

非均匀杂波环境 3D-STAP 方法研究

高 飞^{1,2}, 谢文冲², 王永良²

(1. 国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073; 2. 空军雷达学院重点实验室, 湖北武汉 430019)

摘 要: 传统二维空时自适应处理(2D-STAP)利用与待检测单元相邻单元的独立同分布杂波样本估计待检测单元的杂波特性. 而许多实际应用情况中(如前向阵), 杂波谱分布随距离(俯仰角)变化而变化, 杂波统计特性与距离(俯仰角)相关, 呈现非均匀性, 2D-STAP 方法性能严重下降. 本文首先对非正侧面阵配置所产生的与俯仰角相关的杂波分布规律进行了分析, 然后对 3D-STAP 方法能有效解决与俯仰角相关的杂波非均匀问题的本质机理进行了研究, 最后通过仿真实验从杂波抑制性能和运算量两个方面, 论证了非均匀杂波环境下 3D-STAP 方法的综合性能.

关键词: 3D; STAP; 非均匀杂波; 非正侧面阵

中图分类号: TN957.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2009)04-0868-05

Research on 3D-STAP Methods in Non-Stationary Clutter

GAO Fei^{1,2}, XIE Wen chong², WANG Yong liang²

(1. School of Electronic Science and Engineering, NUDT, Changsha, Hunan 410073, China;

2. Key Lab of Wuhan Radar Academy, Wuhan, Hubei 430019, China)

Abstract: The traditional 2 dimensional (2D) space time adaptive processing (STAP) estimates the clutter statistics at a range cell under test (CUT) from the training data (TD) at adjacent range cells, which submit to independent and identical distributing (IID). However, in some applications (e.g. forward looking arrays), the clutter spectrum distribution varies as the range (elevation angle) varies, i.e. the clutter statistics has a dependence on range, which is call non stationary clutter and will degrade the performance of 2D-STAP. This paper firstly analyzes the distribution regulation of the non stationary clutter caused by the non sidelooking planar array configurations, and then studies the essential reason why 3D-STAP can effectively settle the elevation dependent clutter non stationarity, and finally by computer simulations, demonstrates the integrated performance of 3D-STAP in the non stationary clutter environment from two aspects: the clutter suppression capability and the computational load.

Key words: 3 dimensional (3D); space time adaptive processing (STAP); non stationary clutter; non sidelooking arrays

1 引言

现代高技术战争发展的需求越来越倾向于提升对遮蔽战场环境, 如城市、丛林、山地等战场环境中各种车辆武器装备信息的探知能力, 针对这些战场环境的许多空中探测平台如地面动目标显示(GMTI)雷达、机载远程战场侦察雷达和机载火控雷达大都采用前向阵模式. 然而, 在前向阵的情况下要有有效的抑制杂波却是一个具有挑战性的问题, 特别是对近距离探测时这一问题更为棘手. 在非正侧视情况下, 各个距离单元的杂波统计特性与俯仰角(距离门位置)相关^[1,2], 这种杂波统计特性所导致的杂波非均匀性在近距离(大俯仰角)时更为严重. 这种非均匀性造成用被检测距离单元邻近单元杂波样本估计的杂波协方差矩阵不准确, 从而严重影响着 STAP 算法的性能. 要保证较好的 STAP 性能就需要对这些非均匀杂波进行补偿, 文献[3-6]分别对非正侧面阵

情况导致的杂波非均匀性的补偿问题进行了研究. 近年来, 平面阵俯仰维被引入到 STAP 算法中来, 进而产生了 3D-STAP. 国外有关 3D-STAP 的研究主要集中在针对空中动目标显示(AMTI)雷达和 GMTI 雷达在正侧面阵情况^[7-9]和前向阵情况^[10,11]的应用, 但这些文献均没有从本质上分析 3D-STAP 能有效解决与俯仰角相关的杂波非均匀问题的机理, 国内有关 3D-STAP 的研究还为见公开报道.

