

文章编号: 2095-4980(2018)06-1054-04

## 一种改进的机载雷达抗副瓣干扰方法

李文君, 杨海龙, 孟 军

(中国洛阳电子装备试验中心, 河南 济源 459000)

**摘 要:** 某机载雷达采用和差波束空时自适应处理( $\Sigma\Delta$ -STAP)方法能较好地对抗一个主瓣干扰和  $\Delta A$  波束非零点副瓣干扰, 但当干扰从  $\Delta A$  波束副瓣零点方向进入时, 主瓣分裂, 对抗效果差。结合雷达实际特点, 提出一种改进的  $\Sigma\Delta$ -STAP 方法, 利用和、差和保护 3 个通道进行二维自适应处理。仿真结果表明, 该方法能够很好对抗副瓣零点干扰, 性能较以前  $\Sigma\Delta$ -STAP 方法有 10 dB 的改善, 并且受幅相误差的影响变弱。

**关键词:** 和差波束空时自适应处理; 副瓣干扰; 改善因子

**中图分类号:** TN95

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA201806.1054

## An improved suppressing sidelobe jamming method of airborne radar

LI Wenjun, YANG Hailong, MENG Jun

(Luoyang Electronic Equipment Test Center of China, Jiyuan Henan 459000, China)

**Abstract:** Space-Time Adaptive Processing with sum and difference beams( $\Sigma\Delta$ -STAP) is utilized in airborne radar. It can suppress one jamming from common side lobe direction and main lobe direction well. But the effect in suppressing jamming from the beam's zero side lobe direction is not very good and the main lobe will be separated. According to the characteristics of airborne radar, an improved  $\Sigma\Delta$ -STAP method based on  $\Sigma$ ,  $\Delta A$  and guard channels is proposed. Simulation results present that the improved method can suppress jamming from the beam's zero side, and the improvement factor is enhanced by 10 dB. The influence on the performance by error becomes weaker.

**Keywords:** Space-Time Adaptive Processing with sum and difference beams( $\Sigma\Delta$ -STAP); side lobe jamming; improvement factor

某机载雷达主要用于模拟国内外典型机载火控雷达用于检验被试雷达对抗装备的干扰效果, 其有空/空、地面动目标指示(Ground Moving Target Indicate, GMTI)和合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)等多种工作模式, 投入靶场运用以来, 在前期各项试验任务和训练演练任务中发挥了重要作用。在前期靶场任务中, 经常进行干扰对抗装备对该雷达实施有源干扰。抗有源干扰的常规措施是窄波束、低副瓣, 大功率口径积等<sup>[1]</sup>, 但这些技术的实现一般受到器件稳定性以及加工工艺限制, 牵涉雷达体制, 工程实现比较复杂。常用的抗干扰处理方法主要有自适应零点、副瓣匿影、点迹过滤等<sup>[2]</sup>。因此对多通道雷达来讲, 空-时自适应处理(STAP)方法能在空域形成零点, 是常用的抗有源干扰方法。

某机载雷达采用和差波束空时自适应处理( $\Sigma\Delta$ -STAP)方法, 空域自由度为 2, 是简化的自适应处理方法, 工程实现相对比较简单。该方法能较好地对抗一个  $\Delta A$  波束非零点副瓣干扰和主瓣干扰, 但当干扰从  $\Delta A$  波束副瓣零点方向进入时, 主瓣分裂, 对抗效果差<sup>[3]</sup>。这主要是由于  $\Sigma\Delta$ -STAP 处理器设计时自身存在的缺陷造成的, 只有 2 路通道。结合雷达装备实际特点, 合理利用保护通道, 提出一种改进的  $\Sigma\Delta$ -STAP 方法。结果表明, 改进后雷达抗干扰能力增强, 一定程度上可提高某雷达在电子战中的性能。

