

# 基于实测数据的 STAP 的权值计算 算法性能比较

范西昆<sup>1</sup>, 管桦<sup>1</sup>, 陈满屯<sup>2</sup>, 刘英<sup>3</sup>

(1. 空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077; 2. 95577 部队 指挥自动化站, 云南 陆良 655601; 3. 95007 部队, 广东 广州 510410)

**摘 要:**空时自适应处理(STAP)的权值求解是其计算最密集的部分,由于机载雷达回波数据动态范围很大,导致传统的采样协方差矩阵求逆(SMI)方法数值稳定性较差,相对而言基于 QR 分解的采样矩阵求逆算法(QRD-SMI)在系统动态范围要求和并行性上具有优势。为了寻求在 STAP 工程实现时采用 QRD-SMI 的理论依据,分析了采用这两种不同算法的 STAP 处理方法,比较了二者的计算量,用 MountainTop 数据比较研究了 2 种方法的性能。实验结果表明这 2 种方法均具有良好的杂波、干扰抑制性能,传统的 SMI 算法在杂波抑制性能上较 QRD-SMI 算法有一定的优势,而 QRD-SMI 算法对“目标消除效应”较 SMI 算法有更强的稳健性,综合比较算法性能、数值特性以及可并行实现性,QRD-SMI 更适合在 STAP 的工程实现时采用。

**关键词:**机载预警雷达;杂波抑制;STAP;MountainTop 数据

**DOI:**10.3969/j.issn.1009-3516.2010.04.0013

**中图分类号:** TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2010)04-0062-06

对于机/空载雷达,STAP 技术可有效抑制强地杂波和各种干扰,提高对低空、低速目标检测的能力。经过三十多年的研究,STAP 已逐步进入实用化阶段。在 STAP 处理的各环节中,权值的计算是非常关键的一环,因为它是 STAP 处理过程中计算最密集的部分<sup>[1]</sup>。STAP 权值的求解从数学的角度来讲,是在最小平方误差准则下求解超定线性方程组的最小二乘问题。求解最小二乘问题的数学方法有 2 条,一是正规方程求解方法,二是基于系数矩阵 QR 分解的求解方法,这 2 条途径分别被称为均方域算法和数据域算法。均方域算法显式计算采样协方差矩阵求逆,相当于对采样数据进行平方运算,大大增加了数据动态范围,使得在许多实际情况下协方差矩阵出现病态,严重影响算法数值特性。数值域算法通过正交变换,将数据矩阵转换为上三角矩阵,然后求得权值。数值域算法包括以下几类:基于 QR 分解的采样协方差求逆(QRD-SMI),基于 QR 分解的最小二乘(QRD-LS)、逆 QR 递推算法等。数值域算法的特点是:①所需的动态范围低,采用数值域算法避免了乘方运算,使所需的动态范围减半,数值特性良好。而在动态范围要求很大的机载雷达自适应信号处理计算过程中,干扰协方差矩阵求逆的数值稳定性很差。数值域算法矩阵分解部分,与均方域的矩阵求逆部分的计算量基本相当。但数值域算法避免了形成协方差矩阵,在实际系统测试中,该计算步骤的计算量是相当可观的。②数值域算法包括基于 Givens 正交变换、Householder 映射以及 Schmidt 正交化算法等,这些算法具有内在并行性,便于并行实现<sup>[2]</sup>。

为了寻求在 STAP 工程实现时采用 QRD-SMI 的理论依据,分析了采用功率域的 SMI 和数值域的 QRD-SMI 这 2 种不同算法的 STAP 处理方法,比较二者的计算量,用 MountainTop 数据比较研究了 2 种方法的性能。

\* 收稿日期:2010-01-04

基金项目:陕西省自然科学基金资助项目(2010JQ8028);西安市科技计划资助项目(CXY1008(5));电讯工程学院博士启动基金资助项目(DG080806)

