

惯性器件误差和标定

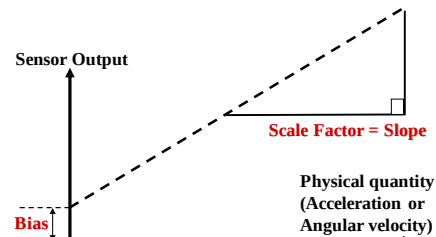
- 误差分类
- 误差模型
- 测试 & 标定

传感器误差分类(续)

- 基本的误差类型
 - 常值误差 (Constant error)
 - 重复性 (Repeatability) --multiple runs
 - 稳定性 (Stability) -- within one run
 - 噪声和带宽 (Noise & Bandwidth)
 - 热敏感度 (Thermal sensitivity, 温漂) ?
- 确定性和随机性
(Deterministic vs. Stochastic)

传感器误差分类

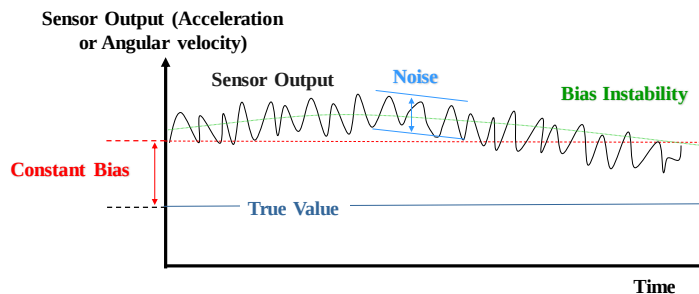
- 零偏 (Bias, 静态误差、加性误差)
 - 包含噪声 (Noise)
- 比例因子 (Scale factor, 动态误差、乘性误差)
 - 包含非线性 (non-linearity)
 - 轴偏移/轴交叉 (Axes misalignment / cross-axis)



* Reference: IEEE Standard for Inertial Sensor Terminology
© Dr. Xiaoji Niu, Nav. Group, WHU

零偏误差 (Bias Errors)

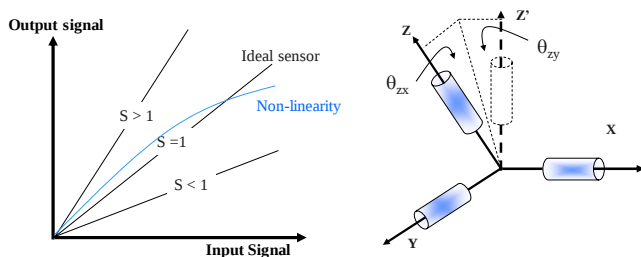
- 以零偏为例来理解不同的误差类型
 - 常值零偏, 零偏稳定性, 噪声



比例因子误差 (Scale Factor Errors)

- 比例因子:
 - 输出被测量的信号/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?



© Dr. Xiaoji Niu, Nav. Group, WHU

66

噪声误差 (Noise Error)

- 噪声: (ARW & VRW)
 - 高频误差;
 - 完全随机 (相邻历元不相关);
 - 功率谱分布;
 - 白噪声模型: 功率谱密度在整个频域内均匀分布的噪声
 - 谱密度: (信号单位)/sqrt(Hz).
 - 幅度(RMS)与带宽的平方根成正比
 - 幅度(RMS)与平均时间的平方根成反比

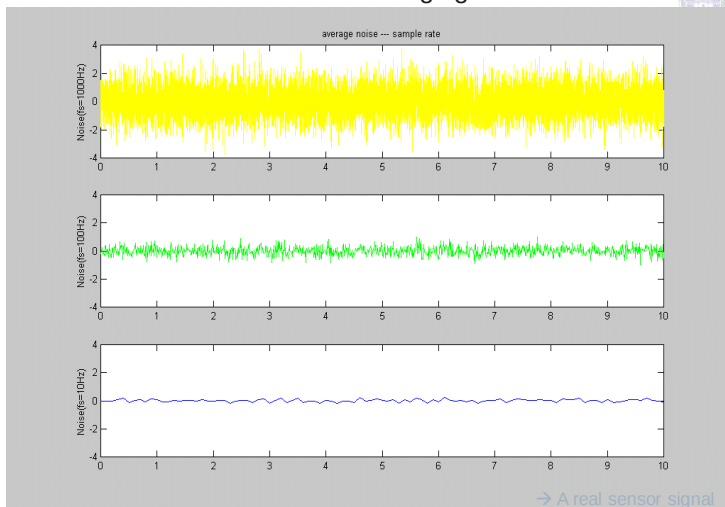
单位: rad/s/sqrt(Hz), deg/s/sqrt(Hz), deg/sqrt(hr)
m/s²/sqrt(Hz), m/s/sqrt(hr), mGal/sqrt(Hz)

