

移动卫星通信低成本多传感器融合姿态估计方法

伍宗伟^{1,2}, 姚敏立¹, 马红光¹, 贾维敏¹, 田方浩¹

(1. 第二炮兵工程大学 403 教研室, 710025, 西安; 2. 解放军 96265 部队, 473000, 河南 南阳)

摘要: 针对低成本移动卫星通信终端的天线姿态估计问题, 提出了一种基于自适应滤波的低成本多传感器融合姿态估计方法. 该方法通过融合微机械陀螺信息和加速度计重力场测量信息来得到精确的水平姿态角估计; 通过融合单基线 GPS 高精度的航向角测量与陀螺信息保证航向角精度. 在单基线 GPS 失锁的情况下, 利用机动加速度观测对融合滤波器进行自适应控制, 与标准平方根无迹卡尔曼滤波器相比, 有效地克服了机动加速度影响. 实验结果表明: 所提出的低成本姿态估计方法在单基线 GPS 锁定或短时间失锁情况下, 能够满足宽带移动卫星通信天线波束对准精度要求, 三维姿态角误差均小于 0.5° .

关键词: 移动卫星通信; 多传感器融合; 姿态估计; 自适应滤波; 无迹卡尔曼滤波

中图分类号: TN927 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)12-0055-07

An Attitude Estimation Method Using Multi-Sensor Fusion for Low-Cost Mobile Satellite Communication

WU Zongwei^{1,2}, YAO Minli¹, MA Hongguang¹, JIA Weimin¹, TIAN Fanghao¹

(1. Staff Room 403, The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China;

2. The 96265th Unit of PLA, Nanyang, Henan 473000, China)

Abstract: A new attitude estimation system is proposed to estimate the antenna attitude for low-cost mobile satellite communication. The system uses the adaptive filtering based multi-sensor fusion method to integrate the inertial measurement unit and GPS for attitude estimation. The complementary property between the angles derived by the integration of micro-electro-mechanical system (MEMS) gyros and the gravity field vector measurement from MEMS accelerometers is utilized to estimate the level angles. Meanwhile, the high accuracy of the single baseline GPS is fused with gyros integration to ensure the heading accuracy. A real-time adaptive method is proposed to overcome the maneuver acceleration disturbance, and shows better performance than the standard unscented Kalman filter. The adaptive method is controlled by the acceleration observation when the GPS is unlocked. Experimental results show that the errors of three angles estimated by the proposed system are all smaller than 0.5° , and meet the beam pointing accuracy requirement for broadband mobile satellite communication in the condition that the GPS is locked or unlocked in a certain short while.

Keywords: mobile satellite communication; multi-sensor fusion; attitude estimation; adaptive filtering; unscented Kalman filter

姿态估计问题广泛应用于航天器姿态控制、无人机姿态稳定、车辆导航、车辆稳定平台等领域, 其

姿态估计的主要方法有2种:一是利用多个传感器矢量观测来求解 Wahba 问题,由于可以利用星敏感器、太阳敏感器等多个观测器来估计飞行器的姿态,并且可以不采用陀螺,所以在空间领域有着广泛的应用;二是利用陀螺和辅助传感器融合,通过最优估计来得到精确的姿态估计,这一类方法多是在近地以及地面环境中采用,主要依靠陀螺积分得到姿态角,用辅助传感器来校正陀螺漂移。当前热门的车载移动卫星通信技术即是车载稳定平台的一个典型应用,采用的方法是利用陀螺与相应的辅助传感器进行数据融合实现姿态估计。车载移动卫星通信技术,国内俗称动中通(satcom-on-the-move, SOTM),广泛应用于军事边防、公安消防、反恐安保、应急救援等多个军民领域^[1],是目前卫星通信领域研究的热点。动中通需要快速隔离载体姿态扰动,时刻保持天线与卫星在方位、俯仰和极化三维上波束对准,才能正常工作。当前,动中通大都采用基于高精度惯性器件和 GPS 的姿态航向参考系统^[2],造价昂贵,严重地制约了动中通的应用和推广,因此,开发出低成本的动中通姿态估计系统意义重大。

文献[3]代表了一类基于 GPS 的低成本姿态估计方法,虽然估计精度较高,但是其数据输出速率低且存在输出延迟,无法跟踪车辆快速的姿态变化,且必须同时接收到3颗以上的 GPS 卫星信号,极易因为遮挡和车辆的迅速机动而失锁;文献[4]代表了基于微机电技术(Micro-Electro Mechanical Systems, MEMS)的低成本姿态估计方法,利用 MEMS 陀螺和 MEMS 加速度计以及磁传感器估计姿态,由于是估计人体手臂运动姿态,没有考虑磁传感器干扰以及机动加速度干扰;文献[5]虽然考虑了加速度计受载体机动加速度的影响,采用了加速度计的范数大于重力加速度 g 时不融合的开关判断,由于车体振动等原因造成 MEMS 加速度计误差较大,使得 g 判断条件近乎完全失效,另外磁传感器在车载应用环境中容易受到电磁干扰,不足以保证航向精度;文献[6]的改进也仅仅是增加了卫星信号跟踪系统来进行方位角估计,实际上增加了系统的实现复杂度。

