

文章编号:1674-6864(2010)02-0079-05

一种基于 DSP 和多传感器稳定平台的设计

王超,郝静如,李启光

(北京信息科技大学 机电工程学院,北京 100192)

摘 要: 为了准确采集稳定平台动态情况下姿态变化的信息,设计了一种新型的多传感器稳定平台的结构和硬件控制系统,六个加速度计和三个陀螺仪分别沿三个回转轴对称安置。在动、静态两种情况下,用不同的数学模型对加速度计和陀螺仪输出的信息进行解算。在动态情况下,对陀螺仪输出的信息和解算后的加速度信息进行 Kalman 滤波。经实验验证,能够提高稳定平台系统的精度。

关键词: 稳定平台;DSP;陀螺仪;加速度计;卡尔曼滤波

中图分类号: V 249.122+.4 **文献标志码:** A

Design of stable platform based on DSP and multi-sensor

WANG Chao, HAO Jing-ru, LI Qi-guang

(School of Electromechanical Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: In order to accurately capture the stable platform attitude changing information in a dynamic situation. A new kind of multisensor stable platform structure and hardware control system are designed; six accelerometers and three gyroscopes are arranged symmetrically on the axis of rotation. Under the dynamic and static situation, different mathematical models are used to resolve accelerometers and gyroscopes output information. Primarily under dynamic situations, the gyroscope output information and acceleration information are obtained for the kalman filter. According to the measured data, and by matlab simulation, the program can improve the accuracy of stability platform.

Key words: stable platform; DSP; gyroscope; accelerometer; kalman filter

0 引言

海上、陆地上、空中运行的各种平台都需要知道其姿态信息,并且需要对姿态进行实时控制。但是目前姿态测量系统大都采用高精度的惯性陀螺仪来实现,这种方法设备复杂、价格昂贵且难以推广。本文介绍一种新型的测量稳定平台姿态角变化的方法,该方法将采用三个低精度、低成本的 MEMS 陀螺仪与六个硅微加速度计组合的多传感器测量系统来测量平台的姿态信息,适用于全姿态(包括航向、俯仰和滚转)测量。由于利用了硅微加速度计,因而系统具有全固态结构、体积小、重量轻、启动快、能耗小、成本低等特点。把加速度计实时输出的线速度信息换算成对应的角速度作为预测值,把陀螺仪输

出的信息作为量测值,然后把二者的信息融合在一起。采用一种改进的卡尔曼滤波算法对二者的信息进行处理,并且利用 DSP 处理器 TMS320LF2812 实现了该算法的硬件设计,提高了实时测量角速率变化的精度。

1 稳定平台的设计

1.1 多传感器在稳定平台上的位置布局

目前,平台姿态测量系统多数采用成本较高的陀螺仪作为平台角度变化的传感器,虽然该测量方法能够测得平台的角度变化信息,但是测量精度较低,实时性较差。对于多传感器在稳定平台的位置布局,本文采用了如图 1 所示的设计方法,外环为横滚环框架,内环为俯仰环框架,转台绕 Z 轴转动为

收稿日期:2010-03-09

作者简介:王超(1983—),男,吉林长春人,硕士研究生,主要从事稳定平台控制系统的研究。

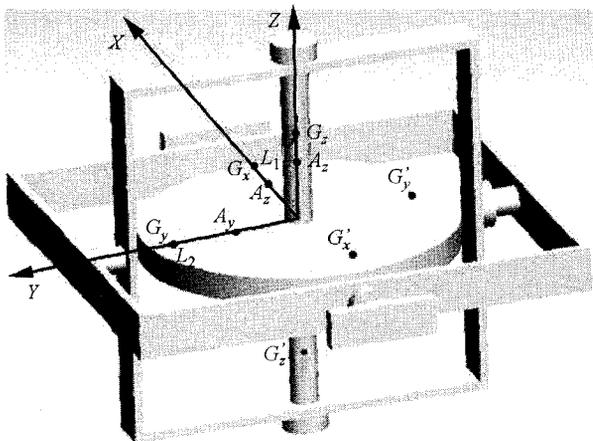


图1 三轴稳定平台的结构图

方位环, A_x, A_y, A_z 为单自由度陀螺仪, 敏感轴相互正交, 他们的指向构成了平台坐标系 X, Y, Z , ACR(方位坐标分解器)将信息分配和放大后分别馈入三个

