



第四章 GNSS/INS组合导航

4.1 概述



- 惯性导航的优点和存在问题
- 提高惯性导航系统精度的方法和途径
- 采用最优滤波的惯性组合导航原理
- GNSS、INS的互补性和组合的好处



4.1 概述

1 惯性导航的优点和存在问题

- 优点：自主、抗干扰、短期精度高、数据输出率高、导航信息完备、适应范围广，机、弹、舰主要导航手段
- 不足：
 - **误差特性**：系统误差周期振荡，某些误差随时间积累。精度由惯性器件精度决定，以陀螺仪精度尤为突出
 - **高度阻尼**：纯惯导高度通道不稳定，须引入外部高度进行阻尼
 - **初始化**：航位推算导航，工作前需初始化信息，准备时间长。
 - **影响因素多**：初始对准精度、惯性敏感器误差和载体运动轨迹都影响导航误差增长的速度



4.1 概述

2 提高惯性导航系统精度的方法和途径

- 基于惯性技术的改进
 - 采用新型、高精度惯性器件
 - 建立惯性器件误差模型并对器件误差进行补偿
 - 研究和采用高精度惯性导航和姿态计算算法
 - 改进特点：
 - 改进敏感器可提高精度，但成本昂贵，提高精度有限
 - 除潜艇或其他战略平台外，大多数战术平台不宜采用
- 与其他传感器或导航系统进行组合-组合导航



4.1 概述

2 提高惯性导航系统精度的方法和途径

- 基于惯性技术的改进
- 与其他传感器或导航系统进行组合-组合导航
 - 基于现有器件或设备，利用导航误差不随时间积累的外部参考信息源，定期或不定期地对惯性导航系统进行导航参数校正和对惯性器件的漂移进行补偿
 - 是提高武器系统导航精度和可靠性的有效途径

4.1 概述



3 采用最优滤波的惯性组合导航原理

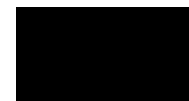
- 信息源
 - 两种或两种以上，具有互补特性，彼此独立
 - 一种信息源提供短时间高精度数据
 - 其余信息源提供时间长稳定性高的数据
- 实现过程
 - 利用两者测量信息的差推算前一系统的修正值
 - 利用后者数据限制前一种数据长时间飘移
- 惯性组合导航系统
 - 关键子系统：惯性系统
 - 长期精度稳定数据源：GNSS、星光、无线电
 - 修正惯性导航系统的误差，提高惯性导航系统信息精度

4.1 概述



3 采用最优滤波的惯性组合导航原理

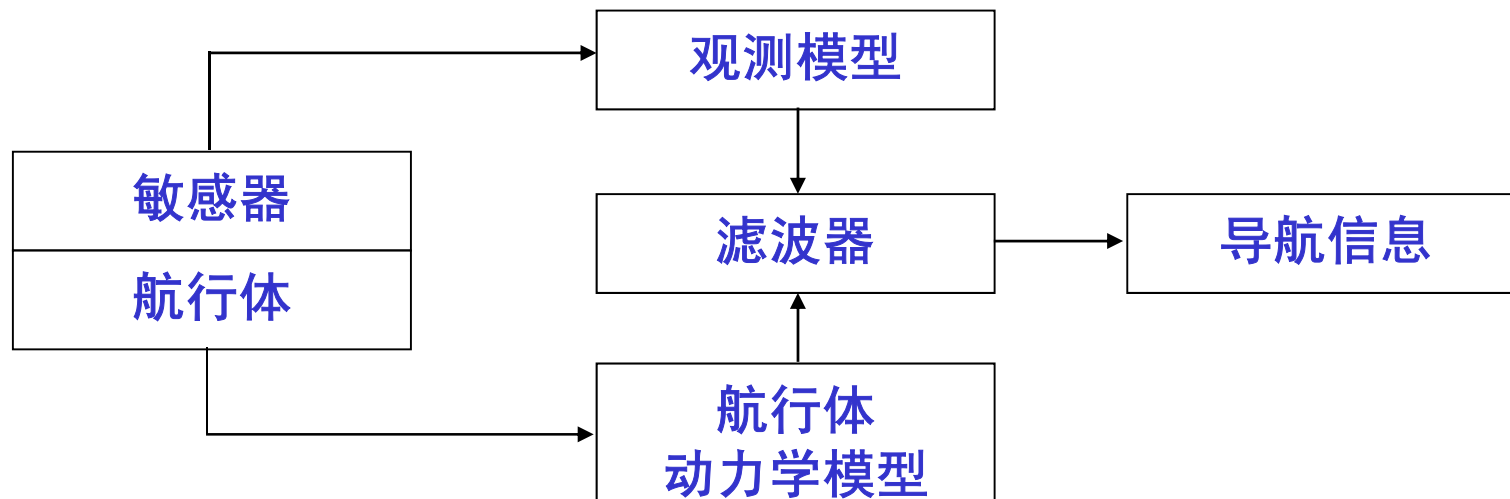
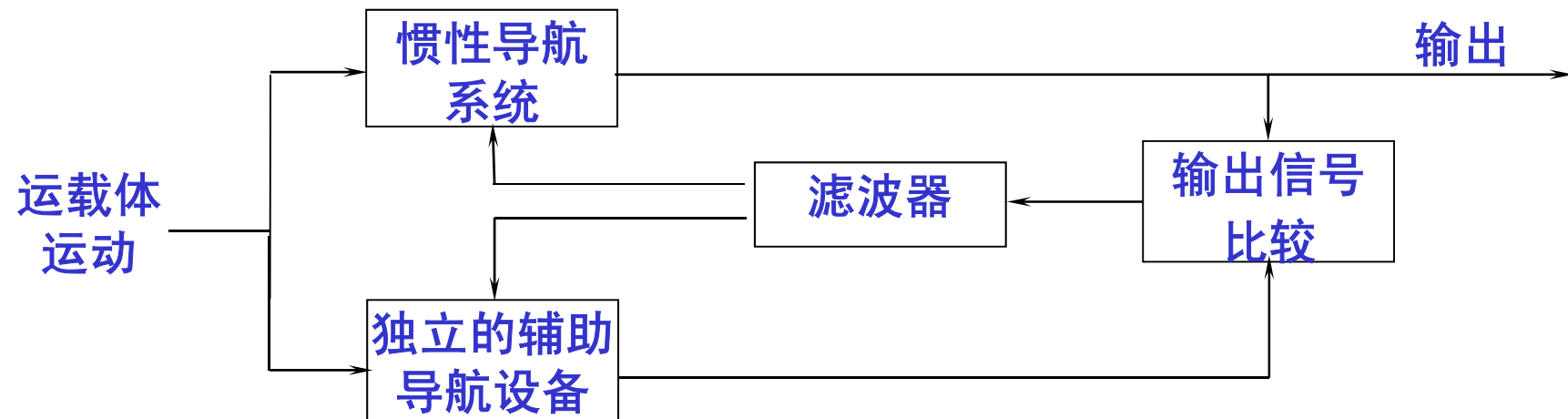
- 滤波算法：扩展卡尔曼滤波
 - 测量值常是状态估值的非线性组合，惯性系统方程本身非线性
- 主要状态：惯性导航参数误差
- 滤波对象：惯导系统误差方程
- 量测值：惯导和其他系统或装置的某些导航参数之差
- 实现方式：从量测值中实时估计导航参数误差，修正惯导导航参数





