

# 非均匀杂波环境 STAP 方法研究\*

谢文冲<sup>1,2\*\*</sup> 王永良<sup>2</sup>

1. 国防科技大学电子科学与工程学院, 长沙 410073;

2. 空军雷达学院雷达兵器运用工程军队重点实验室, 武汉 430019

**摘要** 分析了非均匀杂波对 STAP 算法性能的影响, 在此基础上提出了一种非均匀杂波环境下 STAP 杂波抑制方案. 该方案首先通过训练样本加权法抑制功率非均匀现象, 然后利用干扰点替代法消除干扰目标和孤立干扰对 STAP 算法的影响, 最后通过常规 STAP 算法实现对目标的检测. 计算机仿真结果验证了有效性.

**关键词** 非均匀杂波 空时自适应处理 加权法 替代法

常规空时自适应处理(STAP)技术属于统计方法, 一般是利用与待检测距离单元相邻的距离单元(不包含待检测距离单元本身及其保护单元)的数据作为训练样本来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. 但是对于实际工程中面临的剧烈变化的非均匀环境(非均匀性分为功率非均匀、干扰目标和孤立干扰等), 由于不同距离门的杂波样本具有不同的统计特性, 如果所有其他距离门样本都不包含待检测样本中部分甚至全部杂波信息, 自适应处理将不可能将待检测样本中的杂波有效抑制, 导致虚警率增加, 目标检测性能下降. 因此在非均匀杂波环境下, 统计 STAP 方法将难以应用.

功率非均匀主要是由杂波干扰引入的, 它指杂波功率的剧烈变化. 距离、地理环境的空间变化(水陆交界、城乡结合部、植被)、高大物体(如山峰)及其遮蔽(即由于雷达波束被高大物体遮挡形成的功率很低的区域)、人造的强点固定杂波(如桥梁、电线杆、市中心、铁塔、角反射器等)都会产生明显的功率变化. 对由功率非均匀引起的功率估计偏差问题, 文献[1]提出的功率选择训练法(PST)解决

了功率非均匀问题. PST 法根据测量到的实际杂波强度选择干扰功率足够强的样本作为训练样本来估计待检测距离单元的杂波协方差矩阵, 它较好地解决了功率估计不足的问题. 但是 PST 法的不足之处是它仅选择了部分样本来估计杂波协方差矩阵, 如果在训练样本数较少的情况下容易导致杂波协方差矩阵产生奇异.

干扰目标和孤立干扰(discrete interference)的重要来源之一是动目标, 其中包含在训练样本中的动目标称为干扰目标, 而包含在待检测样本中, 但在主瓣方向及待检测 Doppler 单元上的运动目标称为孤立干扰. 抑制干扰目标的主要方法是非均匀检测器(NHD)<sup>[2-5]</sup>, 首先将训练样本中不满足与待检测样本杂波分布 I. I. D. 条件的样本检测出来, 并加以剔除. 但是任何一种样本选择方案均意味着训练样本数的减少, 这会使得在实际应用中 STAP 算法本来就存在的训练样本不足问题更加突出. 抑制孤立干扰的主要方法是直接数据域(DDD)方法<sup>[6-8]</sup>, DDD 方法利用空域相邻两阵元或时域相邻两脉冲相消来滤除孤立杂波, 但仅适合于天线阵元均匀分布情况.

在对非均匀现象对 STAP 性能影响分析的基础

2006-04-28 收稿, 2006-09-05 收修稿

\* 武器装备预研基金(批准号: 51431040105JB4901)

\*\* E-mail: xwch1978@yahoo.com.cn

上, 提出了一种实用的非均匀杂波环境下 STAP 杂波抑制方案. 该方案分别通过加权法和替代法完成对功率非均匀和干扰目标及孤立干扰等各种非均匀现象的抑制, 最后通过常规 STAP 方法实现对运动目标的检测.

