

基于非线性最小二乘的空中机动目标检测方法

李海* 吴仁彪 王小寒

(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)

摘要: 针对强杂波背景下的空中机动目标检测问题, 该文提出一种基于非线性最小二乘(Nonlinear Least Squares, NLS)的空中机动目标检测方法。该方法通过构造目标信号模型, 并利用NLS算法使其和杂波抑制后的数据具有最小的“平方和”距离来进行参数估计。该方法在脉冲点数有限的情况下, 依然能够获得很好的参数估计结果。仿真结果证明了该方法的有效性。

关键词: 机载雷达; 机动目标检测; 空时自适应处理(STAP); 非线性最小二乘(NLS)

中图分类号: TN959.73

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)09-2143-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.00220

Detection of Air Maneuvering Targets via Nonlinear Least Squares

Li Hai Wu Ren-biao Wang Xiao-han

(Tianjin Key Lab for Advanced Signal Processing, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: In this paper, a method based on Nonlinear Least Squares (NLS) is presented for detecting the maneuvering aerial targets with the strong clutter background. Firstly, the signal model of the target is constructed. Secondly, the data after clutter suppression is obtained. Then, the parameters of the targets can be estimated while using NLS through minimizing the sum of the squares of the distances between the former two. The method can provide an accurate estimate of the parameters even when the data sample is limited. The effectiveness of the method is verified via simulated data.

Key words: Airborne radar; Maneuvering target detection; Space-Time Adaptive Processing (STAP); Nonlinear Least Squares (NLS)

1 引言

以高空运动平台为载体的机载预警雷达的可视范围比地基雷达要大得多, 是现代战场上最重要的军事传感器之一。由于它处于下视工作状态, 面临着比地基雷达更复杂的地(海)杂波问题, 使得对目标的检测和参数估计变得十分困难。空时自适应处理(Space-Time Adaptive Processing, STAP)是一种有效的机载雷达地杂波抑制手段^[1,2], 传统的STAP方法都是假设在相干处理时间(Coherent Processing Interval, CPI)内目标回波多普勒频率恒定(即目标做匀速运动)。但是当目标进行变速、转弯等机动飞行时, 其在一个CPI内回波多普勒频率随时间发生变化, 即发生多普勒走动, 使得传统的STAP方法相参积累性能大大下降, 从而导致目标检测能力下降。

当机动目标做匀加速运动时目标回波信号为线性调频(Linear Frequency Modulation, LFM)信号^[3]。对LFM信号的检测与参数估计有最大似然估

计(Maximum Likelihood, ML)^[4]和时频分析^[5-7]等经典算法。其中ML估计是一种最有效的估计方法, 其估计精度很高, 对参数的估计方差接近于Cramer-Rao下界。但其运算量很大, 不利于该方法在实际中进行实时处理和工程实现。利用时频分析方法来估计机动目标参数时需要较多的采样点数, 因此该类方法在地基雷达和合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)中应用比较广泛(地基雷达和SAR发射脉冲数较多)^[3,8,9]。而当机载预警雷达的脉冲重复频率一定时, 较多的采样点数意味着CPI加长, 这会引入杂波和目标的距离走动, 给后续处理带来更大困难, 因此直接利用时频分析方法来检测空中机动目标会导致估计精度较差。

针对上述问题, 本文提出了一种基于NLS的机载雷达空中机动目标检测方法, 其核心思想是构造一个目标信号模型, 使其和杂波抑制后的数据具有最小的“平方和”距离。NLS方法可以直接应用在机载预警雷达平台上, 在脉冲点数有限的情况下, 依然能够获得很好的参数估计结果。该方法的步骤为首先对雷达回波数据进行杂波抑制, 然后利用快

2012-03-06 收到, 2012-05-21 改回

国家自然科学基金(61071194, 60979002)和中国民航大学基金(2011kyE06, ZXH 2009D018)资助课题

*通信作者: 李海 haili@cauc.edu.cn

速解线调法^[10]对目标的初始速度和加速度进行粗略, 确定参数的2维搜索范围, 最后在该范围内重构目标信号模型, 利用NLS算法构造代价函数, 搜索代价函数最小值对应的参数, 将其作为估计结果。