→ Example of noise vs. averaging time

© Dr. Xiaoji Niu, Nav. Group, WHU

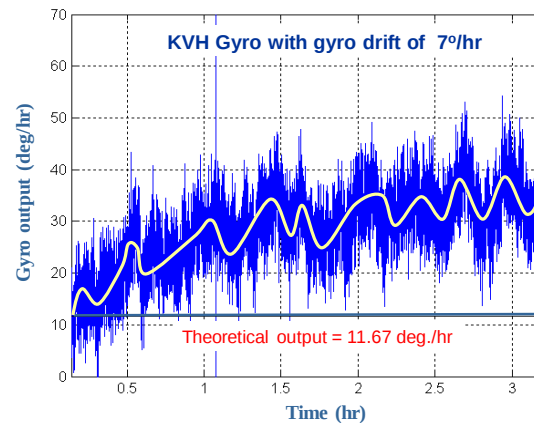
67

□ RMS vs. Averaging time



→ A real sensor signal

实际的传感器信号



→ Sensor output model

© Dr. Xiaoji Niu, Nav. Group, WHU

69

陀螺测量模型



$$\square I_{\omega} = \omega + b_{\omega} + S\omega + N\omega + \varepsilon_{\omega}$$

- I_{ω} : 测量值 (deg/hr).
- ω : 真实的角速度 (deg/hr).
- b_{ω} : 陀螺零偏 (deg/hr).
- S : 陀螺比例因子矩阵.
- N : 陀螺交轴耦合矩阵.
- ε_{ω} : 陀螺传感器噪声矢量 (deg/hr).

$$b_i = \begin{bmatrix} b_{ix} \\ b_{iy} \\ b_{iz} \end{bmatrix} \quad S_i = \begin{bmatrix} S_{ix} & 0 & 0 \\ 0 & S_{iy} & 0 \\ 0 & 0 & S_{iz} \end{bmatrix} \quad N = \begin{bmatrix} 0 & \theta_{xy} & \theta_{xz} \\ \theta_{yx} & 0 & \theta_{yz} \\ \theta_{zx} & \theta_{zy} & 0 \end{bmatrix}$$

© Dr. Xiaoji Niu, Nav. Group, WHU

70

加速度计测量模型



$$\square I_f = f + b_f + S_1 f + S_2 f^2 + Nf + \delta g + \varepsilon_f$$

- I_f : 测量值 (m/sec²).
- F : 真实比力 (m/sec²).
- B_f : 加速度计零偏 (m/sec²).
- S_1 : 加速度计线性比例因子误差矩阵.
- S_2 : 非线性比例因子误差矩阵.
- N : 交轴耦合矩阵.
- δg : 重力异常矢量 (偏离理论重力值) (m/sec²).
- ε_f : 加速度计传感器噪声矢量 (m/sec²).

→ Clarification

© Dr. Xiaoji Niu, Nav. Group, WHU

71

术语解释



易混淆的概念:

- Bias vs. Bias error; SF vs. SF error;
- Random Walk vs. White Noise

同义词:

- Drift, variation, instability, stability;
- Non-orthogonality, cross-axis, axis-misalignment

易混淆的单位:

- Accel: m/s², g, mg, ug, mGal, m/s/h;
- Gyro: rad/s, deg/s, deg/h;
- For white noise (or random walk):
- Spectrum density (q) vs. sqrt(q)
- rad/s/sqrt(Hz), deg/s/sqrt(Hz) = deg/sqrt(s), deg/sqrt(h);
- m/s²/sqrt(Hz) = m/s/sqrt(s), ug/sqrt(Hz), m/s/sqrt(h).

Case Study 1

• RMS
• P-P
• +/-
• <

* Reference: IEEE Standard for Inertial Sensor Terminology

© Dr. Xiaoji Niu, Nav. Group, WHU

72

误差模型



随机模型

- White noise (Gaussian distributed)
- Random walk
- 1st-order Gaussian-Markov process
- Random constant
- ...

