Inertial Navigation System

一、惯性导航系统原理

1.惯性导航基础

> 🌈
>
> 导航状态：位置、速度和姿态（PVA）
>
> 导航原理：航位推算 (DR) vs 直接定位（Direct Fixing）
>
> 惯性导航系统分为：平台式 vs 捷联式

1. 惯性导航建立在牛顿经典力学定律的基础上，需要测量载体相

对惯性空间的加速度和角速度。

2. 加速度计

   测量相对于***惯性参考系***的加速度（称之为比力）

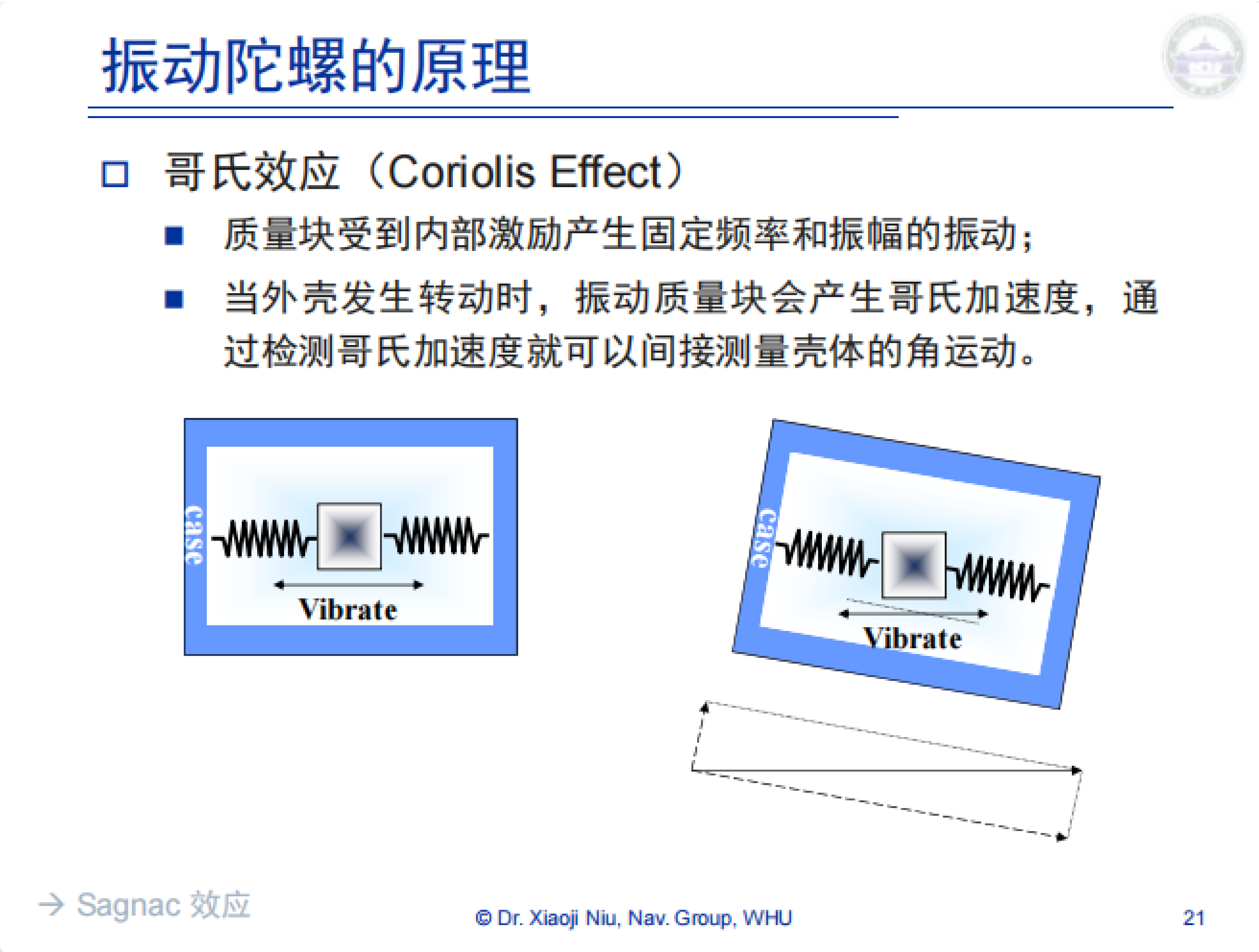
$$f = a - g \text{（惯导比力方程）}$$

- **f** = 加速度计输出（比力，Specific Force）
- **a** = 相对于惯性空间的运动加速度
- **g** = 万有引力加速度

> 🌈
>
> MEMS加速度计原理：变距离式电容传感器

3. 陀螺仪

   测量相对于***惯性参考系***的角速率



> 🌈
>
> MEMS陀螺都是基于振动陀螺（哥氏效应）的原理制造的

4. 惯导系统特性

惯性导航系统特性

- 优点
  - 完全自主性和高可靠性（军用和航空航天）
  - 导航信息丰富
  - 动态性能好（采样率高、频带宽）
- 缺点
  - 惯性导航误差随时间累积

$$\delta r_N = \delta r_{N,0} + \delta v_{N,0} \cdot t + \frac{1}{2}(g \cdot \delta\theta_0 + b_{aN})t^2 + \frac{1}{6}(g \cdot b_{gE})t^3$$

