

KIN20 激光陀螺惯性导航系统

一、概述

KIN20 激光惯性导航系统的核心是由三个激光陀螺和三个石英加速度计及外围采集处理电路组成的惯性测量系统，并在高性能的 DSP 上运行着独特的捷联导航算法和组合导航算法，启动过程采用特殊对准方案，无动态约束条件，对纬度和速度没有限制。系统能精确的输出载体的三维姿态角（航向角，横摇角，纵摇角），姿态角速率（航向角速率，横摇角速率，纵摇角速率），及经纬度等导航信息。在有外界 GPS、里程计、计程仪等信息输入的条件下，可实现组合导航。

二、系统指标

1. 主要精度指标

激光惯性导航系统精度如表 1 所示。

表 1 KIN20 激光陀螺惯性导航系统精度

项目	指标
航向角	$\leq 0.06^\circ$ (rms)
纵摇角	$\leq 0.01^\circ$ (rms)
横摇角	$\leq 0.01^\circ$ (rms)

2. 系统工作条件

KIN20 激光陀螺惯性导航系统测量范围如表 2 所示。

表 2 光纤惯性导航系统测量范围

项目	测量范围
速度范围	-40m/s-40m/s
俯仰角范围	$\pm 90^\circ$
横滚角范围	$\pm 180^\circ$
航向角范围	0° - 360°

3. 可靠性

- a) 平均故障间隔时间（MTBF）： $\geq 2000\text{h}$;
- b) 连续工作时间： $\geq 4\text{h}$ 。

4. 环境适应性

- a) 工作温度： $-40^\circ\text{C} \sim +60^\circ\text{C}$;
- b) 贮存温度： $-55^\circ\text{C} \sim +85^\circ\text{C}$;
- c) 振动：2g, 20Hz-100Hz, 扫频;
- d) 强冲击：20g, 5ms, 半正弦。

5. 运输性

装箱后的产品可用于铁路、公路、水路及航空运输。

6. 安全性

- a) 电源模块在输入端有过流保护的保险丝，对设备进行过流保护；
- b) 设备无有毒气体和固体，外壳无锋利边缘，不危害人员生命健康，安装结构牢固可靠。

7. 互换性

整机在保证安装定位面的情况下具有互换性。

8. 电源适应性与能耗

- a) 电源适应性：24V DC（19.5V~33V）；
- b) 功耗:工作时最大功耗小于 30W。

9. 接口形式

- a) 通讯数据接口：2 个 RS422
- b) 更新频率≤400HZ

10. 机械尺寸:

192mm×292mm×167.5mm(宽，长，高)（或按要求定制）。

11. 重量

8.2kg（不包含电缆）。

12. 外观质量

表面光滑、平整、无尖锐的棱角，无腐蚀及影响外观质量的伤痕、毛刺、变形和污垢，涂层均匀，无凝结、脱落、气泡、龟裂及磨损等现象。

三、系统特点

- 1) 为了实现系统的小型化与轻型化要求，台体采用最小化设计，内部其它部分采用模块化设计，其他部分的尺寸适应惯组的最小化要求；
- 2) 采用精度0.01°/h的激光陀螺仪；
- 3) 电子线路单元按功能进行模块化设计。

四、参数指标

1. 惯性元件

(1) 激光陀螺

表 3 激光陀螺主要性能指标

序号	技术指标	参数
1	零偏稳定性（° /h）	0.01
2	零偏重复性（° /h）	0.01
3	最大测量角速率（° /s）	400° /s
4	标度因数线性度 ppm	10ppm
5	标度因数重复性 ppm	10ppm

6	磁场敏感性 (° /h/Gauss)	0.01
7	稳定时间 (s)	2
8	工作温度	-40℃～60℃
9	存储温度	-55℃～85℃
10	重量	≤1000g

