

在ADIS16480中调谐扩展卡尔曼滤波器

作者: Mark Looney和Glenn Romano

简介

ADIS16480是一款MEMS惯性测量单元(IMU)，内置一个三轴加速度计、一个三轴陀螺仪、一个三轴磁力计和一个气压计。除了提供完全校准、帧同步的惯性MEMS传感器，ADIS16480还集成了一个扩展卡尔曼滤波器(EKF)，可计算动态方位角。

EKF使用陀螺仪、加速度计和磁力计所测数据估算方位角。加速度计根据地球重力测量方位角。磁力计根据地球磁场测量方位角。图1表示使用两种独立数据输入的EKF：集成陀螺仪与当前方位，由加速度计和磁力计的几何测量结合而得。卡尔曼增益级包含加权因子，在最终角度估算中决定每一因素的贡献程度。ADIS16480根据分配给每个传感器的不确定程度的协方差项实时导出加权因子。

在给定的应用环境下，性能的优化来自为传感器选择合适的协方差。选择优化的协方差值时，可能需经过反复测试、观察、分析、调整以及再测试的过程。虽然本应用笔记提供简化此过程的分析工具，但针对不同应用的观察和调整也是必须的。

ADIS16480在用户可访问的寄存器中为陀螺仪偏置、陀螺仪速率随机游动(RRW)以及加速度计和磁力计的协方差值提供了用户写入控制(见表1)。在ADIS16480中使用自适应的EKF选项时，这些寄存器可根据传感器的测量条件实时更新。

表1. ADIS16480协方差项寄存器

| 寄存器 | 地址 ¹ | 用途 |
|---------------|-----------------|------------|
| QCVR_NOIS_UPR | 0x62 | 陀螺仪噪声，高位字 |
| QCVR_NOIS_LWR | 0x60 | 陀螺仪噪声，低位字 |
| QVCR_RRW_UPR | 0x66 | 陀螺仪RRW，高位字 |
| QVCR_RRW_LWR | 0x64 | 陀螺仪RRW，低位字 |
| RCVR_ACC_UPR | 0x6E | 加速度计，高位字 |
| RCVR_ACC_LWR | 0x6C | 加速度计，低位字 |
| RCVR_MAG_UPR | 0x72 | 磁力计，高位字 |
| RCVR_MAG_LWR | 0x70 | 磁力计，低位字 |

¹ 这些寄存器均可在第3页的ADIS16480用户寄存器存储器映射中找到。访问这些地址前，先设置PAGE_ID = 0x0003 (DIN = 0x8003)。

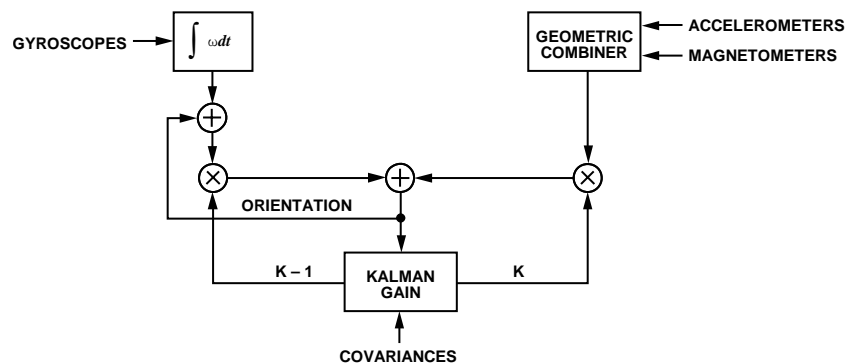


图1. ADIS16480扩展卡尔曼滤波器的信号通道

10825-001

目录

| | | | |
|-------------|---|---------------|---|
| 简介..... | 1 | 调谐指南..... | 4 |
| 修订历史..... | 2 | 针对动态性能调谐..... | 4 |
| 理论协方差值..... | 3 | 针对静态精度调谐..... | 7 |
| 自适应特性..... | 3 | 结论..... | 8 |