本文根据移动卫星通信终端的天线波束对准精度(角度误差绝对值小于 0.5°)以及低成本要求,采用三轴 MEMS 陀螺和加速度计估计水平姿态角,航向角依靠精度较高的单基线 GPS(精度为 0.1°)来保证精度。采用自适应平方根无迹卡尔曼滤波器(unscented Kalman filter, UKF)进行多传感器融合,有效地克服了单基线 GPS 容易失锁无法提供航

向角以及车体机动加速度对加速度计造成较大干扰等问题。最后,通过行车实验对本文提出的低成本姿态估计方法进行了验证。

1 姿态估计平方根 UKF 算法

1.1 姿态运动学描述

动中通波束姿态对准与一般的视线对准不同,对于线极化波束,还需要极化对准,否则波束存在滚动自由度,影响通信,因此必须进行三维姿态估计和控制。动中通安装于车体时,根据坐标变换原理,天线的三维姿态估计实际上转换为对车体姿态的三维估计。

首先定义坐标系:地理坐标系取为东北天坐标系,车体坐标系的 x 、 y 、 z 轴分别指向车右侧方向、车头方向以及车体正上方。采用无奇异可表示全姿态的姿态四元数来表示姿态角,四元数可以用其4个分量表示为具有4个参数的复数形式^[7]

$$q = q_1 + q_2 i + q_3 j + q_4 k \quad (1)$$

根据四元数的动力学方程可得

$$\dot{q} = \frac{1}{2} \Xi(q) \omega = \frac{1}{2} \Omega(\omega) q \quad (2)$$

式中

$$\Xi(q) = \begin{bmatrix} -q_2 & -q_3 & -q_4 \\ q_1 & -q_4 & q_3 \\ q_4 & q_1 & -q_2 \\ -q_3 & q_2 & q_1 \end{bmatrix};$$

$$\Omega(\omega) = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_x & -\omega_y & -\omega_z \\ \omega_x & 0 & \omega_z & -\omega_y \\ \omega_y & -\omega_z & 0 & \omega_x \\ \omega_z & \omega_y & -\omega_x & 0 \end{bmatrix}$$

其中 $\omega = [\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T$ 为在车体坐标系中的姿态变化角速度。陀螺测量值误差一般建模为测量白噪声和慢变零偏,慢变零偏可以认为是白噪声积分形成的随机游走噪声^[7]

$$\dot{\omega}_m = \omega + b + n_\omega; \quad \dot{b} = n_b \quad (3)$$

式中: ω_m 为角速度测量值; ω 为真实角速度; b 为慢变零偏; n_ω 为测量白噪声; n_b 为陀螺零偏游走随机驱动白噪声。将式(3)带入式(2)得

$$\dot{q} = \frac{1}{2} \Omega(\omega_m - b - n_\omega) q = \frac{1}{2} \Omega(\omega_m) q - \frac{1}{2} \Xi(q) b - \frac{1}{2} \Xi(q) n_\omega \quad (4)$$

因此,系统的状态方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{b} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\Omega(\omega_m) & -\frac{1}{2}\Xi(q) \\ \mathbf{0}_{3 \times 4} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q \\ b \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} q \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\Xi(q) & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 4} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_w \\ n_b \end{bmatrix}$$

从式(5)可以看出,陀螺的测量值作为状态方程的时间传递变量,状态方程为线性的,这也是采用四元数表示姿态的一个优势。

单基线 GPS 的测量值为航向角 ψ , 加速度计测量值为重力矢量的分量 a_x 、 a_y 、 a_z , 根据几何关系, 可得^[6]

$$a_y = \sin(\theta); \frac{a_x}{a_z} = -\tan(\varphi) \quad (6)$$

结合四元数与欧拉角关系^[8]的测量方程为

$$\left. \begin{aligned} \psi &= \arctan \frac{2(q_2q_3 - q_1q_4)}{(q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 - q_4^2)} + w_\psi \\ a_y &= 2(q_3q_4 + q_1q_2) + w_\theta \\ a_x/a_z &= \frac{2(q_2q_4 - q_1q_3)}{(q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 + q_4^2)} + w_\varphi \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: w_ψ 、 w_θ 、 w_φ 分别为零均值白噪声, 其中的航向角 ψ 在单基线 GPS 锁定时才能得到; a_x 、 a_y 、 a_z 为加速度计重力测量分量, 是在车体没有机动加速度的情况下得到的, 所以式(7)可以认为是理想情况下的测量方程。

