DOI:10.3969/j.issn.1672-2337.2016.03.008

自适应副瓣对消与动目标检测的联合使用

唐小文，李荣锋，戴凌燕，陈风波，段克清
（空军预警学院重点实验室，湖北武汉 430019）

摘　要：为了同时对抗有源干扰和无源杂波，需要联合采用自适应副瓣对消(ASLC)和动目标检测(MTD)两种技术。在工程应用中，通常先采用 ASLC 抑制有源干扰，然后采用 MTD 对消无源杂波并提取目标回波。但是，回波数据在进行 ASLC 处理过程中产生了权值噪声，导致 MTD 处理杂波出现较大剩余，MTD 性能受到了一定的影响。针对此问题，提出了 3 种方法，较好地解决了 ASLC 和 MTD 联合使用兼容性问题，可以实现对有源干扰和无源杂波的同时抑制，从而提取出目标回波信号。

关键词：自适应副瓣对消；动目标检测；权值噪声；对角加载

中图分类号：TN911.7　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1672-2337(2016)03-0273-06

The Combination of Adaptive Sidelobe Canceller and Moving Target Detection

TANG Xiaowen, LI Rongfeng, DAI Lingyan, CHEN Fengbo, DUAN Keqing
(*Key Research Lab, Air Force Early Warning Academy, Wuhan* 430019, *China*)

Abstract: To suppress both active jamming and passive clutter, it is needed to employ adaptive sidelobe canceller(ASLC) and moving target detection(MTD) jointly. In engineering applications, it is common to use ASLC to compete with active jamming firstly. And then, MTD is used to compete with passive clutter to extract the target echo. However, the weight noise caused by ASLC when processing echo data brings many clutter residues into the MTD process. The performance of MTD is affected. Therefore, three methods are proposed to solve the compatibility of ASLC and MTD, which can restrain active jamming and passive clutter at the same time and extract the target echoes.

Key words: adaptive sidelobe canceller; moving target detection; weight noise; diagonal loading

0　引　言

自适应副瓣对消(ASLC)作为空域对抗有源干扰的有效方法，最早是由 Howells 提出的[1]，由一个高增益的主天线和一个辅助天线组成。后来，辅助天线由一个发展为多个，辅助通道加权值的计算也由简单的闭环算法演变成采样矩阵求逆算法(SMI)[2]。目前自适应副瓣对消理论上已基本成熟，并广泛地运用于实际工程中。近年来，对 ASLC 的研究主要集中于解决工程使用中遇到的问题。文献[3]分析了幅相误差和阵元互耦对自适应处理性能的影响及解决方法。文献[4]分析了频带不一致性对自适应处理性能的影响及解决方法。文献[5]研究了稀布阵雷达长相干积累下 ASLC 技术的应用。Sedivy 对在超高频波段和 X 波段的两部雷达的 ASLC 系统性能进行了检测和评估[6]。更进一步，借鉴 ASLC 干扰对消的思想，文献[7-8]提出了和差及辅助波束联合对消来提高雷达抗主瓣干扰能力。

众所周知，雷达探测过程中，接收到的回波信号不可避免地混杂着来自地面或云、雨等的杂波信号。当杂波达到一定强度时，较弱的目标将无法探测到，雷达工作陷入被动状态。因此，产生了抑制固定杂波方法，即动目标显示(MTI)和动目标检测(MTD)[9]。当目标速度较低或运动方向在雷达探测切线方向时，MTI 很难捕捉到目标，MTD 弥补了这方面的不足。现代电子作战环境十分复

收稿日期：2015-12-25；修回日期：2016-03-07
基金项目：国家自然科学基金青年基金(No.61501506)；湖北省自然科学基金青年基金(No.2015CFB607)

杂,干扰和杂波总是复合存在。因而,同时使用 ASLC 和 MTD(或 MTI)来对抗有源干扰和无源杂波已经成为现代雷达的一个重要手段。目前,在雷达实际应用中,通常先采用 ASLC 抑制有源干扰,再采用 MTD 处理无源杂波,然后进行目标检测并提取目标回波。但这种先 ASLC 后 MTD 的处理方式往往导致杂波对消不彻底,甚至出现较大剩余,从而对目标检测性能产生影响。这实际上是自适应副瓣对消和动目标检测联合使用的兼容性问题,文献[10]研究了这种影响的内在原因,但并未给出有效的解决方法。文献[5]研究了对角加载对自适应权值进行约束的解决方法,但对加载值的选取没有深入研究。除此之外,鲜有公开文献深入研究该问题的有效解决方法。

