

基于 MTI 滤波器特性的改进直接数据域算法的研究

姜晓静¹ 吴仁彪¹ 卢晓光¹

摘要

传统的空时自适应处理方法属于统计方法,一般假设其它相邻距离单元的训练样本满足独立同分布的条件,利用这些训练本来估计待检测单元中杂波的协方差矩阵.对机载雷达来说,严重非均匀环境很难满足样本独立同分布的要求.直接数据域方法只利用待检测距离单元本身的数据来获取训练样本,因此得到广泛应用.提出一种改进直接数据域算法,在利用空时窗滑动对消目标信号时,基于滤波原理,对空时窗的权系数进行优化,这样有利于在对消目标的同时保留更多杂波信息,进而求解的自适应权值对杂波的抑制性能更佳.仿真结果表明了改进算法的有效性,相比原始直接数据域算法,具有更窄的改善因子凹口,提高了对慢速目标的检测性能,且计算量没有增加.

关键词

空时自适应处理;直接数据域;杂波抑制;非均匀环境;MTI 滤波器

中图分类号 TN957

文献标志码 A

收稿日期 2009-06-04

资助项目 国家自然科学基金(60736009)

作者简介

姜晓静,女,硕士,主要研究方向为空时自适应处理、阵列信号处理. jxjing123@163.com

0 引言

Introduction

雷达作为探测手段,在军事和民用领域都有广泛应用,且继续向深度和广度发展.为了获取更全面的信息,同时出于安全性考虑要求其机动灵活,将雷达安置于高空高速平台如飞机和卫星上已成为趋势.

对机载雷达来说,如何有效地从强杂波、干扰背景中检测微弱目标是很大的难题,而又是必须解决的问题.由于平台的运动,静止的地物杂波相对于雷达也是运动的,其多普勒谱严重展宽,杂波呈现出很强的空时耦合性,空时自适应处理(Space-Time Adaptive Processing, STAP)正是在这种情况下应运而生.

传统的 STAP 方法利用待检测距离单元相邻的距离单元(但不包含待检测距离单元本身)的数据作为训练本来估计杂波协方差矩阵^[1-2].但是对于剧烈变化的非均匀杂波环境,由于不同距离门的干扰样本具有不同的统计特性,如果所有其他距离门样本都不包含待检测样本中部分甚至全部干扰的信息,自适应算法就不会在待检测样本中将干扰有效抑制.

为了获得比较好的非均匀杂波的抑制能力,需要探索在很少训练样本甚至没有训练样本时的杂波抑制方法.自 Sarkar 提出直接数据域(Direct Data Domain, DDD)算法以来,DDD 算法在 STAP 中得到广泛应用^[3-4].与传统的 STAP 方法相比^[5],该方法根据一次快拍数据来计算自适应权矢量,不需要通过相邻距离门的辅助数据来估计样本协方差矩阵,因而适用于剧烈变化的非均匀环境.

本文提出了一种基于运动目标显示(Moving Target Indication, MTI)滤波原理的改进 DDD 方法.在 DDD 算法中,利用空时窗滑动进行目标对消的过程中,可以根据 MTI 对消原理,对空时窗权系数进行优化,保留更多杂波信息,进而获得的自适应权值具有更佳的杂波抑制性能.

1 DDD 空时自适应处理

Direct data domain STAP

为了克服统计 STAP 方法利用相邻距离单元数据做训练样本的问题,一种仅利用待检测距离门数据的 DDD 方法^[6-7]被提出并得到广

¹ 中国民航大学 天津市智能信号与图像处理重点实验室,天津,300300

泛应用. DDD 方法使用信号滤除算法以防止出现信号对消,即对待检测距离门的数据做信号滤除处理. 滤除处理后的样本仅包含干扰分量而不包含真实目标分量,可以用做训练样本.

设天线为 N 元等距线阵,阵元间距为 d ,且 $d = \lambda/2$ (λ 为工作波长),一个相干处理间隔内脉冲数为 K . 信号以窄带方式进入阵列天线,其包含目标信号、杂波、干扰和噪声.

