



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 109143223 A
(43)申请公布日 2019.01.04

(21)申请号 201810924051.1

(22)申请日 2018.08.14

(71)申请人 中国电子科技集团公司第三十八研究所

地址 230000 安徽省合肥市高新技术开发区香樟大道199号

(72)发明人 郭佳意 钮俊清

(74)专利代理机构 合肥昊晟德专利代理事务所(普通合伙) 34153

代理人 王林

(51)Int.Cl.

G01S 13/72(2006.01)

权利要求书3页 说明书6页 附图5页

(54)发明名称

一种双基地雷达的空间目标跟踪滤波装置及方法

(57)摘要

本发明公开了一种双基地雷达的空间目标跟踪滤波装置及方法,所述初始化模块分别连接数据预处理模块和滤波处理模块,用于完成雷达坐标、坐标系参数、滤波参数的初始化,以及目标首点和第二点的坐标解算;所述数据预处理模块接收雷达量测的实时点迹信息,完成点迹数据补距离多普勒耦合,同时剔除异常点,将首点数据传输给初始化模块;所述滤波处理模块连接数据预处理模块,用于对雷达量测的点迹数据进行滤波处理,基于空间目标运动方程;所述显示模块连接滤波处理模块和数据预处理模块,用于接收并显示点迹数据、航迹数据、时统信息和波束指向信息。克服了现有双基地雷达目标跟踪技术的缺点和不足,有效提高了雷达空间目标跟踪的效率和精度。



1. 一种双基地雷达的空间目标跟踪滤波装置,其特征在于,包括初始化模块、数据预处理模块、滤波处理模块和显示模块;

所述初始化模块分别连接数据预处理模块和滤波处理模块,用于完成雷达坐标、坐标系参数、滤波参数的初始化,以及目标首点和第二点的坐标解算;

所述数据预处理模块接收雷达量测的实时点迹信息 (R_{Σ}, θ) , 完成点迹数据补距离多普勒耦合,同时剔除异常点,将首点数据传输给初始化模块, R_{Σ} 表示目标分别到发射站与接收站的距离之和,即 $R_{\Sigma} = R_T + R_R$, R_T 为目标到发射站的距离、 R_R 为目标到接收站的距离, θ 表示接收站目标视角;

所述滤波处理模块连接数据预处理模块,用于对雷达量测的点迹数据进行滤波处理,基于空间目标运动方程,无需对量测点做单基距解算获取 R_R ,直接采用目标的距离和 R_{Σ} 进行滤波;

所述显示模块连接滤波处理模块和数据预处理模块,用于接收并显示点迹数据、航迹数据、时统信息和波束指向信息。

2. 一种使用权利要求1所述的双基地雷达的空间目标跟踪滤波装置进行跟踪滤波的方法,其特征在于,包括以下步骤:

- (1) 完成雷达坐标系初始化;
- (2) 完成滤波参数的初始化,包括量测噪声的协方差与初始协方差矩阵的设置;
- (3) 对第 i 个量测点进行滤波;

所述滤波过程如下:

(31) 设第 $k-1$ 时刻融合中心的状态估计向量为 $\hat{X}_{k-1|k-1}$, 状态估计协方差为 $P_{k-1|k-1}$, 对该点进行不敏变换的采样点选取:

$$\begin{cases} \chi_{0,k-1|k-1} = \hat{X}_{k-1|k-1}, & W_0^{(m)} = \frac{\lambda}{2(L+\lambda)}, W_0^{(c)} = \frac{\lambda}{2(L+\lambda)} + 1 - \alpha^2 + \beta; \\ \chi_{i,k-1|k-1} = \hat{X}_{k-1|k-1} + (\sqrt{(L+\lambda)P_{k-1|k-1}})_i, & W_i^{(m)} = W_i^{(c)} = \frac{1}{2(L+\lambda)}, \quad i=1, \dots, L; \\ \chi_{i+L,k-1|k-1} = \hat{X}_{k-1|k-1} - (\sqrt{(L+\lambda)P_{k-1|k-1}})_i, & W_{i+L}^{(m)} = W_{i+L}^{(c)} = \frac{1}{2(L+\lambda)}, \quad i=1, \dots, L; \end{cases}$$

其中,状态向量维数 $L=7$, $\lambda = \alpha^2(L+\kappa)$ 为比例参数,用于控制采样点到均值的距离;通常 $\alpha=0.5$; $\kappa=3-L$; $\beta=2$;

(32) 对各采样点 $x_{i,k-1|k-1}$ 计算第 k 时刻的状态预测:

$$\xi_{i,k|k-1} = f(x_{i,k-1|k-1}, k-1)$$

$$\text{进而获得状态预测估计: } \hat{X}_{k|k-1} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(m)} \xi_{i,k|k-1}$$

$$\text{以及状态预测协方差为: } P_{k|k-1} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(c)} [\xi_{i,k|k-1} - \hat{X}_{k|k-1}] [\xi_{i,k|k-1} - \hat{X}_{k|k-1}]^T + Q_{k-1}$$

其中, $f(x)$ 表示空间目标的运动方程;

(33) 计算第 k 时刻的量测预测:

$$\zeta_{i,k|k-1} = h(\xi_{i,k|k-1}, k)$$

进而获得状态预测估计： $\hat{Y}_{k|k-1} = \sum_{i=0}^{2n} W_i \zeta_{i,k|k-1}$

以及相应协方差为： $P_{\hat{y}_k \hat{y}_k} = \sum_{i=0}^{2L} \left[\zeta_{i,k|k-1} - \hat{Y}_{k|k-1} \right] \left[\zeta_{i,k|k-1} - \hat{Y}_{k|k-1} \right]^T + R_k$

