

空时二维自适应处理的目标污染样本挑选方法

王 彤, 保 铮

(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室, 陕西西安 710071)

摘 要: 在空时二维自适应处理 (STAP) 中, 杂波样本数据不满足独立同分布 (iid) 条件是影响 STAP 处理的一个重要因素. 这种非 iid 特性不仅包含地面的不均匀性和散射体的内部运动, 也包括了目标和一些类似目标的干扰造成的样本数据污染. 在某些情况下, 被目标污染的样本会对权系数矢量的估计造成明显的影响, 使输出信杂比大大下降. 本文首先分析了目标信号对广义旁瓣相消结构 (GSC) 处理方式的影响, 指出采用阻塞矩阵和不包含检测单元的辅助数据不能有效消除目标信号的影响. 而现有的非均匀检测 (NHD) 方法不能有效挑出污染样本. 据此, 本文提出杂波剩余功率下降的目标污染样本选择准则和两种新的非均匀样本检测方法, 可以将对自适应有影响的污染样本数据剔除. 试验结果证实了新方法的有效性, 而且其中一种方法的运算量很小, 便于工程实现, 具有较高的应用价值.

关键词: 空时二维自适应处理; 杂波抑制; 非均匀信号检测

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 12A-1840-05

The Contaminated Sample Selecting Method for STAP

WANG Tong, BAO Zheng

(Key laboratory of radar signal processing, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: The performance of STAP degrades severely when the training samples are not independently and identically distributed (iid). The iid assumption is violated not only by the nonhomogeneity of the ground and the inner moving of the scatterer but also by the targets and other interferences. In some cases, the sample contaminated by a target will affect the estimation of the weight vector effectively and the output SCNR of STAP degrades evidently. In this paper, the target effect on the generalized sidelobe cancellor (GSC) is analysed. It seems that the blocking matrix and the secondary data training can not avoid the effect effectively. And the existing nonhomogeneity detectors can not select the contaminated sample exactly also. So a new NHD criterion and two new NHD methods are proposed. The computer simulation results show good performance can be obtained. Moreover, one of them is computationally easy and suits applications.

Key words: STAP (space time adaptive processing); clutter suppression; NHD (nonhomogeneity detector)

1 引言

在机载雷达中采用相控阵天线使空时二维自适应处理 (STAP) 成为可能. STAP 通常采用最小方差准则估计权矢量, 利用空时数据改变系统的二维响应达到抑制杂波的目的.

杂波统计特性随距离变化的非均匀杂波环境使机载雷达难以获得独立同分布 (iid) 的杂波数据. 地面散射体的非均匀性和内部运动造成的不同距离的杂波具有不同的杂波谱是非均匀性的一个重要方面. 人们往往采用一些样本训练策略来减弱这种非均匀性. 主要方法是训练样本和权矢量随距离变化的样本选取方法, 比如滑窗法、分段处理、递推算法、滑洞 (Sliding Hole) 法^[1,2]. 这些方法都假设杂波数据在小的距离范围内是局部均匀的, 因此检测单元附近的距离单元的杂波数据具有较高的参考价值. 杂波非均匀性的另外一个重要方面是包括目标信号在内的一些孤立杂波的干扰, 这些杂波只是

出现在个别的距离单元, 因而不满足局部均匀的假设条件. 但这些孤立干扰对权矢量计算的扰动却是很明显的, 特别是对于多普勒滤波后自适应的降维处理方案. 权矢量小的扰动会带来系统输出信噪比较大的下降, 因此包括目标信号在内的孤立干扰对 STAP 的影响更为严重.

针对第二个问题, 人们常常采用阻塞矩阵和不包含检测单元的辅助数据以避免目标信号的影响. 本文首先分析了较强的目标信号对广义旁瓣相消结构 (GSC) STAP 的影响, 指出采用阻塞矩阵和不包含检测单元的辅助数据不能有效消除目标信号的影响. 在目标信号较强时, 必须采用非均匀检测 (NHD) 算法剔除被目标污染的样本, 使其不参与权系数的计算. 现有的 NHD 方法, 即广义内积 (GIP)^[3] 和修正的采样协方差矩阵求逆 (MSMI)^[4] 等方法不能有效挑出污染样本. 本文提出最小杂波剩余功率的非均匀样本选择准则和两种新的非均

匀检测方法, 可以将对自适应有影响的污染样本数据剔除. 试验结果证实了新方法的有效性, 而且其中一种方法的运算量很小, 便于工程实现, 具有较高的应用价值.