## 1 非均匀杂波环境对 STAP 的影响

假设雷达天线经过微波合成以后的线阵由  $N$  个等距阵元组成, 一个相干处理间隔(CPI)内的脉冲数为  $K$ . 将第  $n$  个阵元第  $k$  次快拍的接收数据记为  $x_{nk}$ , 则第  $n$  个阵元的阵列数据矢量  $\mathbf{X}(n)$  为

$$\mathbf{X}(n) = [x_{n1} \quad x_{n2} \quad \cdots \quad x_{nK}]^T \quad (1)$$

将  $\mathbf{X}(n)$ ,  $n=1, 2, \dots, N$  排成  $NK \times 1$  的列矢量  $\mathbf{X}$ , 即

$$\mathbf{X} = [\mathbf{X}^T(1) \quad \mathbf{X}^T(2) \quad \cdots \quad \mathbf{X}^T(N)]^T \quad (2)$$

STAP 算法中的最优处理器可以通过对  $\mathbf{X}$  进行线性加权实现, 设自适应处理的权矢量为  $\mathbf{W}(NK \times 1)$ , 则处理器输出为

$$y = \mathbf{W}^H \mathbf{X} \quad (3)$$

当待检测距离单元的杂波协方差矩阵已知时, 自适应处理的权矢量为

$$\mathbf{W}_{\text{opt}} = \frac{\mathbf{R}^{-1} \mathbf{S}}{\mathbf{S}^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{S}} \quad (4)$$

其中,  $\mathbf{R}$  为已知的杂波协方差矩阵,  $\mathbf{S}$  为待检测单元的空时二维导向矢量. 则输出信杂噪比为

$$\text{SCNR}_o | \mathbf{W}_{\text{opt}} = \frac{|b|^2 |\mathbf{W}^H \mathbf{S}|^2}{\mathbf{W}^H \mathbf{R} \mathbf{W}} = \mathbf{S}^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{S} \quad (5)$$

其中,  $b$  为目标回波幅度.

当杂波协方差矩阵未知时, 自适应处理的权矢量为

$$\hat{\mathbf{W}}_{\text{opt}} = \frac{\hat{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{S}}{\mathbf{S}^H \hat{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{S}} \quad (6)$$

其中  $\hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \mathbf{X}_l \mathbf{X}_l^H$ ,  $\mathbf{X}_l (l=1, 2, \dots, L)$  为训练样本. 则输出信杂噪比为

$$\text{SCNR}_o | \hat{\mathbf{W}}_{\text{opt}} = \frac{(\mathbf{S}^H \hat{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{S})^2}{\mathbf{S}^H \hat{\mathbf{R}}^{-1} \hat{\mathbf{R}} \hat{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{S}} \quad (7)$$

所以由于估计而造成的输出信杂噪比相对于确知协方差矩阵下的最优信杂噪比的损失为

$$Loss = \frac{(\mathbf{S}^H \hat{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{S})^2}{\mathbf{S}^H \hat{\mathbf{R}}^{-1} \hat{\mathbf{R}} \hat{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{S}} \cdot \frac{1}{\mathbf{S}^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{S}} \quad (8)$$

### 1.1 功率非均匀

功率非均匀会导致杂波功率估计不准. 杂噪比估计过低时, 样本协方差矩阵主要由噪声决定, 因而相应的自适应权不能形成足够深的凹陷, 造成凹陷过浅, 杂波得不到充分抑制, 造成干扰剩余功率增大(虚警率增加), 目标检测性能下降. 杂噪比估计过高时, 相应自适应权形成很深的凹陷, 此时, 常常带来凹陷展宽, 信号能量受到损失, 造成输出信杂噪比下降, 同样会降低目标检测性能. 由于功率非均匀造成的信杂噪比损失  $Loss_{\text{power}}$  为

$$Loss_{\text{power}} = \frac{(\mathbf{S}^H \hat{\mathbf{R}}_{\text{power}}^{-1} \mathbf{S})^2}{\mathbf{S}^H \hat{\mathbf{R}}_{\text{power}}^{-1} \hat{\mathbf{R}}_{\text{power}} \hat{\mathbf{R}}_{\text{power}}^{-1} \mathbf{S}} \cdot \frac{1}{\mathbf{S}^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{S}} \quad (9)$$

