

基于改进的 PASTd 多目标角度跟踪方法

燕飞, 范永玲

(中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471000)

摘要: 为实现移动目标的自动角度跟踪,提出了一种基于改进 PASTd 的面阵子空间多目标角度跟踪算法。首先利用改进的 PASTd 算法跟踪信号子空间,与其他子空间跟踪算法不同,该算法具有更快的收敛速度,同时确保得到的信号子空间单位化正交,避免了计算多维逆矩阵,降低了运算量;然后采用卡尔曼滤波获得当前多个目标的角度估计值,整个跟踪过程是自动的。不同于一维角度跟踪算法,该算法可以同时跟踪多个目标的方位角和俯仰角。仿真结果验证了该方法的有效性。

关键词: 多目标; 角度跟踪; 卡尔曼滤波; PASTd; MUSIC

中图分类号: TN953 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2016)01-0015-04

A Multi-target Angle Tracking Algorithm Based on Improved PASTd

YAN Fei, FAN Yong-ling

(China Airborne Missile Academy, Luoyang 471000, China)

Abstract: To implement automatic angle tracking of moving targets automatically, a new multi-target angle tracking algorithm is proposed based on PASTd and Kalman filter. The improved PASTd algorithm is used to track the signal subspace. Different from other signal subspace tracking algorithms, this algorithm has faster convergence speed and less calculation cost owing to the orthogonal signal subspace. Then, the angles of multiple targets can be predicted by using Kalman filter, with the tracking process executed automatically. Different from other one-dimensional tracking algorithms, this algorithm can track the elevation and azimuth of multiple targets simultaneously. Simulation results show the validity of the new algorithm.

Key words: multi-target; angle tracking; Kalman filter; PASTd; MUSIC

0 引言

移动目标的角度跟踪在雷达、声纳、通讯等许多领域都有着重要的应用。众多学者对角度跟踪算法进行了研究:从数据协方差矩阵中提取目标的角度信息,如 Sword 跟踪算法^[1]、在此基础上的改进 Sword 跟踪算法^[2]、基于 Kalman 滤波的 Sword 跟踪算法^[3]以及可跟踪大于阵元数目标的改进算法^[4-5]等,这类算法利用阵列协方差矩阵的变化得到角度信息;通过跟踪信号子空间提取角度信息^[6]。该算法需计算 N 次 $(2N+1) \times (2N+1)$ 维逆矩阵(N 为目标个数),计算量较大;文献^[7]利用 PAST算法^[8]跟踪信号子空间,利用信号导向矢量投影到信号子空间的误差为零的性质,更新角度信息,

但在计算投影矩阵的时候需要计算 $N \times N$ 维逆矩阵,计算量也比较大;文献^[9]中提出了一种新的初始化 $W(0)$ 的方法,利用预测角得到的预测目标导向矢量来初始化,使得在迭代次数较少时就可以跟踪到信号子空间,减少了计算的复杂度,但算法只可以进行一维角度的跟踪;在信号子空间跟踪方面,ABED-MERAIM 对 PAST 算法进行改进,提出了 OPAST 算法^[10],该算法的收敛性比 PAST 算法好,同时保证得到的信号子空间完全正交;文献^[11]在此基础上加以改进,提高了算法的收敛速度和数值稳定性,同时使算法估计得到的信号子空间单位化正交。

本文把改进的 PASTd 算法应用到多目标角度跟踪算法中,改进算法收敛速度更快,正交子空间降低了运算量;同时算法可以实现多个目标方位角和俯仰角的跟踪。

收稿日期:2014-11-24

修回日期:2015-11-20

作者简介:燕飞(1984—),女,河南许昌人,硕士,工程师,研究方向为阵列信号处理。

1 信号模型

假设有 P 个窄带信号入射到均匀面阵,阵列形式为 $M \times N$,如图 1 所示,假设阵元为全向天线。

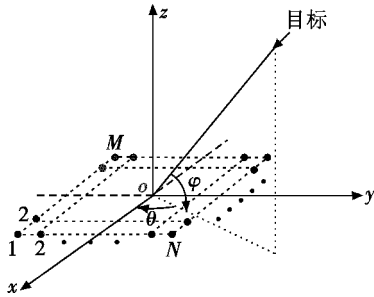


图 1 阵列模型

Fig. 1 The planar array

在 t 时刻阵列的输出为

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{A}(t)\mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t) \quad (1)$$