  - 需要初始信息
  - 成本高、笨重

→ 引入辅助信息

→ 惯导等级分类

5. ins的精度等级

INS的精度等级

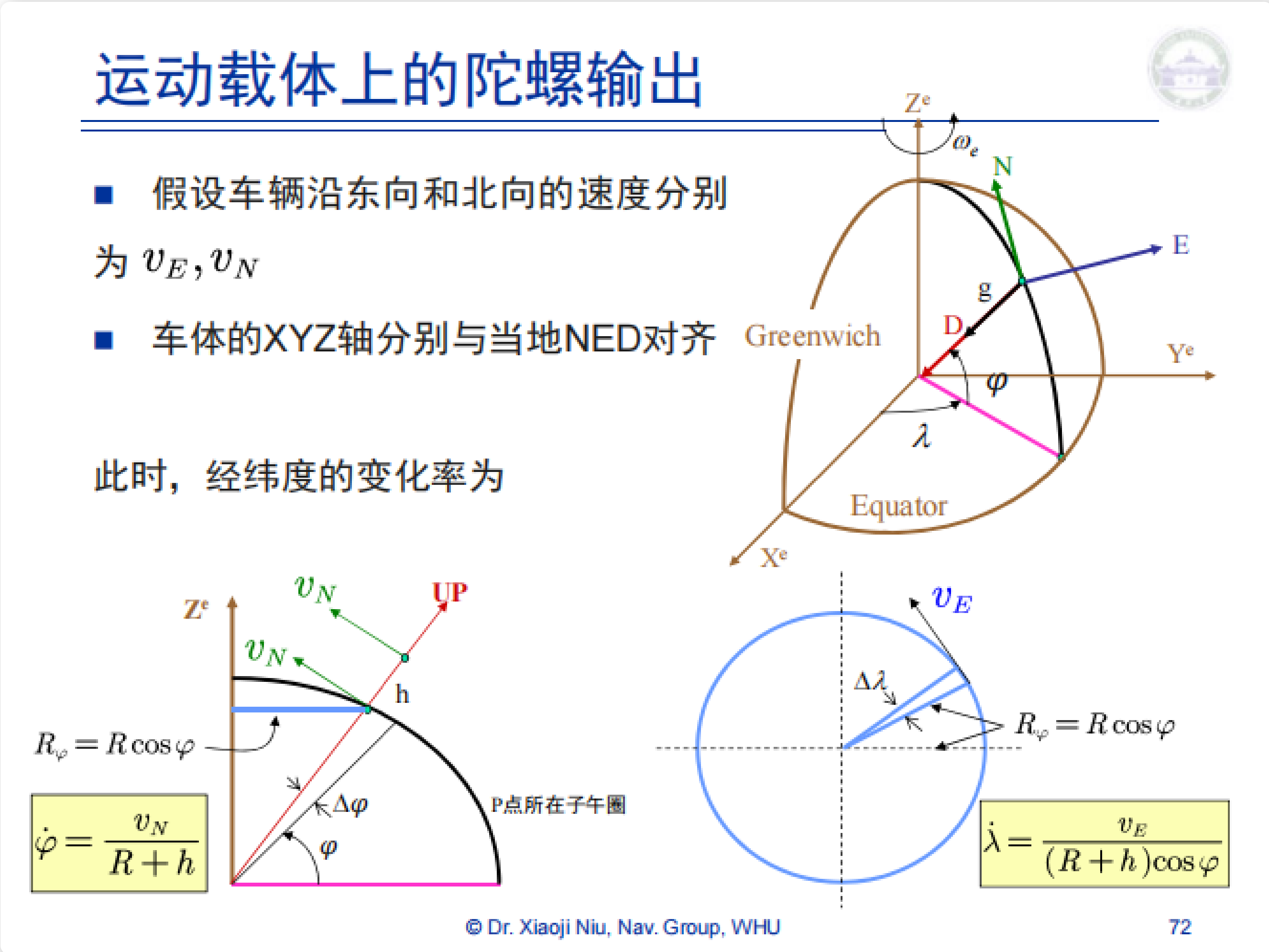
	战略级 Strategic-Grade	导航级 Navigation-Grade	战术级 Tactical-Grade	微机械级 MEMS
定位误差*	< 30 m/hr	0.5 – 2 nmi/hr (70-100k USD)	10-20 nmi/hr (10-20K USD)	/
陀螺零偏	0.0001 deg/hr	大约地球自转的 1/1000，0.015 deg/hr	1- 10 deg/hr	/
加速度计零偏	1 ug	50 – 100 ug	100 – 1000 ug	/
应用领域	❑ 洲际弹道导弹 ❑ 潜艇	❑航空、航海 ❑高精度测绘	❑ 短时间应用（战术导弹） ❑与GPS组合使用	/

* 陀螺零偏是核心指标

* 1 nmi（海里）≈1.8 km

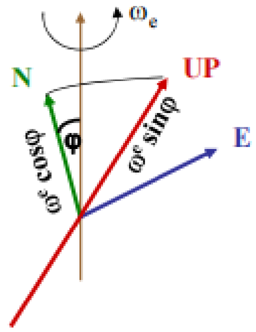
2.惯性器件的误差

1. 运动载体上的陀螺输出



运动载体上的陀螺输出

- 陀螺输出



$$\boxed{\dot{\lambda}=\frac{v_E}{(R+h)\cos\varphi}}$$

$$\omega_E=-\dot{\varphi}=-\underbrace{\frac{v_N}{R+h}}_{\text{动态分量}}$$

$$\omega_N=\dot{\lambda}\cos\varphi+\omega_e\cos\varphi=\underbrace{\frac{v_E}{R+h}}_{\text{动态分量}}+\underbrace{\omega_e\cos\varphi}_{\text{静态分量}}$$

$$\omega_D=-\dot{\lambda}\sin\varphi-\omega_e\sin\varphi=-\underbrace{\frac{v_E}{R+h}\tan\varphi}_{\text{动态分量}}-\underbrace{\omega_e\sin\varphi}_{\text{静态分量}}$$

2. 常用坐标系

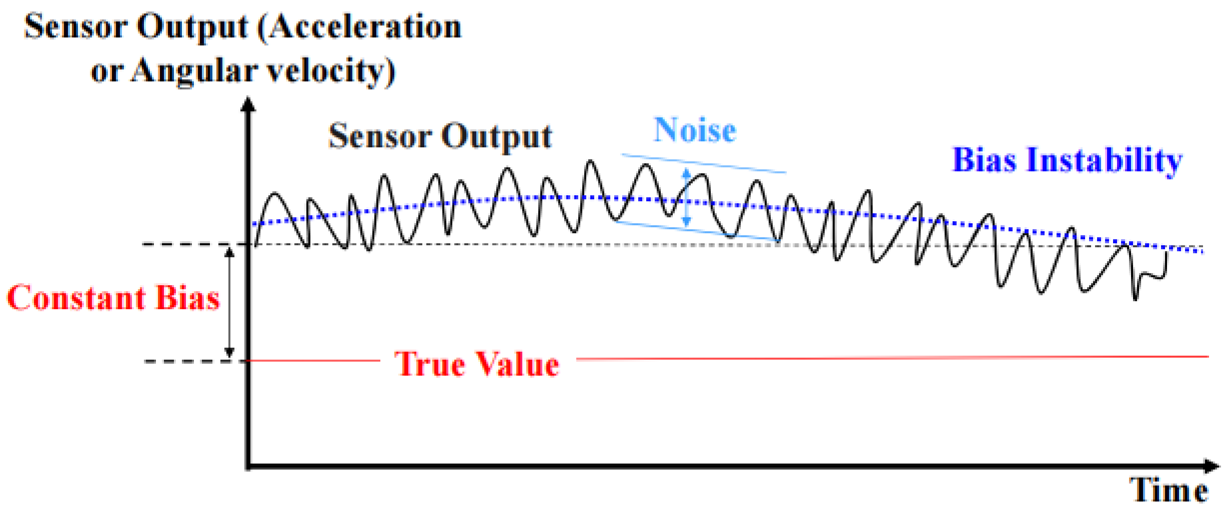
- 实用惯性坐标系(*i*-frame)
- 地心地固坐标系 (ECEF, e-frame)
- 导航坐标系(n-frame)，又称当地水平坐标系、地理坐标系
- IMU坐标系(b-frame)

3. 传感器误差的成分

- 常值误差（Constant error）
- 重复性（Repeatability）-- multiple runs
- 稳定性（Stability）-- within one run

