

基于 Hankel 矩阵分解的天波超视距雷达机动目标检测算法

李会勇* 薛长飘 陈卓 胡进峰 姚冯
(电子科技大学电子工程学院 成都 611731)

摘要: 机动目标检测是天波超视距雷达的研究重点之一。目前已有的算法在高信噪比条件时对单个机动目标的检测效果较好,但在低信噪比时对多个机动目标的检测性能有待提高。该文提出一种基于 Hankel 矩阵分解的机动目标检测算法,该算法将机动目标信号构造为 Hankel 矩阵的形式,通过矩阵分解将信号时频估计转化为线性主成分分析的凸优化问题,从而实现匀速与机动目标的分离以及多个目标的同时估计。仿真结果证明了该算法具有估计精度高,信噪比条件低,可以同时多目标检测等优点。

关键词: 天波超视距雷达; Hankel 矩阵分解; 机动目标检测

中图分类号: TN958.93

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)03-0541-07

DOI: 10.11999/JEIT170511

Maneuvering Target Detection Algorithm Based on Hankel Matrix Decomposition in Over-the-horizon Radar

LI Huiyong XUE Changpiao CHEN Zhuo HU Jinfeng YAO Feng

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: Maneuvering target detection is one of the focuses in skywave Over-The-Horizon Radar (OTHR). The performance of existing algorithms is good for single maneuvering target in the condition of high SNR. However, the performance for multiple maneuvering targets in low SNR needs to be improved. In this paper, a new maneuvering target detection algorithm is proposed based on Hankel matrix decomposition. The maneuvering target signal is constructed in the form of Hankel matrix. Then the time-frequency estimation of maneuvering target signal is transformed into a convex optimization problem based on linear Principal Component Analysis (PCA) by matrix decomposition, so as to realize the separation of uniform and maneuvering targets, and the simultaneous estimation of multiple targets. The simulation results show that the proposed algorithm has the advantages of high estimation accuracy, low SNR and multiple target detection.

Key words: Over-The-Horizon Radar (OTHR); Hankel matrix decomposition; Maneuvering target detection

1 引言

天波超视距雷达(Over-The-Horizon Radar, OTHR)利用高频电磁波,经过电离层反射自上而下地进行传播,其目标探测距离最远可达 3500 km,具有重要的战术和战略意义。该雷达工作时相干积累时间较长,在检测导弹、飞机、火箭等机动目标时会使得多普勒频谱扩展,分散了目标的能量,影响

检测。此外,机动目标检测还可以通过对目标加速度的估计来识别不同类型的目标。因此,机动目标检测是天波超视距雷达的研究重点之一。

目前天波雷达机动目标检测方法主要有两大类:第 1 类是基于多项式相位建模的方法,其中典型的是 Kun Lu 等人^[1]提出的基于高阶模糊函数的方法,该方法通过高阶模糊函数求解多项式的各阶系数从而估计机动目标参数,具有计算量低的优点,然而该方法在求解高阶系数时需要较高的输入信噪比,且存在明显的误差积累效应;第 2 类是基于时频分析的方法,其中典型的是 Yasotharan 等人^[2-6]提出的基于 WVD 的方法,该方法具有参数估计精度高优点,然而当存在多目标时该方法会受到交叉项的干扰。

近年来,基于线性降维技术的主成分分析^[7-11](Principal Component Analysis, PCA)的子空间

收稿日期: 2017-05-26; 改回日期: 2017-10-26; 网络出版: 2017-11-23

*通信作者: 李会勇 hyli@uestc.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61671137, 61371184, 61301262), 国家自然科学基金(重点项目)(61731006), 四川省科技厅项目(2017GZ0344)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61671137, 61371184, 61301262), The National Natural Science Foundation of China (Key Program)(61731006), The Sichuan Provincial Department of Science and Technology Project (2017GZ0344)

