

一种机载 MIMO 雷达降维 STAP 快速算法

郝琳¹, 张永顺¹, 李哲¹, 许洁²

(1. 空军工程大学防空反导学院, 西安 710051; 2. 中国人民解放军 93617 部队, 北京 101400)

摘要: 针对机载 MIMO 雷达杂波抑制问题, 提出了一种降维 STAP 快速算法——F-JDL (Fast JDL) 算法, 即首先利用包含感兴趣观测角度形成的过完备基集合将空时数据准确映射到局域处理区域的角度-多普勒单元, 之后对于降维后的杂波协方差矩阵通过矩阵分块的方法进行求逆运算, 进一步提高处理速度。该方法充分结合 JDL 降维方法及矩阵求逆快速算法的优点。仿真结果表明, 该方法充分利用了 MIMO 雷达杂波自由度较大的优势, 同时大大降低了计算量和样本需求, 保证了高效的算法实时性, 具有较好的杂波抑制性能。

关键词: 机载 MIMO 雷达; 改进的 JDL 算法; 矩阵求逆; 快速算法

中图分类号: V249.32 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)07-0014-03

A Dimension-Reduced Rapid STAP Algorithm for Airborne MIMO Radar

HAO Lin¹, ZHANG Yong-shun¹, LI Zhe¹, XU Jie²

(1. College of Air and Missile Defense, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;

2. No. 93617 Unit of PLA, Beijing 101400, China)

Abstract: In order to solve the clutter suppression problem of MIMO radar, a rapid dimension-reduced STAP algorithm, Fast JDL (F-JDL) algorithm, is proposed. Firstly, the space-time data is reflected accurately to the angle-Doppler bins of localized processing region by employing an over-complete basis set, which is consisted of all the interested testing angles. Then the matrix block-inversion is used to dispose the clutter covariance matrix. This method combines the advantages of both the JDL dimension-reduced algorithm and matrix block-inversion. The simulation results show that: F-JDL algorithm makes full use of the advantage of MIMO radar of large DOF (Degree of Freedom), and significantly decreases the computational cost and training samples required, which presents better clutter suppression performance.

Key words: airborne MIMO radar; improved JDL algorithm; matrix inversion; fast algorithm

0 引言

机载雷达常处于下视工作状态, 受地面杂波的影响十分严重。地杂波分布范围广、强度大, 在一些地形复杂的环境中, 杂波强度可达 60~90 dB, 并且由于载机运动, 致使杂波谱大大展宽, 导致目标常淹没在杂波中, 雷达的目标检测能力受到严重影响。为解决上述问题, STAP (Space-time Adaptive Processing) 技术应运而生, 它可以有效提高机载雷达的杂波抑制能力^[1-2]。MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 雷达发射端的正

交分集可以产生大量的虚拟阵元, 增大系统自由度^[3-5], 这使得 MIMO 雷达在增强杂波与干扰抑制性能上具有极大潜力, 为 STAP 技术带来了新机遇。但随着自由度的提高, 计算量也随之增大, 为实时处理带来了困难。

自 20 世纪 70 年代 BRENNAN 等人提出 STAP 的概念以来, 针对 STAP 技术的研究主要围绕杂波协方差矩阵 \mathbf{R} 的求逆运算和估计两部分内容进行。 \mathbf{R} 的求逆运算问题即运算量问题, 高维矩阵 \mathbf{R} 求逆所需巨大的运算量导致 STAP 技术在实际工程中难以实现, 故需设计出各种运算量更小的 STAP 方法。国内外许多专家学者对降维降秩 STAP 进行了广泛而深入的研究。1994 年, 文献[6-7]提出的局域联合处理算法 (JDL) 是一种稳健的固定结构降维自适应算法, 但其

收稿日期: 2014-07-29 修回日期: 2014-09-01

基金项目: 国家自然科学基金(61372033)

作者简介: 郝琳(1989—), 女, 河北邯郸人, 硕士生, 研究方向为 MIMO 雷达空时自适应信号处理。

受系统误差的影响比较大;文献[8]提出一种基于空时导向矢量作为变换阵来实现降维的 JDL 方法,对于角度、多普勒单元间距无限制条件,可以获得更好的杂波抑制性能;文献[9]提出一种基于信号过完备理论的改进 JDL-STAP 算法,相比于经典的 DFT-JDL 算法具有更好的性能和稳健性。本文提出一种降维 STAP 快速算法——F-JDL 算法,使用改进的 JDL 方法级联矩阵分块求逆进行降维处理,进一步降低运算量,提高系统的实时处理能力。