式中: $\mathbf{A}(t) = [\mathbf{a}(\theta_1(t), \varphi_1(t)) \quad \mathbf{a}(\theta_2(t), \varphi_2(t)) \quad \cdots \quad \mathbf{a}(\theta_p(t), \varphi_p(t))]$, $\theta_n(t), \varphi_n(t)$ 分别为 t 时刻第 n 个目标的方位角和俯仰角; $\mathbf{s}(t) = [s_1(t) \quad s_2(t) \quad \cdots \quad s_p(t)]^T$, $s_n(t)$ 为第 n 个信号; $\mathbf{n}(t) = [n_1(t) \quad n_2(t) \quad \cdots \quad n_{M \times N}(t)]^T$, $n_m(t)$ 为第 m 个阵元的噪声,噪声是均值为零、方差为 σ^2 、互不相关的高斯白噪声,且与信号不相关。 $\mathbf{a}(\theta_n(t), \varphi_n(t))$ 为各个信号的导向矢量,表达式为

$$\mathbf{a}(\theta_n(t), \varphi_n(t)) =$$

$$[e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(r_1 \cdot \mathbf{v})} \quad e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(r_2 \cdot \mathbf{v})} \quad \cdots \quad e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(r_{M \times N} \cdot \mathbf{v})}]^T \quad (2)$$

式中: λ 为波长; \mathbf{r}_m 为第 m 个阵元在 xoy 平面中的坐标; $\mathbf{v} = [\cos \theta_n(t) \cos \varphi_n(t), \sin \theta_n(t) \cos \varphi_n(t)]$ 。

2 角度跟踪

MUSIC 算法只可以估计来波方向,并不能自动跟踪运动目标,由文献[3]可知,利用 MUSIC 算法可以估计目标初始时刻的角度信息,进行数据关联,然后通过卡尔曼滤波进行目标角度的跟踪。

首先,建立状态方程和测量方程,对于第 n 个目标有

$$\mathbf{x}_n(k+1) = \mathbf{F}\mathbf{x}_n(k) + \mathbf{w}_n(k) \quad (3)$$

$$\mathbf{z}_n(k) = \mathbf{H}\mathbf{x}_n(k) + \mathbf{v}_n(k) \quad (4)$$

式中: $\mathbf{x}_n(k) = [\theta_n(k), \dot{\theta}_n(k), \varphi_n(k), \dot{\varphi}_n(k)]^T$, $\theta_n(t)$ 为 kT 时刻第 n 个目标的方位角, $\dot{\theta}_n(k)$ 为 kT 时刻第 n 个目标的方位角速度, $\varphi_n(t)$ 为 kT 时刻第 n 个目标的俯仰角, $\dot{\varphi}_n(k)$ 为 kT 时刻第 n 个目标的俯仰角速度, $\mathbf{z}_n(k)$ 为观测角; $\mathbf{w}_n(k)$ 和 $\mathbf{v}_n(k)$ 分别为系统噪声和测量噪声,二者均值都为零, $\mathbf{w}_n(k)$ 方差为 $\mathbf{Q}_n(k)$, $\mathbf{v}_n(k)$ 方差为 $\sigma_n^2(k)$ 且二者不相关; \mathbf{F} 和 \mathbf{H} 分别为转移矩阵

和测量矩阵,对于匀速角度变化有

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \mathbf{H} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

然后,结合卡尔曼滤波算法对本文提出的跟踪算法进行详细推导。

步骤 1 预测。

对于第 n 个目标,由 $(k-1)T$ 时刻估计的 $\hat{\mathbf{x}}_n(k-1|k-1)$ 和协方差矩阵 $\mathbf{P}_n(k-1|k-1)$ 可以得到预测的状态矢量及其协方差矩阵,表示为

$$\hat{\mathbf{x}}_n(k|k-1) = \mathbf{F}\hat{\mathbf{x}}_n(k-1|k-1) \quad (6)$$

$$\mathbf{P}_n(k|k-1) = \mathbf{F}\mathbf{P}_n(k-1|k-1)\mathbf{F}^T + \mathbf{Q}_n(k) \quad (7)$$

