

# STAP 技术在有源干扰环境下的运用方法

马汇森<sup>1</sup>, 马林华<sup>1</sup>, 甘元<sup>2</sup>, 张健<sup>2</sup>

(1. 空军工程大学航空航天工程学院, 陕西西安, 710038; 2. 95321 部队, 湖北武汉, 430100)

**摘要** 为了在复杂的有源干扰环境下改善空时二维自适应处理(Space-time Adaptive Processing, STAP)技术的处理性能,提出了一种基于局部空域自适应阵列处理的改进型自适应波束形成方法。这是一种空间抗干扰与 STAP 技术滤除杂波级联的方法。采用 MUSIC 技术对有源干扰的波达方向进行估计,然后分别在期望方向和干扰方向形成接收多波束,再在波束域进行自适应处理以抑制有源干扰,最后在空间反干扰滤波后运用 STAP 技术进行杂波抑制。仿真结果表明,该方法能有效估计出干扰源的方位,使 STAP 技术在有干扰的环境下也能保持较好的杂波抑制性能,同时在波束域进行自适应滤波,大大降低了抑制干扰所需的运算量,理论分析和仿真结果表明了该算法的有效性。

**关键词** STAP 技术; DOA 估计; 抗干扰; 杂波抑制

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2012.03.014

**中图分类号** TN959.73 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2012)03-0065-05

机载预警雷达必须具有抑制地面强杂波的能力从而实现对低空飞行目标和地面运动目标的检测。1973年 Brennan 等提出了空时自适应处理(STAP)的概念和理论<sup>[1]</sup>,经过近 40 年的研究发展,成为机载阵列雷达抑制杂波的重要技术,据报道美国海军 E-2D 预警机上已经把这项技术用于实践<sup>[2]</sup>。

由于全空时自适应处理运算量和需要的样本数十分巨大,在实际应用中必须采取降维 STAP 技术<sup>[3]</sup>。但随着降维 STAP 结构的系统自由度降低,在有干扰的复杂的电磁环境下能否有效地同时对抗干扰和抑制杂波值得怀疑。Klemm 提出了一种用 2 个步骤完成干扰和杂波抑制的方法<sup>[4]</sup>,即先在无源雷达模式下(发射前)估计空间干扰协方差矩阵,以确保协方差矩阵方差的估计不受杂波影响,接着在发射后并且是在空间干扰抑制之后,估计杂波的协方差矩阵,以抑制杂波。本文在此思路的基础上,结合现代高分辨力 MUSIC 技术对有源干扰的波达方向进行估计,以便在雷达发射模式下形成自适应波束避开干扰源方位,接着采用降维的对称辅助结构对地杂波进行处理,最后通过仿真得出结论。

## 1 一种改进的自适应波束形成方法抑制空间干扰

STAP 基本思想就是将空域(自适应波束形成)和时域为一维自适应滤波推广到二维空时自适应处理中。假设雷达天线为均匀线阵结构,阵元数目为  $N$ ,在一个相参处理间隔内的脉冲数量为  $K$ ( $K$  次采样),接收到的空时协方差数据矩阵  $\mathbf{Q}$  为一  $N \times K$  维的矩阵。在存在干扰的情况下,空时协方差矩阵  $\mathbf{Q}$  为:

$$\mathbf{Q} = \mathbf{Q}_c + \mathbf{Q}_n + \mathbf{Q}_j \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{Q}_c$  为杂波协方差矩阵;  $\mathbf{Q}_n$  为噪声协方差矩阵;  $\mathbf{Q}_j$  为干扰协方差矩阵。杂波和干扰模型的建立见文献[5]。

自适应波束形成通过设计权矢量  $\mathbf{W}$ ,使其天线方向图的零点(也称为凹口)指向某些方向,以抑制来自

\* 收稿日期: 2011-12-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60874040); 航空科学基金资助项目(200801196005)