4.1 概述

3 采用最优滤波的惯性组合导航原理





4.1 概述

4 GNSS/INS互补性和优势

● 互补性

全球定位系统	惯性导航系统
<ul style="list-style-type: none">●高精度定位输出（均方根值20米）●有界的位置/速度误差●不提供载体加速度和姿态输出●精度取决载体动力学●不要求初始化信息（可用于惯性器件的初始对准）●要求卫星可见●提供精确时间信息●数据更新率较低●抗干扰能力差●自主完善性较低	<ul style="list-style-type: none">●适当精度的位置输出（典型值1500米/小时）●位置和速度误差有漂移趋势●提供载体加速度和姿态输出●精度与载体动力学无关●要求初始化信息●不要求外界信息●不提供精确时间信息●数据更新率高●抗干扰能力好●自主完善性高



4.1 概述

4 GNSS/INS互补性和优点

- 优点

- 取长补短，组合精度高于两个系统单独工作的效果
- 组合后优势表现为：
 - 实现惯性传感器的校准、空中对准、高度通道稳定
 - 实现低等级/低成本惯导获得高等级精度惯导的性能
 - 紧组合中，实现对接收机跟踪环路的辅助，提高接收机的动态特性与抗干扰性，实现完整性的检测，提高可靠性



4.2 INS/GNSS组合的模式和结构

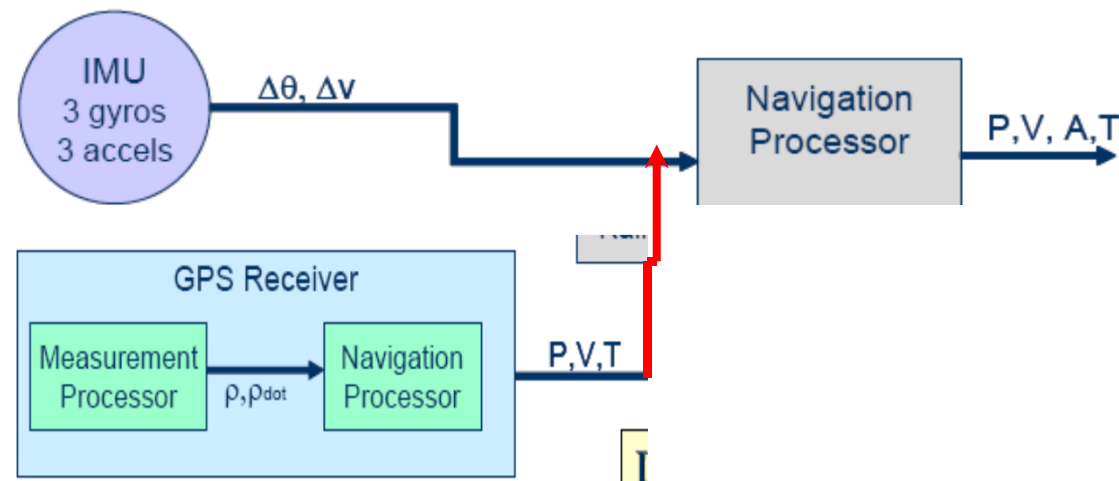
- 组合模式
- 典型组合结构
- 不同组合模式和结构的特点



4.2 INS/GNSS组合的模式和结构

1 组合模式

- 重调



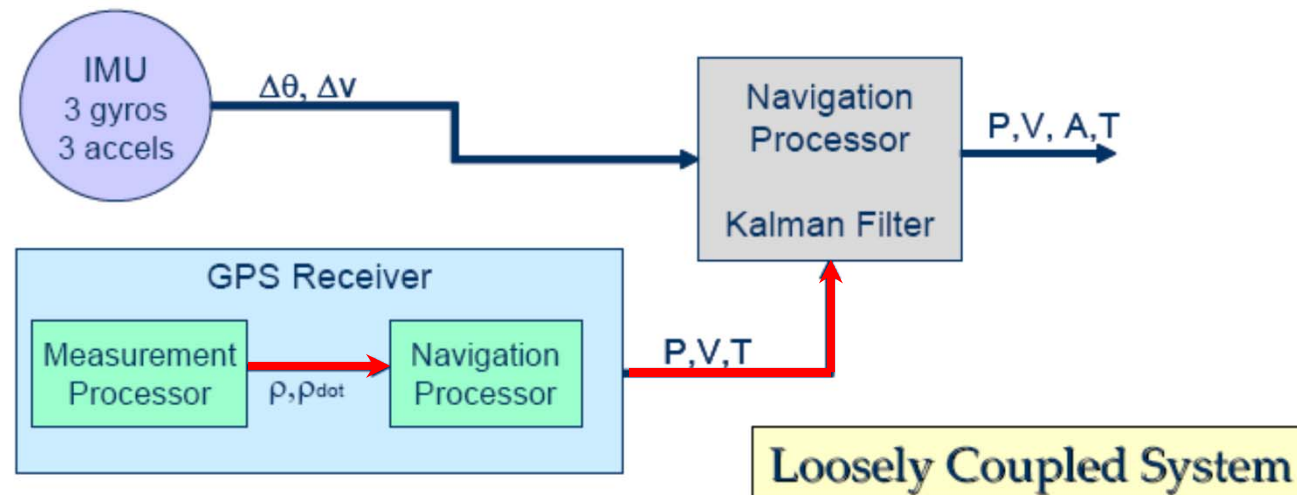
- 松组合
- 紧组合
- 超紧组合



4.2 INS/GNSS组合的模式和结构

1 组合模式

- 松组合



- 紧组合
- 超紧组合