步骤 2 子空间跟踪。

由于 PASTd 算法跟踪得到的信号子空间正交性不强,在计算投影矩阵时计算量比较大,同时收敛速度比较慢,因此采用改进的 PASTd 算法。这种算法在 PASTd 算法的基础上,在每次迭代提取第 p 个特征向量时,将第 p 个特征向量与前 $p-1$ 个已经得到的特征向量进行单位正交化处理,这样就能保证所有的特征向量都相互正交。假设 $\mathbf{V} = \mathbf{U}_i(:, 1:p-1)$ 为第 i 次迭代时 $p-1$ 个已得到的正交特征向量, $\mathbf{U}_i(:, p)$ 为在第 i 次迭代时第 p 个特征向量,则此向量的单位正交化步骤为

$$\mathbf{U}_i(:, p) = \mathbf{U}_i(:, p) - \mathbf{V}\mathbf{V}^H\mathbf{U}_i(:, p) \quad (8)$$

$$\mathbf{U}_i(:, p) = \frac{\mathbf{U}_i(:, p)}{\|\mathbf{U}_i(:, p)\|} \quad (9)$$

设采样间隔 T 内采样点为 N_s ,由改进的 PASTd 算法^[11]可以得到信号子空间。

由文献[7]可知,导向矢量生成的子空间和信号子空间几乎一样,所以导向矢量投影到信号子空间的误差为零,即

$$\mathbf{P}_V^\perp(k)\mathbf{a}_n(k) = 0 \quad n=1, 2, \dots, P \quad (10)$$

式中: $\mathbf{P}_V^\perp(k) = \mathbf{I} - \mathbf{P}_r(k)$, $\mathbf{P}_r(k) = \mathbf{U}(k)(\mathbf{U}^H(k) \cdot \mathbf{U}(k))^{-1}\mathbf{U}^H(k)$, $\mathbf{P}_r(k)$ 为 $\mathbf{U}(k)$ 的投影矩阵。由 $\mathbf{P}_r(k)$ 的表达式可以看出,在计算投影矩阵时需要计算 $(\mathbf{U}^H(k)\mathbf{U}(k))^{-1}$,由于采用了改进的 PASTd 算法, $\mathbf{U}(k)$ 进行了单位正交化处理,所以 $(\mathbf{U}^H(k)\mathbf{U}(k))^{-1} = \mathbf{I}$,避免了矩阵求逆,降低了运算量。

步骤 3 计算角度变化值。

第 n 个目标的角度更新值 $\Delta\theta_n(k)$, $\Delta\varphi_n(k)$, 预测角度值 $\hat{\theta}_n(k|k-1)$, $\hat{\varphi}_n(k|k-1)$ 以及目标角度值 $\theta_n(k)$, $\varphi_n(k)$ 的关系表达式为

$$\begin{cases} \theta_n(k) = \hat{\theta}_n(k|k-1) + \Delta\theta_n(k) \\ \varphi_n(k) = \hat{\varphi}_n(k|k-1) + \Delta\varphi_n(k) \end{cases} \quad (11)$$

式中, 预测角度值 $\hat{\theta}_n(k|k-1)$, $\hat{\varphi}_n(k|k-1)$ 由卡尔曼滤波得到。则导向矢量的第 m 个元素可以表示为

$$\begin{aligned} a_{m,n}(k) = & \exp(-j\frac{2\pi}{\lambda}(x_m \cos \theta_n(k) \cos \varphi_n(k) + \\ & y_m \sin \theta_n(k) \cos \varphi_n(k))) = \\ & (\exp(-j\frac{2\pi}{\lambda}(x_m \cos(\hat{\theta}_n(k|k-1) + \Delta\theta_n(k)) \cdot \\ & \cos(\hat{\varphi}_n(k|k-1) + \Delta\varphi_n(k)) + y_m \sin(\hat{\theta}_n(k|k-1) + \\ & \Delta\theta_n(k)) \cos(\hat{\varphi}_n(k|k-1) + \Delta\varphi_n(k))))。 \quad (12) \end{aligned}$$

