

一种新的相控阵机载预警雷达孤立干扰抑制方法

王万林 廖桂生 张光斌

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

摘要: 在非均匀(Non-homogeneous)杂波环境中, 孤立干扰若得不到有效抑制必将引起目标检测性能严重变差。对此该文提出了一种新的非均匀环境下两级空时自适应处理的级联算法, 即首先根据均匀杂波的分布特性选取辅助波束用辅助通道法滤除均匀杂波, 然后用直接数据域算法抑制孤立干扰。该方法具有性能优良、鲁棒性好和计算量低等优点, 其有效性为计算机仿真实验结果所验证。

关键词: 相控阵机载预警雷达, 空时自适应处理, 非均匀, 孤立干扰, 直接数据域

中图分类号: TN957, TN959 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2005)02-0278-05

A New Method to Isolated Interferers Suppression for Phased Array AEW Radar

Wang Wan-lin Liao Gui-sheng Zhang Guang-bin

(National Key Lab of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an, 710071, China)

Abstract The heavy loss of target detection performance must be resulted if the isolated interferers can not be effectively suppressed in the non-homogeneous environment of clutter. Therefore, a new method of two stage hybrid space time adaptive processing in non-homogeneous environment is presented in this paper, in which the homogeneous clutter is firstly suppressed based on auxiliary channel processing approach by selecting auxiliary channel according to clutter's distributing characters in the beam Doppler space and the isolated interferers is latterly mitigated based on direct data domain algorithm. This method has advantages of excellent target detection performance, good robust to whether small yaw exists or not, and low computation load. Simulation results are presented to demonstrate its effectiveness.

Key words Phased array AEW radar, Space time adaptive processing, Non-homogeneous, Isolated interferers, Direct data domain

1 引言

由 Brennan 等人^[1]提出的空时二维自适应处理(STAP)技术属于统计方法, 在理论上假定所有距离单元数据独立同分布, 然后用待检测距离单元相邻的距离单元(但不包含待检测距离单元本身)的数据作为训练样本来估计杂波协方差矩阵以用于求自适应权矢量。工程实现时通常用包含待检测距离单元的一段或全程距离门数据统计平均估计杂波协方差矩阵, 对于均匀杂波环境(各距离单元独立同分布)而言, 这种统计方法无疑可以得到一个最优滤波器。但是对于剧烈变化的非均匀杂波环境(非均匀性包括目标信号、杂波功率非均匀和孤立干扰等情况, 为了叙述方便, 我们将杂波和孤立干扰统称为干扰), 由于不同距离门的干扰样本具有不同的统计特性, 基于上述的杂波协方差矩阵估计而得到的自适应权矢量的干扰抑制性能会严重变差, 导致虚警率增加, 为了防止虚警必须提高检测门限, 而这又势必降低目标检测性能。因此,

在非均匀干扰环境下 STAP 方法将难以应用。在信息技术日益发展的现代战争中, 机载预警(Airborne Early Warning, AEW)雷达必须面对大量较强的孤立干扰(训练距离单元中没有包含的待检测距离单元中的有源或无源干扰, 称为孤立干扰), 这时我们只能从待检测距离单元本身获取关于孤立干扰的信息。针对待检测距离单元存在孤立干扰的情况, 文献[2, 3]提出了一种两级混合 STAP 算法, 即直接由待检测距离单元数据分别和联合利用空域两阵元和时域两脉冲信号相消滤除目标信号得到 5 个训练样本, 由这 5 个样本估计孤立干扰特性并以此设计自适应滤波器抑制孤立干扰, 然后再级联一个统计 STAP 自适应滤波器抑制均匀干扰。然而, 由于待检测样本经信号滤除后得到的 5 个样本中, 除孤立干扰之外, 还存在着由大量均匀杂波引起的均匀干扰, 并且一般说来均匀杂波要比孤立干扰强得多, 因此计算直接数据域算法的自适应权时, 5 个训练样本中均匀强杂波的存在会使自适

