

雾膜软件

WMS506 代码包

标准版本惯性卫星松组合导航仿真 Matlab

版本 20240824

1. 内容介绍

本代码包的功能主要有：生成一组惯性卫星组合导航的仿真数据；根据陀螺仪和加速度计信息计算惯性导航；根据卫星定位信息计算组合导航。

采用 15 维状态量、6 维观测量的扩展卡尔曼滤波方法。

代码包适用于：组合导航的学习、研究、教学、科研；处理组合导航实验数据。

本代码为了便于学习理解，力求简洁清楚。只保留了关键的、普适的导航计算原理。一些差异化功能没有包含在本代码中，例如：通信协议、初始对准、传感器标定、生成仿真路线等等。需要其余功能的用户可以联系本店定制开发。

2. 应用说明

2.1. 概念定义

惯性测量单元为 3 轴陀螺仪和 3 轴加速度计。定义 x 向东、y 向北、z 向天为姿态 0 位置。旋转方向和角速度方向满足右手法则，即右手握住坐标轴，大拇指位于坐标轴正向，则其余四个手指指向旋转正向。姿态的欧拉角旋转顺序定义为依次绕 z、x、y 旋转。

组合导航中，扩展卡尔曼滤波的状态变量定义为 15 维度的误差量：经纬高，东北天速度，东北天姿态，三轴陀螺仪零偏，三轴加速度计零偏。

如果无特殊说明，一般采用国际单位制。角度单位为 rad，角速度单位为 rad/s，速度单位 m/s，加速度单位 m/s/s。

2.2. 生成仿真数据

直接运行 `creatdata.m`，即生成一组仿真数据，存储于 `data.mat` 文件。

常见的生成仿真数据的方式有 2 种：一种是给定路线、计算得到陀螺仪、加速度计数值；另一种是给定陀螺仪、加速度计数值，计算得到路线。本代码包采用的是后一种方式，因为这样更简单。

生成仿真数据的流程为：

给定陀螺仪、加速度计数值 惯性导航计算，得到准确路线 给数据添加额外误差 让卫星导航数据间隔变大 保存

2.3. 主程序

主程序为 `instance1.m`。直接运行即可。

程序主要工作流程为：

设定初值 <pre>while(1) { 惯性导航计算 更新状态方程 if(间隔一段时间收到卫星数据)</pre>
--

```

    {
        计算卡尔曼滤波
        根据卡尔曼滤波的计算结果补偿惯性导航的误差
    }
    保存数据
}
绘图

```

2.4. 设定初值

设定传感器的采样间隔时间 $dTins$ ，单位为 s 。

初始姿态存储于四元数 $atti1$ 中。可以直接修改 $atti1$ 以改变初始姿态。或者可以通过 $setoula$ 函数，用欧拉角设置姿态四元数。 $setoula$ 函数输入单位为度。

初始速度存储于 $speed1$ 中，可以直接修改。

初始位置存储于 $pos1$ 中，可以直接修改。顺序为纬度、经度、高度。注意纬度和经度的单位为 rad 。

卡尔曼滤波中，初始状态的方差矩阵为 $Pk1$ 。测量的方差矩阵为 R 。系统噪声的方差矩阵为 $Q1$ ，在本代码包中， $Q1$ 与时间和 $Q0$ 有关。可以根据需要设置上述参数。

2.5. 导航计算

惯性导航计算为 $insgyroacc(gyro, acc, atti1, speed1, pos1, dTins)$ 。把 $gyro$ 和 acc 换为实际的陀螺仪和加速度计数据即可，单位为 rad/s 和 $m/s/s$ 。

卫星导航的位置和速度分别为 $gnsspos$ 和 $gnssspeed$ ，换为真实数据即可。卡尔曼滤波由 kal 函数计算。

现有代码按照固定间隔计算卫星数据；但是在采用真实数据时，应该按照实际的数据间隔计算。

2.6. 数据格式

输入数据为 12 列，3 个角速度 (rad/s)，3 个加速度 ($m/s/s$)，3 个卫星位置 (rad, rad, m)，3 个卫星速度 (m/s)。

输出数据前 9 列为导航结果，存储于 $dataA$ 矩阵，用于画图或保存。前 9 列为 3 个姿态角 (deg)、3 个速度 (m/s)、3 个位置 (rad, rad, m)。注意此处姿态欧拉角单位为度。

3. 计算原理

3.1. 坐标系

载体系 b 定义为与载体固定连接的坐标系，不妨取 xyz 轴为右前上。

地理系 t 定义为与载体处地面重合的坐标系，不妨取 xyz 轴为东北天。

导航坐标系 n 是表示导航结果的坐标系。在航海、航空领域中，为了避免船只、飞机通过南北极附近时 n 系快速旋转导致导航结果异常， n 系会与 t 系有一定的夹角。在普通导航系统中，可以不虑载体通过南北极的情况，因此选取 n 系与 t 系重合以使导航算法简化。

平台坐标系 p ，是平台式导航系统中传感器的指向，或者是捷联式导航系统中数学换算后的传感器的指向。理想情况下 p 系与 n 系重合；但是由于陀螺仪误差等因素，真实的 p 系与 n 系有误差角。捷联式导航系统希望把加速度换算到 n 系中，但是实际上是换算到了 p 系中。在一般的导航计算中，不必刻意区分 p 系和 n 系，但是在分析误差时需要引入 p 系。

地球坐标系 e ，是和地球固连的坐标系，不妨规定 z 轴沿着南北极方向指向北， x 轴指向 0 经度方向。

惯性参考系 i 。惯性参考系主要用于描述概念。惯性导航中一般不需要真正地在惯性参考系中投影，所以不必在惯性参考系中规定坐标系。

完整地描述角速率、姿态、加速度、速度、位移等需要 3 个坐标系。坐标系 β 相对于坐

标系 α 的变化量 $\mathbf{x}$ 在坐标系 γ 的投影表示为 $\mathbf{x}_{\alpha\beta}^\gamma$ 。例如，地球自转在地理系的坐标为

$$\boldsymbol{\omega}_{ie}^t = \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_e \cos L \\ \omega_e \sin L \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

其中 ω_e 是地球自转角速率， L 是纬度。这是地球系 e 相对于惯性系 i 的转动在地理系 t 的投影。在这种表示方法下，一些简单的计算规则如下：

同一个坐标系内表示的变量符合向量加法规则，即

$$\mathbf{x}_{AB}^\gamma + \mathbf{x}_{BC}^\gamma = \mathbf{x}_{AC}^\gamma \quad (3-2)$$