1.2 平方根 UKF 算法

将式(5)与式(7)离散化处理, 时间间隔取为陀螺数据采样时间 0.01 s. 离散化之后的系统方程为

$$\mathbf{x}_k = f(\mathbf{x}_{k-1}, \mathbf{n}_{k-1}); \mathbf{y}_k = h(\mathbf{x}_k, \mathbf{w}_k) \quad (8)$$

式中: $\mathbf{x}_k = [\mathbf{q}_k^T \ \mathbf{b}_k^T]^T$; $\mathbf{y}_k = [\psi \ a_y \ \frac{a_x}{a_z}]^T$; $\mathbf{n}_{k-1}$ 和 $\mathbf{w}_k$ 均为零均值高斯白噪声; 协方差阵分别为 $\mathbf{Q}_{k-1}$ 和 $\mathbf{R}_k$. n 维状态变量的平方根 UKF 算法步骤如下。

(1) 初始化

$$\hat{\mathbf{x}}_0 = E[\mathbf{x}_0] \quad (9)$$

$$\mathbf{S}_0 = \text{chol}\{E[(\mathbf{x}_0 - \hat{\mathbf{x}}_0)(\mathbf{x}_0 - \hat{\mathbf{x}}_0)^T]\} \quad (10)$$

式中: $\mathbf{S}_0$ 为初始方差阵的 Cholesky 分解; $\text{chol}\{\cdot\}$ 为 Cholesky 分解。

(2) 计算采样点, 采用对称采样的采样点为 $2n+1$ 个, 其中 $\gamma_i, i=0, 2, \dots, 2n$ 为 Sigma 点序列^[9]

$$\mathbf{x}_{i,k-1} = [\hat{\mathbf{x}}_{k-1} \ \hat{\mathbf{x}}_{k-1} + \mathbf{S}_{k-1}\gamma_i \ \hat{\mathbf{x}}_{k-1} - \mathbf{S}_{k-1}\gamma_i] \quad (11)$$

(3) 时间更新, 计算状态和协方差阵平方根的一步预测 $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$ 、 $\mathbf{S}_{k|k-1}$ 、 $\mathbf{W}_i^m$ 、 $\mathbf{W}_i^c$ ($i=0, 2, \dots, 2n$), 分别为均值权值和协方差权值序列, γ_i 、 $\mathbf{W}_i^m$ 、 $\mathbf{W}_i^c$ 的计算

见文献[9].

$$\mathbf{x}_{i,k|k-1} = f(\mathbf{x}_{i,k-1}) \quad (12)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} = \sum_{i=1}^{2n+1} \mathbf{W}_i^m \mathbf{x}_{i,k|k-1} \quad (13)$$

$$\mathbf{S}_{k|k-1} = \text{qr}\{[(\mathbf{W}_i^c)^{1/2}(\mathbf{x}_{1:2n,k|k-1} - \mathbf{x}_k^*) \ (\mathbf{Q}_k)^{1/2}]\} \quad (14)$$

$$\mathbf{S}_{k|k-1} = \text{cholupdate}\{\mathbf{S}_{k|k-1}^*, \mathbf{x}_{0,k|k-1}^* - \mathbf{x}_k^*, \mathbf{W}_0^c\} \quad (15)$$

式中: $\text{qr}\{\cdot\}$ 为 QR 分解; $\text{cholupdate}\{\cdot\}$ 为平方根矩阵的更新, 其定义详见参考文献[9].

(4) 更新采样点, 利用一步预测值更新采样点

$$\mathbf{x}_{i,k|k-1} = [\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} \ \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + \mathbf{S}_{k|k-1}\gamma_i \ \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} - \mathbf{S}_{k|k-1}\gamma_i] \quad (16)$$

(5) 测量更新, 最后得到后验估计 $\hat{\mathbf{x}}_k$ 、 $\mathbf{S}_k$

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k(\mathbf{y}_k - \hat{\mathbf{y}}_{k|k-1}) \quad (17)$$

$$\mathbf{S}_k = \text{cholupdate}\{\mathbf{S}_{k|k-1}, \mathbf{U}, -1\} \quad (18)$$