作者简介:范西昆(1976-),男,陕西西安人,讲师,博士,主要从事信号处理研究。E-mail: vanxikun@163.com

## 1 SMI 与 QRD - SMI STAP 权值计算算法

STAP 在线性约束最小方差(LCMV)最佳准则下的权矢量满足如下线性方程组  $\mathbf{R}_{xx} \mathbf{w}_{\text{opt}} = \boldsymbol{\mu} \mathbf{S}^*$ , 其中  $\mathbf{S}$  为信号导向矢量, 它等于控制波束主瓣在目标方向的静态加权,  $\mathbf{R}_{xx}$  为样本协方差矩阵, 在实际中  $\mathbf{R}_{xx}$  是未知的。可以选取  $K$  个样本估计干扰估计协方差矩阵, 得到它的最大似然估计  $\hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \mathbf{x}_i^H \mathbf{x}_i$ , 其中  $K$  应当满足 2-3 倍的系统自由度, 则自适应权值和滤波器输出为:  $\mathbf{W} = \frac{\hat{\mathbf{R}}^{-1} \hat{\mathbf{S}}}{\mathbf{S}^H \hat{\mathbf{R}}^{-1} \hat{\mathbf{S}}}, y = \mathbf{W}^H X_k$ 。

STAP 算法使下列问题最小化,  $\min_{\mathbf{S}^H \mathbf{W} = 1} \|\mathbf{X} \mathbf{W}\|$  其中  $\mathbf{X}$  表示雷达数据, 而  $\mathbf{S}$  表示导向矢量。在自适应所在的域内, 自适应权值是通过求线性方程组的最小二乘解得出。出于数值稳定性和动态范围方面的考虑, 可以通过 QR 分解直接从  $\mathbf{X}$  计算  $\mathbf{R}$  的 Cholesky 分解。计算  $\mathbf{R}_{xx} \mathbf{w}_{\text{opt}} = \boldsymbol{\mu} \mathbf{S}^H$ , 其中  $\mathbf{A}$  是一个上三角阵,  $\mathbf{Q}$  是一个正交的酉矩阵,  $\mathbf{Q}^H \mathbf{Q} = \mathbf{I}$ 。因此,  $\hat{\mathbf{R}} = \mathbf{X}^H \mathbf{X}$  等价于  $\hat{\mathbf{R}} = \mathbf{A}^H \mathbf{A}$ , 由于  $\mathbf{A}$  是三角阵, 由如下 2 步回代操作解出  $\mathbf{W}: \mathbf{A}^H \mathbf{y} = \mathbf{S}^*$ ,  $\mathbf{A} \mathbf{W} = \mathbf{y}$ 。

## 2 SMI 与 QRD - SMI STAP 计算量分析

文献[3]给出了空域自适应 QRD - SMI 的计算量, 在这里给出空时二维处理中该算法的计算量。对于  $M$  个脉冲,  $N$  个阵元,  $K$  个空时快拍的输入数据, QRD - SMI 总的计算量为: 共需约  $\left(\frac{19}{2}K + \frac{9}{2}\right)(MN)^2 - \left(\frac{11}{2}K + \frac{7}{2}\right)MN$  次乘法,  $(8K + 4)MN$  次除法,  $KMN$  次开方运算。而 SMI 算法, 形成估计的干扰协方差矩阵需要  $K(MN)^2$  次乘法, 而求逆过程需要  $(MN)^3$  次算术操作。

从上面的分析来看, QRD - SMI 较 SMI 的计算量要小, 但对于实际系统二者的计算量均相当可观。由第 1 节算法分析以及条件数的定义, 我们可以得出:

$$\text{Cond}(\hat{\mathbf{R}}_{xx}) = \text{Cond}(\mathbf{X}_n^H \mathbf{X}_n) = \text{Cond}(\mathbf{A}_n^H \mathbf{A}_n) = \text{Cond}^2(\mathbf{A}_n) = \text{Cond}^2(\mathbf{A}_n^H) \quad (1)$$

因条件数大于等于 1, 所以基本 SMI 算法的条件数大于 QRD - SMI 算法的条件数。因而后者的数值稳定性优于前者。

## 3 STAP 性能评价指标

为了评价一种给定的 STAP 算法的性能, 我们将评估空时滤波器的阵列响应, 以及信杂噪比(SINR)和改善因子<sup>[4-8]</sup>。对于位于距离  $r_0$ , 方位位于  $\phi$ , 多普勒频率为  $f$  的阵列响应为:

$$B(\phi, f; r_0) = |\mathbf{W}(\phi, f; r_0)^H \mathbf{S}(\phi, f; r_0)|^2 \quad (2)$$