同一个变量在不同坐标系的换算可以用矩阵表示。

$$\mathbf{x}_{\alpha\beta}^\mu = \mathbf{C}_\gamma^\mu \mathbf{x}_{\alpha\beta}^\gamma \quad (3-3)$$

坐标变换矩阵表示旋转关系。例如二维的坐标变换矩阵为

$$\mathbf{C}_n^b = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3-4)$$

三维的坐标旋转有 3 个自由度，可以看作是类似形式矩阵相乘。

坐标变换矩阵是正交矩阵，逆矩阵是原矩阵的转置

$$\mathbf{C}_\mu^\gamma = (\mathbf{C}_\gamma^\mu)^{-1} = (\mathbf{C}_\gamma^\mu)^T \quad (3-5)$$

3.2. 惯性导航

3.2.1. 基本原理

惯性导航的基本原理是：陀螺仪测量角速度，角速度积分得到姿态。加速度计测量加速度，加速度积分得到速度，速度积分得到位置。

实际情况中有一些因素导致上述计算变得复杂。1.需要进行一些坐标系变换。2.需要考虑地球的自转、重力、以及球形形状。

3.2.2. 姿态更新

三维空间有 3 个旋转自由度。类似式(3-4)，依次绕三个坐标轴旋转，则坐标变换矩阵为

$$\mathbf{C}_n^b = \begin{bmatrix} \cos \theta_y & 0 & -\sin \theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_y & 0 & \cos \theta_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_x & \sin \theta_x \\ 0 & -\sin \theta_x & \cos \theta_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_z & \sin \theta_z & 0 \\ -\sin \theta_z & \cos \theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-6)$$

把坐标变换矩阵表示为绕坐标轴分别旋转三次，三次旋转的角度即为欧拉角。旋转的顺序并不是唯一的，也可以定义旋转顺序不同的欧拉角。同一个坐标变换矩阵，在不同的旋转顺序定义下，有不同的欧拉角角度；同样的旋转角度，按照不同的坐标轴顺序旋转，会得到不同的坐标变换矩阵；这个性质称为姿态角的不可交换性。所以使用欧拉角描述姿态时必须规定清楚旋转顺序。本书中欧拉角定义为：初始状态右前上（xyz）三轴位于东北天方向，依次绕上轴旋转偏航角，绕右轴旋转俯仰角，绕前轴旋转横滚角。

如果每次旋转的角度很小，则坐标变换矩阵近似为

$$d\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -d\theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ d\theta_y & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & d\theta_x \\ 0 & -d\theta_x & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d\theta_z & 0 \\ -d\theta_z & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-7)$$

略去二阶小量，则有

$$d\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & d\theta_z & -d\theta_y \\ -d\theta_z & 1 & d\theta_x \\ d\theta_y & -d\theta_x & 1 \end{bmatrix} \quad (3-8)$$

上式表示了坐标旋力矩阵与旋转角度的关系。如果旋转角度很小，则不必考虑旋转顺序。为了表示的方便，引入角增量反对称矩阵

$$[\theta] = \begin{bmatrix} 0 & -\theta_z & \theta_y \\ \theta_z & 0 & -\theta_x \\ -\theta_y & \theta_x & 0 \end{bmatrix} \quad (3-9)$$

那么姿态矩阵更新公式为

$$\mathbf{C}_b^i(t+T) = \mathbf{C}_b^i(t) \lim_{k \rightarrow +\infty} \left(\mathbf{I} + \frac{[\theta_{ib}^b]}{k} \right)^k = \mathbf{C}_b^i(t) \exp([\theta_{ib}^b]) \quad (3-10)$$

其中 $\exp$ 表示自然常数 e 为底数的指数函数。 $\mathbf{C}_b^i(t)$ 是上一时刻的姿态矩阵， $\mathbf{C}_b^i(t+T)$ 是下一时刻的姿态矩阵。上式即姿态更新公式。

利用麦克劳林公式，能得到更便于计算的如下公式

$$\exp([\theta]) = \mathbf{I} + \frac{\sin|\theta|}{|\theta|} [\theta] + \frac{1 - \cos|\theta|}{|\theta|^2} [\theta]^2 \quad (3-11)$$

如果旋转角度较小，同时为了避免分母为 0，可以采用如下近似公式

$$\exp([\theta]) \approx \mathbf{I} + [\theta] \quad (3-12)$$

根据上述若干公式，使用陀螺仪数据计算得到姿态。

实际导航系统中，为了防止计算误差导致姿态矩阵失去正交性，也为了减少计算量，往往采用四元数代替姿态矩阵进行姿态更新。四元数定义为

$$\mathbf{q} = \left[\cos \frac{\theta}{2} \quad u_x \sin \frac{\theta}{2} \quad u_y \sin \frac{\theta}{2} \quad u_z \sin \frac{\theta}{2} \right]^T \quad (3-13)$$

其中 θ 是旋转的角度， $[u_x \quad u_y \quad u_z]^T$ 是旋转轴的单位向量。

四元数也可以表示为

$$\mathbf{q} = \cos \frac{\theta}{2} + \mathbf{A} \sin \frac{\theta}{2} \quad (3-14)$$

其中 $\mathbf{A}$ 是旋转轴的单位向量。

四元数姿态微分方程为

$$\dot{\mathbf{q}} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & -\omega_x & -\omega_y & -\omega_z \\ \omega_x & 0 & \omega_z & -\omega_y \\ \omega_y & -\omega_z & 0 & \omega_x \\ \omega_z & \omega_y & -\omega_x & 0 \end{bmatrix} \mathbf{q} \quad (3-15)$$

引入 4 维的角增量矩阵

$$[\theta] = \begin{bmatrix} 0 & -\theta_x & -\theta_y & -\theta_z \\ \theta_x & 0 & \theta_z & -\theta_y \\ \theta_y & -\theta_z & 0 & \theta_x \\ \theta_z & \theta_y & -\theta_x & 0 \end{bmatrix} \quad (3-16)$$

四元数更新姿态的公式为

$$\mathbf{q}(t+T) = \left(\cos \frac{|\theta|}{2} \mathbf{I} + \frac{\sin \frac{|\theta|}{2}}{|\theta|} [\theta] \right) \mathbf{q}(t) \quad (3-17)$$

姿态可以用 3×3 矩阵或者 4×1 的四元数表示。本代码包采用四元数计算姿态，这是主流方法。但是矩阵对于坐标系变换的计算比较方便，所以坐标变换的地方使用了矩阵表示姿态。根据角度增量更新姿态四元数，为 `qupdate` 函数。