应权在抑制孤立干扰的同时又花费大量自由度试图抑制均匀杂波，从而大大削弱了对孤立干扰的抑制能力，而级联的统计 STAP 自适应处理又无法抑制孤立干扰。因此文献[4]针对该问题提出了一种改进的级联算法，即在抑制孤立干扰的直接数据域算法前引入滤除均匀杂波的预处理，以便得到更好的孤立干扰抑制性能，然而改进方法仍然存在如下两个方面的缺陷：(1) 即使在均匀环境下也会因样本数目太少而无法精确估计出不包含目标信号的空时均匀杂波协方差矩阵；(2) 由于预处理是先由目标信号导向矢量补空间的标准基和均匀杂波协方差矩阵来构造噪声子空间，再将待检测样本向所构造的噪声子空间投影来滤除均匀杂波的，因此计算量较大。所以改进方法理论意义大于实际意义，无法用于实际 AEW 雷达系统。

针对上述问题，本文提出了一种新的非均匀环境下两级空时自适应处理的级联算法，新算法分两步进行：首先根据均匀杂波的分布特性选取辅助波束用辅助通道法滤除均匀杂波，然后用直接数据域算法抑制孤立干扰。由于孤立干扰与均匀杂波具有不同的分布特性，因此用辅助通道法滤除均匀杂波时不受孤立干扰的影响，这样均匀杂波经过有效滤除后，级联的直接数据域算法就可以不受均匀杂波的影响而集中精力对付孤立干扰。

2 信号模型

为了讨论方便，本文假定雷达天线为均匀线阵结构(也可以是面阵经微波合成的等效线阵结构)，阵元数目为 N ，在一个相干处理间隔(CPI)内的脉冲数目为 K ，因此接收到的数据为一 $N \times K$ 维的矩阵 X ，其元素 $x_{n,k}$ 表示第 n 个阵元在第 k 个脉冲下的回波。目标信号矩阵 S 也是一 $N \times K$ 维的矩阵，它由空域导向矢量 $S_S(\psi_{s0})$ 和时域导向矢量 $S_T(f_{d0})$ 所构成，若两个矢量分别为

$$S_S(\psi_{s0}) = [1, \exp(j\varphi_S(\psi_{s0})), \dots, \exp(j(N-1)\varphi_S(\psi_{s0}))]^T \quad (1)$$

式中 $\varphi_S(\psi_{s0}) = 2\pi d \cos \psi_{s0} / \lambda$ ， ψ_{s0} 为目标信号的空域锥角， d 为阵元间距， λ 为波长，

$$S_T(f_{d0}) = [1, \exp(j\varphi_T(f_{d0})), \dots, \exp(j(K-1)\varphi_T(f_{d0}))]^T \quad (2)$$

式中 $\varphi_T(f_{d0}) = 2\pi f_{d0} / f_r$ ， f_{d0} 为目标信号的多普勒频率， f_r 为脉冲重复频率。因此目标信号矩阵 S 为

$$S = S_S(\psi_{s0}) S_T^T(f_{d0}) \quad (3)$$

3 均匀杂波的滤除算法

3.1 辅助通道法抑制均匀杂波的原理

由于 AEW 雷达一般采用正侧视阵列结构，对于正侧视 AEW 雷达系统，杂波谱在波束-多普勒空间中仅沿斜带分布，因此根据杂波的这一特性用如图 1 所示的辅助通道法可以将

均匀杂波有效滤除， B 为空域两阵元或时域两脉冲目标信号相消算子，矩阵 X 由算子 B 进行目标信号相消后可得如下 5 个矩阵：

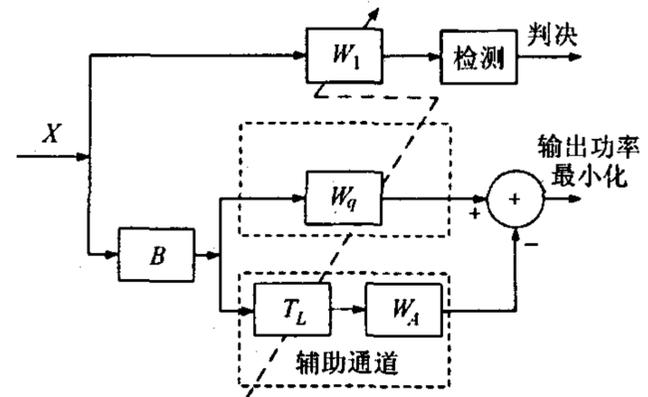


图 1 辅助通道降维 STAP 结构

$$X_{S1} = X(1:N-1, 1:K-1) - \exp(-j\varphi_S(\psi_{s0}))X(2:N, 1:K-1) \quad (4)$$

$$X_{S2} = X(1:N-1, 2:K) - \exp(-j\varphi_S(\psi_{s0}))X(2:N, 2:K) \quad (5)$$

$$X_{T1} = X(1:N-1, 1:K-1) - \exp(-j\varphi_T(f_{d0}))X(1:N-1, 2:K) \quad (6)$$

$$X_{T2} = X(2:N, 1:K-1) - \exp(-j\varphi_T(f_{d0}))X(2:N, 2:K) \quad (7)$$

$$X_{ST} = X(1:N-1, 1:K-1) - \exp(-j(\varphi_S(\psi_{s0}) + \varphi_T(f_{d0})))X(2:N, 2:K) \quad (8)$$