4.2 INS/GNSS组合的模式和结构

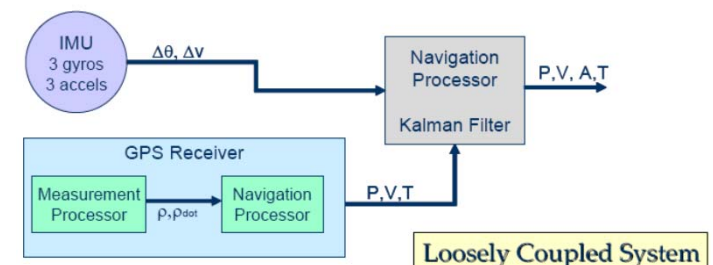
1 组合模式

● 松组合

- 利用GNSS系统解算信息和INS的导航输出信息作融合
- GNSS辅助惯导
- GNSS和惯导独立工作，对已存在导航系统改动最小
- 能提供冗余度，有界的位置、速度和姿态估计
- 能提供高数据率的与制导控制方程相配的平动和转动信息
- 两个滤波器（GNSS计算滤波器、组合滤波器）
- GNSS重调惯导；可利用位置、速度组合

● 紧组合

● 超紧组合

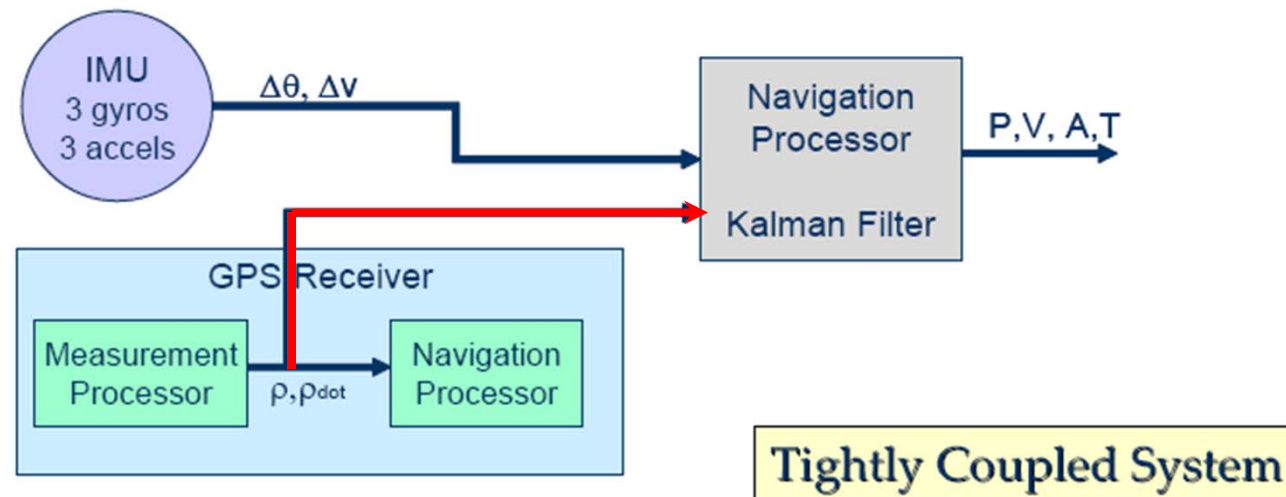




4.2 INS/GNSS组合的模式和结构

1 组合模式

- 松组合
- 紧组合



- 超紧组合



4.2 INS/GNSS组合的模式和结构

1 组合模式

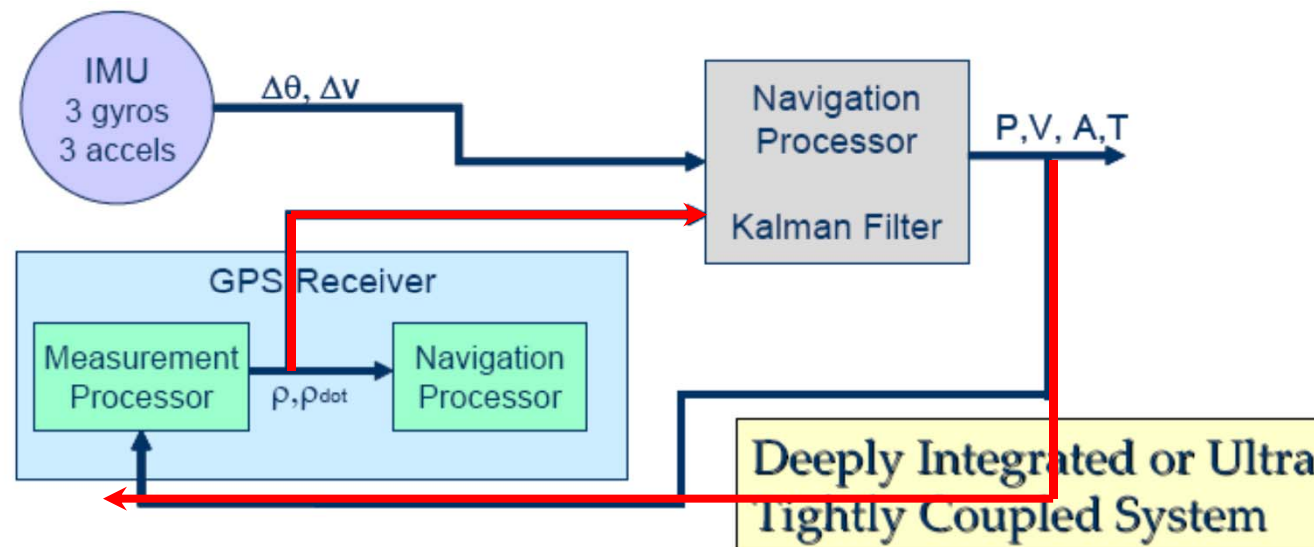
- 松组合
- 紧组合
 - 利用GNSS原始测量信息（伪距、伪距率和载波相位）组合
 - 估计IMU、INS和GNSS接收机误差
- 超紧组合
 - GNSS接收机和惯导系统相互辅助
 - 接收机具有输出原始测量信息和接收速率辅助信息的能力
 - 以牺牲子系统的独立性为代价获取高性能，实现难度较大
 - 伪距、伪距率组合
 - 惯导辅助GNSS



4.2 INS/GNSS组合的模式和结构

1 组合模式

- 松组合
- 紧组合
- 超紧组合





4.2 INS/GNSS组合的模式和结构

1 组合模式

- 松组合 紧组合

- 基于GNSS信息完成INS初始对准，陀螺漂移误差校正，加速度计零漂和刻度因子误差校正
- INS经过卡尔曼滤波重调更趋精确，即使GNSS不能工作，INS力学编排方程计算模块也完全可以做到短时精密导航