本文针对 GMTI 雷达非正侧面阵的情况, 通过与 2D-STAP 的比较, 对 3D-STAP 能有效解决与俯仰角相关的杂波非均匀问题的本质机理进行了研究, 分析了 3D-STAP 在克服非正侧面阵情况导致的杂波非均匀性方面的优势, 最后通过仿真分析验证了 3D-STAP 的性能优势, 并对有、无杂波非均匀补偿的 JDL 2D 和 JDL 3D 方法的运算量进行了分析比较. 从 JDL 3D 方法运算量的相对增加和性能提高来看, 在杂波非均匀环境下, 降维

3D-STAP 方法的综合性能要远优于 2D-STAP 方法。

2 与俯仰角相关的非均匀杂波分布规律分析

图 1 为一机载雷达前向阵的杂波几何模型, 其中 φ_1 、 θ_1 和 φ_2 、 θ_2 分别为不同杂波距离环中两个杂波散射体的俯仰角和与天线阵列水平轴向的方位夹角, θ_p 为天线安放角(天线阵列水平轴向与飞行速度矢量 V 的夹角, 此处为 -90°)。

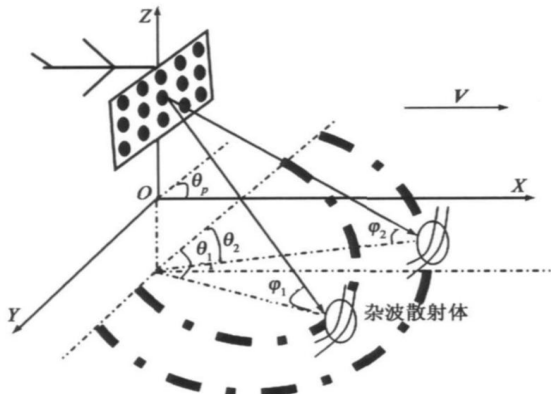


图1 机载雷达前向阵的杂波几何模型

在非正侧面阵情况, 杂波训练样本的非均匀性主要是因为杂波的多普勒频率 f_d 与方位向空间频率 v_{as} 的

关系随着俯仰向空间频率 v_{es} 的变化而变化, 而 v_{es} 的变化是和杂波到达向的俯仰角一一对应的。假设 \bar{f}_d 为杂波的归一化多普勒频率, 其与 v_{as} 和 v_{es} 的数学关系式为^[12]

$$\bar{f}_d = \frac{2V}{f_r d} \left[\cos \theta_p v_{as} - \sin \theta_p \sqrt{\frac{d^2}{\lambda^2} - v_{as}^2 - v_{es}^2} \right], v_{as}^2 + v_{es}^2 \leq \frac{d^2}{\lambda^2} \quad (1)$$

其中, V 为载机飞行速度, f_r 为发射脉冲重复频率, λ 为雷达工作波长, d 为阵元的行间距和列间距, θ_p 为天线阵面偏置角。图 2(a)(b)(c) 分别为杂波脊斜率为 1 时正侧面阵、斜侧面阵和前向阵的 3D 杂波分布。

从图 2 可以看出, 与正侧面的杂波分布不同, 非正侧面阵时不同的俯仰角对应的多普勒-方位向空间频率($\bar{f}_d - v_{as}$)平面上的杂波分布是不同的(非均匀的), 图中的投影线反映了不同距离单元(俯仰角)的杂波分布。理想的 STAP 二维滤波器的空时频响应应该在相应距离单元对应的投影线位置形成二维凹口, 所以对于非正侧面阵的情况, 不同距离单元对应的 STAP 滤波器也是不同的。2D-STAP 仅仅在 $\bar{f}_d - v_{as}$ 平面通过沿距离维学习形成自适应权值, 会受杂波非均匀的严重影响, 因此如果不对杂波的非均匀性进行补偿, 2D-STAP 无法实现对杂波的有效抑制。