模型在众多领域中得到广泛应用。由于稀疏矩阵对含有大稀疏噪声和野点的数据具有很好的鲁棒性,本文注意到天波雷达回波数据矩阵中的稀疏特性是相似的,提出了基于 Hankel 矩阵分解的机动目标检测方法。该方法首先将天波超视距雷达回波信号写为 Hankel 矩阵的形式,进而分解为一个低秩矩阵和一个稀疏矩阵和的形式,通过最优化核范数来实现回波矩阵的估计和恢复。该方法可以分离匀速与机动目标,实现多目标的同时探测。与传统算法相比,本文所提算法具有如下优点:(1)当回波中存在多个目标信号时,本文算法精度高,检测效果好;(2)本文算法可以直接分离未知目标个数的多个机动目标,并同时参数估计,而传统的算法如 HAF^[2]在估计多目标参数时,存在强目标对弱目标的遮蔽问题;(3)本文所提算法具有更低的信噪比条件。

2 机动目标检测问题分析

天波超视距雷达通常采用 LFM 信号,经过多个脉冲进行相干积累以提高目标的信噪比,在距离-多普勒维上对目标进行探测和参数估计等。经过匹配滤波后,天波雷达接收信号可表示成离散形式^[12]:

$$\mathbf{r}(n) = \mathbf{s}(n) + \mathbf{c}(n) + \mathbf{w}(n), \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

其中, N 为脉冲积累个数, $\mathbf{r}(n)$ 为接收信号, $\mathbf{s}(n)$ 为目标信号, $\mathbf{c}(n)$ 为杂波, $\mathbf{w}(n)$ 为高斯白噪声。

当目标为机动目标时,目标信号 $\mathbf{s}(n)$ 可以表示为

$$\mathbf{s}(n) = A \cdot \exp \left\{ j2\pi \left(\frac{2f_c}{c} \right) \left(R_0 + \sum_{k=1}^K \frac{v_k}{k!} (n\Delta T)^k \right) \right\} \quad (2)$$

其中, A 表示回波的幅度, f_c 为雷达载频, c 为光速, ΔT 为脉冲重复间隔, R_0 表示目标初始距离, K 表示目标的相位系数, v_1 是目标速度, v_2 是目标加速度, v_3 是目标的加速度变化率。天波雷达中,目标在一个相干积累周期内,加速度的变化一般很小,因此 v_3 及更高阶系数可以忽略,只需要估计 v_1 和 v_2 。由式(2)可以看出,可以通过估计目标回波信号的瞬时频率来获得目标的机动参数。

在一个相干积累周期 T_c 内,目标的多普勒展宽为

$$\Delta f_{\text{spread}} = \frac{2f_c}{c} \left(\sum_{k=2}^K \frac{v_k}{(k-1)!} T_c^{(k-1)} \right) \quad (3)$$

由式(3)可以看出,相干积累周期 T_c 越长,目标的加速度 v_2 和加速度变化率 v_3 越大,机动目标的多普勒展宽越严重,更加不利于机动目标的检测和运动参数估计。天波雷达中通常采用几秒甚至几十秒的长相干积累,因此天波雷达中更加需要通过估计目标的各阶运动参数来对回波进行多普勒补偿。

3 所提的机动目标检测算法

首先,将式(2)中的接收信号 $\mathbf{s}(n)$ 构成 $K \times L$ 维 Hankel 矩阵,表示为

$$\mathbf{H}_C(\mathbf{s}) = \begin{bmatrix} s(1) & s(2) & \cdots & s(L) \\ s(2) & s(3) & \cdots & s(L+1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s(K) & s(K+1) & \cdots & s(M) \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, $M = L + K - 1$ 。

由于天波雷达目标回波信号是由 r 个单频率信号构成,且 $r \ll \min(K, L)$,则 Hankel 矩阵 $\mathbf{H}_C(\mathbf{s})$ 的秩为 r ,且当 r 个信号为慢时变单频信号时,矩阵 $\mathbf{H}_C(\mathbf{s})$ 的秩近似为 r ,在实际情况中,如果电离的非线性相位调制较小,且目标的加速度较小时,式(4)中目标和杂波噪声信号构成的 Hankel 矩阵 $\mathbf{H}_C(\mathbf{s})$ 的秩近似为 3。在天波超视距雷达积累脉冲数 N 远远大于 3,比如 256,512 等,因此,总可以构造一个 Hankel 矩阵 $\mathbf{H}_C(\mathbf{u})$,使得它的秩远远小于矩阵的维数,为低秩矩阵,即

$$\text{rank}(\mathbf{H}_C(\mathbf{u})) \ll \min(K, L) \quad (5)$$

在雷达回波中,若存在多个目标,假设 $\mathbf{s}(n)$ 由 J 个匀速目标 $\mathbf{u}(n)$ 和 K 个机动目标 $\mathbf{i}(n)$ 组织成,即

$$\mathbf{s}(n) = \mathbf{u}(n) + \mathbf{i}(n) = \sum_J A_j \exp \left\{ j2\pi v_1 t \left(\frac{2f_c}{c} \right) \right\} + \sum_K A_k \exp \left\{ j2\pi \left(\frac{2f_c}{c} \right) \left(v_1 t + \sum_{k=1}^K \frac{v_k}{k!} (n\Delta T)^k \right) \right\} \quad (6)$$