(2) 加速度计

表 4 加速度计主要性能指标

序号	技术指标	参数
1	量程	±20 g
2	偏值 K0	<4 mg
3	标度因数 K1	(1.2～1.3) mA/g
4	分辨率	5 μg
5	偏值、标度、二次项短期稳定性 (1σ, 3h)	30×10 ⁻⁶ g
6	偏值、标度、二次项月稳定性 (1σ)	50×10 ⁻⁶ g
7	二阶非线性项系数 K2	<70 μg/g ²
8	三阶非线性项系数 K3	<70 μg/g ³
9	交叉耦合系数 K4	<70 μg/g ²
10	偏值的温度系数	<70 μg/℃ (-40℃～65℃)
11	标度的温度系数	<70 ppm/℃ (-40℃～65℃)
12	安装误差角 (门状态和摆状态)	100"
14	应力筛选试验偏值、标度、二次项的变化同原标度的比值	< 1×10 ⁻⁴
15	电器参数	力矩器电阻值: (140～190) Ω; 绝缘电阻>250MΩ
16	工作温度范围	-55℃-80℃
17	存储温度范围	-55℃-80℃

2. 电路方案

光纤惯性导航系统线路板分为三部分：二次电源板、信号处理板、导航通信电路、IF板。电源板实现将输入的直流24V电源进行二次转换，为惯性元件和其他电子线路板进行供电；采集板实现陀螺和加速度计的信号采集，并完成导航解算；导航板实现惯性和组合导航解算；IF板实现加速度计信号的电流到频率转换，输入到采集板。系统硬件组成信息见表1，系统硬件组成框图见图1。

表 1 硬件组成

序号	名称	主要功能	数量	备注
1	二次电源电路	为系统其它模块提供所需电源	1	
2	信号处理电路	实现惯性元件数据采集以及对采集数据进行预处理	1	
3	导航通信电路	实现惯性导航解算，并负责和系统外围设备进行数据交互	1	
4	IF 转换电路	实现三路加速度计信号采集	1	
5	底板	实现上述四种线路板的电气连接	1	