其中， $h(x)$ 为双基地雷达的空间目标量测方程；

(34) 获得第 k 时刻的滤波值：

首先计算第 k 时刻测量和状态向量的交互协方差

$$P_{x_k y_k} = \sum_{i=0}^{2L} \left[\xi_{i,k|k-1} - \hat{X}_{k|k-1} \right] \left[\zeta_{i,k|k-1} - \hat{Y}_{k|k-1} \right]^T$$

如果第 k 时刻雷达所提供的测量量为 Y_k ，则状态更新方程为

$$X_k = \hat{X}_{k|k-1} + K_k \left(Y_k - \hat{Y}_{k|k-1} \right)$$

其中，计算增益：

$$K_k = P_{x_k y_k} P_{\hat{y}_k \hat{y}_k}^{-1}$$

相应的状态更新协方差为：

$$P_k = P_{k|k-1} - K_k P_{\hat{y}_k \hat{y}_k} K_k'$$

(4) 重复步骤(3)直到目标跟踪结束。

3. 根据权利要求2所述的一种跟踪滤波的方法，其特征在于，初始化处理包括观测到空间目标后解算其首点在地心地固ECEF坐标系下坐标和速度，具体过程如下：

(11) 收到来自雷达的空间目标量测首点和第二点 $(R_{1\Sigma}, A_1, E_1)$ 、 $(R_{2\Sigma}, A_2, E_2)$ ，其中， $R_{i\Sigma} = R_{iT} + R_{iR}$ ， R_{iR} 为空间目标第 i 点到接收站的距离， R_{iT} 为空间目标第 i 点到发射站的距离， A_i, E_i 分别为空间目标第 i 点到接收站的方位角和俯仰角；

(12) 解算目标前两点到接收站的距离 R_{iR} ，即获得目标前两点的在雷达极坐标系下的坐标；

(13) 采用坐标系转换方法将其从雷达极坐标系转换到地心地固坐标系ECEF下；

(14) 利用差分法计算出目标首点在ECEF下的坐标和速度。

4. 根据权利要求2所述的一种跟踪滤波的方法，其特征在于，所述空间目标的运动方程为：

$$\ddot{r}_x = -\frac{\mu}{r^3} x - \frac{3}{2} J_2 \frac{\mu a_e^2}{r^5} x \left(1 - \frac{5z^2}{r^2} \right) + \omega^2 x + 2\omega V_y + \ddot{x}$$

$$\ddot{r}_y = -\frac{\mu}{r^3} y - \frac{3}{2} J_2 \frac{\mu a_e^2}{r^5} y \left(1 - \frac{5z^2}{r^2} \right) + \omega^2 y - 2\omega V_x + \ddot{y}$$

$$\ddot{r}_z = -\frac{\mu}{r^3} z - \frac{3}{2} J_2 \frac{\mu a_e^2}{r^5} z \left(3 - \frac{5z^2}{r^2} \right) + \ddot{z}$$

式中， $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ ， $X = (x, y, z)$ 是地心地固坐标系下的卫星位置， $\mu = 3.985325 \cdot 10^{14} \text{Nm}^2 \text{kg}^{-1}$ 为地球引力常数， a_e 为地球平均赤道半径， J_2 为地球二阶带谐项系数， $\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}$ 为地固系下的日月引力加速度。

5. 根据权利要求2所述的一种跟踪滤波的方法,其特征在于,所述双基地雷达的空间目标量测方程为:

$$R_{k\Sigma} = \sqrt{(x_k - x_R)^2 + (y_k - y_R)^2 + (z_k - z_R)^2} + \sqrt{(x_k - x_T)^2 + (y_k - y_T)^2 + (z_k - z_T)^2}$$

$$A_k = \arctan\left(\frac{x_k}{y_k}\right)$$

$$E_k = \arctan\left(\frac{x_k}{\sqrt{x_k^2 + y_k^2}}\right)$$

式中, $R_{k\Sigma}$ 为预测的第k时刻空间目标到接收站与发射站的距离和, (x_k, y_k, z_k) 为预测的第k时刻目标在地心地固坐标系中的位置坐标, (x_R, y_R, z_R) 为接收站坐标, (x_T, y_T, z_T) 为发射站坐标。

一种双基地雷达的空间目标跟踪滤波装置及方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种空间目标跟踪滤波方法,尤其涉及的是一种双基地雷达的空间目标跟踪滤波装置及方法。

背景技术

[0002] 常见的单基地雷达采用收发同置,雷达既是发射站也是接收站。其目标测量值为 (R, A, E) ,其中 R, A, E 分别是目标到接收站的距离、方位角、俯仰角。与此不同的是,双基地雷达的发射站和接收站是分置的,其目标测量值为 (R_{Σ}, A, E) ,其中 $R_{\Sigma} = R_R + R_T$, R_{Σ} 是目标到发射站距离 R_T 与其到接收站距离 R_R 之和, A, E 是目标到接收站的方位角、俯仰角。因此,为了实现双基地雷达对目标的跟踪,传统做法为先解算收到的目标量测值,获得近似的目标到接收站的距离后再进行滤波。

[0003] 如图1所示,传统的双基地雷达对目标的跟踪滤波方法如下:

[0004] 步骤101、102,完成雷达坐标系与滤波参数的初始化;其中,滤波参数包括量测噪声的协方差及初始协方差矩阵;

[0005] 步骤103,收到雷达的第 i 个量测点 $(R_{i\Sigma}, A_i, E_i)$;采用椭圆法单基距解算法解算空

间目标到接收站的距离:
$$R_{iR} = \frac{R_{i\Sigma}^2 - L^2}{2(R_{i\Sigma} + L \cos \theta_{iR})}$$

[0006] 式中, L 为基线距离, θ_{iR} 为双基平面上接收站目标视角;

[0007] 步骤104,对 (R_{iR}, A_i, E_i) 进行UKF滤波;

