

DOI: 10.13382/j.jemi.B1902752

有色观测噪声下的自适应 UKF 在北斗多路径 误差削弱中的研究*

刘 春 卫吉祥 李维华 汪志宁 刘 滔
(合肥工业大学 电气与自动化工程学院 合肥 230009)

摘要:针对由环境复杂性而造成的北斗多路径误差不能有效削弱的问题,提出了一种基于新的误差模型下的自适应无迹卡尔曼滤波(UKF)方法。该方法首先利用量测状态扩增法来解决量测噪声为有色噪声的问题,再用改进的 Sage-Husa 自适应 UKF 来动态估计系统噪声和量测噪声,从而解决噪声统计特性未定造成的误差削弱效果不明显的情况。实验结果表明在有色观测噪声下的改进 Sage-Husa 自适应 UKF 算法相比于传统 UKF,能够将多路径误差削弱近 60%,该方法在针对北斗定位中由于多路径误差产生的噪声不可知的情况具有很强的适用性。

关键词:多路径误差;有色观测噪声;无迹卡尔曼滤波;Sage-Husa

中图分类号: P228.1; TN911.72 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 420.1010

Research on the Beidou multipath error reduction based on adaptive UKF algorithm under colored observation noise

Liu Chun Wei Jixiang Li Weihua Wang Zhining Liu Tao

(School of Electrical and Automation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In order to solve the problem that the Beidou multipath error caused by environmental complexity cannot be effectively eliminated, an adaptive unscented Kalman filter (UKF) method based on a new error model is proposed. Firstly, the method uses the measurement state amplification method to solve the problem that the measurement noise is colored noise, and then uses the improved Sage-Husa adaptive UKF to dynamically estimate the system noise and measurement noise, so as to solve the situation that the error offset effect is not obviously caused by the undetermined statistical characteristics of noise. Comparing this method with the traditional UKF, the experimental results show that the improved Sage-Husa adaptive UKF algorithm under colored observation noise can reduce the multipath error by nearly 60%. This method has strong applicability for the case where the noise generated by the multipath error is unknown to the Beidou positioning.

Keywords: multipath error; colored observation noise; unscented Kalman filter; Sage-Husa

0 引言

北斗卫星导航系统(Beidou navigation satellite system, BDS)作为我国自主研发,具有自主知识产权的导航技术,经过多年发展已十分成熟并在全世界范围内普及应用^[1]。BDS是中国重要的空间基础设施,它为全球用户提供全天候、全天时、高精度的定位、导航和授时服

务^[2]。目前,我国正在建设北斗三号系统,根据系统建设总体规划,截止到2018年底,我国已经完成19颗卫星发射组网,已经能够面向全球提供基本的导航授时服务;2020年7月份之前,将完成30颗卫星发射组网,从而全面建成北斗三号系统^[3]。作为国家十三五规划重点推进项目,北斗系统的广泛应用,有利于我国摆脱对GPS的过度依赖,消除国家战略安全的潜在威胁^[4]。

多路径效应作为减少BDS定位精度的主要原因之

收稿日期:2019-11-12 Received Date: 2019-11-12

* 基金项目:合肥市北斗卫星导航重大应用示范资助项目

一,成为近几年人们研究的热点。目前削弱多路径效应的常用方法有选择性能良好的扼流圈天线、改善周边环境以及完善接收机算法等^[5]。改善周边环境最为简单,但由于定位环境复杂多变,故该方法具有一定的局限性;扼流圈天线作为硬件改进,虽能在一定程度上减轻多路径误差,但造价高且体积较大;接收机算法改进,如仰角加权方法、卡尔曼滤波技术、信噪比技术、经验模式分解技术等^[6],是目前人们应用较为广泛的方法。

随着 BDS 多路径误差削弱技术研究的深入,越来越多的算法被提出。文献[7]采用了自适应卡尔曼滤波,它是将输出相关法与标准卡尔曼滤波结合起来,从而不断地使最佳增益矩阵与实际量测数据相适应,但由于标准卡尔曼的局限性,使得结果改进不明显;文献[8]采用了无迹卡尔曼(unscented Kalman filter, UKF)滤波,通过无迹变换(unscented transformation, UT)来获得最小均方误差估计,然后进行预测和更新,但是该文献的仿真都是在噪声模型已知的情况下进行的,在实际中容易造成滤波发散;文献[9]采用自适应无迹卡尔曼滤波(adaptive unscented Kalman filter, AUKF),通过引入自适应因子来调节协方差阵,结果表明文献[9]比文献[8]的定位精度有所提高,但是仍未考虑到有色噪声的影响。本文主要介绍了一种在有色观测噪声下的自适应无迹卡尔曼滤波方法,首先通过量测状态扩充法改善有色观测噪声从而建立新的系统模型,然后通过改进的 Sage-Husa 时变噪声统计估值器对系统噪声和量测噪声的方差进行估计和修正,再与 UKF 结合进行预测和更新,从而达到削弱多路径误差的目的。