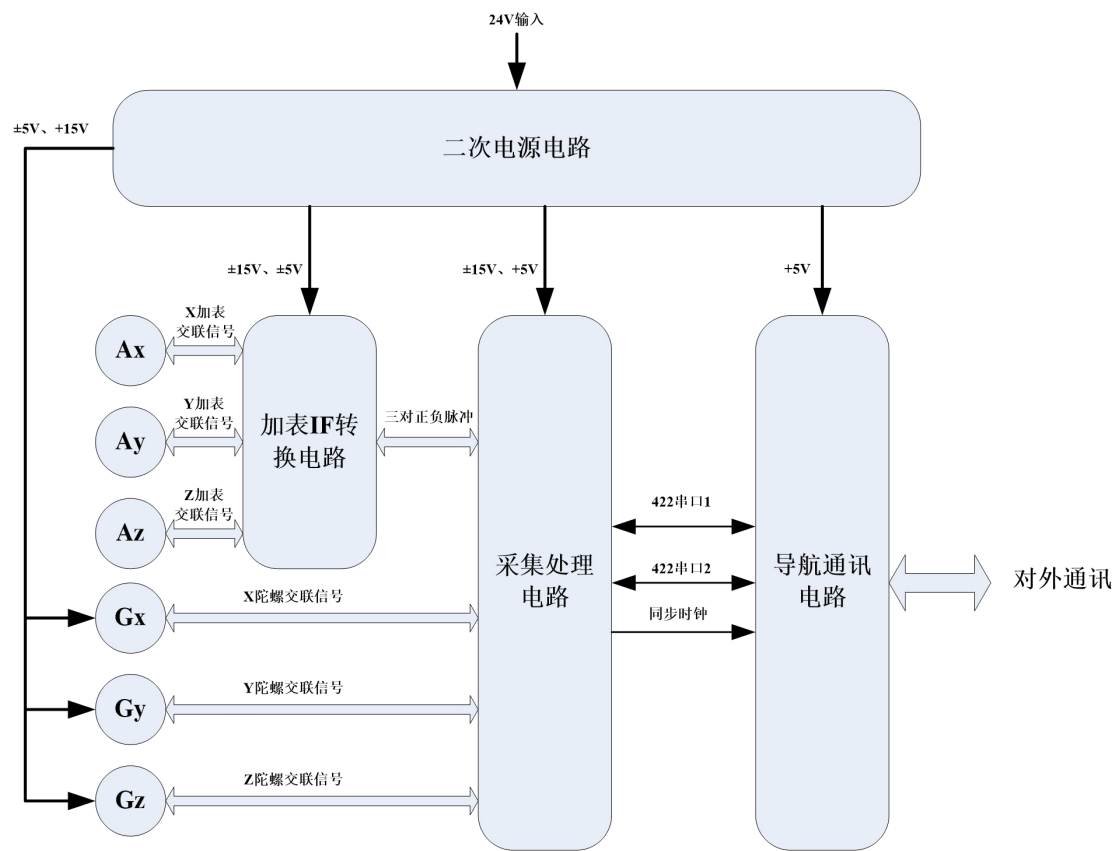


图 1 硬件组成框图

3. 软件方案

3.1 导航机械编排

本系统采用的导航坐标系为当地地理坐标系，导航系机械编排的框图如图 2 所示。

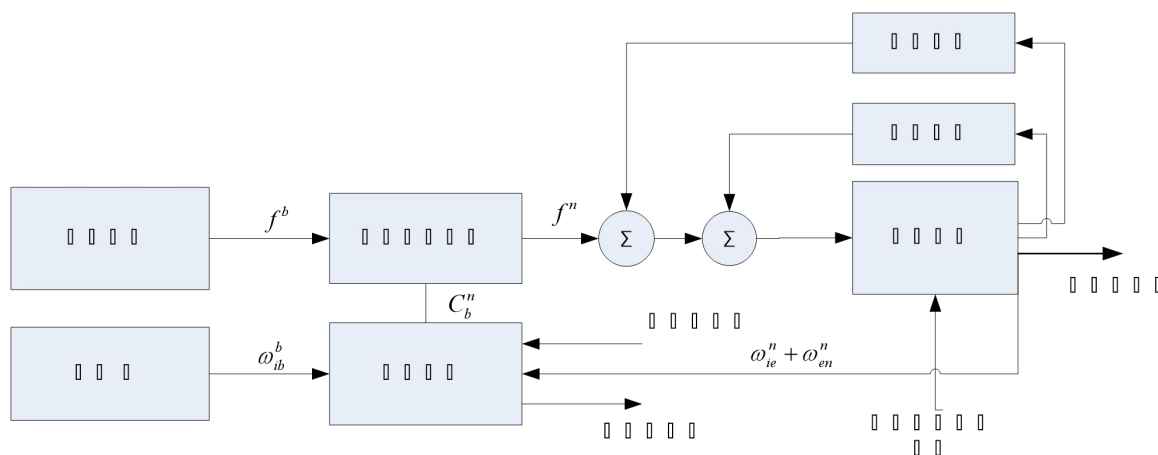


图 2 导航机械编排框图

读取加速度计和陀螺的输出后，进行导航解算，导航解算原理框图如图 3 所示。

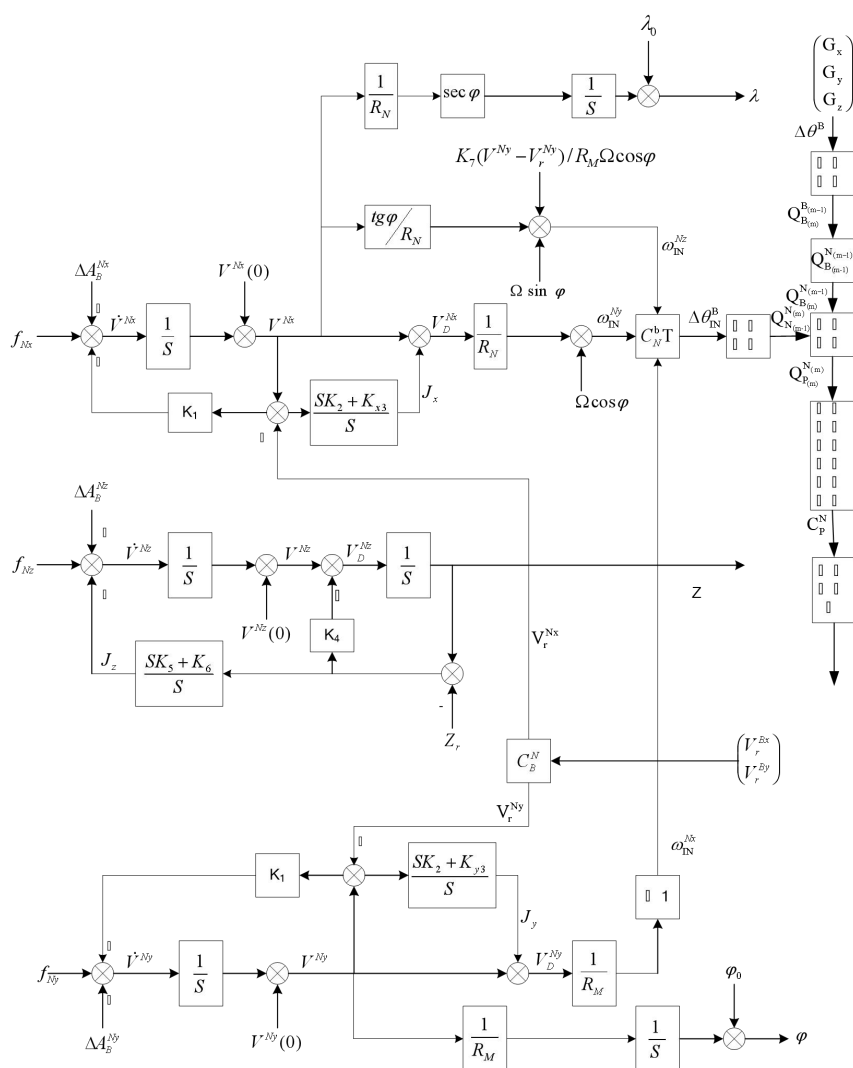


图 3 捷联导航解算原理框图

3.2 速度位置计算

加速度计的输出为速度增量 ΔV^b ，则加速度为

$$f^n = \frac{1}{T} C_b^n K_A^b K_A (\Delta V^b - \Delta A \cdot T)$$

上式中 T 为计算的时间步长， ΔA 为加表零偏， $K_A = \begin{bmatrix} k_{ax} & 0 & 0 \\ 0 & k_{ay} & 0 \\ 0 & 0 & k_{az} \end{bmatrix}$ 为标度

矩阵， $C_A^b = \begin{bmatrix} 1 & -\gamma_{yz} & \gamma_{zy} \\ \gamma_{xz} & 1 & -\gamma_{zx} \\ -\gamma_{xy} & \gamma_{yx} & 1 \end{bmatrix}$ 安装误差矩阵， C_b^N 为姿态矩阵。有害加速度的计

算为：

$$\begin{cases} \Delta A_B^{Nx} = -(2\Omega \sin \varphi + V^{Nx} \cdot \frac{tg \varphi}{R_N}) V^{Ny} + (2\Omega \cos \varphi + \frac{V^{Nx}}{R_N}) \cdot V^{Nz} \\ \Delta A_B^{Ny} = (2\Omega \sin \varphi + V^{Nx} \cdot \frac{tg \varphi}{R_N}) V^{Nx} + \frac{V^{Ny} \cdot V^{Nz}}{R_M} \\ \Delta A_B^{Nz} = -(2\Omega \cos \varphi + \frac{V^{Nx}}{R_N}) V^{Nx} - \frac{(V^{Ny})^2}{R_M} + g(\varphi, Z) \end{cases}$$

其中：

$$R_M = \frac{a(1-e^2)}{(1-e^2 \sin^2 \varphi)^{\frac{3}{2}}} + Z$$

$$R_N = \frac{a}{(1-e^2 \sin^2 \varphi)^{\frac{1}{2}}} + Z$$

$$g(\varphi, Z) = \frac{g_0 a^2}{(a+Z)^2} (1 + 0.0052884 \sin^2 \varphi - 0.0000059 \sin^2 2\varphi)$$

$$g_0 = 978.045 \text{ cm/s}^2$$

$$a = 6378.245 \text{ km}$$

e 为椭球的偏心率， Z 为高度。

中间速度的解算公式为

$$\begin{cases} V^{Nx}(t) = e^{-K_1 T} \cdot V^{Nx}(t_0) + \frac{1}{K_1} (1 - e^{-K_1 T}) [f_{Nx}(t_0) - \Delta A_B^{Nx}(t_0) + K_1 V_r^{Nx}(t_0)] \\ V^{Ny}(t) = e^{-K_1 T} \cdot V^{Ny}(t_0) + \frac{1}{K_1} (1 - e^{-K_1 T}) [f_{Ny}(t_0) - \Delta A_B^{Ny}(t_0) + K_1 V_r^{Ny}(t_0)] \\ V^{Nz}(t) = V^{Nz}(t_0) + [f_{Nz}(t_0) - \Delta A_B^{Nz}(t_0) - J_z(t_0)] \cdot T \end{cases}$$