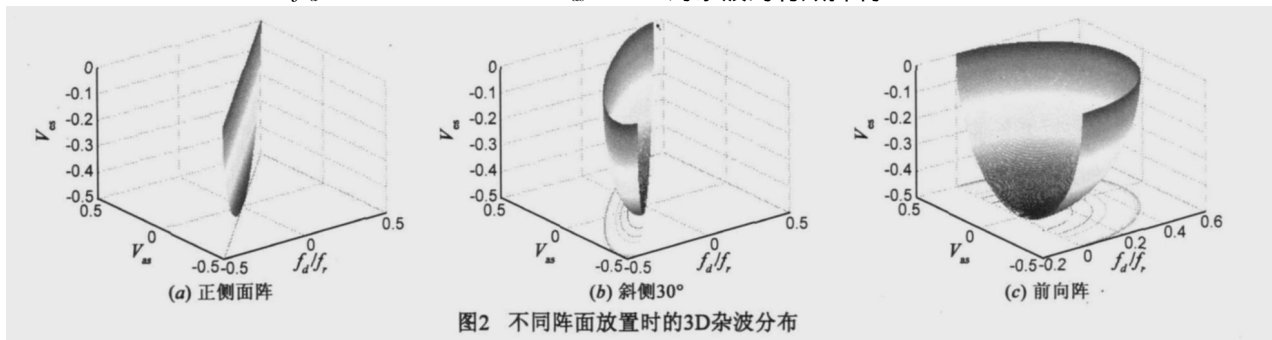


图2 不同阵面放置时的3D杂波分布

3 3D-STAP 抑制与俯仰角相关的非均匀杂波的本质分析

对于正侧面阵的情况, 2D-STAP 之所以可以达到较好的性能, 是因为杂波沿距离维的分布是均匀的, 通过沿距离维学习形成的自适应权可以准确地抑制被检测单元的杂波; 对于非正侧面阵的情况, 2D-STAP 如上节分析, 由于杂波样本的非均匀将导致所形成的自适应权不准确, 从而性能严重下降。从常规的统计 STAP 观点来看, 当杂波为非均匀时, STAP 系统自由度越大, 训练自适应权需要的杂波样本数越多, 训练样本匮乏的问题越严重, 因而 STAP 性能越差。然而在非正侧面情况的非均匀杂波中, 系统自由度明显多于 2D-STAP 的 3D-STAP 却能达到更好的性能, 其原因值得研究。

首先, 从抑制杂波的机理来看, 2D-STAP 只在 $\bar{f}_d - v_{as}$ 平面上进行学习, 形成 2D 自适应滤波器抑制杂波, 在非

正侧面阵情况下, 杂波在 $\bar{f}_d - v_{as}$ 平面上的分布是非均匀的, 无法在 $\bar{f}_d - v_{as}$ 平面上通过学习形成有效的自适应权; 而 3D-STAP 是在 $\bar{f}_d - v_{as} - v_{es}$ 空间中进行学习, 形成 3D 自适应权抑制杂波。2D-STAP 角度看来在 $\bar{f}_d - v_{as}$ 平面上各个距离门间非均匀的杂波, 从 3D-STAP 角度看来, 在 $\bar{f}_d - v_{es}$ 平面上的各个距离门间, 非均匀性发生了改变。以前向阵的情况为例, 如图 3 所示, 各个距离门杂波在 $\bar{f}_d - v_{as}$ 平面上的分布($\bar{f}_d - v_{as}$ 平面上的投影线)差别很大, 即非均匀性很强(尤其在近程, 即大俯仰角情况), 而在 $\bar{f}_d - v_{es}$ 平面上的分布($\bar{f}_d - v_{es}$ 平面上的投影线)差别要小得多, 即非均匀性要弱的多。从而在 2D-STAP 中难以有效抑制的与俯仰角相关的非均匀杂波, 在 3D-STAP 中可以通过沿距离维的学习在 $\bar{f}_d - v_{as}$ 平面联合 $\bar{f}_d - v_{es}$ 平面形成有效的三维自适应权将其抑制。其次, 从杂波信息利用的角度来理解, 2D-STAP 在估计杂波协方差矩阵时, 空域各个通道(合成的各个子阵水平放置)杂波数