其中, 由功率非均匀训练样本估计得到的协方差矩阵  $\hat{\mathbf{R}}_{\text{power}}^{-1} = p \mathbf{R}_C + \mathbf{R}_N$ ,  $p$  表示渐进收敛的杂波功率偏差系数. 由(9)式可以看出,  $Loss_{\text{power}}$  的大小不仅与功率非均匀的剧烈程度有关, 也与待检测的 Doppler 通道有关. 图 1 给出了不同强度的训练样本和不同检测 Doppler 通道所造成的目标 SCNR 损失. 由图 1 可以看出: (1) 当功率估计偏差过低时造成的损失远远大于功率估计偏差过高的情况. 图 1 中功率估计偏差过高造成的损失表现不明显, 这是由于仿真参数选择的原因, 随着  $p$  的继续增大, 这种损失将会变得明显; (2) 对于不同的待检测 Doppler 通道, 功率非均匀造成的目标 SCNR 损失不同.

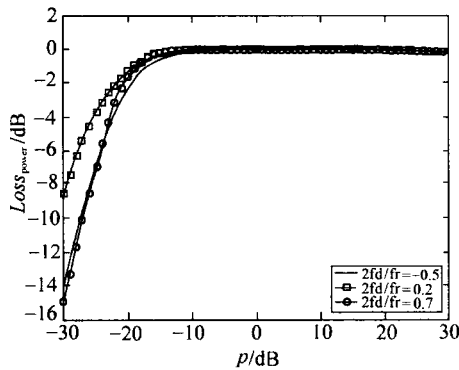


图 1 功率非均匀造成的目标 SCNR 损失

### 1.2 干扰目标

当存在干扰目标时,待检测样本中的干扰由杂波和噪声组成,而由于干扰目标的存在,训练样本反映出的干扰由干扰目标、杂波和噪声组成,从而导致训练样本和待检测样本中的干扰不满足 I. I. D. 条件. 训练样本中的强干扰目标会使自适应滤波器在此干扰所在的方位—Doppler 频率处形成零点. 当强干扰目标的方位(或 Doppler 通道)与待检测方位即主瓣方向(或待检测 Doppler 通道)相差较大时,这个多余的零点不会对检测带来多大影响;反之,如果强干扰目标的方位与待检测方位接近,所在 Doppler 通道也与待检测 Doppler 通道接近,这个本来不应有的零点就使得自适应方向图主瓣畸变,造成信号抵消,降低目标检测概率. 由于干扰目标造成的信杂噪比损失  $Loss_{IT}$  为

$$Loss_{IT} = \frac{(\mathbf{S}^H \hat{\mathbf{R}}_{IT}^{-1} \mathbf{S})^2}{\mathbf{S}^H \hat{\mathbf{R}}_{IT}^{-1} \mathbf{R} \hat{\mathbf{R}}_{IT}^{-1} \mathbf{S}} \cdot \frac{1}{\mathbf{S}^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{S}} \quad (10)$$

其中,包含干扰目标的干扰协方差矩阵估计值  $\hat{\mathbf{R}}_{IT}^{-1} = \mathbf{R} + \sum_{j=1}^J \sigma_{IT_j}^2 \mathbf{S}_{IT_j} \mathbf{S}_{IT_j}^H$ ,  $J$  表示训练样本中包含的干扰目标数,  $\sigma_{IT_j}^2$  表示第  $j$  个干扰目标的功率,  $\mathbf{S}_{IT_j}$  表示第  $j$  个干扰目标的空时导向矢量. 图 2 和图 3 分别给出了  $Loss_{IT}$  随干扰目标强度、方位以及 Doppler 频率的变化情况,待检测方位角和归一化 Doppler 频率分别为  $110^\circ$  和  $-0.375$ . 由图 2 和图 3 可以看出:(1)  $Loss_{IT}$  随着干扰目标强度的增大而增大;(2) 当干扰目标方位角离待检测方位角越近时,  $Loss_{IT}$  越大,反之越小;(3) 当干扰目标 Doppler 频率离待检测 Doppler 频率

越近时,  $Loss_{IT}$  越大,反之越小.