W_q 为主通道的静态权矢量，它形成指向目标的检测通道，因此 W_q 表示为

$$W_q = S_S^q(\psi_{s0}) \otimes S_T^q(f_{d0}) \quad (9)$$

式中空域静态权矢量 $S_S^q(\psi_{s0})$ 和时域静态权矢量 $S_T^q(f_{d0})$ 分别为

$$S_S^q(\psi_{s0}) = [w_1, w_2 \exp(j\varphi_S(\psi_{s0})), \dots, w_{N-1} \exp(j(N-2)\varphi_S(\psi_{s0}))]^T \quad (10)$$

$$S_T^q(f_{d0}) = [h_1, h_2 \exp(j\varphi_T(f_{d0})), \dots, h_{K-1} \exp(j(K-2)\varphi_T(f_{d0}))]^T \quad (11)$$

其中 w_1, w_2, \dots, w_{N-1} 和 h_1, h_2, \dots, h_{K-1} 分别为空域和时域矢量的 Chebwin 加权， T_L 为形成辅助通道的变换矩阵，至于辅助通道的构造在下节详细讨论， W_A 为辅助通道的自适应权矢量，根据图 1 可得主通道输出为

$$z_q = W_q^H Z \quad (12)$$

其中 Z 为矩阵 $\text{Vec}(X_{S1})$ ， $\text{Vec}(X_{S2})$ ， $\text{Vec}(X_{T1})$ ， $\text{Vec}(X_{T2})$ 或 $\text{Vec}(X_{ST})$ ，由此可见， X 经目标滤除后训练样本数目增加为原来的 5 倍。若设变换矩阵 T_L 为 $(N-1)(K-1) \times L$ 维，则辅助通道中二维数据矢量 Z 经矩阵 T_L 后为 $Z_L = T_L^H Z$ ，因此辅助通道的输出为

$$z_A = (T_L W_A)^H Z \quad (13)$$

至此，辅助通道的自适应权矢量 W_A 可以由如下最小二乘(LS)

问题的解确定:

$$\min_{W_A} \|W_q^H Z - (T_L W_A)^H Z\|^2 \quad (14)$$

由上式可得:

$$W_A = R_L^{-1} U_L \quad (15)$$

式中, $R_L = T_L^H R_Z T_L$, $U_L = E[Z_L z_q^*]$, $R_Z = E[ZZ^H]$ 。

最后得到检测通道的自适应权为

$$W_1 = W_q - T_L W_A \quad (16)$$

注意对于不同的多普勒检测通道, f_{d0} 是不同的。

3.2 辅助通道的构造

目前构造辅助通道主要有两种方法:一种是文献[5]的辅助通道法,该方法着眼于全空时域二维杂波用辅助通道对消,另一种是文献[6]的简易辅助通道法,该方法着眼于多普勒滤波器带内杂波用辅助通道对消而不考虑带外杂波。由于AEW雷达一般采用正侧视阵列结构,对于正侧视AEW雷达系统,若设 $a=4V/\lambda f_r$,则根据 a 的大小可知杂波的分布特性共有3种情况:(1)当 $a=1$ 时,杂波谱沿如图2(a)所示的对角线分布,(2)当 $a>1$ 时,杂波谱沿如图2(b)所示的斜带分布,(3)当 $a<1$ 时,杂波谱沿如图2(c)所示的斜带分布,因此辅助通道应该根据3种情况分别确定,本文针对文献[5]的方法(文献[6]的方法与之类似)对上述3种情况分别讨论。根据文献[5]的思想,辅助通道由如下变换矩阵构造:

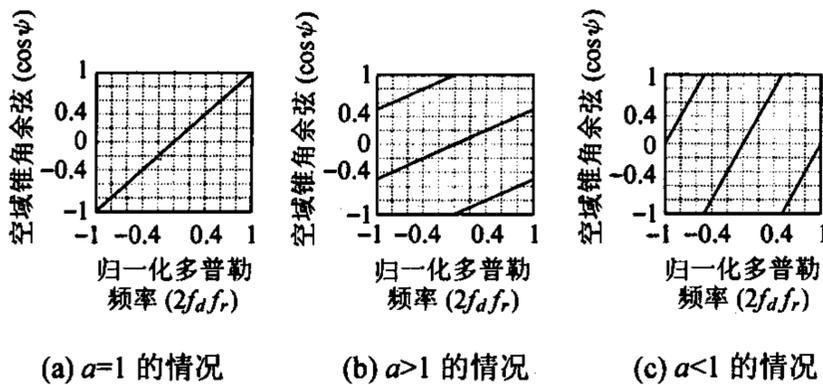


图2 正侧视AEW雷达杂波谱在波束-多普勒域的分布特性

$$T_L = [S_S(\varphi_{S1}) \otimes S_T(f_{d1}), S_S(\varphi_{S2}) \otimes S_T(f_{d2}), \dots, S_S(\varphi_{SL}) \otimes S_T(f_{dL})] \quad (17)$$

对于情况(1), $a=1$, 由于杂波谱沿直线:

$$2f_{d1}/f_r = \cos\psi_{S1} \quad (18)$$

分布,因此沿该直线均匀选取 $L=N+K-1$ ^[5] 个辅助波束,此时,杂波不存在方位模糊和多普勒模糊,只存在距离模糊。

对于情况(2), $a>1$, 由于复正弦函数具有周期性,因此杂波谱沿直线:

$$2f_{d1}/f_r = a \cos\psi_{S1}, \quad -1 \leq \cos\psi_{S1} \leq 1 \quad (19)$$

分布,所以沿该直线均匀选取 $L=a_2 N + a_1 K - a_1 a_2$ (其中 $a_2/a_1=a$, 并且 a_1 和 a_2 为互质的正整数)^[7] 个辅助波束,此时,杂波只存在多普勒模糊,不存在距离模糊或距离模糊程度较轻(为了避免或降低距离模糊,该情况在AEW雷达中比较常见)。

对于情况(3), $a<1$, 同情况(2), 杂波谱沿直线:

$$\cos\psi_{S1} = (1/a)(2f_{d1}/f_r), \quad -1 \leq 2f_{d1}/f_r \leq 1 \quad (20)$$

分布,所以沿该直线均匀选取 $L=a_2 N + a_1 K - a_1 a_2$ (a_1 和 a_2 定义同上)^[7] 个辅助波束,此时,杂波存在方位模糊和距离模糊(由于距离模糊比较严重,该情况在AEW雷达中很少见到)。

辅助通道还可以参考文献[8, 9]的方法(文献[8, 9]分别称为局域联合(Joint Domain Localized, JDL)方法和空时相邻多波束(Space Time Multiple Beam, STMB)方法)来构造,虽然这种方法不容易避开各训练样本中的孤立干扰,但是由于由若干训练样本统计平均均匀杂波协方差矩阵时可以弱化孤立干扰的影响,因此训练样本中的孤立干扰对待检测单元的影响较小,这种方法的主要优点在于它对阵元(子阵)的误差鲁棒性较好。

4 孤立干扰的抑制算法

由于孤立干扰只存在于待检测距离单元,因此孤立干扰的信息无法从邻近的距离单元获得,只能由待检测距离单元本身估计得到,必须用直接数据域算法逐距离门处理。同样地,为了避免信号相消,用式(4)–(8)的方法将目标信号滤除得到数据 $Y_1 = \text{Vec}(X_{S1})$, $Y_2 = \text{Vec}(X_{S2})$, $Y_3 = \text{Vec}(X_{T1})$, $Y_4 = \text{Vec}(X_{T2})$ 和 $Y_5 = \text{Vec}(X_{ST})$, 然后按如下线性约束最小方差(LCMV)准则计算抑制孤立干扰的最优权:

$$\left. \begin{aligned} \min_{W_2} W_2^H R_Y W_2 \\ \text{s.t. } W_2^H S = 1 \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

$$\text{式中: } R_Y = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 Y_i Y_i^H$$