式(6)中,右边第 1 项中,由于 v_1 是常数,因此匀速目标的回波信号是单频的正弦信号。当有一个匀速目标时,其回波信号的 Hankle 矩阵的阶数就是一阶。有几个匀速目标,则回波信号的 Hankle 矩阵就有几阶,因此匀速目标回波信号具有低秩特性。

式(6)中,右边第 2 项是机动目标回波信号,可以看出,对于 K 个机动目标来说,在某一瞬时,这 K 个机动目标只有 K 个瞬时频率,因此其 Hankle 矩阵具有稀疏特性。

将式(6)左右分别构造 Hankel 矩阵,写为

$$\mathbf{S} = \mathbf{U} + \mathbf{I} \quad (7)$$

其中, $\mathbf{S} = \mathbf{H}_C(\mathbf{s})$ 是目标信号的 Hankel 矩阵, $\mathbf{U} = \mathbf{H}_C(\mathbf{u})$ 是匀速目标的 Hankel 矩阵, $\mathbf{I} = \mathbf{H}_C(\mathbf{i})$ 是机动目标的 Hankel 矩阵。

至此,目标的估计问题即转化为匀速目标与机动目标的估计问题,由于矩阵 \mathbf{U} 的低秩性和矩阵 \mathbf{I} 的稀疏性,可通过线性最优化的方法求解 \mathbf{S} 在低维子空间上的投影。因此将其转化为基于无约束的 RPCA(Robust Principal Component Analysis)线

性凸优化问题^[13,14]，奇异值分解可以稳定高效地求解恢复两个矩阵，再通过时频分析得到两个矩阵的时频图，因此可以实现动静目标的分离与多个机动目标的同时探测，如式(8)所示：

$$\begin{cases} \min_{\mathbf{U}, \mathbf{I}} \|\mathbf{U}\|_* + \lambda \|\mathbf{I}\|_0 \\ \text{s.t. } \mathbf{S} = \mathbf{U} + \mathbf{I} \end{cases} \quad (8)$$

其中， $\|\cdot\|_*$ 表示矩阵的核范数，即奇异值之和， $\|\cdot\|_0$ 为矩阵的 ℓ_0 范数，即元素绝对值之和， $\lambda > 0$ 用来权衡稀疏和低秩性。

注意到对任意的 $p > 0$ ，总存在常数 C, s, k_0 ，使得当 \mathbf{U} 满足正交性时，若 $k > k_0$ ，且 \mathbf{U} 满足

$$\text{rank}(\mathbf{U}) \leq C \frac{k}{\lg k} \quad (9)$$

时，同时 \mathbf{I} 满足在某位置概率绝对值都小于 s 时， \mathbf{U} 能够被精确恢复的概率为 $1 - Ck^{-p}$ ，因此式(8)的估计问题在匀速目标矩阵 \mathbf{U} 的低秩性不理想时估计会不准确。由于矩阵的非零奇异值等于该矩阵的秩，因此可以用核范数来代替和逼近矩阵的秩，式(7)的问题可以进一步转化为

$$\begin{cases} \min_{\mathbf{U}, \mathbf{I}} \|\mathbf{U}\|_* + \lambda \|\mathbf{I}\|_1 \\ \text{s.t. } \mathbf{S} = \mathbf{U} + \mathbf{I} \end{cases} \quad (10)$$

通过式(10)，可以将天波超视距雷达目标回波信号分解为低秩的匀速目标与稀疏的机动目标，通过求解该基于奇异值分解的优化问题检测估计目标矩阵。下面将介绍一种可行的求解方法。