式中

$$\mathbf{y}_{i,k|k-1}^* = h[\mathbf{x}_{i,k|k-1}]$$

$$\hat{\mathbf{y}}_{k|k-1} = \sum_{i=1}^{2n+1} \mathbf{W}_i^m \mathbf{y}_{i,k|k-1}^*$$

$$\mathbf{K}_k = \left(\frac{\mathbf{P}_{xy}}{\mathbf{S}_{yy}^T} \right) / \mathbf{S}_{yy}$$

$$\mathbf{U} = \mathbf{K}_k \mathbf{S}_{yy}$$

$$\mathbf{S}_{yy}^* = \text{qr}\{[(\mathbf{W}_i^c)^{1/2}(\mathbf{y}_{1:2n,k|k-1}^* - \hat{\mathbf{y}}_{k|k-1}) \ (\mathbf{R}_k)^{1/2}]\}$$

$$\mathbf{S}_{yy} = \text{cholupdate}\{\mathbf{S}_{yy}^*, \mathbf{y}_{0,k|k-1}^* - \hat{\mathbf{y}}_{k|k-1}, \mathbf{W}_0^c\}$$

$$\mathbf{P}_{xy} = \sum_{i=0}^{2n} \mathbf{W}_i^c [(\mathbf{x}_{i,k|k-1} - \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1})][(\mathbf{y}_{i,k|k-1}^* - \hat{\mathbf{y}}_{k|k-1})]^T$$

平方根算法能够保持协方差阵的正定性, 在实际的滤波过程中稳定性更强, 但上述算法是基于式(7)理想情况下得到的, 当存在机动加速度误差和单基线 GPS 失锁情况时, 需要采用自适应算法来去除这些因素的影响。

2 自适应算法

单基线 GPS 需要 2 个 GPS 天线同时捕获相同的 4 颗以上卫星信号才能实现姿态解算, 容易受到遮挡, 因此针对航向角的自适应规则即为: GPS 失锁, 则令航向角测量方差 $P_\psi = +\infty$, 否则保持原值。此为自适应规则 1。

单基线 GPS 在提供航向角的同时能够给出车体的速度, 微分即可得到车体的机动加速度, 车体机动频率较低, 采用 10 Hz 的速度测量微分足以用来判断车体是否机动。车体加速度可以分为前向加速度(对应于 y 轴)和向心加速度(对应于 x 轴)。如果

某一方向的机动加速度大于设定阈值,则令噪声方差阵 $\mathbf{R}_k$ 中对应的测量方差 $P = +\infty$,即可实现机动加速度的自适应调整.由于车体的机动频率不高,机动持续时间有限,短时间内陀螺零偏基本不变,积分累积误差较小,因此充分利用陀螺短时精度高的特性,可以有效地去除机动加速度的干扰.此为自适应规则 2.

在单基线 GPS 失锁时,采用机动加速度观测来进行规则 2 的判断.机动加速度观测通过从加速度计的测量值中减去重力加速度分量得到,已知加速度计测量值为

$$\mathbf{a} = \mathbf{a}_g + \mathbf{a}_m + \mathbf{n} \quad (19)$$

式中: $\mathbf{a}_g$ 为重力矢量的测量值; $\mathbf{a}_m$ 为机动加速度矢量; $\mathbf{n}$ 为测量白噪声.通过姿态角估计值 $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ 、 $\hat{\boldsymbol{\phi}}$ 可以计算此时的重力矢量的估计值 $\hat{\mathbf{a}}_g$,通过坐标系变换关系得

$$\hat{\mathbf{a}}_g = g \begin{bmatrix} -\cos\hat{\boldsymbol{\theta}} \sin\hat{\boldsymbol{\phi}} & \sin\hat{\boldsymbol{\theta}} & \cos\hat{\boldsymbol{\theta}} \cos\hat{\boldsymbol{\phi}} \end{bmatrix}^T \quad (20)$$

式中: g 为重力加速度.因此可以得到机动加速度的估计值为

$$\hat{\mathbf{a}}_m = \mathbf{a} - \hat{\mathbf{a}}_g - \mathbf{n} \quad (21)$$

上述的机动加速度观测即可作为单基线 GPS 失锁时规则 2 的判断条件.机动加速度观测作为自适应判断条件实际上可以看作是一个反馈控制,通过估计值反馈回来进行滤波器的调整,会对整个系统的稳定性造成影响,这也是单基线 GPS 锁定时采用速度微分作为判断条件的原因,否则不论单基线 GPS 锁定还是失锁,仅用加速度观测就足够了,因此自适应算法仅在单基线 GPS 失锁时采用加速度观测作为判断条件,增强了系统的稳定性.

卡尔曼滤波器的自适应策略很多,但是,机动加速度的存在使得加速度计的姿态输出含有较大误差,因此只能采用自适应判断,在无量测时靠陀螺保持,在众多的判断自适应规则中,本文结合两种不同传感器的特性,采用简单、稳定的判断方法.