1 ASLC 对 MTD 性能的影响分析

MTD 是靠不同重复周期间的杂波回波进行相消。而对于 ASLC,它在每个周期对辅助天线的加权值都是变化的,变化的权值会降低 MTD 的杂波对消性能。ASLC 处理过程中生成的加权值之所以不会保持一定值,主要是因为选用有限的快拍数据进行求权导致的误差。下面对此进行分析。

经过 ASLC 处理后的自适应方向图为

$$\boldsymbol{F}_{\mathrm{opt}}(\theta)=\boldsymbol{F}_{\mathrm{m}}(\theta)-\boldsymbol{W}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{F}_{\mathrm{a}} \tag{1}$$

式中,$\boldsymbol{F}_{\mathrm{m}}(\theta)$,$\boldsymbol{F}_{\mathrm{a}}$ 分别为主天线静态方向图、辅助天线方向图,辅助天线加权值为 $\boldsymbol{W}=[w_2,w_2,\cdots,w_N]^{\mathrm{T}}$,$N$ 为阵元个数。

由 $\boldsymbol{F}_{\mathrm{a}}=[F_{\mathrm{a1}},F_{\mathrm{a2}},\cdots,F_{\mathrm{aN}}]^{\mathrm{T}}$,有

$$\Delta F=\boldsymbol{W}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{F}_{\mathrm{a}}=\sum_{i=1}^{N}w_iF_{ai} \tag{2}$$

辅助天线初始增益相等,即 $F_{\mathrm{a1}}=F_{\mathrm{a2}}=\cdots=F_{\mathrm{aN}}=F_{\mathrm{a}}$,则

$$\Delta F=F_{\mathrm{a}}\sum_{i=1}^{N}w_i \tag{3}$$

选取一段快拍数据,快拍数为 M,计算估计量 $\hat{\boldsymbol{R}}_x$ 和 $\hat{\boldsymbol{r}}_{x\mathrm{d}}$,即

$$\hat{\boldsymbol{R}}_x=\frac{1}{M}\sum_{m=1}^{M}X(t_m)X^{\mathrm{H}}(t_m) \tag{4}$$

$$\hat{\boldsymbol{r}}_{x\mathrm{d}}=\frac{1}{M}\sum_{m=1}^{M}X(t_m)d^{*}(t) \tag{5}$$

求得权值估计量为 $\hat{\boldsymbol{W}}=\hat{\boldsymbol{R}}_{xx}^{-1}\hat{\boldsymbol{r}}_{x\mathrm{d}}$,理想权值为 $\boldsymbol{W}_{\mathrm{opt}}$,则产生误差为

$$\Delta\hat{\boldsymbol{W}}=\hat{\boldsymbol{W}}-\boldsymbol{W}_{\mathrm{opt}} \tag{6}$$

即权值噪声,这种误差是计算 $\boldsymbol{R}_x$ 和 $\boldsymbol{r}_{x\mathrm{d}}$ 时由噪声、估计误差等产生的。

由于自适应权产生了误差,回波信号会相继发生改变,误差为

$$\Delta V=\sum_{i=1}^{N}\Delta w_iF_{ai}=F_{\mathrm{a}}\sum_{i=1}^{N}\Delta w_i \tag{7}$$

则功率误差为

$$E\{\Delta V^{*}\Delta V\}=F_{\mathrm{a}}^2E\Big\{\sum_{i=1}^{N}\Delta w_i^{*}\sum_{i=1}^{N}\Delta w_i\Big\}=$$

$$F_{\mathrm{a}}^2E\Big\{\sum_{i=1}^{N}\Delta w_i^{*}\Delta w_i\Big\}=F_{\mathrm{a}}^2E\{\Delta\boldsymbol{W}^{\mathrm{H}}\Delta\boldsymbol{W}\} \tag{8}$$

由权值计算带来的误差是由有限快拍数据造成的,因而不同周期间的相关性不大,而 MTD 是利用相邻周期间回波相关性来进行对消,所以 MTD 对权值噪声无明显的对消作用。