首先，构造增广拉格朗日函数如下：

$$\begin{aligned} L(\mathbf{U}, \mathbf{I}, \lambda) = & \|\mathbf{U}\|_* + \lambda \|\mathbf{I}\|_1 + \langle \mathbf{A}, \mathbf{U} + \mathbf{I} - \mathbf{S} \rangle \\ & + \frac{\beta}{2} \|\mathbf{U} + \mathbf{I} - \mathbf{S}\|_F^2 \end{aligned} \quad (11)$$

其中， \mathbf{A} 是拉格朗日算子， $\beta > 0$ 是惩罚因子， $\langle \mathbf{A}, \mathbf{B} \rangle$ 表示矩阵 \mathbf{A} 和矩阵 \mathbf{B} 的内积。

构造如式(12)所示的迭代算子：

$$\begin{cases} \mathbf{U}_{h+1} = \arg \min_{\mathbf{U}} \tilde{L}_U(\mathbf{U}, \mathbf{U}_h, \mathbf{I}_h, \mathbf{A}_h, \beta_h) \\ \mathbf{I}_{h+1} = \arg \min_{\mathbf{I}} \tilde{L}_I(\mathbf{U}_{h+1}, \mathbf{I}, \mathbf{I}_h, \mathbf{A}_h, \beta_h) \\ \mathbf{A}_{h+1} = \mathbf{A}_h + \beta_h (\mathbf{U}_{h+1} + \mathbf{I}_{h+1} - \mathbf{S}) \end{cases} \quad (12)$$

其中

$$\begin{cases} \tilde{L}_U = \|\mathbf{U}\|_* + \frac{\beta_h \eta_U}{2} \|\mathbf{U} - \mathbf{R}\|_F^2 \\ \tilde{L}_I = \lambda \|\mathbf{I}\|_1 + \frac{\beta_h \eta_U}{2} \|\mathbf{I} - \mathbf{W}\|_F^2 \\ \mathbf{R} = \mathbf{U}_h - (\beta_h \eta_U)^{-1} [\mathbf{A}_h + \beta_h (\mathbf{U}_h + \mathbf{I}_h - \mathbf{S})] \\ \mathbf{W} = \mathbf{I}_h - (\beta_h \eta_U)^{-1} [\mathbf{A}_h + \beta_h (\mathbf{U}_{h+1} + \mathbf{I}_{h+1} - \mathbf{S})] \end{cases} \quad (13)$$

通过线性迭代步骤求解式(13)的拉格朗日函

数，可以得到：

$$\begin{cases} \mathbf{G}_{\zeta_\varepsilon} [\sum] \mathbf{V}^T = \arg \min_{\mathbf{U}} \varepsilon \|\mathbf{U}\|_* + \frac{1}{2} \|\mathbf{U} - \mathbf{R}\|_F^2 \\ \zeta_\varepsilon [\mathbf{W}] = \arg \min_{\mathbf{I}} \varepsilon \|\mathbf{I}\|_1 + \frac{1}{2} \|\mathbf{I} - \mathbf{W}\|_F^2 \end{cases} \quad (14)$$

式(14)有闭合解为

$$\begin{cases} \mathbf{U}_{h+1} = \mathbf{G}_{\zeta_{\beta_h^{-1}}} [\sum] \mathbf{V}^T \\ \mathbf{I}_{h+1} = \zeta_{\beta_h^{-1} \lambda} [\mathbf{W}] \end{cases} \quad (15)$$

其中， $\mathbf{G}[\sum] \mathbf{V}^T$ 是矩阵 \mathbf{R} 的奇异值分解， $\zeta_\varepsilon |x|$ 是收缩算子，定义为

$$\zeta_\varepsilon |x| = \begin{cases} x - \varepsilon, & x > \varepsilon \\ x + \varepsilon, & x < -\varepsilon \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (16)$$

其中， $\varepsilon > 0$ 为一很小的正数。

4 仿真结果及分析

本节的仿真结果表明：本文算法能有效估计机动目标的加速度且精度较高；本文算法对信噪比的要求比传统的HAF^[2]算法低，且当信噪比足够高时，误差更小。

表1是天波超视距雷达仿真参数，来自于实际天波雷达的典型值，仿真的信噪比SNR定义为目标信号与噪声信号的功率比。表2是设置不同目标的仿真参数，该参数均是模拟天波超视距雷达实际应用中出现最多的目标。目标1是匀速目标，目标2和目标3是机动目标。