据的相关计算只反映了方位向(或空间锥角)的杂波相位相关信息,因而在遇到需要利用俯仰向杂波相位相关信息的情况(如前向阵)时,其性能会有较大损失.而 3D-STAP 在估计杂波协方差矩阵时,同时可以利用方位向和俯仰向的杂波相位相关信息,因而在遇到需要利用俯仰向杂波相位相关信息的情况时性能要明显优于 2D-STAP.这一点其实在通过补偿方法(包括多普勒平移,波束-多普勒平移等)来消除各个距离门杂波样本非均匀的 2D-STAP 中得以体现,补偿的过程实际上就是在利用各个距离门杂波样本的俯仰向相位信息.

4 仿真实验

仿真中,载机速度 $V = 140\text{m/s}$,载机飞行高度 $H = 3500\text{m}$,平面阵采用 $M \times N = 8 \times 8$ 的矩形面阵,相干脉冲数 $K = 8$,雷达工作波长 $\lambda = 0.30\text{m}$,阵元行列间距 $d = \lambda/2$,发射脉冲重复频率 $f_r = 1860\text{Hz}$,接收机带宽 $B = 2.5\text{MHz}$,主波束指向方位角 $\theta_0 = 90^\circ$,俯仰角 $\varphi_0 = -28^\circ$,采样得到的距离门个数为 1286 ($3.52\text{km} \sim 80.62\text{km}$).文

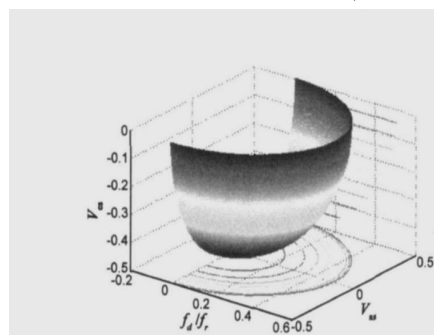


图3 前向阵时各个距离门杂波在不同平面上的分布

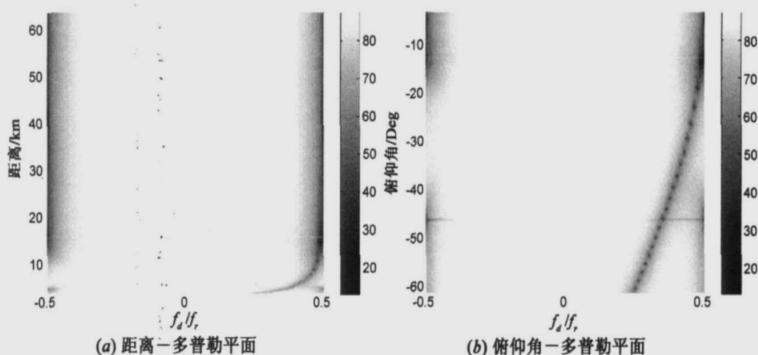


图4 2D/3D-STAP的AMF方法的改善因子

4.2 杂波协方差矩阵未知的情况

图 5(a) 和 (b) 分别为 AMF 方法下 2D-STAP 和 3D-STAP 在俯仰角-多普勒平面上的改善因子.从图中可以看出,在大俯仰角对应的主杂波区 2D-STAP 性能受杂波非均匀影响非常严重,改善因子凹口即宽且深,而 3D-STAP 在整个主杂波区的性能相对 2D-STAP 要好的多,其主杂波区要比 2D-STAP 性能提高了 40dB 左右. 3D-STAP 在解决因阵列非正侧放置而导致的杂波非均匀方面相对于现有的各种针对非均匀训练样本补偿的方法鲁棒性要强许多,因为后者在利用先验知识进行补偿时本身就会受到先验知识误差(惯导系统提供的参数不可避免存在误差)的影响. 3D-STAP 虽然相对运算量要大,但也可以结合各种降维方法降低运算量,在下面的仿真中我们将对其分析.