设 $\Delta\theta_n(k)$, $\Delta\varphi_n(k)$ 很小, 将上式在 $\hat{\theta}_n(k|k-1)$, $\hat{\varphi}_n(k|k-1)$ 处进行泰勒级数展开, 并且省去二阶及二阶以上的余项, 可得

$$\begin{aligned} a_{m,n}(k) = & \hat{a}_{m,n}(k|k-1) \times \{1 - j\frac{2\pi}{\lambda} \times (-x_m \sin \theta_n(k|k-1) \cos \varphi_n(k|k-1) + y_m \cos \theta_n(k|k-1) \cos \varphi_n(k|k-1)) \Delta\theta_n(k) - \\ & (-x_m \cos \theta_n(k|k-1) \sin \varphi_n(k|k-1) - y_m \sin \theta_n(k|k-1) \sin \varphi_n(k|k-1)) \Delta\varphi_n(k)\}。 \quad (13) \end{aligned}$$

将式(13)代入 $\mathbf{a}_n(k)$, 可得

$$\mathbf{a}_n(k) = \hat{\mathbf{a}}_n(k|k-1) + \hat{\mathbf{b}}_n(k|k-1) \begin{pmatrix} \Delta\theta_n(k) \\ \Delta\varphi_n(k) \end{pmatrix} \quad (14)$$

式中:

$$\hat{\mathbf{a}}_n(k|k-1) = [\hat{a}_{1,n}(k|k-1) \cdots \hat{a}_{M \times N,n}(k|k-1)]^T; \quad (15)$$

$$\hat{a}_{m,n}(k|k-1) = \exp(-j\frac{2\pi}{\lambda}(x_m \cos \hat{\theta}_n(k|k-1) \cos \hat{\varphi}_n(k|k-1) + y_m \sin \hat{\theta}_n(k|k-1) \cos \hat{\varphi}_n(k|k-1))); \quad (16)$$

$$\hat{\mathbf{b}}_n(k|k-1) = [\hat{b}_{1,n}(k|k-1) \cdots \hat{b}_{M \times N,n}(k|k-1)]^T \quad (17)$$

式中, 下标 $1, n$ 表示第 1 个阵元, 第 n 个信号对应的值。

$$\begin{aligned} \hat{b}_{m,n}(k|k-1) = & j\frac{2\pi}{\lambda} \times \hat{a}_{m,n}(k|k-1) \times \\ & (\hat{b}_{1,m,n}(k|k-1) \quad \hat{b}_{2,m,n}(k|k-1)); \quad (18) \end{aligned}$$

$$\hat{b}_{1,m,n}(k|k-1) = -x_m \sin \theta_n(k|k-1) \cos \varphi_n(k|k-1) + y_m \cos \theta_n(k|k-1) \cos \varphi_n(k|k-1); \quad (19)$$

$$\hat{b}_{2,m,n}(k|k-1) = -x_m \cos \theta_n(k|k-1) \sin \varphi_n(k|k-1) - y_m \sin \theta_n(k|k-1) \sin \varphi_n(k|k-1) \quad (20)$$

式中, 下标 m, n 表示第 m 个阵元, 第 n 个信号对应的值。

将式(14)代入式(10), 可以得到如下的线性方程组

$$\mathbf{u}_n(k) \begin{pmatrix} \Delta\theta_n(k) \\ \Delta\varphi_n(k) \end{pmatrix} = \mathbf{y}_n(k) \quad n = 1, 2, \dots, P \quad (21)$$

式中: $\mathbf{u}_n(k) = \mathbf{P}_U^+(k) \hat{\mathbf{b}}_n(k|k-1)$; $\mathbf{y}_n(k) = -\mathbf{P}_U^+(k) \cdot \hat{\mathbf{a}}_n(k|k-1)$ 。则上式的最小二乘解为

$$\begin{pmatrix} \Delta\theta_n(k) \\ \Delta\varphi_n(k) \end{pmatrix} = (\mathbf{u}_n^H(k) \mathbf{u}_n(k))^{-1} \mathbf{u}_n^H(k) \mathbf{y}_n(k) \quad (22)$$