下面给出一个仿真,为便于定量分析,仿真中用一个强固定回波来模拟地杂波,该杂波位于 60 km 处,脉冲压缩后强度为 80 dB,并假设在 150 km 处有一目标,脉冲压缩后强度为 20 dB。仿真环境及具体参数设置如表 1 所示。

表 1 仿真环境及参数

参 数	数 值
辅助天线数	3
雷达信号形式	线性调频信号,带宽 2 MHz,脉宽 600 μs
重复周期	2.5 ms
采样频率	4 MHz
天线转速	6 r/min
杂波对消方式	16 点 MTD
信号处理流程	先脉压,再副瓣对消,最后 MTD 处理
干扰环境	1 个干扰,入射角度为 −20°,脉压后强度约为 36 dB
杂波	用一个强固定回波来模拟,位于 60 km 处,脉压后强度为 80 dB
目标	位于 150 km 处,脉压后强度为 20 dB

图 1 为回波信号经脉压处理后的输出,可看出目标信号(约 10 dB)完全淹没于干扰(约 36 dB)中,在 60 km 处有 1 个强固定回波(约 80 dB)。图 2 为 MTD 处理后 16 个多普勒滤波器的输出。从图中可以看出,干扰信号已被抑制,目标信号清晰出现,MTD 处理后目标强度约为 20 dB(第 1,2 号滤波器)。但是,强固定回波并没有被完全抑制,有约 30 dB 的剩余,这个剩余是 ASLC 处理所导致的权值噪声引起的,如果不加以解决,将大大降低系统对无源杂波的抑制能力。

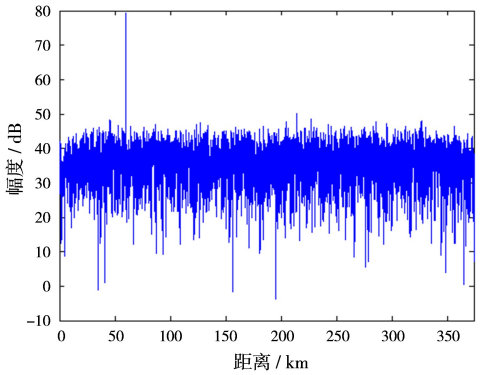


图 1　脉压后的输出回波信号

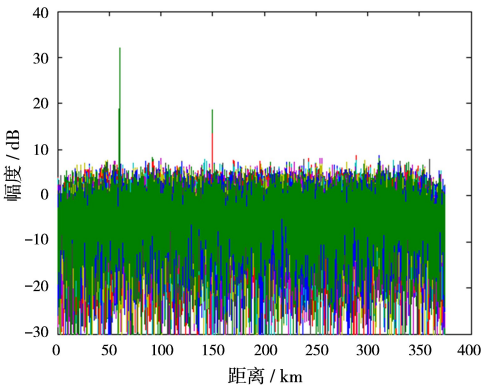


图 2　MTD 后输出(16 个多普勒滤波器)

2　ASLC 对 MTD 性能影响的解决方法

针对上述问题，本文提出 3 种解决思路：在一个相参处理间隔(CPI)内自适应权不变、对角加载、MTD 前置处理。

2.1　在一个 CPI 内自适应权不变

在一个 CPI 内只进行 1 个重复周期的 ASLC 权值计算，再把该自适应权值用于 CPI 内所有数据进行干扰对消。这样可使 CPI 各个重复周期间的自适应干扰对消权值不变，消除了权值噪声，即消除了杂波谱展宽，从而不影响 MTD 处理对杂波的抑制性能。但是，这种处理方法会降低 ASLC 抑制干扰性能，下面就其具体原因展开分析。

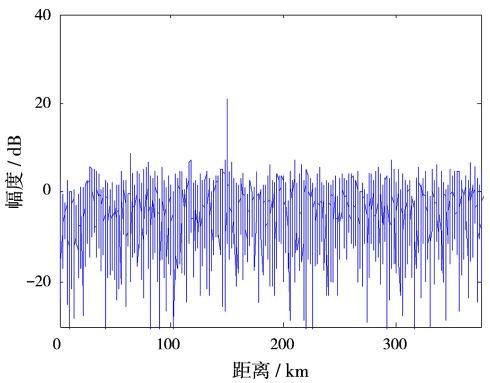
当主天线波束不扫描时，上述方法不存在问题。但是，当波束扫描时，干扰与主天线的相对位置将发生变化，当变化较明显时，干扰位置将移出自适应零点，使得干扰不能被有效抑制。以天线 6 r/min(即 36°/s)为例进行分析，假设雷达重复周期为 2.5 ms，MTD 点数为 16，ASLC 权值在第 8 个重复周期计算，则第 k 个重复周期时干扰位置与自适应零点的角度间隔为

$$\Delta\theta_k=(k-8)\times 36\times 2.5\times 10^{-3}=0.09\times(k-8) \quad (9)$$