2 目标信号对 STAP 杂波抑制的影响

为了简化问题, 我们首先以采用频域局域化处理的广义旁瓣相消结构为例, 说明目标信号对 STAP 杂波抑制的影响. 如图 1 所示, 使用静态空域时域权矢量 w_s 将空时二维数据 x 合成主支路

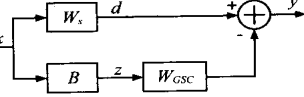


图 1 广义旁瓣相消结构

$d = w_s^H \cdot x$, 其中 H 表示共轭转置. 静态权矢量 w_s 为空域导向矢量和时域导向矢量的 Kronecker 直积, 主支路输出 d 相当于常规处理中的和波束通道在一个多普勒滤波器中的输出. 用阻塞变换矩阵 B 将空时二维数据合成 T 个空时二维辅助支路, 即 $z = B^H \cdot x$. 如果 B 具有阻塞作用, 在辅助支路中就不会包含目标信号. 系统输出 $y = d - w_{GSC}^H \cdot z$. 旁瓣相消权矢量的可以表示为

$$w_{GSC} = R_z^{-1} \cdot r_{zd} \quad (1)$$

式中 $R_z = E[zz^H] = B^H R_x B$ 为辅助支路的协方差矩阵, $r_{zd} = E[zd^*] = B^H r_{xd}$ 为主支路的互相关系数矢量, $*$ 表示取共轭. 由于理想的 R_z 和 r_{zd} 是无法确知的, 实际工作中总是用有限次快拍的平均值代替数学期望对 R_z 和 r_{zd} 进行估计. 设样本数为 p , 则它们的最大似然估计可以写成

$$R_z = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p z_i z_i^H, \hat{r}_{zd} = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p z_i d_i^* \quad (2)$$

则 $\hat{w}_{GSC} = R_z^{-1} \cdot \hat{r}_{zd}$. 在样本数据不包含目标信号时, 只要样本数足够多, 估计是精确的, 采用权系数 \hat{w}_{GSC} 可以有效地抵消主支路的杂波. 但是, 样本中包含目标信号是难以避免的. 假设第 t 个样本中包含目标信号, 而且变换矩阵 B 具有阻塞目标信号的作用, 目标信号分量在主支路和辅助支路的输出分别为 s 和 z_s , 杂波分量在该样本主支路和辅助支路输出分别为 d_t 和 z_t . 由于阻塞 $z_s = 0$, 辅助支路不含目标信号分量, 因此协方差矩阵的估计不变, 而相关矢量的估计变为

$$\hat{r}'_{zd} = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p z_i d_i^* + \frac{1}{p} z_s s^* \quad (3)$$

权矢量变为

$$\hat{w}'_{GSC} = R_z^{-1} \cdot \hat{r}'_{zd} + \frac{s^*}{p} R_z^{-1} z_s \quad (4)$$

某一距离单元的杂波输出为

$$\begin{aligned} y'_t &= d_t - \hat{w}'_{GSC} z_t = (d_t - \hat{w}'_{GSC} z_t) - \frac{s^*}{p} z_t^H R_z^{-1} z_t \\ &= y_t - \frac{s^*}{p} z_t^H R_z^{-1} z_t \end{aligned} \quad (5)$$

可以看到在相关矢量的估计中多了后一项, 即主支路目标信号 s 与所在距离单元(第 t 个样本)的辅助支路的杂波数据 z_t 的一个交叉项. 由于主支路数据 d 相当于常规处理中的和波束通道在一个多普勒滤波器中的输出, 所以 s 相当于常规处理得到的目标信号. 常规处理本身具有一定的杂波抑制能力, 很多目标采用常规处理方案是可以检测到的, 这就是说主支

路的目标信号 s 在数量级上可能接近甚至大于杂波在主支路的输出. 如果样本数 p 不是非常大, 目标信号 s 会对权矢量造成严重的影响. 随着 p 的增大, 目标信号的影响会成反比变小. 考虑到运算量和杂波的局部均匀性, 通常 p 的取值不可能很大. 式(5)给出了目标污染情况下某一距离单元的杂波输出 y'_t , 它等于没有目标污染时的滤波输出 y_t 加上 $(-\frac{s^*}{p} z_t^H R_z^{-1} z_t)$. 而对于目标所在的距离单元, 其杂波输出为

$$\begin{aligned} y'_t &= s + d_t - \hat{w}_{GSC} z_t = (d_t - \hat{w}_{GSC} z_t) + s - \frac{s^*}{p} z_t^H R_z^{-1} z_t \\ &= (d_t - \hat{w}_{GSC} z_t) + s(1 - \frac{1}{p} z_t^H R_z^{-1} z_t) \end{aligned} \quad (6)$$

