

# 基于 3DT 的空时自适应单脉冲参数估计算法

于佳<sup>1</sup>, 沈明威<sup>1,\*</sup>, 吴迪<sup>2</sup>, 朱岱寅<sup>2</sup>

1. 河海大学 计算机与信息学院, 南京 211100

2. 南京航空航天大学 雷达成像与微波光子技术教育部重点实验室, 南京 210016

**摘要:** 空时自适应处理(STAP)是机载预警雷达抑制杂波和干扰的一项关键技术,而多普勒三通道联合自适应处理(3DT)是适合工程实现的降维(RD)STAP方法。STAP目标检测后还需进一步估计目标的角度参数,因此将自适应单脉冲(AM)技术引入3DT,提出了一种高精度联合估计目标速度与方位空间角的空时自适应单脉冲算法。理论分析与仿真实验结果表明,当目标多普勒频率偏离检测多普勒单元中心频率时,该算法能同时减少目标多普勒跨越损失和空时导引矢量失配损失,进而提高输出信杂噪比(SCNR),改善目标测角精度。

**关键词:** 空时自适应处理; 多普勒三通道联合自适应处理; 杂波抑制; 自适应单脉冲; 参数估计

中图分类号: V557 文献标识码: A 文章编号: 1000-6893(2016)05-1580-07

单脉冲基于线性逼近准则进行目标参数估计,被广泛应用于雷达目标跟踪<sup>[1-5]</sup>。针对干扰和杂波抑制,该技术可拓展至自适应阵列和空时自适应处理(Space-Time Adaptive Processing, STAP)<sup>[6-8]</sup>进行高精度目标方位角估计,即自适应单脉冲(Adaptive Monopules, AM)技术<sup>[9-12]</sup>。但由于STAP是在空时二维域进行联合处理,仅考虑空域自适应单脉冲技术将会严重降低目标空间角的估计精度。

STAP选取待检测单元(CUT)邻近距离单元作为训练样本,自适应计算滤波器的权值,已成为机载雷达杂波抑制的关键技术<sup>[13]</sup>。但是全维处理所需要的运算量惊人,无法满足实时处理<sup>[14]</sup>。降维(Reduced-Dimension, RD)STAP<sup>[15-20]</sup>通过对全维数据的线性变换将问题的求解降至低

维空间,从而实现系统自由度的降低与训练样本数的减少。多普勒三通道联合自适应处理(3DT)是适合工程应用的后多普勒降维STAP技术<sup>[21]</sup>。它首先将各个通道接收信号通过快速傅里叶变换(FFT)由时域变换到多普勒域,然后联合待检测目标所在多普勒单元及其两侧相邻多普勒单元进行自适应处理。然而,当实际的目标多普勒频率偏移对应多普勒单元的中心多普勒频率时,由于导引矢量的严重失配,后续空域自适应单脉冲算法估计目标方位角误差增加。因此,本文基于3DT研究了空时自适应单脉冲(Space-Time Adaptive Monopules, STAM)测角算法,该算法能够联合估计出目标的多普勒频率与方位角,通过迭代修正3DT的时域降维矩阵和目标空时导引矢量,进而实现目标参数的高精度估计。

收稿日期: 2015-04-30; 退修日期: 2015-06-15; 录用日期: 2015-10-15; 网络出版时间: 2015-11-20 09:07

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20151120.0907.002.html

基金项目: 国家自然科学基金(61201459, 61301212); 江苏省自然科学基金(BK2012408); 中央高校基本科研业务费专项资金(2012B0614); 江苏省高校优势学科建设工程资助项目

\* 通讯作者. Tel.: 025-58099106 E-mail: smw\_nuaa@hotmail.com

**引用格式:** 于佳, 沈明威, 吴迪, 等. 基于3DT的空时自适应单脉冲参数估计算法[J]. 航空学报, 2016, 37(5): 1580-1586. YU J, SHEN M W, WU D, et al. Space-time adaptive monopulse parameter estimation algorithm based on 3DT[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(5): 1580-1586.

