离维自适应空域滤波方法

张 炜, 郑 坤

(电子信息控制重点实验室, 四川 成都 610036)

摘 要: 目标信号混入训练数据时, 自适应空域滤波的权值在距离维实时更新会造成信号自相消的现象。针对这一问题, 提出一种基于两级检测处理的全距离维更新计算权值的方法。第一级处理进行样本选择, 将强目标信号检测出来, 并剔除出训练数据; 第二级处理进行自适应波束形成和目标检测。仿真结果说明提出的方法能够在整个距离维更新自适应权值, 适合于警戒雷达对抗旁瓣干扰。

关键词: 空域滤波; 两级检测; 雷达抗干扰

中图分类号: TN911.72

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2018195

Two stages detection based adaptive spatial filtering for updating the weights in the whole range domain

ZHANG Wei, ZHENG Kun

(Science and Technology on Electronic Information Control Laboratory, Chengdu Sichuan 610036, China)

Abstract: If the adaptive weights update in the whole range domain, the target signal may be contained in the training data, resulting in signals self-cancelling effect. To cope with such a reality problem, a two stages detection based method is discussed for updating the adaptive weights in the whole range domain when the training data is contaminated by the target signals. The main objective of the first stage is to select proper samples as training data, in which the range cells corrupted by target signal will be deleted from the training data. Then adaptive beamforming and detection processing will be performed in the second stage. The simulations show that the proposed method is capable of updating the adaptive weights in the whole range domain, and is suitable for early warning radar to suppress sidelobe jamming.

Keywords: spatial filtering; two stages detection; jamming suppression for radar

随着数字处理技术的发展, 基于自适应阵列处理理论的旁瓣干扰消除技术, 如旁瓣对消(Side Lobe Cancelling, SLC)、自适应波束形成(Adaptive Beamforming, ABF)等, 已在工程领域得到长足发展。自适应阵列处理技术的基本原理是正常接收主瓣方位信号, 同时尽量减少从旁瓣进入的信号, 即波束图在干扰进入方向处形成零陷^[1]。SLC 和 ABF 技术原理和处理过程一样, 都是通过计算一个权值对接收的多通道信号加权。在计算权值时, 一个重要的环节是如何得到干扰加噪声的协方差矩阵。传统雷达一般在信号休止期得到训练数据, 然后由训练数据估计干扰加噪声协方差矩阵。一般认为训练数据中不包含功率较强的目标信号, 否则会造成信号自相消的现象, 即目标信号也会被当成干扰而消除^[2-3]。远距离的真实目标回波很弱, 如果目标数据混入训练数据, 估计的权值不会明显降低 SLC 和 ABF 算法的性能。因此, 传统雷达一般将训练数据采样区选择在回波的远距离段^[4]。

针对传统雷达用远距离段采样数据计算权值这一特点, 电子进攻方可以不在远距离段发射干扰信号, 这时计算的权值对干扰无任何对抗作用^[5-7]。为应对电子进攻方的这一技巧, 现代雷达应该研究在距离维进行权值实时更新计算的技术。鲁棒或稳健自适应波束形成技术可以保证在训练数据包含目标信号时, 计算的权值能够正常接收目标信号并抑制干扰^[8-11]。但稳健波束形成算法有如下不足之处: a) 算法只能缓解信号自相消现象, 当输入信噪较高时, 稳健波束形成算法的性能会严重下降; b) 基于约束和优化的稳健波束形成算法的性能与优化参数有关, 而优化参数只能通过经验选取^[12]; c) 基于约束的稳健波束形成算法的计算量较大, 不容易工程实现。

收稿日期: 2018-09-05; 修回日期: 2018-12-03

作者简介: 张 炜(1986-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事信号处理和机器学习在雷达和电子战中应用研究。email: zhangwei_edu@163.com

本文提出一种基于两级检测的自适应权值在全距离维实时更新的计算方法。其基本思想是通过第一级检测器将待检测距离段内的功率强的目标信号检测出来，然后将待检测距离段内不包含目标信号的数据作为训练数据，则计算的二级检测器的权值不会出现信号自相消现象。