静态误差

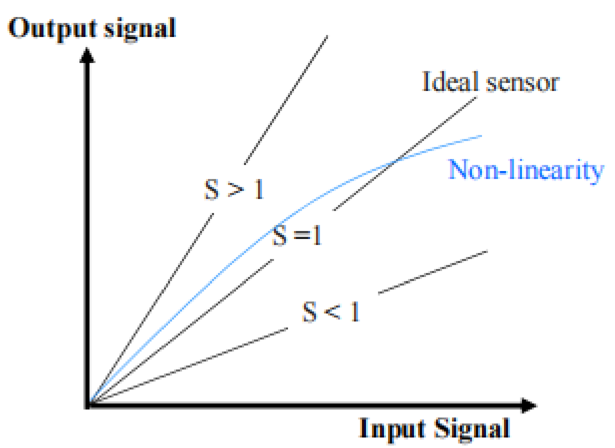
- □ 以零偏为例来理解不同的误差成分
  - ■ 常值零偏
  - ■ 零偏稳定性，噪声

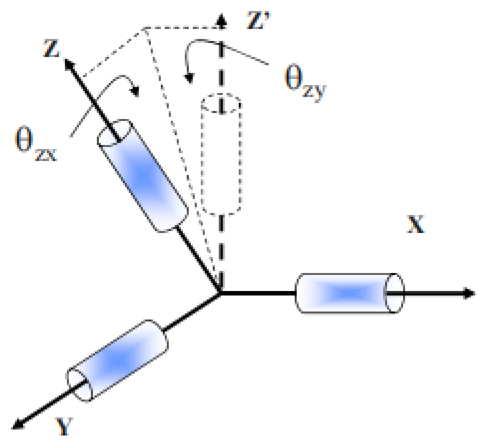


动态误差

- □ 比例因子:
  - ■ 输出被测量的信号/输入物理量
- □ 非线性:
  - ■ 随输入信号变化的比例因子
- □ 轴偏移/轴交叉：
  - ■ 每个轴的输出受到其它两个轴的输入的影响

* 比例因子有没有噪声？

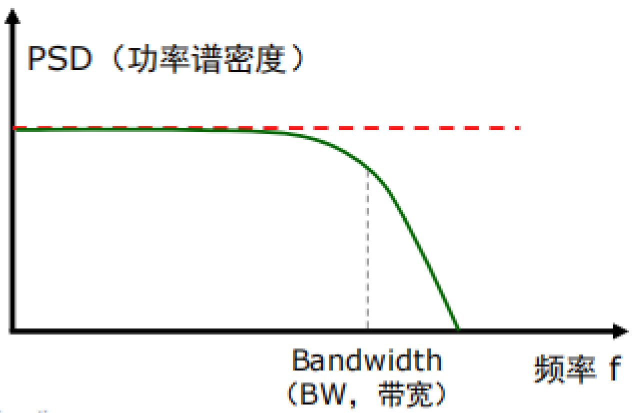




- 噪声（Noise）

噪声（Noise ）

- 噪声
  - 高频误差，完全随机（相邻历元不相关）
  - 白噪声模型:功率谱密度在整个频域内均匀分布的噪声
  - 实际白噪声的带宽
  - 别名：angular random walk (ARW) & velocity random walk (VRW)



→ Example of noise vs. averaging time

噪声（Noise ）

- 白噪声模型参数
  - 功率谱密度（PSD）: (信号单位)^2/Hz
    - 常用PSD单位开根号来表示： (信号单位)/sqrt(Hz)
  - 谱密度单位
    - 角速度：rad/s/sqrt(Hz)，deg/s/sqrt(Hz)，deg/sqrt(hr)
    - 加速度：m/s2/sqrt(Hz)，m/s/sqrt(hr)，mGal/sqrt(Hz)
  - 幅度(RMS)与带宽的平方根成正比

信号总能量 = PSD × BW = RMS^2

  - 通过求平均来降低噪声的幅度：幅度(RMS)与平均时间的平方根成反比

→ Example of noise vs. averaging time

- 热敏感度（Thermal sensitivity，温漂）

4. 陀螺测量模型

陀螺测量模型

□ 陀螺的测量值

$$\tilde{\boldsymbol{\omega}} = \boldsymbol{\omega} + \boldsymbol{b}_{\omega} + \mathbf{S}\boldsymbol{\omega} + \mathbf{N}\boldsymbol{\omega} + \boldsymbol{\varepsilon}_{\omega}$$

- $\tilde{\boldsymbol{\omega}}$ ：测量值 (deg/hr)
- $\boldsymbol{\omega}$ ：真实的角速度(deg/hr)
- $\boldsymbol{b}_{\omega}$ ：陀螺零偏 (deg/hr)
- $\mathbf{S}$ ：陀螺比例因子误差矩阵
- $\mathbf{N}$ ：陀螺交轴耦合误差矩阵
- $\boldsymbol{\varepsilon}_{\omega}$ ：陀螺传感器噪声矢量 (deg/hr)

$$\boldsymbol{b}_{\omega} = \begin{bmatrix} b_{\omega,x} \\ b_{\omega,y} \\ b_{\omega,z} \end{bmatrix} \qquad \mathbf{S} = \begin{bmatrix} s_x & 0 & 0 \\ 0 & s_y & 0 \\ 0 & 0 & s_z \end{bmatrix} \qquad \mathbf{N} = \begin{bmatrix} 0 & \gamma_{xy} & \gamma_{xz} \\ \gamma_{yx} & 0 & \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} & \gamma_{zy} & 0 \end{bmatrix}$$

5. 加速度计测量模型

加速度计测量模型

加速度计的测量值

$$\tilde{\boldsymbol{f}} = \boldsymbol{f} + \boldsymbol{b}_f + \mathbf{S}_1 \boldsymbol{f} + \mathbf{S}_2 \boldsymbol{f}^2 + \mathbf{N} \boldsymbol{f} + \delta \boldsymbol{g} + \boldsymbol{\varepsilon}_f$$

- $\tilde{\boldsymbol{f}}$: 测量值 (m/sec^2)
- $\boldsymbol{f}$: 真实比力 (m/sec^2)
- $\boldsymbol{b}_f$: 加速度计零偏 (m/sec^2)
- $\mathbf{S}_1$: 线性比例因子误差矩阵
- $\mathbf{S}_2$: 非线性比例因子误差矩阵
- $\mathbf{N}$: 交轴耦合矩阵
- $\delta \boldsymbol{g}$: 重力异常
- $\boldsymbol{\varepsilon}_f$: 加速度计传感器噪声矢量 (m/sec^2)