4.3 2D 和 3D-STAP 的几种降维方法比较

图 6(a)(b) 中分别给出了待检测距离门在 6.82Km (俯仰角为 -31.1°) 时,非均匀补偿和无补偿的 2D-STAP

中将以第 9~1009 个距离门 ($4\text{km} \sim 64\text{km}$) 作为待检测单元,分别考查 2D-STAP 和 3D-STAP 的性能,其中自适应匹配滤波(AMF)方法,局域联合处理(JDL)方法的训练样本数均按 RMB 准则确定.

4.1 杂波协方差矩阵已知情况

由于各个距离门(俯仰角)的杂波协方差矩阵是直接仿真产生,因此 2D-STAP 不会受杂波非均匀的影响,此时 2D-STAP 和 3D-STAP 性能相同,图 4(a) 和 (b) 分别为 AMF 方法下 2D/3D-STAP 在距离-多普勒和俯仰角-多普勒平面上的改善因子.其中,图 4(b) 中的两条水平线分别对应俯仰主瓣和两个第一副瓣交界的零陷位置,其对应图 4(a) 上距离分别为 15.9km 和 5.1km 的水平线,两图中的凹陷曲线反映了不同距离门(俯仰角)的主杂波的多普勒频率.对比两图可知,大俯仰角对应了极少数近程距离门,而小俯仰角却对应了绝大部分较远程及远程的距离门.因此可以看出在俯仰角-多普勒平面上更能反映杂波多普勒频率与其俯仰角的依赖关系.

方法性能比较,及 3D-STAP 和两种非均匀补偿下的 2D-STAP 方法性能比较,其中两种杂波非均匀补偿方法分别是 DW^[3] (Doppler Warping) 和 HODW^[13] (Higher Order Doppler Warping).

从图 6(a) 中可以看出, DW+2D-STAP 性能优于无补偿的 2D-STAP, HODW+2D-STAP 性能优于 DW+2D-STAP, 补偿的 AMF 2D 方法相对补偿前性能改善最明显,这是由于 AMF 2D 算法自由度最大,受杂波样本非均匀的影响,样本相对匮乏最严重,补偿后性能改善的空间最大.从图 6(b) 中可以看出, AMF 3D 方法和局部处理域为 $5 \times 5 \times 5$ 的 JDL 3D 方法性能均优于其他几种补偿的 2D-STAP 方法,其中局部处理域为 $5 \times 5 \times 5$ 的 JDL 3D 方法要比补偿后性能最好的 HODW+AMF 2D 方法在低速区高 5dB 以上.局部处理域为 $3 \times 3 \times 3$ 的 JDL 3D 方法与局部处理域为 3×3 的 DW+JDL 2D 方法和 HODW+JDL 2D 方法性能相当,这是由于算法自由度与杂波非均匀性这一矛盾相互作用的结果.如图 6(a) 所