速度的计算公式为：

$$\begin{cases} V_D^{Nx}(t) = V^{Nx}(t) + J_x(t) \\ V_D^{Ny}(t) = V^{Ny}(t) + J_y(t) \\ V_D^{Nz}(t) = V^{Nz}(t) - K_4[Z(t) - Z_r(t)] \end{cases}$$

中间变量的计算公式为：

$$\begin{cases} J_x(t) = K_2[V^{Nx}(t) - V_r^{Nx}(t)] + D_x(t) \\ J_y(t) = K_2[V^{Ny}(t) - V_r^{Ny}(t)] + D_y(t) \\ J_z(t) = K_5[Z(t) - Z_r(t)] + D_z(t) \end{cases}$$

$$\begin{cases} D_x(t) = D_x(t_0) + K_3[V^{Nx}(t_0) - V_r^{Nx}(t_0)] \cdot T \\ D_y(t) = D_y(t_0) + K_3[V^{Ny}(t_0) - V_r^{Ny}(t_0)] \cdot T \\ D_z(t) = D_z(t_0) + K_6[Z(t_0) - Z_r(t_0)] \cdot T \end{cases}$$

位置更新为：

$$\begin{cases} \lambda(t) = \frac{V^{Nx}}{R_N \cos \varphi} \cdot T + \lambda(t_0) \\ \varphi(t) = \frac{V^{Ny}}{R_M} \cdot T + \varphi(t_0) \\ Z(t) = V_D^{Nz} \cdot T + Z(t_0) \end{cases}$$

ω_{EN}^N 的计算为：

$$\begin{cases} \omega_{EN}^{Nx} = -V_D^{Ny} / R_M \\ \omega_{EN}^{Ny} = V_D^{Nx} / R_N \\ \omega_{EN}^{Nz} = V^{Nx} \cdot \tan \varphi / R_N + K_7(V^{Ny} - V_r^{Ny}) / (R_M \cdot \Omega \cos \varphi) \end{cases}$$

以上各式中， K_1, K_2, \dots, K_7 为阻尼网络中的参数。当系统工作于罗经状态，可取值 $K_1=0.01$ ； $K_2=42.47$ ； $K_3=0.0966$ ； $K_4=0.05$ ； $K_5=0.0009927$ ； $K_6=0.000007233$ ； $K_7=0.0966$ 。

3.3 姿态的计算

设姿态角横摇为 θ ，纵摇为 ϕ ，航向为 ψ ，则经过对准后四元数

$Q_B^N = [q_1 \ q_2 \ q_3 \ q_4]^T$ 的始值为：

$$\begin{cases} q_1 = \cos(\psi/2) \cos(\phi/2) \cos(\theta/2) + \sin(\psi/2) \sin(\phi/2) \sin(\theta/2) \\ q_2 = \cos(\psi/2) \sin(\phi/2) \cos(\theta/2) + \sin(\psi/2) \cos(\phi/2) \sin(\theta/2) \\ q_3 = \cos(\psi/2) \cos(\phi/2) \sin(\theta/2) - \sin(\psi/2) \sin(\phi/2) \cos(\theta/2) \\ q_4 = \cos(\psi/2) \sin(\phi/2) \sin(\theta/2) - \sin(\psi/2) \cos(\phi/2) \cos(\theta/2) \end{cases}$$

激光陀螺以固定频率输出角度增量脉冲数 ΔP^G ，则角度增量

$$\Delta\theta^B = C_G^B K_G \Delta P^G - \Delta G \quad T \quad (4-10)$$

其中 $K_G = \begin{bmatrix} k_{gx} & 0 & 0 \\ 0 & k_{gy} & 0 \\ 0 & 0 & k_{gz} \end{bmatrix}$ 为陀螺标度矩阵, $C_G^B = \begin{bmatrix} 1 & -\mu_{yz} & \mu_{zy} \\ \mu_{xz} & 1 & -\mu_{zx} \\ -\mu_{xy} & \mu_{yx} & 1 \end{bmatrix}$ 为安装

误差矩阵, ΔG 为陀螺常漂。则姿态四元数的更新为

$$Q_{B(m)}^{N(m-1)} = Q_{B(m-1)}^{N(m-1)} Q_{B(m)}^{B(m-1)}$$

忽略二阶以上小量, $Q_{B(m)}^{B(m-1)}$ 计算如下,

$$Q_{B(m)}^{B(m-1)} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{1}{8} \Delta\theta^2 \\ (\frac{1}{2} - \frac{1}{48} \Delta\theta^2) \Delta\theta^B \end{bmatrix}$$