- 超紧组合

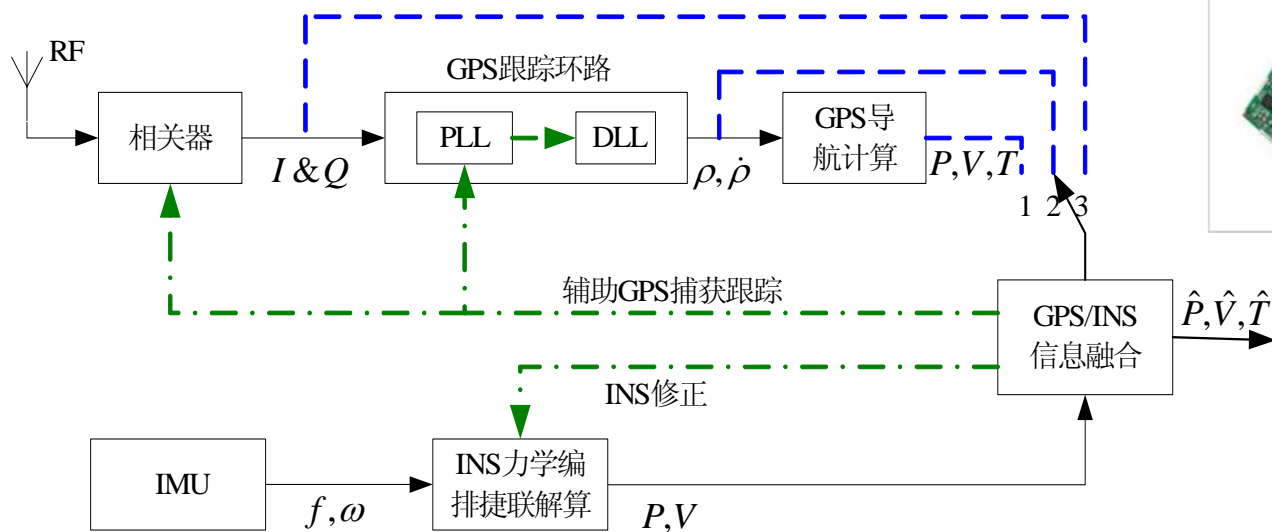
- **高动态信号的捕获和跟踪。**辅助修正INS量测量反馈到接收机跟踪环路，减小由载体运动产生的跟踪误差，缩小环路带宽，降低进入环路的噪声强度，增强环路的抗干扰能力，提高观测精度，实现INS辅助GNSS接收机快速准确地跟踪卫星信号
- 利用INS辅助GNSS接收机进行高动态飞行卫星信号捕获和跟踪