规则 1 根据 GPS 工作状态可得

$$\sigma_{\psi}^2 = \begin{cases} +\infty, & \text{GPS 锁定} \\ \sigma_{\omega\psi}^2, & \text{GPS 失锁} \end{cases} \quad (22)$$

规则 2:依据前述的机动加速度判断准则,得到 GPS 不同状态下的阈值判断规则,该规则通过调整测量方差来达到自适应目的,方差调整方法如下

$$\sigma_{\theta}^2 = \begin{cases} +\infty, & |\dot{\mathbf{V}}| \geq a_{Ty} \\ \sigma_{\omega\theta}^2, & |\dot{\mathbf{V}}| < a_{Ty} \end{cases}, \text{GPS 锁定} \quad (23)$$

$$\sigma_{\phi}^2 = \begin{cases} +\infty, & |V\omega_z| \geq a_{Tx} \\ \sigma_{\omega\phi}^2, & |V\omega_z| < a_{Tx} \end{cases}, \text{GPS 锁定} \quad (24)$$

$$\sigma_{\theta}^2 = \begin{cases} +\infty, & |\hat{a}_{my}| \geq a'_{Ty} \\ \sigma_{\omega\theta}^2, & |\hat{a}_{my}| < a'_{Ty} \end{cases}, \text{GPS 失锁} \quad (25)$$

$$\sigma_{\phi}^2 = \begin{cases} +\infty, & |\hat{a}_{mx}| \geq a'_{Tx} \\ \sigma_{\omega\phi}^2, & |\hat{a}_{mx}| < a'_{Tx} \end{cases}, \text{GPS 失锁} \quad (26)$$

式中: $\sigma_{\omega\psi}^2$ 为单基线 GPS 的航向角测量方差; $\sigma_{\omega\theta}^2$ 和 $\sigma_{\omega\phi}^2$ 分别为加速度计的俯仰角和横滚角测量方差; V 为 GPS 测量的线速度(y 方向); $V\omega_z$ 为向心加速度(x 方向);同样 $\hat{a}_{mx}$ 、 $\hat{a}_{my}$ 为对应的 x、y 方向的加速度观测; a_T 与 a'_T 分别为两种情况下的判断阈值,其值的确定需要在实验中调试.自适应估计方法的简单框图如图 1 所示.

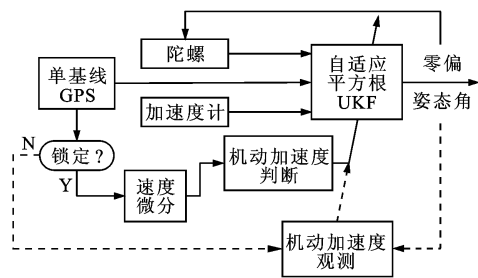


图1 姿态估计方法总体图

3 实验分析

实验设备主要包括星网宇达公司的单基线 GPS 产品 XW-ADU3601 以及微机械惯性测量单元 XW-IMU5220,对比的参考系统为 XW-ADU7612.其中 XW-ADU3601 能够给出 10 Hz、精度分别为 0.1° (2 m 基线) 的航向角和精度为 0.02 m/s 的速度;XW-IMU5220 能够稳定地输出 100 Hz 的测量值,陀螺零偏 $\leq 0.5^\circ/\text{s}$,加速度计零偏 $\leq 0.005g$. XW-ADU7612 能够以 100 Hz 的数据更新速率输出被测对象精确的姿态角(精度为 0.1°).如图 2 所示,单基线 GPS 的安装基线为 1.6 m.根据所用器件的静态测量数据给定如下滤波器参数,预测时间 0.01 s,更新时间 0.1 s,过程噪声和测量噪声均为零均值白噪声,过程噪声方差分别为 $\sigma_{\omega}^2 = 10^{-5}$ 和 $\sigma_b^2 = 10^{-7}$,测量噪声方差分别为 $\sigma_{\omega\psi}^2 = 10^{-3}$ 和 $\sigma_{\omega\theta}^2 = \sigma_{\omega\phi}^2 = 10^{-1}$.由于通信要求在每时每刻都能够得到精确的姿态估计,因此实验中的估计误差均定义为估计出来的姿态角与参考值之差,如果在某个时间点误差大于要求的估计精度 ($< 0.5^\circ$),则该时刻通信的有效性也将得不到保障.