这里导向矢量 S 为抑制均匀杂波的自适应权矢量 W_1 , 因此由式(21)可得:

$$W_2 = R_Y^{-1} W_1 / (W_1^H R_Y^{-1} W_1) \quad (22)$$

虽然 R_Y 中既包含均匀杂波的信息,又包含孤立干扰的信息,但是由于 W_1 是滤除均匀杂波的最优权,因此可以等效认为导向矢量为指向目标信号的导向矢量, R_Y 中只包含孤立干扰的信息,不包含均匀杂波的信息,因而由式(16)得到的自适应权 W_1 只抑制均匀杂波,由式(22)得到的自适应权 W_2 只抑制孤立干扰,所以滤除均匀杂波时不受孤立干扰的影响,而抑制孤立干扰时也不受均匀杂波的影响,职责明确,互不影响。同样地,由于数据 Y 中不包含均匀杂波,虽然训练样本数目只有5个,但是与所对付的孤立干扰维数相比要多一些,因此由式(22)得到的自适应权 W_2 完全能够将孤立干扰有效滤除。而在文献[2, 3]的方法中,由于均匀杂波的存在,因此直接数据域算法的自适应权会试图抑制均匀杂波(由于杂波的功率比孤立干扰的要强得多,因此自适应权花在均匀杂波上的自由度要比花在孤立干扰上的多)而职责不明确,而

此时训练样本数目也只有 5 个，最多只能提供 5 个自由度，本得到的自适应权由于协方差矩阵估计损失的原因不但不能滤除均匀杂波，而且也不能抑制孤立干扰，而级联的统计方法又只有滤除均匀杂波的能力，根本没有抑制孤立干扰的能力，所以最终由于孤立干扰的影响而导致虚警概率上升。

5 实验研究

实验 1 本实验用较典型的参数对本文方法和文献[2, 3]的方法的处理性能进行计算机仿真分析。雷达系统采用 16 列×4 行的正侧视面阵阵列结构，雷达工作波长为 0.23m，脉冲重复频率为 2260Hz，脉冲积累数目为 24，波束指向方向偏离阵面法向 90°，输入杂噪比为 60dB，载机的飞行速度为 130m/s，飞行高度为 6000m。发射时俯仰和方位均为等(不)加权，而接收时俯仰加权 20dB，对于本文方法，主通道的方位加权 40dB，多普勒加权 70dB，辅助通道的方位等(不)加权，多普勒加权 70dB^[5]，对于文献[2, 3]的方法，方位和多普勒均为等(不)加权，由于在某些距离单元中注入了目标信号和孤立干扰，因此为非均匀环境。由系统参数可以看到杂波的分布特性为情况(1)($a=1$)，本文方法按照文献[5]的方法选取 9 个辅助波束来构造辅助通道。为了便于比较本文方法和文献[2, 3]的直接数据域(DDD)方法的性能，在 435 号距离单元注入一 SNR=20dB 的目标信号，在 465 号距离单元注入一 INR=20dB 的孤立干扰，图 3 给出了 465 号距离单元的方向图(图 3(a)和图 3(b))和 401-500 号距离单元的处理结果(图 3(c)和图 3(d))。

从图 3(a)和 3(b)可以看出，由式(23)得到的权 W_2 同时在孤立干扰和杂波处形成了很深的凹口，可以同时抑制均匀杂波和孤立干扰，而文献[2, 3]的直接数据域算法的权本意是想抑制孤立干扰，但是由于均匀杂波的影响，导致该权职责不明确，既不能在孤立干扰处形成凹口，也不能在均匀杂波处形成凹口，从而最终不能有效滤除孤立干扰和均匀杂波，这一点还可以由图 3(c)和 3(d)得到进一步证实，另外，图 3(a)的主瓣宽度比图 3(b)的宽，这是由本文方法加权引起的，至于计算量，由于文献[2, 3]中方法级联的统计 JDL 方法的变换矩阵是随距离单元变化的，因此抑制孤立干扰和均匀

与所对付的干扰的自由度相比要少得多，因而由 5 个训练样本杂波都需要逐距离单元计算自适应权，而本文方法只是在抑制孤立干扰时逐距离单元计算权，因而本文方法比文献[2, 3]方法的计算量小。