1 多路径误差模型建立

多路径误差^[10]是指由于测站周边反射物反射的卫星信号与卫星直接发射的信号在进入 BDS 接收机时产生了干涉现象,从而导致接收机接收到的观测值与真实值之间存在偏差。多路径效应与周围环境有关,并受到其他许多因素的影响,故而有很强的时空环境效应^[11]。本文通过导航电文参数和模型校正等^[12-13]措施来修正卫星钟差、对流层和电离层误差带来的影响^[14],即只在多路径误差下将某时刻接收到的经纬度大小及其变化速率和加速度作为状态向量,即在 k 历元时刻,系统状态向量为 $\mathbf{X}_k = [n_k, n'_k, n''_k]^T$,则系统在历元 $k-1$ 时刻的转移方程为:

$$\mathbf{X}_k = \begin{bmatrix} 1 & t & \frac{t^2}{2} \\ 0 & 1 & t \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{X}_{k-1} + \begin{bmatrix} \frac{t^3}{6} \\ \frac{t^2}{2} \\ t \end{bmatrix} \mathbf{W}_{k-1} \quad (1)$$

式中: t 为两相邻历元间隔; \mathbf{W}_{k-1} 为系统在历元 $k-1$ 时刻的过程噪声。

将 k 历元时刻的观测向量记为 $\mathbf{Z}_k = n_k$, 则系统在历元 k 时刻的观测方程为:

$$\mathbf{Z}_k = [1 \ 0 \ 0] \mathbf{X}_k + \mathbf{V}_k \quad (2)$$

式中: \mathbf{V}_k 为系统在历元 k 时刻的观测噪声。

将式(1)、(2)简写成式(3)形式。

$$\begin{cases} \mathbf{X}_k = \Phi_{klk-1} \mathbf{X}_{k-1} + \Gamma_{klk-1} \mathbf{W}_{k-1} \\ \mathbf{Z}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{V}_k \end{cases} \quad (3)$$

式中: Φ_{klk-1} 为系统的状态转移矩阵; Γ_{klk-1} 为过程噪声输入矩阵; \mathbf{H}_k 为量测矩阵。此处的 \mathbf{W}_{k-1} 为白噪声,服从方差为 \mathbf{Q}_{k-1} 的高斯分布, \mathbf{V}_k 为有色噪声。

假设有色噪声 \mathbf{V}_k 服从一阶 AR 模型^[15],即:

$$\mathbf{V}_k = \psi_{klk-1} \mathbf{V}_{k-1} + \xi_{k-1} \quad (4)$$

式中: ξ_{k-1} 是方差为 \mathbf{R}_{k-1} 的高斯白噪声。

2 有色观测噪声下 UKF 和 Sage-Husa 算法

本文将有色噪声改化成白噪声的形式,而后利用改进的 Sage-Husa 算法收敛速度快且不需考虑均值估计带来新误差的特点,把它与 UKF 相结合,从而有效的削弱多路径误差。

2.1 有色观测噪声改化

白噪声是一种理想情况下的噪声,而在实际多路径误差处理中必须考虑有色噪声的影响,故而可以利用量测状态扩充法^[16]解决量测噪声为有色噪声的情况,由式(3)可得:

$$\mathbf{V}_k = \mathbf{Z}_k - \mathbf{H}_k \mathbf{X}_k \quad (5)$$

式(5)结合式(4)得:

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_{k+1} &= \mathbf{H}_{k+1} \mathbf{X}_{k+1} + \mathbf{V}_{k+1} = \\ & \mathbf{H}_{k+1} (\Phi_{k+1k} \mathbf{X}_k + \Gamma_{k+1k} \mathbf{W}_k) + \psi_{k+1k} \mathbf{V}_k + \xi_k = \\ & \mathbf{H}_k \Phi_{klk-1} \mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{H}_k \Gamma_{klk-1} \mathbf{W}_{k-1} + \\ & \psi_{klk-1} \mathbf{Z}_{k-1} - \psi_{klk-1} \mathbf{H}_{k-1} \mathbf{X}_{k-1} + \xi_{k-1} \end{aligned} \quad (6)$$

即可得:

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_{k+1} - \psi_{k+1k} \mathbf{Z}_k &= (\mathbf{H}_{k+1} \Phi_{k+1k} - \psi_{k+1k} \mathbf{H}_k) \mathbf{X}_k + \\ & \mathbf{H}_{k+1} \Gamma_{k+1k} \mathbf{W}_k + \xi_k \end{aligned} \quad (7)$$

令:

$$\mathbf{Z}_k^* = \mathbf{Z}_{k+1} - \psi_{k+1k} \mathbf{Z}_k \quad (8)$$

$$\mathbf{H}_k^* = \mathbf{H}_{k+1} \Phi_{k+1k} - \psi_{k+1k} \mathbf{H}_k \quad (9)$$

$$\mathbf{V}_k^* = \mathbf{H}_{k+1} \Gamma_{k+1k} \mathbf{W}_k + \xi_k \quad (10)$$