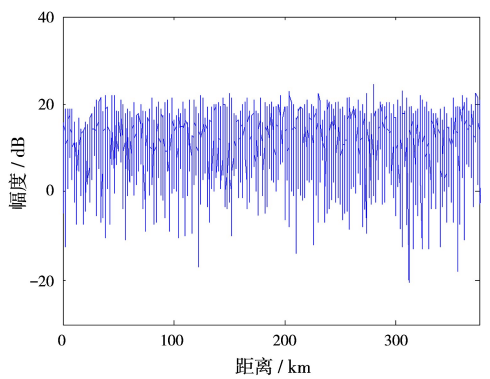
显然，干扰位置与自适应零点越远，干扰对消能力越差，下面的仿真结果说明了这种影响。

仿真 1：仿真环境及参数设置同表 1 参数一致。

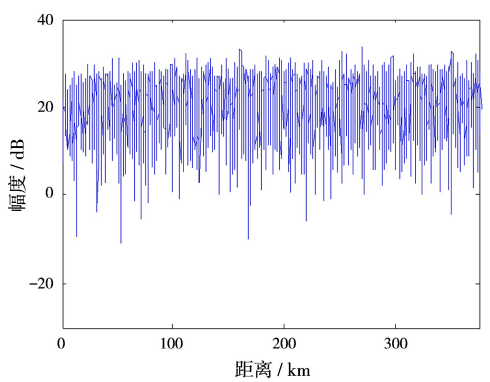
图 3 给出了第 8，10，14 和 16 个重复周期的干扰对消输出结果(在 MTD 处理前)，可看出由于 ASLC 权值是在第 8 个重复周期计算得出，故该重复周期的干扰对消结果很理想，而其他 3 个重复周期的干扰对消很不彻底，干扰对消性能严重下降。



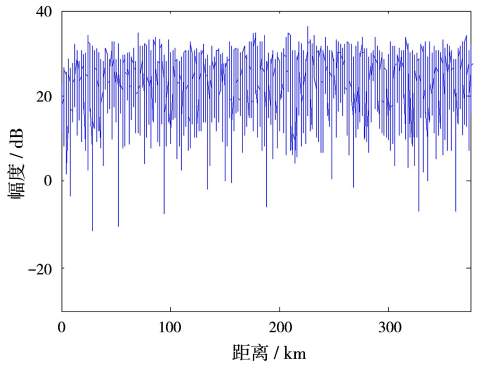
(a)　第 8 个重复周期输出



(b)　第 10 个重复周期输出



(c)　第 14 个重复周期输出



(d) 第 16 个重复周期输出

图 3 多个重复周期的干扰对消输出

因此,这种方案仅适用于一个 CPI 内天线波束不扫描的情况(例如方位相扫体制相控阵雷达),对于方位机扫体制,并不适用。

2.2 对角加载

在计算权值时,理想权值 $\boldsymbol{W}_{\text{opt}}=\boldsymbol{R}_{xx}^{-1}\boldsymbol{r}_{x\text{d}}$,则计算自相关矩阵量 $\boldsymbol{R}_{xx}$ 和相关矩阵量 $\boldsymbol{r}_{x\text{d}}$,即

$$\boldsymbol{R}_{xx}=E\left[\boldsymbol{X}(t)\boldsymbol{X}^{\text{H}}(t)\right] \tag{10}$$

$$\boldsymbol{r}_{x\text{d}}=E\left[\boldsymbol{X}(t)\boldsymbol{d}^{\text{H}}(t)\right] \tag{11}$$

而在实际计算中,采用了采样矩阵求逆(SMI)算法,用有限次快拍数据计算估计量 $\hat{\boldsymbol{R}}_x$ 和 $\hat{\boldsymbol{r}}_{x\text{d}}$(见式(4)和式(5)),以代替理想值 $\boldsymbol{R}_x$ 和 $\boldsymbol{r}_{x\text{d}}$。