修订历史

2013年1月—修订版A至修订版B

| | |
|--------------|---|
| 更改表2和表3..... | 3 |
|--------------|---|

2012年12月—修订版0至修订版A

| | |
|---------------|---|
| 更改“调谐指南”..... | 4 |
|---------------|---|

2012年7月—修订版0：初始版

理论协方差值

调谐EKF通常是个迭代过程，因为某些误差源难以建立模型。开始该过程的方法之一是假设这些误差源不存在，并设置协方差值为理论噪声值和稳定值。陀螺仪噪声的协方差初始值来源于该陀螺仪的总噪声规格。将该数值的单位转换为弧度/每秒(即rad/sec)并求它的平方。

$$\sigma_{noise}^2 = \left(0.16 \times \frac{\pi}{180} \right)^2 = 7.8 \times 10^{-6} \text{ (rad/sec)}^2$$

陀螺仪的RRW协方差初始值可取自运行时的偏置稳定度(每小时6.25°)。

$$\sigma_{RRW}^2 = \left(\frac{6.25}{3600} \times \frac{\pi}{180} \right)^2 = 3.7 \times 10^{-13} \text{ (rad/sec)}^2$$

实际计算中，影响长期漂移的其他因素可能亦须纳入考量范围以优化该参数，如温度漂移、振动和其他线性加速。

加速度计和磁力计的协方差项取自它们的噪声规格，并采用LSB²作为单位。

$$\sigma_{Accel}^2 = \left(\frac{0.0015}{1.221 \times 10^{-8}} \times \frac{1}{2^{31}} \right)^2$$

$$\sigma_{Accel}^2 = 3.39 \times 10^{-9} \text{ LSB}^2$$

$$\sigma_{Mag}^2 = \left(\frac{0.00045}{0.1 \times 10^{-4}} \times \frac{1}{2^{15}} \right)^2$$

$$\sigma_{Mag}^2 = 1.98 \times 10^{-8} \text{ LSB}^2$$

表2. 理论协方差值

| | |
|-------|-----------------------|
| 陀螺仪噪声 | 7.8×10^{-6} |
| 陀螺仪漂移 | 3.7×10^{-13} |
| 加速度计 | 3.39×10^{-9} |
| 磁力计 | 1.98×10^{-8} |

ADIS16480采用的默认协方差值如表3所列。注意，由于纳入了典型、未建模误差源，表中数值大于理论值。

表3. 出厂默认协方差项

| | |
|-------|---|
| 陀螺仪噪声 | $1 \times 10^{-5} \text{ (rad/sec)}^2$ |
| 陀螺仪漂移 | $5 \times 10^{-11} \text{ (rad/sec)}^2$ |
| 加速度计 | $4 \times 10^{-9} \text{ LSB}^2$ |
| 磁力计 | $3 \times 10^{-8} \text{ LSB}^2$ |

自适应特性

ADIS16480集成了创新残差算法，可自适应调整加速度计(RCVR_ACC_xxx)和磁力计(RCVR_MAG_xxx)的协方差项。该算法实时调整RCVR_ACC和RCVR_MAG寄存器，可让用户观察环境条件变化的影响。该特性在调谐EKF的过程中极为有用。

此算法生成的协方差值通常比计算得到的理论值大。差别在于一些未建模的误差源，如传感器的失调和比例因子、对齐误差导致的交叉耦合、以及硬铁/软铁磁性失真。

片上温度补偿能尽可能降低与温度有关的误差，但残差是导致协方差值较大的另一因素。

陀螺仪的比例因子误差未建模，对协方差项会产生噪声影响。ADIS16480的EKF_CNFG[9]具有存储器淡出功能，以提供一定的补偿。设置EKF_CNFG[9] = 1 (DIN = 0x8003, 0xC102)以使能此项功能；它可向方差中添加陀螺仪速率的百分比，以便计算比例因子误差。当传感器稳定时，对陀螺仪协方差(Q)参数不作修正，但增加旋转速率会使协方差增加，从而增大潜在误差。Q值的调整对器件而言产生于内部，并且无法通过读取QCVR_NOIS寄存器而观察到。