2 数据模型和问题描述

雷达接收的目标基带回波为

$$s_r(\hat{t}, t_m) = b_t \cdot p(\hat{t} - \tau) \cdot e^{-j2\pi f_c \tau} \\ = b_t \cdot p(\hat{t} - \tau) \cdot e^{-j2\pi f_c \frac{2R(t_m)}{c}} \quad (1)$$

其中 t_m 表示慢时间, \hat{t} 表示快时间, $p(\cdot)$ 为回波包络, f_c 为载波频率, b_t 为目标回波幅度, $\tau = 2R(t_m)/c$ 为回波延迟, $R(t_m)$ 为在慢时间 t_m 时目标与雷达的距离。本文假设目标做匀加速运动, 所以在慢时间 t_m 时目标距离雷达的距离为

$$R(t_m) = R_0 - vt_m - \frac{1}{2}at_m^2 \quad (2)$$

其中 $t_m = mT$, T 为发射脉冲重复周期, R_0 为目标在初始时刻与雷达平台的距离, v 为目标的初始速度, a 为目标的加速度。本文暂不考虑距离走动, 即动目标回波在一个 CPI 内处于同一个距离门, 则

$$p(\hat{t} - \tau) = p(\hat{t} - 2R_0/c) \quad (3)$$

将式(2)和式(3)代入式(1), 得

$$s_r(\hat{t}, t_m) = b_t \cdot p(\hat{t} - 2R_0/c) \cdot e^{-j2\pi f_c [2(R_0 - vt_m - (1/2)at_m^2)]/c} \\ = b_t \cdot p(\hat{t} - 2R_0/c) \cdot e^{-j2\pi f_c 2R_0/c} \cdot e^{j2\pi f_c 2vt_m/c} \\ \cdot e^{j\pi f_c 2at_m^2/c} = \tilde{b}_t \cdot e^{j2\pi f_c 2vt_m/c} \cdot e^{j\pi f_c 2at_m^2/c} \quad (4)$$

其中 $\tilde{b}_t = b_t \cdot p(\hat{t} - 2R_0/c) \cdot e^{-j2\pi f_c 2R_0/c}$, 由式(4)可得, 匀加速目标的多普勒频率为

$$f_d = \frac{2vf_c}{c} + \frac{2at_m f_c}{c} = \frac{2v}{\lambda} + \frac{2at_m}{\lambda} = f_{d0} + \frac{2at_m}{\lambda} \quad (5)$$

其中 λ 为雷达发射脉冲波长。式(5)右边第1项为目标初始速度产生的初始多普勒频率项, 第2项为目标加速度产生的多普勒调频项, 即多普勒走动。

下面给出当目标做匀加速运动时机载雷达接收到的数据形式。设机载平台上沿航向方向放置 N 元均匀线阵, 阵元间距为 $d = 0.5\lambda$, λ 为工作波长, 一个 CPI 内发射 K 个脉冲, x_{nk} 为第 n 个阵元在第 k 个脉冲上的复采样值, 则每一距离门上的接收数据可以写作一个 $N \times K$ 的矩阵如式(6)

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1K} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2K} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N1} & x_{N2} & \cdots & x_{NK} \end{bmatrix} \quad (6)$$

将式(6)中的数据矩阵 \mathbf{X} 按列排成一个 $NK \times 1$ 的列向量, 可记为 $\mathbf{x} = \text{vec}(\mathbf{X})$, 就形成了一个空时

快拍数据。假定单个距离门内最多存在一个目标, 待检测单元的空时快拍可写成

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_s + \mathbf{x}_c + \mathbf{x}_n \quad (7)$$

其中 \mathbf{x}_s , \mathbf{x}_c 和 \mathbf{x}_n 分别表示目标、杂波和噪声成分。 \mathbf{x}_s 可表示为如下形式:

$$\mathbf{x}_s = b_t \mathbf{a}(u_t, \omega_t) \quad (8)$$

其中 b_t 为目标回波幅度, $\mathbf{a}(u_t, \omega_t)$ 为目标空时导向矢量。

$$\mathbf{a}(u_t, \omega_t) = \mathbf{a}(\omega_t) \otimes \mathbf{a}(u_t) \quad (9)$$