由式(10)可知, \mathbf{V}_k^* 是零均值的白噪声,故 \mathbf{V}_k^* 方差为:

$$\mathbf{R}_k^* = \mathbf{H}_{k+1} \Gamma_{k+1k} \mathbf{Q}_k \Gamma_{k+1k}^T \mathbf{H}_{k+1}^T + \mathbf{R}_k \quad (11)$$

由式(8)~(10)可得量测方程:

$$\mathbf{Z}_k^* = \mathbf{H}_k^* \mathbf{X}_k + \mathbf{V}_k^* \quad (12)$$

式中:原来的观测向量 \mathbf{Z}_k 与改化的新观测向量 \mathbf{Z}_k^* 等价。

将式(3)中的观测方程换由式(12)表示,可得到新的状态空间方程,UKF 算法和 AUKF 算法都是在新的方程组下进行的。

2.2 UKF 算法描述

UKF 算法^[17]摒弃了将非线性函数线性化的做法,而是以卡尔曼滤波为框架,对一步预测方程采用 UT 来解决均值和方差非线性化的问题。

UKF 算法首先利用 UT 变换在估计点附近确定 Sigma 点,本文采用常用的对称分布采样的 UT 变换,具体采样方法如下。

记状态向量 \mathbf{X} 为 n 维向量,其均值为 \bar{x} ,方差为 \mathbf{P} ,通过以下的 UT 变换得到 $2n + 1$ 个 Sigma 点 \mathbf{X} 和相应的权值 ω 。

首先计算 $2n + 1$ 个 Sigma 点:

$$\begin{cases} \mathbf{X}^0 = \bar{\mathbf{X}}, i = 0 \\ \mathbf{X}^i = \bar{\mathbf{X}} + (\sqrt{(n + \lambda)\mathbf{P}})_i, i = 1, \dots, n \\ \mathbf{X}^i = \bar{\mathbf{X}} - (\sqrt{(n + \lambda)\mathbf{P}})_i, i = n + 1, \dots, 2n \end{cases} \quad (13)$$

式中: $(\sqrt{\mathbf{P}})^T (\sqrt{\mathbf{P}}) = \mathbf{P}$, $(\sqrt{\mathbf{P}})_i$ 表示矩阵方根的第 i 列。

然后计算采样点的相应权值:

$$\begin{cases} \omega_m^0 = \frac{\lambda}{n + \lambda} \\ \omega_c^0 = \frac{\lambda}{n + \lambda} + (1 + \alpha^2 + \beta) \\ \omega_m^i = \omega_c^i = \frac{\lambda}{2(n + \lambda)}, i = 1, \dots, 2n \end{cases} \quad (14)$$

式中:上标 $0, i$ 表示第 0 和第 i 个采样点;下标 m 表示均值; c 表示协方差。参数 λ 为缩放比例参数,即 $\lambda = \alpha^2(n + \kappa) - n$, α 用于控制采样点的分布状态, $\beta \geq 0$ 为权系数, κ 为待选参数,其值的选取没有具体界限,并且要保证矩阵 $\sqrt{(n + \lambda)\mathbf{P}}$ 为半正定矩阵。本文中,取 $\alpha = 0.01, \kappa = 0, \beta = 2$ 。

在通过 UT 变换获得采样点之后,有色观测噪声下的 UKF 算法步骤如下。

1) 初始化状态变量 $\hat{\mathbf{X}}_0$ 和协方差 \mathbf{P}_0 。

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{X}}_0 = \bar{\mathbf{X}}_0 + \mathbf{D}_{x_0}^{-1} \mathbf{H}_0^T (\mathbf{H}_0 \mathbf{D}_{x_0} \mathbf{H}_0^T + \mathbf{R}_0)^{-1} (\mathbf{Z}_0 - \bar{\mathbf{Z}}_0) \\ \mathbf{P}_0 = (\mathbf{D}_{x_0}^{-1} + \mathbf{H}_0^T \mathbf{D}_{x_0} \mathbf{H}_0)^{-1} \end{cases} \quad (15)$$

2) 利用式(13)获得一组采样点和相应采样点的预测值。

$$\mathbf{X}_{klk}^i = [\hat{\mathbf{X}}_{klk}, \hat{\mathbf{X}}_{klk} + \sqrt{(n + \lambda)\mathbf{P}_{klk}}, \hat{\mathbf{X}}_{klk} - \sqrt{(n + \lambda)\mathbf{P}_{klk}}] \quad (16)$$

$$\mathbf{X}_{k+1k}^i = f(k, \mathbf{X}_{klk}^i) \quad (17)$$

3) 利用式(14)计算系统的状态预测值及协方差阵预测值。

$$\hat{\mathbf{X}}_{k+1k} = \sum_{i=0}^{2n} \omega^i \mathbf{X}_{k+1k}^i \quad (18)$$

$$\mathbf{P}_{k+1k} = \sum_{i=0}^{2n} \omega^i (\hat{\mathbf{X}}_{k+1k} - \mathbf{X}_{k+1k}^i) (\hat{\mathbf{X}}_{k+1k} - \mathbf{X}_{k+1k}^i)^T + \mathbf{Q}_{k+1} \quad (19)$$