由于协方差矩阵是正定的赫尔密特矩阵, $z_t^H R_z^{-1} z_t > 0$, 可以计算它的均值, 令 $\tilde{z}_t = R_z^{-1/2} z_t$, 则 \tilde{z}_t 的协方差矩阵 $R_z = E[R_z^{-1/2} R_z R_z^{-1/2}]$. 假设对协方差矩阵的最大似然估计是准确的, $\tilde{R}_z = I$, $R_z^{-1/2}$ 是 z_t 的白化矩阵, \tilde{z}_t 是 z_t 的白化结果. 由此得到

$$E[z_t^H R_z^{-1} z_t] = E[\tilde{z}_t^H \tilde{z}_t] = T$$

其中 T 为矢量 z_t 的长度, 也就是数据经过降维矩阵 B 后的维数. 通常系统自由度 T 总是小于样本数 p 的, 因此, $E[1 - \frac{1}{p}$

$z_t^H R_z^{-1} z_t] = \frac{p-T}{p} < 1$. 由式(6)可以看到, 对于目标所在的距离单元, 目标信号污染相关矢量会使目标的输出减弱, 如果样本数是自由度的两倍, 则目标信号的电压会损失一半, 即 6 分贝.

综上所述, 采用阻塞矩阵的广义旁瓣相消结构, 目标信号虽然只出现在主通道内, 也会对 STAP 造成显著的影响. 在仿真中我们会看到某些情况下这些影响是相当严重的.

假如降维矩阵没有对目标信号进行阻塞, 目标信号不仅会污染相关矢量, 也会污染协方差矩阵. 它对权矢量和滤波输出的影响更为复杂, 也更严重. 总的来说, 目标信号对协方差矩阵的影响要小于其对相关矢量的影响, 在此我们不给出进一步的说明.

为了避免目标信号污染样本, 人们也常常采用去掉检测单元的辅助数据(secondary data) 构成协方差矩阵和相关矢量^[1,2]. 即在对某一单元进行检测时, 使计算权矢量的统计量中不包含该距离单元及其附近单元(保护单元)的数据. 但是, 由上面分析可以看到, 辅助数据组中如果包含目标信号, 会对全数据组单元的输出产生影响, 只是在辅助数据中去掉检测单元, 它可以抑制检测单元中目标信号的下降, 却不能抑制杂波剩余的提高. 因此这种方法不能有效抑制的目标信号的影响.

3 用非均匀检测方法剔除污染样本

通过上面的分析, 我们知道样本中的目标信号会对空时二维处理造成不利的影响, 采用阻塞矩阵和去掉检测单元的辅助数据并不能有效地消除这种影响. 因此, 必须采用一定的非均匀检测方法剔除污染样本. 文献[3]和[4]为了挑选非均匀样本提出和比较了几种非均匀检测算法, 指出广义内积(GIP)和修正的采样协方差矩阵求逆是比较有效的方法.

广义内积方法假设杂波数据满足多维正态分布, 而且协方差矩阵是基本准确的. 通过计算某一距离门样本在协方差矩阵所确定的多维正态分布中出现的概率密度, 来判断该样本是否符合该分布. 某一距离门数据的广义内积可以写成

$$GIP_i = \mathbf{x}_i^H \mathbf{R}_x^{-1} \mathbf{x}_i = (\mathbf{R}_x^{-1/2} \mathbf{x}_i)^H (\mathbf{R}_x^{-1/2} \mathbf{x}_i) = |\mathbf{R}_x^{-1/2} \mathbf{x}_i|^2 \quad (7)$$

即白化矢量的模的平方, 容易证明 $E[GIP_i] = l$, l 是样本矢量 \mathbf{x}_i 的长度, 广义内积明显偏离均值的样本被认为是非均匀的.