4.2 INS/GNSS组合的模式和结构

2 典型组合结构

- 融合方式随观测量不同
 - 速度/位置观测量
 - 伪距/伪距率观测量
 - 接收机同相、正交 (I&Q) 信号观测量



不同信息融合方案

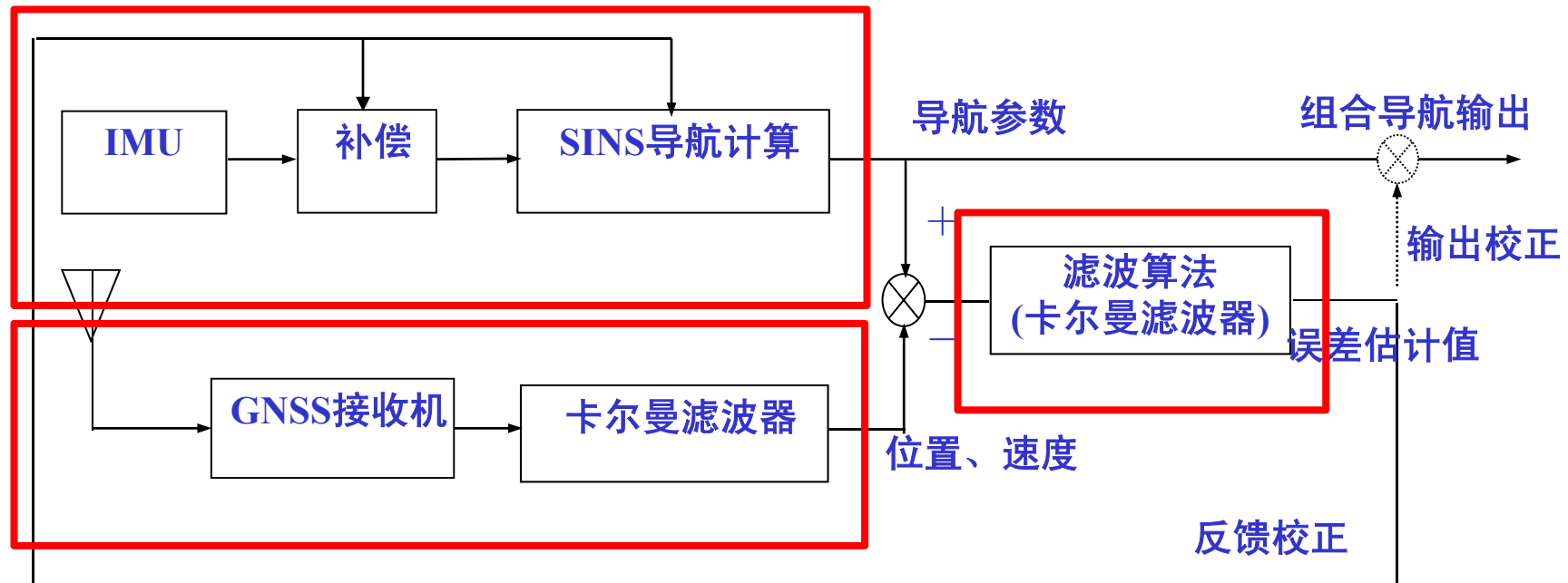


4.2 INS/GNSS组合的模式和结构

2 典型组合结构

- 融合方式随观测量不同

- 速度/位置观测量



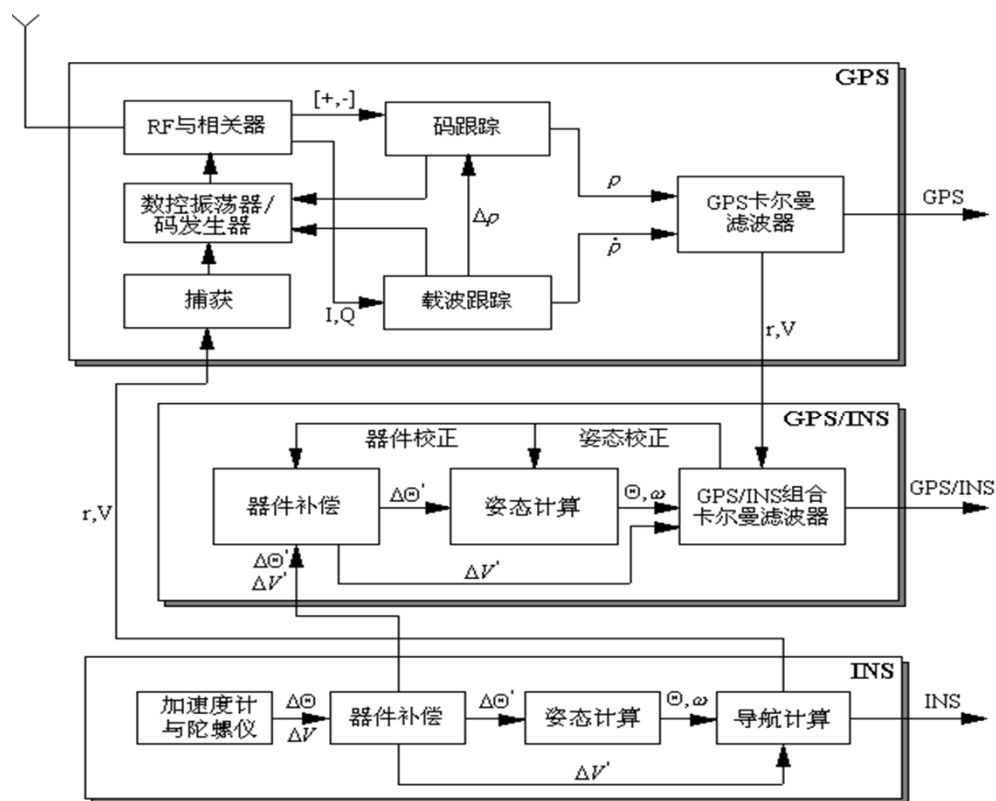
位置、速度组合原理图



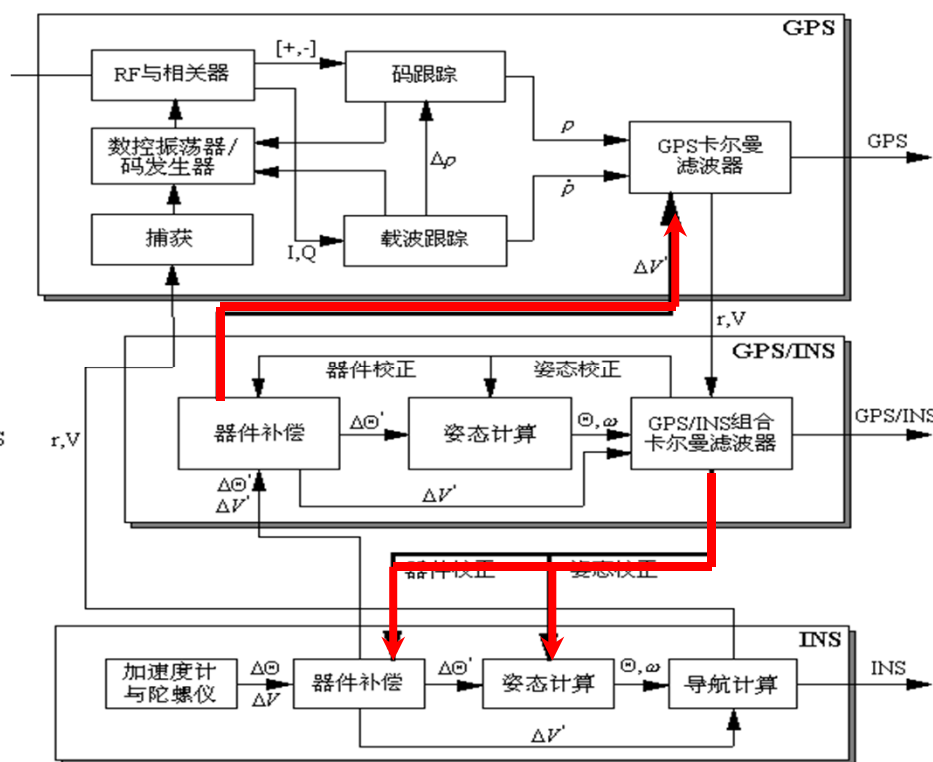
4.2 INS/GNSS组合的模式和结构

2 典型组合结构

- 速度/位置观测



位置、速度组合结构图一



位置、速度组合结构图二



4.2 INS/GNSS组合的模式和结构

2 典型组合结构

- 速度/位置观测

组合系统三个组成部分的功能

组成部分	模块功能
GNSS接收机模块	GNSS接收机卡尔曼滤波估计：位置、速度、加速度、钟偏差、钟漂
SINS模块	SINS提供位置、速度、加速度、姿态、姿态变化率
组合滤波模块	组合卡尔曼滤波估计：位置、速度、姿态校正量，惯性器件误差校正量

组合系统的特点

系统性能描述
具有未组合结构的所有特性，包括冗余度、INS和GNSS解算结果的独立性。
具有更快的码捕获和载波相位捕获能力
提高了导航性能；具有飞行中或更好地器件误差校正和对准能力，使得在卫星信号失锁和受到干扰时，在更长时间内保持更好的导航性能。