4) 根据一步预测值,再次进行 UT 变换,产生新的 Sigma 点集,从而得到采样点的观测值。

$$\mathbf{X}_{k+1k}^i = [\hat{\mathbf{X}}_{k+1k}, \hat{\mathbf{X}}_{k+1k} + \sqrt{(n + \lambda)\mathbf{P}_{k+1k}}, \hat{\mathbf{X}}_{k+1k} - \sqrt{(n + \lambda)\mathbf{P}_{k+1k}}] \quad (20)$$

$$\mathbf{Z}_{k+1k}^{*i} = h^*(\mathbf{X}_{k+1k}^i) \quad (21)$$

5) 由系统量测预测值和互协方差计算增益矩阵。

$$\hat{\mathbf{Z}}_{k+1k}^* = \sum_{i=0}^{2n} \omega^i \mathbf{Z}_{k+1k}^{*i} \quad (22)$$

$$\mathbf{P}_{Z_k Z_k} = \sum_{i=0}^{2n} \omega^i (\mathbf{Z}_{k+1k}^{*i} - \hat{\mathbf{Z}}_{k+1k}^*) * (\mathbf{Z}_{k+1k}^{*i} - \hat{\mathbf{Z}}_{k+1k}^*)^T + \mathbf{R}_{k+1}^* \quad (23)$$

$$\mathbf{P}_{X_k Z_k} = \sum_{i=0}^{2n} \omega^i (\mathbf{X}_{k+1k}^i - \hat{\mathbf{X}}_{k+1k}) * (\mathbf{Z}_{k+1k}^{*i} - \hat{\mathbf{Z}}_{k+1k}^*)^T \quad (24)$$

$$\mathbf{K}_{k+1} = \mathbf{P}_{X_k Z_k} \mathbf{P}_{Z_k Z_k}^{-1} \quad (25)$$

6) 计算系统的状态更新和协方差更新。

$$\hat{\mathbf{X}}_{k+1k+1} = \hat{\mathbf{X}}_{k+1k} + \mathbf{K}_{k+1} (\mathbf{Z}_{k+1} - \hat{\mathbf{Z}}_{k+1k}^*) \quad (26)$$

$$\mathbf{P}_{k+1k+1} = \mathbf{P}_{k+1k} - \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{P}_{Z_k Z_k} \mathbf{K}_{k+1}^T \quad (27)$$

标准的 UKF 算法是在假设系统已经能够精确建模的基础上进行的滤波,但在实际应用中,有可能存在状态转移矩阵、状态噪声、量测矩阵、量测噪声不能准确建模的情况,故本文采用改进的 Sage-Husa 算法来解决噪声模型未知的问题。

2.3 改进的 Sage-Husa 自适应 UKF 算法

在衍生的卡尔曼滤波算法中, Sage-Husa 算法是用来解决状态噪声协方差 \mathbf{Q} 和量测噪声协方差 \mathbf{R} 固定不变的缺点。但是,传统的 Sage-Husa 算法也要同时对状态噪声均值 q 和量测噪声均值 r 进行估计^[18],常常会导致估计偏差。因此,本文提出了改进的 Sage-Husa 算法,在此算法中构造了新的 \mathbf{Q} 阵和 \mathbf{R} 阵,取消了可能造成估计偏差的 r 阵和 q 阵,并且 \mathbf{Q}, \mathbf{R} 只与初始值和当前值有关,按比例因子值获取信息。故结合文献[19-20]可得以下 $\mathbf{R}_k^*, \mathbf{Q}_k$ 递推式:

$$\mathbf{R}_k^* = (1 - \alpha_1) \mathbf{R}_0^* + \alpha_1 (\boldsymbol{\varepsilon}_k \boldsymbol{\varepsilon}_k^T - \mathbf{H}_k^* \mathbf{P}_{klk-1} \mathbf{H}_k^{*T}) \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{Q}_k &= (1 - \alpha_2) \mathbf{Q}_0 + \alpha_2 (\mathbf{K}_k \boldsymbol{\varepsilon}_k \boldsymbol{\varepsilon}_k^T \mathbf{K}_k^T + \mathbf{P}_k - \\ &\Phi_{klk-1} \mathbf{P}_{k-1} \Phi_{klk-1}^T - 2\mathbf{K}_k \mathbf{R}_k \mathbf{K}_k^T - 2\mathbf{K}_k \mathbf{H}_k \mathbf{P}_{klk-1} \mathbf{H}_k^T \mathbf{K}_k^T + \\ &\mathbf{P}_{klk-1} \mathbf{H}_k^T \mathbf{K}_k^T + \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k \mathbf{P}_{klk-1}) \end{aligned} \quad (29)$$

式中:预设比例因子 $0 < \alpha_1 < 1, 0 < \alpha_2 < 1; \mathbf{R}_0, \mathbf{Q}_0$ 为协方差初始值,新息序列 $\boldsymbol{\varepsilon}_k = \mathbf{Z}_k^* - \mathbf{H}_k^* \mathbf{X}_{klk-1}$ 。

