

Mark Looney
应用工程师
ADI公司

MEMS陀螺仪中主要噪声源的预测和管理

in | 分享至LinkedIn

✉ | 电子邮件

摘要

当MEMS惯性测量单元(IMU)用作运动控制系统中的反馈传感器时，必须了解陀螺仪的噪声情况，因为它会在所监视的平台上造成不必要的物理运动。根据具体情况，针对特定MEMS IMU进行早期应用目标噪声估算时需要考虑多个潜在的误差源。在此过程中需要考虑的三个常见陀螺仪特性为其固有噪声、线性振动响应和对准误差。图1的简单模型显示了会影响各误差源评估的几个特性：噪声源、传感器响应和滤波。此模型给出了对这些特性进行频谱分析所需的基准。

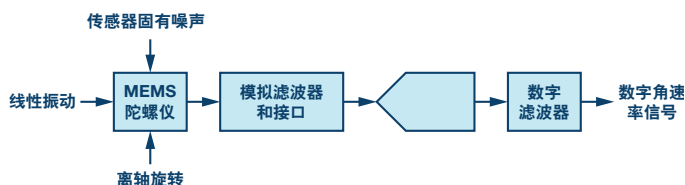


图1.陀螺仪噪声源和信号链

传感器固有噪声

传感器固有噪声代表的是陀螺仪在静态惯性和环境条件下运行时其输出中的随机振动。MEMS IMU数据手册通常会提供速率噪声密度(RND)参数来描述陀螺仪相对于频率的固有噪声。此参数通常使用单位 $^{\circ}/s/\sqrt{Hz}$ ，是预测特定滤波器配置固有噪声的关键。公式1给出了一种简单方法来估算与特定频率响应(噪声带宽)和RND相关的噪声。

$$TN = \text{总噪声}, \frac{^{\circ}}{\text{sec}} (rms) \quad (1)$$

$$TN = RND \times \sqrt{f_{NBW}}$$

其中：

$$RND = \text{速率噪声密度}, \frac{^{\circ}}{\text{sec}}/\sqrt{Hz}$$

$$f_{NBW} = \text{噪声带宽}, Hz$$

当RND的频率响应遵循单极点或双极点低通滤波器曲线时，噪声带宽(f_{NBW})和滤波器截止频率(f_C)将有公式2和公式3的关系。

$$f_{NBW} = 1.57 \times f_C \quad (\text{单极点低通滤波器}) \quad (2)$$

$$f_{NBW} = 1.22 \times f_C \quad (\text{双极点低通滤波器}) \quad (3)$$

除了RND参数外，MEMS IMU数据手册有时会使用输出噪声等参数指定特定滤波器配置的陀螺仪固有噪声。输出噪声通常使用角速率标准单位($^{\circ}/s$)，并使用均方根(rms)等统计术语来描述总噪声幅度。

线性振动

由于陀螺仪用于测量旋转角速率，因此其对线性运动的响应会引入测量误差。MEMS IMU数据手册通常通过“线性加速度对偏置的影响”或“线性加速度”等参数来描述对线性运动的这一响应，这些参数通常使用单位 $^{\circ}/s/g$ 。线性振动是一种重复的惯性运动，其幅度大小可通过位移(m)、线性速度(m/s)或线性加速度(m/s^2 或 g)表示。在特定的振动频率(f_{LV})下，位移($|d_{LV}|$)、速度($|v_{LV}|$)和加速度($|a_{LV}|$)之间的幅度关系如公式4所示。

$$|a_{LV}| = 2 \times \pi \times f_{LV} \times |v_{LV}| = (2 \times \pi \times f_{LV})^2 \times |d_{LV}| \quad (4)$$

当振动幅度以加速度(g_{rms})表示时,与线性加速度参数相乘可估算陀螺仪测量中产生的噪声。例如,当ADIS16488A承受 5 g (rms)的振动时,由于线性加速度等于 $0.009^\circ/s/g$,因此其陀螺仪中的噪声估算值将为 $0.045^\circ/s$ (rms)。

$$\phi_{LV} = \text{线性振动带来的陀螺仪噪声} \quad (5)$$

$$\phi_{LV} = H_{LG} \times a_{LV} = 0.009^\circ/\text{sec}/g \times 5g_{rms} = 0.045^\circ/\text{sec} (rms)$$

其中:

$$H_{LG} = 0.009^\circ/\text{sec}/g = \text{ADIS16488A陀螺仪线性加速度}$$

$$a_{LV} = 5g_{rms}$$

如图1所示,陀螺仪信号链常常包括滤波器,这有助于减少线性振动引起的噪声。以频谱项(幅度、频率)定义振动可在估算噪声贡献时考虑滤波器的影响。加速度频谱密度(ASD)函数是以频谱项表达振动的常见方式,通常使用单位 g^2/Hz 。下面通过示例说明已知ASD和陀螺仪频率响应(H_G)时估算噪声幅度的步骤:

1. ASD函数乘以陀螺仪频率响应的平方值:

$$ASD_F(f) = ASD(f) \times H_G^2(f)$$

其中:

$$ASD(f) = \text{加速度频谱密度} \left(g^2/Hz \right) \quad (6)$$

$$HG(f) = \text{滤波器响应}$$

2. 利用帕塞瓦尔定理,通过在目标频率范围内对ASDF进行积分来计算“滤波振动曲线”中的平均功率。

$$a_V^2 = \int_{f_1}^{f_2} ASD_F(f) \times df \quad (7)$$

3. 求取噪声功率估算值的平方根,然后与线性加速度系数(H_{LG})相乘即可计算出陀螺仪噪声幅度。

$$\phi_N = H_{LG} \times \sqrt{a_V^2} \quad (8)$$

对准误差

运动控制系统通常会建立惯性参考系,其中包含三个相互垂直 90° 的轴。这三个轴为MEMS IMU中的各个传感器提供方位参考。理想情况下,陀螺仪的各个旋转轴将与系统参考系中的轴完全对齐,将IMU安装到平台上之后,将其监视运行情况。这种情况下,在惯性参考系中围绕其中一个轴旋转,只有该轴的陀螺

仪会生成响应。实际操作中,无法实现这种效果,因为机械缺陷必定会造成一些对齐误差,从而导致离轴陀螺仪响应惯性参考系中围绕一个轴的旋转运动。量化此响应需要一些三角恒等式,并谨慎定义陀螺仪的对齐误差。

每个陀螺仪的对齐误差均具有两个分量,分别定义其相对于惯性参考系中另一个轴的对齐误差。例如,对于图2中的系统, θ_{xz} 代表x轴陀螺仪相对于z轴的对齐误差。此对齐误差定义有助于建立公式以计算离轴陀螺仪对系统惯性参考系中围绕另一个轴旋转运动的响应。公式9中给出了一个示例,其量化了x轴陀螺仪相对于z轴的对齐误差(θ_{xz})和围绕z轴旋转(ω_{ZR})而产生的响应(ω_{GX})。

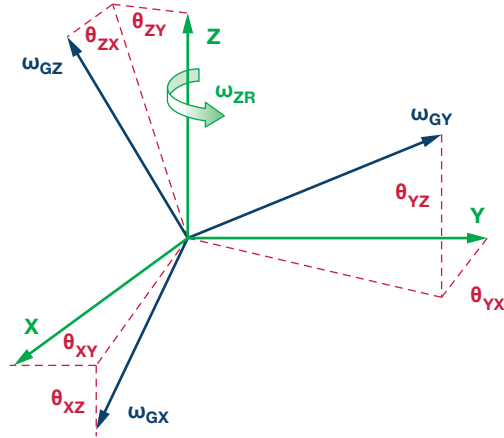


图2.三轴式陀螺仪对齐误差

$$\omega_{GX} = \omega_{ZR} \times \sin(\theta_{XZ}) \quad (9)$$

MEMS IMU通常具有两种类型的对齐误差,它们相互关联,但在系统级建模中具有不同应用:轴到封装和轴到轴。“轴到封装对齐误差”描述陀螺仪相对于器件封装上特定机械特性的对齐情况。将IMU安装到系统后,如果系统无法支持惯性对齐,则轴到封装对齐误差将成为整体对齐误差的主要因素之一。系统与IMU的机械接口的机械缺陷也会增加整体对齐误差。“轴到轴对齐误差”描述各个陀螺仪旋转轴相对于其他两个陀螺仪的相对对齐精度。在系统可以实现简单的对齐过程时,此参数影响最大,此时通常沿系统的惯性参考系中的一个轴直线移动整个组件(IMU已安装在系统平台上),同时需要观察传感器。

如果对齐误差不是IMU规格的一部分,则通过评估器件封装中主要机械特性的物理容差就可以估算这些误差。例如,以下情况会引入 0.5° 的对齐误差:

- ▶ 4 mm × 4 mm LGA封装上的焊接回流工艺具有35 μm的安装误差
- ▶ PCB上相距20 mm的两个安装孔之间具有0.175 mm的容差

案例研究

为了说明这些原理, 请看以下示例, 其中估算ADIS16488A中的陀螺仪噪声, 该器件用于在以下配置/条件下运行的新型航电系统:

- ▶ 陀螺仪可用全带宽
- ▶ 振动(ASD(f)): 0.122 g²/Hz; 10 Hz到2000 Hz (总振动= 5 grms)
- ▶ 最大旋转速率 = ±100°/s, 频率范围 = 5 Hz到50 Hz

全带宽配置匹配与ADIS16488A针对固有传感器噪声的0.135°/s (rms)的输出噪声规格相关的条件。对于振动贡献, 图3给出了曲线说明ASD(f)以及滤波曲线ASD_f(f)。ASD_f(f)中的频率响应反映了与此IMU陀螺仪信号路径中双极点(404 Hz, 757 Hz)低通滤波器相关的衰减曲线。