1 F-JDL 降维 STAP 快速算法

1.1 机载 MIMO 雷达杂波模型

正侧面机载 MIMO 雷达阵列天线几何模型如图 1 所示。假设 MIMO 雷达载机以速度 V 沿 X 向正方向做匀速直线运动,载机高度为 H 。杂波散射单元方位角为 θ ,俯仰角为 φ 。假设在一次相干处理时间(CPI)内,载机移动距离远小于雷达与杂波间的斜距,即雷达与杂波源的相对几何关系近似不变。MIMO 雷达收发天线均为正侧面配置的均匀线阵,其中,发射阵元总数为 M ,间距为 d_T ,接收阵元总数为 N ,间距为 d_R ,收发间距比 $\alpha = d_T/d_R$,时间域相干处理脉冲数目为 K ,且 M 个发射波形相互正交。

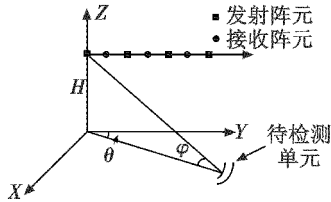


图 1 机载 MIMO 雷达系统模型

Fig. 1 The model of airborne MIMO radar system

用矢量形式表示杂波回波模型,定义发射矢量、接收矢量及时域导向矢量分别为

$$\begin{cases} \mathbf{S}_{st}(\omega_s) = (1, e^{j\omega_s(\theta, \varphi)\alpha}, \dots, e^{j\omega_s(\theta, \varphi)\alpha(M-1)})^T \in C^{M \times 1} \\ \mathbf{S}_{sr}(\omega_s) = (1, e^{j\omega_s(\theta, \varphi)}, \dots, e^{j\omega_s(\theta, \varphi)(N-1)})^T \in C^{N \times 1} \\ \mathbf{S}_T(\omega_t) = (1, e^{j\omega_t(\theta, \varphi)}, \dots, e^{j\omega_t(\theta, \varphi)(K-1)})^T \in C^{K \times 1} \end{cases} \quad (1)$$

式中, ω_s, ω_t 分别定义为空域角频率和域角频率,其值为

$$\begin{cases} \omega_s(\theta, \varphi) = 2\pi d_R \cos \theta \cos \varphi / \lambda \\ \omega_t(\theta, \varphi) = 4\pi V_r T \cos \theta \cos \varphi / \lambda \end{cases} \quad (2)$$

一个杂波点源的空时采样矢量经匹配滤波接收后,杂波接收数据可表示为^[8]

$$\mathbf{c}_i = \rho_i \mathbf{S}_T(\omega_t) \otimes \mathbf{S}_{st}(\omega_s) \otimes \mathbf{S}_{sr}(\omega_s) = \rho_i \mathbf{S}_{V,i}(\omega_s, \omega_t) \in C^{MNK \times 1} \quad (3)$$

式中, \otimes 为 kronecker 积, $\mathbf{S}_{V,i}(\omega_s, \omega_t) = \mathbf{S}_T(\omega_t) \otimes \mathbf{S}_{st}(\omega_s) \otimes \mathbf{S}_{sr}(\omega_s)$, 在该距离环上的总的杂波矢量可表示为

$$\mathbf{X} = \sum_{i=1}^{N_c} \rho_i \mathbf{S}_{V,i}(\omega_s, \omega_t) \in C^{MNK \times 1} \quad (4)$$

1.2 改进的 JDL 算法

二维线性调频 Z 变换(CZT)是局域范围内的一种变换,基于 T 的 JDL 方法利用 CZT 可同时实现数据域转换和降维,达到角度-多普勒域的细化过程。算法流程如下:首先利用空域、时域导向矢量做直积形成的矩阵来达到转换数据域和局域化的效果,而基于 DFT 的算法是利用傅里叶系数来实现数据域的转换然后再进行局域化的,而后的算法实现过程需要较多的限制条件,基于 T 的 JDL 算法对于角度、多普勒单元的间距都没有限制,具有更好的杂波抑制性能。