将式(28)、(29)代入式(19)、(23)则可得到有色观测噪声下的 AUKF 算法。其具体算法步骤如下:1)读取接收机上的经纬度数据,将其代入到新的多路径误差模型中,并且初始化状态变量 $\hat{\mathbf{X}}_0$ 、协方差 \mathbf{P}_0 、过程噪声方差 \mathbf{Q}_0 和量测噪声 \mathbf{R}_0 ;2)读取当前的历元数据,进行 UT 变换,获得 Sigma 点、Sigma 的权值和相应 Sigma 点的预测值;3)计算系统状态预测值和协方差预测值,从而计算增益矩阵,然后进行状态更新和协方差更新;4)将改进的 Sage-Husa 算法进行更新,即将 \mathbf{R}_k^* 、 \mathbf{Q}_k 更新,然后用于下一次循环计算式(19)和(23);5)判断一下当前的历元是否大于所取 K 值,是则结束算法,否则返回步骤 2)。

其算法流程图如下图 1 所示。

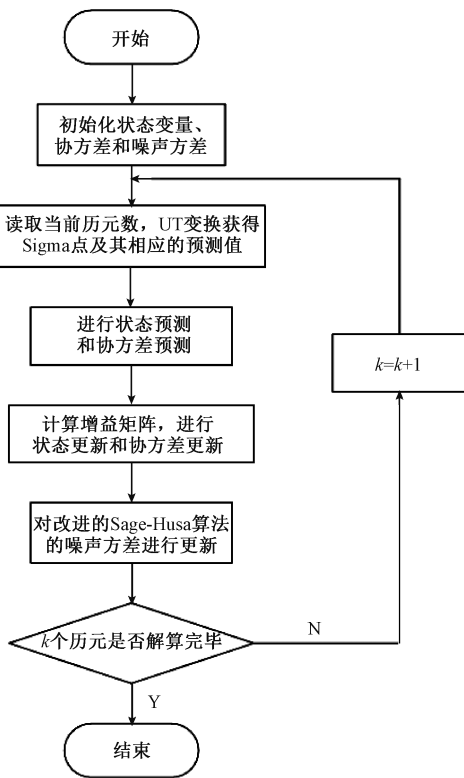


图 1 AUKF 算法流程

Fig. 1 AUKF algorithm flow chart

3 实验结果与分析

为了验证本文所提出的算法对多路径误差削弱的效果,将进行如下实验。本实验接收机采用的模块是由 STM32F103C8T6 和陀螺仪传感器组成的十轴惯导模块。将该模块放置在肥工业大学屯溪路校区足球场上,保持周围环境的晴朗和开阔,再结合有源外接天线即可接收

BDS 的经纬度数据信息。

接下来将得到的经纬度数据导入到 MATLAB 中,分别在 500 个历元下,用 UKF 算法(传统的算法)、UKF1 算法(有色观测噪声模型下的 UKF 算法)、AUKF 算法(改进的 Sage-Husa 算法)和 AUKF1 算法(有色观测噪声模型下的 AUKF 算法)对经纬度进行滤波,通过对结果分析对比,比较不同算法对多路径误差的消除情况。首先将对实验的初始值进行设置,其具体初始值如表 1 所示。

表 1 实验初始值设置

Table 1 Experimental initial value setting

方案	参数	初始值
UKF	历元数	500
	矩阵 \mathbf{Q}	$\text{diag}([1, 0.1, 0.01])$
	矩阵 \mathbf{R}	1
	采样时间	1
UKF1	历元数	500
	矩阵 \mathbf{Q}_0	$\text{diag}([1, 0.1, 0.01])$
	矩阵 \mathbf{R}_0	1
	比例因子 α_1	0.5
AUKF1	比例因子 α_2	0.5
	采样时间	1

将表 1 的参数初始值代入到系统方程中进行解算,可以分别得到经纬度处理的误差、速度和加速度。由于速度与加速度对反应多路径误差不够明显,故接下来主要分析和比较不同算法下经纬度误差大小和误差收敛速度。

图 2 所示为用普通 UKF 处理多路径误差的结果,由图可知纬度上的平均误差为 2.49 m、均方根差为 2.95 m,经度上的平均误差为 2.52 m、均方根差为 3.12 m。在普通的 UKF 算法中,将过程噪声和量测噪声作为已知噪声,故而导致误差波动范围较大,并且由于有色噪声的影响图 2(a) 在 50、250 等历元处,图 2(b) 在 210、305 等历元处发生明显跳变。

在处理多路径误差时,由于噪声的统计特性并不都是确定的,需要考虑到有色噪声的影响。图 3 所示为使用有色观测噪声模型下的多路径误差处理,由图 3 可知在纬度平均误差为 2.11 m、均方根差为 2.40 m,经度上平均误差为 2.02 m、均方根差为 2.44 m。比较图 2 和 3 可以看出,顾及有色观测噪声的 UKF 滤波效果明显优于普通 UKF,误差减小了 25%,且在历元跳变方面也有了一点的改善。