其中 \otimes 表示 Kronecker 积, 空域导向矢量 $\mathbf{a}(u_t) = [1, e^{j2\pi \cdot 1 \cdot d \cos \psi_t / \lambda}, \dots, e^{j2\pi \cdot (N-1) \cdot d \cos \psi_t / \lambda}]^T$ 为 $N \times 1$ 维列向量, 时域导向矢量 $\mathbf{a}(\omega_t) = [1, e^{j2\pi \cdot 1 \cdot f_d / f_r}, \dots, e^{j2\pi \cdot (K-1) \cdot f_d / f_r}]^T$ 为 $K \times 1$ 维列向量, ψ_t 表示目标来向角, f_d 表示多普勒频率, $(\cdot)^T$ 表示转置运算, f_r 为脉冲重复频率 (Pulse Repetition Frequency, PRF)。

当目标存在多普勒走动时, 目标回波的多普勒发生了变化, 即匀加速目标的时域导向矢量为

$$\mathbf{a}(\omega_t) = \begin{bmatrix} 1 & e^{j\left[2\pi \cdot 1 \cdot \frac{f_{d0} + \pi \cdot 1 \cdot \frac{2a}{\lambda f_r^2}}{f_r}\right]} & \cdots & e^{j\left[2\pi \cdot (K-1) \cdot \frac{f_{d0} + \pi \cdot (K-1)^2 \cdot \frac{2a}{\lambda f_r^2}}{f_r}\right]} \end{bmatrix}^T \\ = \begin{bmatrix} 1 & e^{j\left[2\pi \cdot 1 \cdot \frac{2v}{\lambda f_r} + \pi \cdot 1 \cdot \frac{2a}{\lambda f_r^2}\right]} & \cdots & e^{j\left[2\pi \cdot (K-1) \cdot \frac{2v}{\lambda f_r} + \pi \cdot (K-1)^2 \cdot \frac{2a}{\lambda f_r^2}\right]} \end{bmatrix}^T \quad (10)$$

可见, 匀加速目标的时域导向矢量部分由两部分组成, 分别为目标初始多普勒频率项和调频率项, 即当目标做匀加速运动时, 目标的回波信号为 LFM 信号^[3]。

\mathbf{x}_c 表示杂波, 待检测单元的杂波数据是该距离环上所有杂波散射点的回波叠加而成的, 如图 1 所示, 因此杂波数据可表示为

$$\mathbf{x}_c = \sum_{i=1}^{N_c} b_{ci} \mathbf{a}(u_{ci}, \omega_{ci}) \quad (11)$$

其中 N_c 表示杂波散射点数目, b_{ci} 为第 i 个杂波散射

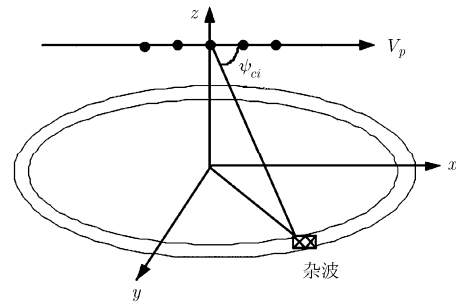


图1 雷达与杂波散射单元几何关系

点回波复幅度， $\mathbf{a}(u_{ci}, \omega_{ci})$ 为第*i*个杂波散射点空时导向矢量。其归一化空间频率和时间频率分别为 $u_{ci} = 2\pi d \cos \psi_{ci} / \lambda$ 和 $v_{ci} = 4\pi V_p \cos \psi_{ci} / \lambda f_r$ ， ψ_{ci} 为第*i*个杂波散射点与天线相位中心之间的夹角， V_p 为平台速度。

由杂波分布特性^[2]可知：杂波分布范围广，强度大，同时由于平台运动以及不同方位的地面散射体相对于平台的速度各异，从而使杂波谱大大扩展，呈现出很强的空时耦合特性，在很大程度上淹没了目标信号，严重影响了雷达对目标信号参数的估计性能。因此，本文的工作可归结为对强杂波背景下的LFM信号的检测和参数估计。