图 2 实验载体及设备安装照片

在校园进行了绕圈实验,由于实际更新频率为 100 Hz,数据量太大,所以作图采用的数据率为每 1 s 显示一个数据。

实验 1 GPS 锁定情况. 为了验证在 GPS 锁定情况下的姿态估计算法,实验地点选择在空旷操场,单基线 GPS 始终锁定,从起步 2 s 开始测量,到刹车停车共行车 267 s. 各传感器单独估计角度比较如图 3 所示,从图中可以看出单基线 GPS 的测量值是很准确的,而陀螺积分得到的航向角则明显存在累积误差. 根据姿态角求解式(2)可知:3 个姿态角是相互关联的,从姿态角的变化大小可知,航向陀螺在转弯期间测量值远远大于其他 2 个陀螺,因此转弯对俯仰角和横滚角影响较大,出现了较大的波动,而俯仰陀螺以及横滚陀螺由于测量值较小并没有对航向角的估计造成影响,因此陀螺积分得到的俯仰角和横滚角没有表现出航向角明显的单调增的累积特性;陀螺积分除了存在累积误差之外,短时间的精度很高,能够跟踪姿态变化;采用加速度计计算的姿态角不存在累积误差,但是噪声较大,并且在有机动加速度时存在较大的偏差. 长时间看来,加速度计得到的姿态角并没有表现出陀螺积分随时间的累积误差,因此结合陀螺和加速度计的互补特性可以得到较为精确的姿态估计,短时精度靠陀螺保持,长时间的精度由加速度计保证。

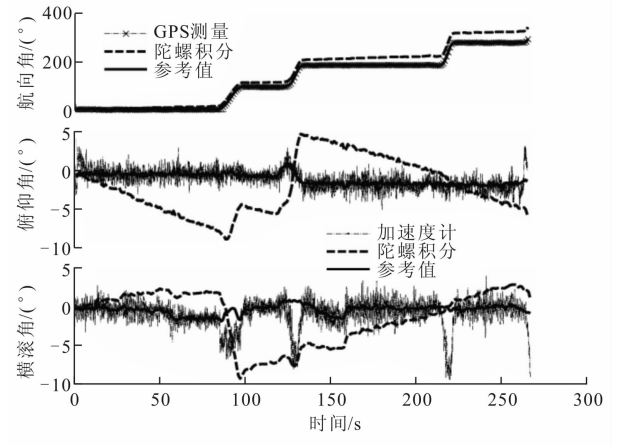


图 3 3 种传感器单独估计姿态角比较

自适应算法的有效性如图 4 所示,从中可以看出:由于单基线 GPS 保持锁定,其提供的航向角精度可以达到 0.1° ,而航向角的估计不受机动加速度影响,因此,不论是否采用自适应算法,其航向角的估计精度都较高,基本与参考值重合;从俯仰角和横滚角估计对比来看,平方根 UKF 融合了加速度计和陀螺的互补特性,得到较好的姿态角估计,但是受到机动加速度影响,采用自适应算法之后精度明显提高. 线加速度和向心加速度判断阈值分别取为 $a_{Ty}=0.006g, a_{Tr}=0.006g$,结合式(6)以及正弦曲线特性,取 $a_{Ty}=0.006g$ 为阈值可以满足俯仰角在 $[-47^{\circ}, 47^{\circ}]$ 之间保证 $\pm 0.5^{\circ}$ 精度($\sin(47^{\circ}+0.5^{\circ})-\sin(47^{\circ})\approx 0.0059$),这对于车辆的姿态角来说已经足够. 横滚角同理可得。

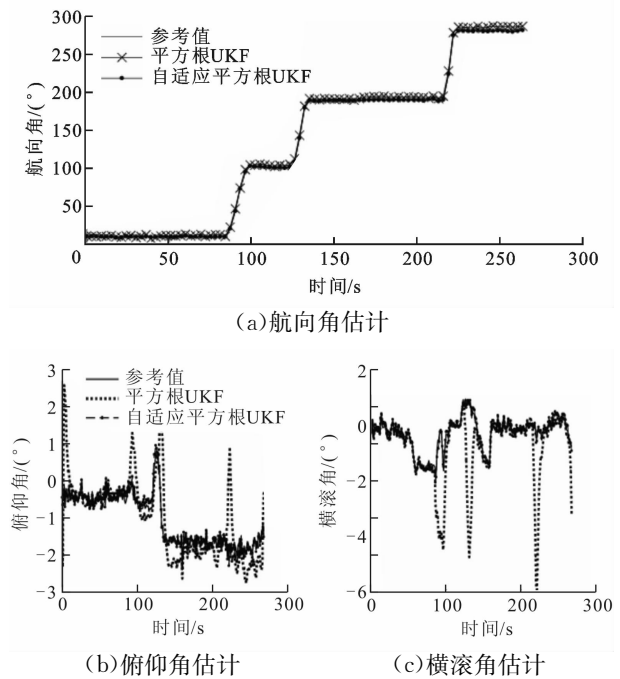
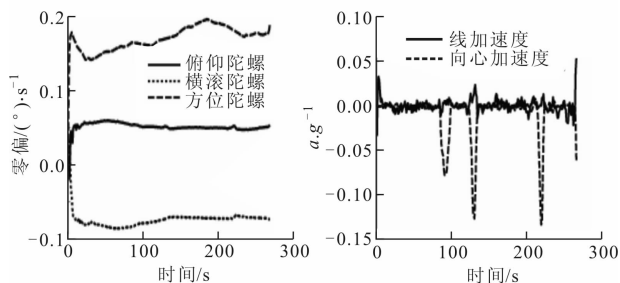