由公式(7)可以看到, 广义内积有三个主要的缺点: (1) 广义内积假设数据是多维正态分布, 并且协方差矩阵基本准确, 在样本数量有限的情况下该假设很难满足; (2) 广义内积显然与数据矢量 \mathbf{x}_i 的模有关, 若数据矢量增大到原来的两倍, 广义内积也会增大到原来的四倍, 能量大的杂波数据很容易被误认为是非平稳杂波, 去掉这些能量大的杂波数据会使自适应凹口变浅, 减弱系统的杂波抑制能力; (3) 广义内积的计算中没有用到导向矢量, 与系统的空间角度指向和多普勒指向无关.

修正的采样协方差矩阵求逆 (MSMI) 方法从样本中剔除待检测的样本 \mathbf{x}_n 及其保护单元 $\mathbf{x}_{n-1}, \mathbf{x}_{n+1}$ (此处以两个保护

单元为例), 计算新的协方差矩阵 $\mathbf{R}_{x, n} = \frac{1}{p-3} \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq n-1, n, n+1}}^p \mathbf{x}_i \mathbf{x}_i^H$

(修正的协方差矩阵), 修正的协方差矩阵逆乘以导向矢量 \mathbf{s} 得到权矢量 $\mathbf{w}_n = \mathbf{R}_{x, n}^{-1} \mathbf{s}$, 用该权矢量对待测样本滤波的结果 $y_n = |\mathbf{s}^H \mathbf{R}_{x, n}^{-1} \mathbf{x}_n|$ 作为检验统计量判断样本的平稳性. 容易看出, 这种方法实际上就是用前面提到的去掉检测单元及其保护单元的辅助数据构成权矢量的滤波输出作为非平稳检验量.

注意在上面两种 NHD 算法的描述中, 针对的是直接法 STAP. 对于采用广义旁瓣相消的降维 STAP 算法, 数据矢量和协方差矩阵应该包含主支路和辅助支路的所有数据. 实验表明这两种方法都不能十分有效地检测出对系统滤波性能有较大危害的污染样本. 因此本文提出一种新的样本非均匀判定准则和两种新的非均匀检测方法.

杂波剩余功率下降的非均匀样本选择准则: 从样本集合中去掉某一样本 \mathbf{x}_n , 重新计算得到权矢量 \mathbf{w}_n , 如果该权矢量 \mathbf{w}_n 对样本集合中的其它样本进行滤波使得这些样本的平均杂波剩余明显减小, 就认为该样本 \mathbf{x}_n 是非均匀的.

由此可以得到第一种新的非均匀检测方法, 我们结合图 1 中的广义旁瓣相消结构进行说明. 首先采用所有的样本 $z_1,$

$\dots, z_p, d_1, \dots, d_p$ 计算协方差矩阵 $\mathbf{R}_z = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p \mathbf{z}_i \mathbf{z}_i^H$ 和相关矢量

$\hat{\mathbf{r}}_{zd} = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p \mathbf{z}_i d_i^*$, 计算权系数矢量 $\hat{\mathbf{w}}_{GSC} = \mathbf{R}_z^{-1} \cdot \hat{\mathbf{r}}_{zd}$. 接着针对待检测的样本 z_n , 计算去掉样本 z_n 后的协方差矩阵和相关矢量

$$\mathbf{R}_{z, n} = \frac{1}{p-1} \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^p \mathbf{z}_i \mathbf{z}_i^H = \frac{p}{p-1} (\mathbf{R}_z - \frac{1}{p} \mathbf{z}_n \mathbf{z}_n^H) \quad (8)$$

$$\hat{\mathbf{r}}_{zd, n} = \frac{p}{p-1} (\hat{\mathbf{r}}_{zd, n} - \frac{1}{p} \mathbf{z}_n d_n^*)$$

并计算权系数 $\hat{\mathbf{w}}_{GSC, n} = \mathbf{R}_{z, n}^{-1} \cdot \hat{\mathbf{r}}_{zd, n}$. 最后, 计算 $\hat{\mathbf{w}}_{GSC}$ 和 $\hat{\mathbf{w}}_{GSC, n}$ 对其它样本进行滤波的平均杂波剩余

$$y_n = \frac{1}{p-1} \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^p d_i - \mathbf{w}_{GSC}^H \mathbf{z}_i|^2, y'_n = \frac{1}{p-1} \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^p d_i - \mathbf{w}_{GSC, n}^H \mathbf{z}_i|^2 \quad (9)$$

对 y_n 和 y'_n 进行比较, 如果 y_n 明显大于 y'_n , 则认为第 n 个样本 z_n, d_n 是非均匀样本.