假设 $\hat{\boldsymbol{R}}_x$ 为 N 阶矩阵,其特征值为 $\lambda_k(k=1,2,\cdots,N)$,对应的特征向量为 $\boldsymbol{\mu}_k(k=1,2,\cdots,N)$。矩阵 $\hat{\boldsymbol{R}}_x$ 特征分解可表示为

$$\hat{\boldsymbol{R}}_x=\sum_{k=1}^{N}\lambda_k\boldsymbol{\mu}_k\boldsymbol{\mu}_k^{\text{H}} \tag{12}$$

假定有 p 个干扰,则特征值中相应有 p 个大特征值,$N-p$ 个小特征值。理想条件下,将特征值排序为

$$\lambda_1\geqslant\lambda_2\geqslant\lambda_3\geqslant\cdots\geqslant\lambda_p\geqslant\lambda_{p+1}=\lambda_{p+2}=\cdots=\lambda_N \tag{13}$$

而在实际情况中,选取有限的样本数据进行计算。有限的快拍数使得 $\hat{\boldsymbol{R}}_x$ 的小特征值发生抖动,$\lambda_{p+1},\lambda_{p+2},\cdots,\lambda_N$ 不能完全相等,进而求得的权值也有误差。因此,提出利用对角加载[11]来减轻权值噪声的影响,对角加载的实现比较简单,自适应求权如下式:

$$\boldsymbol{W}=(\hat{\boldsymbol{R}}_{xx}+L\boldsymbol{I})^{-1}\hat{\boldsymbol{r}}_{x\text{d}} \tag{14}$$

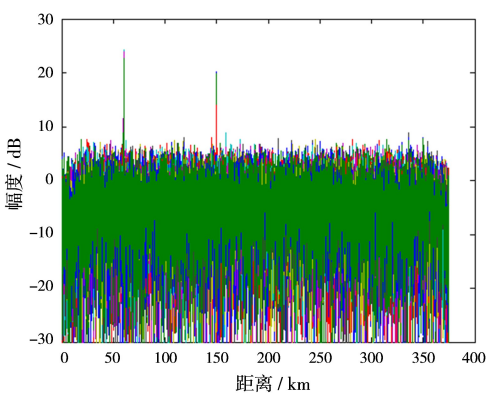
式中,$\boldsymbol{I}$ 为单位矩阵,L 为对角加载量。

对角加载后的 $\hat{\boldsymbol{R}}_x$ 小特征值抖动就会相对变小,其分散程度降低,权值误差的影响减小,ASLC 性能得到优化,从而保证 MTD 处理对杂波的抑制性能。

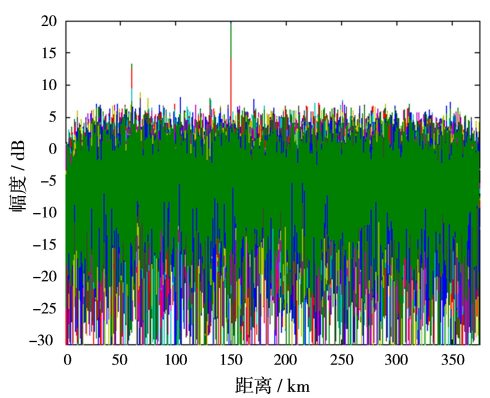
对角加载量 L 的选取非常关键,过小则不能保证消除权值噪声的影响,过大则会降低干扰抑制能力。下面通过详细的仿真来进行分析。