将接收到的待检测距离单元数据写成 $K \times N$ 的矩阵 \mathbf{X} ,其元素 $\mathbf{X}(k, n)$ 表示待检测距离门第 k 个脉冲第 n 个阵元的采样数据.

$$\mathbf{X}(k, n) = \alpha \mathbf{S}(k, n) + \mathbf{X}_j(k, n) + \mathbf{X}_c(k, n) + \mathbf{X}_n(k, n), \quad (1)$$

其中: \mathbf{S} 为目标信号矩阵; α 为目标信号复振幅; \mathbf{X}_j , \mathbf{X}_c , \mathbf{X}_n 分别为干扰矩阵、杂波矩阵及噪声矩阵. 目标矩阵 \mathbf{S} 可表示为

$$\mathbf{S}(k, n) = \exp[j2\pi(n-1)d\cos\theta/\lambda + j2\pi(k-1)f_d/f_r]. \quad (2)$$

其中: θ 和 f_d 分别为目标信号的角度和多普勒频率; f_r 为脉冲重复频率.

设

$$z_1 = \exp(j2\pi d \cos\theta/\lambda)$$

表示到来的目标信号在相邻 2 个阵元之间的相位差,而

$$z_2 = \exp(j2\pi f_d/f_r)$$

表示到来的目标信号在相邻 2 个脉冲之间的相位差. 借助 z_1 和 z_2 ,用邻近的空域、时域或空时域样本通过

$$x_{11} - z_1^{-1}x_{12}, x_{11} - z_2^{-1}x_{21}$$

和

$$x_{11} - z_1^{-1}z_2^{-1}x_{22}$$

可以消去目标信号,仅仅剩余干扰信号. 对于二维的情况来说,可以用不同的方程在空域、时域或空时域对消信号. 下面的 3 个对消式分别在空域、时域、空时域对消掉信号.

$$\mathbf{X}(k, n) - z_1^{-1}\mathbf{X}(k, n+1), \quad (3)$$

$$\mathbf{X}(k, n) - z_2^{-1}\mathbf{X}(k+1, n), \quad (4)$$

$$\mathbf{X}(k, n) - z_1^{-1}z_2^{-1}\mathbf{X}(k+1, n+1). \quad (5)$$

根据一定准则选取合适的窗大小 (N_t 和 N_s , 其中 N_s 为窗的空间维数, N_t 为时域维数), 用该窗 ($N_t \times N_s$) 滑过接收数据. 计算时, 滑窗从矩阵 \mathbf{X} 的最左上角开始, 对滑窗每个位置分别执行对消式 (3)、(4) 及 (5), 即对滑窗内的元素进行相减, 然后

把得到的新矩阵重新排列成列矢量, 这样得到系统矩阵 \mathbf{T} 的 3 列元素, 然后滑窗向右移动一个位置, 得到另外 3 列元素, 当窗移动到最右边时, 向下移动一行, 并平移到最左边, 以此类推, 这样就可以形成足够多的列矢量. 例如, 利用对消式 (4) 构造系统矩阵 \mathbf{T} 的一列元素, 可得对消矩阵.

$$\begin{bmatrix} x_{11} - z_2^{-1}x_{21} & \cdots & x_{1N_s} - z_2^{-1}x_{2N_s} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{N_t1} - z_2^{-1}x_{(N_t+1)1} & \cdots & x_{N_tN_s} - z_2^{-1}x_{(N_t+1)N_s} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

将式 (6) 重新排列成列矢量可得

$$[\bar{x}_{11} \quad \bar{x}_{21} \quad \bar{x}_{N_s1} \quad \bar{x}_{12} \quad \cdots \quad \bar{x}_{N_t2} \quad \cdots \quad \bar{x}_{1N_t} \quad \cdots \quad \bar{x}_{N_tN_t}]^T. \quad (7)$$

为保证系统在目标信号方向的增益, 可以构造如下的约束列矢量

$$\begin{bmatrix} 1 & z_1 & \cdots & z_1^{N_s-1} & z_2 & z_1z_2 & \cdots & z_1^{N_s-1}z_2 \\ \cdots & \cdots & z_2^{N_t-1} & z_1z_2^{N_t-1} & \cdots & z_1^{N_s-1}z_2^{N_t-1} \end{bmatrix}^T. \quad (8)$$

把这些列矢量合成矩阵, 这样就构成系统矩阵 \mathbf{T} . 类似于常规 STAP 方法, 基于 DDD 的 STAP 方法的自适应权归结为求矩阵方程

$$\mathbf{w}^H \mathbf{T} = \mathbf{y}$$

的解, 其解将使得干扰最小, 其中 \mathbf{w} 为空时权值矢量. \mathbf{y} 的最后一个元素为其增益 c , 其它元素都设为 0, 即矩阵方程为

$$\mathbf{w}^H \mathbf{T} = \mathbf{y} = [0 \quad 0 \quad \cdots \quad c]. \quad (9)$$

对这个方程求解得到权向量, 在干扰方向进行空时零化, 同时对目标保持固有的增益.