环架轴上的伺服电机, 控制相应环框架的角运动, 其中控制横滚通道的信号还需要经过 SR(俯仰正割分解器)作俯仰角补偿处理^{[1]133}。图 1 中沿横滚环轴 X 方向的对称位置放置两个加速度计 G_x 和 G'_x , 距离中心轴的距离为 L_1 , 沿俯仰环轴 Y 方向的对称位置放置两个加速度计 G_y 和 G'_y , 距离中心轴的距离为 L_2 , 沿方位环轴 Z 方向的对称位置放置两个加速度计 G_z 和 G'_z , 距离中心轴的距离为 L_3 。

1.2 DSP 稳定平台伺服控制系统的硬件设计

稳定平台系统以 TMS320F2812 为控制核心设计, 如图 2 所示。采用双闭环控制结构, 内环为速度环又称稳定环, 外环为位置环又称跟踪环。为了保证稳定平台对目标的精确、快速跟踪, 设计的平台伺服控制系统具有快速的动态响应、高质量的稳定精度和较强的抗非线性干扰能力, 能够满足多种控制算法的实现^[2]。

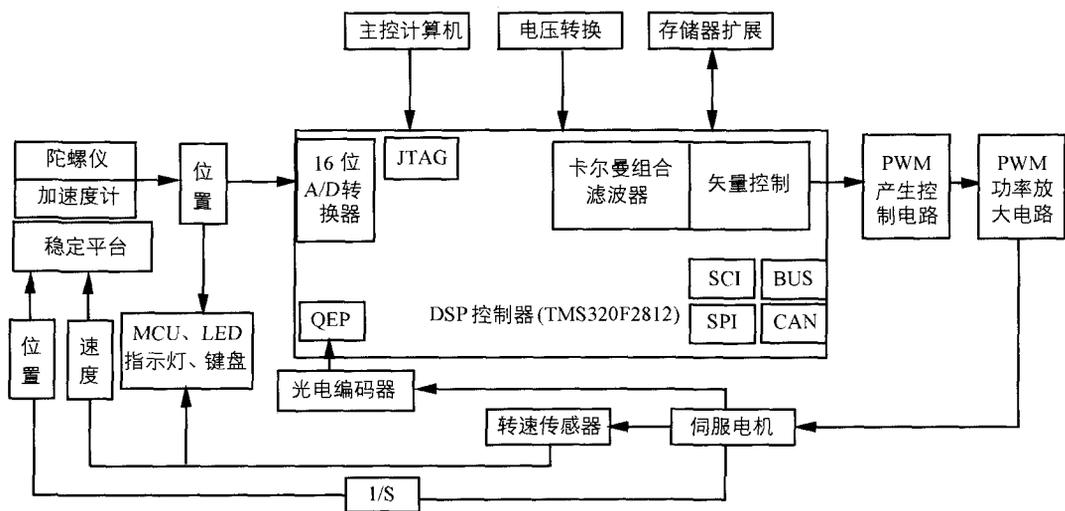


图2 稳定平台伺服控制系统硬件设计

2 数学模型

2.1 线加速度转化成角加速度的数学模型

利用 3 个加速度计测量的数值可以直接求得静态时平台的方位角、俯仰角和横倾角, 以平台的横倾角 ϕ 为例, 当 $\alpha_y \geq 0$, 则表明 Y 轴相对于水平面低头, 此时相当于平台左倾, 即绕 X 轴负向旋转, 此时横倾角安装定义为负。反之, 横倾角安装定义为正。故横倾角计算公式为:

$$\phi = -\arcsin \frac{a_y}{\sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}} \quad (1)$$

其中 a_x, a_y, a_z 为安装在平台坐标系三个回转轴上的加速度计 G_x, G_y, G_z 静态时的输出值。由于加速度计敏感的是重力加速度和绝对加速度在其敏感轴上的投影和, 而当平台静止时, 绝对加速度为零, 但是重力加速度在 X 轴、 Y 轴、 Z 轴上的投影分别为 a_x, a_y, a_z 。也就是说重力加速度在载体坐标系中的投影为 a_x, a_y, a_z , 由此通过立体几何平面方程和直线之间的夹角关系可以得到公式(1), 直接算出平台的姿态角。