6. 误差模型

误差模型

基本的误差成分

- 常值误差
- 重复性
- 不稳定性
- 噪声

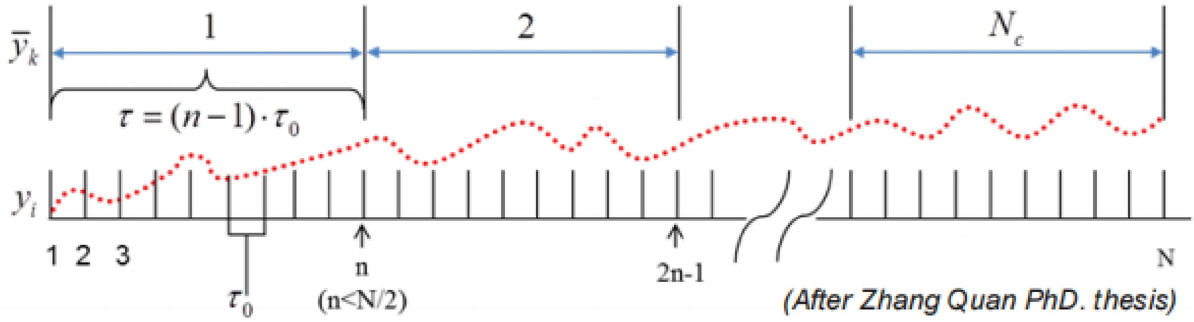
随机模型

- 高斯白噪声
- 随机游走
- 一阶高斯马尔科夫过程
- 随机常数

误差模型的识别与参数确定方法

- 自相关分析（auto-correlation）
- 功率谱密度分析（power spectrum density, PSD）
- Allan方差分析（Allan variance analysis）

Allan方差计算



(After Zhang Quan PhD. thesis)

- Step 1 分块：按窗口长度 $\tau=(n-1)t_0$ 将序列 y 分成 N_c 块(clusters)，每块包n个数据点，块间无重叠。
- Step 2 块平均：分别计算各块内n个数据点的均值，记为 $\bar{y}_k=\frac{1}{n}\sum_{i=k}^{k+n-1} y_i$ 。
- Step 3 计算Allan方差：

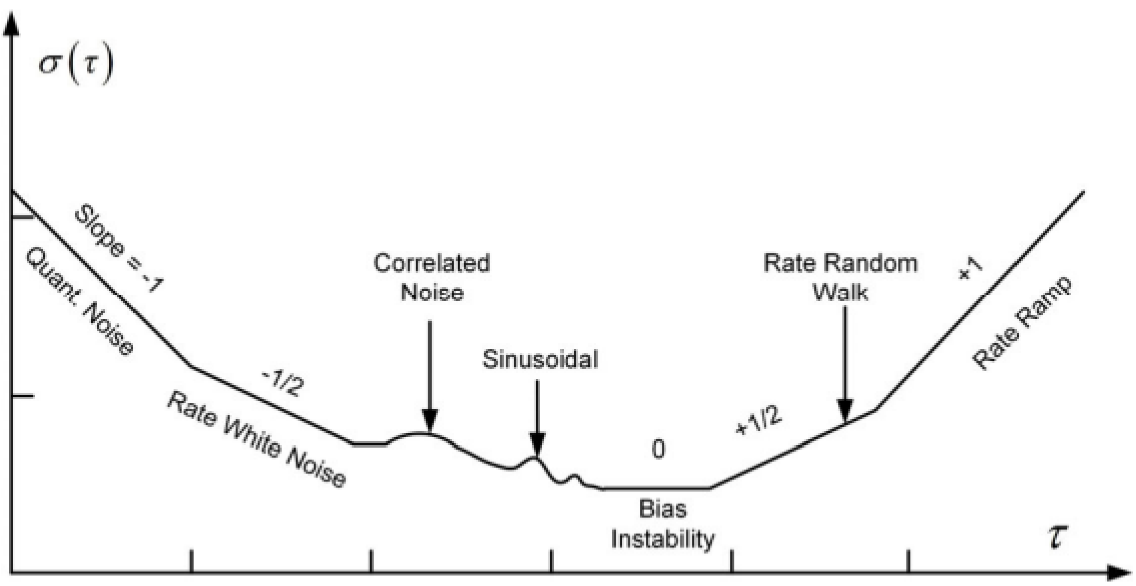
$$\sigma^2(\tau)=\frac{1}{2(N_c-1)}\sum_{k=1}^{N_c-1}(\bar{y}_{k+1}-\bar{y}_k)^2$$

- 改变块长度，重复1~3，并画出Allan标准差随块长度 τ 变化的双对数曲线。

→ 注意事项

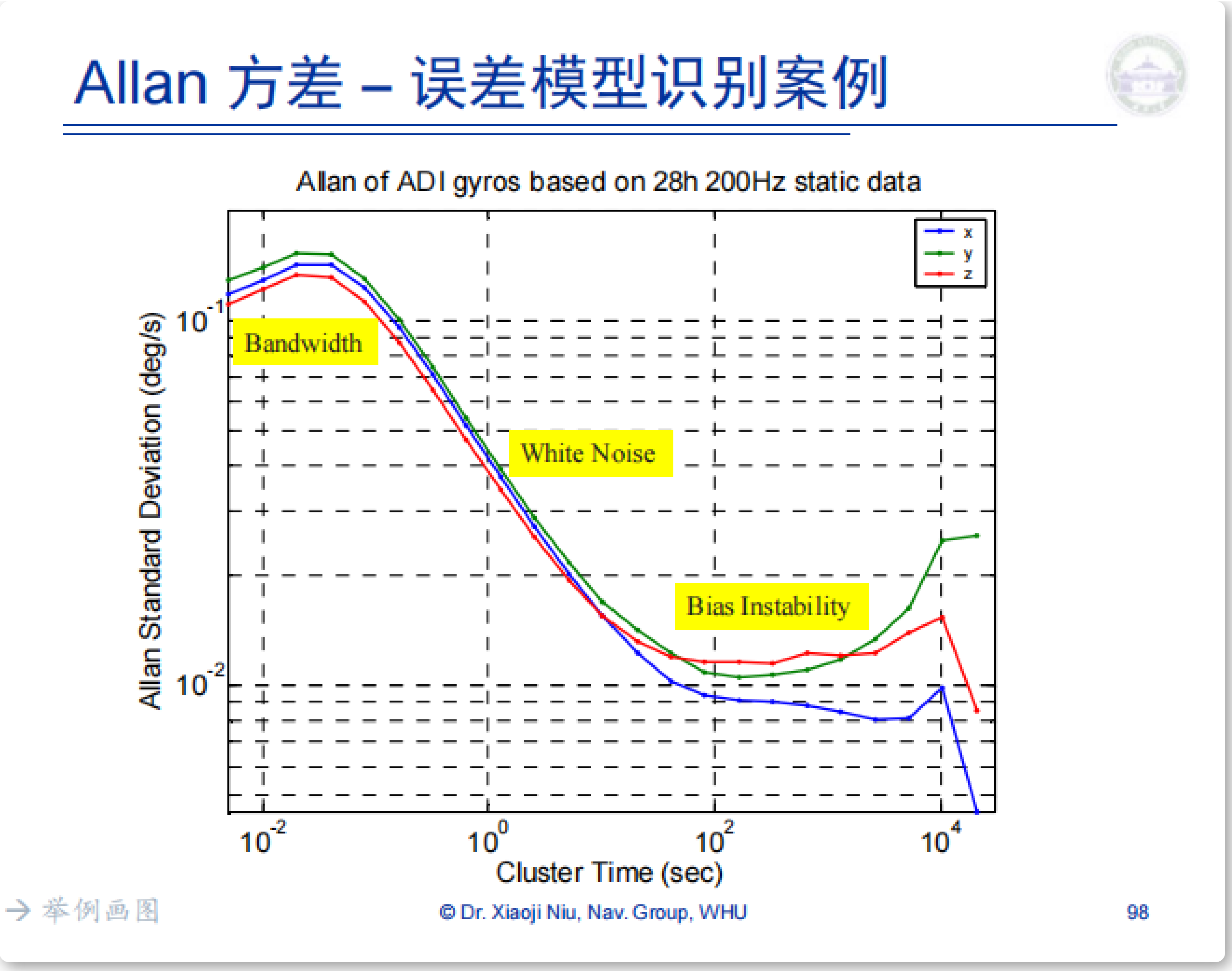
Allan方差分析方法

- 根据Allan标准差曲线的形状识别主要随机误差类型，计算随机误差的模型参数



Sample plot of Allan variance analysis results

(After IEEE Std 647-1995, Annex C)