图1是基于表1中的雷达参数的天波超视距雷达回波匹配滤波后的信号频谱仿真图。从图中可以看到，位于多普勒频率约-12 Hz, 4 Hz, 22 Hz的地方形成了谱峰，分别对应3个目标。位于0 Hz处的

表1 雷达仿真参数

雷达工作频率 f_c (MHz)	10
脉冲重复周期 T (s)	0.12
采样点数 K	512
信噪比 SNR(dB)	0

表2 目标仿真参数

	距离(km)	速度(m/s)	加速度(m/s ²)	加速度变化率(10 ⁻² m/s ³)
目标1	351	0	0	0
目标2	432	79	3	-1
目标3	2102	-91	-4	5

目标是典型的匀速目标, 由于其没有加速度及以上的机动系数, 因此呈现出理想的单频谱峰。在天波雷达中, 位于 0 Hz 附近通常会出现较高的海杂波, 图 1 是仿真的去除海杂波之后的信号。位于 -12 Hz 和 4 Hz 的目标, 由于其相位有二阶及以上系数, 在傅里叶变换后的频带由较窄的频谱扩展变宽, 形成了有一定宽度的“山峰”, 给后续的信号处理与目标检测带来影响。图 2 是同样的雷达参数下, 将信噪比设置为 -10 dB, 目标加速度绝对值分别增加 5 m/s^2 后的频谱图。从图中可以看出, 噪声基底抬高, 目标的频谱相对于图 1 的展宽更加明显, 这给机动目标检测带来了巨大困难。

图 3 是本文算法机动目标频率成分的估计结果。图 3(a) 是本文算法中求解出的矩阵 $\mathbf{S} = \mathbf{U} + \mathbf{I}$ 的时频分布俯视图, 其 3 维图如图 3(b) 所示, 3 条坐标轴分别代表时间采样点数、频率采样点数和幅值。

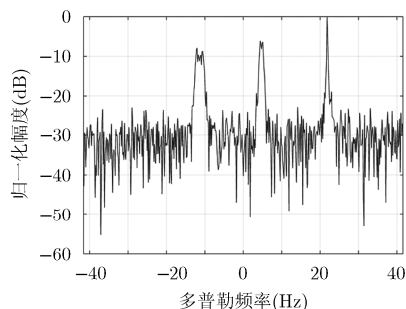


图 1 机动目标与匀速目标的频率-幅度图

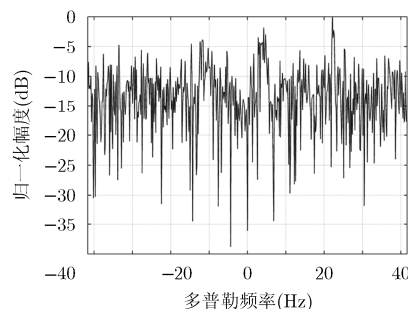
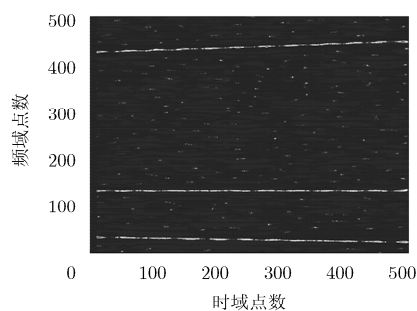
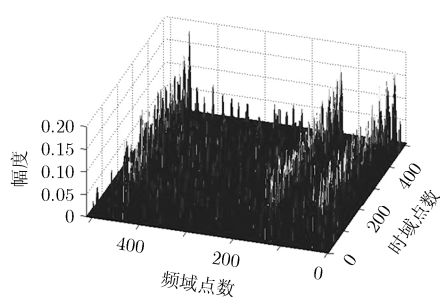