3 杂波抑制

本文利用子空间投影技术对雷达接收到的总回波数据进行杂波抑制^[2]，将待检测单元数据投影到杂波子空间的正交子空间中，得到投影后的无杂波数据。由第2节可知，杂波加噪声协方差矩阵为

$$\mathbf{R} = E\{(\mathbf{x}_c + \mathbf{x}_n)(\mathbf{x}_c + \mathbf{x}_n)^H\} = \mathbf{R}_c + \mathbf{R}_n \quad (12)$$

式中 \mathbf{R}_c 表示杂波协方差矩阵， \mathbf{R}_n 是噪声项协方差矩阵。对 \mathbf{R} 进行特征值分解，可以得到

$$\mathbf{R} = \sum_{m=1}^M \lambda_m \mathbf{u}_m \mathbf{u}_m^H \approx \sum_{m=1}^Q \lambda_m \mathbf{u}_m \mathbf{u}_m^H + \sigma_n^2 \sum_{m=Q+1}^M \mathbf{u}_m \mathbf{u}_m^H \quad (13)$$

其中 λ_m ($m = 1, \dots, Q$)为*Q*个大特征值，*Q*是杂波特征值数目，其余的*M* - *Q*个特征值相等，均为 σ_n^2 。 \mathbf{u}_m ($m = 1, \dots, Q$)是第*m*个大特征值对应的特征向量张成的杂波子空间，记为 $\mathbf{U}_C = \text{span}\{\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_Q\}$ 。则其正交补空间的投影矩阵为

$$\mathbf{P}_C^\perp = \mathbf{U}_C^\perp (\mathbf{U}_C^\perp)^H \quad (14)$$

通过上述推导可知，投影后的无杂波数据为

$$\mathbf{x}_{\text{proj}} = \mathbf{P}_C^\perp \mathbf{x} \quad (15)$$

由于通常 $\sigma_n^2 < \lambda_i$ ， $\lim_{m \rightarrow \infty} \sigma_n^2 \mathbf{R}^{-m} = \mathbf{P}_C^\perp$ ，而确定杂波子空间维数较复杂，所以我们用 \mathbf{R}^{-1} 代替 \mathbf{P}_C^\perp 抑制杂波^[11]，即

$$\mathbf{x}_{\text{proj}} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{x} \quad (16)$$

4 基于NLS的机动目标检测方法

在理想情况下，对雷达接收数据进行杂波抑制后的数据中只含有目标和噪声信号，此时可对杂波抑制后的数据进行目标的参数估计。由于机载预警雷达在一个CPI内发射的脉冲采样点数有限，因此直接利用时频分析方法来估计机动目标参数会产生估计精度较差的问题。针对此问题，本文提出了一种基于NLS的机动目标检测方法，其基本思想为构造一个目标信号模型，使其和杂波抑制后的数据具有最小的“平方和”距离。下面对该方法进行具体

介绍。

由第3节分析可知，杂波抑制后的数据还包括目标信号，因此，可以重构一个目标信号模型

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_z &= b_t \cdot \mathbf{a}(u_t, \omega_t) = b_t \cdot \mathbf{a}(\omega_t) \otimes \mathbf{a}(u_t) \\ &= b_t \cdot \left[1, e^{j\left(2\pi \cdot 1 \cdot \frac{2v'}{\lambda f_r} + \pi \cdot 1 \cdot \frac{2a'}{\lambda f_r^2}\right)}, \dots, e^{j\left(2\pi \cdot (K-1) \cdot \frac{2v'}{\lambda f_r} + \pi \cdot (K-1)^2 \cdot \frac{2a'}{\lambda f_r^2}\right)} \right]^T \\ &\quad \otimes \left[1, e^{\frac{j2\pi \cdot 1 \cdot d \cos \psi_t}{\lambda}}, \dots, e^{\frac{j2\pi \cdot (N-1) \cdot d \cos \psi_t}{\lambda}} \right]^T \end{aligned} \quad (17)$$

其中 b_t 为目标回波幅度，空域导向矢量

$$\mathbf{a}(u_t) = \left[1, e^{\frac{j2\pi \cdot 1 \cdot d \cos \psi_t}{\lambda}}, \dots, e^{\frac{j2\pi \cdot (N-1) \cdot d \cos \psi_t}{\lambda}} \right]^T$$