由上面看到, 这种检测方法计算量很大. 经过适当地简化, 可以使其运算量大大降低. 首先, 由于变换矩阵 \mathbf{B} 对信号是阻塞的, 辅助通道的数据中不包含目标信号, 因此可以认为协方差矩阵的估计是准确的, 不需要每一次都对协方差矩阵及其逆矩阵进行更新, 只需要更新主辅相关矢量. 这就大大节省了矩阵更新和求逆的运算量; 其次, 在剩余杂波功率的计算中, 可以利用矩阵的二次型

$$\begin{aligned} y_n &= \frac{1}{p-1} \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^p d_i - \mathbf{w}_{GSC}^H \mathbf{z}_i|^2 \\ &= \frac{1}{p-1} \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^p \begin{bmatrix} 1 \\ -\mathbf{w}_{GSC} \end{bmatrix}^H \begin{bmatrix} d_i \\ \mathbf{z}_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_i \\ \mathbf{z}_i \end{bmatrix}^H \begin{bmatrix} 1 \\ -\mathbf{w}_{GSC} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1 \\ -\mathbf{w}_{GSC} \end{bmatrix}^H \begin{bmatrix} \delta_n & \hat{\mathbf{r}}_{zd, n}^H \\ \hat{\mathbf{r}}_{zd, n} & \mathbf{R}_{z, n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ -\mathbf{w}_{GSC} \end{bmatrix} \quad (10) \end{aligned}$$

其中 $\delta_n = \frac{1}{p-1} \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^p d_i d_i^*$, y'_n 也可以采用同样的方法简化计算, 权矢量的计算中可以使用 Cholesky 分解和回代简化运算.

通过上面的简化, 对一个样本进行非均匀检测需要一次矢量相减和两次矢量数乘来计算新的相关矢量, 一次矩阵和矢量相乘计算 $\hat{\mathbf{w}}_{GSC, n}$ 和两次二次型计算 y_n 和 y'_n . 在后面的仿真试验中会看到其实根本不需要计算 y_n , 只从 y'_n 的曲线上我们就可以很容易地发现被目标污染的样本. 这种算法是非常有效和可靠的, 但其运算量还是比较大的.

下面提出另一种简单的非均匀检测方法, 时域临近波束方法. 图 1 中主支路的静态权矢量 \mathbf{w}_s 实际上是时空二维空间的一个二维波束, 我们可以在其附近形成另外一些波束, 在没有锥削的情况下, 这些波束在形状上相似, 接收的

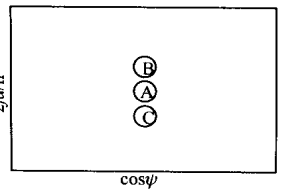


图 2 二维时空波束示意图

杂波也具有一定的相似性, 利用这些波束可以对非均匀信号进行检测. 如图 2 所示的是二维波束的示意图. 实验表明, 与主支路波束 A 空间指向相同而多普勒临近的两个波束 B 和 C 输出的杂波与波束 A 最为相近, 这是因为它们的空间方向图相同, 多普勒滤波器相似, 且共零点. 而且由于空间波束相同, 即使存在阵元幅相误差和通道误差, 这个特性也不会发生变化. 因为波束 A 的多普勒指向正好是波束 B 和 C 的零点, 所以波束 A 指向的目标在波束 B 和 C 中将没有响应. 我们可以用波束 A 与波束 B 和 C 输出的平均功率之比作为检验样本是否均匀的统计量. 即

$$Q_A = \frac{|d_i|^2}{|d_{B,i}|^2 + |d_{C,i}|^2} \quad (11)$$

其中 $d_i, d_{B,i}, d_{C,i}$ 分别是波束 A, B, C 在某一距离单元的标量输出. 值得注意的这三个波束是时域 FFT 的三个相邻输出, 作 FFT 时不能加锥形, 否则会破坏共零点特性, 使目标信号在波束 B 和 C 中也有较大的输出, 就无法完成对强目标信号的检测. 显然, 这种检测方法的运算量很小, 很容易实现, 而且后面的试验结果也证明这种方法对于较强的目标信号是十分有效的.