其中 $\Delta\theta = |\Delta\theta^B|$, 计算完 m 时刻的转动四元数后, 对其进行归一化,

$$Q_{B(m)}^{N(m-1)} = Q_{B(m)}^{N(m-1)} / \|Q_{B(m)}^{N(m-1)}\|$$

导航坐标系相对惯性坐标系 i 系的旋转角度变化如下计算

$$\zeta_m = (\omega_{IE}^N + \omega_{EN}^N) T$$

忽略二阶以上小量, 用四元数表示相对应的旋转关系为

$$Q_{N(m)}^{N(m-1)} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{1}{8} |\zeta_m|^2 \\ \frac{1}{2} \zeta_m \end{bmatrix}$$

由于导航坐标系旋转的存在, 因此需要对姿态四元数再次更新, 如下所示

$$Q_{B(m)}^{N(m)} = Q_{N(m-1)}^{N(m)} Q_{B(m)}^{N(m-1)}$$

其中, $Q_{N(m)}^{N(m-1)}$ 与 $Q_{N(m-1)}^{N(m-1)}$ 互为共轭四元数。姿态四元数 Q_B^N 与姿态矩阵的关系为

$$C_B^N = \begin{bmatrix} q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 - q_4^2 & 2(q_2 q_3 - q_1 q_4) & 2(q_2 q_4 + q_1 q_3) \\ 2(q_2 q_3 + q_1 q_4) & q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 - q_4^2 & 2(q_3 q_4 - q_1 q_2) \\ 2(q_2 q_4 - q_1 q_3) & 2(q_3 q_4 + q_1 q_2) & q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 + q_4^2 \end{bmatrix}$$

用姿态角表示姿态矩阵 C_B^N 为

$$C_B^N = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi + \sin \theta \sin \phi \sin \psi & \cos \phi \sin \psi & \sin \theta \cos \psi - \cos \theta \sin \phi \sin \psi \\ -\cos \theta \sin \psi + \sin \theta \sin \phi \cos \psi & \cos \phi \cos \psi & -\sin \theta \sin \psi - \cos \theta \sin \phi \cos \psi \\ -\sin \theta \cos \phi & \sin \phi & \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix}$$

其中横摇角 θ 的定义域为 $(-90^\circ, 90^\circ)$ ，纵摇角 ϕ 的定义域为 $(-90^\circ, 90^\circ)$ ，航向角 ψ 的定义域为 $[0^\circ, 360^\circ)$ ，姿态角的计算如下：

$$\theta = \arctan(-c_{31} / c_{33})$$

$$\begin{cases} C_{32} < \sqrt{C_{31}^2 + C_{33}^2} : & \phi = \arctan(C_{32} / \sqrt{C_{31}^2 + C_{33}^2}) \\ C_{32} > \sqrt{C_{31}^2 + C_{33}^2} : & \phi = \frac{1}{2}\pi - \arctan(\sqrt{C_{31}^2 + C_{33}^2} / C_{32}) \\ C_{32} < -\sqrt{C_{31}^2 + C_{33}^2} : & \phi = \frac{1}{2}\pi + \arctan(\sqrt{C_{31}^2 + C_{33}^2} / C_{32}) \end{cases}$$

$$\begin{cases} C_{22} \geq |C_{12}|, C_{12} \geq 0 : & \psi = \arctan(C_{12} / C_{22}); \\ C_{22} \geq |C_{12}|, C_{12} < 0 : & \psi = 2\pi + \arctan(C_{12} / C_{22}); \\ C_{12} > |C_{22}| : & \psi = \frac{\pi}{2} - \arctan(C_{22} / C_{12}); \\ C_{22} \leq -|C_{12}| : & \psi = \pi + \arctan(C_{12} / C_{22}); \\ C_{12} < -|C_{22}| : & \psi = \frac{3}{2}\pi - \arctan(C_{22} / C_{12}); \end{cases}$$

3.4 组合导航解算

预留卫星导航、里程计、计程仪等外部信息接口，基于 Kalman 滤波实现惯性导航和其它传感器的融合导航。系统具备纯惯性导航、组合导航、罗经功能。