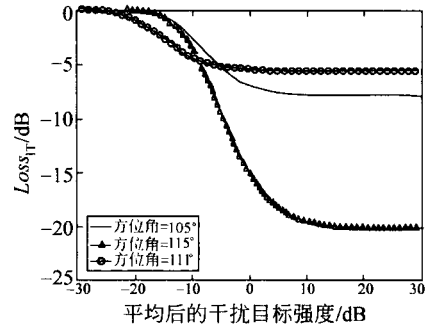


图 2  $Loss_{IT}$  随干扰目标强度和干扰目标方位变化情况

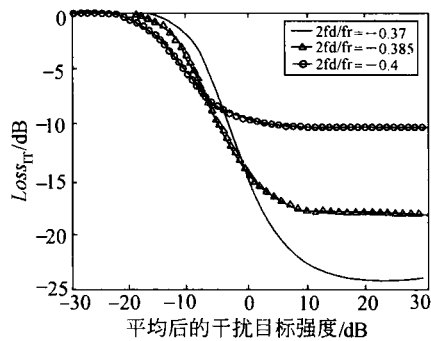


图 3  $Loss_{IT}$  随干扰目标强度和干扰目标 Doppler 频率变化情况

### 1.3 孤立干扰

当存在孤立干扰时,训练样本反映出的干扰由杂波和噪声组成,而由于孤立干扰的存在,待检测样本中的干扰由孤立干扰、杂波和噪声组成,从而导致训练样本和待检测样本中的干扰不满足 I. I. D. 条件. 由训练样本估计得到的自适应权值不可能抑制孤立干扰,造成干扰剩余功率增大,导致虚警率增加,目标检测性能下降. 由于孤立干扰造成的信杂噪比损失  $Loss_{DT}$  为

$$Loss_{DT} = \frac{(\mathbf{S}^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{S})^2}{\mathbf{S}^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{R}_{DT} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{S}} \cdot \frac{1}{\mathbf{S}^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{S}} \quad (11)$$

其中,包含孤立干扰的待检测样本的协方差矩阵  $\mathbf{R}_{DT} = \mathbf{R} + \sum_{j=1}^{J'} \sigma_{DT_j}^2 \mathbf{S}_{DT_j} \mathbf{S}_{DT_j}^H$ ,  $J'$  表示训练样本中包含的干扰目标数,  $\sigma_{DT_j}^2$  表示第  $j$  个孤立干扰的功率,  $\mathbf{S}_{DT_j}$

表示第  $j$  个孤立干扰的空时导向矢量. 图 4 和图 5 分别给出了  $Loss_{DT}$  随孤立干扰强度、方位以及 Doppler 频率的变化情况, 待检测方位角和归一化 Doppler 频率分别为  $110^\circ$  和  $-0.5$ . 由图 4 和图 5 可以看出: (1)  $Loss_{DT}$  随着孤立干扰强度的增大而增大; (2) 当孤立干扰方位角离待检测方位角越近时,  $Loss_{DT}$  越大, 反之越小; (3) 当孤立干扰 Doppler 频率离待检测 Doppler 频率越近时,  $Loss_{DT}$  越大, 反之越小.