## 1 问题表述

### 1.1 3DT 原理

假设雷达阵列天线有  $N$  列,且一次相干处理间隔内时域脉冲数为  $K$ 。对每个通道作 FFT 变换,对于第  $k$  个检测多普勒单元,取左侧第  $k-1$  个多普勒单元和右侧第  $k+1$  个多普勒单元作为辅助通道,做空时域的联合自适应处理。数据的转置与降维用矩阵  $T$  来实现。其中  $T$  为一系列空域与时域导引矢量 Kronecker 积构成的降维转置矩阵,定义为

$$T = T_t \otimes T_s \quad (1)$$

式中: $\otimes$  为 Kronecker 积; $T_s$  为空域降维矩阵,由于 3DT 空域并未降维,因此  $T_s$  为  $N \times N$  维的单位矩阵; $T_t$  为时域降维矩阵,表达式为

$$T_t = \begin{bmatrix} 1 & e^{j2\pi f_{d,k-1}} & \cdots & e^{j2\pi f_{d,k-1}(K-1)} \\ 1 & e^{j2\pi f_{d,k}} & \cdots & e^{j2\pi f_{d,k}(K-1)} \\ 1 & e^{j2\pi f_{d,k+1}} & \cdots & e^{j2\pi f_{d,k+1}(K-1)} \end{bmatrix}^T \quad (2)$$

其中: $f_{d,k-1}$ 、 $f_{d,k}$  和  $f_{d,k+1}$  分别为第  $k-1$ 、 $k$  和  $k+1$  个多普勒单元归一化的中心多普勒频率。假定  $z$  为接收数据, $s$  为目标导引矢量, $R$  为杂波干扰噪声协方差矩阵,则经过  $T$  降维后,第  $k$  个检测多普勒单元的接收数据、目标导引矢量和杂波加干扰噪声协方差矩阵分别为  $z_T = T^H z$ 、 $s_T = T^H s$  和  $R_T = TRT^H$ 。

因此,3DT 第  $k$  个待检测多普勒单元的最优权矢量为

$$w_T = R_T^{-1} s_T \quad (3)$$

由杂噪特性未知,实际应用中式(3)协方差矩阵  $R_T$  的计算由其极大似然估计形式  $\hat{R}_T$  代替:

$$\hat{R}_T = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L x_{T,i} x_{T,i}^H \quad (4)$$

式中: $x_{T,i} = T^H x_i$  为第  $i$  个训练样本  $x_i$  经降维矩阵  $T$  进行降维处理后的输出; $L$  为样本个数,为保证估计精度,训练样本需要与待检测单元杂噪分量在统计上满足独立同分布条件,且至少为系统自由度的两倍。

### 1.2 空域自适应单脉冲

为进一步确定目标方位信息,传统的空域自适应单脉冲可用于目标测角。自适应单脉冲测角

公式为<sup>[1]</sup>

$$\hat{u} = u_0 + \frac{1}{c}(r_u - \mu_u) \quad (5)$$

式中: $\hat{u}$  为目标方位空间频率  $u$  的估计值; $u_0$  为设定的空域自适应单脉冲目标方位空间频率初始值; $r_u$  为空域自适应单脉冲比; $c$  为空域自适应单脉冲比的斜率; $\mu_u$  为空域自适应单脉冲比的偏移量修正值。

3DT 将目标归一化多普勒频率  $f_d$  严格限制为目标所在多普勒单元归一化中心多普勒频率,则降维后 3DT 的空域自适应单脉冲导引矢量为

$$s_{ST} = [a(1)s_s \quad a(2)s_s \quad a(3)s_s]^T$$

式中: $a = [0 \quad 1 \quad 0]^T$ ;  $s_s$  为空域导引矢量。3DT 的系统自由度仅为  $3N$ ,实际应用中可以显著减小运算量。

基于 3DT 的自适应单脉冲(3DT-AM)算法在目标多普勒频率与多普勒单元中心频率一致时能获得良好的测角精度。当目标多普勒频率偏离多普勒单元中心频率,且多普勒分辨率较低时,其测角误差就相应增大。该性能损失是由于多普勒跨越损失和时域导引矢量偏差引起的。假定目标归一化多普勒频率为 0.002,而其所在多普勒单元的归一化中心多普勒频率为 0,则经过 3DT 降维处理后目标真实导引矢量为

$$s_{ST}^R = [0.203 \ 8s_s \quad s_s \quad -0.344s_s]^T$$

这与 3DT 给出的导引矢量  $s_T$  不匹配。同时多普勒跨越损失也降低了 3DT 处理后的目标输出信杂噪比。

由于常规空域自适应单脉冲仅匹配空域方位角,并不能对检测目标多普勒频率进行跟踪,速度误差下,测角性能下降,因此为提高测角精度,应根据目标真实多普勒频率同时修正 3DT 的时域降维矩阵  $T_t$  和目标空时导引矢量  $s_T$ ,既减少目标多普勒跨越损失,提高输出信杂噪比,又降低目标 3DT 导引矢量失配损失,实现对目标的高精度测角。第 2 节具体研究基于 3DT 的空时自适应单脉冲算法。