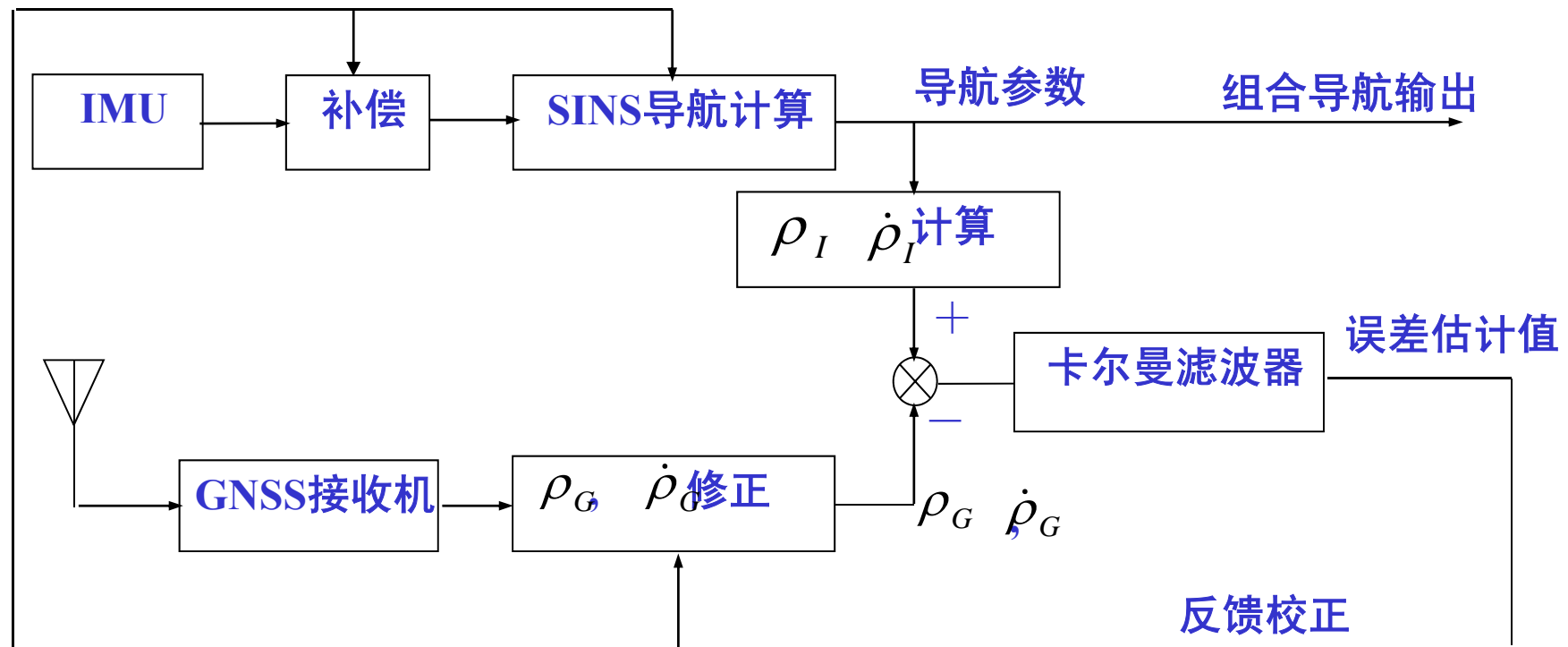


4.2 INS/GNSS组合的模式和结构

2 典型组合结构

- 融合方式随观测量不同

- 伪距/伪距率观测量



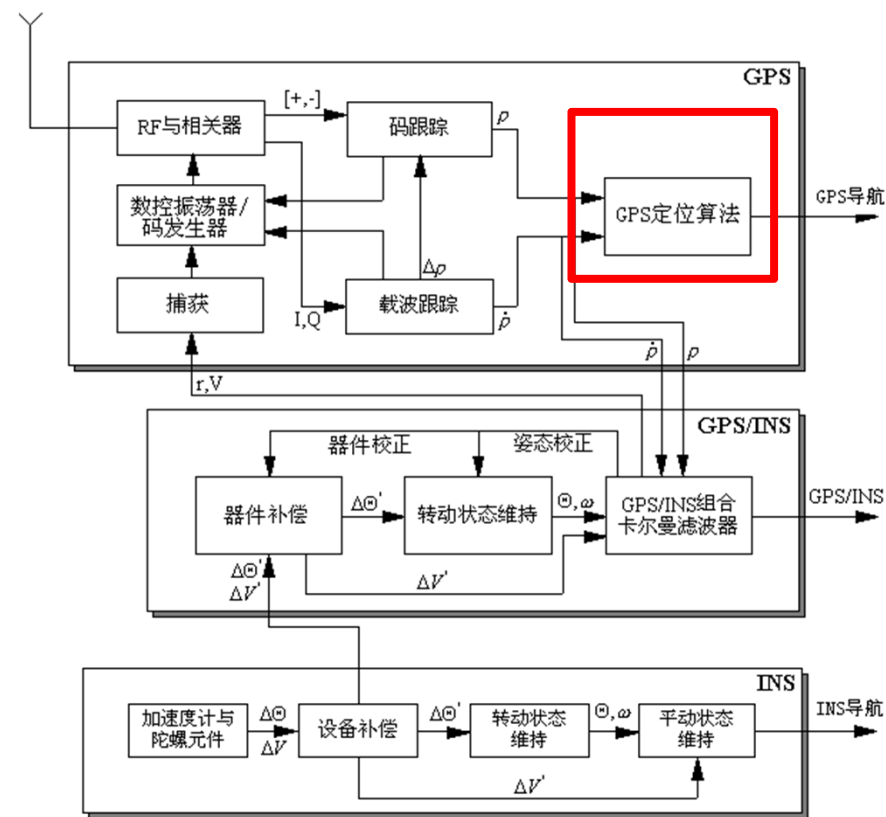
伪距、伪距率组合原理图



4.2 INS/GNSS组合的模式和结构

2 典型组合结构

- 伪距、伪距率观测



二次滤波

伪距、伪距率组合结构图一



4.2 INS/GNSS组合的模式和结构

2 典型组合结构

- 不同组合的收益

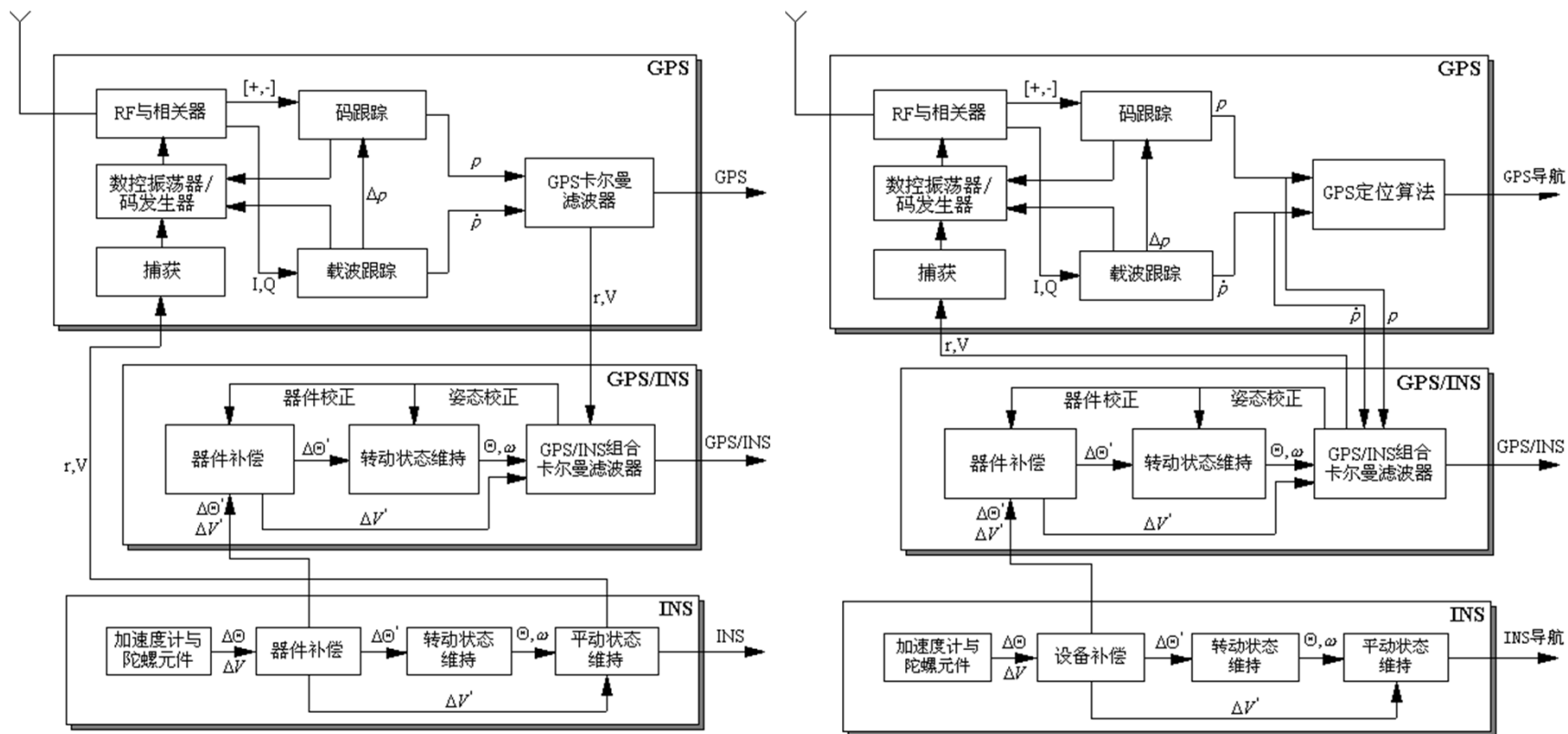
组合层次	收 益
未耦合/GNSS重调INS (系统特性相加)	提供位置、速度、加速度、姿态、姿态变化率信息； 冗余系统； 无漂移的GNSS； 高带宽的SINS
松组合（耦合） (系统之间融合)	更快的GNSS信号捕获能力； 飞行中校正和对准； 良好的惯性器件校正和对准； 更好的姿态估计； 受干扰后更长的工作时间
紧组合（耦合） (系统相互融合)	良好的导航性能； 良好的器件校正； 高动态下的可靠跟踪，跟踪环带宽降低，良好的抗干扰性能； 不管有多少颗可见卫星，均可最优利用



4.2 INS/GNSS组合的模式和结构

3 我国SINS/GNSS组合结构选择

●典型组合导航结构





4.2 INS/GNSS组合的模式和结构

3 我国SINS/GNSS组合结构选择

●位置/速度组合和伪距/伪距率组合的比较

	位置、速度组合	伪距、伪距率组合
使用信息	GNSS解算位置速度 INS 解算位置速度	GNSS原始测量值（伪距伪距率） 用INS导航值计算的伪距和伪距率
子系统关系	子系统彼此独立	子系统独立
工程实现难易程度	无需对现有系统改动，工程实现容易，研制周期短	算法计算量大，实现较为复杂
滤波器数目	存在滤波器驱动滤波器效应（二次滤波问题）	不存在二次滤波问题，滤波周期受接收机原始数据采样率限制
卫星选择	必须有四颗以上可见卫星才能进行组合导航	定位星座的选择策略灵活 能提高组合系统的性能和稳定度
卫星信息	无	需要利用卫星位置\速度信息



4.4 组合系统的模型和算法

- 概述
- INS、GNSS的误差模型
- 组合系统的状态方程和量测方程