基本的误差类型

- Constant error
- Repeatability
- Instability
- Noise
- Thermal sensitivity

误差模型的识别

- Auto-correlation
- Power spectrum density (PSD)
- Allan variance

© Dr. Xiaoji Niu, Nav. Group, WHU

73

自相关 (Auto correlation)

□ 白噪声过程

- 随机过程 $x(t)$ 表示如下:

$$x(t) = W(t)$$

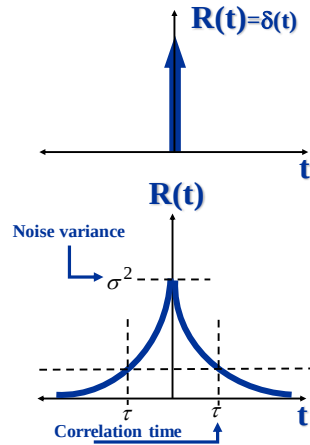
□ 一阶马尔可夫过程

$$\dot{x}(t) = -\frac{1}{\tau} x(t) + \sqrt{\frac{2}{\tau}} \sigma^2 W(t)$$

$$R(t) = \sigma^2 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Estimate the correlation time at $t = \tau$
i.e.

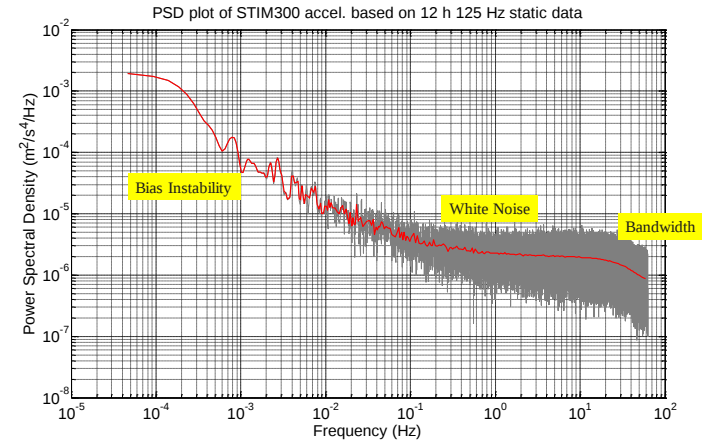
$$R(t) = \sigma^2 e^{-1} = \sigma^2 / e = \sigma^2 / 2.7 \\ = 0.3678 \sigma^2$$



© Dr. Xiaoji Niu, Nav. Group, WHU

74

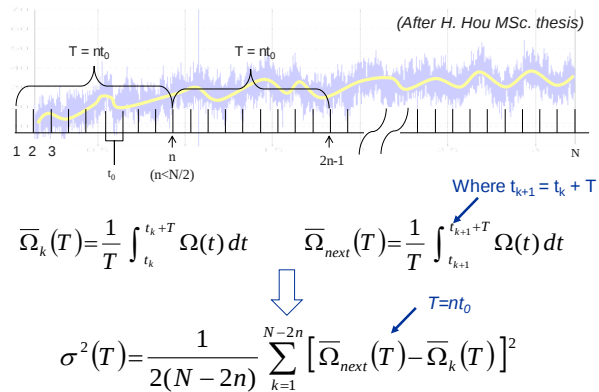
功率谱密度 (PSD) – Example



© Dr. Xiaoji Niu, Nav. Group, WHU

75

Allan 方差

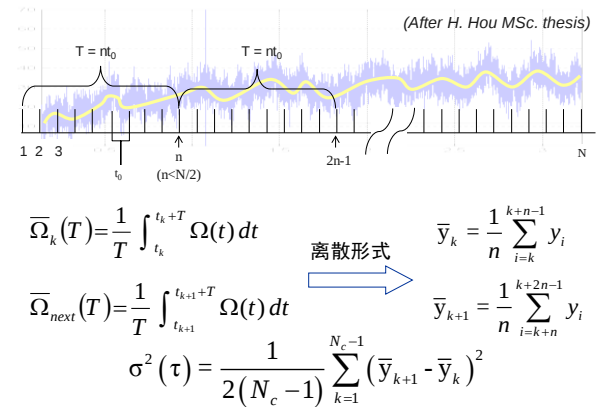


Reference: IEEE standard for Testing IFOG (AnnexC_Allan)