权矢量  $\mathbf{W}$  被导向目标所在的方位和多普勒频率时, 这时的信杂噪比(SINR)定义为:

$$\text{SINR}(\phi, f; r_0) = \frac{|\mathbf{W}(\phi, f; r_0)^H \mathbf{S}(\phi, f; r_0)|^2}{\mathbf{W}(\phi, f; r_0)^H \mathbf{R}(r_0) \mathbf{W}(\phi, f; r_0)} \quad (3)$$

权矢量  $\mathbf{W}$  被导向目标所在的方位和多普勒频率时, 这时的改善因子(IF)定义为:

$$\text{IF}(\phi, f; r_0) = \frac{|\mathbf{W}(\phi, f; r_0)^H \mathbf{S}(\phi, f; r_0)|^2 (\text{CNR} + 1) \sigma^2}{\mathbf{W}(\phi, f; r_0)^H \mathbf{R}(r_0) \mathbf{W}(\phi, f; r_0)} \quad (4)$$

式中: CNR 为杂噪比;  $\sigma^2$  为噪声功率。而对于实测数据, CNR 是不可能先验预知的, 因此, 这时用采样协方差矩阵的迹代替杂波加噪声功率, 式(3)可改写为:

$$\text{IF}(\phi, f; r_0) \approx \frac{|\mathbf{W}(\phi, f; r_0)^H \mathbf{S}(\phi, f; r_0)|^2 \text{trace}(\mathbf{R}(r_0))}{\mathbf{W}(\phi, f; r_0)^H \mathbf{R}(r_0) \mathbf{W}(\phi, f; r_0)} \quad (5)$$

## 4 数据实验

### 4.1 实验1

使用 MountainTop 计划数据 t38pre01v1.mat (数据的基本情况及详细分析见文献[9]), 在使用相同的 STAP 滤波器结构的情况下, 分别使用均方域和数值域两种算法计算自适应权值。然后用几个性能指标比较这 2 种算法的性能, 包括目标检测性能、阵列响应特性、改善因子特性和“目标消除效应”的稳健性。

#### 1) 目标检测性能比较

SMI 算法和 QRD-SMI 算法对目标检测的性能见图 1、图 2。可以看出, SMI 和 QRD-SMI 均检测出目标, 可以清晰地发现目标位于 152 km 处(数据的距离单元 130 km 到 190 km)。仔细比较两图可以发现: SMI 算法对杂波的抑制性能更好。

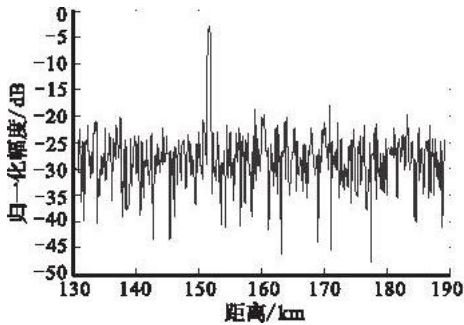


图1 SMI 算法目标检测效果图

Fig. 1 The target detection result of SMI

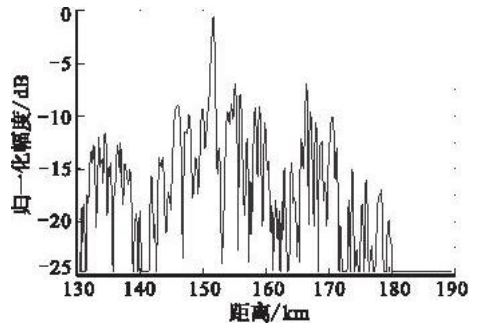


图2 QRD-SMI 算法目标检测效果图

Fig. 2 The target detection result of QRD-SMI

#### 2) 阵列响应比较

图 3 给出了数据 t38pre01v1.mat 与该数据的功率谱, 图 4 为式(2)所示的阵列响应, 与之对应图 5 为直接数据域算法的频响图。比较后我们可以发现, SMI 在杂波处凹口明显, 对于同样的滤波器结构, SMI 的杂波抑制性能是优于数据域算法的。