3.惯性器件的标定

> 🌈
>
> 标定的重要性：去除系统误差（陀螺零偏）

1. 加速度计标定

- 参考源：地球重力
- 方法：两位置，六位置法静态测试

加速度计的两位置法静态标定

- 考虑一个静止加速度计的敏感轴分别朝上和朝下 (两位置)

$$f_{\text{up}} = b + (1 + \delta s)g \qquad f_{\text{down}} = b - (1 + \delta s)g$$

- 加速度计的零偏b和比例因子δs误差可以这样计算：

$$b = \frac{f_{\text{up}} + f_{\text{down}}}{2} \qquad \delta s = \frac{f_{\text{up}} - f_{\text{down}}}{2g} - 1$$

* 与测绘操作类比

加速度计的六位置法标定算法

$$\tilde{\boldsymbol{f}} = \boldsymbol{f} + \boldsymbol{b}_f + \mathbf{S}\boldsymbol{f} + \mathbf{N}\boldsymbol{f} + \boldsymbol{\varepsilon}_f$$

- 加速度计的测量模型可写作如下矩阵形式

$$\begin{bmatrix} \tilde{f}_x \\ \tilde{f}_y \\ \tilde{f}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_x & \gamma_{yx} & \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} & s_y & \gamma_{zy} \\ \gamma_{xz} & \gamma_{yz} & s_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{ax} \\ b_{ay} \\ b_{az} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} \tilde{f}_x \\ \tilde{f}_y \\ \tilde{f}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_x & \gamma_{yx} & \gamma_{zx} & b_{ax} \\ \gamma_{xy} & s_y & \gamma_{zy} & b_{ay} \\ \gamma_{xz} & \gamma_{yz} & s_z & b_{az} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \\ 1 \end{bmatrix} \Rightarrow \tilde{\boldsymbol{f}} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} \boldsymbol{f} \\ 1 \end{bmatrix}$$

  - $\tilde{\boldsymbol{f}}$ 三轴加速度计的实际输出
  - γ 交轴耦合误差分量
  - s 比例因子，*注意不是比例因子误差
  - $\boldsymbol{f}$ 理想加速度计输出
- 六位置法：依次让XYZ三轴加速度计敏感轴分别竖直向上和竖直向下静置一段时间，采集六次加速度计的原始输出，取均值。
  - 六位置: 1 = x_up; 2 = x_down; 3 = y_up; 4 = y_down; 5 = z_up; 6 = z_down;
- 各位置理想加速度计输出

$$\boldsymbol{f}_1 = \begin{bmatrix} g \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{f}_2 = \begin{bmatrix} -g \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{f}_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ g \\ 0 \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{f}_4 = \begin{bmatrix} 0 \\ -g \\ 0 \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{f}_5 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{f}_6 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix}$$

加速度计的六位置法标定算法（续）

- 六位置的加速度计输出模型可以写作如下矩阵形式

$$\begin{bmatrix} \tilde{f}_1 & \tilde{f}_2 & \tilde{f}_3 & \tilde{f}_4 & \tilde{f}_5 & \tilde{f}_6 \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} f_1 & f_2 & f_3 & f_4 & f_5 & f_6 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

  - 简写为

$$\mathbf{L} = \mathbf{M}\mathbf{A}$$

  - 其中

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \tilde{f}_1 & \tilde{f}_2 & \tilde{f}_3 & \tilde{f}_4 & \tilde{f}_5 & \tilde{f}_6 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} f_1 & f_2 & f_3 & f_4 & f_5 & f_6 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

- M矩阵中中包含12个待估参数，共有18个方程。可用最小二乘法求解M

$$\hat{\mathbf{M}} = \mathbf{L}\mathbf{A}^{\mathrm{T}}(\mathbf{A}\mathbf{A}^{\mathrm{T}})^{-1}$$

*12位置法标定方法

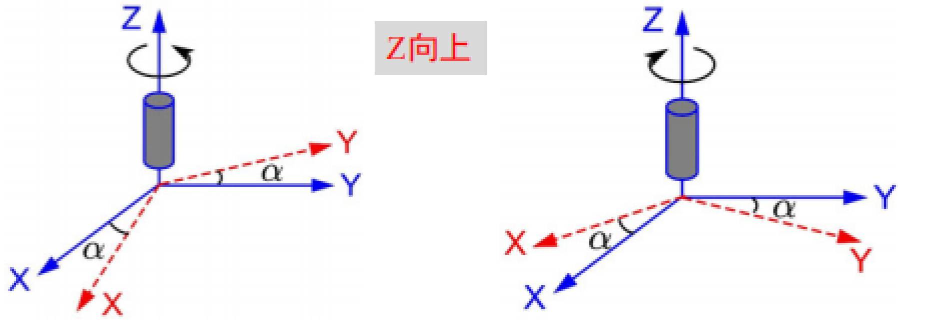
→ Summary of standard cali.

2. 陀螺的标定

- 参考源：地球自转或转台旋转
- 方法：角速率测试

陀螺标定原理

- IMU分别绕Z轴陀螺正方向和反方向旋转相同大小的参考角度 (α)