作者简介: 马汇森(1988-),男,山东淄博人,硕士生,主要从事宽带网络通信研究。

E-mail: 903676876@qq.com

这些方向的干扰源,这对对付敌方释放的破坏雷达性能的干扰非常有用,可以在空域上抑制干扰,即空域滤波。相控阵雷达根据接收到的数据,自适应的调整权值,进行波束形成,即自适应波束形成。

一般采用采样协方差矩阵求逆的方法来实现  $\mathbf{W}_{\text{opt}}$  的计算,这是一种空域全自适应阵列的处理方式,该方法的运算速度主要取决于干扰加噪声矢量的协方差矩阵  $\mathbf{Q}_m$ ,其最优权的计算式为:

$$\mathbf{W}_{\text{opt}} = \mu \mathbf{Q}_m^{-1} \mathbf{S}(\psi) \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{S}(\psi)$  为空间信号导向矢量;  $\mu$  为一标量。

### 1.1 一种改进的自适应波束形成方法

通过式(2)可以看到,采样协方差矩阵求逆算法自适应波束形成是一种全自适应阵列处理方法,当阵元数  $N$  较大时,求矩阵的逆计算量并不小。如果能知道干扰的一些先验信息,就能提高运算处理的实时性。比如知道干扰的方向和数目,那么在那些方向上形成辅助波束,一个辅助波束指向一个干扰源,这些辅助波束是利用整个阵列信号与主波束形成并联的一些辅助波束网络形成,形成的辅助波束等于干扰源的数目,我们可以对主波束和辅助波束的输出信号进行类似于采样协方差矩阵的自适应波束形成。形成辅助波束后的部分自适应处理已经把自适应的自由度数  $N$  降低为  $J+1$ ,其中  $J$  为干扰源数目。在一般情况下,  $J$  远小于  $N$ ,从而估计  $(J+1)$  阶协方差矩阵的时间大大缩减。

准确估计干扰的数目和方向是该自适应处理方法能正确抑制干扰的关键所在。Schmidt 在 1979 年提出的多重信号分类方法(MUSIC)<sup>[5]</sup>是一种有效的高分辨力子空间测向方法。可以解决多径信号的 DOA 估计问题,但是该方法对误差很敏感,实际中存在的多种误差,会影响干扰信号的方位估计,造成自适应波束算法性能下降,甚至可能在目标方向形成零陷<sup>[7]</sup>,导致方位估计性能恶化,甚至可能彻底失效。

考虑到误差的情况,需要采取一定的措施来保证 DOA 估计的精度。Weiss A J 和 Friedlander B 提出了一种基于 MUSIC 算法的自校正算法<sup>[8]</sup>,它的基本思想和方法是对阵列协方差矩阵进行特征值分解,得到噪声子空间的估计值  $\hat{\mathbf{U}}_N$ ,再构建代价函数  $J_F(\hat{\boldsymbol{\psi}}, \hat{\boldsymbol{\Gamma}}) = \arg \min_{\boldsymbol{\psi}, \boldsymbol{\Gamma}} \sum_{i=1}^J \mathbf{S}^H(\boldsymbol{\psi}_i) \boldsymbol{\Gamma}^H \hat{\mathbf{U}}_N \hat{\mathbf{U}}_N^H \boldsymbol{\Gamma} \mathbf{S}(\boldsymbol{\psi}_i)$ ,  $\boldsymbol{\Gamma}$  为阵列幅相误差对角矩阵,设定迭代初始值  $\hat{\boldsymbol{\Gamma}}(0) = \boldsymbol{\Gamma}(0)$ ,并利用阵列幅相误差的标称值进行方位估计,计算空间谱曲线式(3),并将空间谱线的峰值对应的方位作为方位估计值  $\hat{\boldsymbol{\psi}}(k)$ ,在约束条件下求解代价函数的最小值,并满足收敛条件  $J_F(k+1) - J_F(k) \leq \xi$ 。

$$P(\boldsymbol{\psi} | \hat{\boldsymbol{\Gamma}}(k)) = \frac{1}{|\mathbf{U}_N^H \hat{\boldsymbol{\Gamma}}(k) \mathbf{S}(\boldsymbol{\psi})|^2} \quad (3)$$