实验 2 本实验用比较实际的参数对本文方法处理的实用性和稳健性进行计算机仿真分析。实验雷达系统的脉冲重复频率为 1130Hz，阵元幅相误差为 5%，其他参数同实验 1。由于在某些距离单元中注入了目标信号和孤立干扰，因此为非均匀环境。由系统参数可以看出杂波存在多普勒模糊，没有偏航时杂波的分布特性为情况(2)($a>1$)，因而沿式(19)所表示的杂波斜带均匀选取 $2 \times N + K - 2 = 54$ 个辅助波束来构造辅助通道，存在偏航时地杂波散射体回波的多普勒频率为

$$\left(\frac{\lambda f_r}{4V}\right)^2 \left(\frac{2f_d}{f_r}\right)^2 + \cos^2 \psi_s - \cos \alpha \left(\frac{\lambda f_r}{4V}\right) \left(\frac{2f_d}{f_r}\right) \cos \psi_s = \cos^2 \theta_s \sin^2 \alpha \quad (23)$$

对于偏航角度很小时，由于 $\sin^2 \alpha \approx 0$ ，因此由上式可以近似得到

$$\left(\frac{2f_d}{f_r}\right) \approx \left(\frac{4V}{\lambda f_r}\right) (\cos \alpha \pm \sqrt{\cos^2 \alpha - 1} \cos \psi_s) \approx \left(\frac{4V}{\lambda f_r}\right) \cos \alpha \cos \psi_s \quad (24)$$

所以沿上式所表示的杂波斜带均匀选取 54 个波束来构造辅助通道。为了便于研究本文方法的处理性能，在 435 号距离单元注入一 SNR=20dB 的目标信号，在 465 号距离单元注入一 INR=20dB 的孤立干扰，图 4 给出了没有偏航和偏航 5°时两种情况下 465 号距离单元的方向图(图 4(a)和图 4(b))和 401-500 号距离单元的处理结果(图 4(c)和图 4(d))。

由图 4(a)和 4(b)可以看出，两种情况在两个强杂波和孤立干扰的地方都能同时形成 3 个较好的零点，图 4(c)和 4(d)的良好检测结果也说明了这一点。因为在该实验中文献[2, 3]的处理结果无法检测到目标，所以本文没有给出其实验结果。