## 2 空时自适应单脉冲参数估计

空时自适应单脉冲将单独的空域自适应处理推广到空域和时域进行二维处理,可获得比单纯

的空域自适应处理更好的性能。两维单脉冲估计可以拓展至任意和差波束和任意子阵的 STAP, 且不限于角度估计, 空时自适应单脉冲能推广至目标多普勒频率和方位空间角估计<sup>[9-11]</sup>。空时自适应单脉冲算法的空时目标导引矢量  $s$  为

$$s = s_t \otimes s_s \quad (6)$$

式中:  $s_t = [1 \quad e^{j\pi v} \quad \dots \quad e^{j\pi v(K-1)}]^T$ ,  $s_s = [1 \quad e^{j\pi u} \quad \dots \quad e^{j\pi u(N-1)}]^T$  分别为对应时域导引矢量和空域导引矢量,  $u = \sin \theta$  为目标空间频率,  $\theta$  为目标方位空间角,  $v = f_d$  为目标归一化多普勒频率。

根据 3DT 降维后的输出信号, 计算空时自适应单脉冲的和差波束自适应权值。和波束自适应权值、方位差波束自适应权值和时域差波束自适应权值分别为

$$w_T = R_T^{-1} s_{T0} \quad (7)$$

$$d_{aT,u} = R_T^{-1} d_{T,u} \quad (8)$$

$$d_{aT,v} = R_T^{-1} d_{T,v} \quad (9)$$

式中:  $s_{T0} = s_T|_{u=u_0, v=v_0}$ ;  $d_{T,u} = T^H d_u$ ,  $d_{T,v} = T^H d_v$ ;  $d_u = s_{t0} \otimes D_N s_{s0}$ ,  $d_v = D_K s_{t0} \otimes s_{s0}$ , 且  $s_{t0} = s_t|_{v=v_0}$ ,  $s_{s0} = s_s|_{u=u_0}$ , 其中  $D_N = \text{diag}(\pi i [0 \quad 1 \quad \dots \quad N-1])$ ,  $D_K = \text{diag}(2\pi i [0 \quad 1 \quad \dots \quad K-1])$ ;  $u_0 = \sin \theta_0$  为空时自适应单脉冲估计设定的目标方位空间频率初始值;  $\theta_0$  为发射天线方位指向角;  $v_0 = f_{d,k}$  为空时自适应单脉冲估计设定的目标归一化多普勒频率初始值, 即为第  $k$  个多普勒单元归一化的中心多普勒频率。

由空时自适应单脉冲估计的目标方位空间角和多普勒频率的公式为

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{u,u} & c_{u,v} \\ c_{v,u} & c_{v,v} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} r_u - \mu_u \\ r_v - \mu_v \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中:  $r_u$  和  $r_v$  分别为空域和时域单脉冲比, 其表达式为

$$r_a = \text{Re} \left\{ \frac{d_{aT,a}^H z_T}{w_T^H z_T} \right\} \quad (11)$$

其中:  $C = \begin{bmatrix} c_{u,u} & c_{u,v} \\ c_{v,u} & c_{v,v} \end{bmatrix}$  为空时自适应单脉冲比斜率矩阵;  $\mu_u$  和  $\mu_v$  分别为空域和时域自适应单脉冲比的偏移量修正值, 其表达式为

$$\mu_a = \text{Re} \left\{ \frac{d_{aT,a}^H s_{T0}}{w_T^H s_{T0}} \right\} \quad (12)$$

$$c_{a,\beta} = \frac{\text{Re} \{ d_{aT,a}^H d_{T,\beta} s_{T0} w_T + d_{aT,a}^H s_{T0} d_{T,\beta}^H w_T \}}{|w_T^H s_{T0}|^2} -$$

$$\mu_a 2\text{Re} \left\{ \frac{w_T^H d_{T,\beta}}{w_T^H s_{T0}} \right\} \quad (13)$$