图 4 2 种算法的姿态角估计对比

图 5 给出了采用自适应平方根 UKF 算法的估计结果. 可以看出,陀螺零偏的变化较为缓慢,短时间内陀螺积分值是精确的,采用判断自适应是完全可行的;车辆的机动时间较短,此时间段内陀螺足以保证姿态角估计精度. 从图中的估计误差曲线可以看出,航向误差保持在 0.1° 以内,俯仰和横滚角误差都不大于 0.4° ,满足自动驾驶的姿态角精度要求。

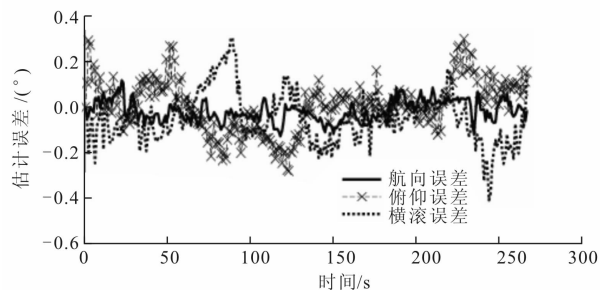
实验 2 GPS 失锁情况. 为了验证 GPS 失锁情况下自适应算法的正确性,选择实验地点为树荫公路,单基线 GPS 由锁定变为失锁,行进中数据采集时间 45 s.

图 6 表明了单基线存在失锁情况下的姿态角的



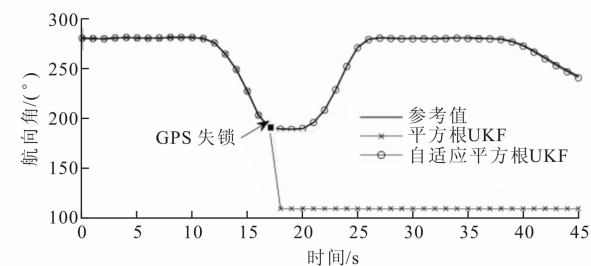
(a)陀螺零偏估计

(b)机动加速度干扰

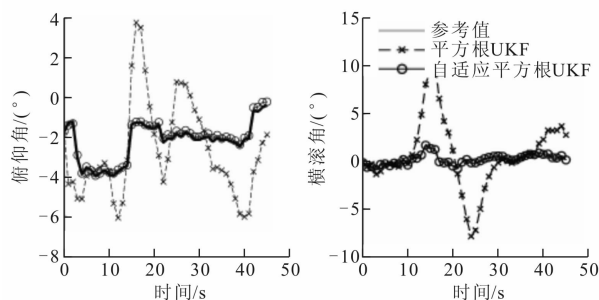


(c)姿态角估计误差

图5 平方根UKF估计结果

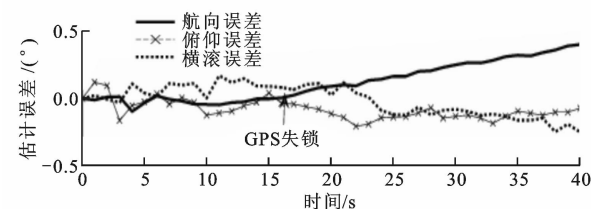


(a)航向角估计对比



(b)俯仰角估计

(c)横滚角估计

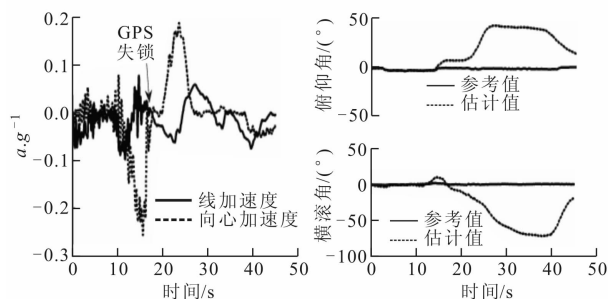


(d)姿态角估计误差

图6 单基线失锁情况下的姿态估计结果

估计值与姿态估计误差曲线. 从航向角的估计可以看出: 单基线 GPS 在 17.1 s 之后失锁, XW-ADU3601 的输出结果为上一次断电时保存的值(图 6a 中为 109.2°). 失锁之后, 由规则 1 可知, 此时利用陀螺积分保持, 但是陀螺的漂移会造成航向角的累积漂移误差, 从估计误差曲线可以看到, 在单基线 GPS 失锁之后, 航向角误差逐渐增大, 可以预见, 长时间的单基线 GPS 失锁会造成航向角的发散, 动中通系统将无法对准卫星, 但是水平姿态角仍然保持较高的精度, 克服此问题的方法可以采用卫星信号闭环跟踪, 利用跟踪接收机进行方位角的校正^[10].