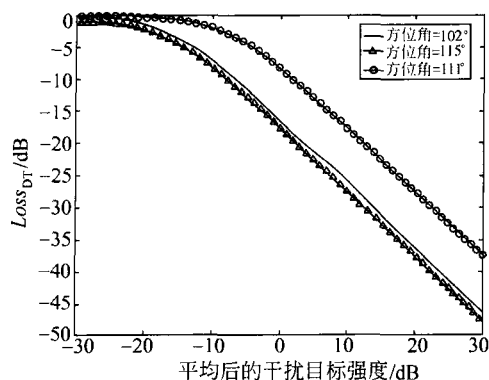


图 4  $Loss_{DT}$  随干扰目标强度和孤立干扰方位变化情况

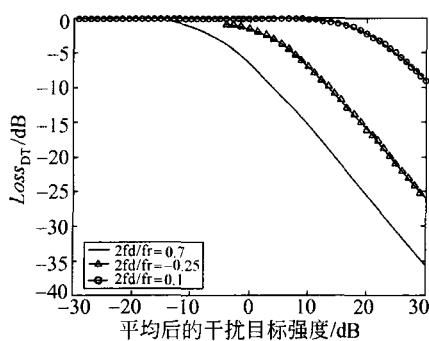


图 5  $Loss_{DT}$  随干扰目标强度和孤立干扰 Doppler 频率变化情况

## 2 非均匀杂波抑制

### 2.1 功率非均匀抑制

对于统计型 STAP 算法, 待检测样本的协方差矩阵一般由训练样本估计得到, 即  $\hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \mathbf{X}_l \mathbf{X}_l^H$ . 为了精确估计协方差矩阵, 我们希望能与待检测样本 I.I.D. 的训练样本在估计过程中占的比重大一些, 其他非均

匀样本占的比重小一些. 通过训练样本加权法来抑制功率非均匀现象, 即

$$\hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L W_l^2 \mathbf{X}_l \mathbf{X}_l^H \quad (12)$$

其中第  $l$  个训练样本加权值  $W_l = \sqrt{\frac{P_0}{P_l}}$ ,  $P_0 = \mathbf{X}_0^H \mathbf{X}_0$  表示待检测样本功率,  $P_l = \mathbf{X}_l^H \mathbf{X}_l$  表示第  $l$  个训练样本功率. 则经过上述处理以后各个样本回波信号在功率强度上与待检测样本将保持基本一致. 经过功率非均匀抑制后的第  $l$  个训练样本为

$$\mathbf{X}_l^i = W_l \mathbf{X}_l \quad (13)$$

### 2.2 干扰目标和孤立干扰抑制

现有的干扰目标抑制方法一般是首先通过各种 NHD 检测出包含干扰目标的训练样本, 然后剔除这些非均匀样本, 利用剩余的均匀样本来估计协方差矩阵. 这些方法的缺点是容易导致训练样本数不足, 使得估计出的样本协方差矩阵奇异. 现有的孤立干扰抑制方法一般是直接数据域 (DDD) 信号滤除法<sup>[9, 10]</sup>, DDD 信号滤除法容易造成空域和时域的孔径损失, 并且算法的一个前提条件是要求阵元间距必须是等距的. 这里通过替代法来抑制干扰目标和孤立干扰. 为了叙述方便, 下面将干扰目标和孤立干扰统称为干扰点.

**2.2.1 干扰点检测** NHD 一般分为两类: 自适应 NHD 和非自适应 NHD, 其中自适应 NHD 由于要利用估计后的杂波协方差矩阵, 所以当存在多个干扰点时其对于干扰点的检测性能容易受到其他干扰点的影响. 非自适应 NHD 不需要估计协方差矩阵, 所以这里对干扰点的检测利用常规的空时级联 (CST) 统计量.

利用常规空时级联权  $\mathbf{S}$ , 即静态权处理训练样本, 得到常规空时级联统计量如下:

$$\eta(\mathbf{X}_l^i, f_a, \phi_s) = |\mathbf{S}^H(f_a, \phi_s) \mathbf{X}_l^i|^2 \quad (14)$$

其中,  $\mathbf{S}(f_a, \phi_s)$  表示空时导向矢量,  $\mathbf{X}_l^i$  表示经过功率非均匀抑制后的第  $l$  个距离单元样本. 则

$$\begin{cases} \eta(\mathbf{X}_i^1, f_d, \psi_s) \geq \eta_0 & \text{存在干扰点} \\ \eta(\mathbf{X}_i^1, f_d, \psi_s) < \eta_0 & \text{不存在干扰点} \end{cases} \quad (15)$$

其中  $\eta_0$  表示判决门限. 将(15)式应用于所有的样本即可判断出各个样本中点  $(f_d, \psi_s)$  处是否存在干扰点, 这里不包含待检测点. 从上式可以看出其仅能判断出强度大于杂波的干扰点, 而无法判断强度小于杂波的干扰点. 但是从 1.2 节的分析可知, 干扰点强度越大造成的损失越严重, 干扰点强度小于杂波时所造成的损失可以忽略不计. 这里仅仅考虑对强干扰点的抑制问题.