式中:  $\alpha = u, v$ ;  $\beta = u, v$ 。

多步单脉冲<sup>[1]</sup>可以进一步减小估计值与真实值的偏差。本文研究的基于 3DT 的空时自适应单脉冲(3DT-STAM)测角算法将估计出的  $u$  和  $v$  作为新的设定初始值  $u_0$  和  $v_0$ , 并依据新估计的归一化多普勒频率  $v_N$  重新设计 3DT 时域降维矩阵, 即

$$T_t = \begin{bmatrix} 1 & e^{j2\pi(f_{d0}-1/K)} & \dots & e^{j2\pi(f_{d0}-1/K)(K-1)} \\ 1 & e^{j2\pi f_{d0}} & \dots & e^{j2\pi f_{d0}(K-1)} \\ 1 & e^{j2\pi(f_{d0}+1/K)} & \dots & e^{j2\pi(f_{d0}+1/K)(K-1)} \end{bmatrix}^T \quad (14)$$

式中:  $v_N = f_{d0}$ 。

本文研究的 3DT-STAM 通过联合估计目标多普勒频率与空间频率, 并利用估计的目标多普勒频率迭代修正 3DT 的时域降维矩阵, 既提高了目标多普勒相干积累增益, 又降低了目标空时导引矢量的失配损失, 因此可获得比空域自适应单脉冲更好的测角精度。仿真实验结果表明: 通过两步迭代运算, 即可准确估计目标方位空间频率  $u$  和归一化多普勒频率  $v$ 。估计的目标方位空间角为

$$\theta = \arcsin u \quad (15)$$

详细性能评估将在第 3 节中具体给出。

### 3 仿真结果

下面基于雷达杂波仿真数据进行算法性能评估。雷达系统参数见表 1。在待检测距离单元注入一待检测目标, 其归一化多普勒频率  $f_d = 0$ , 目标所在多普勒单元的归一化中心多普勒频率  $f_{dk} = 0$ , 如图 1 纯实线所示, 经过两步迭代, 3DT-AM 即可准确估计目标的方位角。然而, 当目标多普勒频率  $f_d$  偏移中心多普勒频率时, 目标角度估计精度随即降低, 且随着多普勒频率偏移量增加, 其角度估计误差相应变大。

表 1 雷达仿真参数

Parameter	Symbol	Value
Number of elements	$N$	16
Elements spacing	$d/\lambda$	0.5
Wavelength/m	$\lambda$	0.223
Range gates	$L$	101
Number of processed echoes	$K$	128
Pulse repetition frequency/kHz	$f_r$	5
Radar platform velocity/(m · s <sup>-1</sup> )	$v_p$	130
Signal-to-clutter and noise ratio/dB	SCNR	10
Target azimuth/(°)	$\theta$	0.5
Look direction/(°)	$\theta_0$	0

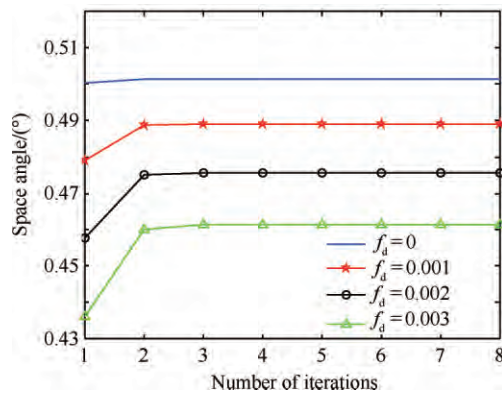


图 1 3DT-AM 目标角度估计随迭代次数变化曲线

Fig. 1 Target angle estimation versus number of iterations using 3DT-AM

当  $f_d = 0.002$  时, 3DT-AM 与 3DT-STAM 每次迭代角度估计结果如图 2 所示。3DT-AM 的角度估计误差约为  $0.027^\circ$ , 误差在 5% 左右。与 3DT-AM 三步迭代收敛相比, 3DT-STAM 仅需两步迭代, 收敛速度快, 测角误差显著降低。3DT-STAM 的高精度得益于其联合估计了目标多普勒频率与方位空间角, 通过修正时域降维矩阵同时降低了目标多普勒跨越损失和导向向量匹配误差。3DT-STAM 每次迭代估计的目标归一化多普勒频率如图 3 所示。