1 自适应波束形成基本原理

考虑一个 M 阵元的线性阵列，接收的信号可以表示为：

$$\mathbf{x}[n] = \sum_{p=1}^P \mathbf{a}(\theta_p) s_p[n] + \mathbf{n}[n] \quad (1)$$

式中： $\mathbf{x}[n]$ 为阵列接收信号； $\mathbf{a}(\theta_p)$ 为干扰信号导向矢量； $s_p[n]$ 为第 p 个干扰信号； $\mathbf{n}[n]$ 为噪声，其方差为 σ_n^2 。

自适应波束形成的常用准则为最小方差无畸变准则。该准则可以表示为以下优化问题：

$$\min_{\mathbf{w}} \mathbf{w}^H \mathbf{R}_{xx} \mathbf{w} \quad \text{subject to} \quad \mathbf{w}^H \hat{\mathbf{a}} = 1 \quad (2)$$

式中： $\mathbf{w}$ 为权矢量； $\mathbf{R}_{xx}$ 为干扰加噪声协方差矩阵； $\hat{\mathbf{a}}$ 为假设的目标信号导向矢量。式(2)的解为：

$$\mathbf{w} = \frac{\mathbf{R}_{xx}^{-1} \hat{\mathbf{a}}}{\hat{\mathbf{a}}^H \mathbf{R}_{xx}^{-1} \hat{\mathbf{a}}} \quad (3)$$

实际应用中， $\mathbf{R}_{xx}$ 一般用不包含目标信号的训练数据估计的采样协方差矩阵 $\hat{\mathbf{R}}_{xx}$ 替代：

$$\hat{\mathbf{R}}_{xx} = \sum_{n=1}^N \mathbf{x}^H[n] \mathbf{x}[n] \quad (4)$$

在估计采样协方差矩阵 $\hat{\mathbf{R}}_{xx}$ 时，理论上训练数据只需要包含干扰和噪声的采样信息即可。传统雷达在接收回波信号的远距离区间选择训练数据，而灵巧干扰可以避开雷达的远距离区域施放干扰，造成雷达不能获取干扰样本^[13]。现代雷达可以在距离维实时更新计算采样协方差矩阵，但训练数据可能混入待检测的目标信号。当训练数据被强目标信号污染，用式(3)计算的权值会把目标信号当成干扰抑制，出现信号自相消现象。因此如果在估计采样协方差矩阵时将训练数据中混入的强目标信号剔除，则不会出现信号自相消现象。

2 两级检测原理及其在雷达自适应空域滤波中的应用

2.1 两级检测原理

两级检测的基本原理：首先通过第一级检测进行样本选择。由于含有强目标信号的样本数据的检测输出与大部分不包含目标的训练样本的检测输出显著不同，通过一些准则可以有效发现那些包含目标的样本数据^[14-15]。然后，选择没被目标信号污染的样本数据估计干扰加噪声的采样协方差矩阵并计算自适应权值。最后，用计算的权值对所有待检测的数据进行二级检测处理。

定义第一级检验统计量：

$$\eta = \left| \mathbf{a}^H \mathbf{R}_{xx}^{-1} \mathbf{x}_n \right| \quad (5)$$

式中 $\mathbf{x}_n$ 为某个样本信号。下面分别对训练数据有无混入目标信号这 2 种情况下的检验统计量进行分析。

假设某个样本除了包含干扰和噪声，还混入了目标信号，即：

$$\mathbf{x}_n = \mathbf{a} s[n] + \sum_{p=1}^P \mathbf{a}(\theta_p) s_p[n] + \mathbf{n}[n] \quad (6)$$

式中 $s[n]$ 为目标信号。

协方差矩阵 $\mathbf{R}_{xx}$ 包含干扰加噪声的二阶统计信息， $\mathbf{R}_{xx}$ 的特征分解表示为：

$$\mathbf{R}_{xx} = \mathbf{U}_j \mathbf{\Lambda} \mathbf{U}_j^H + \sigma_n^2 \mathbf{U}_n \mathbf{U}_n^H \quad (7)$$