假设 P_t 表示空域发射单元数,则 $\mathbf{S}_{JDLs}(\omega_s)$ 由 P_t 列不同的空域发射导向矢量 $\mathbf{S}_{st}(\omega_s)$ 组成,维数为 $M \times P_t$; P_r 表示空域接收单元数,则 $\mathbf{S}_{JDLr}(\omega_s)$ 由 P_r 列不同的空域接收导向矢量 $\mathbf{S}_{sr}(\omega_s)$ 组成,维数为 $N \times P_r$; Q 表示时域局域单元数,则 $\mathbf{S}_{JDL}(\omega_t)$ 由 Q 列不同的时域导向矢量 $\mathbf{S}_T(\omega_t)$ 组成,维数为 $K \times Q$, 可得

$$\mathbf{T} = \mathbf{S}_{JDL}(\omega_t) \otimes \mathbf{S}_{JDLs}(\omega_s) \otimes \mathbf{S}_{JDLr}(\omega_s) \quad (5)$$

则矩阵 \mathbf{T} 的维数为 $MNK \times P_t P_r Q$, \mathbf{X} 为 $MNK \times 1$ 的空时二维数据矢量,降维过程就可以表示为

$$\tilde{\mathbf{X}} = \mathbf{T}^H \mathbf{X} \quad (6)$$

式中, $\tilde{\mathbf{X}}$ 的维数为 $P_t P_r Q \times 1$, 并且转换到了角度-多普勒域,同时实现了数据的转换和局域化的过程。

1.3 矩阵分块求逆算法

设 \mathbf{R} 是一个 N 阶的方阵,分块如下

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} (\mathbf{A}_{11})_{n \times n} & (\mathbf{A}_{12})_{n \times m} \\ (\mathbf{A}_{21})_{m \times n} & (\mathbf{A}_{22})_{m \times m} \end{pmatrix}_{N \times N} \quad (7)$$

设 \mathbf{R} 的逆矩阵分块如下

$$\mathbf{R}^{-1} = \begin{pmatrix} (\mathbf{B}_{11})_{n \times n} & (\mathbf{B}_{12})_{n \times m} \\ (\mathbf{B}_{21})_{m \times n} & (\mathbf{B}_{22})_{m \times m} \end{pmatrix}_{N \times N} \quad (8)$$

根据矩阵分块求逆的原理可以得到

$$\begin{cases} \mathbf{B}_{11} = (\mathbf{A}_{11} - \mathbf{A}_{12} \mathbf{A}_{22}^{-1} \mathbf{A}_{21})^{-1} \\ \mathbf{B}_{12} = -\mathbf{B}_{11} \mathbf{A}_{12} \mathbf{A}_{22}^{-1} \\ \mathbf{B}_{21} = -\mathbf{A}_{22}^{-1} \mathbf{A}_{21} \mathbf{B}_{11} \\ \mathbf{B}_{22} = \mathbf{A}_{22}^{-1} (\mathbf{I} - \mathbf{A}_{21} \mathbf{B}_{12}) \end{cases} \quad (9)$$

矩阵 \mathbf{R} 利用一次分块求逆的总运算量为 $T^{(1)}(N) = T(m) + T(n) + 6mn^2 + 8nm^2 - 5mn + 2m^3$ 。但经过一次分块求逆之后的运算量依然很高,可以继续对 $T(m)$ 和 $T(n)$ 进行分块求逆降低运算量,可以看出,经过若干次递归计算后, N 阶矩阵 \mathbf{R} 求逆的总运算量主要由 $6mn^2 + 8nm^2 + 2m^3$ 的部分决定。

1.4 F-JDL 算法描述

本文所提 F-JDL 算法即在利用改进的 JDL 算法进

行一次降维的基础上,对于降维后的杂波协方差矩阵通过矩阵分块进行求逆运算,大大降低运算量,提高了实时处理能力,其算法实现流程如图2所示。

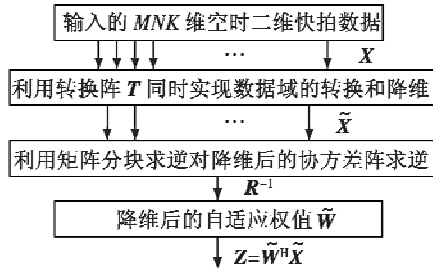


图2 F-JDL算法实现框图

Fig. 2 The realization block diagram of F-JDL

由图2可以看出,F-JDL算法主要由两部分组成,即首先利用1.2节中的改进的JDL算法实现数据域的降维与转换,进而利用1.3节的矩阵分块求逆方法对降维后的协方差矩阵进行求逆,第一步主要作用是降低运算量,第二步则可以提高运算速度。