在上述迭代过程中,优化的代价函数  $J_F$  逐渐减小,且  $J_F \geq 0$ ,上述优化过程可以保证收敛到一个局部最优点,但不一定是全局最优点,所以迭代初始值的选取对算法的性能有较大影响。

### 1.2 仿真分析

阵列为 8 单元的均匀线阵,间距为半波长,4 个独立干扰源的方位为正负  $45^\circ$ ,正负  $20^\circ$ ,幅相误差为 10%,收敛条件  $\xi$  设为 0.1,图 1 为迭代 10 次后的空间 MUSIC 谱线,图 2 为迭代次数的误差曲线图。从仿真可以看到,10 次迭代后 4 个干扰源的方向都被很好地估计出来了。

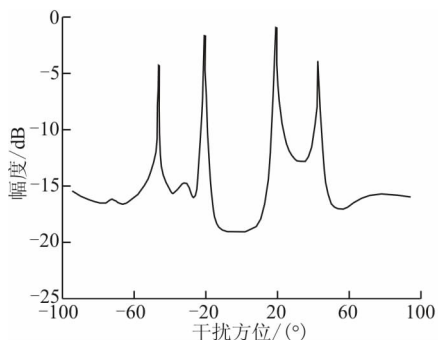


图 1 误差校正后的 MUSIC 空间谱

Fig. 1 Music space spectrum after emendation

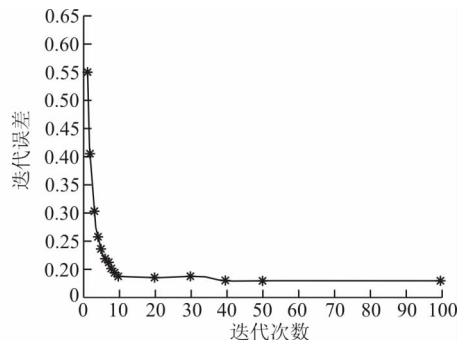


图 2 迭代次数与误差关系

Fig. 2 Relationship between iterative number and error

知道了  $J$  个干扰源的角度,可以形成  $J$  个辅助波束,指向这  $J$  个干扰源,与主波束构成  $(J+1)$  维阵列等效信号。辅助波束接收到位于主波束方向上的信号可以忽略不计,由  $(J+1)$  维等效阵列信号估计出协方差

矩阵  $\hat{Q}_{mT}$ , 然后根据式(2)采样协方差矩阵求逆算法, 得到最佳加权矢量形成自适应波束。空间导向矢量  $S(\psi)$  变为  $(J+1)$  维矢量  $S_T(\psi)$ , 如果我们只对搜索主通道的信号分量进行评估, 忽略辅助通道对信号的贡献, 可得到:

$$S_T(\psi) = [1, 0, \dots, 0]^T \tag{4}$$

假设主波束指向为  $45^\circ$ , 从图3和图4可以看到自适应波束在3个干扰方向 ( $-70^\circ, 10^\circ, 70^\circ$ ) 形成了凹口, 有效地滤除了空间有源干扰信号。