式中： $\mathbf{\Lambda}$ 为由 P 个最大的主特征值 $\lambda_p (p=1, 2, \dots, P)$ 组成的对角矩阵； $\mathbf{U}_j$ 为主特征值对应的特征向量组成的干扰特征子空间； $\mathbf{U}_n$ 为噪声特征子空间。忽略样本中噪声的影响，由于干扰信号导向矢量与噪声子空间正交，式(5)检验统计量可表示为：

$$\eta_1 = \left| \mathbf{a}^H \mathbf{R}_{xx}^{-1} \mathbf{x}_n \right| = \left| \sum_{p=1}^P \frac{\|\mathbf{U}_p^H \mathbf{a}\|^2}{\lambda_p} s[n] + \frac{s[n] \|\mathbf{U}_n^H \mathbf{a}\|^2}{\sigma_n^2} + \sum_{p=1}^P \frac{\mathbf{a}^H \mathbf{U}_p \mathbf{U}_p^H \mathbf{a}(\theta_p)}{\lambda_p} s_p[n] \right| \quad (8)$$

假设训练样本只包含干扰和噪声, 则式(8)可以重写为:

$$\eta_2 = \left| \mathbf{a}^H \mathbf{R}_{xx}^{-1} \mathbf{x}_n \right| = \left| \sum_{p=1}^P \frac{\mathbf{a}^H \mathbf{U}_p \mathbf{U}_p^H \mathbf{a}(\theta_p)}{\lambda_p} s_p[n] \right| \quad (9)$$

由于在强干扰条件下, 有 $\lambda_p \gg \sigma_n^2$, 因此 $\eta_1 \gg \eta_2$ 。由以上分析可知, 含有目标信号的样本数据的第一级检测输出和不含目标信号的样本数据的第一级输出区别较大, 通过一定的准则可以区分样本数据单元是否含有目标信号。将含有目标信号的样本数据剔除, 就可以用剩下的样本数据估计协方差矩阵并计算自适应权值。然后用此权值作为第二级检测器对样本数据进行检测处理, 从而避免在自适应处理中出现信号自相消的现象。

上述分析中, 假设干扰加噪声协方差矩阵已知, 而实际应用中是用训练数据估计的。因此, 应用第一级检测器的假设条件是训练数据中只是少部分样本被目标信号污染。在这种假设情况下, 采样协方差矩阵 $\mathbf{R}_{xx}$ 所包含的目标信号的统计信息可以忽略不计, 用式(5)计算的检测输出量可以分辨训练数据是否包含目标信号。

另外, 对于用第一级检验统计量检测被目标信号污染的距离单元, 需要做如下说明: 检测目标信号是两级检测完成后恒虚警检测器的任务, 第一级检测只是将被强目标信号污染的距离单元检测出来, 并不是检测出所有包含目标信号的距离单元。因此, 第一级检测处理可能无法检测出被微弱目标污染的距离单元, 但微弱目标信号混入训练数据产生的信号自相消现象很小, 影响可以忽略。

2.2 基于两级检测处理的雷达自适应波束形成

目标回波信号在脉冲压缩之前覆盖的距离段比较长, 如果在目标信号区实时更新计算权值, 可能造成过多的目标信号混入训练数据, 使得第一级检测器失效。而且, 剔除的污染样本太多, 剩下的可用训练数据样本减少, 会降低自适应空域滤波器的性能。显然, 脉冲压缩后的目标信号在空域和距离域都是稀疏的。为应对脉冲压缩之前进行第一级检测的不利影响, 本文提出在脉压之后进行两级检测处理。

基于两级检测的雷达自适应波束形成处理步骤为:

- 1) 对雷达回波信号进行变频、采样后, 首先进行数字脉冲压缩处理;
- 2) 将脉冲压缩后的雷达回波信号按距离段分为 L 个距离段;
- 3) 将待检测距离段全部单元数据作为该段的训练数据, 估计一个临时采样协方差矩阵;
- 4) 用临时采样协方差矩阵按照式(5)计算待检测距离段内每个数据样本的第一级检测输出量;
- 5) 将第一级检测输出量超过一定门限的数据样本剔除出训练样本, 然后用剩下的训练数据计算新的采样协方差矩阵;
- 6) 用新采样协方差矩阵计算第二级自适应权值, 然后对待检测距离段内的所有样本数据进行第二级检测;
- 7) 采用步骤 3)至步骤 6)的方式处理下个距离段的数据。

自适应雷达空域滤波处理方法在每个距离段更新计算一个新权值, 相当于权值在整个距离维不断更新, 并且不会出现信号自相消现象, 解决了传统雷达的自适应空域滤波权值不能全距离维更新的难题。另外, 一个距离段更新计算的自适应权值抑制该距离段内的干扰信号, 避免了出现训练数据不包含干扰信号的不利情况。

3 仿真结果

通过仿真实验考查基于两级检测处理的自适应雷达空域滤波方法在训练数据被目标信号污染时的性能。

仿真参数设置为: 阵元数为 10, 一个干扰源, 干噪比(Interference-to-Noise Ratio, INR)为 30 dB, 每个训练样本都包含干扰信号。在实验中考考虑 2 种信号环境: 一种是目标信号混入训练数据; 另一种是训练数据不包含目标信号。

1) 第一级检测器性能仿真

考查第一级检测器对目标信号的检测性能。假设第 10, 25, 40 个训练单元混有目标信号, 信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)为 20 dB。图 1 为有无目标信号混入训练数据时第一级检测的输出结果。从图 1 看到, 混有目标信号的训练数据和不含目标信号的训练数据在第一级检测的输出结果中差异明显, 因此可以方便地将混入目标信号的样本剔除出训练数据。

2) 基于两级检测的自适应波束形成性能仿真

考查基于非均匀检测器的自适应波束形成方法的性能, 仿真参数同 1)。

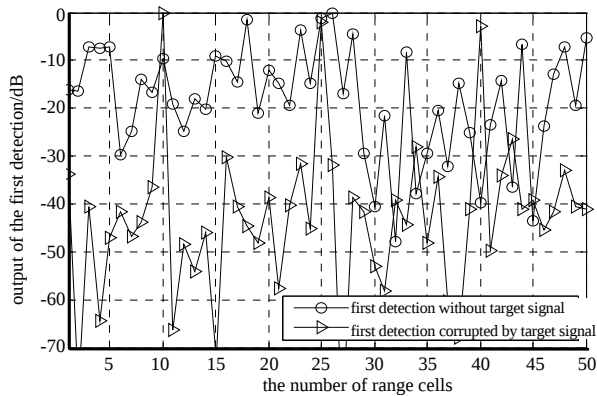


Fig.1 First detection results corresponding to two cases of training data
图 1 第一级检测输出

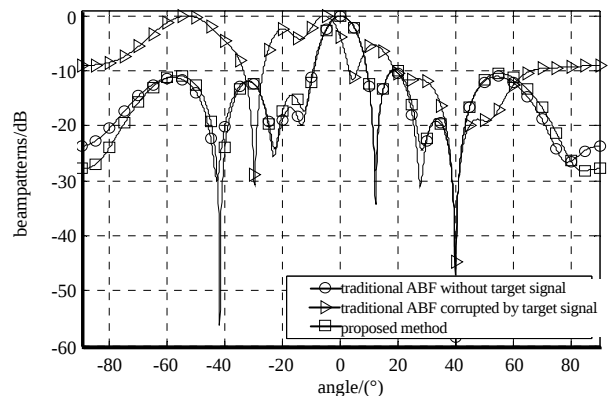


Fig.2 Beampattern of the beamformers
图 2 波束图

图 2 为分别用无目标信号的训练数据、有目标信号混入的训练数据和用第一级检测剔除目标信号后的训练数据估计的采样协方差矩阵计算的权值的输出波束图。从图中很明显看到,当训练数据包含目标信号时,计算的权值在主瓣附近产生畸变,出现信号自相消现象;然而所提方法在主瓣附近性能与不含目标信号的训练数据计算的权值的输出结果相似。所提方法既能保护主瓣目标信号的接收,又能抑制旁瓣干扰信号。