实际导航中计算姿态时，要扣除地球自转的影响。此外，由于地球是球形的，位置变化时地面会向下弯曲，相对于地面的姿态就变了，所以速度会导致一个额外的角速度。

惯性导航需要依次计算姿态、速度、位置。陀螺仪直接测到 $\mathbf{b}$ 系相对于 $\mathbf{i}$ 系的转动，而

导航解算中需要计算 b 系相对于 n 系的姿态。导航系 n 系相对于惯性系 i 系的相对转动包括两个部分：一是地球自转角速率；二是因为地球表面是曲面，载体位置变化会导致 n 系相对 e 系的姿态发生变化，角速率 ω_{en}^n 与速度有关

$$\omega_{en}^n = \begin{bmatrix} -\frac{v_N}{R_m + H} \\ \frac{v_E}{R_p + H} \\ \frac{v_E \tan L}{R_p + H} \end{bmatrix} \quad (3-18)$$

其中 R_m 和 R_p 分别是子午圈和卯酉圈的半径， L 是纬度。

因为

$$\omega_{nb}^b = \omega_{ib}^b - \omega_{ie}^b - \omega_{en}^b \quad (3-19)$$

所以

$$\omega_{nb}^b = \omega_{ib}^b - C_n^b(\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \quad (3-20)$$

根据上述角速率计算 C_b^n ，即姿态。

3.2.3. 速度更新和位置更新

加速度要从传感器的坐标系换算到东北天。本来速度是加速度积分。但是由于地球自转，需要扣除离心力和科里奥利力。此外，加速度计不能区分重力和一般的加速度，所以还需要扣除重力。

加速度为

$$\dot{V}_{en}^n = C_b^n f_b - 2\omega_{ie}^n \times V_{en}^n - \omega_{en}^n \times V_{en}^n + g \quad (3-21)$$

其中 f_b 是加速度计的数值。根据等效原理，加速度计不能把重力与真正的加速度相区分，所以要扣除地球重力 g 的影响。因为地球是圆的，所以要补偿离心加速度项 $\omega_{en}^n \times V_{en}^n$ 。因为地球在自转，所以要补偿科氏加速度 $2\omega_{ie}^n \times V_{en}^n$ 。

加速度积分计算得到速度。速度积分计算得到位置。如果用经纬高表示位置，则有

$$\dot{L} = V_N / R_m \quad (3-22)$$

$$\dot{\lambda} = \frac{V_E}{R_p \cos L} \quad (3-23)$$

其中 L 和 λ 分别是纬度和经度， R_m 和 R_p 分别是当前位置的子午圈和卯酉圈半径。

地球是个椭圆，函数 `earthmodelupdate` 计算两个方向的半径和重力。

3.3. 组合导航

3.3.1. 原理概述

连续计算惯性导航；当获取卫星数据时，采用扩展卡尔曼滤波修正导航误差。

卡尔曼滤波可以理解为：根据方差求权重，做加权平均。

原始的卡尔曼滤波适用于线性系统。因为导航系统不是线性的，所以采用扩展卡尔曼滤波。扩展卡尔曼滤波的主要方法是，选用误差量，利用一阶微分近似为线性系统。滤波得到误差量估计值后，立刻补偿误差。

有的文献把 EKF 算法进一步细化为 ESKF 算法，严格意义上本代码包的方法属于 ESKF 算法。但是大量的文献没有把 EKF 算法进行如此细致的划分，本代码包的算法完全可以说就是 EKF 算法。

3.3.2. 卡尔曼滤波

比较复杂的系统中，一方面系统具有多个自由度，另一方面被测量随着时间而变化。因此用状态空间方程的形式描述系统的关系，并把加权平均数计算方法用矩阵表示，则得到卡尔曼滤波。

系统表示为:

$$\mathbf{x}_k = \Phi \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{w}_{k-1} \quad (3-24)$$

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{H} \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \quad (3-25)$$

其中是 $\mathbf{x}$ 状态量,是希望获得而又难以准确测量的量。式(3-24)描述了被测量的变化关系,这里是离散形式。 $\mathbf{z}$ 表示量测量,是能测量得到但是包含随机误差的量。式(3-25)描述了量测量与状态量的关系。 $\mathbf{w}$ 和 $\mathbf{v}$ 是随机噪声。有的系统中 $\mathbf{w}$ 和 $\mathbf{v}$ 会乘以系数矩阵,但是大多数惯性导航装置的三轴传感器精度大体相当,因此没必要引入标准卡尔曼滤波的 $\mathbf{F}$ 矩阵。

状态量的变化也可以描述为连续方程

$$\dot{\mathbf{x}}_k = \mathbf{F} \mathbf{x}_{k-1} \quad (3-26)$$

如果采样间隔足够小,离散方程与连续方程的关系为

$$\Phi = \mathbf{I} + \mathbf{F}T \quad (3-27)$$

其中 T 为采样间隔, $\mathbf{I}$ 为单位矩阵。

卡尔曼滤波的解算过程就是根据 $\mathbf{z}$ 估计 $\mathbf{x}$,具体方法如下:

如果不考虑误差,前后时刻的 $\mathbf{x}$ 具有关系

$$\hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} = \Phi \hat{\mathbf{X}}_{k-1} \quad (3-28)$$

$\hat{\mathbf{X}}_{k-1}$ 是前一时刻 $\mathbf{x}$ 的估计值, $\hat{\mathbf{X}}_{k|k-1}$ 是推算的后一时刻的 $\mathbf{x}$ 。但是因为误差的存在,这个推算并不准确,需要根据 $\mathbf{z}$ 修正,因此取

$$\hat{\mathbf{X}}_k = \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k(\mathbf{z}_k - \mathbf{H}\hat{\mathbf{X}}_{k|k-1}) \quad (3-29)$$

其中 $\mathbf{K}_k$ 是反映权重的滤波增益。这个增益由如下方法计算

$$\mathbf{P}_{k|k-1} = \Phi \mathbf{P}_{k-1} \Phi^T + \mathbf{Q} \quad (3-30)$$

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \quad (3-31)$$

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}) \mathbf{P}_{k|k-1} (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H})^T + \mathbf{K}_k \mathbf{R} \mathbf{K}_k^T \quad (3-32)$$

其中 $\mathbf{P}$ 、 $\mathbf{Q}$ 、 $\mathbf{R}$ 分别是 $\hat{\mathbf{X}}$ 、 $\mathbf{w}$ 、 $\mathbf{v}$ 的方差矩阵。

上述公式给出了线性系统的卡尔曼滤波方法。非线性系统可以局部微分而近似为线性系统,采用扩展卡尔曼滤波方法解算。扩展卡尔曼滤波中的 $\mathbf{x}$ 是误差量,扩展卡尔曼滤波获得误差量后,及时修正,使得误差量总维持在较小范围内;在误差量较小时,局部微分得到的线性系统与原始的非线性系统基本一致,卡尔曼滤波能取得较好效果。