考虑到噪声的不确定性,引入改进后的自适应 UKF 算法,其滤波结果如图 4 所示。可以看出,在添加 Husa-Sage 算法后,由于系统要进行后验估计,导致了在滤波开始阶段向负无穷处发散,而后随着采样的增加,后验估计

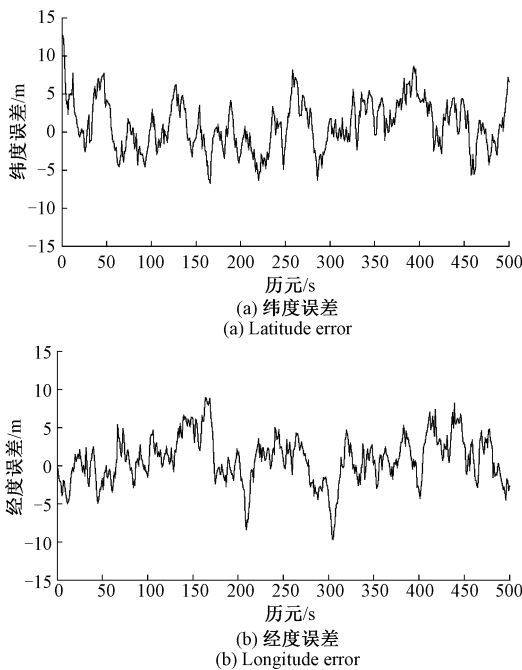


图2 UKF 滤波结果
Fig. 2 UKF filtering results

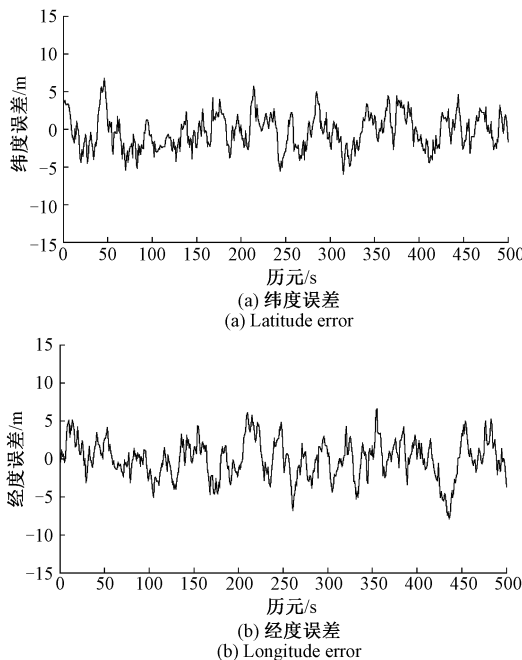


图3 UKF1 滤波结果
Fig. 3 UKF1 filtering results

逐渐正确,滤波开始收敛。由图4可得,经纬度误差在30历元左右开始收敛,收敛之后纬度平均误差为1.59 m、均方根差为2.37 m,经度平均误差为1.62 m、均方根差为2.5 m。但是因为有色噪声的影响,图4(a)分别在140、355等历元处,图4(b)在355、470等历元处发生反

常的跳变。相对图3来说,AUKF的均方根差并未减小,是因为前30个历元的发散以及反常跳变导致均方根差的增大。

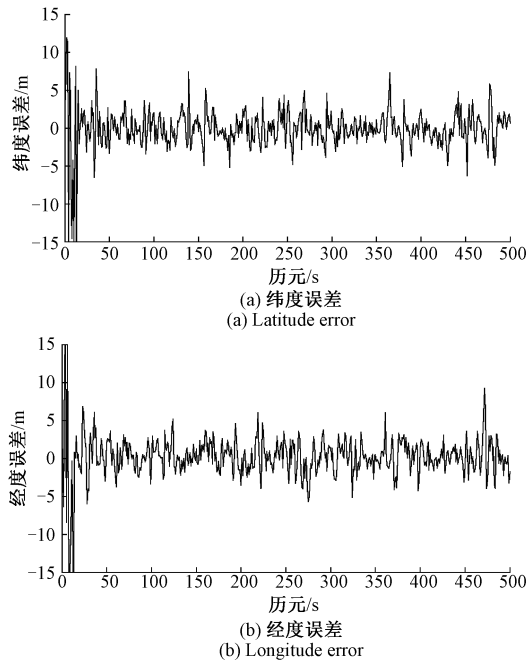


图4 AUKF 滤波结果
Fig. 4 AUKF filtering results

由图3、4可知,有色观测噪声建模和自适应滤波都可以削弱多路径误差,但是都只考虑了噪声的某一方面影响,而将有色噪声与自适应结合起来,考虑到了噪声的不确定性,故可以提升算法性能。在有色观测噪声模型下进行AUKF滤波如图5所示。由图5可知,经纬度误差大概在20历元处收敛,纬度平均误差为0.98 m、均方根差为1.61 m,经度平均误差为1.05 m、均方根差为1.72 m。相比于图3和4,有色观测噪声下的AUKF的误差削弱效果明显优于它们,但也可以看出收敛历元较图4来说改进比较小。