- 卡尔曼滤波算法



4.4 组合导航的模型和算法

1 概述

- 状态方程与状态
 - 基础：惯导线性误差方程 + 惯性器件误差模型
 - 选取原则：综合工作条件、估计精度、噪声方差、计算机能力决定状态组成，与尽可能完整状态方程比较进行误差分析后确定
 - 基本状态：惯导导航误差(三位置误差+三速度误差+三姿态误差) 惯性器件误差（偏置+漂移）、GNSS时间误差等。
- 观测方程：位置/速度信息或伪距/伪距率综合
 - 位置/速度组合：状态选取惯性导航误差+器件误差
 - 伪距/伪距率组合：状态选取惯性导航误差+器件误差+GNSS钟差



4.4 组合导航的模型和算法

2 INS/GNSS的误差模型

- INS误差
 - IMU误差（惯性器件误差）
 - 陀螺仪/加速度计测量误差
 - INS 导航参数误差
 - 位置/速度/姿态误差
- GNSS误差
 - 时钟误差
 - 定位/测速误差



4.4 组合导航的模型和算法

2 INS/GNSS的误差模型

- INS/GNSS误差状态

典型SINS误差

15维	22维	34维
位置 (3) 速度 (3) 对准误差 (3) 陀螺仪漂移 (3) 加速度计偏差 (3)	位置 (3) 速度 (3) 对准误差 (3) 陀螺仪漂移 (3) 陀螺仪比例系数误差 (3) 加速度计偏差 (3) 加速度计比例系数误差 (3) 高度表偏差 (1)	位置 (3) 速度 (3) 对准误差 (3) 陀螺仪漂移 (3) 陀螺仪比例系数误差 (3) 陀螺仪安装误差 (6) 加速度计偏差 (3) 加速度计比例系数误差 (3) 加速度计安装误差 (6) 高度表偏差 (1)



4.4 组合导航的模型和算法

2 INS/GNSS的误差模型

- INS/GNSS误差状态

- 状态矢量：15维 INS导航误差+IMU器件误差

$$X_I = [\delta v_x \ \delta v_y \ \delta v_z \ \phi_x \ \phi_y \ \phi_z \ \delta L \ \delta \lambda \ \delta h \ \varepsilon_{xb} \ \varepsilon_{yb} \ \varepsilon_{zb} \ \nabla_{xb} \ \nabla_{yb} \ \nabla_{zb}]^T$$

