

doi: 10.7690/bgzdh.2015.01.009

$\Sigma\Delta$ -STAP 对抗有源干扰性能的分析

李 刚¹, 李文君¹, 谢瑞莎², 张剑峰¹

(1. 中国洛阳电子装备试验中心技术室, 河南 济源 459000; 2. 国网洛阳供电公司农电工作部, 河南 洛阳 471023)

摘要: 针对实战环境中存在有源干扰会使雷达目标检测能力下降的问题, 提出一种利用 $\Sigma\Delta$ -STAP 对抗有源干扰性能的抗干扰方法。通过建立抗干扰模型, 对主瓣、非零点副瓣和副瓣零点 3 种典型干扰方向进行分析, 验证 $\Sigma\Delta$ -STAP 对抗干扰效果, 并与常规 STAP 处理进行了比较。仿真结果表明: $\Sigma\Delta$ -STAP 能较好地对抗一个 ΔA 波束非零点副瓣干扰和主瓣干扰, 但当干扰从 ΔA 波束副瓣零点方向进入时, 效果不理想且导致主瓣分裂。

关键词: $\Sigma\Delta$ -STAP; 有源干扰; 主瓣; 副瓣; 改善因子

中图分类号: TJ03 **文献标志码:** A

Study on Ability of $\Sigma\Delta$ -STAP in Active Jamming-Suppression

Li Gang¹, Li Wenjun¹, Xie Ruisha², Zhang Jianfeng¹

(1. Engineering Office, Luoyang Electronic Equipment Test Center of China, Jiyuan 459000, China;

2. Rural Power Department, State Grid Luoyang Power Supply Company, Luoyang 471023, China)

Abstract: The detective ability of airborne radar is often greatly degraded in active jamming environment. For this case, the $\Sigma\Delta$ -STAP in active jamming-suppression is proposed in the paper. By built suppress jamming model, the $\Sigma\Delta$ -STAP performance in suppressing jamming from main lobe, common side lobe and zero side lobe directions is analyzed and compared in details with results of general STAP. Simulation results presented that $\Sigma\Delta$ -STAP can suppress one jamming from common side lobe direction and main lobe direction well. Its performance in suppressing jamming from the difference beam's zero side lobe direction is not very good and will cause the main lobe to be separated.

Keywords: $\Sigma\Delta$ -STAP; active jamming; main lobe; side lobe; improvement factor

0 引言

对雷达来说, 除了感兴趣的目标回波以外, 其他进入雷达接收机的信号都可看作是干扰信号^[1-3]。按照干扰能量的来源分类, 雷达的干扰可以分为有源干扰和无源干扰。有源干扰的干扰能量是由雷达本身以外的其他辐射源产生, 产生与雷达信号相似的电磁波, 其直达波的能量有时比目标回波大几十 dB, 对目标检测构成严重威胁。笔者主要研究雷达对抗有源干扰的情况。

机载雷达在实战环境中会受到各种有意无意的干扰, 有源干扰会使雷达目标检测能力下降, 抗有源干扰的常规措施是尽可能降低天线副瓣电平^[4-5], 并采用频率捷变技术。但副瓣电平的降低受到器件稳定性以及加工工艺限制, 并且对大功率近距离压制干扰也无能为力。因此对多通道雷达, 采用自适应阵列处理方法在空域形成零点是最有效的抗干扰方法。 $\Sigma\Delta$ -STAP 方法是局部自适应处理, 空域自由度为 2 个, 时域自由度为 3 个, 实现比较简单。基于此, 笔者分析利用 Σ 、 ΔA 波束联合空时自适应处理 ($\Sigma\Delta$ -STAP) 的抗干扰性能, 主要研究主瓣干

扰和副瓣干扰 2 种情况下 $\Sigma\Delta$ -STAP 的抗干扰性能。

1 干扰模型

文中的干扰模型^[6-7], 假设在相控阵天线的每个天线阵元都加干扰, 不同阵元接收的干扰信号幅度相同, 而相位服从空间波程差规律。以天线左上角单元相位为基准, 假定每一行的相位增量是 Δu , 每一列的相位增量是 Δv , 则第 m 行第 n 列单元的相位增量为 $(m-1)\times\Delta u+(n-1)\times\Delta v$ 。保护通道接收的干扰与主天线单元接收的干扰空间上也是相干的。而各单元噪声的幅度和相位却是随机的, 相互之间统计独立, 每个天线单元的输出为

$$X(n, m) = b \cdot S(n, m) + C(n, m) + N(n, m) + JNR \cdot J \cdot \exp(i \cdot ((n-1) \cdot \Delta u + (m-1) \cdot \Delta v)) \quad (1)$$