调谐指南

如前所述，EKF算法通过对陀螺仪、加速度计和磁力计测量值的优化组合估算出ADIS16480的方位。每个传感器的协方差项决定了它们在角度估算中的影响(权重)。较小的协方差值表示该传感器噪声对其他传感器的噪声影响较小，将会提供稳定的测量值。因此，这些传感器的测量值在最终的估算结果中所占的权重就大。

协方差项使特定应用中抑制噪声影响变得可行。振动是导致出厂默认协方差项产生变化的因素之一。本例中，与RCVR_ACCL_xxx寄存器有关的数值可能会变大，降低加速度计所占权重，因为加速度计的测量值将会有与振动相关的误差。

磁场干扰和其他误差源的存在提供了协方差项的更新可改进角度精度的另一例证。本例中，增加RCVR_MAG_xxx寄存器中的数值可降低磁场误差的影响。降低加速度计和磁力计的权重所带来的折衷之一是管理陀螺仪饱和度的能力。较小的加速度计或磁力计的影响力可能导致角度跟踪的丢失以及从饱和度事件恢复缓慢。另一折衷是设备表现出了较高的稳态误差。另一方面，降低加速度计和磁力计的权重似乎可带来较少的噪声输出。

若磁场误差对于角度精度目标来说过大，则EKF_CFG[1]提供了一个控制位，可屏蔽磁力计对角度测量的影响。设置EKF_CFG[1] = 1 (DIN = 0x8003, 0x5001)以屏蔽磁力计对角度估算造成的影响。屏蔽磁力计的影响将迫使偏航角度仅依赖陀螺仪，造成的结果是角度漂移速率与陀螺仪的总偏置误差成正比。性能的优化包括在互相矛盾的系统需求之间取得正确的平衡，这通常很困难。

协方差调整对于持续环境噪声的补偿很有用，而对于管理巨大、偶发性的干扰，ACC_DIST_THR和MAG_DISTB_THR寄存器提供了用户可编程的“干扰水平”。ADIS16480持续将三个维度与反映它们在最后EKF初始化过程中状态的存储值相比较。当幅度大于或等于ACC_DIST_THR或MAG_DISTB_THR寄存器指定阈值的某一百分比时，便在干扰持续期间暂时禁用受影响的测量值。

磁力计的软铁/硬铁影响

硬铁和软铁影响是常见的磁力计测量值的误差源，并且似乎与特定应用有关。在尝试调谐EKF前，将ADIS16480绕三轴中的两轴缓慢旋转360°并测量所有三个磁力计以便表征磁力计的响应。使用这些测量值获得硬铁和软铁校正系数，并将这些数值写入SOFT_IRON_Sxx和HARD_IRON_x寄存器。

折衷空间

调谐包括在动态和静态性能之间做出折衷。针对跟踪高速移动来调谐滤波器可能会牺牲稳态精度。同样，针对稳态精度的调谐将以带宽和跟踪快速移动的能力为代价。这两者的相对重要性由应用决定。

针对动态性能调谐

针对动态条件调谐EKF的第一步是制定协方差值的原因/效果分析测试方法。该测试方法包括4个基本部分：惯性运动配置、可观察性能指标、分析技术和数据采集。下述实例展示了这些对所有应用都有用的步骤。

惯性运动配置

惯性运动配置必须包含能够反映实际应用条件的惯性条件。图2表示本例中涉及的惯性条件——利用1 Hz正弦曲线，在0至30度之间围绕z轴旋转。

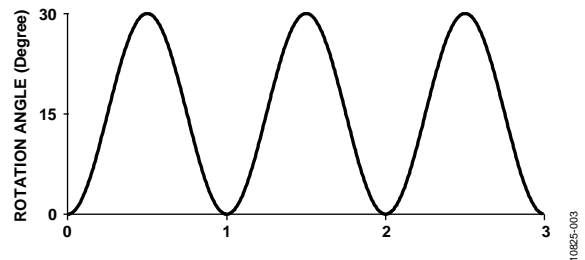


图2. 动态测试激励

相对于水平方向，该配置还使用了两个不同的方向作为旋转轴：水平(图3)和垂直(图4)。当旋转轴位于垂直方向上，加速度计的输出基本未被采用，因为输出恒定。将旋转轴设置在水平方向上，则旋转平面与磁北一致，确保陀螺仪、加速度计和磁力计均受到激励。