### 1 改进的 $\Sigma\Delta$ -STAP 方法

$\Sigma\Delta$ -STAP 方法对从差波束非零点副瓣区域进入的干扰具有较好的抑制效果, 但不能抑制差波束副瓣零点干

扰。某机载雷达为抑制奇异点杂波，设有保护天线。结合雷达的实际特点对  $\Sigma\Delta$ -STAP 方法进行改进，提出一种利用保护通道(G)作辅助通道，与和( $\Sigma$ )、方位差( $\Delta A$ )波束一起进行空时二维自适应处理的方法，相当于在原有处理方法上增加一个处理通道，空域自由度变为 3。

图 1 是保护天线与主天线的几何关系图，图中 G 代表保护天线，雷达保护天线的位置对仿真结果影响不大。

图 2 是  $\Sigma$ 、 $\Delta A$  波束和保护通道(G)的天线方向图， $\Delta A$  波束在主瓣指向上响应很低，保护通道(G)的增益小于阵列天线主瓣增益，但比副瓣增益要高一些，保护通道(G)和主天线增益比一般远远小于 1。

改进的  $\Sigma\Delta$ -STAP 方法是对和、方位差及保护 3 个空域通道分别进行动目标指示(MTI)、快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)和时域自适应处理<sup>[4-5]</sup>。

将  $\Sigma$ 、 $\Delta A$  波束与保护通道(G)在相邻 3 个多普勒通道的输出排成矢量，记为：

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_\Sigma \\ \mathbf{X}_{\Delta A} \\ \mathbf{X}_G \end{bmatrix} = [x_{\Sigma 1}, x_{\Sigma 2}, x_{\Sigma 3}, x_{\Delta A 1}, x_{\Delta A 2}, x_{\Delta A 3}, x_{G1}, x_{G2}, x_{G3}]^T \quad (1)$$

空域导向矢量  $\mathbf{S}_s = [1, 0, \alpha^T]$ ，时域导向矢量  $\mathbf{S}_T = [e^{-j\phi_r(f_d)}, 1, e^{j\phi_r(f_d)}]^T$ ，总导向矢量为  $\mathbf{S} = \mathbf{S}_s \otimes \mathbf{S}_T$ ， $\otimes$  表示克罗内克(Kronecker)直积。

输出信干杂噪比(Signal Jam Clutter Noise Rate, SJCNr)为：

$$SJCNr_o = \frac{|E(y)|^2}{\text{var}(y)} = \frac{|\mathbf{W}^H \mathbf{S}|^2}{\mathbf{W}^H \mathbf{R}_x \mathbf{W}} \quad (2)$$

式中： $\mathbf{W}$  为加权矢量； $\mathbf{R}_x = E(\mathbf{X}\mathbf{X}^H)$  为杂波协方差矩阵。

滤波器的输出为  $\mathbf{y} = \mathbf{W}^H \mathbf{X}$ ，则自适应求解应满足如下条件：

$$\begin{cases} \min_{\mathbf{W}} \mathbf{W}^H \mathbf{R}_x \mathbf{W} \\ \text{s.t.} : \mathbf{W}^H \mathbf{S} = 1 \end{cases} \quad (3)$$

根据线性约束最小方差准则<sup>[6]</sup>，其最优解为：

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

## 2 抗零点副瓣干扰仿真分析

如图 3 所示，假设天线阵面与飞行方向的夹角是  $90^\circ$  (前视阵)，天线的俯仰扫描角为  $0^\circ$ ，波束主瓣指向和飞行方向夹角是  $30^\circ$ ，则主瓣指向与阵面夹角为  $60^\circ$ 。干扰方向和天线阵面的方位夹角<sup>[7-9]</sup>定义为干扰角度。本文考虑干扰从  $0^\circ$  到  $180^\circ$  方向即从正面进入的情况。在天线坐标系内  $57^\circ$  到  $63^\circ$  角域为主瓣覆盖区，其他方向为副瓣区。

仿真条件为：天线阵为平面阵，脉冲重复频率(Pulse Repetition Frequency, PRF)为 30 kHz，杂波在多普勒域无模糊，相干脉冲积累数为 34，工作波长为 0.03 m，载机飞行速度为 150 m/s，杂噪比(Clutter to Noise Ratio, CNR)为 50 dB，干噪比(Jam to Noise Ratio, JNR)为 20 dB。本文重点研究来自零点副瓣(干扰方向来自  $36^\circ$ )干扰时的情况，分别对  $\Sigma\Delta$ -STAP 方法和改进后的方法进行仿真分析比较。