[0008] 步骤105、106,重复步骤103、104,直到目标跟踪结束。

[0009] 在上述传统跟踪滤波过程中,由于单基距的解算没有考虑地球扁率的影响,导致解算误差较大,距离精度只能达到公里级别,甚至10公里级别,远远不能满足跟踪雷达的精度要求。

发明内容

[0010] 本发明所要解决的技术问题在于:如何提高空间目标的跟踪效率和精度,提供了一种双基地雷达的空间目标跟踪滤波装置及方法。

[0011] 本发明是通过以下技术方案解决上述技术问题的,本发明的一种双基地雷达的空间目标跟踪滤波装置,包括初始化模块、数据预处理模块、滤波处理模块和显示模块;

[0012] 所述初始化模块分别连接数据预处理模块和滤波处理模块,用于完成雷达坐标、坐标系参数、滤波参数的初始化,以及目标首点和第二点的坐标解算;

[0013] 所述数据预处理模块接收雷达量测的实时点迹信息 (R_{Σ}, θ) ,完成点迹数据补距离多普勒耦合,同时剔除异常点,将首点数据传输给初始化模块, R_{Σ} 表示目标分别到发射站与接收站的距离之和,即 $R_{\Sigma} = R_T + R_R$, R_T 为目标到发射站的距离、 R_R 为目标到接收站的距离, θ 表示接收站目标视角;

[0014] 所述滤波处理模块连接数据预处理模块,用于对雷达量测的点迹数据进行滤波处

理,基于空间目标运动方程,无需对量测点做单基距解算获取 R_R ,直接采用目标的距离和 R_Σ 进行滤波;

[0015] 所述显示模块连接滤波处理模块和数据预处理模块,用于接收并显示点迹数据、航迹数据、时统信息和波束指向信息。

[0016] 一种使用所述的双基地雷达的空间目标跟踪滤波装置进行跟踪滤波的方法,包括以下步骤:

[0017] (1) 完成雷达坐标系初始化;

[0018] (2) 完成滤波参数的初始化,包括量测噪声的协方差与初始协方差矩阵的设置;

[0019] (3) 对第 i 个量测点进行滤波;

[0020] 所述滤波过程如下:

[0021] (31) 设第 $k-1$ 时刻融合中心的状态估计向量为 $\hat{X}_{k-1|k-1}$,状态估计协方差为 $P_{k-1|k-1}$,对该点进行不敏变换的采样点选取:

$$[0022] \begin{cases} \chi_{0,k-1|k-1} = \hat{X}_{k-1|k-1}, & W_0^{(m)} = \frac{\lambda}{2(L+\lambda)}, W_0^{(c)} = \frac{\lambda}{2(L+\lambda)} + 1 - \alpha^2 + \beta; \\ \chi_{i,k-1|k-1} = \hat{X}_{k-1|k-1} + (\sqrt{(L+\lambda)P_{k-1|k-1}})_i, & W_i^{(m)} = W_i^{(c)} = \frac{1}{2(L+\lambda)}, \quad i=1, \dots, L; \\ \chi_{i+L,k-1|k-1} = \hat{X}_{k-1|k-1} - (\sqrt{(L+\lambda)P_{k-1|k-1}})_i, & W_{i+L}^{(m)} = W_{i+L}^{(c)} = \frac{1}{2(L+\lambda)}, \quad i=1, \dots, L; \end{cases}$$

[0023] 其中,状态向量维数 $L=7$, $\lambda = \alpha^2(L+\kappa)$ 为比例参数,用于控制采样点到均值的距离;通常 $\alpha=0.5$; $\kappa=3-L$; $\beta=2$;

[0024] (32) 对各采样点 $\chi_{i,k-1|k-1}$ 计算第 k 时刻的状态预测:

[0025] $\xi_{i,k|k-1} = f(\chi_{i,k-1|k-1}, k-1)$

[0026] 进而获得状态预测估计: $\hat{X}_{k|k-1} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(m)} \xi_{i,k|k-1}$

[0027] 以及状态预测协方差为: $P_{k|k-1} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(c)} [\xi_{i,k|k-1} - \hat{X}_{k|k-1}] [\xi_{i,k|k-1} - \hat{X}_{k|k-1}]^T + Q_{k-1}$

[0028] 其中, $f(x)$ 表示空间目标的运动方程;

[0029] (33) 计算第 k 时刻的量测预测:

[0030] $\zeta_{i,k|k-1} = h(\xi_{i,k|k-1}, k)$

[0031] 进而获得状态预测估计: $\hat{Y}_{k|k-1} = \sum_{i=0}^{2n} W_i \zeta_{i,k|k-1}$

[0032] 以及相应协方差为: $P_{\hat{y}_k \hat{y}_k} = \sum_{i=0}^{2L} [\zeta_{i,k|k-1} - \hat{Y}_{k|k-1}] [\zeta_{i,k|k-1} - \hat{Y}_{k|k-1}]^T + R_k$

[0033] 其中, $h(x)$ 为双基地雷达的空间目标量测方程;

[0034] (34) 获得第 k 时刻的滤波值:

[0035] 首先计算第 k 时刻测量和状态向量的交互协方差

$$[0036] \quad P_{x_k, y_k} = \sum_{i=0}^{2L} \left[\xi_{i, k|k-1} - \hat{X}_{k|k-1} \right] \left[\zeta_{i, k|k-1} - \hat{Y}_{k|k-1} \right]^T$$

[0037] 如果第k时刻雷达所提供的测量量为 Y_k ,则状态更新方程为

$$[0038] \quad X_k = \hat{X}_{k|k-1} + K_k \left(Y_k - \hat{Y}_{k|k-1} \right)$$

[0039] 其中,计算增益:

$$[0040] \quad K_k = P_{x_k, y_k} P_{\hat{y}_k, \hat{y}_k}^{-1}$$

[0041] 相应的状态更新协方差为:

$$[0042] \quad P_k = P_{k|k-1} - K_k P_{\hat{y}_k, \hat{y}_k} K_k'$$

[0043] (4) 重复步骤(3)直到目标跟踪结束。

[0044] 初始化处理包括观测到空间目标后解算其首点在地心地固ECEF坐标系下坐标和速度,具体过程如下:

[0045] (11) 收到来自雷达的空间目标量测首点和第二点 $(R_{1\Sigma}, A_1, E_1)$ 、 $(R_{2\Sigma}, A_2, E_2)$, 其中, $R_{i\Sigma} = R_{iT} + R_{iR}$, R_{iR} 为空间目标第i点到接收站的距离, R_{iT} 为空间目标第i点到发射站的距离, A_i, E_i 分别为空间目标第i点到接收站的方位角和俯仰角;

[0046] (12) 解算目标前两点到接收站的距离 R_{iR} ,即获得目标前两点的在雷达极坐标系下的坐标;

[0047] (13) 采用坐标系转换方法将其从雷达极坐标系转换到地心地固坐标系ECEF下;

[0048] (14) 利用差分法计算出目标首点在ECEF下的坐标和速度。

[0049] 所述空间目标的运动方程为:

$$[0050] \quad \ddot{r}_x = -\frac{\mu}{r^3}x - \frac{3}{2}J_2 \frac{\mu a_e^2}{r^5}x \left(1 - \frac{5z^2}{r^2} \right) + \omega^2 x + 2\omega V_y + \ddot{x}$$

$$[0051] \quad \ddot{r}_y = -\frac{\mu}{r^3}y - \frac{3}{2}J_2 \frac{\mu a_e^2}{r^5}y \left(1 - \frac{5z^2}{r^2} \right) + \omega^2 y - 2\omega V_x + \ddot{y}$$

$$[0052] \quad \ddot{r}_z = -\frac{\mu}{r^3}z - \frac{3}{2}J_2 \frac{\mu a_e^2}{r^5}z \left(3 - \frac{5z^2}{r^2} \right) + \ddot{z}$$

[0053] 式中, $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$, $X = (x, y, z)$ 是地心地固坐标系下的卫星位置, $\mu = 3.985325 \cdot 10^{14} \text{Nm}^2 \text{kg}^{-1}$ 为地球引力常数, a_e 为地球平均赤道半径, J_2 为地球二阶带谐项系数, $\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}$ 为地固系下的日月引力加速度。

[0054] 所述双基地雷达的空间目标量测方程为:

$$[0055] \quad R_{k\Sigma} = \sqrt{(x_k - x_R)^2 + (y_k - y_R)^2 + (z_k - z_R)^2} + \sqrt{(x_k - x_T)^2 + (y_k - y_T)^2 + (z_k - z_T)^2}$$

$$[0056] \quad A_k = \arctan \left(\frac{x_k}{y_k} \right)$$

$$[0057] \quad E_k = \arctan \left(\frac{x_k}{\sqrt{x_k^2 + y_k^2}} \right)$$

[0058] 式中, $R_{k\Sigma}$ 为预测的第 k 时刻空间目标到接收站与发射站的距离和, (x_k, y_k, z_k) 为预测的第 k 时刻目标在地心地固坐标系中的位置坐标, (x_R, y_R, z_R) 为接收站坐标, (x_T, y_T, z_T) 为发射站坐标。

[0059] 本发明相比现有技术具有以下优点: 本发明基于空间目标运动方程和 Unscent Kalman Filter (UKF 无迹卡尔曼滤波) 法, 在目标的跟踪滤波过程中, 无需先解算出目标到接收站的距离, 消除了该步骤中产生误差的可能。新算法克服了现有双基地雷达目标跟踪技术的缺点和不足, 有效提高了雷达空间目标跟踪的效率和精度。

附图说明

- [0060] 图1是传统双基地雷达空间目标跟踪滤波流程图;
- [0061] 图2是本发明双基地雷达空间目标跟踪滤波流程图;
- [0062] 图3是本发明的结构框图;
- [0063] 图4是量测/滤波距离和与星历距离和一次差图;
- [0064] 图5是量测/本发明滤波距离和与星历距离和一次差对比图;
- [0065] 图6是量测/滤波方位与星历方位一次差图;
- [0066] 图7是量测/滤波俯仰与星历俯仰一次差图。

具体实施方式

[0067] 下面对本发明的实施例作详细说明, 本实施例在以本发明技术方案为前提下进行实施, 给出了详细的实施方式和具体的操作过程, 但本发明的保护范围不限于下述的实施例。

[0068] 如图3所示, 本实施例的一种双基地雷达的空间目标跟踪滤波装置, 包括初始化模块、数据预处理模块、滤波处理模块和显示模块;

[0069] 所述初始化模块分别连接数据预处理模块和滤波处理模块, 用于完成雷达坐标、坐标系参数、滤波参数的初始化, 以及目标首点和第二点的坐标解算;

[0070] 所述数据预处理模块接收雷达量测的实时点迹信息 (R_Σ, θ) , 完成点迹数据补距离多普勒耦合, 同时剔除异常点, 将首点数据传输给初始化模块, R_Σ 表示目标分别到发射站与接收站的距离之和, 即 $R_\Sigma = R_T + R_R$, R_T 为目标到发射站的距离、 R_R 为目标到接收站的距离, θ 表示接收站目标视角;

[0071] 所述滤波处理模块连接数据预处理模块, 用于对雷达量测的点迹数据进行滤波处理, 基于空间目标运动方程, 无需对量测点做单基距解算获取 R_R , 直接采用目标的距离和 R_Σ 进行滤波;

[0072] 所述显示模块连接滤波处理模块和数据预处理模块, 用于接收并显示点迹数据、航迹数据、时统信息和波束指向信息。

[0073] 如图2所示, 本实施例的双基地雷达空间目标跟踪滤波流程如下:

[0074] 步骤201和202, 完成雷达坐标系与滤波参数的初始化; 其中, 滤波参数包括量测噪

声的协方差及初始协方差矩阵；

[0075] 步骤203和204,对第*i*个量测点进行滤波；

[0076] 步骤205,重复步骤203、204,直到目标跟踪结束。

[0077] 本实施例的滤波方法如下：

[0078] 第一步,设第*k-1*时刻融合中心的状态估计向量为 $\hat{X}_{k-1|k-1}$,状态估计协方差为 $P_{k-1|k-1}$ 。对该点进行不敏变换的采样点选取,公式如下：

$$[0079] \begin{cases} \chi_{0,k-1|k-1} = \hat{X}_{k-1|k-1}, & W_0^{(m)} = \frac{\lambda}{2(L+\lambda)}, W_0^{(c)} = \frac{\lambda}{2(L+\lambda)} + 1 - \alpha^2 + \beta; \\ \chi_{i,k-1|k-1} = \hat{X}_{k-1|k-1} + (\sqrt{(L+\lambda)P_{k-1|k-1}})_i, & W_i^{(m)} = W_i^{(c)} = \frac{1}{2(L+\lambda)}, \quad i=1, \dots, L; \\ \chi_{i+L,k-1|k-1} = \hat{X}_{k-1|k-1} - (\sqrt{(L+\lambda)P_{k-1|k-1}})_i, & W_{i+L}^{(m)} = W_{i+L}^{(c)} = \frac{1}{2(L+\lambda)}, \quad i=1, \dots, L; \end{cases}$$

[0080] 其中,状态向量维数 $L=7$, $\lambda = \alpha^2(L+\kappa)$ 为比例参数,用于控制采样点到均值的距离;通常 $\alpha=0.5$; $\kappa=3-L$; $\beta=2$;

[0081] 第二步,对各采样点 $x_{i,k-1|k-1}$ 计算第*k*时刻的状态预测：

[0082] $\xi_{i,k|k-1} = f(x_{i,k-1|k-1}, k-1)$

[0083] 进而获得状态预测估计：

$$[0084] \hat{X}_{k|k-1} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(m)} \xi_{i,k|k-1}$$

[0085] 以及状态预测协方差为：

$$[0086] P_{k|k-1} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(c)} [\xi_{i,k|k-1} - \hat{X}_{k|k-1}] [\xi_{i,k|k-1} - \hat{X}_{k|k-1}]^T + Q_{k-1}$$

[0087] 其中, $f(x)$ 表示空间目标的运动方程：

$$[0088] \ddot{r}_x = -\frac{\mu}{r^3}x - \frac{3}{2}J_2 \frac{\mu a_e^2}{r^5}x \left(1 - \frac{5z^2}{r^2}\right) + \omega^2x + 2\omega V_y + \ddot{x}$$

$$[0089] \ddot{r}_y = -\frac{\mu}{r^3}y - \frac{3}{2}J_2 \frac{\mu a_e^2}{r^5}y \left(1 - \frac{5z^2}{r^2}\right) + \omega^2y - 2\omega V_x + \ddot{y}$$

$$[0090] \ddot{r}_z = -\frac{\mu}{r^3}z - \frac{3}{2}J_2 \frac{\mu a_e^2}{r^5}z \left(3 - \frac{5z^2}{r^2}\right) + \ddot{z}$$

[0091] 式中, $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$, $X = (x, y, z)$ 是地心地固坐标系下的卫星位置, $\mu = 3.985325 \cdot 10^{14} \text{Nm}^2\text{kg}^{-1}$ 为地球引力常数, a_e 为地球平均赤道半径, J_2 为地球二阶带谐项系数, $\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}$ 为地固系下的日月引力加速度；

[0092] 第三步,计算第*k*时刻的量测预测：

[0093] $\zeta_{i,k|k-1} = h(\xi_{i,k|k-1}, k)$

[0094] 进而获得状态预测估计：

$$[0095] \quad \hat{Y}_{k|k-1} = \sum_{i=0}^{2n} W_i \zeta_{i,k|k-1}$$

[0096] 以及相应协方差为:

$$[0097] \quad P_{\hat{y}_k \hat{y}_k} = \sum_{i=0}^{2L} \left[\zeta_{i,k|k-1} - \hat{Y}_{k|k-1} \right] \left[\zeta_{i,k|k-1} - \hat{Y}_{k|k-1} \right]^T + R_k$$

[0098] 其中, $h(x)$ 为双基地雷达的空间目标量测方程:

$$[0099] \quad R_{k\Sigma} = \sqrt{(x_k - x_R)^2 + (y_k - y_R)^2 + (z_k - z_R)^2} + \sqrt{(x_k - x_T)^2 + (y_k - y_T)^2 + (z_k - z_T)^2}$$

$$[0100] \quad A_k = \arctan \left(\frac{x_k}{y_k} \right)$$

$$[0101] \quad E_k = \arctan \left(\frac{x_k}{\sqrt{x_k^2 + y_k^2}} \right)$$

[0102] 式中, $R_{k\Sigma}$ 为预测的第 k 时刻空间目标到接收站与发射站的距离和, (x_k, y_k, z_k) 为预测的第 k 时刻目标在地心地固坐标系中的位置坐标, (x_R, y_R, z_R) 为接收站坐标, (x_T, y_T, z_T) 为发射站坐标;

[0103] 第四步, 获得第 k 时刻的滤波值:

[0104] 首先计算第 k 时刻测量和状态向量的交互协方差:

$$[0105] \quad P_{x_k y_k} = \sum_{i=0}^{2L} \left[\xi_{i,k|k-1} - \hat{X}_{k|k-1} \right] \left[\zeta_{i,k|k-1} - \hat{Y}_{k|k-1} \right]^T$$