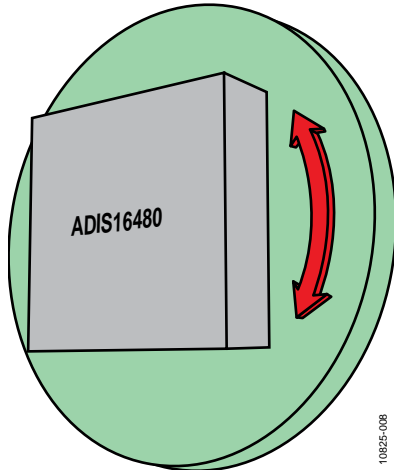


图3. 水平旋转轴

10825-008

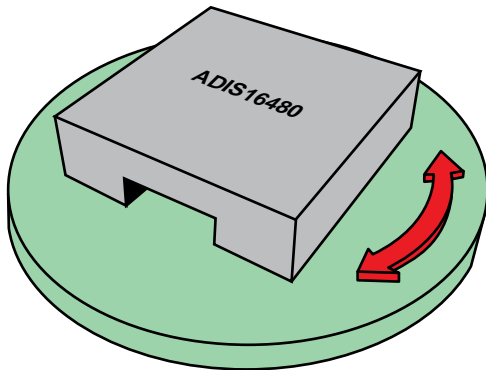


图4. 垂直旋转轴

10825-004

可观察性能指标

偏航角度输出寄存器YAW_C32_OUT为观察提供了最佳的输出变量，假定此时惯性运动配置为z轴。

分析技术

为测量信噪比(SNR)而采用的FFT分析技术可为代表惯性的偏航输出寄存器提供简单、精确的质量指标。

数据采集

ADIS16480输出数据速率为2460 (DEC_RATE = 0x0000)，且数据记录长度为35200个样本，足以代表惯性运动。

下列3D柱状图表示了一系列协方差设置下的信噪比。所有实例中，陀螺仪漂移协方差QCVR_RRW均设为10-12。至于其余三个协方差项，一个值固定在一特定图形上(在图形标题中给出)；柱高表示SNR的观察值，该值与几个独立的设置相关(在10-14至10-4之间)。它证明两个不同的旋转方向导致不同的结果。当旋转轴位于水平方向时，ADIS16480的协方差项范围较大。