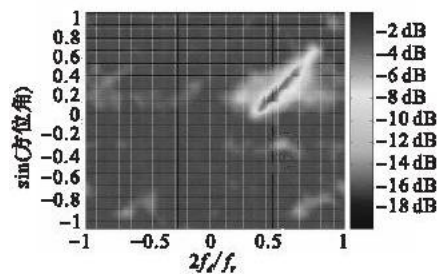


图3 数据 t38pre01v1 的杂波功率谱

Fig. 3 The clutter power spectrum of data t38pre01v1

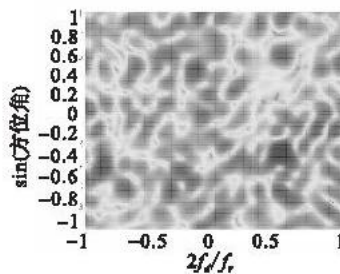


图4 SMI 算法的频响图

Fig. 4 The frequency response of SMI

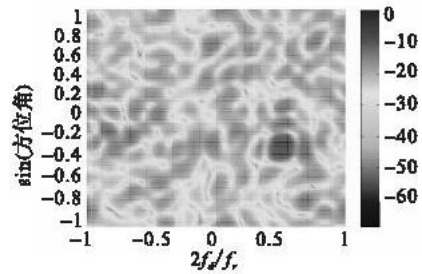


图5 QRD-SMI 算法的频响图

Fig. 5 The frequency response of QRD-SMI

#### 3) 改善因子比较

图 6 给出 SMI 与 QRD-SMI 算法的改善因子对比。可以看出, SMI 算法在靠近主杂波区的性能较 QRD-SMI 更好一些。为了进一步说明问题, 图 7 和图 8 分别给出了 SMI 算法和 QRD-SMI 算法的二维改善因子。比较两幅图可以得出, SMI 算法在非主杂波区的信噪比较稳定, 而 QRD-SMI 算法的信噪比起伏较大。而且 SMI 算法在主杂波区的凹口更窄一些。

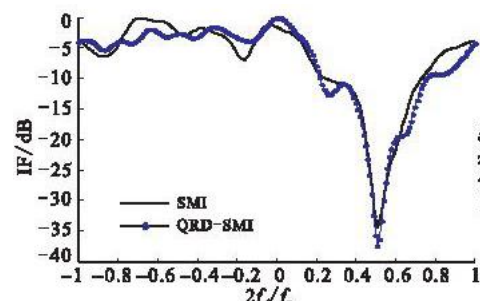


图 6 SMI 与 QRD-SMI 算法的改善因子对比图

Fig. 6 The IF comparison of SMI and QRD-SMI

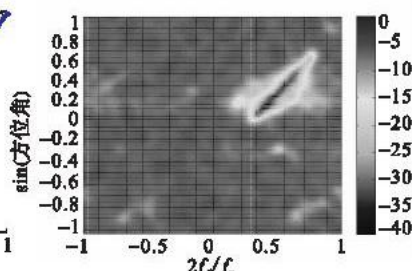


图 7 SMI 算法的二维改善因子图

Fig. 7 The 2-D IF of SMI

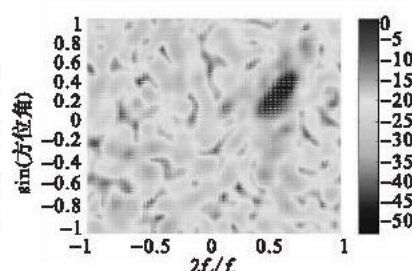


图 8 QRD-SMI 算法的二维改善因子图

Fig. 8 The 2-D IF of QRD-SMI

#### 4) 对信号消除效应的性能比较

在工程应用中最感兴趣的方法是在某一个较长的距离段内,应用同一个协方差矩阵计算得出的权值,因为这样的计算代价最小。如果目标信号包括在协方差矩阵中,在估计的导向矢量与真实的目标矢量存在误差时,会导致目标相消效应。估计的导向矢量与真实的目标矢量之间的误差,是由指向或校正误差产生的。