由图 7a 可以看出: 在单基线 GPS 失锁之前, 采用速度微分进行判断; 单基线 GPS 失锁之后, 采用加速度观测进行判断, 由于姿态估计比速度微分平滑, 因此加速度观测得到的机动加速度比速度微分平滑. 图 7b 表明了加速度计测量值中直接减去机动加速度观测时出现的发散现象, 进一步说明了采用本文提出的判断自适应方法的正确性和有效性.



(a)机动加速度

(b)姿态角

图7 机动加速度与姿态角估计

4 结 论

本文提出了一种新的低成本动中通天线姿态估计方法, 采用低成本的微机械陀螺、加速度计和单基线 GPS, 通过自适应平方根 UKF 算法对动中通车体的姿态进行高精度的估计. 本文方法利用了陀螺和加速度计的互补特性: 陀螺短时精度高, 长时间存在累积误差, 加速度计短时间精度差, 长时间无累积误差, 但加速度计测量值由于受到机动加速度干扰, 故单基线 GPS 在保证航向角精度的同时, 还需要进行机动加速度的判断, 当单基线 GPS 失锁之后, 利用加速度观测反馈进行机动加速度的自适应判断. 从实验结果来看, 本文方法简单有效, 能够得到满足移动卫星通信对准精度要求的高输出速率的姿态角

估计.

参考文献:

[1]

BELJOUR H, CORYELL L, TAT F. Army SATCOM on the move technology initiatives[C]//Proceedings of the IEEE Military Communications Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009:1-7.

[2]

滕云鹤,毛献辉,章燕申,等. 移动卫星通信捷联式天线稳定系统[J]. 宇航学报, 2002, 23(5):72-75.
TENG Yunhe, MAO Xianhui, ZHANG Yanshen, et al. A strapdown stabilized antenna system for mobile satellite communications [J]. Journal of Astronautics, 2002, 23(5): 72-75.

[3]

EGZIABHER D G, HAYWARD R C, POWELL J D. A low-cost GPS/inertial attitude heading reference system (AHRS) for general aviation applications[C]//Proceedings of the IEEE 1998 Position Location and Navigation Symposium. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1998: 518-525.

[4]

YUN Xiaoping, BACHMANN E R. Design, implementation, and experimental results of a quaternion-based Kalman filter for human body motion tracking [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2006, 22(6): 1216-1227.

[5]

JURMA D, JANKOVEC M, KAMNIK R, et al. Calibration and data fusion solution for the miniature attitude and heading reference system[J]. Sensors and Actuators: A, 2007, 138(2): 411-420.

[6]

沈晓卫,姚敏立,李琳琳,等. 宽带移动卫星通信低成本组合姿态确定算法[J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(6):64-68.
SHEN Xiaowei, YAO Minli, LI Linlin, et al. A hybrid attitude determination method with low cost for broadband mobile satellite communication[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(6):64-68.

[7]

CRASSIDIS J L, MARKLEY F L, CHENG Y. Survey of nonlinear attitude estimation methods[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2007, 30(1):12-28.

[8]

KUIPERS J B. Quaternions and rotation sequences [M]. Princeton, NJ, USA: Princeton University Press, 1999.

[9]

JULIER S J, UHLMANN J K, DURRANT-WHYTE H F. A new method for nonlinear transformation of means and covariances in filters and estimators[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2000, 45(3): 477-482.

[10]

DEBRUIN J. Control system for mobile satcom antennas establishing and maintaining high-bandwidth satellite links during vehicle motion [J]. IEEE Control Systems Magazine, 2008,28(1):86-101.

(编辑 刘杨)

[文摘预登]

面向转发的双向高速报文解析结构

董永吉¹, 郭云飞^{1,2}

(1. 国家数字交换系统工程技术研究中心, 450002, 郑州; 2. 解放军理工大学指挥信息系统学院, 210007, 南京)

为进一步提升未来互联网体系结构的实验平台对转发报文高速灵活解析的能力,提出了一种面向转发的双向报文解析结构(BiPPAF). 该结构由以下 2 个方面构成:在协议的解析表达上,利用二叉 trie 树动态灵活的字符串组织方式,实现协议解析表达的可扩展;在协议解析的处理上,采用硬件流水线通过高速流水的查表方式,实现协议解析的高性能. BiPPAF 结构通过为每个网络接口建立协议二叉 trie 树实现接口独立的协议解析能力,并利用节点映射算法来完成流水线和二叉 trie 树之间的关联,能够均衡各级流水线上二叉 trie 树的节点数目优化存储空间的使用. 仿真实验表明,当采用 8 级深度的流水线时,与 Packet Parsing 方法相比,BiPPAF 结构的协议处理速率提升了 31%,而资源占用降低了 64%.