代码包采用闭环反馈校正的方式,滤波后修正惯导误差,所以标准卡尔曼滤波中的 $\hat{\mathbf{X}}_{k-1}$ 取0,简化后的计算公式为

$$\hat{\mathbf{X}}_k = \mathbf{K}_k \mathbf{z}_k \quad (3-33)$$

导航系统是非线性系统。取扩展卡尔曼滤波的状态量 $\mathbf{x}$ 为15维向量,包含位置误差、速度误差、姿态误差、陀螺仪零偏、加速度计零偏各3各自由度,即

$$\mathbf{x} = [\delta L \quad \delta \lambda \quad \delta h \quad \delta v_E \quad \delta v_N \quad \delta v_U \quad \delta \phi_E \quad \delta \phi_N \quad \delta \phi_U \quad \varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \varepsilon_z \quad \nabla_x \quad \nabla_y \quad \nabla_z]^T \quad (3-34)$$

用扩展卡尔曼滤波进行组合导航的步骤是:1.进行惯性导航解算。2.卫星修正时,比较惯性导航与卫星导航的结果偏差,即 $\mathbf{z}$ 。3.用卡尔曼滤波计算 $\mathbf{x}$ 。4.根据 $\mathbf{x}$ 修正惯性导航的结果,并返回步骤1。

3.3.3. 组合导航的状态矩阵

惯性和卫星组合导航系统关键在于具体列出状态矩阵 Φ ,即可实现组合导航的计算。扩展卡尔曼滤波的矩阵 $\mathbf{F}$ 是雅可比矩阵,即偏微分矩阵。根据惯性导航的计算公式,可以得到 $\mathbf{F}$ 如下。

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{pp} & \mathbf{F}_{vp} & \mathbf{O}_3 & \mathbf{O}_3 & \mathbf{O}_3 \\ \mathbf{F}_{pv} & \mathbf{F}_{vv} & \mathbf{F}_{av} & \mathbf{O}_3 & \mathbf{C}_b^n \\ \mathbf{F}_{pa} & \mathbf{F}_{va} & \mathbf{F}_{aa} & -\mathbf{C}_b^n & \mathbf{O}_3 \\ \mathbf{O}_3 & \mathbf{O}_3 & \mathbf{O}_3 & \mathbf{O}_3 & \mathbf{O}_3 \\ \mathbf{O}_3 & \mathbf{O}_3 & \mathbf{O}_3 & \mathbf{O}_3 & \mathbf{O}_3 \end{bmatrix} \quad (3-35)$$

其中每个子矩阵都是 3 阶方阵, $\mathbf{O}_3$ 表示 0 矩阵。

反映位置误差对位置误差影响的子矩阵为

$$\mathbf{F}_{pp} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{v_N}{(R_m + h)^2} \\ \frac{v_E \sec L \tan L}{R_p + h} & 0 & -\frac{v_E \sec L}{(R_p + h)^2} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3-36)$$

反映速度误差对位置误差影响的子矩阵为

$$\mathbf{F}_{vp} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{R_m + h} & 0 \\ \frac{\sec L}{R_p + h} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-37)$$

反映位置误差对速度误差影响的子矩阵为

$$\mathbf{F}_{pv} = \begin{bmatrix} 2\omega_e v_N \cos L + 2\omega_e v_U \sin L + \frac{v_N v_E \sec^2 L}{R_p + h} & 0 & \frac{v_U v_E - v_N v_E \tan L}{(R_p + h)^2} \\ -\left(2\omega_e v_E \cos L + \frac{v_E^2 \sec^2 L}{R_p + h}\right) & 0 & \frac{v_N v_U}{(R_m + h)^2} + \frac{v_E^2 \tan L}{(R_p + h)^2} \\ -2v_E \omega_e \sin L & 0 & -\frac{v_N^2}{(R_m + h)^2} - \frac{v_E^2}{(R_p + h)^2} \end{bmatrix} \quad (3-38)$$

反映速度误差对速度误差影响的子矩阵为

$$\mathbf{F}_{vv} = \begin{bmatrix} \frac{v_N \tan L - v_U}{R_p + h} & 2\omega_e \sin L + \frac{v_E \tan L}{R_p + h} & -2\omega_e \cos L - \frac{v_E}{R_p + h} \\ -2\omega_e \sin L - \frac{2v_E \tan L}{R_p + h} & \frac{-v_U}{R_m + h} & \frac{-v_N}{R_m + h} \\ 2\left(\omega_e \cos L + \frac{v_E}{R_p + h}\right) & \frac{2v_N}{R_m + h} & 0 \end{bmatrix} \quad (3-39)$$

反映姿态误差对速度误差影响的子矩阵为

$$\mathbf{F}_{av} = \begin{bmatrix} 0 & -f_U & f_N \\ f_U & 0 & -f_E \\ -f_N & f_E & 0 \end{bmatrix} \quad (3-40)$$

其中 f_E 、 f_N 、 f_U 是换算到 n 系的加速度计数值, 即不扣除重力的比力信息。

$$\mathbf{f}_n = \begin{bmatrix} f_E \\ f_N \\ f_U \end{bmatrix} = \mathbf{C}_b^n \mathbf{f}_b \quad (3-41)$$

反映位置误差对姿态误差影响的子矩阵为

$$\mathbf{F}_{pa} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{v_N}{(R_m + h)^2} \\ -\omega_e \sin L & 0 & \frac{-v_E}{(R_p + h)^2} \\ \omega_e \cos L + \frac{v_E \sec^2 L}{R_p + h} & 0 & \frac{-v_E \tan L}{(R_p + h)^2} \end{bmatrix} \quad (3-42)$$

反映速度误差对姿态误差影响的子矩阵为

$$\mathbf{F}_{va} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{R_m + h} & 0 \\ \frac{1}{R_p + h} & 0 & 0 \\ \frac{\tan L}{R_p + h} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3-43)$$

反映姿态误差对姿态误差影响的子矩阵为

$$\mathbf{F}_{aa} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_e \sin L + \frac{v_E \tan L}{R_p + h} & -\omega_e \cos L - \frac{v_E}{R_p + h} \\ -\omega_e \sin L - \frac{v_E \tan L}{R_p + h} & 0 & -\frac{v_N}{R_m + h} \\ \omega_e \cos L + \frac{v_E}{R_p + h} & \frac{v_N}{R_m + h} & 0 \end{bmatrix} \quad (3-44)$$