图 3 为分别用无目标信号的训练数据、有目标信号混入的训练数据和用第一级检测剔除目标信号后的训练数据估计的采样协方差矩阵计算的自适应权值的输出结果。图 4 为自适应波束形成后的目标检测概率。从图 3 和图 4 看到,目标信号混入训练数据时会降低自适应波束形成器输出的信干噪比,降低了对目标信号的检测概率,而用第一级检测将目标信号剔除后的自适应波束形成器输出的结果与不含目标信号的自适应波束形成器输出结果相似,所以用两级检测处理是权值在距离维自适应更新的一种有效方法。

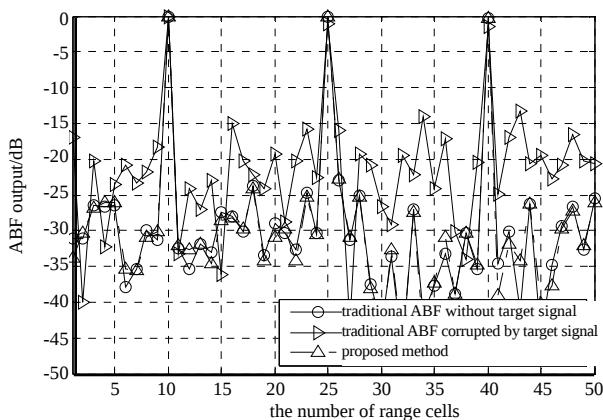


Fig.3 Output of the beamformers
图 3 自适应波束形成输出结果

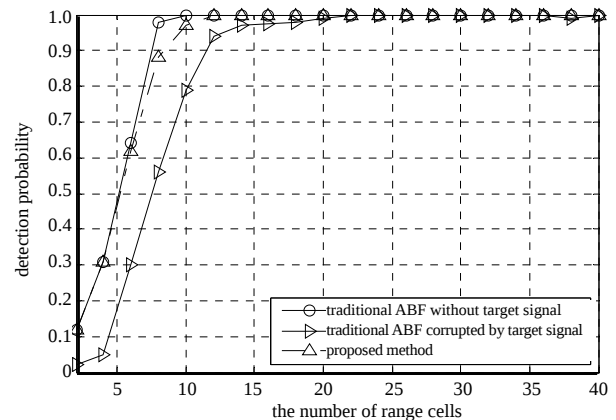


Fig.4 Detection probability
图 4 检测概率

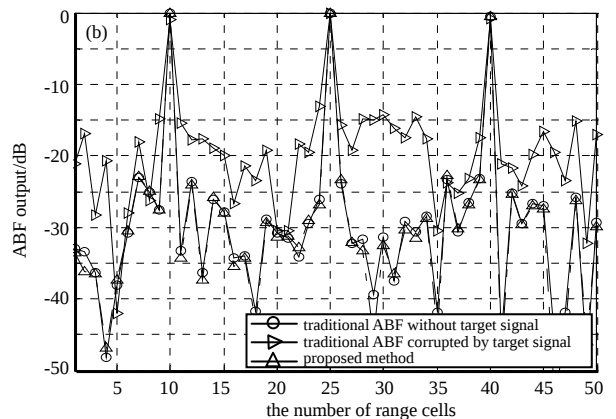
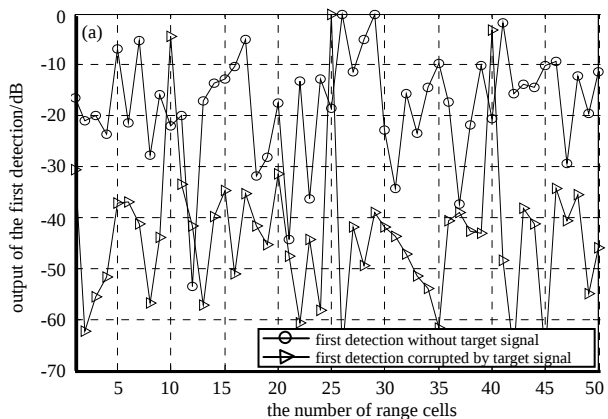