由于 $\Delta\theta_n(k)$, $\Delta\varphi_n(k)$ 是实数, 可以对上式取实部, 得到角度变化值。

步骤4 角度更新。

由以上的分析可以得到状态向量及其协方差矩阵

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{x}}_n(k|k) = \hat{\mathbf{x}}_n(k|k-1) + \mathbf{G}_n(k) \begin{pmatrix} \Delta\theta_n(k) \\ \Delta\varphi_n(k) \end{pmatrix} \\ \mathbf{P}_n(k|k) = (\mathbf{I} - \mathbf{G}_n(k) \mathbf{H}) \mathbf{P}_n(k|k-1) \end{cases} \quad (23)$$

式中, $\mathbf{G}_n(k) = \mathbf{P}_n(k|k-1) \mathbf{H}^T [\mathbf{H} \mathbf{P}_n(k|k-1) \mathbf{H}^T + \sigma_z^2(k)]^{-1}$, 为卡尔曼增益矩阵。

3 实验结果与分析

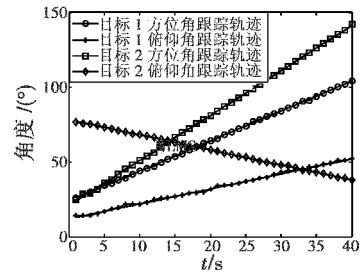
为了验证本文算法的性能, 针对两个运动目标进行角度跟踪, 并与常规 MUSIC 算法以及基于 PASTd 的角度跟踪算法比较。仿真条件为: 阵列形式为 5×3 均匀面阵跟踪两个运动目标, 阵元间隔为半波长, $T = 1$ s, 即每隔 1 s 估计一次, 跟踪时间为 40 s, $N_s = 50$, 噪声为高斯白噪声, $\sigma^2 = 1$ 。子空间跟踪算法中的 $\beta =$

$$0.99, \mathbf{U}(0) = \begin{pmatrix} \mathbf{I}_P \\ \mathbf{0}_{(M \times N - P) \times P} \end{pmatrix},$$

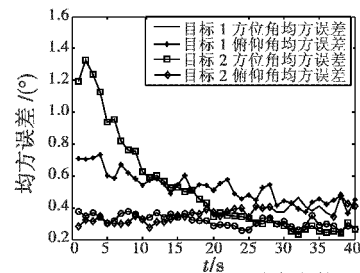
系统噪声和测量噪声分别为 $\mathbf{Q}_n = \mathbf{I}_{P \times P}$, $\sigma_z^2 = 1, n = 1, 2, \dots, P$ 。

假设有两个目标, 初始角度值已估计得到, 目标角度变化曲线如图 2a 所示。

图 2 所示为算法在 SNR 分别为 5 dB, 10 dB, 20 dB 时经过 100 次蒙特卡罗实验得到的跟踪图和均方误差。由图可以看出, 随着信噪比的升高, 算法的均方误差在减小, 跟踪精度在逐渐提高。在 SNR 为 5 dB 时, 算法的跟踪均方误差最大, 此时本文算法最大的均方误差为 1.4° , 可认为算法较好地跟踪到了运动目标。



a 本文算法跟踪图



b SNR 为 5 dB 时本文算法跟踪均方误差

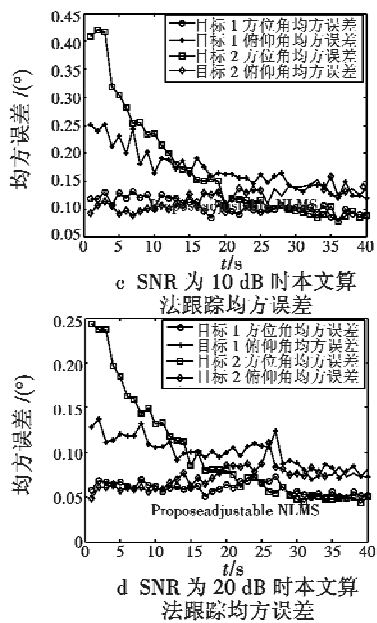


图2 不同信噪比时本文算法跟踪图和均方误差

Fig.2 Tracking and mean square error curves with different SNR

表1所示为3种算法经过100次蒙特卡罗实验得到的平均均方误差,可以看出,本文改进的PASTd算法比PSATd跟踪效果要好,这是由于在低采样点情况下,改进的PASTd算法收敛速度更快,数值稳定性更好,在高信噪比下角度跟踪平方均方误差比MUSIC算法略大,但MUSIC算法需要特征分解,谱峰搜索,这些都是运算量较大的,同时每个时刻搜索的方位角和俯仰角都需要和前一时刻的角度进行关联,也需要一定的运算量,而本文的算法运算量要比MUSIC小很多,不需要特征值分解和谱峰搜索,通过接收数据更新信号子空间,完全可以实现目标的自动跟踪。