当平台处于动态条件下, 只采用 3 个加速度计则不能区分平台绝对加速度和重力加速度, 因此只

能测取静态条件下的平台姿态。为了解决这个问题,必须采用 6 个加速度计的方案,通过 6 个加速度计敏感平台线运动和角运动信息,分解重力加速度和平台绝对加速度,从而获取不同运动状态下平台的姿态角变化的信息。

基于 6 个加速度计的线速度转化成角速度的公式为^[3]

$$a = f + w \times (w \times L) + \varepsilon \times L \quad (2)$$

其中: $f = [f_x \ f_y \ f_z]$ 为质心处重力加速度和线运动加速度之和; $w = [\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]$ 为载体相对惯性坐标系的旋转角速度; ε 为相应的角加速度; L 为加速度计安装位置相对旋转轴向径。

依据公式(2)即可通过 6 个加速度计间接算出平台的三个角速度

$$\begin{cases} \omega_x = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\Delta a_1}{L_1} - \frac{\Delta a_2}{L_2} + \frac{\Delta a_3}{L_3}} \\ \omega_y = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\Delta a_1}{L_1} + \frac{\Delta a_2}{L_2} - \frac{\Delta a_3}{L_3}} \\ \omega_z = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\Delta a_1}{L_1} + \frac{\Delta a_2}{L_2} + \frac{\Delta a_3}{L_3}} \end{cases} \quad (3)$$

其中 $\Delta a_1, \Delta a_2, \Delta a_3$ 为平台上对称位置上的加速度计的输出信息取差值得到,这样做即可以消除线加速度项,也消除了温漂、震动等带来的有害加速度的影响,同时也抵消了由于地球自转引起的哥氏加速度的影响,又可以提取出旋转加速度的影响。

2.2 动态条件下陀螺仪信号的采集

为了准确采集到平台在动态条件下的陀螺仪的输出角速度信息,建立了两个坐标系:一个是平台的理想坐标系(导航坐标系) R , 相对惯性空间保持稳定;另一个是平台坐标系 B , 该坐标系是根据平台三个回转轴按右手定则建立的。平台静止时,它与理想坐标系重合,可直接从三个回转轴上采集到陀螺仪输出的角速度信息。然而,当平台运动时,就不能从运动状态下的平台坐标系上采集到陀螺仪的信息,所以引入四元数将平台坐标系的姿态矩阵 ω_{Rb}^b 转化成理想坐标系状态下的姿态矩阵 ω_{Rb}^R 解算陀螺仪的角速度。由角速度信息得到四元数模型的数学表达式为^{[1]290}

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{1}{2} Q \otimes \omega_{Rb}^R \otimes Q^T \otimes Q = \frac{1}{2} Q \omega_{Rb}^b \quad (4)$$

其中 $\omega_{Rb}^b = [\omega'_x \ \omega'_y \ \omega'_z]$, 为表征刚体旋转的规范化四元数表达式。

式(4)可以表示成矩阵形式:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{1}{2} M'(\omega_{Rb}^b) Q$$

$$\begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & -\omega'_x & -\omega'_y & -\omega'_z \\ \omega'_x & 0 & \omega'_z & \omega'_y \\ \omega'_y & -\omega'_z & 0 & \omega'_x \\ \omega'_z & \omega'_y & -\omega'_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中 ω_{Rb}^b 由姿态更新的最新值确定。

2.3 kalman 的相关方程

陀螺漂移是一种随机变量,一般包括三种分量:一阶马尔可夫过程、随机常数(偏置)和白噪声。稳定平台的误差角 ϕ_x, ϕ_y, ϕ_z 与上述三种漂移 $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ 有关,具体关系如下式^{[1]299}

$$\begin{cases} \omega'_x = \dot{\phi}_x = \omega_{ie} \sin \varphi \cdot \phi_y - \omega_{ie} \cos \varphi \cdot \phi_z + \varepsilon_x \\ \omega'_y = \dot{\phi}_y = -\omega_{ie} \sin \varphi \cdot \phi_x + \varepsilon_y \\ \omega'_z = \dot{\phi}_z = \omega_{ie} \cos \varphi \cdot \phi_x + \varepsilon_z \end{cases} \quad (6)$$