[0106] 如果第 k 时刻雷达所提供的测量量为 Y_k , 则状态更新方程为:

$$[0107] \quad X_k = \hat{X}_{k|k-1} + K_k \left(Y_k - \hat{Y}_{k|k-1} \right)$$

[0108] 其中, 计算增益:

$$[0109] \quad K_k = P_{x_k y_k} P_{\hat{y}_k \hat{y}_k}^{-1}$$

[0110] 相应的状态更新协方差为:

$$[0111] \quad P_k = P_{k|k-1} - K_k P_{\hat{y}_k \hat{y}_k} K_k'$$

[0112] 本实施例采用一段真实的空间目标观测数据进行跟踪滤波。新旧算法滤波效果对比如图 4~7。如图4所示, 采用旧算法后目标的距离和一次差约在10000米左右, 且逐步发散; 如图5所示, 而采用本发明的新算法后, 目标的距离和一次差 < 30米。如图6所示, 采用旧算法后目标的方位角一次差范围在 [1.4度, 0.4度] 区间内, 而采用本发明的新算法后, 方位角一次差为 -0.02度左右。如图7所示, 采用旧算法后目标的俯仰角一次差在 0.3度左右, 而采用本发明的新算法后, 俯仰角一次差为 -0.01度左右。综上所述, 本发明的新算法大大提高了目标跟踪的滤波精度。

[0113] 以上所述仅为本发明的较佳实施例而已, 并不用以限制本发明, 凡在本发明的精神和原则之内所作的任何修改、等同替换和改进等, 均应包含在本发明的保护范围之内。