式中: $S(n, m)$ 是信号导引矢量; b 为目标回波幅度, 无目标时 $b=0$; $C(n, m)$ 是模拟的杂波数据; $N(n, m)$ 是内部噪声; J 是外部干扰的调制包络, 服从 $N(0, 1)$ 正态分布的随机数。CNR 为单元杂噪比, JNR 为单元干噪比, 机载雷达主杂波往往很强, 一般 CNR 远远大于 JNR。 Δu 是干扰信号相邻阵元列间相位

收稿日期: 2014-07-24; 修回日期: 2014-08-27

作者简介: 李 刚(1977—), 男, 山东人, 硕士, 工程师, 从事雷达信号处理、雷达对抗仿真研究。

增量, Δv 是相邻阵元行间相位增量, 假设干扰在 天线坐标系内的方位入射角为 θ_j , 俯仰角为 φ_j , 那么:

$$\begin{cases} \Delta u = \frac{2\pi}{\lambda} dx \cdot \cos \theta_j \cos \varphi_j \\ \Delta v = \frac{2\pi}{\lambda} dy \cdot \sin \varphi_j \end{cases} \quad (2)$$

2 $\Sigma\Delta$ -STAP 对抗干扰效果分析

如图 1 所示, 假设天线的俯仰扫描角为 0° , 天线阵面与飞行方向的夹角是 30° , 天线主瓣指向和飞行方向夹角是 90° , 则主瓣指向与天线阵面夹角为 60° 。干扰的角度指干扰方向和天线阵面的方位夹角, 由于天线俯仰角为 0° , 方位角等于波束指向锥角。笔者考虑干扰从天线正面进入的情况, 即干扰从 $0^\circ \sim 180^\circ$ 方向进入。在天线坐标系内 $55^\circ \sim 65^\circ$ 角域为主瓣覆盖区, 其他方向为副瓣区。

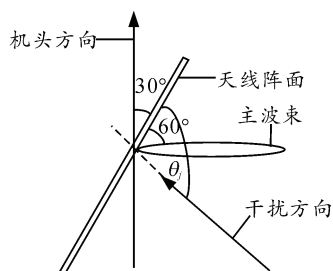


图 1 天线坐标系

下面讨论 $\Sigma\Delta$ -STAP 对抗一个有源干扰的情况, 干扰从不同方向进入时, 对抗效果也不一样^[8]。笔者讨论 3 种典型情况:

- 1) 干扰来自 ΔA 波束非零点副瓣 (116° 方向), 类似于支援干扰, 由于高的副瓣区占绝大多数角域, 这种情况代表实际普遍存在的干扰;
- 2) 干扰来自 ΔA 波束副瓣零点 (36° 方向), 零点占角域不大, 是一种特例;
- 3) 干扰来自 Σ 波束主瓣 (61° 方向), 类似于随队干扰, 主瓣占角域也不大。

2.1 干扰从 116° 方向进入

图 2 是空域自适应方向图, 从该图上可清楚看到在 116° 方向形成了凹口。图 2 还比较了天线阵元幅相误差对干扰零深的影响, 分析了误差为 5%、10% 2 种情况, 从图中看出零深基本不变, 原因阵元误差对无杂波区性能影响不大。

图 3 为改善因子曲线, $\Sigma\Delta$ -STAP 抗干扰与常规处理相比, 清晰区的改善因子提高 20 dB 左右,

副瓣杂波区提高 10 dB 左右。阵元幅相误差主要影响副瓣杂波区的改善因子, 误差为 5% 时, 改善因子下降 4~5 dB, 误差为 10% 时, 改善因子下降 10 dB 左右, 但仍比常规处理好。幅相误差对清晰区改善因子影响很小, 这与图 2 的零深结果相吻合。