为 $N \times 1$ 维列向量，时域导向矢量

$$\mathbf{a}(\omega_t) = \left[1, e^{j\left(2\pi \cdot 1 \cdot \frac{2v'}{\lambda f_r} + \pi \cdot 1 \cdot \frac{2a'}{\lambda f_r^2}\right)}, \dots, e^{j\left(2\pi \cdot (K-1) \cdot \frac{2v'}{\lambda f_r} + \pi \cdot (K-1)^2 \cdot \frac{2a'}{\lambda f_r^2}\right)} \right]^T$$

为 $K \times 1$ 维列向量，其中包含目标的未知参数，分别为初始速度 v' 和加速度 a' 。

将其与杂波抑制后的数据相匹配，利用NLS方法^[12]来进行参数估计，构造代价函数

$$\begin{aligned} (\hat{v}, \hat{a}) &= \arg \min_{(v, a)} \left[\|\mathbf{x}_{\text{proj}} - \mathbf{x}_z\|^2 \right] \\ &= \arg \min_{(v, a)} \left[\|\mathbf{x}_{\text{proj}} - b_t \cdot \mathbf{a}(u_t, \omega_t)\|^2 \right] \end{aligned} \quad (18)$$

其中 \mathbf{x}_{proj} 为杂波抑制后的数据， \mathbf{x}_z 为重构后的目标信号，其中包含待估计的参数。上面代价函数取得最小值时所对应的参数，即为估计结果(证明过程略)，此时重构后的目标信号和杂波抑制后的数据 \mathbf{x}_{proj} 之间具有最小的“平方和”距离。

然而，利用式(18)进行参数估计时还需估计目标信号幅度 b_t ，为了避免对目标信号幅度的估计，可用简化算法来估计目标的初始速度和加速度，此时代价函数如式(19)所示。

$$\begin{aligned} (\hat{v}, \hat{a}) &= \arg \max_{(v, a)} \left\{ \mathbf{x}_{\text{proj}}^H \cdot \mathbf{a}(u_t, \omega_t) [\mathbf{a}(u_t, \omega_t)^H \right. \\ &\quad \left. \cdot \mathbf{a}(u_t, \omega_t)]^{-1} \cdot \mathbf{a}(u_t, \omega_t)^H \cdot \mathbf{x}_{\text{proj}} \right\} \end{aligned} \quad (19)$$

其中 $\mathbf{a}(u_t, \omega_t)$ 中包括目标的未知参数，见式(17)。代价函数式(19)取得最大值时所对应的参数即为估计结果(证明过程略)。

图2为基于NLS方法估计机动目标参数的实现框图。

具体步骤可描述如下：

步骤1 杂波抑制

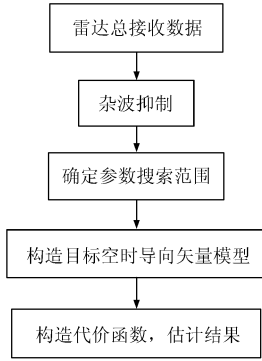


图2 本文方法实现框图

实际中杂波协方差矩阵由参考距离单元数据估计出 $\hat{\mathbf{R}}$ 。

$$\hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{N_{\text{sec}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{sec}}} \mathbf{x}_{\text{sec}}(i) \mathbf{x}_{\text{sec}}^{\text{H}}(i) \quad (20)$$

其中 N_{sec} 为邻近参考单元的个数, 一般取 2 至 3 倍的系统自由度, $\mathbf{x}_{\text{sec}}(i)$ 为第 i 个参考单元的空时快拍数据(即二次数据)。此时, 杂波抑制后的数据可以表示为

$$\hat{\mathbf{x}}_{\text{proj}} = \hat{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{x} \quad (21)$$

步骤2 估计目标初始速度和加速度, 确定参数搜索范围

为了降低本文算法的计算量, 首先对目标的初始速度和加速度进行粗估, 构成一个参数搜索范围, 为下一步精估做准备。由文献[10]可知, 快速解线调算法用一次自相关运算加两次正弦信号频率估计代替最大似然估计繁杂的2维搜索, 节省了运算量, 实现了LFM参数的快速估计。因此可以利用快速解线调法粗略地估计出目标信号的初始速度和加速度, 确定一个目标参数的2维搜索范围, 具体过程参考文献[10], 在此不再赘述。