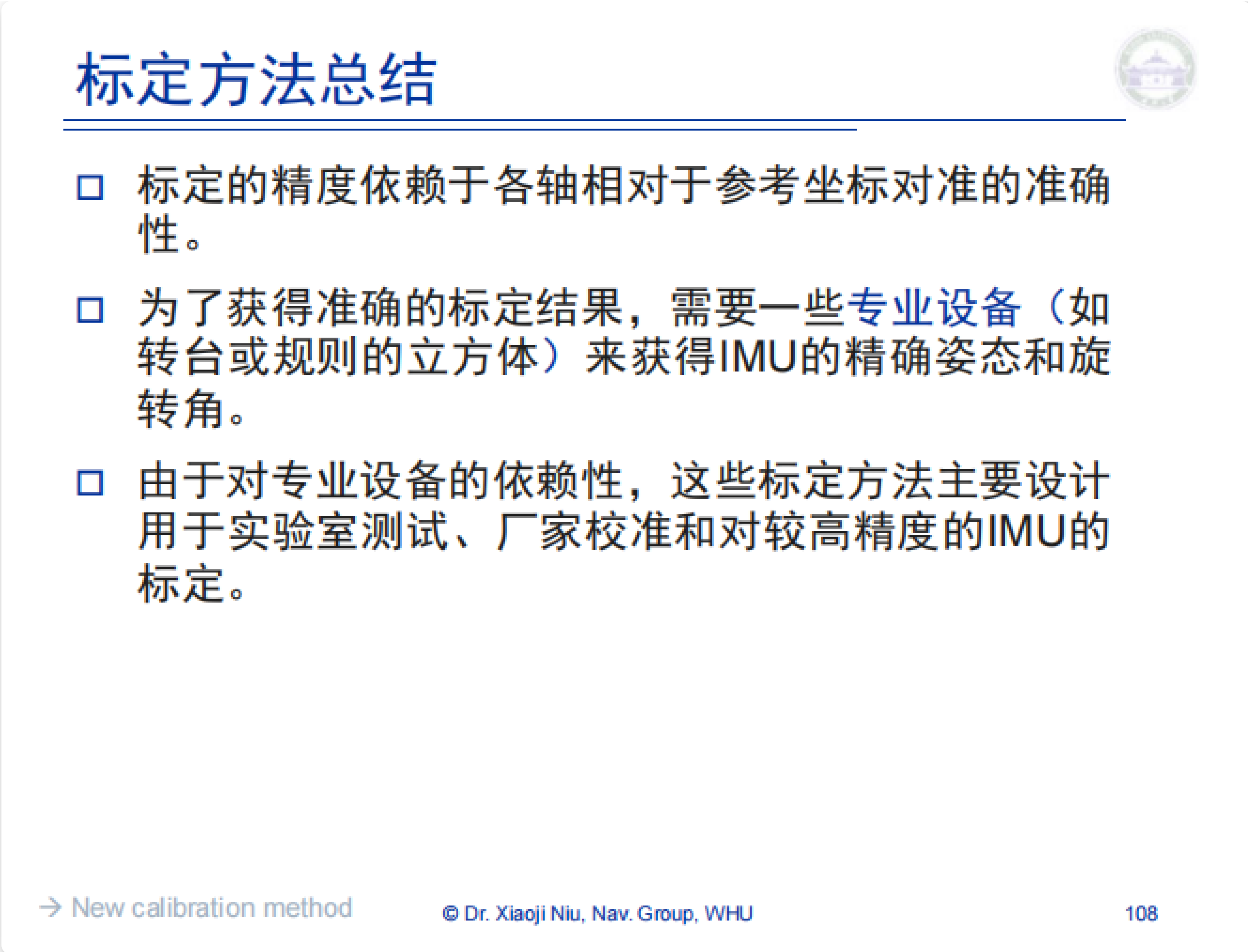
$\tilde{\alpha}_1 = b_{gz}t + (1+\delta s_{gz})\alpha + (\omega_e \sin\varphi)t$ $\tilde{\alpha}_2 = b_{gz}t - (1+\delta s_{gz})\alpha + (\omega_e \sin\varphi)t$

- Z轴陀螺的零偏和比例因子误差的计算如下：

$$b_{gz} = \frac{\tilde{\alpha}_1 + \tilde{\alpha}_2}{2t} - (\omega_e \sin\varphi) \qquad \delta s_{gz} = \frac{\tilde{\alpha}_1 - \tilde{\alpha}_2}{2\alpha} - 1$$

- t 表示转动的时间；忽略了比例因子误差对地球自转角速度的影响
  - 思考：为什么不用角速度率标定？应该采用多大的角速度率？

3. 标定总结



4.INS的初始对准

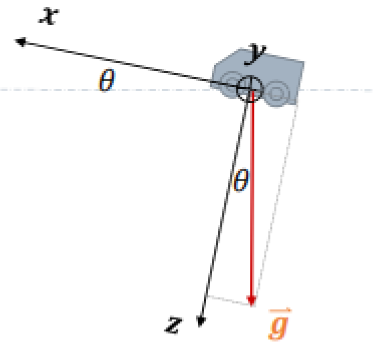
1. INS的初始化

- 初始位置：给定/从GPS
- 初始速度：零/给定
- 初始姿态：***初始对准***（静态粗对准，非常重要）

2. 静态粗对准原理

静态粗对准—加速度计调平原理

- 加速度计调平
  - 利用加速度计测量值确定水平姿态角



$$a_x = g \cdot \sin\theta \Rightarrow \theta = \arcsin\frac{a_x}{g} \approx \frac{a_x}{g}$$

$$\hat{a}_x = a_x + \delta a_x = g \cdot \sin\theta + \delta a_x$$

$$\Rightarrow \hat{\theta} = \arcsin\frac{\hat{a}_x}{g} \approx \frac{\hat{a}_x}{g} = \frac{a_x + \delta a_x}{g}$$

$$= \theta + \frac{\delta a_x}{g}$$

$$\Rightarrow \delta\hat{\theta} \approx \frac{\delta a_x}{g}$$

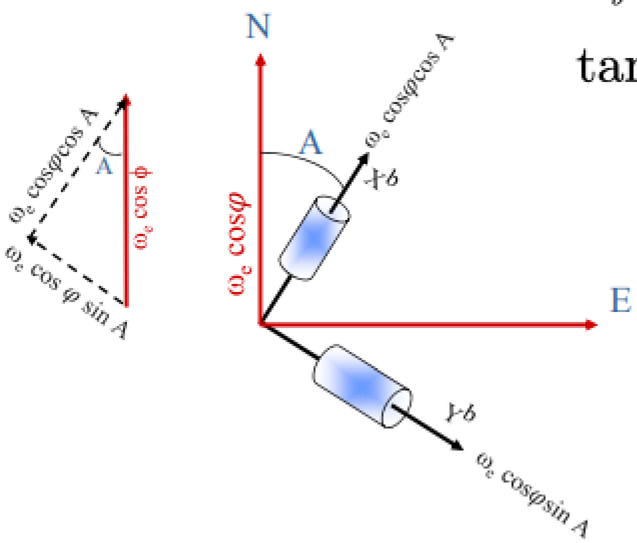
静态粗对准—陀螺罗盘

- 在加速度计调平的基础上：

$$\omega_x^b = \omega_e \cos\varphi \cos A$$

$$\omega_y^b = -\omega_e \cos\varphi \sin A$$

$$\tan A = -\omega_y^b / \omega_x^b \Rightarrow \text{Azimuth}$$

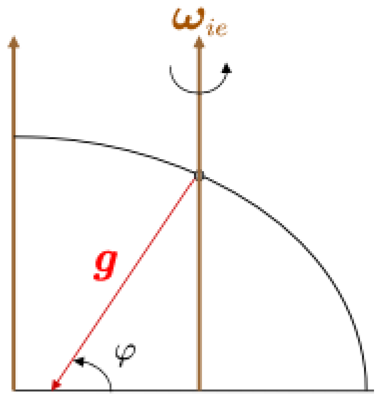


3. 静态解析粗对准—双矢量定姿

静态解析粗对准—双矢量定姿

- 静置在地面上的IMU，其加速度计测量值的是重力加速度向量在b系中的分量，陀螺输出为地球自转角速度向量在b系中的投影。
- 根据向量在不同坐标系下的转换关系，有

$$\boldsymbol{g}^b = \mathbf{C}_n^b \boldsymbol{g}^n,\quad \boldsymbol{\omega}_{ie}^b = \mathbf{C}_n^b \boldsymbol{\omega}_{ie}^n$$