采用均方根误差(RMSE)来量化分析本文研究的自适应单脉冲处理器的角度估计精度。定义目标角度的 RMSE 为

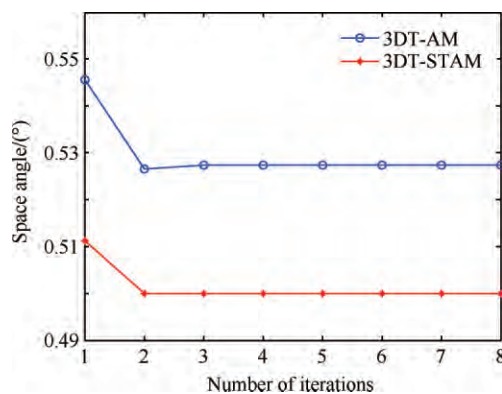


图 2 3DT-AM 与 3DT-STAM 目标角度估计随迭代次数变化曲线

Fig. 2 Target angle estimation versus number of iterations using 3DT-AM and 3DT-STAM

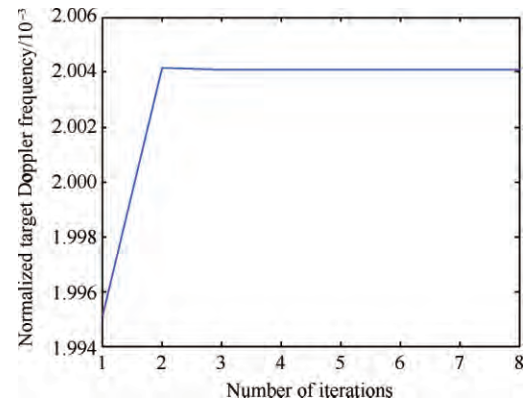


图 3 3DT-STAM 估计的归一化目标多普勒频率随迭代次数变化曲线

Fig. 3 Normalized target Doppler frequency estimation versus number of iterations using 3DT-STAM

$$\theta_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (\hat{\theta}_m - \theta_r)^2} \quad (16)$$

式中:  $M$  为蒙特卡罗实验次数;  $\hat{\theta}_m$  为第  $m$  次估计出来的目标方位角;  $\theta_r$  为实际的目标方位角。以下结果为三步空时自适应单脉冲迭代 200 次独立蒙特卡罗实验的平均值。假定在检测单元内, 目标归一化多普勒频率  $f_d$  由 0 变化至  $1/2K$ , 两种算法所估计的目标方位空间角的 RMSE 随目标多普勒频率偏移变化曲线如图 4 所示。从图中可以看出, 3DT-AM 角度估计的 RMSE 均随着目标多普勒跨越的增加而显著增加, 但由于 3DT-STAM

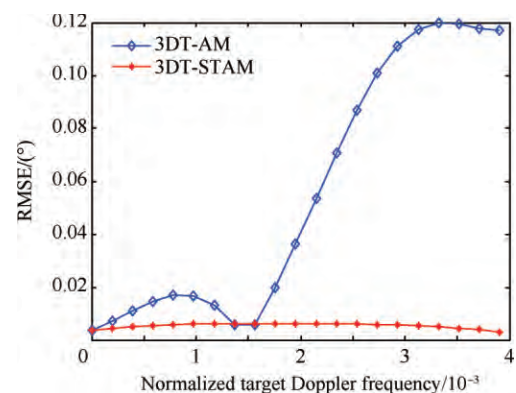


图 4 3DT-AM 与 3DT-STAM 目标角度估计 RMSE 随目标归一化多普勒频率的变化曲线

Fig. 4 Target angle estimation RMSE versus normalized target Doppler frequency using 3DT-AM and 3DT-STAM

不断修正时域降维矩阵的多普勒中心频率,保证目标多普勒频率相干积累增益达到最大,显著提升了测角精度,且测角精度不随频率偏移而变化。

假定目标多普勒频率偏离检测多普勒单元中心频率 13%,图 5 为 3DT-STAM 在不同脉冲数条件即  $K=128$ 、64 和 32 下,目标角度估计 RMSE 随 SCNR 的变化曲线。从图中可以看出,脉冲数多时,多普勒分辨率提高,3DT-STAM 能获得更高的测角精度。