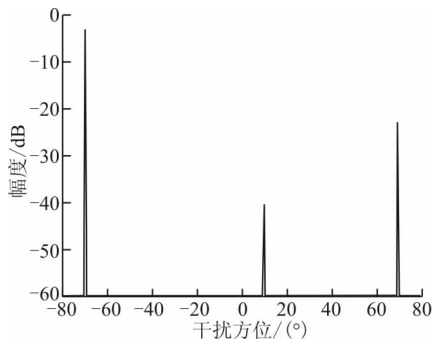


图3 多个干扰信号源的音乐空间谱估计  
Fig.3 MUSIC space spectrum of multiple jamming

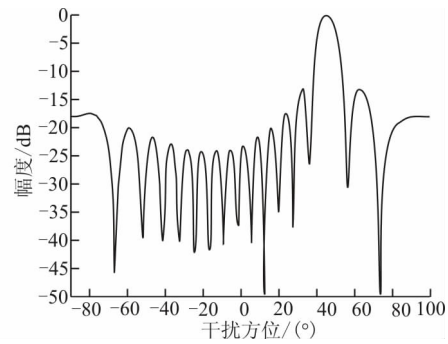


图4 改进方法的自适应波束方向图  
Fig.4 Improved adaptive directional pattern

## 2 抗干扰与 STAP 滤除杂波级联方法

前面我们介绍了干扰与杂波的空时二维谱分布特性, 可以看到, 干扰如果在空域上没有扩展, 可近似看为沿着时域(多普勒域的方向)。级联的反干扰和反杂波滤波器的原理可以通过干扰与杂波谱分布的形式加以说明, 如图5所示。先通过左边的空域滤波抑制干扰, 剩余的杂波可以通过一个空时滤波器进行抑制, 由于没有了干扰信号, 该滤波器仅需要用于处理杂波。

接下来需要解决的问题是设计空域抗干扰滤波和空时杂波滤波器的结构了。空间抗干扰用前面设计的部分自适应的空域滤波器。后面的空时杂波滤波器我们采用一种对称辅助传感器结构<sup>[9]</sup>, 在这种 STAP 降维结构中, 每个子阵接收到的杂波谱都相同, 且在干扰抵消后, 杂波抑制也是在一个缩小的子空间中进行, 能达到准最优的杂波抑制性能。其结构如图6所示。

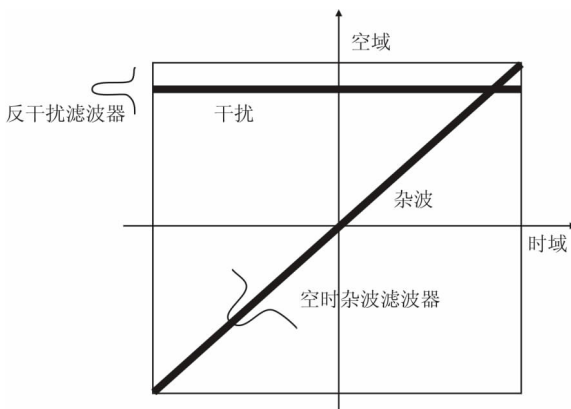


图5 干扰和杂波滤波器的级联原理  
Fig.5 Series-wound principle of filtrating clutter and jamming

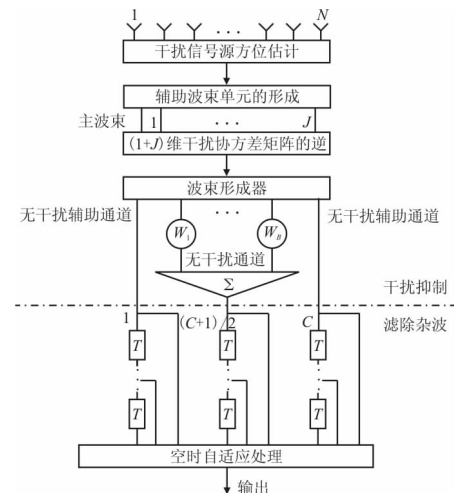


图6 抗干扰与辅助传感器结构级联  
Fig.6 Structure of anti-jamming and clutter suppression

点划线上方为空域抑制干扰结构, 下方为对称辅助结构滤除杂波, 空时自适应处理是一个波束形成器级

联一个多普勒滤波器组,在干扰抑制之后对所有的多普勒频率进行检测,滤除杂波。

仿真分析:假设空间有3个干扰源,其方位分别为 $45^\circ$ 、 $-30^\circ$ 、 $-60^\circ$ ,天线为侧视等间距阵列,天线阵元数 $N=16$ ,脉冲数 $K=8$ ,阵元间距为半波长,载波频率为10 GHz,脉冲重复频率为12 kHz,平台速度 $V_p=90$  m/s,干扰噪声比JNR为50 dB,杂噪比CNR为20 dB,接收机噪声为白噪声。