© Dr. Xiaoji Niu, Nav. Group, WHU

76

Allan 方差

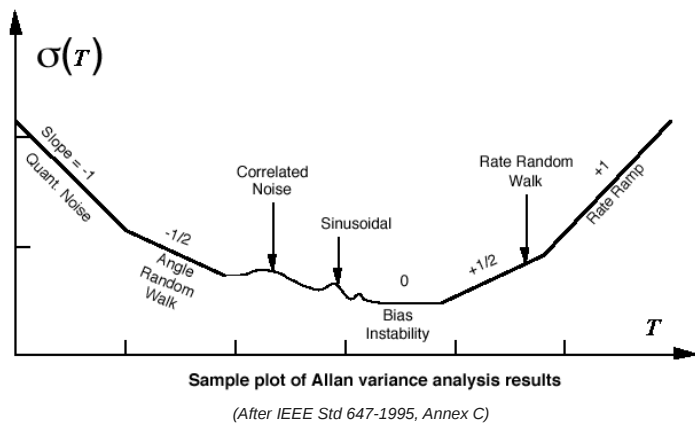


Reference: IEEE standard for Testing IFOG (AnnexC_Allan)

© Dr. Xiaoji Niu, Nav. Group, WHU

77

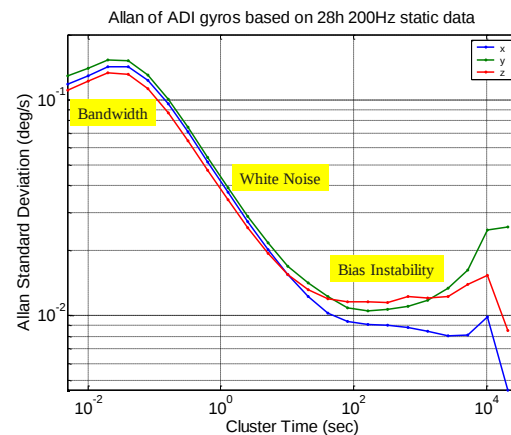
Allan 方差 – Example 1



© Dr. Xiaoji Niu, Nav. Group, WHU

78

Allan 方差 – Example 2



© Dr. Xiaoji Niu, Nav. Group, WHU

79

测试与标定

- 测试 vs. 标定
- 系统误差 vs. 随机误差
- 静态测试
- 转台测试



Reference: David Titterton, Strapdown Inertial Navigation Technology (2nd edition.)
Chapter 8: Testing, calibration and compensation

© Dr. Xiaoji Niu, Nav. Group, WHU

80

其它测试与标定的方法

□ 测试

- 静态测试
- 转台测试
- 温度测试
- 振荡测试
- 磁敏感性
- 离心测试
- 冲击测试
- 振动测试
- 综合测试
- 老化和存贮测试
- ...

□ 标定

- 零偏
- 比例因子
- 交轴耦合
- 加速度敏感性
- 温度漂移
- 上电过程
- ...

*All systematic errors can be compensated.
But consider only the major errors.*

*Some random error can be estimated by
the navigation algorithm and compensated
online.*

© Dr. Xiaoji Niu, Nav. Group, WHU

81

IMU的标定

□ 标定的重要性

- 去除系统误差

□ 加速度计零偏的影响

- 初始横滚与俯仰;
- 速度和位置

□ 陀螺零偏的影响

- 航向(*)
- 姿态、速度和位置

$$\delta r^N = \delta r_0^N + \delta v_0^N \cdot t + \frac{1}{2} (g \cdot \delta \theta_0 + b_{aN}) \cdot t^2 + \frac{1}{6} (b_{gE} \cdot g) \cdot t^3$$

IMU的标定

□ 经典描述

- "Calibration is the process of comparing instrument outputs with known reference information and determining the coefficients that force the output to agree with the reference information over a range of output values" (Chatfield 1997).
- Calibration is known to be the fundamental way to remove the major part of the *deterministic* sensor errors of inertial sensors and IMUs.