定义向量

$$\boldsymbol{v} = \boldsymbol{g} \times \boldsymbol{\omega}_{ie}$$

$$\boldsymbol{v}^b = \mathbf{C}_n^b \boldsymbol{v}^n$$

写成矩阵：

$$[\boldsymbol{g}^b \quad \boldsymbol{\omega}_{ie}^b \quad \boldsymbol{v}^b] = \mathbf{C}_n^b [\boldsymbol{g}^n \quad \boldsymbol{\omega}_{ie}^n \quad \boldsymbol{v}^n]$$

求解姿态矩阵

$$\mathbf{C}_b^n = \begin{bmatrix} (\boldsymbol{g}^n)^{\mathrm{T}} \\ (\boldsymbol{\omega}_{ie}^n)^{\mathrm{T}} \\ (\boldsymbol{v}^n)^{\mathrm{T}} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} (\boldsymbol{g}^b)^{\mathrm{T}} \\ (\boldsymbol{\omega}_{ie}^b)^{\mathrm{T}} \\ (\boldsymbol{v}^b)^{\mathrm{T}} \end{bmatrix}$$

$\mathbf{C}_b^n$ 为从b系到n系的坐标变换矩阵，是正交矩阵

*上下标的含义

$$\mathbf{C}_b^n = (\mathbf{C}_n^b)^{-1} = (\mathbf{C}_n^b)^{\mathrm{T}}$$

静态解析粗对准（续）

- 具体算法实现

$$\boldsymbol{g}^n = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{\omega}_{ie}^n = \begin{bmatrix} \omega_e \cos\varphi \\ 0 \\ -\omega_e \sin\varphi \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{\omega}_{ie}^b = \boldsymbol{\omega}_{ib}^b = \begin{bmatrix} \omega_{ib,x} \\ \omega_{ib,y} \\ \omega_{ib,z} \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{g}^b = -\boldsymbol{f}^b = \begin{bmatrix} -f_x \\ -f_y \\ -f_z \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} (\boldsymbol{g}^n)^{\mathrm{T}} \\ (\boldsymbol{\omega}_{ie}^n)^{\mathrm{T}} \\ (\boldsymbol{v}^n)^{\mathrm{T}} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} \dfrac{\tan\varphi}{g} & \dfrac{1}{\omega_e \cos\varphi} & 0 \\ 0 & 0 & \dfrac{1}{g\omega_e \cos\varphi} \\ \dfrac{1}{g} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

- 只有当 $\boldsymbol{g}^n, \boldsymbol{\omega}_{ie}^n$ 两个向量不共线时，上述逆矩阵才存在。
- 解析粗对准方法不能用于地球两极地区；测量误差的存在使得姿态矩阵不是正交矩阵。

静态解析粗对准（续）

- 数值稳定性：先对参与解算的矢量做单位化和正交化处理

定义向量 $\boldsymbol{v}_g=\frac{\boldsymbol{g}^n}{|\boldsymbol{g}^n|},\quad \boldsymbol{v}_\omega=\frac{\boldsymbol{g}^n\times\boldsymbol{\omega}_{ie}^n}{|\boldsymbol{g}^n\times\boldsymbol{\omega}_{ie}^n|},\quad \boldsymbol{v}_{g\omega}=\frac{\boldsymbol{g}^n\times\boldsymbol{\omega}_{ie}^n\times\boldsymbol{g}^n}{|\boldsymbol{g}^n\times\boldsymbol{\omega}_{ie}^n\times\boldsymbol{g}^n|}$

定义向量 $\boldsymbol{w}_g=\frac{\boldsymbol{g}^b}{|\boldsymbol{g}^b|},\quad \boldsymbol{w}_\omega=\frac{\boldsymbol{g}^b\times\boldsymbol{\omega}_{ie}^b}{|\boldsymbol{g}^b\times\boldsymbol{\omega}_{ie}^b|},\quad \boldsymbol{w}_{g\omega}=\frac{\boldsymbol{g}^b\times\boldsymbol{\omega}_{ie}^b\times\boldsymbol{g}^b}{|\boldsymbol{g}^b\times\boldsymbol{\omega}_{ie}^b\times\boldsymbol{g}^b|}$

求解姿态矩阵

$$\mathbf{C}_b^n=\begin{bmatrix}\boldsymbol{v}_g^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{v}_\omega^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{v}_{g\omega}^{\mathrm{T}}\end{bmatrix}^{-1}\begin{bmatrix}\boldsymbol{w}_g^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{w}_\omega^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{w}_{g\omega}^{\mathrm{T}}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{v}_g & \boldsymbol{v}_\omega & \boldsymbol{v}_{g\omega}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{w}_g^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{w}_\omega^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{w}_{g\omega}^{\mathrm{T}}\end{bmatrix}$$

- 如此得到的姿态矩阵必然为单位正交矩阵，再根据所得姿态矩阵求解相应的姿态角。

静态解析粗对准（续）

- 根据姿态矩阵计算姿态角
  - 方向余弦矩阵 $\mathbf{C}_b^n$ 的第 i 行第 j 列的元素记作 c_{ij}, $1\leqslant i,j\leqslant 3$
  - 首先计算俯仰角

$$\theta=\tan^{-1}\frac{-c_{31}}{\sqrt{c_{32}^2+c_{33}^2}},\quad |\theta|\leqslant\frac{\pi}{2}$$