步骤3 构造代价函数, 估计结果

构造目标信号的空时导向矢量

$$\hat{\mathbf{a}}(u_t, \omega_t) = \hat{\mathbf{a}}(\omega_t) \otimes \mathbf{a}(u_t) \quad (22)$$

$\mathbf{a}(u_t)$ 为空域导向矢量(假设目标方位已知), $\hat{\mathbf{a}}(\omega_t)$ 为目标的时域导向矢量

$$\hat{\mathbf{a}}(\omega_t) = \begin{bmatrix} 1, e^{j\left(2\pi \cdot 1 \cdot \frac{2v'}{\lambda f_r} + \pi \cdot 1 \cdot \frac{2a'}{\lambda f_r^2}\right)}, \dots, e^{j\left(2\pi \cdot (K-1) \cdot \frac{2v'}{\lambda f_r} + \pi \cdot (K-1)^2 \cdot \frac{2a'}{\lambda f_r^2}\right)} \end{bmatrix}^{\text{T}} \quad (23)$$

其中 (v', a') 为待估计参数。

此时NLS算法构造的代价函数如下所示:

$$(\hat{v}, \hat{a}) = \arg \max_{(v, a)} \left\{ \mathbf{x}_{\text{proj}}^{\text{H}} \cdot \hat{\mathbf{a}}(u_t, \omega_t) \cdot [\hat{\mathbf{a}}(u_t, \omega_t)^{\text{H}} \cdot \hat{\mathbf{a}}(u_t, \omega_t)]^{-1} \cdot \hat{\mathbf{a}}(u_t, \omega_t)^{\text{H}} \cdot \mathbf{x}_{\text{proj}} \right\} \quad (24)$$

利用NLS算法, 在步骤2中确定的参数搜索范围内求代价函数最大值(即误差最小值)对应的参数, 即为估计结果。

5 仿真分析

仿真参数设置: 天线阵为阵元数 $N = 16$ 的正侧视理想均匀线阵, 阵元间距 $d = 0.5 \lambda$ 。载机速度为 120 m/s, 雷达工作波长为 0.32 m, 平台高度为 10 km, 雷达距离分辨率为 20 m, 脉冲重复频率为 1500 Hz, 相干处理脉冲数 $K = 64$, 输入信噪比 SNR = 0 dB, 杂噪比 CNR = 50 dB。机动目标处于检测单元内, 处于方位角 90° 处, 初始速度为 $v = 24.01$ m/s, 加速度为 $a = 99.9$ m/s², 实验中假设目标方位已知。该实验中估计参数均方根误差均进行了200次蒙特卡罗实验。

图3所示为杂波抑制前的总回波功率谱, 由于信杂比很低, 信号完全被淹没在杂波中。图4为常规方法杂波抑制后的功率谱, 可以看出杂波虽然被抑制掉了, 目标突显出来, 但由于目标存在加速度, 其在多普勒域存在一定的展宽, 使后续的参数估计变得困难。图5为本文方法处理后的功率谱, 即利用估计结果对加速度项进行补偿, 此时能量在多普勒域重新聚集起来, 提高了目标检测能力和参数估计精度。

图6中的 ‘---’ 和 ‘—’ 分别为图4和图5中 $\cos \psi = 0$ (方位角 90°) 时的功率谱, 可以更加明显地看出加速度补偿前后能量积累的效果, 可见采用本文