IMU的标定

□ 可用参考源:

- 加速度计: 地球重力
- 陀螺仪: 地球自转或转台旋转

□ 方法:

- 两位置、六位置法静态测试
- 角速率测试
- 当地水平坐标系 (LLF) 标定

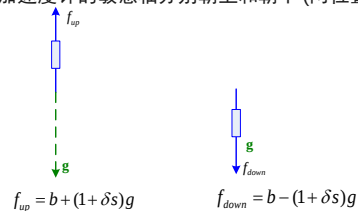
□ 设备:

- 转台
- 立方体

Reference: David Titterton, Strapdown Inertial Navigation Technology (2nd edition.)
Chapter 8: Testing, calibration and compensation

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)



□ 这个加速度计的零偏和比例因子误差可以这样计算:

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

这里 b , δs 和 g 分别表示零偏, 比例因子误差和重力加速度。

* 与精密设备的误差对消操作类比

两位置法静态标定(续)

- 如果有一个倾斜角 (θ), 则

* Robust

$$f'_{up} = b + (1 + \delta s)g \cos \theta$$

$$f'_{down} = b - (1 + \delta s)g \cos \theta$$

- 这个加速度计的零偏和比例因子误差表示如下:

$$b = \frac{f'_{up} + f'_{down}}{2}$$

$$\delta s = \frac{f'_{up} - f'_{down}}{2g \cos \theta} - 1$$

- 这里 b , δs 和 g 分别表示零偏, 比例因子误差和重力加速度

角速率测试

- 主要用于为标定陀螺仪提供相对较强的输入参考。
- 使用一个精确的角位置 (或角速率) 转台, 使IMU能够转动一个**精确已知**的角度 (或在精确已知的角速率下转动)。
- 测试时可以由陀螺输出的角速率积分计算出旋转角度的估计值, 与已知的转台旋转角比较, 可以估算出陀螺的各种误差。
- 例如, 如果转台顺时针和逆时针旋转同样的角度, 那么陀螺的零偏和比例因子误差的估计值可以估算出来。

* 与两位置法类比

角速率测试(续)

- IMU绕着Z轴同时顺时针和逆时针旋转相同的参考角度 (α).

$$l_{z\text{-clockwise}} = b_{gz}t + (1 + \delta s_{gz})\alpha + (\omega_e \sin \phi)t$$

$$l_{z\text{-counterclockwise}} = b_{gz}t - (1 + \delta s_{gz})\alpha + (\omega_e \sin \phi)t$$

注: 这里标度因子对地球自转测量的影响被忽略了, 是否会影响标定结果?

- 陀螺Z轴方向的零偏和比例因子误差的计算如下:

$$b_{gz} = \frac{l_{z\text{-clockwise}} + l_{z\text{-counterclockwise}}}{2t} - \omega_e \sin \phi$$

$$\delta s_{gz} = \frac{l_{z\text{-clockwise}} - l_{z\text{-counterclockwise}}}{2\alpha} - 1$$

- 这里 l 和 t 分别表示角度观测量和旋转时间。

* 注意地球自转项; 为什么不用角速率标定?

六位置法- 最小二乘(LS) 形式

六位置静态方法和速率测试的标定计算可以采用最小二乘法:

- 传感器(e.g. 加速度计)的三轴输出表示如下:

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

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

- 用标准的六位置方法进行IMU对准, 理想的加速度计输出如下:

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

- 因此, 为最小二乘解算设计的矩阵(A)是:

$$A = \begin{bmatrix} f'_1 & f'_2 & f'_3 & f'_4 & f'_5 & f'_6 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

六位置法- 最小二乘(LS) 形式 (续)



- 传感器观测获得的原始输出数据构成一个矩阵(观测矩阵):

$$L = [l_1 \quad l_2 \quad l_3 \quad l_4 \quad l_5 \quad l_6]$$

这里

$$l_1 = \begin{bmatrix} \tilde{f}_x \\ \tilde{f}_y \\ \tilde{f}_z \end{bmatrix}_{x\text{-axis pointing up}} \quad l_2 = \begin{bmatrix} \tilde{f}_x \\ \tilde{f}_y \\ \tilde{f}_z \end{bmatrix}_{x\text{-axis pointing down}}$$

- 整个方程表示如下:

$$L = MA$$

- 矩阵M的值可以用最小二乘法估计得到

$$M = LA^T (AA^T)^{-1}$$

* 12-Position method

→ Summary of standard cali.