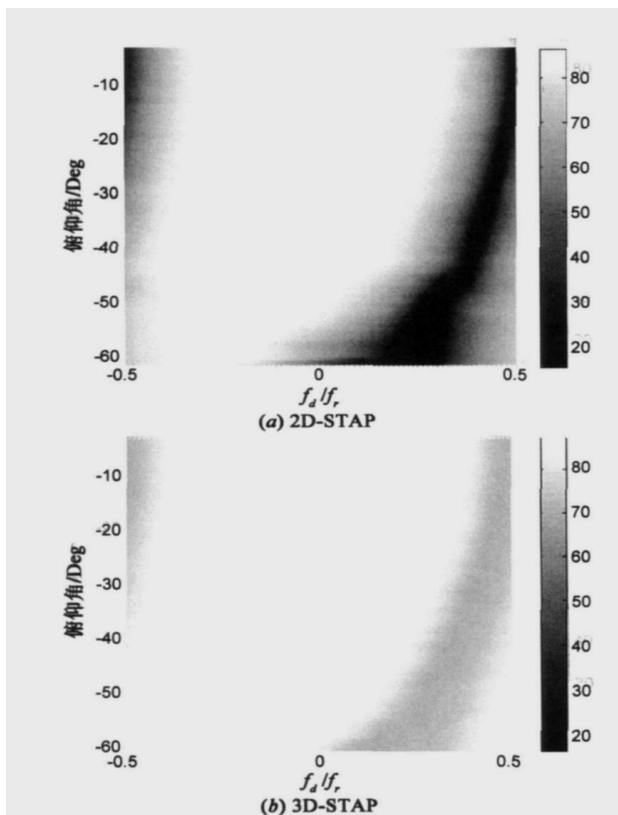


图5 2D和3D-STAP的AMF方法在俯仰角-多普勒平面上的改善因子

示, 对于没有俯仰维自适应能力的 2D-STAP 方法, 在与俯仰角相关的非均匀杂波环境中, 算法自由度越大的方法训练样本相对越匮乏, 性能损失也越严重, 而对 3D-STAP 而言, 从图 3 及第 3 节的分析可知, 从 $\bar{f}_d - v_{cs}$ 平面看杂波非均匀性只是减小了很多, 但仍然存在. AMF 3D 方法和局部处理域为 $5 \times 5 \times 5$ 的 JDL 3D 方法自由度(主要是俯仰维自由度)对 STAP 性能的贡献要明显强于样本引入的杂波非均匀对 STAP 性能的损失, 而局部处理域为 $3 \times 3 \times 3$ 的 JDL 方法自由度对 STAP 性能的贡献与样本引入的杂波非均匀对 STAP 性能的损失基本持平. 从而可以看出, 保持一定系统自由度的降维 3D-STAP 对与俯仰角相关的杂波非均匀性仍具有较好的鲁棒性.

4.4 2D 和 3D-STAP 降维方法的运算量比较

以 JDL 方法为例, 我们讨论处理 1 个距离门(包括 K 个多普勒通道)的总运算量(只考虑复数乘法). DW 方法补偿 1 个距离门样本的运算量为 NK , HODW 方法补偿 1 个距离门样本的运算量为 $NK + NK \log_2 N$. 值得指出的是, HODW 方法是在沿通道维进行一维 DFT 之后对每个空域频率对应的 K 个脉冲进行补偿, 之后再沿空域频率维进行一维逆 DFT 得到补偿后的距离门样本, 所以对于 HODW+JDL 2D 方法, 后续的二维 DFT 运算量可以省去, 只要在 HODW 方法对每个空域频率对

应的 K 个脉冲进行补偿之后, 直接沿脉冲维进行 DFT 即可. 这样 HODW+JDL 2D 方法补偿 1 个距离门样本的运算量为 $NK + \frac{NK}{2} \log_2(NK)$. 假设 JDL 2D 和 JDL 3D 方法的局部处理域分别为 $N_l \times K_l$ 和 $M_l \times N_l \times K_l$, 则对两种方法而言, DFT 的运算量分别为 $N \times K$ 的二维 DFT 运算量, 即 $\frac{NK}{4} \log_2 N \cdot \log_2 K$, 和 $M \times N \times K$ 的三维 DFT 运算量, 即 $\frac{MNK}{8} \log_2 M \cdot \log_2 N \cdot \log_2 K$; 估计 K 个多普勒通道的杂波协方差矩阵运算量(考虑杂波协方差矩阵的对称性)分别为 $K(NK_l)^2(1 + NK_l)$ 和 $K(M_l NK_l)^2(1 + M_l NK_l)$; K 个多普勒通道的杂波协方差矩阵求逆^[14]运算量分别为 $2K(NK_l)^3 - 2K(NK_l)^2 + KNK_l$ 和 $2K(M_l NK_l)^3 - 2K(M_l NK_l)^2 + KM_l NK_l$; K 个多普勒通道波束形成的运算量分别为 KNK_l 和 $KM_l NK_l$. 表 1 给出了 JDL 2D 和 JDL 3D 方法几种不同处理域的运算量比较.