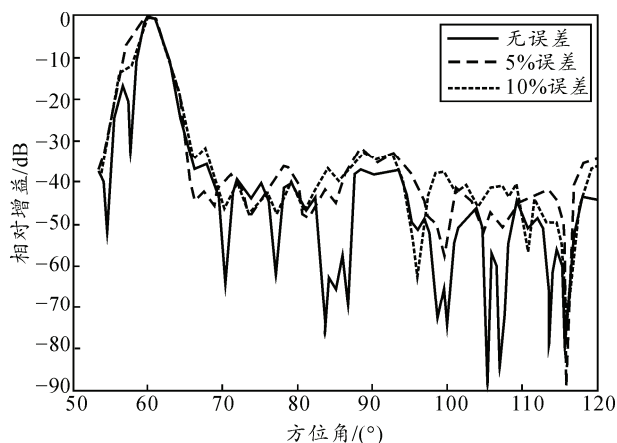


图 2 自适应方向

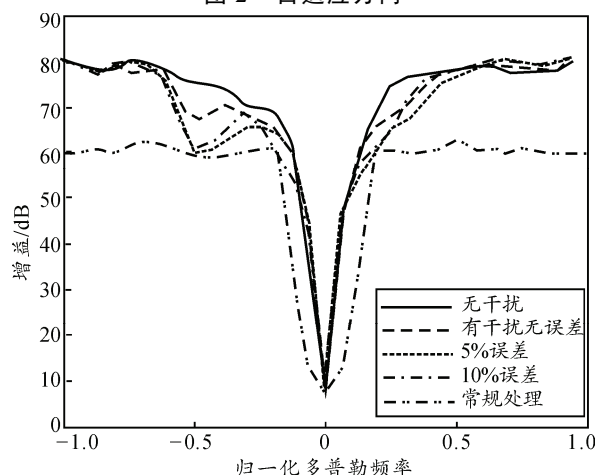


图 3 改善因子

2.2 干扰从 36° 方向进入

图 4 为空域自适应方向图, 在 36° 处形成了凹口, 但是主瓣严重分裂, 这是因为要对抗零点方向干扰, 差波束的权值就很大, 造成与和波束综合出的自适应方向图主瓣分裂。

图 5 为改善因子曲线, 干扰使常规处理改善因子下降 30 dB 左右, 无误差时 $\Sigma\Delta$ -STAP 改善因子只略好于常规处理, 说明不能对抗从 36° 方向进入的干扰。笔者还分析了幅相误差对零深及改善因子的影响, 有意思的是当存在幅相误差时零深反而更深, 主瓣分裂程度也有所缓和, 另外清晰区改善因子竟然提高 15 dB 以上, 副瓣杂波区也提高了 5 dB 左右。这是因为存在幅相误差时 ΔA 波束副瓣零点深度抬高了, 36° 对应的和、差天线相对增益改变, 抗干扰时差波束权值变小, 改善效果反而比没有误

差时好。

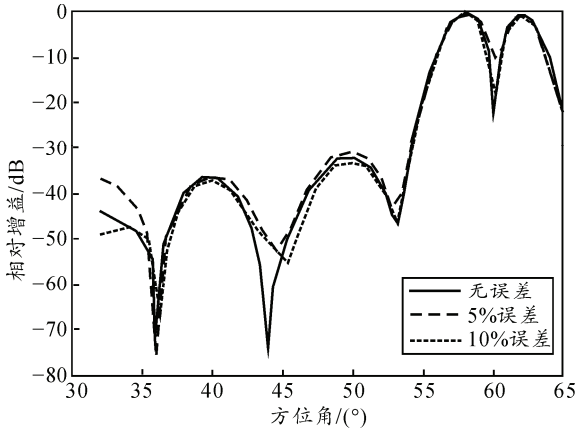


图 4 自适应方向

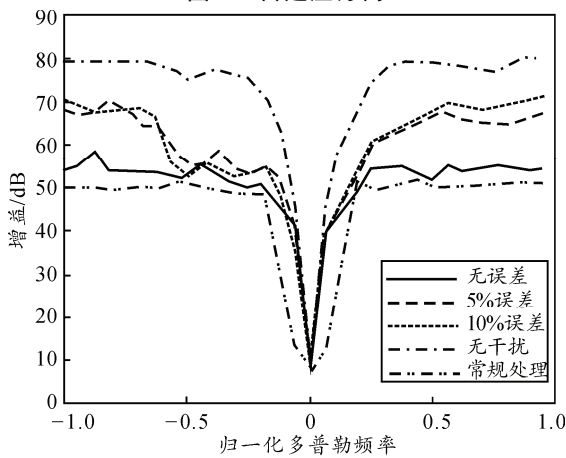


图 5 改善因子

2.3 干扰从 61°方向进入

图 6 是干扰从 61°方向进入时的自适应方向图，在 61°处形成了凹口，可抑制从 61°方向进入的干扰，这个凹口在主瓣区。有幅相误差时，方向图中的凹口深度变化不大，这是因为幅相误差对天线方向图主瓣的影响不大。