我们先看第一级处理干扰抑制的结果,先进行干扰信号的方位判定,然后形成自适应波束抑制干扰。图7为干扰源方位的估计,图8在此基础上形成自适应波束,避开干扰方向,视线方向 $\psi_B=0$ 。

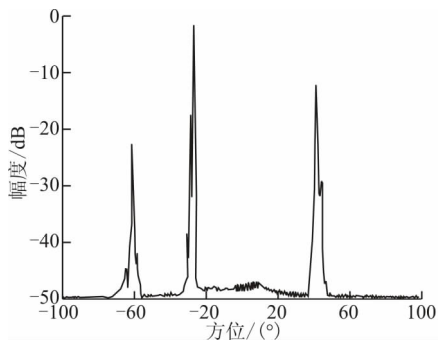


图7 3个干扰源方位估计

Fig. 7 Azimuth estimation of three jamming

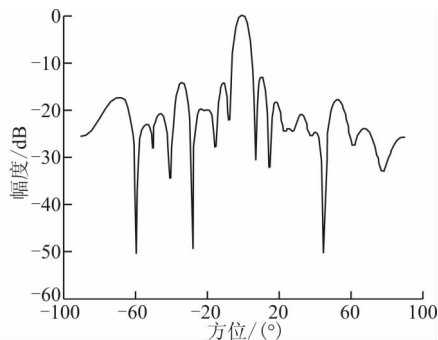


图8 3个干扰源自适应波束方向图

Fig. 8 Adaptive directional pattern of three jamming

在自适应形成波束的基础上,图9仿真了信号干扰比随着方位角 $\psi$ 变化的改善情况,3个凹口可以清晰地看到仿真分析过程中使用的干扰源位置。因此在后面滤除杂波时,视线要避开这些方向。从图9可以看到,MUSIC估计干扰源信号方位具有较高的分辨力,自适应波束的零点凹口形成很准确,因此增益 $G$ 的凹口都比较窄。在空间方位损失性能不多。

抑制回波中的干扰信号后,主要是对杂波的处理。先选择降维后的通道数 $C=3$ ,这是对称辅助传感器的最小通道数。但是干扰协方差矩阵求逆运算会导致杂波回波畸变,即波束方向图保形能力降低,因此会因为缺少自由度,杂波滤波器会有一些性能损失,如图10所示,杂波凹口有展宽,且视线方向有一定偏移。当通道数 $C=7$ 时,杂波抑制的改善因子是令人满意的。还可以看到,由于雷达的视线方向避开干扰方向,干扰能量抑制得较彻底,在后续杂波处理中已经基本看不到干扰的影响了。

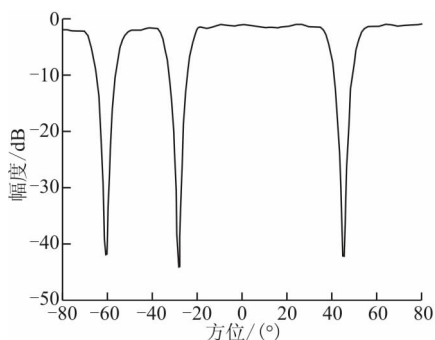


图9 反干扰处理器的性能图

Fig. 9 Performance of anti-jamming processor

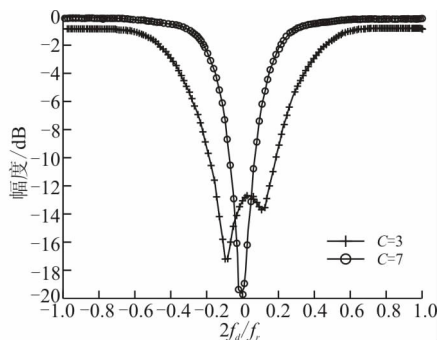


图10 干扰抑制后杂波处理的性能

Fig. 10 Performance of clutter suppression after anti-jamming

### 3 结束语

基于在空间上压制性有源干扰一般是离散的特点,本文先对干扰信号源的方位进行估计,然后形成自适应波束,在干扰方位形成零陷,消除干扰的影响,最后处理已经抑制掉压制干扰能量的回波。这是一种空间抗干扰与STAP技术滤除杂波级联的方法,其中反干扰滤波器的设计采用了高分辨力空间谱估计技术,后面的STAP处理器则采用了对称辅助处理器结构(考虑到误差的影响),能获得准最优的杂波抑制效果。理论