图 4 为  $\Sigma\Delta$ -STAP 方法的空域自适应方向图，从图中可

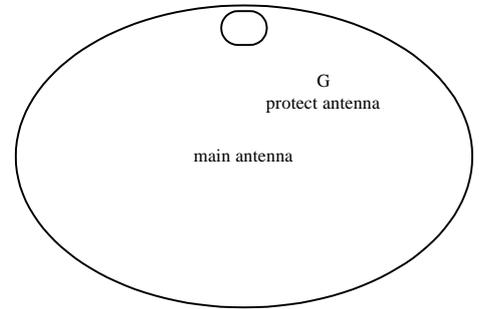


Fig.1 Schematic of antenna position relation  
图 1 天线位置关系示意图

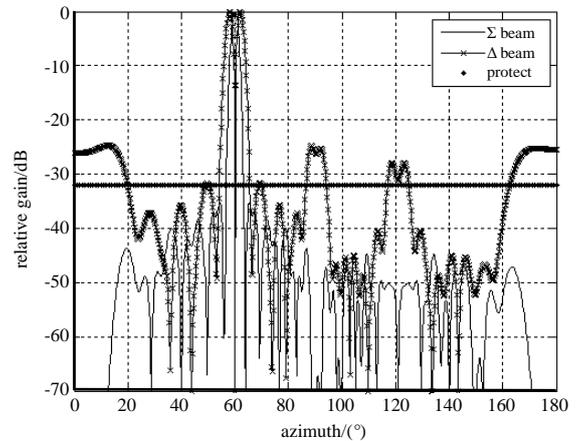


Fig.2 Antenna directional pattern  
图 2 天线方向图

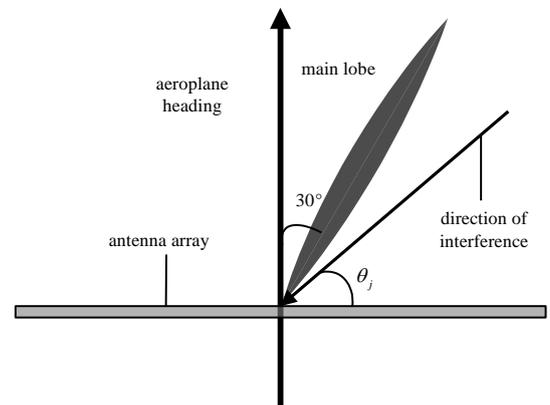


Fig.3 Antenna coordinate system  
图 3 天线坐标系

以看出, 在  $36^\circ$  处能形成凹口, 但为对抗零点方向干扰, 此时差波束在综合方向图时所占权值较大, 主瓣会产生分裂。

图 5 为  $\Sigma\Delta$ -STAP 方法改善因子曲线, 无误差时  $\Sigma\Delta$ -STAP 改善因子比常规处理稍好, 但比无干扰时下降约 25 dB。说明  $\Sigma\Delta$ -STAP 对抗从  $36^\circ$  方向(零点副瓣)干扰效果较差。另外, 可以看到, 存在不同幅相误差时, 改善因子也有较大改变, 说明  $\Sigma\Delta$ -STAP 方法受误差影响较大。