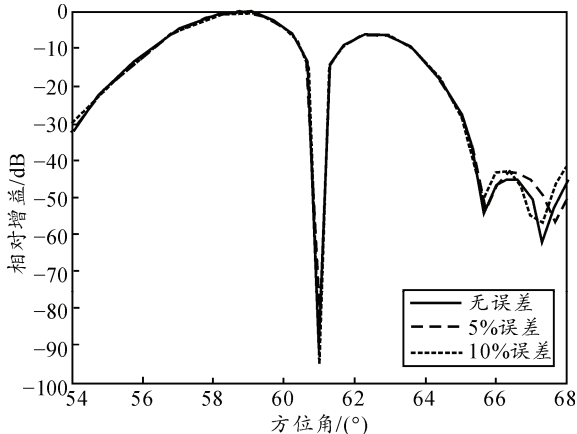


图 6 自适应方向

图 7 是改善因子曲线，存在主瓣干扰时常规处理改善因子下降 65 dB 左右，雷达性能基本丧失，

而 $\Sigma\Delta$ -STAP 改善因子比没有干扰时只下降了 5~6 dB，说明能取得较好的抗主瓣干扰效果。 $\Sigma\Delta$ -STAP 与常规处理相比，清晰区改善因子提高了 60 dB 左右，副瓣杂波区提高 50 dB 左右，抗干扰性能大大增强。有幅相误差时改善因子变差，误差为 5% 时，副瓣杂波区改善因子下降 5~6 dB，误差为 10% 时与 5% 时相比，又下降了 3~4 dB。

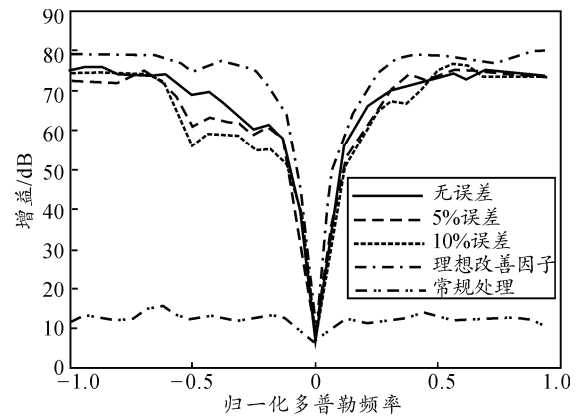


图 7 改善因子

3 结果

图 8 为 3 种典型干扰情况 $\Sigma\Delta$ -STAP 滤波器输出干扰加噪声功率^[9-10]。干扰从 116°方向进入时，与没有干扰时相比输出功率几乎没有改变，说明 $\Sigma\Delta$ -STAP 能很好地对抗从非零点副瓣方向进入的干扰；当干扰从 36°方向进入时，输出杂噪功率抬高了 30 dB 左右，说明对抗从 $\Delta\Delta$ 波束副瓣零点方向进入的干扰性能较差；当干扰从 61°方向进入时，与无干扰相比输出功率只抬高了 5 dB 左右，说明 $\Sigma\Delta$ -STAP 具有较强的抗主瓣干扰能力。

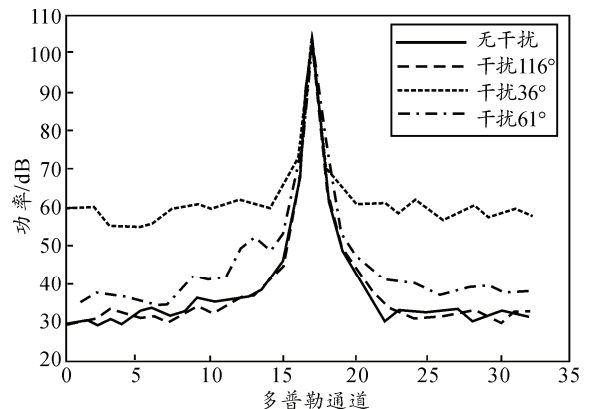


图 8 平均输出功率

4 结束语

综上所述， $\Sigma\Delta$ -STAP 能很好地对抗主瓣干扰和非零点副瓣进入的干扰，而对抗从副瓣零点进入的干扰效果较差。

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]. 中国电子学报, 2008, 3(6): 273-274.
- [2] 保铮, 张玉洪, 廖桂生, 等. 机载雷达空时二维信号处理[J]. 现代雷达, 1994, 16(1): 38-48.
- [3] Richard Klimm. Principles of space-time adaptive processing (3rd edition)[M]. Lucknow: Institution of electrical technology, 2006: 59-60.
- [4] Brennan L E, Reed I S. Theory of adaptive radar [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1973, 9(2): 237-252.
- [5] 李明. 机载阵列雷达抑制非均匀杂波的 STAP 方法研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.