其中 ω_{ie} 为地球自转角速度, φ 为所在地点的纬度。用六个加速度计 G_x 和 G'_x, G'_y 和 G'_y, G_z 和 G'_z 输出解作为卡尔曼滤波器的预测值,三个陀螺仪输出解作为测量值,得出误差修正模型为

$$Z(t) = \begin{bmatrix} \Delta \omega_x \\ \Delta \omega_y \\ \Delta \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega'_x - \omega_x \\ \omega'_y - \omega_y \\ \omega'_z - \omega_z \end{bmatrix} = H(t)X(t) + V(t) \quad (7)$$

由式(7)可得量测方程的离散化的数学模型为

$$\begin{cases} X_k = \Phi_{k-1} X_{k-1} - 1 \\ Z_k = H_{k-1} X_{k-1} + V_{k-1} \end{cases} \quad (8)$$

通过虚拟样机实验,实际测量传感器信息换算得到离散化的系统状态向量迭代矩阵的初始值为 $X_0 = [p \ q \ r \ \varphi \ \theta \ \psi] = [-5 + 5j \ -5 - 5j \ -7 \ -8 \ -8 + 8j \ -8 - 8j]^T$, p, q, r 分别为相对于稳定平台的横滚、俯仰、方位转动角速率的增量, φ, θ, ψ 分别是稳定平台的横滚角、俯仰角、方位角增量,其中 $H_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}$ 为离散化

后系统状态方程的观测矩阵向量的初始值, $V_0 = [\sigma_1^2 \ \sigma_2^2 \ \sigma_3^2 \ \sigma_4^2 \ \sigma_5^2 \ \sigma_6^2]$ 为系统状态方程中的观测噪声矩阵,其中, $\sigma_1^2 = 0.1511^2, \sigma_2^2 = 0.1328^2, \sigma_3^2 = 0.1102^2, \sigma_4^2 = 0.0827^2, \sigma_5^2 = 0.2664^2, \sigma_6^2 = 0.0698^2$ 为观测噪声参量的初始状态值。根据确定的滤波周期计算得到系统的状态转移矩阵向量的初始值为 Φ_0 。

$$\Phi_0 = \begin{bmatrix} 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.9994 & 0.0352 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & -0.0352 & 0.9994 \\ -0.0006 & -2.1964 & -0.0054 & -0.1948 & 0.9118 & 0.1149 \\ 2.1762 & -0.0107 & -0.0011 & -0.8465 & 0.1997 & 0.4982 \\ 1.1346 & 0.3056 & -0.3154 & -0.4145 & 0.5465 & 0.7198 \\ -0.0006 & 0.0000 & -0.1235 & -3.1021 & -0.6325 & 0.5238 \end{bmatrix}$$

3 仿真与结果分析

3.1 kalman 滤波器设计与实验仿真

根据离散化的数学模型,将加速度计输出的线加速度转化成相应的角速度,作为卡尔曼滤波器的预测值,陀螺仪输出的信息作为量测值,将二者进行卡尔曼滤波,滤波后输出的角速度信息反馈给陀螺仪进行初步的校正,然后对陀螺仪输出的信息进行四元数解算再次修正陀螺仪的角速度,大大提高了平台姿态控制的精度。kalman 滤波器的设计如图 3 所示。

选用的陀螺仪为 LCG50-500,量程为 $\pm 500^\circ/\text{s}$,灵敏度 $< 0.05^\circ/\text{s/g}$,稳定平台的初始误差角度为 1.85° 。加速度计为 Mode-11221,量程为 $\pm 50\text{g}$,频

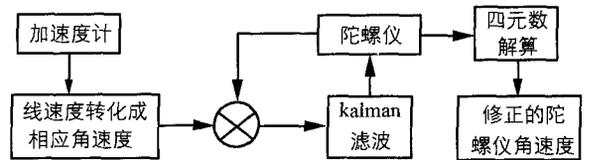


图 3 kalman 滤波器的设计

响为 -1500 Hz ,灵敏度为每个重力加速度 80 mV 。实验仿真信号的采样频率为 5 kHz ,采样时间间隔为 500 s ,样本长度为 $10\ 000$ 个点,设定时长为 15 min 。分别对陀螺仪输出的信号在补偿与未补偿两种情况下通过使用 Matlab 对陀螺仪的输出值进行仿真对比,见图 4 和图 5。以横倾角的角速度误差修正为例,俯仰角和方位角仿真结果记录如表 1。