假设,导向矢量精确地描述了目标矢量。假定无目标的协方差矩阵为  $R$ , 含有目标分量的为  $R_1$ , 则有  $R_1 = \alpha s s^H + R$ , 其中  $\alpha$  是目标的复幅度。容易证明,在这种情况下,SMI 算法的权值将不会发生变化(相当于一个增益因子)。因此,在这种情况下包含目标不会影响阵列性能。相反地,当导向矢量和目标矢量存在误差时,存在的目标将导致权矢量的偏移。这时,目标将被认为是干扰信号,阵列将会将其消除。在实际应用中,很难确保导向矢量精确描述目标矢量(无指向误差,而且阵列经过精确校正)。

将 SMI 和 QRD-SMI 对目标相消效应的稳健性进行比较。图 1 和图 2 给出的结果是将含有目标的距离单元去掉后得出的。这是采用文献[9]给出的样本选取的方法,而在本实验中使用所有的 403 个距离单元估计协方差矩阵(目标所在距离单元包含在其中),SMI 算法计算自适应权值,滤波器输出见图 9,由图中我们可以看出目标完全淹没在杂波中,这表明 SMI 算法对信号消除效应是非常敏感的。接着我们使用 QRD-SMI 算法计算自适应权值,滤波器输出见图 10,QRD-SMI 算法的检测效果依然良好。与图 2 比较后可以得出滤波器输出的变化并不大,由此可以得出 QRD-SMI 算法对信号消除效应更加稳健。由实验 1 测试的 4 个方面的结果,可得出如下结论:2 种算法均有良好的杂波的抑制性能和对目标的检测性能,但 SMI 算法的性能稍优于 QRD-SMI;QRD-SMI 算法对于“信号消除效应”具有更强的稳健性。这一点对于机载雷达的非均匀环境来讲是非常重要的。

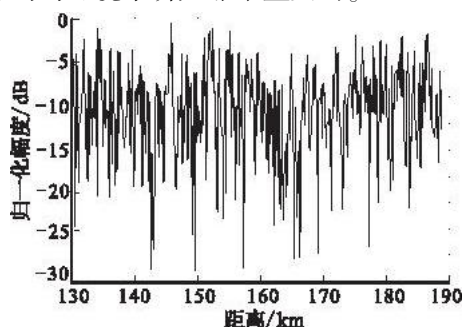


图 9 样本集中含有目标所在距离单元时, SMI 算法的检测效果图

Fig. 9 The target detection result of SMI when sample set containing the target range gates

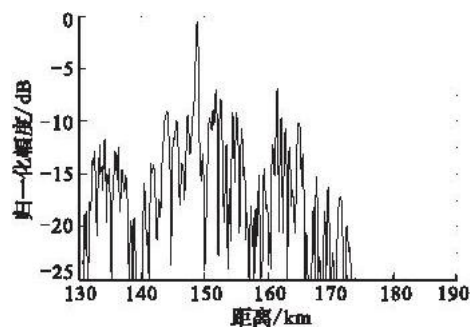


图 10 样本集中含有目标所在距离单元时, QRD-SMI 算法的检测效果图

Fig. 10 The target detection result of QRD-SMI when sample set containing the target range gates

### 4.2 实验 2

对干扰的抑制性能我们使用 MountainTop 计划数据 stap3001.mat 进行实验,本数据包含的信号仅有远场宽带干扰和地形散射干扰,而雷达发射机并未工作,干扰机位于距雷达 65 km 的山顶,偏离正北 302°(相对于雷达接收天线 42°)。