分析和仿真结果表明,该方法能获得较好的抗干扰和杂波抑制效果,具有一定的工程参考价值。

#### 参考文献(References):

- [1] Brennan L E, Reed I S. Theory of adaptive radar[J]. IEEE trans on AES, 1973, 10(6):237-252.
- [2] 罗守贵, 金林. 机载预警雷达的发展趋势[J]. 现代雷达, 2008, 12(30):1-2.  
LUO Shougui, JIN Lin. Development trend analysis on the airborne early warning radar[J]. Modern radar, 2008, 12(30):1-2. (in Chinese)
- [3] 王永良, 李天泉. 机载雷达空时自适应信号处理技术回顾与展望[J]. 中国电子科学报, 2008, 3(6):273-274.  
WANG Yongliang, LI Tianquan. Overview and outlook of space time adaptive signal processing for airborne radar[J]. Journal of China academy of electronics and information technology, 2008, 3(6):273-274. (in Chinese)
- [4] Klemm R. Adaptive air and space borne MTI under jamming conditions[C]//IEEE national radar conference. Boston, MA:IEEE press, 1993:167-172.
- [5] Richard Klimm. Principles of space-time adaptive processing(3rd edition)[M]. Lucknow:Institution of electrical technology, 2006.
- [6] Schmidt R O. Multiple emitter location and signal parameter estimation[J]. IEEE trans on AP, 1986, 34(3):276-280.
- [7] 汪晋宽, 宋昕. 鲁棒自适应阵列信号处理[M]. 北京:电子工业出版社, 2009:38-63.  
WANG Jinkuan, SONG Xin. Robust adaptive array signal processing [M]. Beijing:Electronic industry press, 2009:38-63. (in Chinese)
- [8] Weiss A J, Friedlander B. Eigenstructure methods for direction finding with sensor gain and phase uncertainties [J]. Circuits, system signal processing, 1990, 9(3):271-300.
- [9] 张良, 保铮, 廖桂生. 降维空时自适应处理研究[J]. 电子与信息学报, 2001, 23(3):262-264.  
ZHANG Liang, BAO Zheng, LIAO Guisheng. A study on reduce-rank STAP[J]. Journal of electronics & information technology, 2001, 23(3):262-264. (in Chinese)

(编辑:徐楠楠)

## A Method of STAP Application in Active Jamming Environment

MA Hui-miao<sup>1</sup>, MA Lin-hua<sup>1</sup>, GAN Yuan<sup>2</sup>, ZHANG Jian<sup>2</sup>

(1. School of Aeronautics and Astronautics Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;  
2. Unit 95321, Wuhan 430100, China)

**Abstract:** To solve the problem that how to improve the performance of STAP in the environment of complex active jamming, an improved adaptive beams formed method based on the part space adaptive array processing is put forward. The method is presented, which is a method of special anti-jamming technique in series with filtering clutter using STAP technique. At first, MUSIC method is used to estimate DOA of the active jamming, then, multi-beams are formed on the anticipant and interfered directions. Finally STAP technique is used to suppress clutter after anti-interference filtering in the space. The result of simulation demonstrates that the use of this method can effectively estimates active jamming's orientation, and maintains the performance of clutter suppression in the environment of interference. Using adaptive filter in the beam domain can reduce the required computations. The efficiency of the method is demonstrated by simulation.

**Key words:** Space-Time Adaptive Processing (STAP); DOA estimation; anti-jamming; clutter suppression