Fig.5 First detection and ABF results ($R_{SN}=20$ dB, $R_{IN}=30$ dB, $R_{IS}=10$ dB)
图 5 第一级检测和波束形成输出(信噪比 20 dB, 干噪比 30 dB, 干信比 10 dB)

3) 信噪比和干信比对所提方法性能影响

考查信噪比和干信比对本文提出方法性能的影响。考虑 4 类场景: 低信噪比 $R_{SN}=5$ dB, 高信噪比 $R_{SN}=20$ dB, 高干信比(Interference-to-Signal Ratio, ISR) $R_{IS}=10$ dB 和低干信比 $R_{IS}=-10$ dB 的情况。从仿真可以看出, 信噪比对检测性能影响很大, 信噪比越大, 越利于第一级检测统计量对目标和干扰进行分类, 所提出方法的优势更能体现。然而从图 5 和图 6 看出, 干信比实际上不太影响第一级检测处理, 也不影响自适应波束形成的性能。

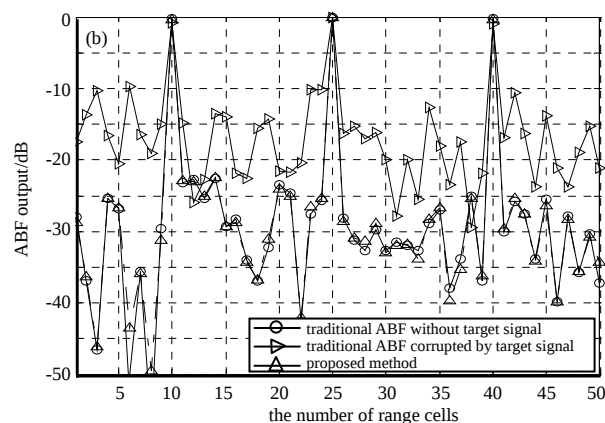
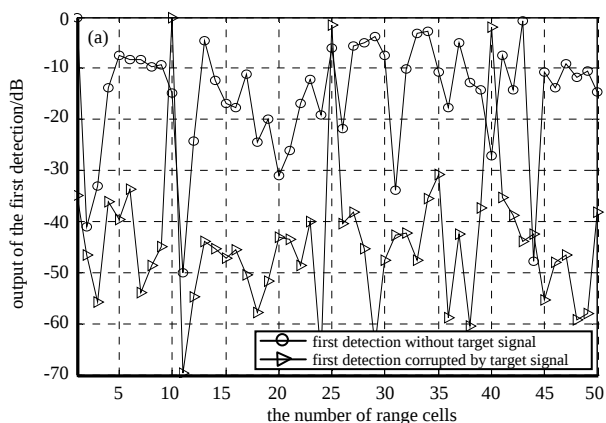
Fig.6 First detection and ABF results($R_{SN}=20$ dB, $R_{IN}=10$ dB, $R_{IS}=-10$ dB)

图 6 第一级检测和波束形成输出(信噪比 20 dB, 干噪比 10 dB, 干信比 -10 dB)