我们通过实验对 2 种算法的滤波器频率响应比较,图 11 给出了数据 stap3001.mat 功率谱,图 12 和图 13

给出了2种算法对于的滤波器频率响应。如图所示,对于干扰2种算法在强干扰处和地形散射干扰处均形成了明显的凹口,干扰抑制性能良好。

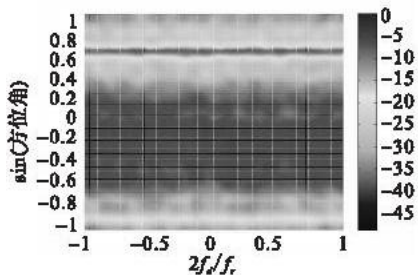


图11 数据 tap3001 的杂波功率谱

Fig. 11 The clutter power spectrum of data tap3001

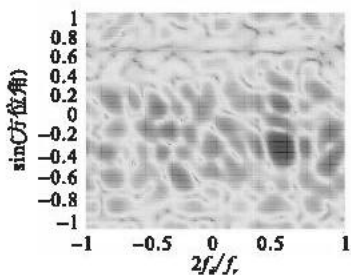


图12 数据 tap3001 的 SMI 算法的频响图

Fig. 12 The 2 - D IF of SMI of data tap3001

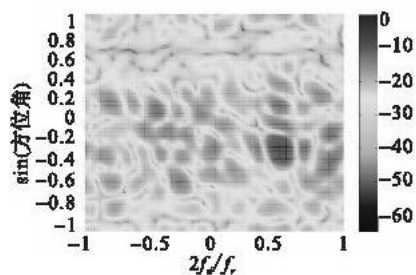


图13 数据 tap3001 的 QRD - SMI 算法的频响图

Fig. 13 The 2 - D IF of QRD - SMI of data tap3001

### 4.3 实验3

实验3 滤波器结构采用部分自适应 STAP 滤波器,进一步比较 SMI 和 QRD - SMI 算法的目标检测性能,数据仍然采用 t38pre01v1.mat。

实验采用经典的 3 - C 法,对于 3 号多普勒通道(多普勒频率  $f = 0.25$ , 目标的多普勒频率),图 14 给出了 SMI 算法的滤波器输出,图 15 给出了 QRD - SMI 算法的滤波器输出。比较这两幅图可以发现,2 种算法均检测到目标,SMI 算法的杂波抑制效果还是稍好一些。与实验 1 的结果比较,同样可以看出,部分自适应的杂波的抑制效果与最优处理器的效果还是有不小的差距。由以上实验可以看出在采用部分自适应 STAP 时,SMI 算法和 QRD - SMI 算法的目标检测效果接近。

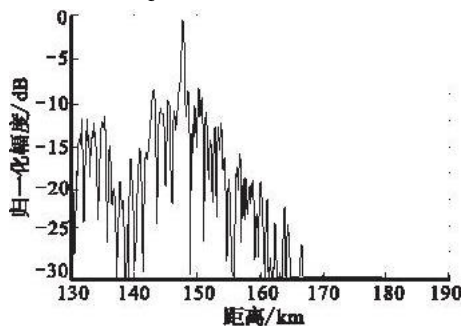


图14 数据 t38pre01v1 部分自适应 STAP, SMI 算法的滤波器输出

Fig. 14 The target detection result of partial adaptive STAP SMI

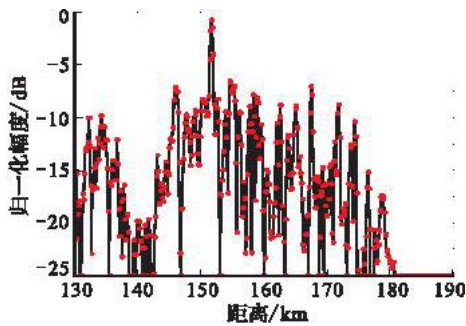


图15 数据 t38pre01v1 部分自适应 STAP, QRD - SMI 算法的滤波器输出

Fig. 15 The target detection result of partial adaptive STAP QRD - SMI

通过以上 3 个实验我们比较了 SMI 与 QRD - SMI 算法的性能,从实验结果来看,QRD - SMI 算法是一种性能优良的算法,而且它拥有出色的数值特性和内在并行性,因此更适合工程实现。QRD - SMI 算法的运算量主要集中在 QR 分解上。QR 正交变换,也即矩阵 QR 分解可用 Givens 平面旋转或 Housholder 镜像变换来实现。矩阵的 QR 正交变换是具有其内在并行性的,研究者已提出了多种适合不同计算模型的并行算法<sup>[11]</sup>。在文献[10]中介绍了一种适合 STAP 这种密集计算的多 DSP 并行处理系统,这种系统特点是单个节点的计算能力很强,但基于它实现并行算法时要尽量减少通信开销,因此它适合粗粒度的并行算法,我们将粗粒度并行 QR 算法应用于所示多 DSP 并行处理系统,实验结果表明实时性良好,进而证明了 QRD - SMI 更适合在 STAP 工程实现时采用。

## 5 结束语

本文使用实测数据比较了工程中常采用的两种权值训练算法的性能,它们分别是功率域的 SMI 和数值域的 QRD - SMI。实验结果显示两种算法均有良好的杂波和干扰抑制性能,SMI 算法的性能稍优于 QRD -