从表 1 可以看出, 对脉冲数为 8, 矩形阵面行列数为 8×8 的情况, 虽然 JDL 2D(包含补偿的情况)和 JDL 3D 方法在表中所给的局部处理域中运算量相差 1~2 个数量级, 但若从 3D-STAP 对系统误差和与俯仰角相关的杂波非均匀性的鲁棒性强这一点来看, 这样的运算量增加和 2D-STAP 中通过各种补偿方法来保持性能所增加的运算量相比是很值得的.

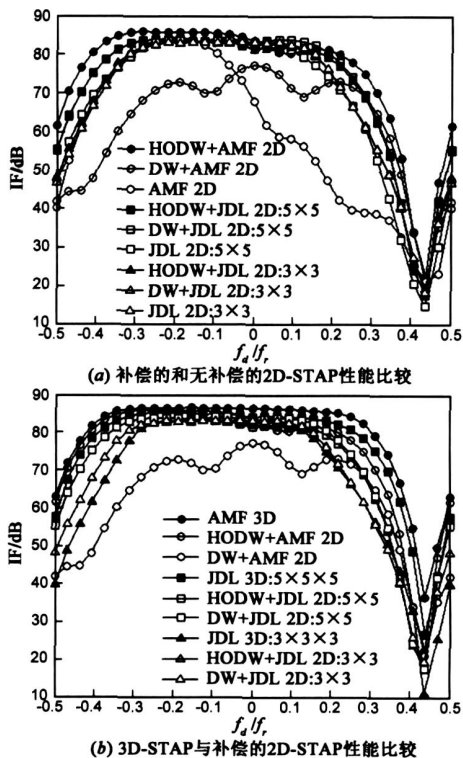


图6 3D-STAP与补偿的及无补偿的2D-STAP性能比较

表 1 JDL 2D 和 JDL 3D 方法几种不同处理域的运算量比较

方法	JDL 2D		DW+ JDL 2D		HODW+ JDL 2D		JDL 3D	
局部处理域	3×3	5×5	3×3	5×5	3×3	5×5	3×3×3	5×5×5
运算量	1.71×10^4	3.17×10^5	1.83×10^4	3.74×10^5	2.16×10^4	3.83×10^5	4.69×10^5	4.68×10^7

5 结论

经典 2D-STAP 算法将与俯仰角相关的非均匀杂波看作均匀杂波来处理造成了较大的性能损失,而现有的各种多普勒域、多普勒-波束域的补偿方法要利用一定的系统参数信息及校正源信息,因而在受到阵列误差影响的同时还会受到校正源误差的影响,其方法鲁棒性较差. 3D-STAP 将俯仰向自适应引入到了只作方位-多普勒维自适应的 2D-STAP 中,在 \bar{f}_d-v_{as} 平面和 \bar{f}_d-v_{es} 平面上联合抑制杂波,从 3D-STAP 角度来看,杂波非均匀性在 \bar{f}_d-v_{es} 平面大大减弱,从而可以较好的解决杂波非均匀性影响. 本文深入剖析了 3D-STAP 能有效解决与俯仰角相关的杂波非均匀问题的本质机理,并就前向阵的情况对有无杂波非均匀补偿的 2D-STAP 和 3D-STAP 的性能进行了仿真分析,验证了 3D-STAP 在克服非正侧面阵情况导致的杂波非均匀性方面相对 2D-STAP 的明显优势,最后,以 JDL 方法为例对二者的运算量进行了比较. 从比较结果可以来看出,从抑制杂波距离依赖性的角度来看,3D-STAP 方法虽然运算量较大,但是性能很好,权衡计算代价和性能改善,3D-STAP 方法是一种性能优良、鲁棒性强的机载雷达杂波抑制方法.

参考文献:

[1] Klemm R. Principles of Space Time Adaptive Processing[M]. London: The Institution of Electrical Engineers, 2002. 71- 75.

[2] Klemm R. Applications of SpaceTime Adaptive Processing [M]. London: The Institution of Electrical Engineers, 2004. 9 - 11.