**2.2.2 干扰点抑制** 在干扰点位置已知的前提下通过替代法来完成对干扰点的抑制. 首先对经过功率非均匀抑制以后的各个距离单元的回波信号进行二维离散 Fourier 变换(2D-DFT), 将其从阵元-脉冲域变换到波束-Doppler 域, 即

$$\mathbf{X}_i^2 = 2D-DFT(\mathbf{X}_i^1) \quad (16)$$

假设干扰点在波束-Doppler 域的位置为  $(f_{d_0}, \psi_{s_0})$ ,

二维 DFT 变换的点数分别为  $N$  和  $K$ , 则干扰点  $(f_{d_0}, \psi_{s_0})$  的回波信号可通过下式代替, 即

$$\mathbf{X}_i^2(f_{d_0}, \psi_{s_0}) = \frac{1}{NK} \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \mathbf{X}_i^2(f_{d_k}, \psi_{s_n}), \quad (f_{d_k}, \psi_{s_n}) \neq (f_{d_0}, \psi_{s_0}) \quad (17)$$

如果被代替的干扰点为干扰目标, 则  $(f_{d_{k_0}}, \psi_{s_{n_0}})$  指训练样本中包含的所有被检测出的干扰目标点; 如果被代替的干扰点为孤立干扰, 则  $(f_{d_{k_0}}, \psi_{s_{n_0}})$  不仅包含待检测样本内的所有被检测出的孤立干扰点, 而且包含待检测的目标点. 然后再将各个距离单元的样本经过二维逆 Fourier 变换(2D-IDFT)转换到阵元-脉冲域, 即

$$\mathbf{X}_i^3 = 2D-IDFT(\mathbf{X}_i^2). \quad (18)$$

最后对经过处理以后的数据  $\mathbf{X}_i^3$  进行 STAP 杂波抑制和目标检测. 非均匀杂波环境下 STAP 算法处理流程如图 6 所示.