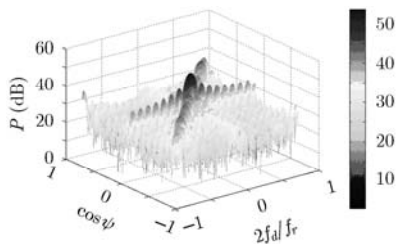


图3 总回波的功率谱

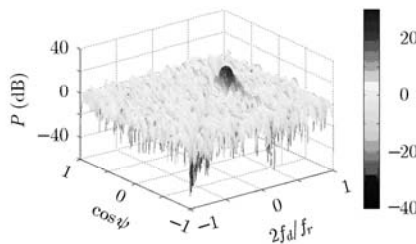


图4 常规方法杂波抑制后的功率谱

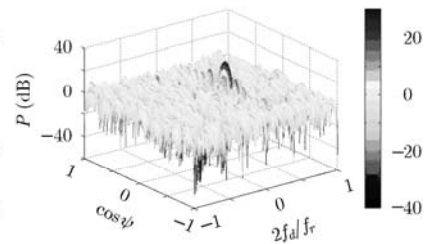


图5 本文方法处理后的功率谱

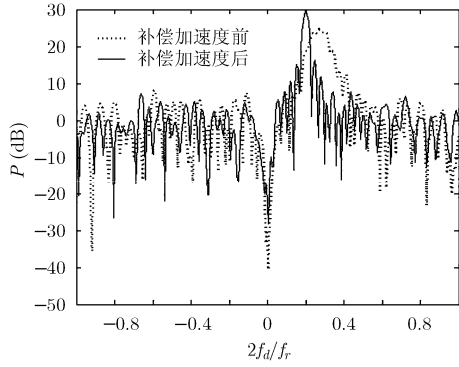


图6 对加速度项补偿前后功率谱图

方法后目标信号积累能量大大提高，有利于目标的检测。

表1为不同方法估计结果的均方根误差，可以看出，本文方法的参数估计结果精度最高。

图7为目标初始速度和加速度估计的均方根误差

表1 不同方法估计结果比较表

	RMSE _v (dB)	RMSE _a (dB)
单个阵元做FRFT变换估计结果	0.1323	16.7585
多阵元非相干积累估计结果	-3.1180	12.5140
本文方法估计结果	-6.7368	9.6089

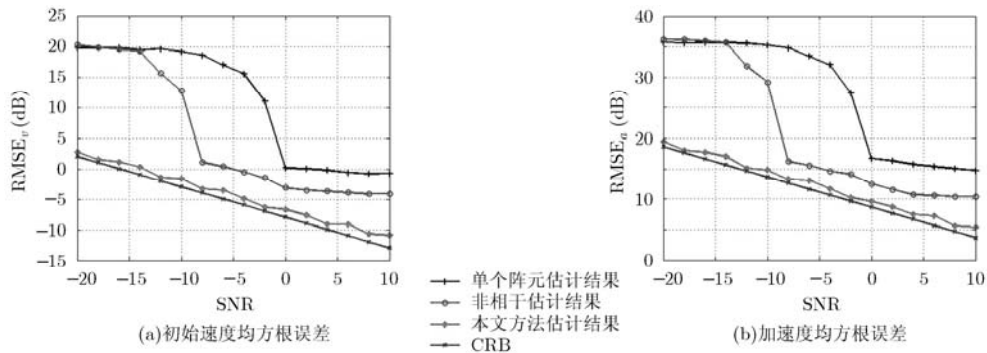


图7 参数均方根误差随信噪比变化曲线

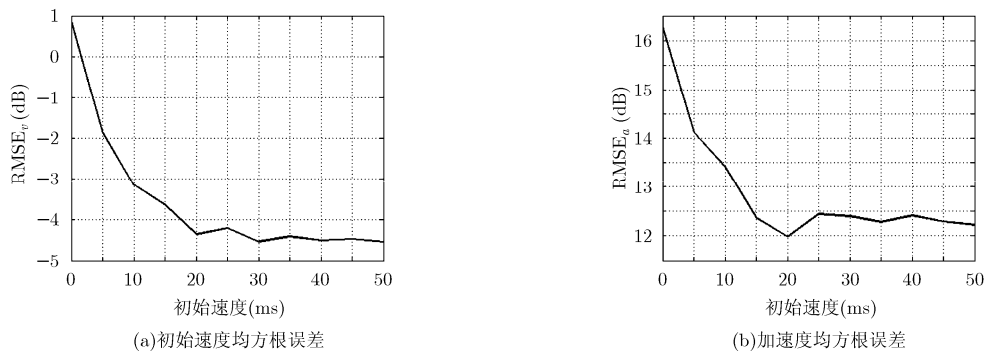


图8 参数均方根误差随初始速度变化的效果图

差随信噪比的变化情况，其中图7(a)为初始速度均方根误差随信噪比的变化图，图7(b)为加速度均方根误差随信噪比的变化图。通过比较可以看出本文方法的估计性能最接近CRB界，尤其在低信噪比的情况下，跟其他方法相比的优势更加明显。