4 实验仿真结果举例

在实验仿真中采用一个矩形斜侧面相控阵天线, 横向为 50 列, 阵元间距为半波长, 每列 8 个阵元. 波长 0.2 米, 空域加权 -35dB , 阵面轴向偏离飞行方向 30° , 中重复频率 $PRF = 250\text{Hz}$, 载机速度为 220 米/秒, 列输入杂噪比为 $CNR = 60\text{dB}$, 脉冲积累数为 34, 载机高度 8000 米, 阵元幅相误差 5% , 采用三脉冲对消滤除主杂波, 后接图 1 的广义旁瓣相消结构, 辅助通道数(空时自由度) $T = 14$, 样本数 $p = 42$.

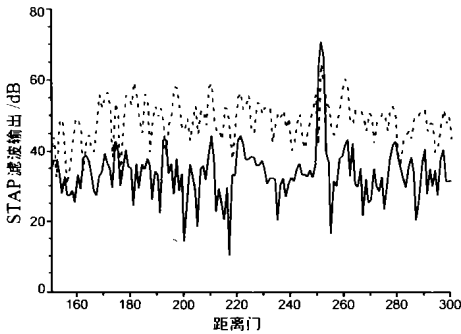


图 3 目标污染对滤波输出的影响

图 3 显示了目标信号对滤波输出的影响, 目标信噪比 $SNR = -5\text{dB}$, 目标出现在 251 号距离单元, 实线表示相关矢量中不包含目标污染样本的滤波输出曲线, 虚线表示相关矢量中包含污染样本 STAP 的滤波输出. 由图可见, 目标污染样本参与自适应权计算的确使输出信杂噪比显著下降. 由于权矢量受到扰动, 不仅杂波的平均功率显著上升了约 15dB , 而且目标的响应下降了约 5dB , 与前面分析的结果相同, 说明权矢量的微小扰动的确会给 STAP 处理带来严重的影响. 图中虚线还能看到目标信号, 但如果目标信号更强, 杂波输出功率还会进一步上升, 在某些情况下目标单元甚至不能形成尖峰.

下面给出用上述各种方法的处理结果. 图 4 给出各个样本广义内积的输出. 因为只有 42 个样本, 所以图中也只有 42 个点. 在计算广义内积时, 数据矢量和协方差矩阵应该包含主支路和辅助支路的所有数据, x_i 为 $(T+1)$ 维矢量, R_x 为 $(T+1) \times (T+1)$ 维的矩阵, 其中 $T = 14$. 根据前面的定义, $E[GP_i] = T+1 = 15$. 由图中可见, 这些样本的广义内积的均值的确在 15 附近, 但方差很大, 很多距离单元的都明显偏离均值, 或者大很多, 或者小很多, 包含目标信号的 251 号距离门样本只是其中之一, 这样有很多样本会被误判为非均匀样本, 系统的杂波抑制性能会显著下降.

图 5 给出修正协方差矩阵的结果. 图 5(a) 和图 5(b) 分别表示 $SNR = -10\text{dB}$ 和 5dB 的情况, 可见图 5(a) 中可以清楚地看到目标样本的输出很高, 而图 5(b) 却看不到. 说明修正的协方差矩阵方法可以检测出小的目标, 对大的目标却不敏感. 这是因为大的目标参与权矢量运算后, 使其它样本的杂波剩余大大增加, 见式(5). 目标样本淹没在杂波中, 很难被检测出来. 修正协方差矩阵方法对弱的目标可以检测出来, 对强的目标反而检测不出来. 这种特性对于非均匀检测是极为不利的.

图 6 给出最小杂波剩余检测的结果, 由图中可见在目标所在的样本单元, 平均杂波剩余功率 \bar{y}_n 很小, 而在其它单元, 平均杂波剩余功率很大, 而且基本相等. 在图