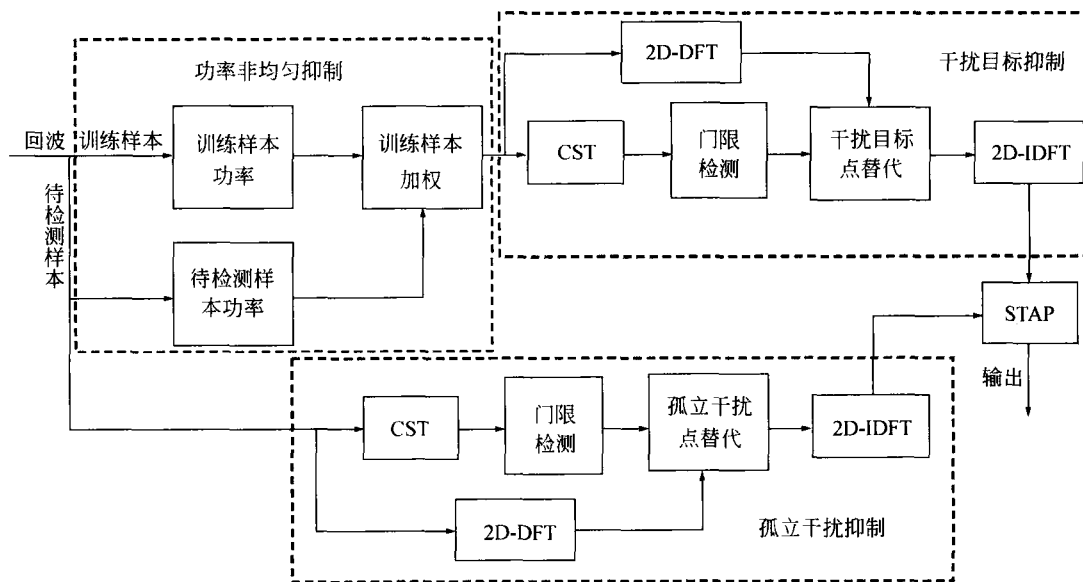


图 6 非均匀杂波环境下 STAP 算法处理流程图

### 3 实验研究

利用仿真数据研究非均匀杂波环境下 STAP 算法的处理性能. 仿真时采用 16 行  $\times$  16 列的正侧视

阵列, 雷达工作波长为 0.23 m, 载机速度为 140 m/s, 载机高度为 8000 m, 脉冲重复频率为 2434.8 Hz, 一次相干处理间隔内雷达发射的脉冲数为 16, 波束指向阵面法线方向, 输入杂噪比为

60 dB. 待检测距离为 200 km, 距离分辨率为 150 m, 我们重点考察与 200 km 相邻的 130 个距离单元, 其中第 65 个距离单元为待检测距离单元. 回波数据在距离向分为 3 种不同的 CNR, 分别是 65, 60 和 55 dB. 在第 65 个距离单元加入两个信噪比为 20 dB 的目标分别表示待检测目标和孤立干扰, 同时第 50 个距离单元加入一个信噪比为 20 dB 的目标表示干扰目标. 待检测的归一化 Doppler 频率  $2f_d/f_r = -0.1429$ , 孤立干扰和干扰目标在空时二维平面上的位置均为  $(-0.2063, -0.1429)$ , 如图 7 所示. 这里利用 1DT 法验证非均匀杂波抑制算法的性能. 图 8 给出了加权法抑制功率非均匀前后的样本数据功率距离向分布比较结果, 图 9 给出了替代法抑制干扰目标和孤立干扰前后的 1DT 算法的输出比较.