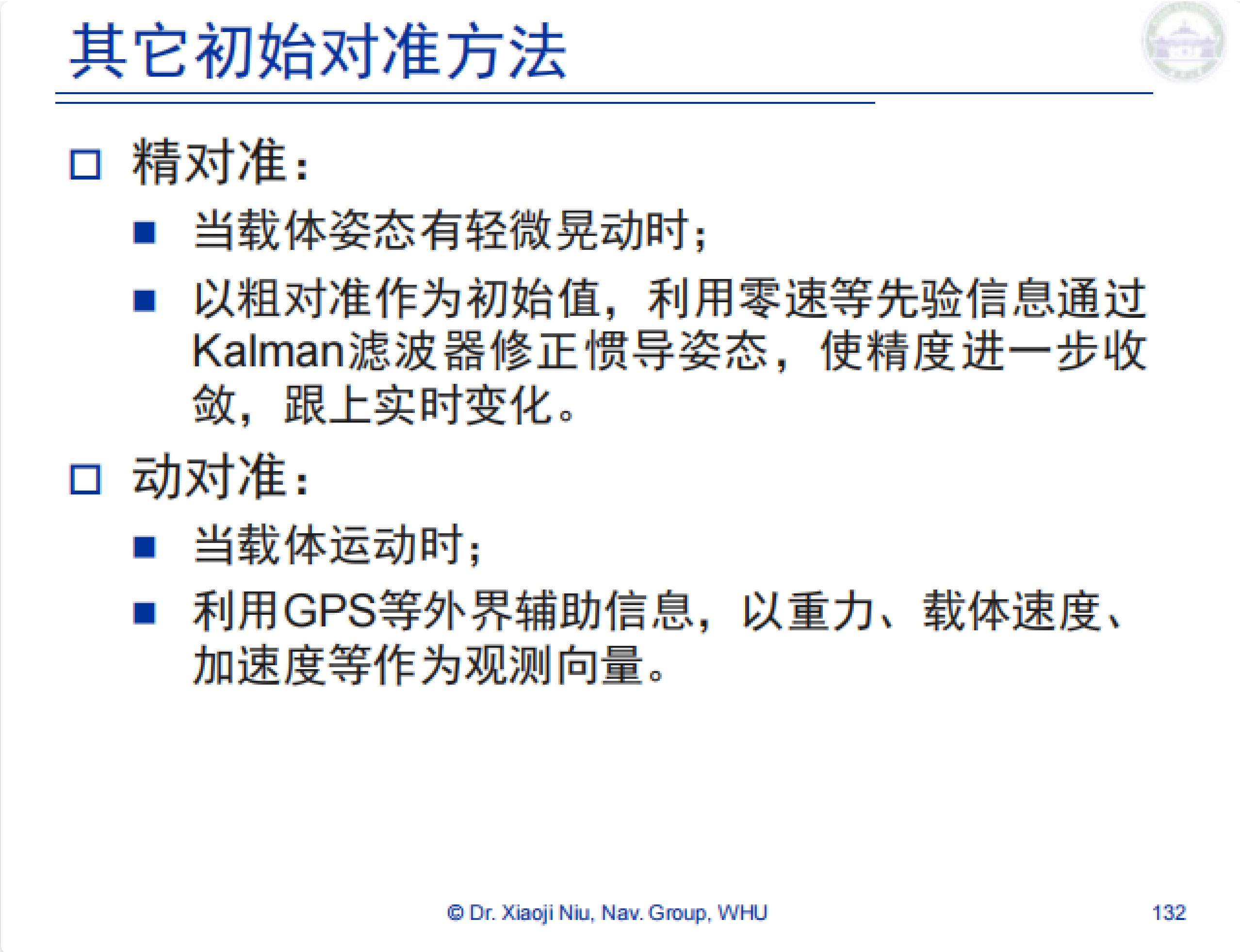
  - 计算横滚角

$$\phi=\tan^{-1}\frac{c_{32}}{c_{33}},\quad |\phi|\leqslant\pi$$

  - 计算航向角

$$\psi=\tan^{-1}\frac{c_{21}}{c_{11}},\quad |\psi|\leqslant\pi$$

4. 其他初始对准方法

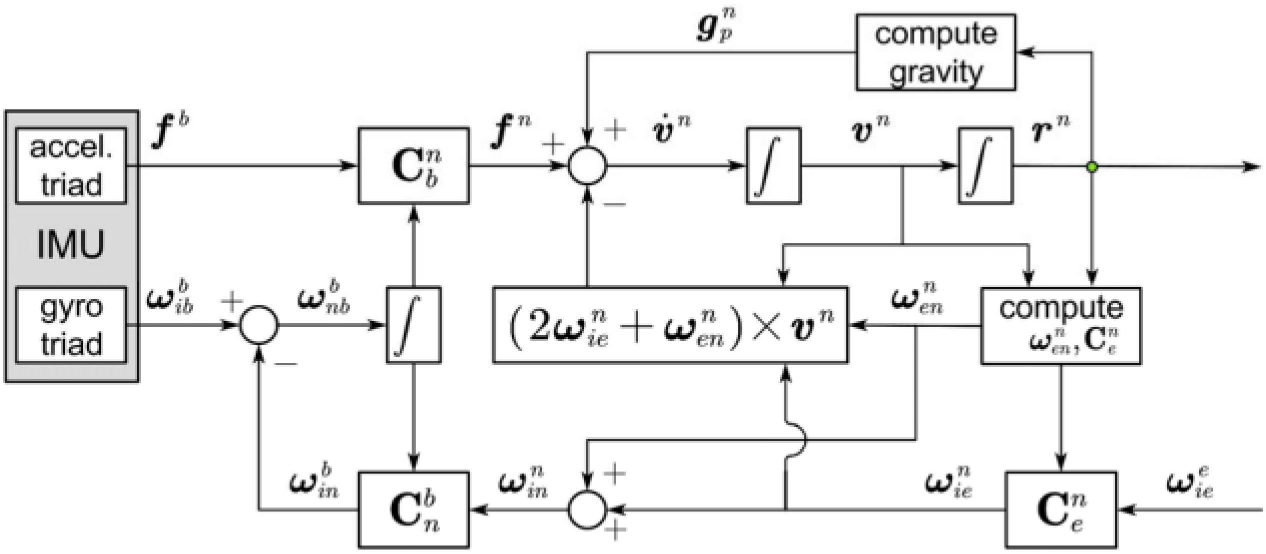


5.惯导设备的使用

1. INS 算法

INS 算法

□ 一种典型的INS机械编排框图



2. INS 测量

INS测量

□ 在使用惯导系统做测量应用之前

1. 认真阅读设备使用手册
2. 测试标定惯导系统，估计出加速度计和陀螺仪的零偏和比例因子误差的确定性部分，并加以补偿
3. 采集长时间的设备数据，用来估计加速度计和陀螺的随机误差特性(例如，白噪声、零偏的一阶Gauss-Markov过程参数)
4. 根据陀螺的噪声参数（ARW）估算所需初始对准的时长（考虑现实可行性），以保证初始对准的航向角精度

□ 做动态测试来演练并考核系统性能

1. 验证导航算法实现的正确性，精调算法参数，预估辅助信息更新所需要的频率来保障一定的测量精度.
2. 需要一个好的参考轨迹 (参考真值，通常是 GPS).
3. 测试轨迹通常是富含典型动态信息的“L”或“S”形轨迹.

INS测量 (续)

□ 典型的正式测试任务

外业：

1. 静态模式下5-15分钟初始对准
2. INS初始化 (初始化速度和位置)
3. （初始动态以便组合导航算法收敛）
4. 定期进行零速修正 (ZUPT) 或坐标修正 (CUPT)
5. （结束前动态改善反向平滑算法效果）
6. 结束前静止1-2分钟

内业：

7. 用惯导算法和Kalman 滤波进行数据处理（实时或事后）
8. 反向平滑处理（事后）
9. 结果显示、检查和输出