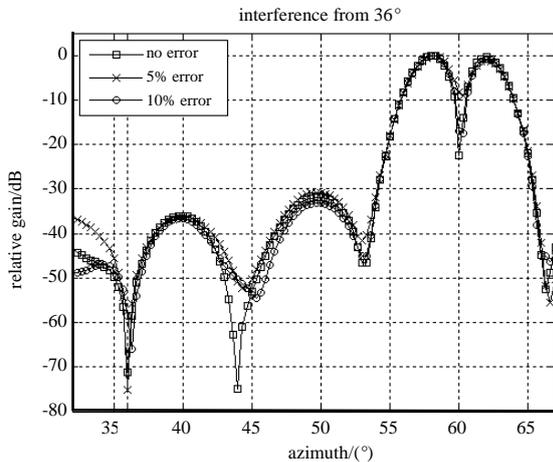


Fig.4 Adaptive directional diagram  
图 4 自适应方向图

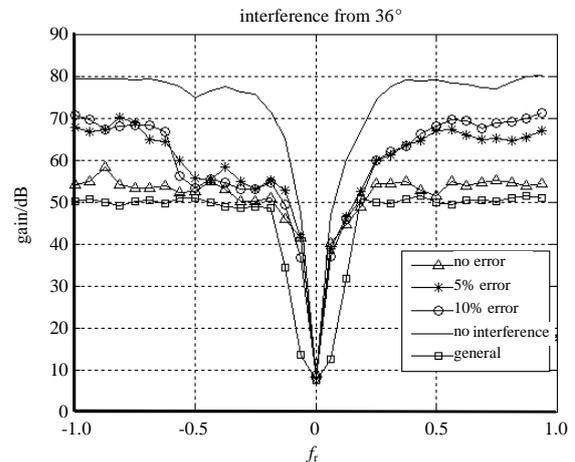


Fig.5 Improvement factor  
图 5 改善因子

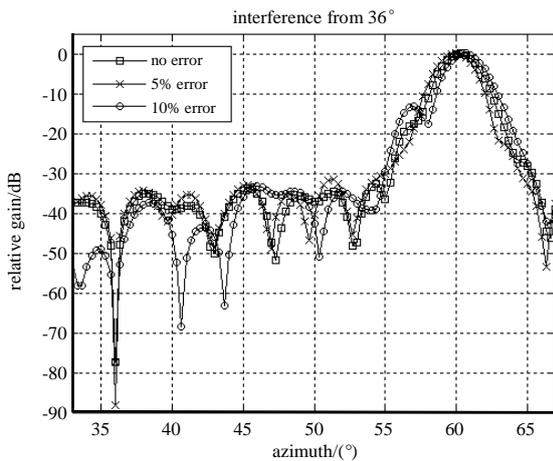


Fig.6 Adaptive directional diagram  
图 6 空域自适应方向图

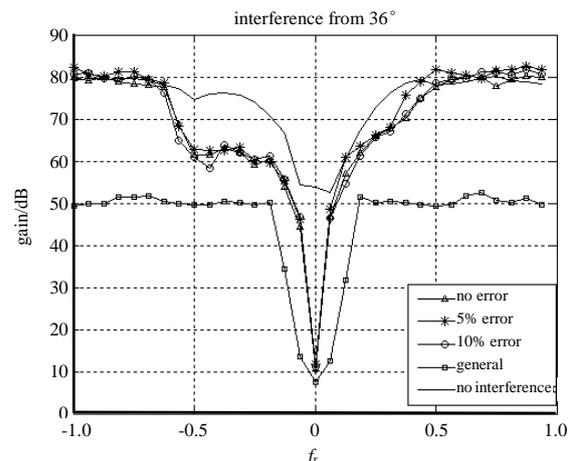


Fig.7 Improvement factor  
图 7 改善因子

图 6 为改进的  $\Sigma\Delta$ -STAP 方法的空域自适应方向图, 可见主瓣不再分裂。因为干扰从  $\Delta A$  波束副瓣零点进入时, 保护通道起了更大作用, 而差通道的权重变小, 主瓣不再分裂。在  $36^\circ$  处形成了凹口, 改进的方法能够对抗从  $\Delta A$  波束副瓣零点方向进入的干扰。幅相误差对方向图中的凹口深度影响很小, 因为此时保护通道起主要作用, 而保护通道的增益受天线幅相误差影响很小。