(上接第 24 页)

4 结束语

笔者探讨了定向器模态测试方案优化的方法, 根据平均驱动自由度位移响应、香农定理和最优参考点法等理论, 通过 Matlab 编程计算, 得到了自由模态测试中的最优悬挂点、测点和参考点, 并通过试验获取了较为准确的模态参数。

与之前的经验测试方法比较有优势: 1) 优化后的方案在取点上有了理论依据, 不再只凭借经验选择; 2) 测试更容易避开节线, 使结果更加可靠、准确, 可避免模态遗漏, 得到更好的振型。这些测试上的优化, 充分利用了模态测试优化理论, 为准确获取定向器的结构动力学特性打下了良好的基础。

参考文献:

- [1] 徐立黄, 张贵林, 张波涛, 等. 基于有限元的某多管火箭炮模态分析[J]. 弹箭与制导学报, 2009, 30(6): 110-115.
- [2] 董小瑞, 杨世文. 复杂结构模态测试方法研究[J]. 兵工学报, 2008, 29(4): 474-477.
- [3] DeClerck J P, Avitabile P. Development of Several New

(上接第 27 页)

3 结束语

笔者在步兵战车多刚体动力学的基础上, 利用 ADAMS 和 ANSYS 软件建立了步兵战车的刚柔耦合模型, 在一定程度上提高了模型的精度。然后通过静平衡试验和炮塔振动测量试验对该模型进行了定性和定量的仿真验证及分析, 验证了该步兵战车刚柔耦合模型是可信的, 为下一步研究步兵战车行进间射击精度问题打下了基础。

参考文献:

- [1] 陈峰华. ADAMS 2012 虚拟样机技术从入门到精通[M].

- [6] 杨晓超, 刘宏伟, 王勇, 等. 有源干扰条件下机载 MIMO 雷达 STAP 协方差矩阵秩的分析[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(7): 1616-1621.
- [7] Ries P, Lapiere F D, Verly J G. Framework and taxonomy for radar space-time adaptive processing (STAP) Methods[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2007, 43(3): 1084-1099.
- [8] 马汇淼, 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, 2012, 13(3): 65-69.
- [9] 吕晖, 冯大政, 和洁, 等. 机载 MIMO 雷达两级降维杂波抑制方法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(4): 805-809.
- [10] Wang G, Lu Y. Clutter rank of STAP in MIMO radar with waveform diversity[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(2): 938-943.

- *****
Tools for Modal Pre-Test Evaluation[C]//Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series. San Francisco, CA: SPIE, 1996: 1272.
- [4] 张军挪, 王瑞林, 李永建, 等. 轻量化机枪的动态稳定性分析[J]. 兵工自动化, 2006, 25(6): 41-52.
- [5] 石亦平, 周玉蓉. ABAQUS 有限元分析实例详解[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 58-63.
- [6] 海伦, 白化同, 郭继忠. 模态分析理论与试验[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2001: 102-110.
- [7] Nedzad Imamovic. Model validation of large finite element model using test data[D]. London: University of London, 1998: 35-41.
- [8] 傅志方. 振动模态分析与参数辨识[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990: 67-82.
- [9] Stubbs N, Park S. Optimal sensor placement for mode shapes via Shannon's sampling theorem[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 1996, 11(6): 411-419.
- [10] 管迪华. 模态分析技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996: 87-94.
- [11] 胡海岩. 机械振动与冲击[M]. 北京: 航空工业出版社, 1998: 263-270.
- [12] 刘渊, 臧朝平, 刘忠华. 结构模态测试中悬挂位置优化配置的研究[C]. 杭州: 中国航空学会第十五届发动机结构强度、振动学术交流会, 2010: 80-93.
- *****
北京: 清华大学出版社, 2013: 170-177.
- [2] 李向荣, 赵海龙. 装甲战车防护技术研究[J]. 四川兵工学报, 2013, 34(5): 1-4.
- [3] 余成宝. 火炮系统模态测试与分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
- [4] 胡俊彪. 坦克发射动力学动态仿真研究[D]. 北京: 装甲兵工程学院兵器工程系, 2009.
- [5] 吴大林, 马吉胜, 黄泽平, 等. 某型履带式自行火炮直线行驶性能仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(2): 1008-1010.
- [6] 刘邦俊, 徐鹏飞, 张建国. 某型轮式火炮炮控系统的角位移测量技术[J]. 四川兵工学报, 2008, 29(6): 58-59.