SMI,而 QRD-SMI 算法对于“信号消除效应”具有更强的稳健性,这一点对于机载雷达的非均匀环境来讲是非常重要的。综合比较算法性能、数值特性和并行性,QRD-SMI 算法更适合在 STAP 的工程实现时采用。

### 参考文献:

- [ 1 ] 王永良,彭应宁. 空时自适应信号处理[M]. 北京:清华大学出版社,2000.  
WANG Yongliang,PENG Yingning. Space Time Adaptive Signal Processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000. (in Chinese)
- [ 2 ] Farina A, Timmoneri L. Real-time STAP Techniques[J]. Electronics & Communication Engineering Journal, 1999, 11(1): 13-22.
- [ 3 ] 龚耀寰. 自适应滤波[M]. 北京:电子工业出版社,2003.  
GONG Yaohuan. Adaptive Filtering[M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2003. (in Chinese)
- [ 4 ] Melvin W L, Showman G A, Hersey R K. Adaptive Radar: Beyond the RMB Rule [C]//Radar Conference. Rome: IEEE, 2008: 1-8.
- [ 5 ] Ries P, Neyt X, Lapierre F D, et al. Fundamentals of Spatial and Doppler Frequencies in Radar STAP [J]. Aerospace and Electronic Systems, 2008, 44(3): 1118-1135.
- [ 6 ] Teixeira C M. Performance Analysis of Post-Doppler STAP [C]//The 42nd Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. Monterey, CA: IEEE Signal Processing Society, 2008: 551-555.
- [ 7 ] Saleh O, Adve R S, Riddolls R J. Fast fully Adaptive Processing: A Multistage STAP Approach [C]//2009 IEEE Radar Conference. Pasadena, CA: IEEE, 2009: 1-6.
- [ 8 ] Melvin W L. A STAP Overview [J]. IEEE AES Magazine, 2004, 19(1): 19-35.
- [ 9 ] 范西昆. 机载雷达空时自适应处理算法及其实时实现问题研究[D]. 长沙:国防科技大学,2006.  
FAN Xikun. Space-Time Adaptive Processing Algorithms and Its Real Time Implementation for Airborne Early Warning Radar [D]. Changsha: National University of Defense and Technology, 2006. (in Chinese)
- [ 10 ] 范西昆,王永良,陈辉. 机载雷达空时自适应处理的实时实现[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(12), 2224-2227.  
FAN Xikun, WANG Yongliang, CHEN Hui. Real Time Implementation of Airborne Radar Space-Time Adaptive Processing [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2006, 28(12): 2224-2227. (in Chinese)
- [ 11 ] 张艳. 分布并行算法设计、分析与实现 [D]. 成都:电子科技大学,2001.  
ZHANG Yan. The Design Analysis and Implementation of Distributed Parallel Methods [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2001. (in Chinese)

(编辑:徐楠楠)

## The Performance Comparison of Space-Time Adaptive Processing Algorithms Based on Mountaintop Data

FAN Xi-kun<sup>1</sup>, GUAN Hua<sup>1</sup>, CHEN Man-tun<sup>2</sup>, LIU Ying<sup>3</sup>

(1. Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China; 2. Unit 95577, Luliang 655601, Yunnan, China; 3. Unit 95007, Guangzhou 510410, China)

**Abstract:** The weight computation is the most intensive computational part of the space-time adaptive processing (STAP). The traditional sample matrix inverse (SMI) algorithm has a poor numerical stability due to that the dynamic range of the space-time snapshots is great, relatively speaking, the QR decomposition based SMI (QRD-SMI) algorithm has a better numerical characteristic and parallelism, which may suit for this condition. For the purpose of real time implementation of STAP, the performance comparison of STAP with two weight computational algorithms is presented. The test results show that both algorithms have satisfactory performances in resisting clutter and jamming, the traditional SMI algorithm has a better performance in clutter rejection, but QRD-SMI algorithm shows a stronger robustness to the effect of target self-nulling. Through comparing the above two algorithms in algorithm performances, numerical characteristics and parallelism in a comprehensive way, the QRD-SMI algorithm is more suitable for real time implementation of STAP.

**key words:** AEW radar; clutter rejection; STAP; MountainTop data