仿真 2:仿真参数同仿真 1,考察不同对角加载量 L 对性能的影响。

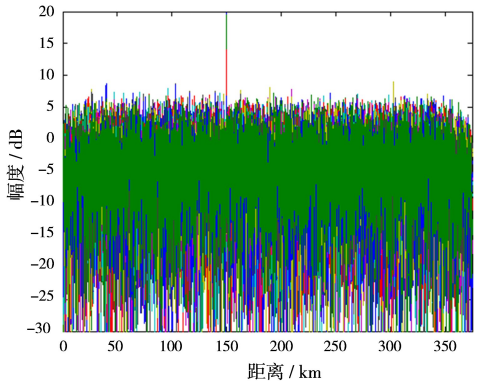
图 4 是对角加载因子分别为 3,10,16 和 30 dB 时 MTD 处理后 16 个多普勒滤波器的输出。从图中可以看出,当 $L=3$ dB 和 10 dB 时,强固定回波仍有剩余,但明显小于无对角加载情况(如图 2 所示),而当 $L=16$ dB 和 30 dB 时,强固定回波已完全被对消,也即当对角加载因子取 16 dB 及以上时,基本消除了常规 ASLC 处理引起的权值噪声影响,使得后续 MTD 处理可达到 80 dB 的地杂波抑制能力。另外,在本仿真条件下,当 $L=3,10,16$ dB 时,ASLC 处理对干扰的抑制能力基本没有下降,但是当 $L=30$ dB 时,对干扰的抑制能力约下降了 4 dB,图 4(d)显示剩余噪声电平抬高了 4 dB,这说明 30 dB 的加载量过大。因此,要使得后续 MTD 处理达到 80 dB 以上的地杂波抑制能力,对角加载量 L 取 16 dB 比较合适。



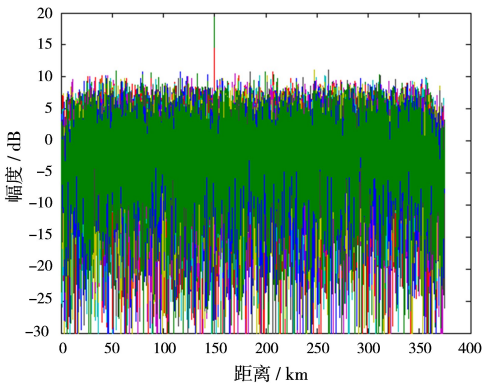
(a) $L=3$ dB



(b) $L=10$ dB

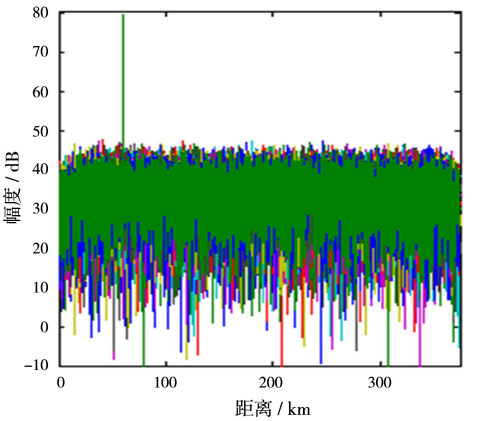


（c）　$L=16$ dB

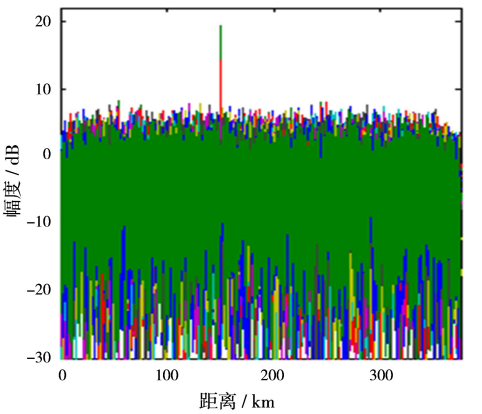


（d）　$L=30$ dB

图 4　不同对角加载因子下 MTD 后输出（16 个多普勒滤波器）



（a）　脉压后的输出回波信号



（b）　ASLC 后输出（16 个多普勒滤波器）

图 5　干扰强度为 36 dB（脉压后）时的输出结果

2.3　MTD 前置处理

这种方法是脉压后先进行 MTD 处理抑制无源杂波，再对每个多普勒滤波器进行 ASLC 处理抑制干扰。由于 MTD 处理在 ASLC 前进行，因此不存在前面所述的权值噪声，所以 MTD 处理对无源杂波的抑制能力不受影响，同时也不会影响后续 ASLC 的处理性能。

下面也给出性能仿真，仿真中信号处理流程为先脉压，再 MTD 处理，最后副瓣对消。其他仿真环境及参数同仿真 1。

仿真 3：图 5(a)为脉压后输出回波信号，目标淹没于干扰中；图 5(b)为先经 MTD 再经 ASLC 处理后的输出。从图中可以看出，无源强杂波和有源强干扰均被完全抑制，目标可被成功检测。