下面我们考查当检测目标导引矢量靠近杂波时，投影矩阵对目标探测性能及估计精度的影响。图8(a)为初始速度的均方根误差随初始速度变化的曲线图，图8 (b)为加速度的均方根误差随初始速度变化的曲线图。由仿真结果可见，当目标初始速度较小时，目标靠近杂波脊，用投影矩阵消杂波后对目标产生的影响很大，此时估计误差较大；随着目标初始速度的增加，目标远离了杂波脊，消杂波后对目标的影响减小，使得估计误差越来越小，也就是说，参数估计均方根误差随目标初始速度的增大而减小。

6 结束语

本文提出了一种基于NLS的空中机动目标检测方法，该方法通过重构目标信号的空时导向矢量，并利用NLS算法构造代价函数，代价函数取得最大值时对应的参数作为目标参数的估计结果。采用快速解线调法和简化算法来降低本文算法的计算复杂度。文中最后通过仿真结果证明该方法的有效性。

参考文献

- [1] Klemm R. Principle of Space-Time Adaptive Processing[M]. 3rd Edition, UK, IET Publishers, 2006: 1-100.
- [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: 14-57.
Wang Yong-liang and Peng Ying-ning. Space-Time Adaptive Processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000: 14-57.
- [3] 刘建成. 加速运动目标检测及跟踪技术研究[D]. [博士论文], 国防科学技术大学, 2007.
Liu Jian-cheng. Study on accelerating target detection and tracking[D]. [Ph.D. dissertation], National University of Defense Technology, 2007.
- [4] Abatzoglou T J. Fast maximum likelihood joint estimation of frequency and frequency rate[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1986, AES-22(6): 708-715.
- [5] Rao P and Taylor F J. Estimation of instantaneous frequency using the discrete wigner distribution[J]. *Electronics Letters*, 1990, 26(4): 246-248.
- [6] 邵智超, 吴彦鸿, 贾鑫. 基于时频分析的 LFM 信号检测与参数估计[J]. 装备指挥技术学院学报, 2004, 15(2): 71-75.
Shao Zhi-chao, Wu Yan-hong, and Jia Xin. Detection and parameter estimation of LFM signal based on time-frequency analysis[J]. *Journal of the Academy of Equipment Command & Technology*, 2004, 15(2): 71-75.
- [7] 陶然, 邓兵, 王越. 分数阶傅里叶变换及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009: 12-49.
Tao Ran, Deng Bing, and Wang Yue. Fractional Fourier Transform and Its Applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009: 12-49.
- [8] 张伟, 童创明, 张群, 等. 基于时频分析的双通道 SAR 自旋目标检测[J]. 航空学报, 2011, 32(10): 1914-1923.
Zhang Wei, Tong Chuang-ming, Zhang Qun, et al. Rotating targets detection with dual-channel SAR based on time-frequency analysis[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2011, 32(10): 1914-1923.
- [9] 姜恒. 时频分析在雷达信号参数估计中的应用研究[D]. [硕士论文], 南京航空航天大学, 2011.
Jiang Heng. Research on parameter estimation of radar signals based on time-frequency distribution[D]. [Master dissertation], Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.
- [10] 王冬梅. 机载雷达空中机动目标检测[D]. [硕士论文], 中国民航大学, 2010.
Wang Dong-mei. Maneuvering target detection on the airborne radar[D]. [Master dissertation], Civil Aviation University of China, 2010.
- [11] Wu R B, Jia Q Q, and Li H. A novel STAP method for the detection of fast dim air moving targets[C]. IEEE International Conference on Signal Processing (ICSP 2010), Beijing, 2010: 2043-2047.
- [12] Petre Stoica, Randolph Moses, 吴仁彪, 等. 现代信号谱分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007: 121-125.
Petre Stoica, Randolph Moses, Wu Ren-biao, et al. Spectral Analysis of Signals[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007: 121-125.
- 李海: 男, 1976年生, 副教授, 博士, 目前研究方向为干涉合成孔径雷达信号处理和空时自适应信号处理.
- 吴仁彪: 男, 1966年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为自适应阵列信号处理、空时自适应处理等.
- 王小寒: 男, 1986年生, 硕士生, 研究方向为机载雷达空中机动目标检测算法研究.