[3] Borsari G K. Mitigting effects on STAP processing caused by an inclined array [A]. IEEE Proceedings of National Radar Conference[C]. Dallas, USA, 1998. 135- 140.

[4] Lapiere F D, Droogenbroeck M V, Verly J G. New methods for handing the range dependence of the clutter spectrum in nonr sidelooking monostatic STAP radars[A]. IEEE Proceedings of ICASSP[C]. Hongkong, China: IEEE, 2003. 73- 76.

[5] Zatman M. Circular array STAP[A]. IEEE Proceedings of National Radar Conference[C]. Boston, USA: IEEE, 1999. 108- 113.

[6] 谢文冲,王永良. 基于 CMT 技术的非正侧面阵机载雷达杂波抑制方法研究[J]. 电子学报, 2007, 35(3): 441- 444.

Xie Wenchong, Wang Yongliang. Study on clutter suppression approach to airborne phased radar with nonr sidelooking arrays based on CMT[J]. Acta Electronica Sinica. 2007, 35(3) : 441- 444. (in Chinese)

[7] Hale T B. Airborne Radar Interference Suppression Using Adaptive Three Dimensional Techniques[D]. School of Engineering and Management, Air Force Institute of Technology (AETC), 2950 P Street, Bldg 640, Wright Patterson AFB, OH 45433 7765, June 2002. AFIT/ DS/ ENG/ 02-02.

[8] Hale T, Temple M, Raquet J, et al. Localised three dimensional adaptive spatialtemporal processing for airborne radar[J]. IEE Proceeding of Radar, Sonar and Navigation, 2003, 150(1): 18 - 22.

[9] Fertig L B, Krich S I. Benefits of 3D-STAP for X-band GMTI airborne radars[A]. 2005 Adaptive Sensor Array Processing (ASAP) Workshop[C]. Lincoln Lab, MA, 2005.

[10] Caldwell J T. Forward looking radar: Interference modeling, characterization, and suppression[D]. school of Engineering and Management, Air Force Institute of Technology (AETC), 2950 Hobson Way, Bldg 640, Wright Patterson AFB, OH 45433 7765, March 2004. AFIT/ GE/ ENG/ 04-02.

[11] Caldwell J and Hale T. Space time adaptive processing for forward looking arrays[A]. Proc IEEE Proceedings of Radar Conference[C]. Wright Patterson AFB, OH, USA, 2004. 514 - 519.

[12] 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. 137- 138.

Wang Yongliang, Peng Yingning. Space Time Adaptive Processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000. 137- 138. (in Chinese)

[13] Himed B, Zhang Y, and Haijari A. STAP with angle Doppler compensation for bistatic airborne radars[A]. Proceedings of IEEE Radar Conference[C]. NY, USA, 2002. 311- 317.

[14] Tibor Mazúch, Jan Kozánek. New Recurrent Algorithm for a Matrix Inversion[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics. 2000.

作者简介:

高 飞 男, 1979 年生于陕西西安, 现于国防科技大学电子科学与工程学院攻读博士学位. 主要研究方向为空时自适应信号处理.

E mail: gaofei2004630@ 163. com

谢文冲 男, 1978 年生于山西万荣, 2006 年于国防科技大学信息与通信工程专业毕业, 获工学博士学位, 现于空军雷达学院从事科研与任教工作. 主要从事空时自适应信号处理和合成孔径雷达成像方面的研究. 已发表论文数篇.

王永良 男, 1965 年生于浙江嘉兴, 教授, 博士生导师. 获“中国优秀博士后”奖, 享受国务院政府特殊津贴. 入选“新世纪百千万人才工程”国家级人选, 已发表论文 200 多篇, 其中被 SCI、EI 和 ISTP 等国际三大检索收录 90 篇, 出版学术专著 2 部, 获国家发明二等奖一项, 省部级科技进步一等奖两项, 二、三等奖各一项, 主要研究领域为: 雷达信号处理、阵列信号处理和自适应信号处理等.