表1 3种算法平均均方误差

Table 1 Mean square error of the three algorithms

信噪比/dB	平均均方误差/(°)		
	PASTd算法	本文算法	MUSIC算法
5	0.6567	0.4557	0.5172
10	0.5782	0.2523	0.1991
20	0.3348	0.0808	0.0095

利用Matlab计时函数,对单次MUSIC算法和改进PASTd子空间跟踪进行计时,MUSIC算法为3.83s,而后者为0.03s。需要说明的是,在计算信号子空间的投影矩阵时,由于本文算法得到的信号子空间已经进行了单位正交化处理,没有进行求逆运算,相比于PASTd算法,运算量有所降低。

4 结束语

针对多目标角度跟踪问题,本文提出了一种新的多目标角度跟踪算法,可以同时跟踪多个目标的方位

角和俯仰角。算法利用不断接收的数据进行跟踪,不同于MUSIC算法,不需要特征分解和谱峰搜索,降低了运算量,适合实时处理;同时采用收敛更快的改进的PASTd算法进行子空间跟踪,提高了跟踪精度,避免了矩阵求逆。此种算法用于雷达的多目标跟踪,可提高信息处理的效率。

参考文献

- [1] SWORD C K, SIMAAN M, KAMEN E W. Multiple target angle tracking using sensor array outputs [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1990, 26 (2): 367-373.
- [2] LO K W, LI C K. An improved multiple target angle tracking algorithm [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1992, 28 (3): 797-805.
- [3] PARK S B, RYU C S, LEE K K. Multiple target angle tracking algorithm using predicted angles [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1994, 30 (2): 643-648.
- [4] 张怀根,张林让,吴顺君,等.一种新的多目标角跟踪方法[J].电子与信息学报,2007,29(12):2840-2842. (ZHANG H G, ZHANG L R, WU S J, et al. A new multiple targets angle tracking method [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(12): 2840-2842.)
- [5] 张怀根,吴顺君,张林让,等.基于协方差矩阵元素的多目标角跟踪方法[J].西安电子科技大学学报,2008,35(5):785-792. (ZHANG H G, WU S J, ZHANG L R, et al. Multiple targets angle tracking algorithm based on the elements of the covariance matrix [J]. Journal of Xidian University, 2008, 35(5): 785-792.)
- [6] RYU C S, LEE S H, LEE K K. Multiple target angle tracking algorithm using angular innovations extracted from signal subspace [J]. Electronics Letters, 1999, 35(18): 1520-1522.
- [7] RYU C S, LEE J S, LEE K K. Multiple target angle-tracking algorithm with efficient equation for angular innovation [J]. Electronics Letters, 2002, 38(10): 483-484.
- [8] YANG B. Projection approximation subspace tracking [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1995, 43 (1): 95-107.
- [9] 谢谦,黄清. PASTd算法应用于机动多目标角度跟踪[J].现代电子技术,2008,31(4):103-106. (XIE Q, HUANG Q. PASTd algorithm implementation for multiple moving angle tracking [J]. Modern Electronic Technology, 2008, 31(4): 103-106.)
- [10] ABED-MERAIM K, CHKEIF A, HUA Y. Fast orthonormal PAST algorithm [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2000, 7(3): 60-62.

4 结束语

本文从分析传统的二位置自对准方案出发,设计了带漂移补偿的HRG平台四位置自对准方案,对HRG随机漂移建立ARMA(2,1)模型,并进行滤波处理。实验结果表明,该方案的对准时间与忽略随机漂移的四位置自对准方案相当,而对准精度明显优于传统的二位置及四位置自对准方案,由此可见,该自对准方法的对准精度相对传统的二位置和四位置方案有较大提高,具有很好的工程价值和应用前景。