© Dr. Xiaoji Niu, Nav. Group, WHU

90

新的标定方法



- 系统级标定
 - 不需要专业设备
 - 使用间接的参考
 - 用于低端传感器
 - 现场的标定和维护



→ Case studies

© Dr. Xiaoji Niu, Nav. Group, WHU

92

标定方法总结



- 标定的精度依赖于各轴相对于参考坐标对准的准确性.
- 为了获得准确的标定结果, 需要一些专业设备(如转台或规则的立方体)来获得IMU的精确姿态和旋转角.
- 由于对专业设备的依赖性, 这些标定方法主要设计用于实验室测试、厂家校准和对较高精度的IMU的标定.

→ New calibration method

© Dr. Xiaoji Niu, Nav. Group, WHU

91

案例研究1



- 如何阅读惯导传感器和IMU的规格参数?
 - 战术级(Tactical grade): LN200
 - 微机电系统(MEMS): ADIS16488
 - 转换成我们所需要的参数...

© Dr. Xiaoji Niu, Nav. Group, WHU

93

战术级(Tactical grade)

□ LN200 from Litton

Performance - Gyro	
Bias Repeatability	1deg./hr to 10deg./hr 1[sigma]
Random Walk	0.04 to 0.1deg/[sqrt root]hr power spectral density (PSD) level
Scale Factor stability	100 ppm 1[sigma]
Bias Variation	0.35deg./hr 1[sigma] with 100-second correlation time
Nonorthogonality	20 arcsec 1[sigma]
Bandwidth	> 500 Hz
Performance - Accelerometer	
Bias Repeatability	200 [micron]g to 1 milli-g, 1[sigma]
Scale Factor stability	300 ppm 1sigma
Vibration Sensitivity	50 [micron]g/g2 1[sigma]
Bias Variation	50 micro-g 1sigma with 60-second correlation time
Nonorthogonality	20 arcsec 1[sigma]
White Noise	50 micro-g[sqrt root]Hz PSD level
Bandwidth	100 Hz

© Dr. Xiaoji Niu, Nav. Group, WHU

94

案例研究2

□ 如何测试和标定一个新的IMU?

- 首先检查功能是否正常
- 静态测试: 稳定平台, Allan方差分析
- 立方体: 标定加速度计(陀螺?)
- 单轴转台 + 立方体:
- 多轴转台:
- 温度试验箱:
- 带试验箱的转台:
- 其它工具: 分度头

* 也依赖于传感器精度等级



© Dr. Xiaoji Niu, Nav. Group, WHU

96

MEMS: ADIS16488 from ADI

Parameter	Test Conditions/Comments	Min	Typ	Max	Unit	结构形式
GYROSCOPES						测量范围
Dynamic Range	x_GYRO_OUT and x_GYRO_LOW (32-bit)	±450		±480	°/sec	测量范围
Sensitivity			3.052 × 10 ⁻⁷		°/sec/LSB	测量范围输出
Initial Sensitivity Tolerance	-40°C ≤ T _A ≤ +70°C, 1 σ		±35	±1	%	噪声均方根值
Sensitivity Temperature Coefficient	Axis-to-axis		±0.05		ppm/°C	灵敏度
Misalignment	Axis-to-frame (package)		±1.0		Degrees	动态范围
Nonlinearity	Best-fit straight line, F5 = 450°/sec		0.01		% of FS	频率响应
Initial Bias Error	1 σ		±0.2		°/sec	线性度
In-Run Bias Stability	1 σ		6.25		°/hr	零点漂移
Angular Random Walk	1 σ		0.3		°/√hr	供电电压
Bias Temperature Coefficient	-40°C ≤ T _A ≤ +70°C, 1 σ		±0.0025		°/sec/°C	静态耗电流
Linear Acceleration Effect on Bias	Any axis, 1 σ (CONFIG[7] = 1)		0.009		°/sec/g	环境温度
Output Noise	No filtering		0.16		°/sec rms	环境湿度
Rate-Noise Density	f = 25 Hz, no filtering		0.005		°/sec/√Hz rms	密封性
3 dB Bandwidth			330		Hz	尺寸
Sensor Resonant Frequency			18		kHz	重量
ACCELEROMETERS						固牢
Dynamic Range	Each axis	±18			g	零漂
Sensitivity	x_ACCL_OUT and x_ACCL_LOW (32-bit)		1.221 × 10 ⁻⁴	±0.5	g/LSB	零漂
Initial Sensitivity Tolerance	-40°C ≤ T _A ≤ +85°C, 1 σ		±25		%	零漂
Sensitivity Temperature Coefficient	Axis-to-axis		±0.035		ppm/°C	零漂
Misalignment	Axis-to-frame (package)		±1.0		Degrees	零漂
Nonlinearity	Best-fit straight line, ±10 g		0.1		% of FS	零漂
Initial Bias Error	Best-fit straight line, ±18 g		0.5		% of FS	零漂
In-Run Bias Stability	1 σ		±16		mg	零漂
Velocity Random Walk	1 σ		0.1		mg	零漂
Bias Temperature Coefficient	-40°C ≤ T _A ≤ +85°C		±0.1		m/sec/°C	零漂
Output Noise	No filtering		1.5		mg rms	零漂
Noise Density	f = 25 Hz, no filtering		0.06		mg/√Hz rms	零漂
3 dB Bandwidth			330		Hz	零漂
Sensor Resonant Frequency			5.5		kHz	零漂