2 仿真及性能分析

2.1 改善因子比较

为分析机载MIMO雷达的杂波分布特性,进行了大量的计算机仿真。模型参数选取为:发射阵元 $M=8$,接收阵元 $N=8$,时域采样脉冲 $K=16$,工作波长 $\lambda=0.23$ m,接收阵元间距 $d_r=\lambda/2$,收发阵元间距比 $\gamma=10$,载机速度 $V=140$ km/h,载机飞行高度 $H=8$ km,脉冲重复频率 $f=2438.8$ Hz,发射功率 $P=180$ kW,输入杂噪比 $R_{C,N}=60$ dB,发射全正交信号。

基于理想和非理想环境,在空域通道数为3、时域通道数为3的条件下,将本文的F-JDL方法与传统JDL方法以及JDL-MWF^[9]方法的改善因子进行了比较。非理想环境即同时存在阵元误差、通道误差、杂波起伏等误差因素的复杂环境。理想和理想条件下的改善因子比较分别见图3和图4。

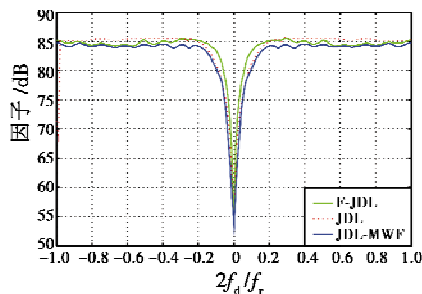


图3 理想条件下改善因子比较

Fig. 3 The space-time MV spectrum plot of airborne MIMO radar under ideal conditions

由图3、图4可以看出,F-JDL方法的性能和JDL方法接近,具有较好的主瓣杂波抑制能力,能在主瓣内

有效形成零点,并且在远离主杂波区能获得准最优性能,而JDL-MWF方法在主杂波区有所展宽,性能较前两者有差距。

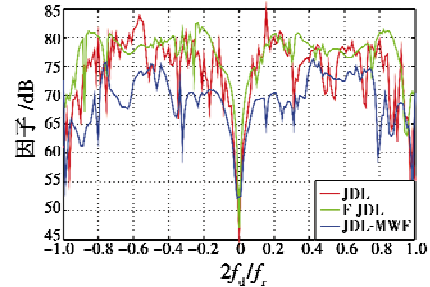


图4 非理想条件下改善因子比较

Fig. 4 The space-time MV spectrum plot of airborne MIMO radar under nonideal conditions

在误差条件下,3种方法的性能均有所下降,F-JDL方法性能下降5 dB左右,主杂波区没有出现明显展宽,JDL方法出现较大起伏,主杂波区出现展宽,JDL-MWF方法性能下降超过10 dB,主杂波区也出现了较大展宽。相较而言,无论是在理想条件下还是误差条件下,F-JDL方法均能达到准最优的性能,对于误差最不敏感,具有较好的抗误差能力。

2.2 运算量及时间复杂度分析

对于MIMO雷达来说,求取最优处理器的自适应权值需要估计 $(MNK \times MNK)$ 维的杂波协方差矩阵并对其进行求逆,根据RMB准则,要使处理引起的损失小于等于3 dB,估计杂波协方差矩阵至少需要 $2MNK$ 的样本数,这样,对杂波协方差矩阵进行求逆所需的运算量将达到 $(MNK)^2 + (MNK)^3$ 。采用文献[9]所提出的JDL算法,降维维数为 P_1P_1Q ,计算量可降至 $(P_1P_1Q)^2 + (P_1P_1Q)^3$ 。利用本文算法,在JDL降维处理后级联矩阵分块求逆,运算量可降至 $(P_1P_1Q/2)^3$,进一步实现了运算量的降低,实时性强。

实验使用Matlab7.6平台进行仿真,通过实际程序应用可以得到,在同样参数设置的条件下,本文所提F-JDL算法用时3.787 s,而文献[9]中的JDL算法用时6.271 s,显然F-JDL算法具有更优越的快速性和处理的实时性。

3 结束语

本文提出了一种降维STAP快速算法——F-JDL算法,充分结合JDL降维方法及矩阵求逆快速算法的优点,有效降低了运算量和样本需求。仿真结果表明,在理想条件下,该方法性能接近JDL全维分解性能,但运算量较之下降明显;误差条件下,F-JDL算法仍能保持准最优的杂波抑制能力,对于真实环境的适应性较

(下转第21页)