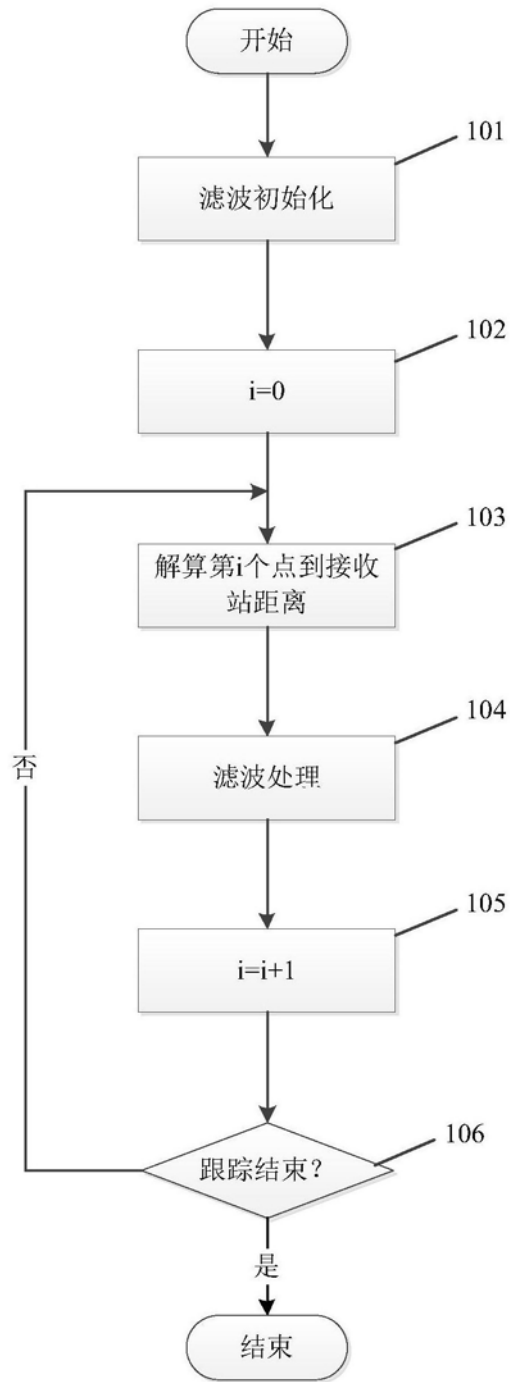


图1

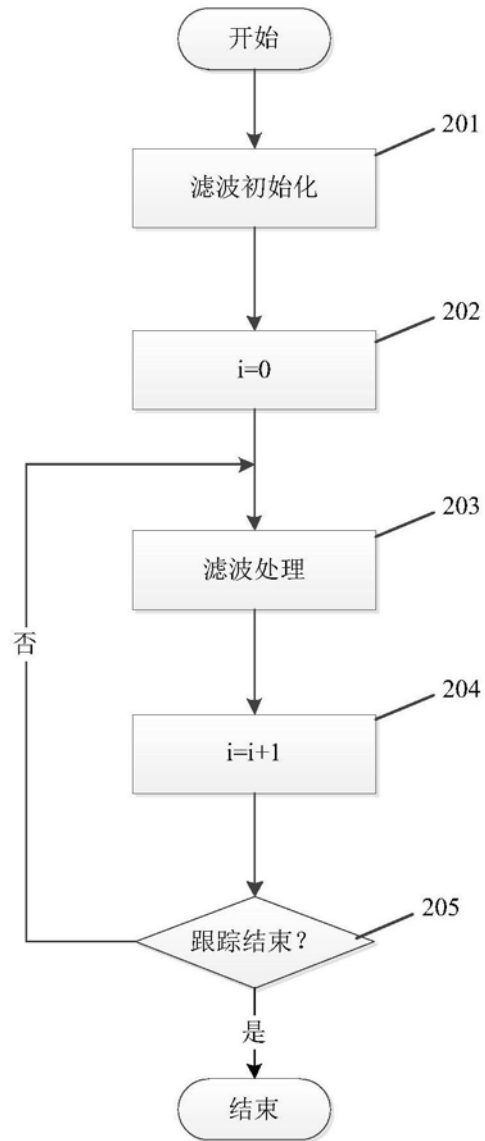


图2

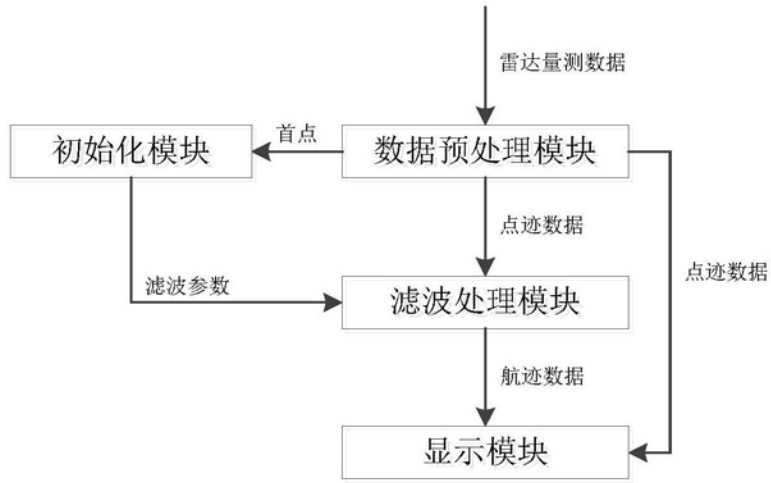


图3

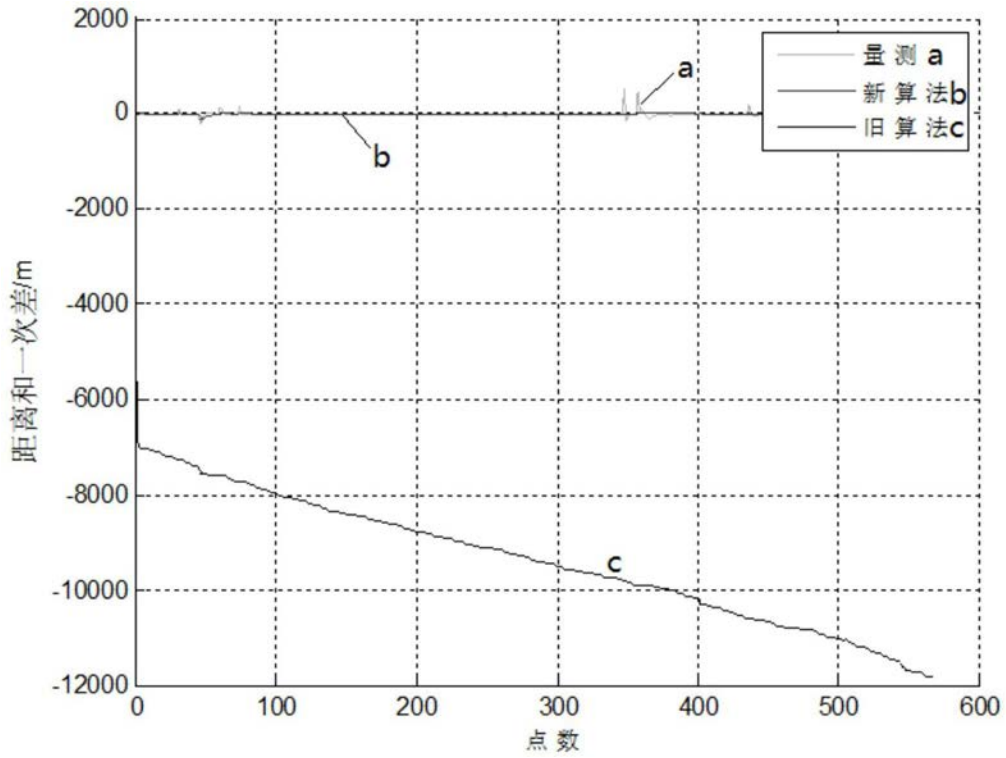