2 改进算法研究

Study on modified approach

直接数据域 STAP 方法利用空时窗的滑动, 对消目标信号, 得到系统矩阵 \mathbf{T} . 通过解方程

$$\mathbf{w}^H \mathbf{T} = \mathbf{y}$$

求得权矢量, 抑制干扰的同时有效增强了目标信号. 但是由于平台的运动, 杂波频谱被展宽, 空时窗滑动对消目标的同时, 一定程度的杂波信息也被对消掉, 这不利于后续算法求自适应权矢量, 相应的, 杂波抑制能力也会有很大程度的下降. 因此, 本文提出了一种基于运动目标显示 (MTI) 滤波原理^[8] 的改进直接数据域方法.

2.1 MTI 滤波原理

雷达 MTI 技术的本质含义是基于回波多普勒信息的提取而区分运动目标与固定目标 (包括低速运动的杂波等). 因此, MTI 通常包括 2 个最基本的部

分,即完成多普勒信息提取的相参处理与完成目标区分的对消处理(有时又称滤波处理).其中对消处理是 MTI 的核心.

当固定目标、地杂波等与运动目标处于同一距离单元时,因固定目标回波中的多普勒频率为 0,慢速运动的杂波中所含的多普勒频移也集中在零频附近,它们的回波经相位检波后,输出信号的相位将不随时间变化或随时间作缓慢变化,反映在幅度上则为其幅度不随时间变化或随时间缓慢变化.相反,运动目标回波经相检输出后,因其相位随时间变化较大,反映在幅度上也是其幅度随时间变化较快.因此,若将同一距离单元在相邻重复周期内的相检输出作相减运算,则固定目标回波将被完全对消,慢速杂波也将得到很大程度衰减,只有运动目标回波得以保留.显然这样便可将固定目标、慢速杂波与运动目标区别开来. MTI 对消的基本原理如图 1.

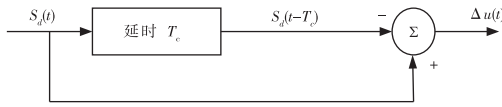


图 1 对消处理原理

Fig. 1 The framework of cancel dealing

在 MTI 雷达中,信号处理方框将完成对消器的功能,它是利用动目标回波和杂波在频谱上的区别,有效地抑制杂波而提取信号,因此它又称为杂波抑制滤波器.

如将这种思想延伸到直接数据域算法中,对机载雷达来说,接收信号包括有用信号、干扰(杂波、离散干扰、噪声),有用信号可根据空时导向矢量模型来表示,因此通过相邻项加权相减很容易可以滤除.利用 MTI 对消原理,对运动平台来说,干扰(主要是杂波)便对应于 MTI 中的运动目标的位置,经相邻项相减得以保留,为后续算法更好的抑制杂波,便需要保留更多的杂波信息,这就要求 MTI 滤波器的通带尽可能宽且平坦,这也是 MTI 运用到直接数据域算法中要解决的核心问题.

2.2 改进算法描述

研究基于滤波原理的改进直接数据域算法,可归结为寻找最优滤波器权系数使其滤波器通带尽可能宽且平坦的寻优问题.一次对消 MTI 滤波器的频率响应图为正弦形,不利于满足保留更多杂波信息的要求.采用二次对消 MTI 滤波器性能也不佳,考虑选用合适的二项式加权系数,设其差分方程为

$$y(n) = a_1x(n) + a_2x(n-1) + a_3x(n-2), \quad (10)$$

其中 a_1, a_2, a_3 为二项式加权系数.为保证有效滤除目标信号,则

$$a_1 + a_2 + a_3 = 0;$$

为了使寻优问题在相同准则下进行,还要增加一个约束公式

$$a_1 - a_2 + a_3 = 1.$$

通过上述 2 个公式,可以得到 a_2 的取值即

$$a_2 = -0.5.$$

在此条件下,还需保证滤波器通带面积最大,才能让通带尽可能宽且平坦.在这些约束准则下,便可找到一组数据

$$a_1 = 0.625, a_2 = -0.5, a_3 = -0.125,$$

经过仿真验证该二项式加权系数有较好的通带特性.