导航计算机每次收到惯性数据时，要计算 $\mathbf{F}$ 矩阵，并更新 Φ 矩阵。导航计算机收到卫星数据时再进行卡尔曼滤波解算，并根据滤波计算得到的误差量修正导航结果。

4. 代码包预览

4.1. 部分代码截图

（由于版本迭代，实际代码可能与截图有轻微差别）

%生成路线

```
dTins=0.005;
L=60000;
t=(1:L)'*dTins;
w=[0.01*sin(0.11*t), 0.01*sin(0.19*t), 0.05*sin(0.03*t)];
an=[0.15*(sin(0.09*t)-0.2), 0.1*sin(0.02*t), 0.07*sin(0.03*t)];
```

```
attil=setoula(0,0,0);
pos1=[45/180*pi;120/180*pi;100];
speed1=zeros(3,1);
[~,~,ge]=earthmodelupdate(pos1);
```

data=zeros(L,12+1+9);%陀螺仪、加速度计、卫星导航位置、卫星导航速度；卫星5

```
for k=1:L
    gyro=w(k,:)' ;
    Cbn=cbn(attil);
    acc=Cbn*(an(k,:)' +[0;0;ge]);
    [attil,speed1,pos1,accn1]=insgyroacc(gyro,acc,attil,speed1,pos1,dTins,biasgyro,biasacc,biasacc);
    data(k,:)=[gyro',acc',pos1',speed1',0,getoula(attil)',speed1',pos1'];
```

```
gyro=data(k,1:3)';
acc=data(k,4:6)';
```

```
[attil,speed1,pos1,accn1]=insgyroacc(gyro,acc,attil,speed1,pos1,dTins,biasgyro,biasacc,biasacc);
Phi1=stateupdate(dTins,attil,speed1,pos1,accn1,Phi1);
Q1=Q1+Q0*dTins;
```

```
if(data(k,13)==1)
    gnsspos=data(k,7:9)';
    gnssspeed=data(k,10:12)';
    Z1=[pos1-gnsspos;speed1-gnssspeed];
    [X1,Pk1]=kal(Z1,H,Pk1,Q1,R,Phi1);
    Phi1=eye(15);
    Q1=zeros(15);
    pos1=pos1-X1(1:3,1);
    speed1=speed1-X1(4:6,1);
    attil=qupdate(attil,(cbn(attil))'*X1(7:9,1));
    biasgyro=biasgyro-X1(10:12,1);
    biasacc=biasacc-X1(13:15,1);
end
```

```

%一、计算姿态
wien=twe(pos);
wenn=twv(pos,speed,Rmeri,Rprim);
Cbn=cbn(atti);
wnbb=gyro1-Cbn'*(wien+wenn);%扣除地球自转、扣除速度引起的角速度之后，在b系的转动角速度。
atti=qupdate(atti,wnbb*dTins);%更新姿态

%二、计算速度
accn=Cbn*acc1;%更新这个数，以便于卡尔曼滤波的部分使用

gn=[0;0;-ge];
an=accn-cross(wien+wien+wenn,speed)+gn;
speed=speed+dTins*an;%更新速度

%三、计算位置
dpos=zeros(3,1);

H=pos(3);
dpos(1)=speed(2)/(Rmeri+H);%北向速度得到纬度
dpos(2)=speed(1)/((Rprim+H)*cos(pos(1)));%东向速度得到经度
dpos(3)=speed(3);
pos=pos+dTins*dpos;%更新位置

```

%位置对位置影响的子矩阵

```

Fpp=[0, 0, RmH1*RmH1*(-vN);
      RpH1*vE*secphi*tanphi, 0, RpH1*RpH1*(-vE)*secphi;
      0, 0, 0];
F(1:3,1:3)=Fpp;

```

%速度对位置影响的子矩阵

```

Fvp=[0, RmH1, 0;
      RpH1*secphi, 0, 0;
      0, 0, 1];
F(1:3,4:6)=Fvp;

```

%位置对速度影响的子矩阵

```

Fpv=[2*we*cosphi*vN+2*we*sinphi*vU+vN*vE*RpH1*secphi*secphi, 0, RpH1*RpH1*(v
      -(2*vE*we*cosphi+vE*vE*RpH1*secphi*secphi), 0, RmH1*RmH1
      (-2.0)*vE*we*sinphi, 0, (-RmH1*RmH1*
F(4:6,1:3)=Fpv;