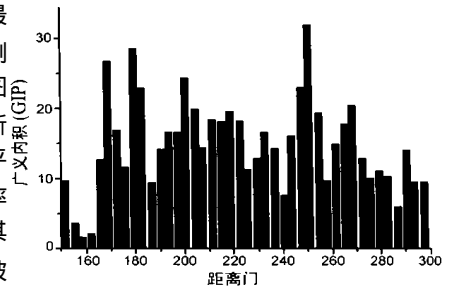


图 4 样本的广义内积

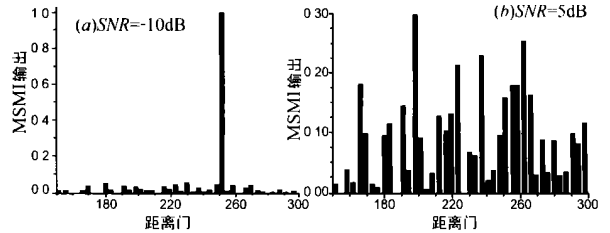


图 5 修正的协方差矩阵方法

中目标污染的样本单元形成了一个显的深凹口, 这说明实际上根本不需要计算其参照功率 y_n , 就可以准确地发现目标所在的单元. 在实验中我们还发现, 最小杂波剩余检测方法的优点是检测的动态范围很宽, 无论是很强的目标, 还是很弱的目标都可以有效地检测出来. 当然, 它的运算量较大, 很难满足实际系统实时处理的要求, 目前只具有一定的理论价值.

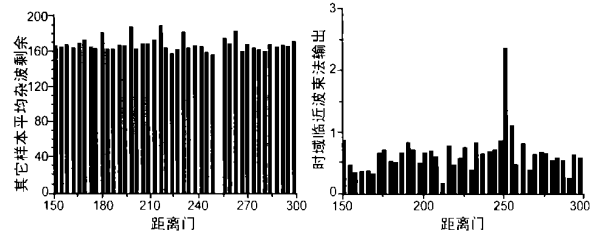


图 6 最小杂波剩余准则

图 7 时域临近波束法

图 7 中画出了时域临近波束非均匀检测法的结果, 信噪比 $SNR = -10\text{dB}$. 如果信噪比变大其检测性能会更好. 时域临近波束非均匀检测方法可以检测到 -10dB 以上的目标信号, 对于更弱的目标信号只有 MSMI 方法可以检测到. 对协方差矩阵和相关矢量构成影响的主要是较强的目标信号, 时域临近波束非均匀检测方法在一定程度上能够满足剔除污染样本的需要. 而且它的运算量小, 结构简单, 在工程实现上具有很大的优势. 如果变换矩阵 B 输出的辅助支路中本身就包含了两个临近的多普勒通道 B 和 C , 则系统几乎不需要增加任何

设备.

在仿真试验中还发现本文所涉及的所有的非均匀检测方法中,只有修正协方差矩阵求逆的方法可以发现极弱的信号,但它不能有效检测强的目标信号.因此我们不能希望用非均匀检测算法代替 STAP 滤波和检测,在剔除了非均匀样本后,滤波、检测还是必不可少的.

5 结论

被较强目标信号污染的样本参与权系数矢量的计算会使系统输出的信杂噪比下降,影响系统的检测性能.采用阻塞矩阵和不包含检测单元的辅助数据不能有效消除目标信号的影响.必须采用非均匀检测(NHD)算法剔除被目标污染的样本.现有的非均匀检测方法:广义内积(GIP)方法在剔除目标信号的同时往往会剔除许多有用的样本,修正的采样协方差矩阵求逆只能剔除功率较小的目标信号.本文提出的最小杂波剩余准则是一种动态范围较大的非均匀检测(NHD)算法,可以准确地找出被污染的样本,但运算量较大.时域临近波束非均匀检测方法运算量小,能够在一定程度上满足非均匀检测的需要,有较强的实用价值.

参考文献:

- [1] G K Borsari, A O Steinhardt. Cost efficient training strategies for space time adaptive processing algorithms [J]. Signals, Systems and Computers, 1995. Conference Record of the Twenty-Ninth Asilomar Conference on, 1996, 1: 650- 654.
- [2] D J Rabideau, A O Steinhardt. Improved adaptive clutter cancellation through data adaptive training [J]. IEEE Trans on AES, July 1999, 35 (3): 879- 891.
- [3] W L Melvin, M C Wicks. Improving practical space time adaptive radar [J]. IEEE National Radar Conference, 1997: 48- 53.
- [4] M C Wicks, W L Melvin, P Chen. An efficient architecture for nonhomogeneity detection in space time adaptive processing airbor

作者简介:

王 彤 男.1974 年 3 月出生于陕西西安.1996 年毕业于西安电子科技大学,获学士学位,现为西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室博士生,主要研究兴趣:阵列信号处理,空时二维自适应信号处理.

保 铮 男.1927 年生于江苏南通,中科院院士,教授,博士生导师,主要研究领域为雷达系统与检测.