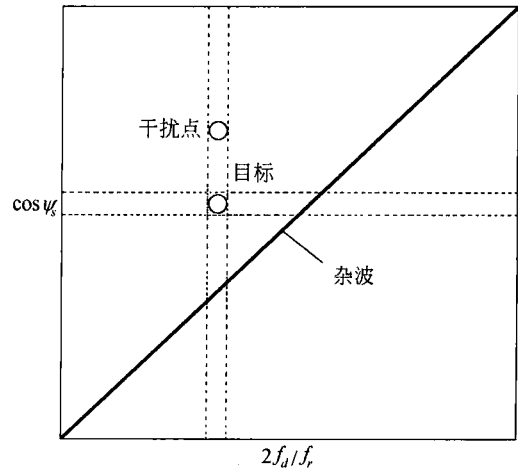


图 7 干扰点在空时二维平面分布图

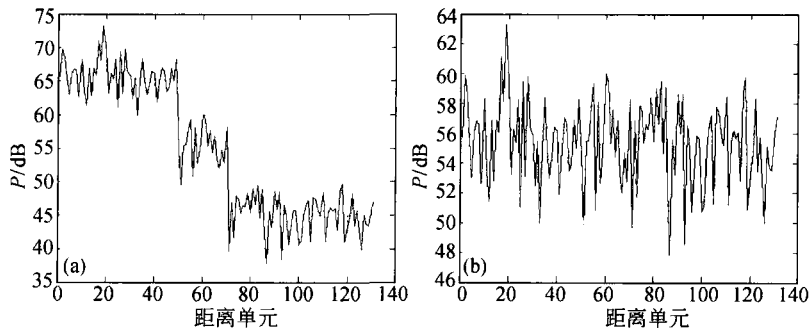


图 8 功率非均匀抑制前后回波功率距离向分布比较

(a) 抑制前; (b) 抑制后

从图 8 中可以看到, 虽然原始回波数据功率前后相差 10 dB, 但是经过样本加权处理后各个距离单元的回波功率基本相同, 消除了功率非均匀造成

的凹陷不足或凹陷过深的问题. 从图 9 中可以看到, 在不进行干扰点抑制的情况下, 1DT 算法输出在第 50 个距离单元存在虚警, 同时造成待检测距离单元

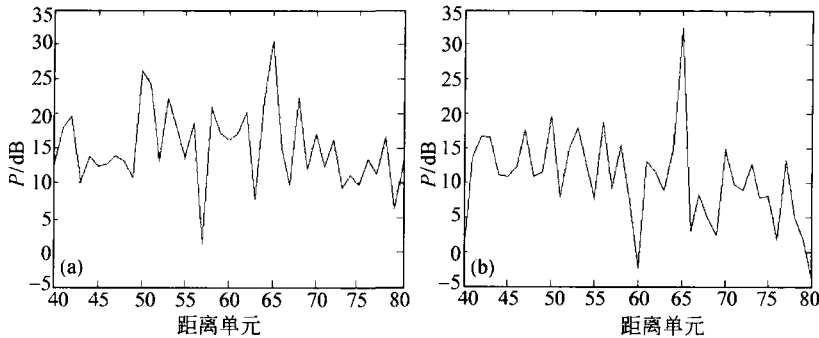


图 9 干扰点抑制前后 1DT 杂波剩余比较

(a) 抑制前; (b) 抑制后

输出 SCNR 下降, 原因是因为孤立干扰的存在消耗了一定的系统自由度. 经过分别对干扰目标和孤立干扰进行替代后, 消除了干扰点的影响, 1DT 算法输出性能得到很大程度的改善, 如图 9(b)所示, 在第 50 个距离单元不存在虚警, 且待检测距离单元 SCNR 改善了 3 dB 左右.

#### 4 结论

本文分析了非均匀杂波对 STAP 算法性能的影响, 并且提出了一种非均匀杂波环境下 STAP 杂波抑制方案. 在该方案中, 对功率非均匀现象提出了训练样本加权法, 不仅消除了功率非均匀现象, 同时解决了功率非均匀造成的凹陷过深和凹陷过浅两种问题; 对于干扰目标和孤立干扰两种非均匀现象提出了干扰点替代法, 在消除干扰点的同时解决了常规非均匀抑制方法造成的样本数不足问题. 仿真结果表明, 提出的非均匀杂波抑制方案不仅消除了虚警现象, 而且提高了 STAP 算法的 SCNR 改善性能. 此外, 本方案具有运算量小, 便于工程实现等优点.

#### 参 考 文 献

- 1 Rabideau DJ, Steinhardt AO. Improved adaptive clutter cancellation through data-training. *IEEE Trans AES*, 1999, 35(3): 879—891
- 2 Melvin WL, Wicks M C, Brown R D. Assessment of multi-channel airborne radar measurements for analysis and design of space-time processing architecture and algorithms. *IEEE National Radar Conference*, Annapolis, MD, 1996, 130—135
- 3 Melvin WL, Wicks M C. Improving practical space-time adaptive radar. *IEEE National Radar Conference*, Syracuse, NY, 1997, 48—53
- 4 Himed B, Salama Y, Michels JH. Improved detection of close proximity targets using two-step NHD. *IEEE International Radar Conference*, Alexandria, VA, 2000, 198—203
- 5 王永良, 彭应宁. 空时自适应信号处理. 北京: 清华大学出版社, 2000, 181—183
- 6 Adve RS, Wicks MC, Hale T B, et al. Ground moving target indication using knowledge based space time adaptive processing. *IEEE International Radar Conference*, Alexandria, VA, 2000, 735—740
- 7 Sarkar TK, Koh J, Adve RS, et al. A pragmatic approach to adaptive antennas. *IEEE AP Magazine*, 2000, 42(2): 39—55
- 8 Sarkar TK, Wang H, Park S, et al. A deterministic least-squares approach to space-time adaptive processing (STAP). *IEEE Trans AP*, 2001, 49(1): 91—103
- 9 Adve RS, Hale TB, Wicks M C. A two stage hybrid space-time adaptive processing algorithm. *IEEE National Radar Conference*, Boston, MA, 1999, 279—284
- 10 Adve RS, Hale TB, Wicks M C. Practical joint domain localized adaptive processing in homogeneous and nonhomogeneous environments. Part 2: Nonhomogeneous environments. *IEEE Proc-Radar, Sonar Navig*, 2000, 147(2): 66—74