从上述分析和仿真可以看出，在雷达进行方位机扫时，第一种方法不能同时有效抑制无源强杂波和有源干扰，而第二、三种方法则较好地解决了这个问题。

3　结束语

自适应副瓣对消处理会产生权值噪声，从而使得 MTD 抑制杂波的性能恶化。为此，本文提出 3 种解决方法：在一个 CPI 内自适应权不变、对角加载、MTD 前置处理。

第一种方法适用于一个 CPI 内天线波束不扫描的情况，对于方位机扫体制，干扰对消很不彻底；第二种方法实现简单，增加的额外运算量几乎可忽略不计，对角加载量的选取是方法的关键，合适的加载量可使 MTD 保持很高杂波抑制性能；第三种方法解决最为彻底，由于不存在权值噪声，可完全同时抑制无源杂波和有源干扰。但是，该方法增加的运算量最大，所增的运算量主要是辅助通道需要进行 MTD 处理所致。在实际工程应用中，可根据不同应用需要对这 3 种方法加以选择。

参考文献：

[1] HOWELLS P W. Intermediate Frequency Sidelobe Canceller: US 3202990[P]. 1965-08-24[2015-10-16].

[2] JOHNSON J R, FENN A J, AUMANN H M, et al. An Experimental Adaptive Nulling Receiver Utilizing the Sample Matrix Inversion Algorithm with Channel Equalization[J]. IEEE Trans on Microwave Theory and Techniques, 1991, 39(5):798-808.

[3] 王永良,丁前军,李荣锋. 自适应阵列处理[M]. 北京：清华大学出版社, 2009.

[4] 王峰,傅有光,孟兵,等. 基于傅里叶变换的雷达通道均衡算法性能分析及改进[J]. 电子学报, 2006, 34(9):1677-1680.
WANG Feng, FU Youguang, MENG Bing, et al. Performance Analysis and Improvement of the Equalization Algorithm Based on Fourier Transform for Radar Channel[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(9):1677-1680. (in Chinese)

[5] 陆鹏程,徐晋,关堂新,等. 稀布阵雷达长相干积累下的干扰抑制设计[J]. 雷达科学与技术, 2012, 10(4):387-390.
LU Pengcheng, XU Jin, GUAN Tangxin, et al. Interference Suppression of SIAR Based on Measured Data[J]. Radar Science and Technology, 2012, 10(4):387-390. (in Chinese)

[6] SEDIVY P. Radar Sidelobe Canceller Performance Evaluation[C]// Conference on Microwave Techniques, Pardubice: IEEE, 2013:186-189.

[7] LI Rongfeng, RAO Can, DAI Lingyan, et al. Combining Sum-Difference and Auxiliary Beams for Adaptive Monopulse in Jamming[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2013, 24(3):372-381.

[8] 周必雷,李荣锋,戴凌燕,等. 子阵级和差及辅助波束联合自适应单脉冲方法[J]. 雷达科学与技术, 2014, 12(4):379-388.
ZHOU Bilei, LI Rongfeng, DAI Lingyan, et al. Adaptive Monopulse Algorithm Based on Combining Sum-Difference and Auxiliary Beams for Aoti-Jamming at Subarray Level[J]. Radar Science and Technology, 2014, 12(4):379-388. (in Chinese)

[9] 王小谟,张光义,王德纯,等. 雷达与探测：信息化战争的火眼金睛[M]. 2 版. 北京：国防工业出版社, 2008.

[10] 孙晓兵,张守宏. 数字旁瓣相消与动目标显示的兼容性分析[J]. 现代雷达, 1992, 14(5):50-56.

[11] Carlson B D. Covariance Matrix Estimation Errors and Diagonal Loading in Adaptive Arrays[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 1988, 24(4):397-401.

作者简介：

唐小文 女，1992 年生，江苏南京人，硕士研究生，主要研究方向为自适应阵列信号处理。
E-mail:1303442664@qq.com

李荣锋 男，1971 年生，浙江长兴人，教授、博士生导师，主要研究方向为雷达信号处理、阵列信号处理。

戴凌燕 女，1979 年生，讲师，主要研究方向为雷达自适应信号处理及自适应波束形成。

陈风波 男，1977 年生，讲师，主要研究方向为雷达自适应抗干扰。

段克清 男，1981 年生，讲师，主要研究方向为空时自适应处理和稀疏恢复等。