图 6 为 56 阵元均匀划分为 14 子阵下 3DT-AM 与 3DT-STAM 在目标在最大多普勒跨越损失时的测角曲线。此时,3DT-AM 的测角误差在 14%左右,而 3DT-STAM 的测角误差保持在 1%以内。

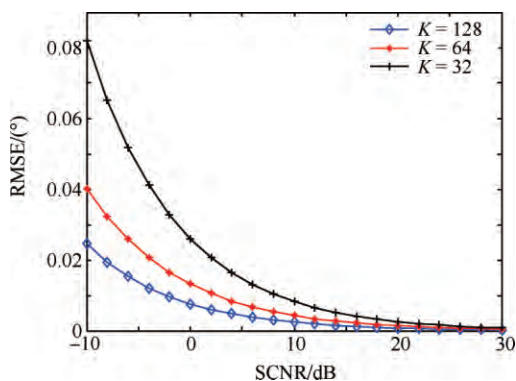


图 5 3DT-STAM 目标角度估计 RMSE 随 SCNR 的变化曲线

Fig. 5 Target angle estimation RMSE versus SCNR using 3DT-STAM

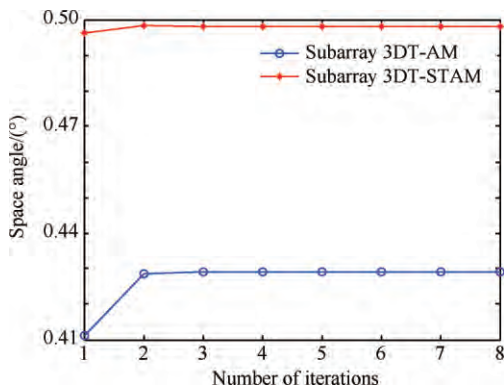


图 6 子阵 3DT-AM 与子阵 3DT-STAM 目标角度估计随迭代次数的变化曲线

Fig. 6 Target angle estimation versus number of iterations using subarray 3DT-AM and subarray 3DT-STAM

## 4 结 论

1) 本文针对降维 3DT 提出了基于空时自适应单脉冲(STAM)的目标参数估计算法,该方法利用估计的目标多普勒频率迭代修正 3DT 的时域降维矩阵,能准确估计目标多普勒频率和空间方位角,其方位角估计精度显著优于自适应单脉冲技术,多普勒频率估计精度显著优于雷达多普勒分辨率。

2) 该算法运算效率高,且能推广应用于子阵和平面阵列,易于工程实施。

## 参 考 文 献

- [1] NICKEL U. Monopulse estimation with adaptive arrays [J]. IEE Proceedings F-Radar and Signal Proceeding, 1993, 140(5): 303-308.
- [2] NICKEL U. Overview of generalized monopulse estimation[J]. IEEE Aerospace and Electronics Systems Magazine, 2006, 21(6): 27-56.
- [3] NICKEL U. Monopulse estimation with subarray-adaptive arrays and arbitrary sum and difference beams[J]. IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation, 1996, 143(4): 232-238.
- [4] MONAKOV A. Maximum-likelihood estimation of parameters of an extended target in tracking monopulse radars[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2012, 48(3): 2653-2665.
- [5] CHAUMETTE E, NICKEL U, LARZABAL P. Detection and parameter estimation of extended targets using generalized monopulse estimator[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2012, 48(4): 3389-3417.
- [6] WU R. Space-time adaptive monopulse processing for airborne radar in non-homogeneous environments[J]. International Journal of Electronics and Communications, 2011, 65(3): 258-264.
- [7] CHEN G, XIE W C. Space-time adaptive monopulse based on space-time uniform constraint[C]//IEEE International Conference on Signal Processing, Communication and Computing. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2014: 215-218.
- [8] WU R. Parameter estimation of moving target based on linearly constrained space-time adaptive monopulse technique[C]//IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2010: 107-112.
- [9] KLEMM R, NICKEL U. Adaptive monopulse with STAP