类似于对消式(3)、(4)及(5),可以得到如下新的对消式:

$$0.625\mathbf{X}(k, n) - 0.5z_1^{-1}\mathbf{X}(k, n+1) - 0.125z_1^{-2}\mathbf{X}(k, n+2). \quad (11)$$

$$0.625\mathbf{X}(k, n) - 0.5z_2^{-1}\mathbf{X}(k+1, n) - 0.125z_2^{-2}\mathbf{X}(k+2, n). \quad (12)$$

$$0.625\mathbf{X}(k, n) - 0.5z_1^{-1}z_2^{-1}\mathbf{X}(k+1, n+1) - 0.125z_1^{-2}z_2^{-2}\mathbf{X}(k+2, n+2). \quad (13)$$

利用对消式(11)、(12)及(13),空时窗滑过接收数据,得到新的系统矩阵 \mathbf{T}' ,同时 \mathbf{T}' 的最后一列为约束列,以保证在目标信号方向的增益.后续求自适应权矢量的过程同上述方程式(9).

图 2 为二项式权系数 1, -1 及 0.625, -0.5, -0.125 的傅里叶变换.从仿真图可以看出后者权系数滤波器特性相比前者有更宽更平坦的通带特性,这相当于在直接数据域算法的空时窗构造中进行了最优加窗处理,在保证有效滤除目标信号的同时,更多更好的保留了杂波信息,为后续算法求解提供了更多有用信息,使算法更有效.

3 仿真结果分析

Simulation results and analysis

用一个 16 个水平天线阵列,阵元间距为 $d = \lambda/2$,相干积累脉冲数为 32 的雷达来验证这种方法的性能.仿真数据包括杂波、白噪声和离散干扰.目标方位角为 90° ,杂噪比为 $\text{CNR} = 30 \text{ dB}$,另外一个 25 dB 的干扰源位于方位角 120° 处.

改善因子是输出信号杂波功率比和输入信号杂

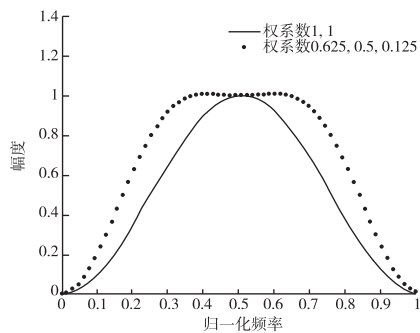


图2 不同二项式权系数滤波器特性比较

Fig. 2 Comparison of filter characteristics of different binomial weight coefficients

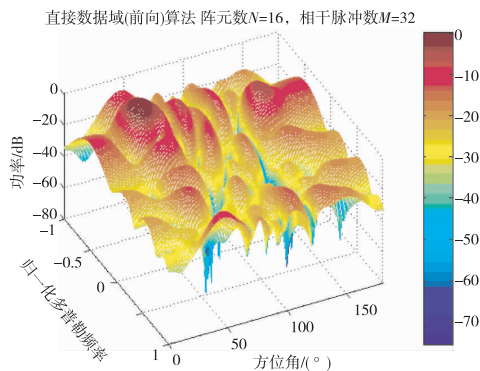


图4 直接数据域算法效果

Fig. 4 Performance of direct data domain approach

波功率比的比值,它是衡量 STAP 算法性能的 1 项重要指标. 如图 3 所示,为 2 种算法的改善因子,实验结果为 200 次蒙特卡罗实验的平均.

从图 3 可以看出,由于主杂波处于多普勒零频区,这 2 种方法在多普勒主杂波区的性能都是较差的(有性能凹口),说明主瓣杂波没有被彻底抑制. 通过比较可以发现,改进算法的性能凹口比较窄,这有利于检测慢速目标. 相比原始算法,改进算法提高了对慢速目标的检测能力.