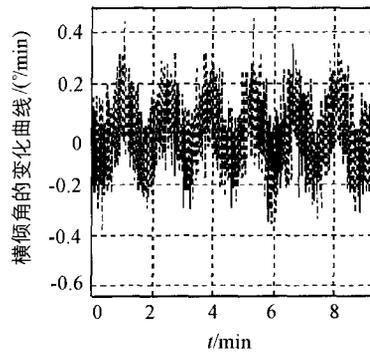
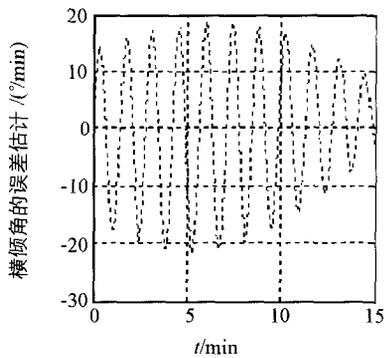


图 4 陀螺仪输出未经补偿横倾角角速率变化曲线

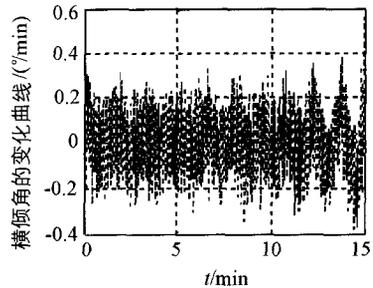
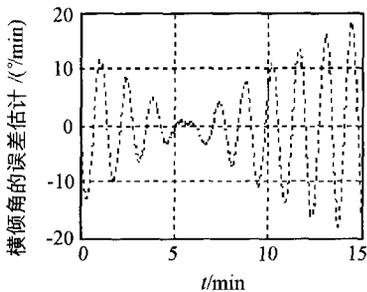


图 5 陀螺仪输出经补偿后横倾角角速率变化曲线

表1 仿真结果比较

	$\Delta\varphi/(\circ)$	$\Delta\theta/(\circ)$	$\Delta\psi/(\circ)$	平面位置误差/ (\circ)	处理每个单元所用的时间/s
无加速度计补偿的设计方案	0.2152	0.3285	0.2264	0.1659	0.053
加速度计补偿的设计方案	0.1895	0.2107	0.1096	0.1609	0.017

3.2 结果分析

从表1中我们可以看出,基于DSP多传感器稳定平台与常规的稳定平台的设计方案相比较,本设计方案大大提高了稳定平台控制系统的精度,将横滚角、俯仰角、方位角的误差分别缩小到 0.1895° , 0.2107° , 0.1096° 以内,而且在设计中采用DSP2812作为高速处理器保证了算法的高效性,显然这种设计方法优于常规的稳定平台设计方法。

4 结论

本文对稳定平台的多传感器布局方面进行了研究,在平台上对称放置六个加速度计来修正相应轴上陀螺仪输出信号,并且分别对加速度计和陀螺仪输出的信息进行数学建模解算和基于四元数的姿态矩阵转换解算,基本上补偿了动态条件下陀螺仪随时间积累的漂移误差。在硬件方面采用了TI的TMS320LF2812高速信号处理器进行运算,达到了稳定平台系统实时性的要求。根据实测数据进行实

验仿真验证,其结果显示稳定平台设计方案和相关算法可以有效提高滤波效果和稳定平台系统的控制精度,具有一定工程应用价值。

参考文献:

- [1] 秦永元,惯性导航[M].北京:科学出版社,2009
- [2] 苏奎峰,蔡昭权,吕强,等. TMS320X281xDSP应用系统设计[M].北京:北京航空航天大学出版社,2008
- [3] 李启光,张海龙,郝静如.基于六加速度计的陀螺仪漂移补偿算法的研究[J].传感器与微统,2009,28(12):42-44
- [4] 马兴义,杨立群,林敏,等. Matlab6应用开发指南[M].北京:机械工业出版社,2001
- [5] Mallat S, Hwang WL. Singularity detection and processing with wavelet[J]. IEEE Transaction on Information Theory,1992,38(2):617-643