```

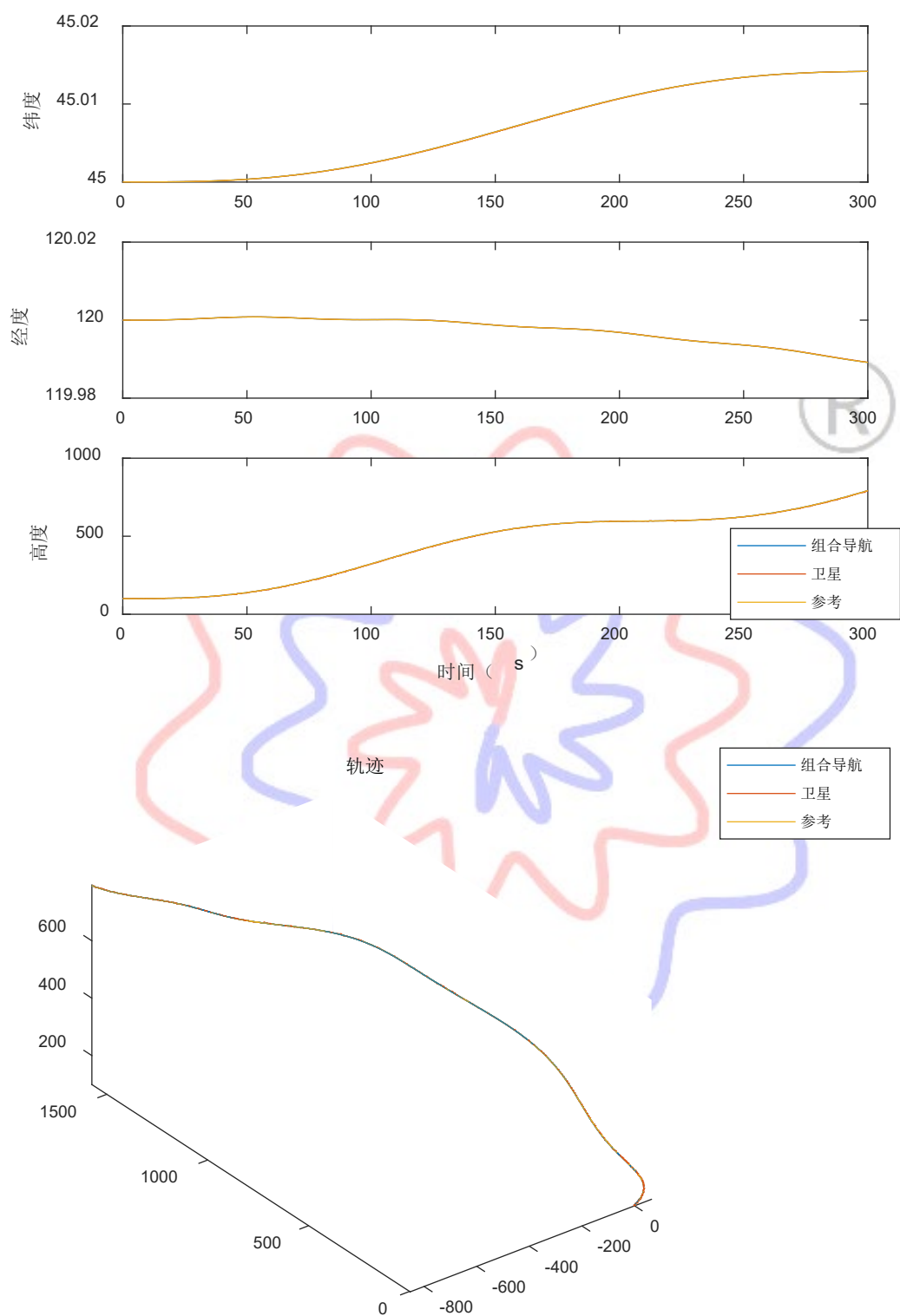
%速度对速度影响的子矩阵

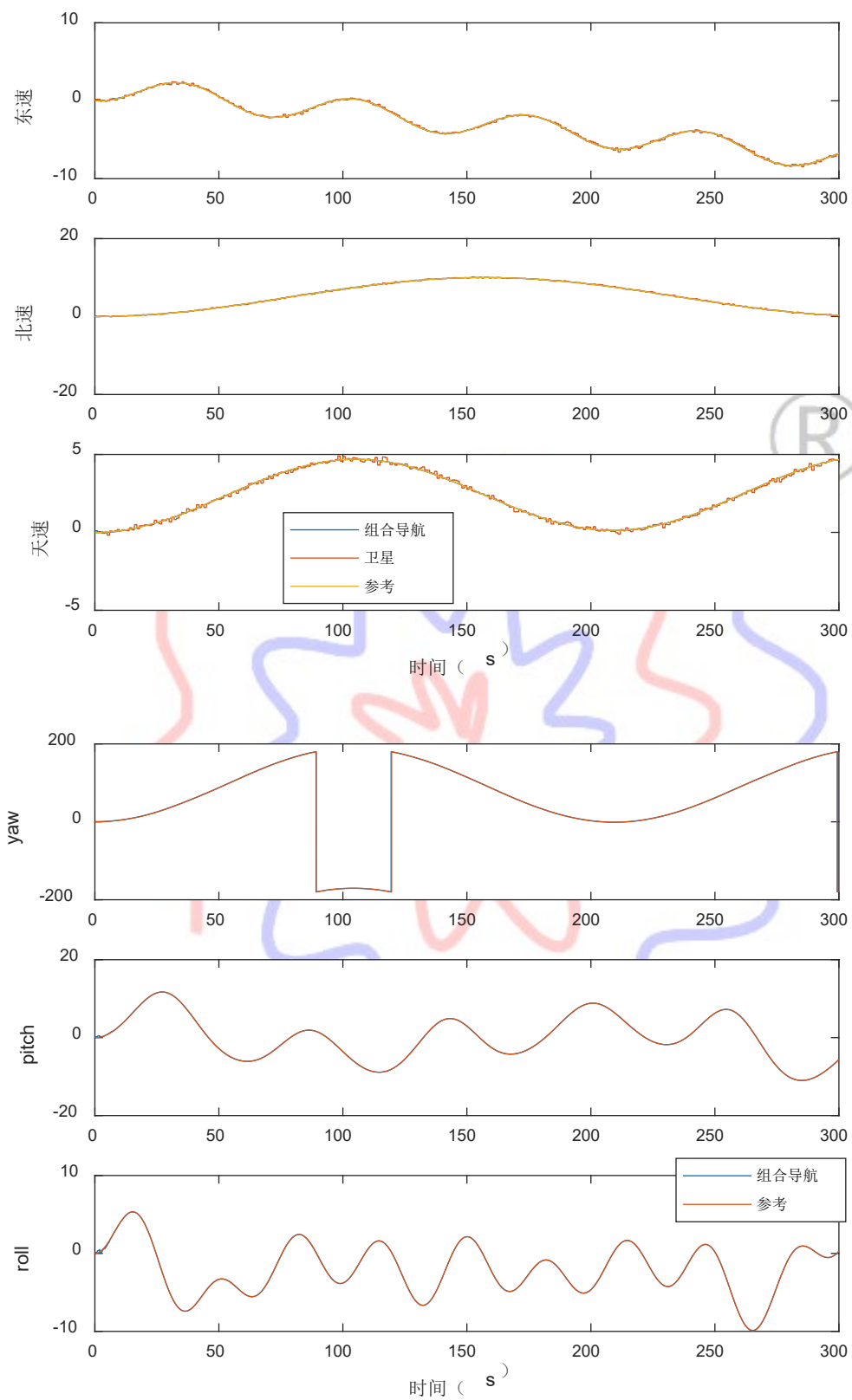
```

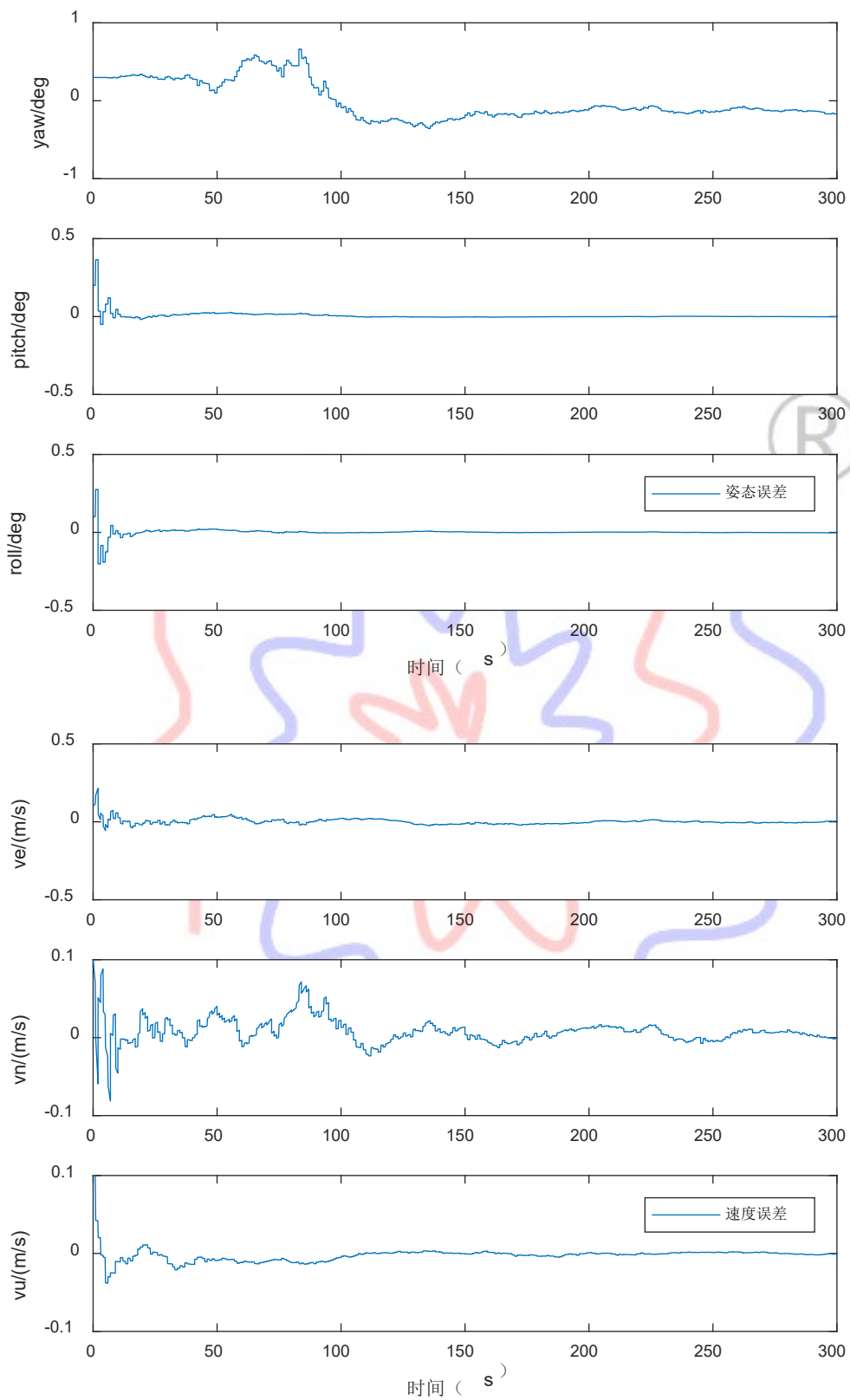
Fvv=[(vN*tanphi-vU)*RpH1, 2.0*we*sinphi+vE*RpH1*tanphi, (-2.
      (-2.0)*(we*sinphi+vE*RpH1*tanphi), (-RmH1)*vU, (-Rm
      2.0*(we*cosphi+vE*RpH1), 2*vN*RmH1, 0];

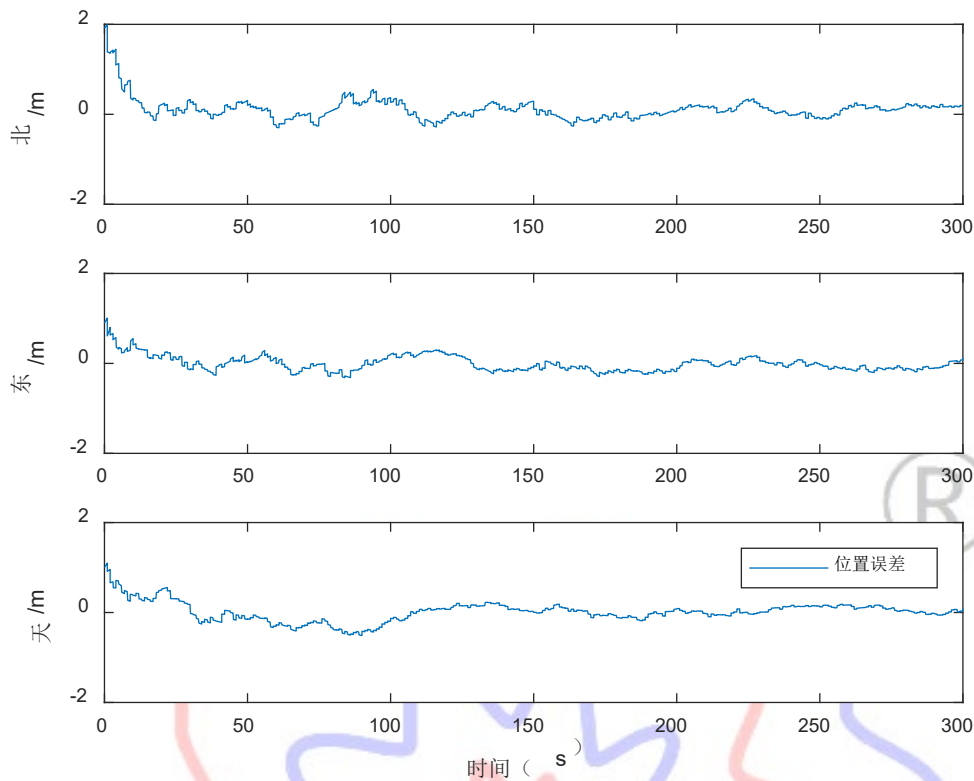
```

4.2. 输出数据曲线









5. 常见问题

5.1. 代码容易看懂吗

本代码为了便于学习理解，力求简洁清楚。但是代码包技术含量较高，本店不保证用户能理解代码。用户可以参照前文的代码截图，预先评估自己是否可以理解代码包的内容。

为了防止非法转卖，代码包的注释比较简化。如有难以理解的部分，可以联系本店人工答疑。

5.2. 组合导航比卫星导航更准吗

组合导航结果基本相当于卫星导航结果的平滑。对于低精度 IMU，组合结果甚至可能不如卫星导航准确。

组合导航与卫星导航相比，主要优势有：1.组合导航的数据刷新率更高。2.组合导航可以输出姿态信息。

5.3. 算法的精度是多少

对于绝大多数情况，组合导航的精度主要取决于传感器精度，算法精度不是导航结果精度的瓶颈。如果用户得到的导航结果精度偏低，应当优先检查传感器精度。

代码包处理附带数据的精度，不能代表代码包处理用户数据的精度。

真实实验数据的绝对精度难以评估。如果用户期望在实验中评估绝对精度，有几种可行的方案：1.采用更高精度的导航设备作为位置基准，与自制设备一同实验；比如采用成品高精度组合导航装置，或采用 RTK 卫星导航装置。2.测绘特定轨道位置，沿着特定轨道运动，比如摄像轨道车。