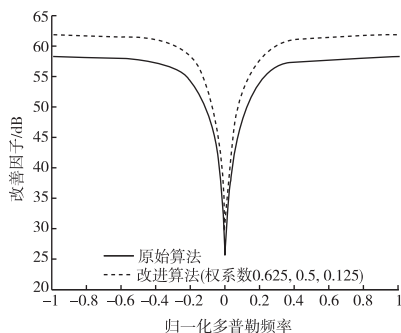


图3 改善因子性能比较

Fig. 3 Comparison of the improvement factor performance

从图 4 可以看出,经算法处理后,在杂波和干扰方向形成了凹陷,使其得到了有效抑制,同时目标部分凸显出来,使其得到了有效增强.

4 结论

Conclusion

本文提出了一种基于滤波原理的改进 DDD 算法,根据 MTI 滤波原理来构造空时滑动窗,对空时滑动窗的加权系数进行寻优,在对消目标的同时以保

留更多的杂波信息,进而求得的自适应权值对杂波的抑制性能更佳,同时相比原始 DDD 算法不会增加计算量. 仿真结果表明了改进算法的优越性,与原始直接数据域算法相比具有更窄的改善因子凹口,不仅没有增加计算量,而且提高了对慢速目标的检测性能.

参考文献

References

- [1] Banle E C, Fante R C, Torres J A. Some limitations on the effectiveness of airborne adaptive radar [C] // IEEE Trans, Aerosp. Electron. Syst, Oct. 1992; 1015-1032
- [2] Wang H, Cai L. On adaptive spatial-temporal processing for airborne surveillance radar systems [C] // IEEE Trans, Aerosp Electron Syst, 1994; 660-669
- [3] Carlo J T, Sarkar T K, Wicks M C. A least square multiple constraint direct data domain approach for STAP [C] // IEEE Radar Conference, 2003; 431-438
- [4] Choi W, Sarkar T K, Wang H, et al. Adaptive processing using real weights based on a direct data domain least squares approach [C] // IEEE Trans on Antennas and Propagation, 2006; 182-191
- [5] Burintramart S, Sarkar T K, Zhang Y, et. al. Performance comparison of statistical-based and direct data domain STAPs [M]. Digital Signal Processing, 2007; 737-755
- [6] 赵军, 朱兆达. 多约束实数权的直接数据域算法在空时自适应处理中的应用 [J]. 南京航空航天大学学报, 2006, 38 (6): 687-691
ZHAO Jun, ZHU Zhaoda. Application of direct data domain approach based on real weights of multiple constraints in space-time adaptive processing [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2006, 38 (6): 687-691
- [7] 邵尉, 钱祖平. 基于非线性共轭梯度法的唯相直接数据域算法 [J]. 系统仿真学报, 2007, 19 (16): 3657-3663
SHAO Wei, QIAN Zuping. Phased-only direct data domain algorithm based on nonlinear conjugate gradient method [J]. Journal of System Simulation, 2007, 19 (16): 3657-3663
- [8] 马晓岩, 向家彬. 雷达信号处理 [M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1999
MA Xiaoyan, XIANG Jiabin. Radar signal processing [M]. Changsha: Hunan Press of Science & Technology, 1999

Study on modified direct data domain STAP based on MTI filter characteristic

JIANG Xiaojing¹ WU Renbiao¹ LU Xiaoguang¹

¹ Tianjin Key Laboratory for Advanced Signal Processing, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300

Abstract Among most of the conventional space-time adaptive processing(STAP) approaches, statistical methods are used, by which data from adjoining range cells must be used to estimate the covariance matrix of the clutter in the cells to be examined and also it is presumed that these data samples are independent and identically distributed. However, this requirement is difficult to satisfy because of the highly inhomogeneous environments in the airborne radar application. For this reason, the direct data domain(DDD) STAP is widely applied, with only the primary data needed. In this paper, a modified version of DDD STAP is presented, which makes use of the sliding of space-time windows to cancel the target signals. Based on the filtering principle, the weighting coefficient of the space-time windows can be optimized, which is not only beneficial to target cancelling but can also preserve more information from clutter, making the performance of weak target detection become better. Simulated numerical experiments demonstrate the novel method is very effective and has a better performance than the original DDD STAP, and its computation load doesn't increase.

Key words space-time adaptive processing; direct data domain; clutter suppression; non-homogeneous environment, MTI filter