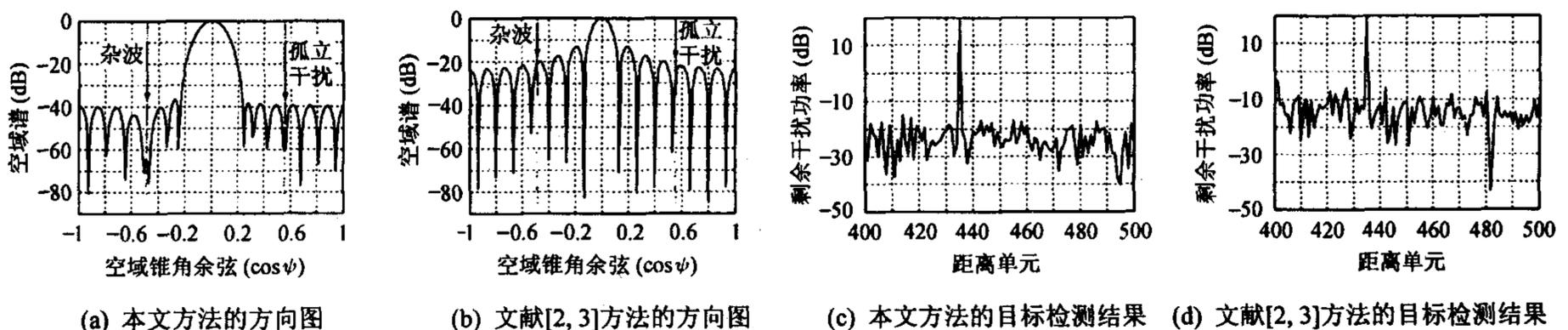


图 3 实验 1 的处理结果

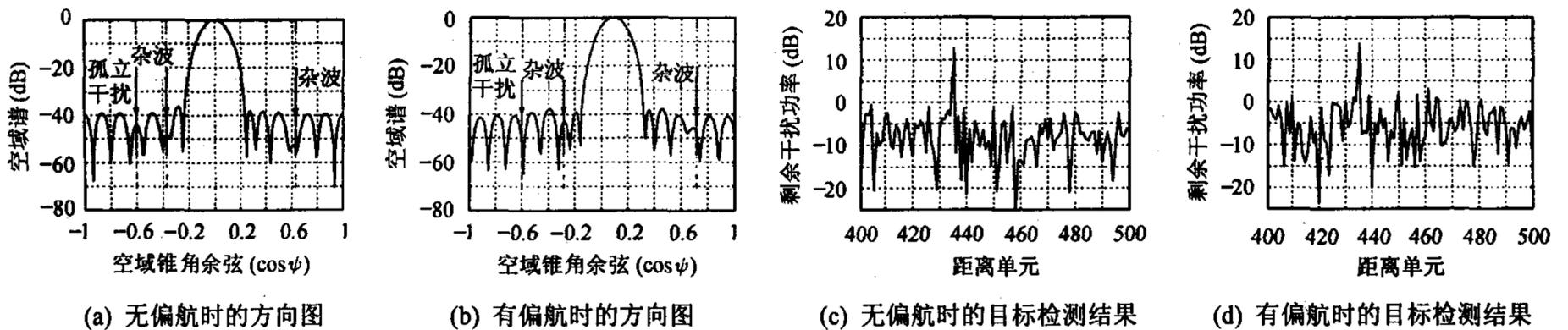


图4 实验2的处理结果

6 结论

在非均匀杂波环境中,孤立干扰若得不到有效抑制必将引起目标检测性能的严重变差,现有的直接数据域和统计局域联合处理两级级联算法在抑制孤立干扰的直接数据域算法中,由于均匀杂波的存在以及极少的训练样本而无法达到预期目的。因此本文提出了一种新的非均匀环境下两级空时自适应处理的级联算法,即首先根据均匀杂波的分布特性选取辅助波束用辅助通道法滤除均匀杂波,然后用直接数据域算法抑制孤立干扰。由于孤立干扰与均匀杂波具有不同的分布特性,因此用辅助通道法滤除均匀杂波时不受孤立干扰的影响,这样均匀杂波经过有效滤除后,级联的直接数据域算法由于不受均匀杂波的影响,就可以用极少的训练样本训练对付孤立干扰的自适应权。理论分析和计算机仿真结果表明,本文方法具有优良的性能、较好的鲁棒性和较强的工程实用价值等优点。

参考文献

- [1] Brennan L E, Mallett J D. Theory of adaptive radar [J]. *IEEE Trans. on AES*, 1973, 9(2): 237 - 251.
- [2] Adve R S, Hale T B, Wicks M C. A two stage hybrid space-time adaptive processing algorithm [A]. *IEEE National Radar Conference*, Boston, MA, April 1999: 279 - 284.

- [3] Adve R S, Hale T B, Wicks M C. Practical joint domain localized adaptive processing in homogeneous and nonhomogeneous environments, part 2: nonhomogeneous environments [J]. *IEEE Proc.-F*, 2000, 147(2): 66 - 74.
- [4] 董瑞军. 机载雷达非均匀 STAP 方法及其应用[D]. [博士论文], 西安: 西安电子科技大学, 2002年9月.
- [5] Klemm R. Adaptive airborne MTI: an auxiliary channel approach [J]. *IEEE Proc.-F*, 1987, 134(3): 269 - 276.
- [6] 廖桂生, 保铮, 张玉洪. 相控阵 AEW 雷达杂波抑制的简化辅助通道法[J]. *电子科学学刊*, 1993, 15(5): 475 - 481.
- [7] Francos J M, Fu W, Nehorai A. Interference mitigation for STAP using the two-dimensional wold decomposition model [A]. *IEEE ICASSP 2002*, May 2002, vol. 3: III-2897 - III-2900.
- [8] Wang H, Cai L. On adaptive spatial-temporal processing for airborne surveillance radar systems [J]. *IEEE Trans. on AES*, 1994, 30(3): 660 - 669.
- [9] 王永良, 吴志文, 彭应宁. 适于非均匀杂波环境的空时自适应处理方法[J]. *电子学报*, 1999, 27(9): 56 - 58.

王万林: 男, 1970年生, 博士生, 主要研究方向为: 雷达信号处理、宽带阵列信号处理。

廖桂生: 男, 1963年生, 教授, 博士生导师, 中国电子学会高级会员, IEEE 会员, 发表学术论文 50 余篇, 获部委科技进步一等和二等奖多次, 主要从事雷达信号处理、通信信号处理和阵列信号处理等方面的研究。