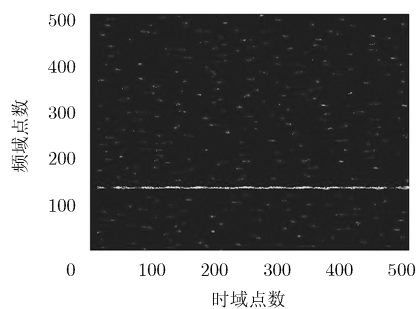
图 2 较难检测的机动目标的频率-幅度图



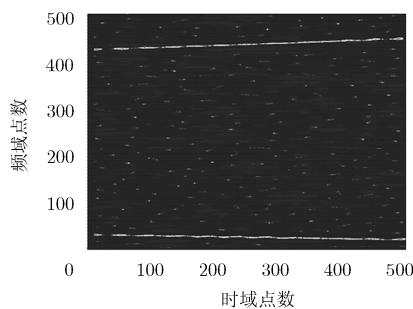
(a) 目标的时频分布



(b) 目标的时频分布3维立体图



(c) 匀速目标的时频分布



(d) 机动目标的时频分布

图 3 目标的时频分布图

仿真中采用了精确度更高的 LDAM 方法。可以看到 3 条横向的时频线, 分别代表 3 个目标。图中其他位置分布的若干小点, 是由杂波和噪声造成的, 可以看出它们相对目标较低。

Hankel 矩阵分解算法分离出低秩矩阵 \mathbf{U} 和稀疏矩阵 \mathbf{I} , 还原为时域矩阵后采用时频分析方法分别得到匀速目标的时频分布俯视图和机动目标的时频分布俯视图如图 3(c) 和图 3(d) 所示。可以看出, 图 3(c) 中的目标位于第 140 个频率单元附近, 它的斜率近似为零, 图 3(d) 中的两个目标分别存在一定的斜率。由于实际情况中目标的加速度变化率很小, 几乎可以忽略不计, 因此大多数目标频率分布都为近似直线。

图 4 是经过 Hough 变换后的目标纵坐标距离 Rho-幅值(Rho 为 Hough 变换后的图上的点到直线的最短距离)分布图。从图中可以看出, 来自不同时

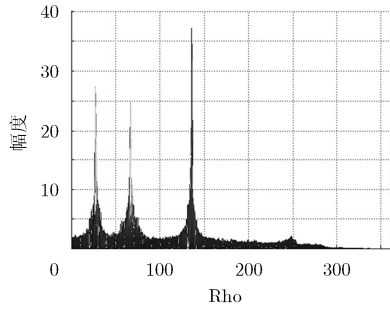


图4 Hough分布

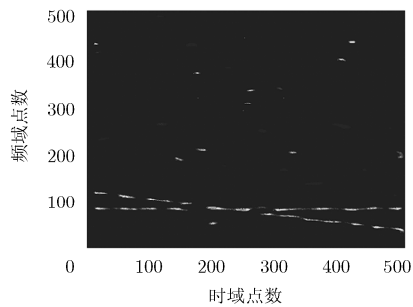
间点的信号叠加在一起，峰值都集中在 25,68,137 附近，经过计算后得到的目标加速度与仿真设置的目标参数是一致的。

进一步验证当机动目标和匀速目标在多普勒域上交叉时，Hankel 矩阵分解仍然成立。雷达仿真参数与表 1 相同，设置不同目标的仿真参数，如表 3 所示。

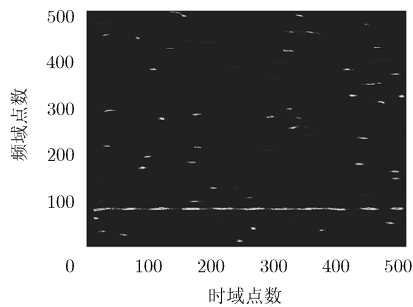
图 5 是含有一个机动目标与匀速目标情况下的时频图，机动目标与匀速目标构成的 Hankel 矩阵对应的时频分布如图 5(a)所示，匀速目标构成的

表 3 目标仿真参数

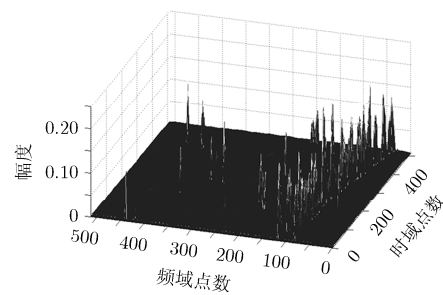
	距离(km)	速度(m/s)	加速度(m/s ²)	加速度变化率(10 ⁻² m/s ³)
目标 1	351	300	-40	2
目标 2	400	200	0	0