- 描述方程

$$\dot{X}_I(t) = F_I(t)X_I(t) + W_I(t)$$

$$F_I(t) = \begin{bmatrix} F_N(t) & F_S(t) \\ 0 & F_M(t) \end{bmatrix}_{15 \times 15}$$

$$W_I(t) = [w_{xa}, w_{ya}, w_{za}, w_{xg}, w_{yg}, w_{zg}, 0, 0, 0, w_{x\varepsilon}, w_{y\varepsilon}, w_{z\varepsilon}, w_{x\nabla}, w_{y\nabla}, w_{z\nabla}]^T$$



4.4 组合导航的模型和算法

2 INS/GNSS的误差模型

- GNSS误差

- 速度/位置组合：不作为状态引入，考虑为测量噪声

- GNSS位置和速度误差一般时间相关的，是有色噪声
- 不引入新状态，加大滤波更新周期，将其误差按白噪声处理

- 伪距/伪距率组合模式：引入两个误差状态

- 等效时钟误差相应的距离
- 等效时钟频率误差相应的距离变化率

$$\mathbf{X}_G(t) = [\delta t_u \quad \delta t_{ru}]^T$$

$$\delta \dot{t}_u = \delta t_{ru} + w_{tu}$$

$$\delta \dot{t}_{ru} = -\frac{1}{\tau_{tru}} \delta t_{ru} + w_{tru}$$



4.4 组合导航的模型和算法

3 组合系统的状态方程和量测方程

- 状态与状态方程

- 位置速度组合：惯导误差

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{X}_I(t)$$

- 伪距/伪距率组合：惯导误差+GNSS误差

$$\mathbf{X}(t) = [\mathbf{X}_I \quad \mathbf{X}_G]^T$$

$$\mathbf{X}_G(t) = [\delta t_u \quad \delta t_{ru}]^T$$



4.4 组合导航的模型和算法

3 组合系统的状态方程和量测方程

- INS/GNSS误差状态

- 位置速度组合：惯导误差

- 维数：15

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{X}_I(t)$$

- 伪距/伪距率组合：惯导误差+GNSS误差

- 维数：17维， $15 + 2$

$$\mathbf{X}(t) = [\mathbf{X}_I \quad \mathbf{X}_G]^T \quad \mathbf{X}_G(t) = [\delta t_u \quad \delta t_{ru}]^T$$



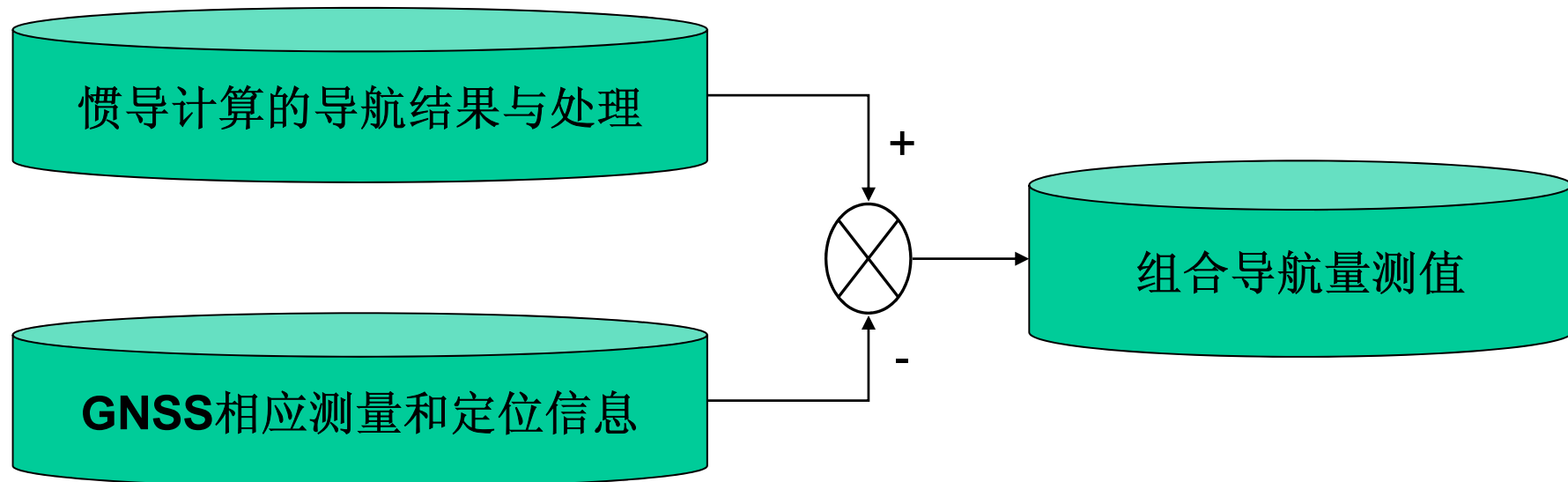
4.4 组合导航的模型和算法

3 组合系统的状态方程和量测方程

- INS/GNSS量测方程

- 对应测量差值作为观测变量

- 位置速度组合：INS、GNSS对应的位置速度差
- 伪距/伪距率组合：INS、GNSS对应的伪距伪距率差





4.4 组合导航的模型和算法

3 组合系统的状态方程和量测方程

- INS/GNSS量测方程

- 位置速度组合（联合/交替）

$$\mathbf{Z}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_P(t) \\ \mathbf{Z}_V(t) \end{bmatrix} \quad \mathbf{Z}_P(t) = \begin{bmatrix} (L_I - L_G)(R_M + h) \\ (\lambda_I - \lambda_G)(R_N + h) \cos L \\ h_I - h_G \end{bmatrix} \quad \mathbf{Z}_V(t) = \begin{bmatrix} v_{Ix} - v_{Gx} \\ v_{Iy} - v_{Gy} \\ v_{Iz} - v_{Gz} \end{bmatrix}$$

- 伪距/伪距率组合

$$\mathbf{Z}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_P(t) \\ \mathbf{Z}_V(t) \end{bmatrix} \quad \delta \rho = \mathbf{e} \cdot \mathbf{D}_a \begin{bmatrix} \delta L \\ \delta \lambda \\ \delta h \end{bmatrix} + \mathbf{D}_{tu} \cdot \delta t_u + V_\rho$$
$$\delta \dot{\mathbf{p}} = \mathbf{D}_V \begin{bmatrix} \delta v_x \\ \delta v_y \\ \delta v_z \end{bmatrix} + \mathbf{D}_P \begin{bmatrix} \delta L \\ \delta \lambda \\ \delta h \end{bmatrix} + \mathbf{D}_{tru} \delta t_{ru} + \mathbf{V}_{\dot{\rho}}$$



4.4 组合导航的模型和算法

5 组合模式典型误差曲线