© Dr. Xiaoji Niu, Nav. Group, WHU

95

附录-1: 常见的随机过程

□ 白噪声和随机游走

- 白噪声序列
- 累加得到随机游走序列 (均值和方差)
- 取平均减少方差
- 连续时间白噪声和随机游走

$$E\{\alpha^2(t)\} = q \cdot \delta(0)$$

$$\dot{\beta}(t) = \alpha(t) \quad E\{\beta^2(t)\} = q \cdot t$$

© Dr. Xiaoji Niu, Nav. Group, WHU

97

白噪声和随机游走的关系

The system response $X(t)$ is given by

$$X(t) = \int_0^t F(u) du \quad (2.13.1)$$

Clearly, the average of the output is

$$E[X(t)] = E\left[\int_0^t F(u) du\right] = \int_0^t E[F(u)] du = 0 \quad (2.13.2)$$

Also, the mean-square-value (variance) is

$$E[X^2(t)] = E\left[\int_0^t F(u) du \int_0^t F(v) dv\right] = \int_0^t \int_0^t E[F(u)F(v)] du dv \quad (2.13.3)$$

But $E[F(u)F(v)]$ is just the autocorrelation function $R_F(u-v)$, which in this case is a Dirac delta function. Thus

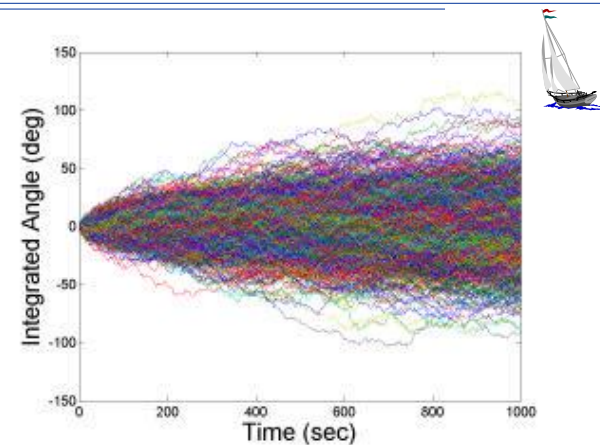
$$E[X^2(t)] = \int_0^t \int_0^t \delta(u-v) du dv = \int_0^t dv = t \quad (2.13.4)$$

Thus, $E[X^2(t)]$ increases linearly with time and the rms value increases in accordance with $\sqrt{t}$ (for unity white noise input).