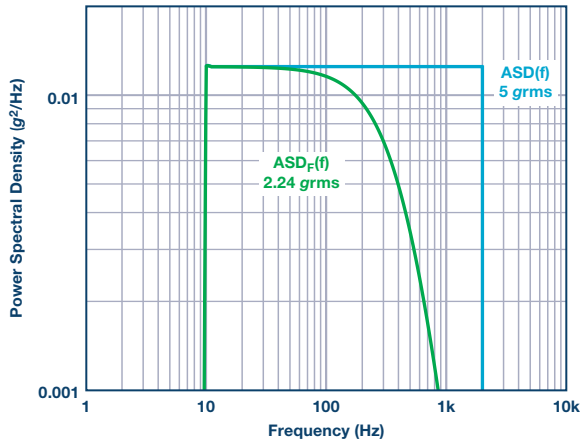


图3. 振动频谱分析

公式10通过线性加速度参数乘以ASD_f(f)曲线幅值2.24 grms, 可估算产生的噪声电平为0.02°/s (rms)。此噪声电平比通过公式5得到的0.045°/s (rms)低55%, 公式5的方法未采用频谱项评估此噪声源。这种改善是采用频谱项定义振动曲线以获取值的一个示例。

$$\omega_{GX} = 0.009 \frac{^\circ}{\text{sec}} \times 2.24 g_{RMS} = 0.02 \frac{^\circ}{\text{sec}} (rms) \quad (10)$$

通过公式11可计算50 Hz频率下围绕z轴进行±100°/s旋转振荡时的x轴陀螺仪噪声。由于50 Hz恰好位于双极点滤波器的通带中, 因此滤波器无法抑制此噪声源。此计算假设ADIS16488A的轴到轴对齐误差是主要误差源(也就是说, 将IMU安装到系统后, 全面部署时将包括简单的惯性参考系对齐过程)。

$$\omega_{GX} = \omega_Z \times \sin(\theta_X) = \pm 100 \frac{^\circ}{\text{sec}} \times \sin(0.05^\circ) = \pm 0.088 \frac{^\circ}{\text{sec}} \quad (11)$$

表1总结了ADIS16488A中来自各个因素的陀螺仪噪声。公式12给出了0.15°/s (rms)的整体噪声估算值(ω_{NOISE}), 表示表1中所有三个噪声源的平方和根值(RSS)。

表1. 噪声贡献总结

贡献	噪声(°/s)
传感器固有噪声	0.135
线性振动响应	0.02
对准误差	0.088

$$\omega_{NOISE} = \sqrt{0.135^2 + 0.02^2 + 0.088^2} = 0.15 \frac{^\circ}{\text{sec}} (rms) \quad (12)$$

结论

这些方法利用相应数据手册中的常用参数信息以及对惯性条件的初步见解或估算, 给出了评估MEMS陀螺仪信号中常见噪声源的简单流程。了解和评估这些噪声源有助于确定重要的应用信息, 指导IMU选择流程, 还可以发掘改善机会(简单对齐, 当IMU支持相应的轴到轴对齐误差级别时)以使用更经济的解决方案, 反之则无法实现这种优势。

致谢

作者在此衷心感谢Randy Carver、Glenn Romano、Paul Perrault和Dave LoCascio为本文内容及审核提供的帮助。

作者简介

Mark Looney是ADI公司(美国北卡罗来纳州格林斯博罗)的iSensor®应用工程师。自1998年加入ADI公司以来, 他在传感器信号处理、高速模数转换器和DC-DC电源转换领域积累了丰富的工作经验。他拥有内华达州大学雷诺分校电气工程专业学士(1994年)和硕士(1995年)学位, 曾发表过数篇文章。加入ADI公司之前, 他曾协助创立汽车电子和交通解决方案公司IMATS, 还担任过Interpoint公司的设计工程师。联系方式: mark.looney@analog.com。

在线支持社区

访问ADI在线支持社区, 与ADI技术专家互动。提出您的棘手设计问题、浏览常见问题解答, 或参与讨论。

ezchina.analog.com

engineerzone®
中文技术论坛

全球总部

One Technology Way
P.O. Box 9106, Norwood, MA
02062-9106 U.S.A.
Tel: (1 781) 329 4700
Fax: (1 781) 461 3113

大中华区总部

上海市浦东新区张江高科技园区
祖冲之路 2290 号展想广场 5 楼
邮编: 201203
电话: (86 21) 2320 8000
传真: (86 21) 2320 8222

深圳分公司

深圳市福田中心区
益田路与福华三路交汇处
深圳国际商会中心
4205-4210 室
邮编: 518048
电话: (86 755) 8202 3200
传真: (86 755) 8202 3222

北京分公司

北京市海淀区
上地东路 5-2 号
京蒙高科大厦 5 层
邮编: 100085
电话: (86 10) 5987 1000
传真: (86 10) 6298 3574

武汉分公司

湖北省武汉市东湖高新区
珞瑜路 889 号光谷国际广场
写字楼 B 座 2403-2405 室
邮编: 430073
电话: (86 27) 8715 9968
传真: (86 27) 8715 9931

©2015 Analog Devices, Inc. All rights reserved. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners. Ahead of What's Possible is a trademark of Analog Devices. TA13715sc-0-12/15

analog.com/cn