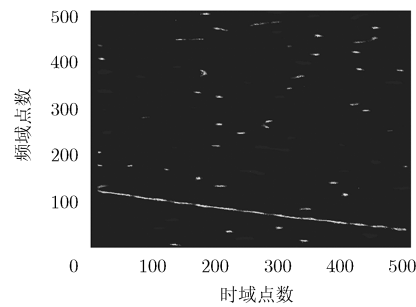
(a)目标的时频分布



(c)匀速目标的时频分布



(b)目标的时频分布3维立体图



(d)机动目标的时频分布

图 5 目标的时频分布图

Hankel 矩阵对应的时频分布如图 5(c)所示，机动目标构成的 Hankel 矩阵对应的时频分布如图 5(d)所示。由此可以看出，当机动目标和匀速目标在多普勒域上交叉时，目标回波信号的 Hankel 矩阵仍然可以写成机动目标的 Hankel 矩阵与匀速目标的 Hankel 矩阵的和的形式，即 Hankel 矩阵分解仍然成立。

下面将进一步验证本文所提算法的估计性能。同类文献中均采用了均方误差(Mean Square Error, MSE)随信噪比变化的曲线对机动目标检测算法的性能进行了对比^[15,16]。图 6 是本文算法与 HAF 算法的 MSE 曲线。从图中可以看出随着信噪比的提升，两种算法的 MSE 均减小，在同样的均方误差条件下，本文算法所需的信噪比比传统的 HAF 算法低 8 dB 左右。图中线“--o--”是目标的克拉美罗界(Cramér-Rao Bound, CRB)曲线，这与参数估计的 MSE 不可能低于 CRB 的理论是一致的。

图 7 是天波 OTH 雷达恒虚警检测概率随 SNR 变化的曲线。从图中可以看出，当信噪比为 -10 dB 时，本文算法的检测概率为 0.51，HAF 算法的检测概率仅为 0.22，当信噪比增加到 -5 dB 左右时，检测概率均有上升，本文算法的检测概率在相同信噪比条件下始终高于 HAF 算法，在信噪比足够大时检测概率已经逼近于 1.0。因此，在大多数实际的天波 OTH 雷达应用中，本文所提算法已能满足很高的检测概率要求。

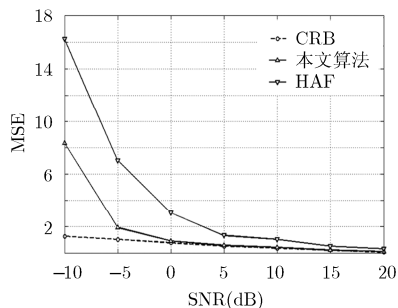


图6 MSE曲线

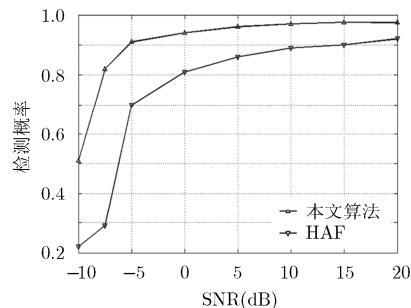


图7 检测概率曲线

5 结束语

本文针对天波超视距雷达机动目标检测问题,提出了一种基于 Hankel 矩阵分解的线性凸优化方法。该方法首先将天波雷达回波信号构建为 Hankel 矩阵,再利用 Hankel 矩阵的性质将其分解为雷达回波中的匀速目标与机动目标,构建鲁棒主成分线性优化模型,通过奇异值分解和时频估计实现目标检测。对于该优化问题的求解,仿真采用了 LADM (Lagrange Alternating Direction Method)方法,仿真结果表明,该算法能够实现匀速、机动目标的分离,多目标的同时探测,给天波雷达信号处理提供了参考。