结合表2和图2~5可知,普通的UKF削弱多路径误差的效果最差。并且UKF1解决了观测噪声为有色噪声的情况、AUKF解决状态噪声和观测噪声模型未知的情况,故而UKF1、AUKF的滤波效果均优于普通UKF滤波。相对而言,滤波效果最好的是既考虑有色噪声又考虑噪声大小未知的AUKF1,它的平均误差和均方根差均有明显降低,和普通UKF相比,AUKF1的误差削弱效果达到了60%左右。

4 结论

为了改善普通UKF在处理多路径误差时默认其噪

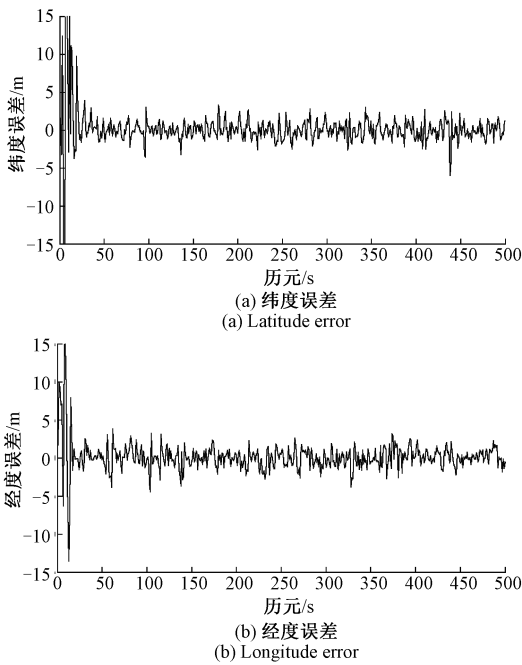


图 5 AUKF1 滤波结果
Fig. 5 AUKF1 filtering results

表 2 实验方案对比

Table 2 Comparison of experimental schemes (m)

实验方案	纬度平均 误差	纬度均方 根差	经度平均 误差	经度均方 根差
UKF	2.49	2.95	2.52	3.12
UKF1	2.11	2.40	2.02	2.44
AUKF	1.59	2.37	1.62	2.50
AUKF1	0.98	1.61	1.05	1.72

声统计特性已知的情况,提出了一种针对噪声模型未知的误差处理方法。该方法先利用量测状态扩增法改善有色观测噪声,而后在此模型下再将改进的 Husa-Sage 算法与普通的 UKF 算法相结合,进而削弱多路径误差。实验结果表明,本文使用的方法在达到收敛历元之后,经纬度的平均误差和方差均有了明显的减少,故而比普通的 UKF 能够更好的处理有色噪声和噪声统计参数未定的情况。因此,在环境复杂的情况下,本文的算法对于削弱多路径误差,提高定位精度具有较强的适用性。

参考文献

[1] 张骥. 北斗卫星导航系统现状及测量中的应用[J]. 信息通信, 2019(8) : 215-216.
ZHANG J. The current status and application of Beidou satellite navigation system [J]. Information Communication, 2019 (8) : 215-216.

[2] 李克昭, 韩梦泽, 孟福军. 北斗系统的特色、机遇与挑战[J]. 导航定位学报, 2014, 2(2) : 21-25.

LI K ZH, HANG M Z, MENG F J. Features, opportunities and challenges of Beidou system [J]. Journal of Navigation and Positioning, 2014, 2 (2) : 21-25.

[3] 吴海玲, 高丽峰, 汪陶胜, 等. 北斗卫星导航系统发展与应用[J]. 导航定位学报, 2015, 3(2) : 1-6.
WU H L, GAO L F, WANG T SH, et al. Development and application of Beidou satellite navigation system[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2015, 3(2) : 1-6.

[4] 强明辉, 李志龙. 北斗卫星导航系统定位精度分析[J]. 舰船电子工程, 2019, 39(2) : 38-40, 46.
QIANG M H, LI ZH L. Analysis of positioning accuracy of beidou satellite navigation system [J]. Ship Electronic Circuit, 2019, 39 (2) : 38-40, 46.

[5] 黄勤豪, 叶嘉丽, 梁炎峰. 北斗卫星导航系统多路径效应分析[J]. 科技资讯, 2018, 16(5) : 22-24.
HUANG Q H, YE J L, LIANG Y F. Multipath effect analysis of beidou satellite navigation system [J]. Science and Technology Information, 2018, 16 (5) : 22-24.

[6] 李川. GPS 多路径误差削弱方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
LI CH. Research on GPS multipath error reduction method[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.

[7] 董健康, 安东. 自适应卡尔曼滤波在组合导航中的应用研究[J]. 计算机技术与发展, 2011, 21(10) : 183-185, 189.
DONG J K, AN D. Application of adaptive Kalman filter in integrated navigation [J]. Computer Technology and Development, 2011, 21 (10) : 183-185, 189.

[8] 王康, 刘莉, 杜小菁, 等. 基于 UKF 的 GPS 定位算法[J]. 宇航学报, 2011, 32(4) : 795-801.
WANG K, LIU L, DU X J, et al. GPS positioning algorithm based on UKF [J]. Journal of Astronautics, 2011, 32 (4) : 795-80.