图 7 是改进的  $\Sigma\Delta$ -STAP 方法改善因子曲线, 在清晰区, 该方法能完全将干扰对消掉, 虽然在副瓣杂波区与无干扰时相比改善因子降低了 15 dB 左右, 但比常规处理仍有 10 dB 改善, 与  $\Sigma\Delta$ -STAP 相比有 5 dB 改善, 阵元幅相误差对改善因子影响不大, 这也是因为保护通道的关系, 说明改进后的  $\Sigma\Delta$ -STAP 方法能对抗  $\Delta A$  波束副瓣零点干扰, 且幅相误差对其的影响变弱。

### 3 结论

某机载雷达采用的  $\Sigma\Delta$ -STAP 方法对抗零点副瓣干扰时, 由于主瓣分裂, 抗干扰效果差。本文结合某机载雷达实际特点, 提出一种基于和、方位差和保护 3 个空域通道的改进方法。仿真结果表明, 改进后的方法能防止主瓣分裂, 有效对抗零点副瓣干扰, 且对幅相误差的稳定性增强。

## 参考文献:

- [1] 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(3):271-275. (WANG Yongliang,LI Tianquan. Overview and outlook of space time adaptive signal processing for airborne radar[J]. Journal of CAEIT, 2008,3(3):271-275.)
- [2] 唐斌,赵源,蔡天一,等. 雷达抗有源干扰技术现状与展望[J]. 数据采集与处理, 2016,31(4):623-639. (TANG Bin, ZHAO Yuan,CAI Tianyi,et al. Advances and perspectives in radar ECCM techniques of active jamming[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2016,31(4):623-639.)
- [3] 李刚,李文君,谢瑞莎,等.  $\Sigma\Delta$ -STAP 对抗有源干扰性能的分析[J]. 兵工自动化, 2015,34(1):32-35. (LI Gang,LI Wenjun,XIE Ruisha,et al. Study on ability of  $\Sigma\Delta$ -STAP in active jamming-suppression[J]. Ordnance Industry Automation, 2015,34(1):32-35.)
- [4] 叶玲平,张良,孙晓闻.  $\Sigma\Delta$ -STAP 和  $\Sigma\Delta G$ -STAP 抗有源干扰的性能比较[J]. 现代雷达, 2007,29(8):48-51. (YE Lingping,ZHANG Liang,SUN Xiaowen. Comparison study of  $\Sigma\Delta$ -STAP with  $\Sigma\Delta G$ -STAP in rejecting active jamming[J]. Modern Radar, 2007,29(8):48-51.)
- [5] 李思奇. 高分辨单脉冲雷达距离像回波建模仿真[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(2):186-189. (LI Siqu. Modeling and simulation of high resolution monopulse radar range profile echo[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(2):186-189.)
- [6] KLEMM R. Principles of space-time adaptive processing[M]. 3rd ed. Lucknow,India:Institution of Electrical Technology, 2006:59-60.
- [7] 马汇森,马林华,甘元,等. STAP 技术在有源干扰环境下的运用方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2012,13(3):65-69. (MA Huimiao,MA Linhua,GAN Yuan,et al. A method of STAP application in active jamming environment[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2012,13(3):65-69.)
- [8] 王彤. 机载雷达简易 STAP 方法及其应用[D]. 西安:西安电子科技大学, 2001. (WANG Tong. Study on application of airborne radar simple STAP method[D]. Xi'an,China:Xidian University, 2001.)
- [9] 唐孝国,张剑云,周青松,等. 对机载相控阵雷达 STAP 技术的旁瓣干扰[J]. 火力与指挥控制, 2014,39(2):156-159. (TANG Xiaoguo,ZHANG Jianyun,ZHOU Qingsong,et al. Study of side lobe jamming on airborne phased array radar STAP technology[J]. Fire Control & Command Control, 2014,39(2):156-159.)

## 作者简介:



李文君(1981-),男,河南省项城市人,工程师,主要研究方向为雷达与雷达对抗.  
email:liwenjunlucky@163.com.

杨海龙(1977-),男,新疆维吾尔自治区塔城市人,工程师,主要研究方向为雷达与雷达对抗.

孟军(1988-),男,山西省临汾市人,工程师,主要研究方向为雷达信号处理.