5.4. 怎样判断组合导航的结果是否正确

用户可以尝试故意把代码包的初始姿态改错、然后再运行，以观察组合导航异常时的计算结果，直观体会组合导航结果正常与异常的差别。

5.5. 代码可以处理自己的实验数据吗

本代码包可以处理实验数据，已经有数百个成功案例。但是收集实验数据和处理实验数

据都有一定的技术含量。本店不保证用户能成功。

用户收集实验数据时，应注意以下事项：1.IMU 要有足够的采样率，推荐高于 200Hz；采样率过低可能导致完全丧失精度；另外，IMU 数据不能有大量丢失，应该力求均匀完整采集。2.要确认 IMU 的轴向；一些市面销售的传感器其坐标方向与标准定义不符，需要额外换算。3.要记录惯性导航的初始姿态，尤其是使用低精度惯性导航装置时务必记录初始航向。4.IMU 数据与卫星接收机数据要时间对齐；有人分别记录二者数据且无时标，会导致两种数据无法对齐、不能处理；对于通常的运动场景，时间对齐精度最好优于 0.1s。5.要抑制杆臂效应，让 IMU 与卫星天线尽量靠近。

为了方便，建议实验时先原地静止 10 秒左右，再开始运动。

用户处理实验数据时，应注意以下事项：1.数据单位是正确的。2.惯性导航的初值是正确的，这点尤其重要。3.数据中已经剔除了异常数值。

5.6. 坐标系定义不一致怎么办

本代码包采用东北天坐标系。如果有人采用北东地、北天东等，也可以使用本代码包计算，但是需要稍作修改。不同坐标系定义，影响姿态四元数或欧拉角的定义，即重写公式(3-6)，不影响其余计算。采用其他坐标系，只需要换算初始姿态、输出姿态角即可；不要换算传感器轴向等无关量。

5.7. 代码依据哪个参考资料的原理

本店正在筹备出版相关书籍，预计 2025 年出版。

暂时可以参考：Fundamentals of Inertial Navigation, Satellite-based Positioning and their Integration (作者 Aboelmagd Noureldin, Tashfeen B. Karamat, Jacques Georgy, 出版商 Springer) (此书国内亦有翻译版)。代码与此书不完全一致。

本店另行录制了教学视频，陆续上传 B 站。

5.8. 怎样调卡尔曼滤波参数

根据大量用户的实践结果，结果异常的情况中 80% 以上可以归结于其余部分的错误，参数不合适造成的异常只占很少的比例。此外，算法对于卡尔曼滤波参数不敏感，通常情况下即使参数调整 10 到 100 倍，仍然能得到正常的计算结果。所以，当结果显著异常时，应当优先检查其余部分是否正确，而不是调整参数。

P_k 是初始误差的平方。 R 是卫星的误差的平方。 P_k 和 R 都能直接计算得到，通常不必大调。注意单位换算。例如，初始位置北向误差大约 10 米，则 P_k 的第一个数取 $(10/R_e)^2$ ，其中 R_e 是地球半径。其余数值计算方法类似。

Q 反映了惯导噪声等误差项的影响，如速率随机游走等。理论上，根据传感器艾伦方差曲线，推算角速率随机游走等误差项的数值，进一步计算得到 Q 的值。但是实际上，因为惯导的误差并没有全部纳入 15 维卡尔曼滤波的方程中，比如不正交误差、 g 值敏感系数、温度系数等等，所以不宜直接根据理论推算 Q 值。

实践中，采用人工调参法比较方便。代码包的默认数值，对于很多导航系统是适用的，可以先不调。如果确实需要调整 Q ，开始尝试时 Q 尽量小一些，等待滤波器调试稳定后，逐步调大一点点 Q 。先确保稳定性，再调整快速性和准确性。

如果惯导的传感器零偏误差较大，可以调大 P_k 和 Q 的最后 6 个数值。如果卫星导航波动较大，则 Q 可以小一点， R 可以大一点。反之亦然。

确有需要的，可以将数据和能运行的代码发送本店，本店人工调参。（可能需要额外收费）

5.9. 卫星导航只有位置没有速度怎么办

此时需要微调代码。卡尔曼滤波参数 R 改为 3×3 矩阵；观测量 $Z1$ 改为 3×1 矩阵；观测方程 $H1$ 改为 3×15 矩阵。如果不修改代码，而是直接取速度为 0，会导致计算结果异常，不

要这样做。

6. 著作权和服务

6.1. 工作原理参考什么资料

参考实体书《组合导航应用笔记》，东南大学出版社，2025 年。

讲解视频，哔哩哔哩视频网搜索“大胡子刘师傅”。

6.2. 著作权声明

本店保留著作权。

电路、说明书、全部附属代码（以下简称本代码包）仅限于学习和研究用途的少量使用；包含改编文件、写入嵌入式系统的编译后程序，所有副本总计不得超过 5 份。

本代码包有偿使用。

严禁转卖或公开发布本代码包的全部或一部分。

大规模应用本代码包需要额外取得本店的授权。

对于违反上述要求的用户，本店有权要求停止销售、撤稿、赔偿损失等。

6.3. 服务内容

赠送 30 分钟语音答疑服务，用于解决较为复杂的疑问。

赠送长期文字答疑，用于解决简单的、零散的疑问。

答疑服务仅限直接购买人本人使用。答疑服务不能转让、不能共享。用户需要保留购买凭证截图；丢失购买凭证的，本店可以不提供答疑服务；不是从本店购买的，而是从其他渠道获得代码包的，不提供答疑服务。

本商品技术含量较高，本店不保证能在限时内解答所有疑问。有需要的用户，可以付费购买额外的语音答疑服务。

本店可提供少量的数据判读服务。但是大量的数据判读服务需要额外收费。较为复杂的数据处理，或者定制化修改代码，可能需要额外收费。

上述服务可能需要排队，本店不能保证服务的实时性。

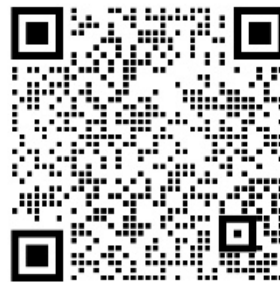
6.4. 联系方式

西安市雁塔区雾膜软件开发站

销售、答疑、定制开发：

微信：（扫码）

雾膜软件



电子邮箱：braun@wmsoft.wang

网站：<http://wmsoft.xyz>