参考文献

- [1] ROZELLE D M. The hemispherical resonator gyro: from wineglass to the planets[J]. *Spaceflight Mechanics*, 2009, 134:1157-1178.
- [2] 任顺清,赵洪波. 半球谐振子密度分布不均匀对输出精度的影响[J]. *中国惯性技术学报*, 2011, 19(3):364-368. (REN S Q, ZHAO H B. Influence of density error of hemispherical resonator on output accuracy of gyro[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2011, 19(3):364-368.)
- [3] 曹渊,张士峰,杨华波,等. 一种新的惯性平台快速连续旋转自对准方法[J]. *兵工学报*, 2011, 32(12):1469-1473. (CAO Y, ZHANG S F, YANG H B, et al. Fast self-alignment method for inertial platform through continuous rotation[J]. *Acta Armamentarii*, 2011, 32(12):1469-1473.)
- [4] 王荣颖,许江宁,卞鸿巍. 基于可观测性分析的方位旋转式惯导初始对准仿真研究[J]. *中国惯性技术学报*, 2009, 17(1):15-19. (WANG R Y, XU J N, BIAN H W. Initial alignment of azimuth rotating GINS based on observability analysis[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2009, 17(1):15-19.)
- [5] 宫海涛. 惯性导航系统的初始对准方法及实验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012. (GONG H T. Initial alignment methods of inertial navigation system and experiment[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology, 2012.)
- [6] 蒋庆仙,马小辉,陈晓璧,等. 光纤陀螺寻北仪的二位置寻北方案[J]. *中国惯性技术学报*, 2006, 14(3):1-5. (JIANG Q X, MA X H, CHEN X B, et al. North determining scheme by two-position for a FOG north seeker[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2006, 14(3):1-5.)
- [7] EDUARDO S R, VLADIMIR A N. Comparison between two basic schemes in function of the true earth's north detection [C]//Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, 2006:315-318.
- [8] 郝燕玲,张义,孙枫,等. 单轴旋转式捷联惯导方位对准研究[J]. *仪器仪表学报*, 2013, 32(2):309-315. (HAO Y L, ZHANG Y, SUN F, et al. Analysis of single-axial rotation SINS azimuth alignment[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 32(2):309-315.)
- [9] ULRICH M. Estimation of useful and disturbing signals in inertial systems alignment [C]//Symposium Gyro Technology, Stuttgart, Germany, 2000:205-228.
- [10] 汪立新. 半球谐振陀螺惯性系统[M]. 西安:西北工业大学出版社,2012. (WANG L X. The inertial system of HRG [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnic University Press, 2012.)
- [11] 曲从善,夏克寒,许化龙,等. 导弹快速自瞄准方法及仿真研究[J]. *兵工学报*, 2009, 30(4):467-470. (QU C S, XIA K H, XU H L, et al. Research on auto-collimation method and simulation for ballistic missile[J]. *Acta Armamentarii*, 2009, 30(4):467-470.)
- (上接第18页)
- [11] 孟艳,汪晋宽,宋昕,等. 基于子空间跟踪和卡尔曼滤波的半盲多用户检测[J]. *信号处理*, 2008, 24(3):464-466. (MENG Y, WANG J K, SONG X, et al. Semi-blind multiuser detection based on subspace tracking and Kalman filter[J]. *Signal Processing*, 2008, 24(3):464-466.)
- (上接第28页)
- [3] 于海南,赵保军. 低信噪比红外图像小目标的检测[J]. *激光与红外*, 2004, 34(1):40-42. (YU H N, ZHAO B J. Detection of small targets of low SNR infrared images[J]. *Laser & Infrared*, 2004, 34(1):40-42.)
- [4] 徐建军,高山,毕笃彦,等. 一种新的图像分割算法[J]. *西安电子科技大学学报*, 2011, 38(1):8-15. (XU J J, GAO S, BI D Y, et al. Novel image segmentation algorithm [J]. *Journal of Xidian University*, 2011, 38(1):8-15.)
- [5] 杜峰,施文康,邓勇,等. 一种快速红外图像分割方法[J]. *红外与毫米波学报*, 2005, 24(3):370-372. (DU F, SHI W K, DENG Y, et al. Fast infrared image segmentation method [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2005, 24(3):370-372.)
- [6] 王润生. 图像理解[M]. 长沙:国防科技大学出版社, 1995. (WANG R S. Image understanding [M]. Changsha: Publishing House of National University of Defense Technology, 1995.)