图4

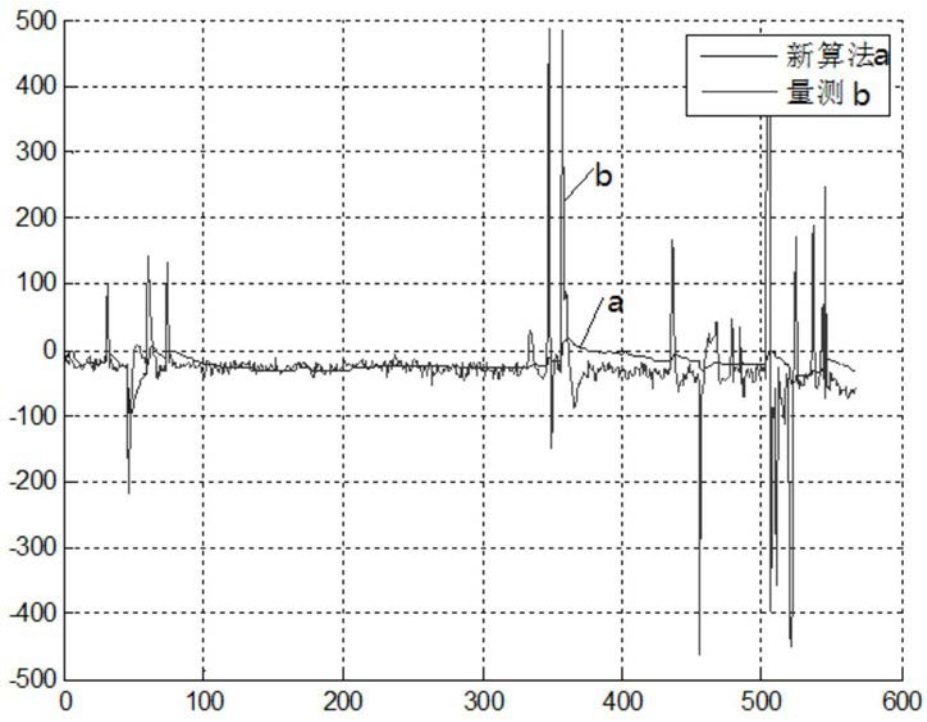


图5

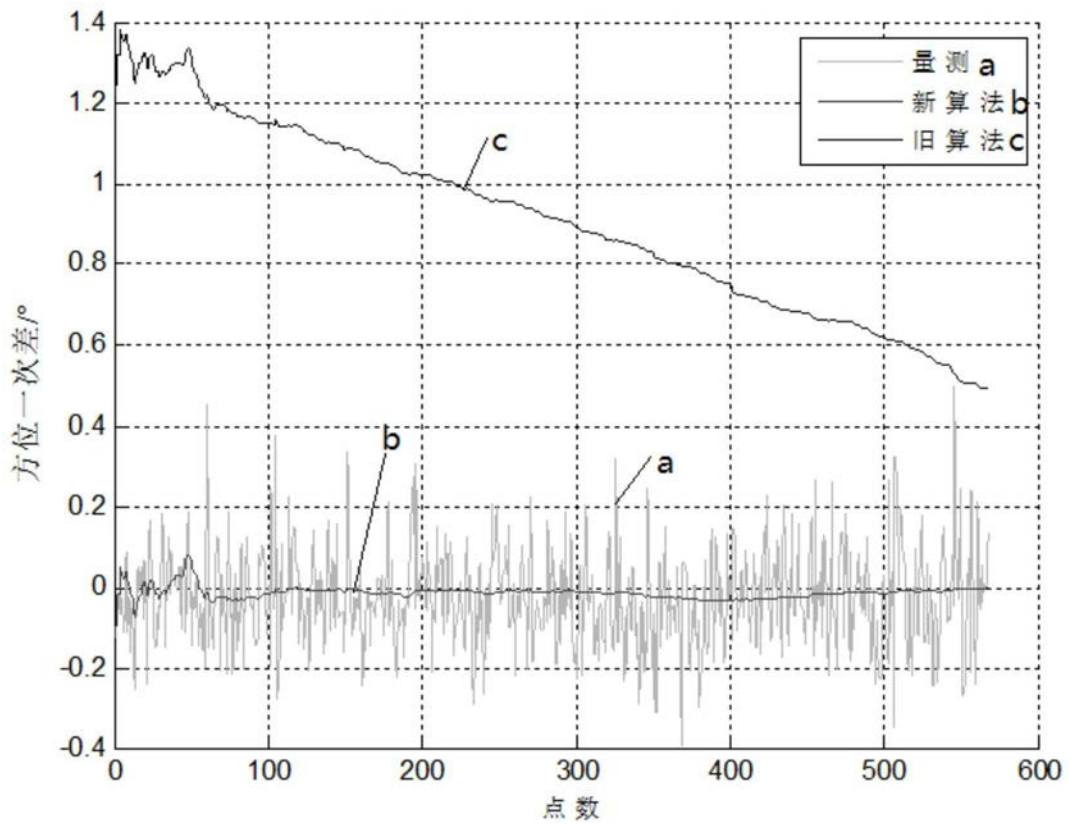


图6

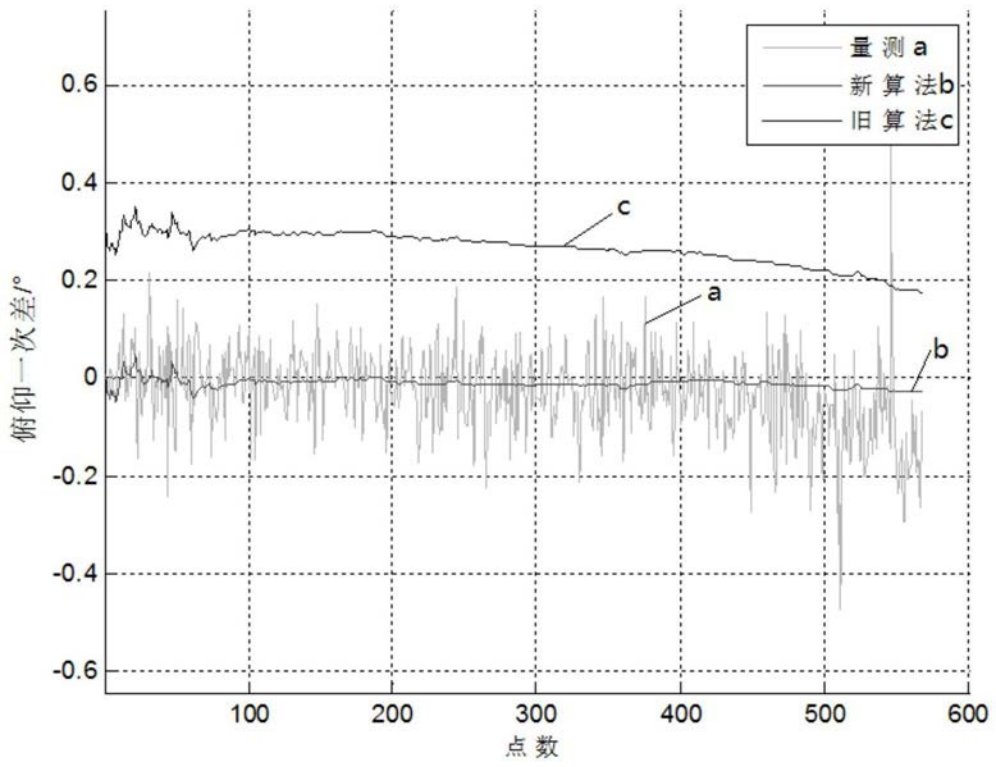


图7