推断算法在准确性方面有明显改善,战略与战术混合航迹预测在中远程航迹预测方面优势明显。

参考文献

- [1] 张军. 空地协同的空域监视新技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2011. (ZHANG J. Air-ground collaborative air-space surveillance [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2011.)
- [2] RTCA SC-186. DO-282B minimum operational performance standards for Universal Access Transceiver (UAT) Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) [S]. Washington: RTCA, 2009.
- [3] BARHYDT R, WARREN A W. Development of intent information changes to revised minimum aviation system performance standards for automatic dependent surveillance broadcast (RTCA/DO-242A) [R]. Hanover: NASA, NASA/TM-2002-211669.
- [4] LIN X, ZHANG J, ZHU Y B, et al. Simulation study of algorithms for aircraft trajectory prediction based on ADS-B technology [C]//Asia Simulation Conference, 7th International Conference on System Simulation and Scientific Computing, IEEE, 2008:322-327.
- [5] KROZEL J, ANDRISANI D. Intent inference and strategic

path prediction [C]//AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, 2005:15-18.

- [6] 周波, 曹博, 唐鹏, 等. 基于 ADS-B 的新型跟踪监视算法 [J]. 电光与控制, 2014, 21(7):45-49. (ZHOU B, CAO B, TANG P, et al. A new algorithm for track monitoring based on ADS-B [J]. Electronics Optics & Control, 2014, 21(7):45-49.)
- [7] YEPES J L, HWANG I, ROTEA M. New algorithms for aircraft intent inference and trajectory prediction [J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2007, 30(2):370-382.
- [8] MUELLER K T, KROZEL J. Aircraft ADS-B intent verification based on a Kalman tracking filter [C]//AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, AIAA-2000-4067.
- [9] PRANDINI M, HU J, LYGEROS J, et al. A probabilistic approach to aircraft conflict detection [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2000, 1(4):199-220.
- [10] 沈笑云, 周波, 曹博, 等. 基于概率的低空自由飞行冲突检测算法 [J]. 电光与控制, 2014, 21(6):47-51. (SHEN X Y, ZHOU B, CAO B, et al. A free flight conflict detection algorithm of low-attitude airspace based on conflict probability [J]. Electronics Optics & Control, 2014, 21(6):47-51.)

(上接第 16 页)

强。综合表明,该算法具有较强的稳健性和可靠性。

参考文献

- [1] BRENNAN L E, REED I S. Theory of adaptive radar [J]. IEEE Transactions on AES, 1973, 9(2):237-252.
- [2] 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 Y L, PENG Y N. Space-time adaptive processing [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.)
- [3] FISHLER E, HAIMOVICH A, BLUM R, et al. MIMO radar: an idea whose time has come [C]//Proceedings of the IEEE Radar Conference, Philadelphia: IEEE, 2004:71-78.
- [4] FISHLER E, HAIMOVICH A, BLUM R, et al. Performance of MIMO radar systems: advantages of angular diversity [C]//The 38th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove: IEEE, 2004:305-309.
- [5] ROBEY F C, S. COUTTS S, WEIKLE D, et al. MIMO radar theory and experimental results [C]//The 38th Asilomar Conference on Signals, Systems, Computers, Pacific Grove: IEEE, 2004:300-304.

- [6] WANG H, CAI L S. On adaptive implementation of optimum MTI in severely nonhomogeneous environments [C]//International Radar Conference, Arlington: IEEE, 1990:351-355.
- [7] WANG H, ZHANG Y H, ZHANG Q. Lessons learned from recent STAP experiments [C]//Proceedings of the CIE International Conference of Radar Proceedings, Beijing: IEEE, 1996:761-765.
- [8] 周云, 汪学刚, 段锐. 一种机载预警雷达改进 JDL-STAP 算法 [J]. 电波科学学报, 2010, 25(6):1052-1056. (ZHOU Y, WANG X G, DUAN R. A modified JDL-STAP algorithm for airborne early-warning radar [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2010, 25(6):1052-1056.)
- [9] 张兰英, 陈祝明, 江朝抒, 等. 一种新的 JDL-STAP 算法的研究 [J]. 信号处理, 2009, 25(10):1612-1615. (ZHANG L Y, CHEN Z M, JIANG C S, et al. The study for a new kind of JDL-STAP algorithm [J]. Signal Processing, 2009, 25(10):1612-1615.)
- [10] 李晓明, 冯大政. 一种机载雷达两级降维空时二维自适应处理方法 [J]. 航空学报, 2008, 29(1):170-175. (LI X M, FENG D Z. A two-stage dimension-reduced STAP method for airborne radar [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(1):170-175.)