© Dr. Xiaoji Niu, Nav. Group, WHU

98

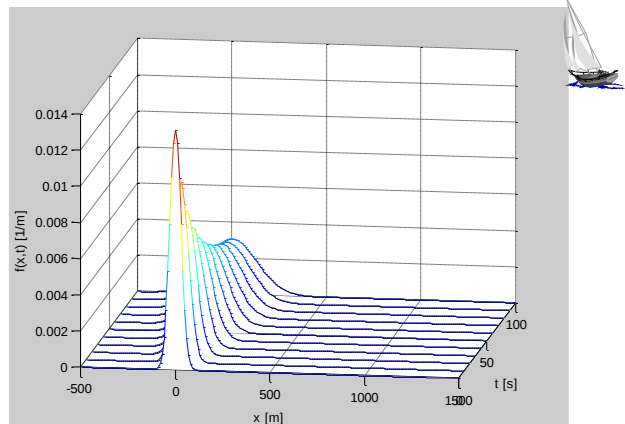
随机游走的发散



© Dr. Xiaoji Niu, Nav. Group, WHU

99

随机游走的发散



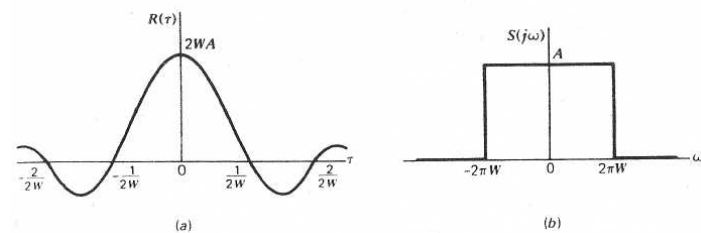
© Dr. Xiaoji Niu, Nav. Group, WHU

100

有限带宽白噪声

- 有限带宽的白噪声
- 带宽和方差的关系

$$E\{\alpha^2(t)\} = q \cdot BW = RMS^2$$



© Dr. Xiaoji Niu, Nav. Group, WHU

101

一阶 Gauss-Markov 过程



- 由高斯白噪声引出
- 方差、相关时间、功率谱密度(PSD)

$$\dot{x}(t) = -\frac{1}{T}x(t) + \alpha(t) \quad q = \frac{2\sigma^2}{T}$$

- 离散化:

$$x_{k+1} = e^{-\frac{\Delta t}{T}} \cdot x_k + \alpha_k \quad q_k = \frac{T}{2} \left(1 - e^{-2\frac{\Delta t}{T}} \right) \cdot q$$

当 $\Delta t \ll T$

$$x_{k+1} \approx \left(1 - \frac{\Delta t}{T} \right) \cdot x_k + \alpha_k \quad q_k \approx \Delta t \cdot q$$

© Dr. Xiaoji Niu, Nav. Group, WHU

102

课后练习1：读书笔记—随机过程基本概念



- Robert Grover Brown and Patrick Y.C. Hwang (1992), Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering: Second Edition, John Wiley and Sons, Inc. 0471-52573-1. Chapter-2: Mathematical Description of Random Signals
- 思考并回答以下问题:
 1. 随机过程概念，它与随机变量的差别；
 2. 平稳随机过程和各态遍历的概念，并举例说明；
 3. 自相关函数、功率谱密度函数的概念和含义，如何从具体实验数据中计算；
 4. 白噪声、Gauss-Markov过程（一阶）、随机游走的概念和特性。

注：可跳过2.6, 2.8, 2.11, 2.12, 2.14；并且不必计较随机过程二阶以上的统计特性。

© Dr. Xiaoji Niu, Nav. Group, WHU

103

课后练习2：常用基本随机过程的仿真



1. 用 Matlab 中的 randn 函数产生 Sigma 值为 0.03 度/小时，采样率 1000Hz，长度为 3600 秒的角速度随机时间序列作为原始白噪声；
2. 仿真有限带宽白噪声：用不同截止频率（如 100Hz, 10Hz, 1Hz）的低通滤波器（Buttworth 滤波器）对原始白噪声信号进行滤波，研究滤波后的白噪声的方均根值（即一倍 Sigma 值）与滤波带宽的关系。结果列成表格。
3. 仿真随机游走：将上述原始白噪声和有限带宽的白噪声按时间积分后得到角度随机游走（ARW），研究随机游走信号的统计方差随积分时间（如 10 秒，60 秒，360 秒，3600 秒）而发散的关系（建议做 100 次以上的仿真样本）。结果列成表格并画图表示。
4. 仿真一阶高斯马尔可夫过程：将上述原始白噪声作为一阶高斯马尔可夫过程的驱动白噪声，取不同的相关时间（如 4 秒，40 秒，400 秒，4000 秒）；研究所得信号的 Sigma 值与原始白噪声的功率谱密度 q 和相关时间 Tau 的关系，观察不同相关时间下的一阶高斯马尔可夫过程的时间变化特征（接近白噪声还是接近随机游走）

© Dr. Xiaoji Niu, Nav. Group, WHU

104