- [C]//IET International Radar Conference, 2006; 1-4.
- [10] WARD J. Maximum likelihood angle and velocity estimation with space-time adaptive processing radar[C]//Conference Record of the Thirtieth Asilomar Conference on Signals Systems and Computers, 1996, 2: 1265-1267.
- [11] ZHOU B L, DAI L Y. Constrained adaptive sum-difference monopulse algorithm with sidelobe controlled[C]//5th IET International Conference on Wireless, Mobile and Multimedia Networks, 2013: 29-32.
- [12] WU D, KONG Y Y. Statistical analysis of monopuls SAR for CFAR detection of ground moving targets[C]//IEEE International Conference Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2014: 604-607.
- [13] WILLIAM L, MELVIN. A STAP overview[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2004, 19 (1): 19-35.
- [14] KLEMM R. Principles of space-time adaptive processing [M]. London: The institution of Electrical Engineers, 2002: 117-125.
- [15] DEGURSE J. Reduced-rank STAP for target detection in heterogeneous environments[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2014, 50 (2): 1153-1162.
- [16] WANG X R, ABOUTANIOS E. Reduced-rank STAP for slow-moving target detection by antenna-pulse selection [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2015, 22(8): 1156-1160.
- [17] YANG X R, LIU Y X. Reduced-rank sub-CPI STAP with fast convergence measure of effectiveness in nonhomogeneous clutter [C]//IET International Radar Conference, 2013: 1-5.
- [18] QIN W X. Reduced-rank space-time adaptive processing to radar measure data[C]//2012 10th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2012: 4332-4336.
- [19] LI X M, FENG D Z. Dimension-reduced space-time adaptive clutter suppression algorithm on lower-rank approximation to weight matrix in airborne radar [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2014, 50(1): 53-69.
- [20] ZHANG W, HE Z S. A method for finding best channels in beam-space-doppler-reduced-dimension STAP[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2014, 50(1): 254-264.
- [21] DIPIETRO R. Extended factored space-time processing for airborne radar systems[C]//1992 Conference Record of the Twenty-Sixth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computing, 1992: 425-430.

#### 作者简介:

于佳 女, 硕士研究生。主要研究方向: 阵列信号处理, 自适应单脉冲测角技术。

Tel: 025-58099106

E-mail: yujiahhu@126.com

沈明威 男, 博士, 副教授, 硕士生导师。主要研究方向: 空时自适应处理。

Tel: 025-58099106

E-mail: smw\_nuaa@hotmail.com

## Space-time adaptive monopulse parameter estimation algorithm based on 3DT

YU Jia<sup>1</sup>, SHEN Mingwei<sup>1,\*</sup>, WU Di<sup>2</sup>, ZHU Daiyin<sup>2</sup>

1. College of Computer & Information, Hohai University, Nanjing 211100, China

2. Key Laboratory of Radar Imaging and Microwave Photonics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Ministry of Education, Nanjing 210016, China

**Abstract:** Space-time adaptive processing (STAP) is the key technology of airborne early-warning radar to suppress clutter and interference, and the joint three-Doppler channel adaptive processing (3DT) is the well-established reduced-dimension (RD) STAP approach for engineering implementation. And, we still need to accurately estimate the target angle after STAP for radar target tracking. Therefore, in this paper, the adaptive monopulse (AM) technique is introduced into 3DT, and a high-precision space-time adaptive monopulse to jointly estimate the target velocity and location is presented. Theoretical analysis and simulation results demonstrate that, when the real target Doppler frequency deviates from the central frequency of the Doppler bin, the proposed algorithm can reduce the target Doppler crossing loss to improve the output signal to clutter and noise ratio (SCNR) and meanwhile mitigate the steering vector mismatch which definitely result in estimating the velocity and angle parameters more precisely.

**Key words:** STAP; 3DT; clutter suppression; adaptive monopulse; parameter estimation

Received: 2015-04-30; Revised: 2015-06-15; Accepted: 2015-10-15; Published online: 2015-11-20 09:07

URL: [www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20151120.0907.002.html](http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20151120.0907.002.html)

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (61201459, 61301212); Natural Science Foundation for Young Scholars of Jiangsu Province of China (BK2012408); Fundamental Research Funds for the Central Universities (2012B0614); A Project Funded by the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions

\* Corresponding author. Tel.: 025-58099106 E-mail: smw\_nuaa@hotmail.com