参考文献

- [1] 胡勤振, 苏洪涛, 刘子威, 等. 配准误差下的多基地雷达目标检测算法[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(1): 88-94. doi: 10.11999/JEIT160207.
HU Qinzen, SU Hongtao, LIU Ziwei, *et al.* Target detection algorithm for multistatic radar with registration errors[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(1): 88-94. doi: 10.11999/JEIT160207.
- [2] LU K and LIU X. Enhanced visibility of maneuvering targets for high-frequency over-the-horizon radar[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2005, 53(1): 404-411.
- [3] YASOTHARAN A and THAYAPARAN T. Time-frequency method for detecting an accelerating target in sea clutter[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2006, 42(4): 1289-1310.
- [4] 胡进峰, 李万阁, 艾慧, 等. 基于改进时频分析方法的天波雷达机动目标检测算法研究[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(8): 1843-1848. doi: 10.11999/JEIT141485.
HU Jinfeng, LI Wange, AI Hui, *et al.* Maneuvering target detection algorithm based on improved time-frequency analysis method in skywave radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(8): 1843-1848. doi: 10.11999/JEIT141485.
- [5] 金术玲, 梁彦, 潘泉, 等. 一种天波超视距雷达分级 Hough 变换航迹起始方法[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(8): 1968-1972. doi: 10.3724/SP.J.1146.2006.02033.
JIN Shuling, LIANG Yan, PAN Quan, *et al.* A two-hierarchy Hough transform based track initiation method for sky-wave Over-the-Horizon radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(8): 1968-1972. doi: 10.3724/SP.J.1146.2006.02033.
- [6] CHEN X, GUAN J, LIU N, *et al.* Maneuvering target detection via radon-fractional Fourier transform-based long-time coherent integration[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2014, 62(4): 939-953. doi: 10.1109/TSP.2013.2297682.
- [7] LIN B, LIU J, XIE M, *et al.* Direction-of-arrival tracking via low-rank plus sparse matrix decomposition[J]. *IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters*, 2015, 14: 1302-1305.
- [8] 丁勇, 李楠. 基于高维度特征分析的非局部图像质量评价方法[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(9): 2365-2370. doi: 10.11999/JEIT151430.
DING Yong and LI Nan. Image quality assessment based on non-local high dimensional feature analysis[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(9): 2365-2370. doi: 10.11999/JEIT151430.
- [9] 邓云凯, 刘亚东, 行坤, 等. 一种结合时频分析与 Dechirp 技术提高运动目标参数估计精度的多通道方法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(1): 14-20. doi: 10.3724/SP.J.1146.2010.00153.
DENG Yunkai, LIU Yadong, XING Kun, *et al.* A high accurate method of estimating moving target's parameters using time-frequency analysis and dechirp technology with multi-channel[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(1): 14-20. doi: 10.3724/SP.J.1146.2010.00153.
- [10] CAO X, YANG L, and GUO X. Total variation regularized RPCA for irregularly moving object detection under dynamic background[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2016, 46(4): 1014-1027.
- [11] SCEALY J L, CARITAT P D, GRUNSKY E C, *et al.* Robust

- principal component analysis for power transformed compositional data[J]. *Journal of the American Statistical Association*, 2015, 110(509): 136-148.
- [12] LI X R and JILKOV V P. Survey of maneuvering target tracking. Part II: Motion models of ballistic and space targets[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2010, 46(1): 96-119.
- [13] SHEN Y, WEN Z, and ZHANG Y. Augmented Lagrangian alternating direction method for matrix separation based on low-rank factorization[J]. *Optimization Methods & Software*, 2014, 29(2): 239-263.
- [14] ZHANG L W, GE Y E, and LU Y. An alternating direction method for solving a class of inverse semi-definite quadratic programming problems[J]. *Journal of Industrial & Management Optimization*, 2016, 12(1): 317-336.
- [15] GUAN J, CHEN X L, HUANG Y, *et al*. Adaptive fractional Fourier transform-based detection algorithm for moving target in heavy sea clutter[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation Iet*, 2012, 6(5): 389-401.
- [16] 李彦兵, 张曦文, 李飞, 等. 一种大加速度机动目标微动参数估计方法[J]. *电子与信息学报*, 2017, 39(1): 82-87. doi: 10.11999/JEIT160261.
- LI Yanbing, ZHANG Xiwen, LI Fei, *et al*. Estimation of micro-motion feature for large accelerated target[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(1): 82-87. doi: 10.11999/JEIT160261.
- 李会勇: 男, 1975年生, 教授, 主要研究方向为阵列信号与自适应信号处理.
- 薛长飘: 男, 1991年生, 硕士生, 研究方向为超视距雷达信号处理.
- 陈卓: 女, 1994年生, 硕士生, 研究方向为超视距雷达信号处理.
- 胡进峰: 男, 1976年生, 教授, 主要研究方向为相控阵与自适应处理、超视距雷达信号处理、随机信号雷达.
- 姚冯: 男, 1992年生, 硕士生, 研究方向为超视距雷达信号处理.