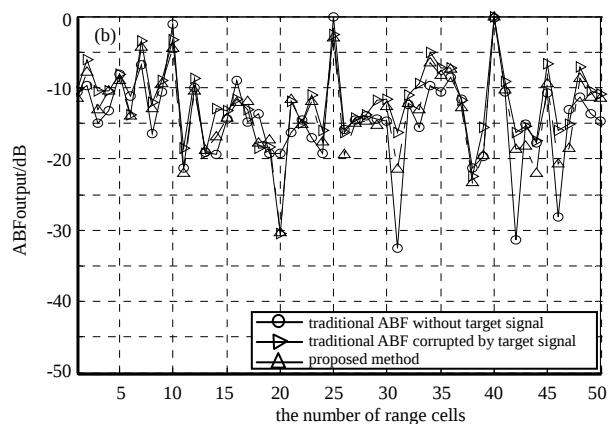
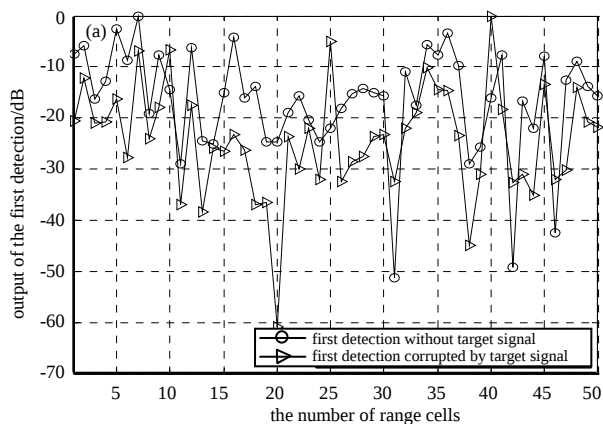
Fig.7 First detection and ABF results($R_{SN}=5$ dB, $R_{IN}=15$ dB, $R_{IS}=10$ dB)

图 7 第一级检测和波束形成输出(信噪比 5 dB, 干噪比 15 dB, 干信比 10 dB)

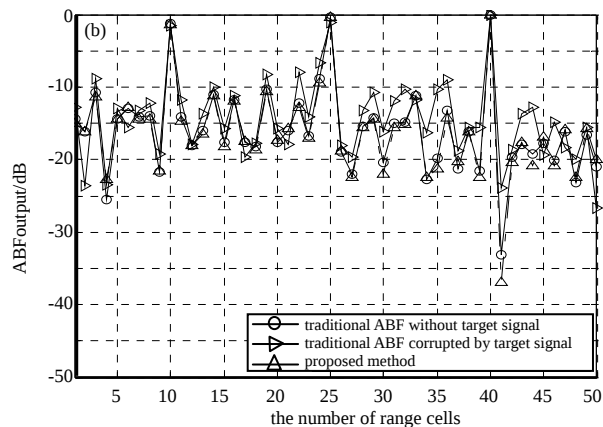
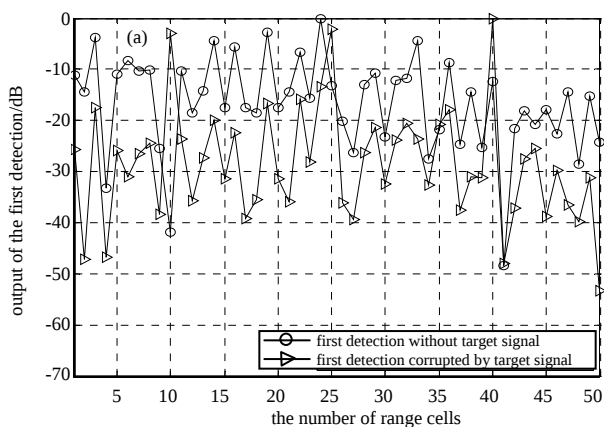
Fig.8 First detection and ABF results ($R_{SN}=5$ dB, $R_{IN}=-5$ dB, $R_{IS}=-10$ dB)

图 8 第一级检测和波束形成输出(信噪比 5 dB, 干噪比 -5 dB, 干信比 -10 dB)

4 结论

以实际对抗需求为背景,提出了一种在距离维更新计算自适应空域滤波权值的两级检测方法。用第一级检测将训练数据中被目标信号污染的样本数据剔除掉,然后用剩下的数据计算第二级检测的自适应权值。通过仿真说明了所提方法的有效性,下一步有待实测数据验证其实际效能。

参考文献:

- [1] VAN-TREES H L. Detection, estimation, and modulation theory, part IV, optimum array processing[M]. New York: Wiley, 2002.
- [2] WANG Jun, ZHANG Wei, LIU Wei. Minimum sensitivity based robust beamforming with eigenspace decomposition[J]. Multidimensional Systems and Signal Processing, 2018, 29(2): 687 - 701.
- [3] ZHANG Wei, WANG Ju, WU Siliang. Robust capon beamforming against large DOA mismatch[J]. Signal Processing, 2013, 93(4): 804-810.
- [4] 李兴成, 张永顺. 对 ASLC 系统的攻击技术研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2007, 8(1): 27-29. (LI Xingcheng, ZHANG Yongshun. A study of the attack technology on ASLC[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2007, 8(1): 27-29.)
- [5] 李兴成, 杨守国. ASLC 系统时间域干扰技术研究[J]. 现代雷达, 2013, 35(10): 18-21. (LI Xingcheng, YANG Shouguo. A study on the attack technology on ASLC in time domain[J]. Modern Radar, 2013, 35(10): 18-21.)
- [6] 龙世敏, 彭世蕤, 王振华, 等. 自适应旁瓣对消系统干扰方法的分析与比较[J]. 电子信息对抗技术, 2016, 31(1): 38-42. (LONG Shimin, PENG Shirui, WANG Zhenhua, et al. Analysis and comparison of interference method against the adaptive sidelobe canceling system[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2016, 31(1): 38-42.)
- [7] 李森, 李彦志, 张国毅, 等. 对自适应旁瓣对消系统的闪烁干扰方案研究[J]. 现代雷达, 2012, 34(2): 51-54. (LI Sen, LI Yanzhi, ZHANG Guoyi, et al. A study on twinkle jamming project against the adaptive sidelobe canceling system[J]. Modern Radar, 2012, 34(2): 51-54.)
- [8] 虞泓波, 冯大政, 解虎. MIMO 雷达迭代降维稳健波束形成方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2016, 43(1): 30-35. (YU Hongbo, FENG Dazheng, XIE Hu. Iterative dimension-reduced robust adaptive beamformer for MIMO radar[J]. Journal of Xidian University(Natural Science Edition), 2016, 43(1): 30-35.)
- [9] 虞泓波, 冯大政, 解虎. 采用序列二次规划求解的稳健波束形成新算法[J]. 西安电子科技大学学报, 2016, 43(2): 41-46. (YU Hongbo, FENG Dazheng, XIE Hu. Novel robust beamforming algorithm using sequential quadratic programming[J]. Journal of Xidian University(Natural Science Edition), 2016, 43(2): 41-46.)
- [10] 李立欣, 白童童, 张会生, 等. 改进的双约束稳健 Capon 波束形成算法[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(8): 2014-2019. (LI Lixin, BAI Tongtong, ZHANG Huisheng, et al. Improved double constraint robust Capon beamforming algorithm[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2016, 38(8): 2014-2019.)
- [11] 蒋曦曦, 吴瑛. 一种稳健的稀疏 Capon 波束形成算法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015, 13(1): 130-134. (JIANG Xixi, WU Ying. A sparse robust Capon beamforming algorithm[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015, 13(1): 130-134.)
- [12] ZHANG Wei, WANG Ju, WU Siliang. Robust minimum variance Multiple-Input Multiple-Output radar beamformer[J]. IET Signal Processing, 2013, 7(9): 854-862.
- [13] 金珊珊, 王春阳, 李欣. 灵巧干扰及其对抗技术综述[J]. 现代防御技术, 2014, 42(4): 131-135. (JIN Shanshan, WANG Chunyang, LI Xin. Overview on smart noise jamming and countermeasures[J]. Modern Defense Technology, 2014, 42(4): 131-135.)
- [14] WU Y, WANG T, WU J, et al. Training sample selection for space-time adaptive processing in heterogeneous environments[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2015, 12(4): 691-695.
- [15] LI H, BAO W, HU J, et al. A training samples selection method based on system identification for STAP[J]. Signal Processing, 2017, 42(1): 119-124.