[9] 李燕, 鲁昌华, 张国强, 等. 自适应 UKF 在北斗伪距定位中的研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(2) : 125-131.
LI Y, LU CH H, ZHANG G Q, et al. Research on adaptive UKF in Beidou pseudorange positioning [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2019, 33 (2) : 125-131.

[10] 潘璠. 简析 GPS 测量中的多路径效应[J]. 中国水运. 航道科技, 2019(2) : 64-68.
PAN F. Analyzing the multipath effects in GPS measurements [J]. China Water Transport. Waterway Technology, 2019 (2) : 64-68.

[11] 李川, 魏世玉, 刘星, 等. 顾及有色噪声的卡尔曼滤波在多路径误差削弱中的应用[J]. 全球定位系统,

- 2019,44(1):62-67.
LI CH, WEI SH Y, LIU X, et al. Application of Kalman filter with colored noise in multipath error reduction[J]. Global Positioning System, 2019,44(1):62-67.
- [12] 胡辉,陈艳. GPS 接收机的定位误差分析[J]. 河南师范大学学报(自然科学版),2010,38(6):68-71.
HU H, CHEN Y. Analysis of positioning error of GPS receiver [J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science), 2010,38(6):68-71.
- [13] 翟显,刘瑞华,王剑,等. 北斗卫星导航系统误差分析与评估[J]. 现代导航,2018,9(1):10-15,17.
ZHAI X, LIU R H, WANG J, et al. Error analysis and evaluation of Beidou satellite navigation system [J]. Modern Navigation, 2018,9(1):10-15,17.
- [14] 李兆铭. 卫星导航接收机误差分析[J]. 科学技术创新,2019(16):19-20.
LI ZH M. Error analysis of satellite navigation receiver[J]. Science and Technology Innovation, 2019(16):19-20.
- [15] 伍锡锈. 利用一阶 AR 模型的 Kalman 滤波系统误差研究[J]. 测绘地理信息,2013,38(4):33-35.
WU X X. Research on Kalman filter system error using first order AR model [J]. Geomatics of Surveying and Mapping, 2013,38(4):33-35.
- [16] 马丽丽,张曼,陈金广. 有色噪声条件下的高斯和卡尔曼滤波算法[J]. 计算机工程与设计,2015,36(10):2856-2859,2865.
MA L L, ZHANG M, CHEN J G. Gaussian and Kalman filtering algorithms under colored noise conditions [J]. Computer Engineering and Design, 2015,36(10):2856-2859,2865.
- [17] 张文,孙瑞胜. EKF 与 UKF 的性能比较及应用[J]. 南京理工大学学报 2015,39(5):614-618.
ZHANG W, SUN R SH. Performance comparison and application of EKF and UKF [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2015,39(5):614-618.
- [18] 杨倩,王洋,赵红梅,等. 基于强跟踪 AUKF 的目标跟踪算法[J]. 现代电子技术,2016,39(17):30-34.
YANG Q, WANG Y, ZHAO H M, et al. Target tracking algorithm based illumination intensity of the tracking AUKF [J]. Modern Electronic Technology, 2016,39(17):30-34.

- [19] 魏伟,秦永元,张晓冬,等. 对 Sage-Husa 算法的改进[J]. 中国惯性技术学报,2012,20(6):678-686.
WEI W, QIN Y Y, ZHANG X D, et al. Improvement of Sage-Husa algorithm [J]. Chinese Journal of Inertial Technology, 2012,20(6):678-686.
- [20] YUAN G N, XIE Y J, SONG Y, et al. Multipath parameters estimation of weak GPS signal based on new colored noise unscented Kalman filter [C]. IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA), 2010.

作者简介



刘春,1988 年于哈尔滨理工大学获得学士学位,1996 年于浙江大学获得硕士学位,现为合肥工业大学副教授,主要研究方向为检测技术与自动化装置、电工理论与新技术。

E-mail:hliuchun@126.com

Liu Chun received B. Sc. from Harbin University of Science and Technology in 1988 and M. Sc. from Zhejiang University in 1996. She is currently an associate professor at Hefei University of Technology. Her main research interests include testing technology and automation equipment, electrical theory and new technology.



魏吉祥,2014 年于辽宁石油化工大学获得学士学位,现为合肥工业大学硕士研究生,主要研究方向为检测技术与自动化装置。

E-mail:1169370670@qq.com

Wei Jixiang received B. Sc. from Liaoning Shihua University in 2014. She is currently a M. Sc. candidate at Hefei University of Technology. Her main research interests include testing technology and automation equipment.



李维华(通信作者),1993 年于合肥工业大学硕士学位,现为合肥工业大学副教授,研究方向为新能源发电及其应用技术。

E-mail:Liwh2000@163.com

Li Weihua (Corresponding author) received M. Sc. degree from Hefei University of Technology in 1993. Now he is an associate professor at Hefei University of Technology. His main research interests includes new energy generation and its application technology.