AN-1157

垂直方向

下图中的信噪比(SNR)测于旋转轴为垂直方向时。

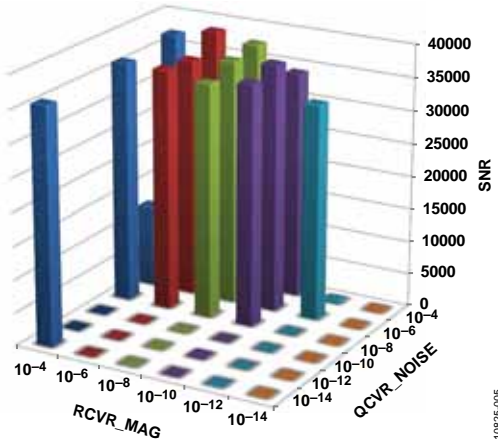


图5. 动态性能, 垂直轴, $RCVR_ACC = 1 \times 10^{-8}$

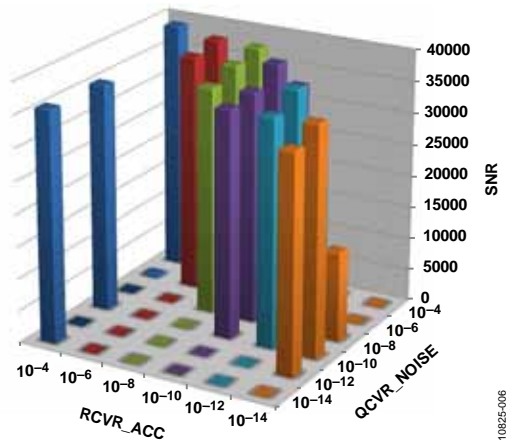


图6. 动态性能, 垂直轴, $RCVR_MAG = 1 \times 10^{-8}$

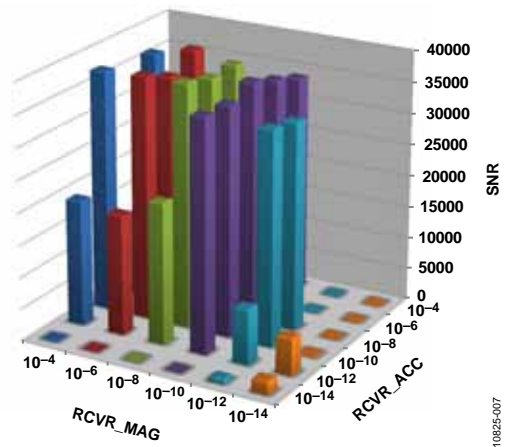


图7. 动态性能, 垂直轴, $QCVR_NOISE = 1 \times 10^{-6}$

水平方向

下图中的SNR测于旋转轴为水平方向时。

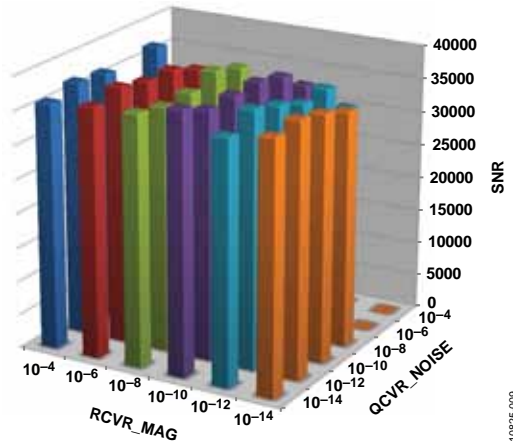


图8. 动态性能, 水平轴, $RCVR_ACC = 1 \times 10^{-8}$

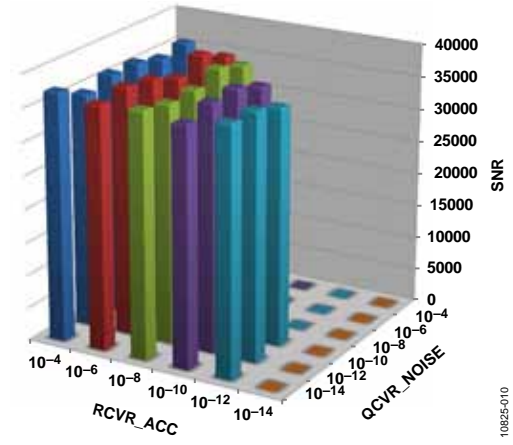


图9. 动态性能, 水平轴, $RCVR_MAG = 1 \times 10^{-8}$

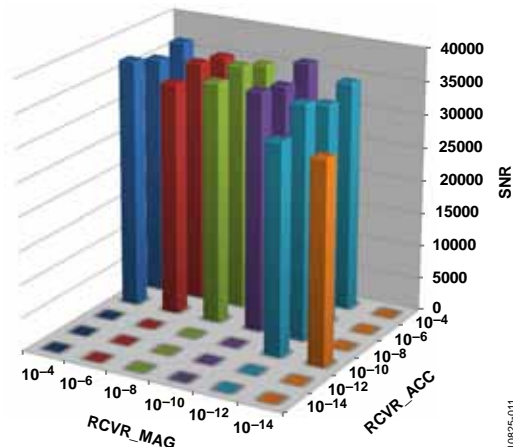


图10. 动态性能, 水平轴, $QCVR_NOISE = 1 \times 10^{-6}$

针对静态精度调谐

在检查静态精度的测试中，记录下初始方向，将传感器旋转90°，然后用初始值减去最终方向值。

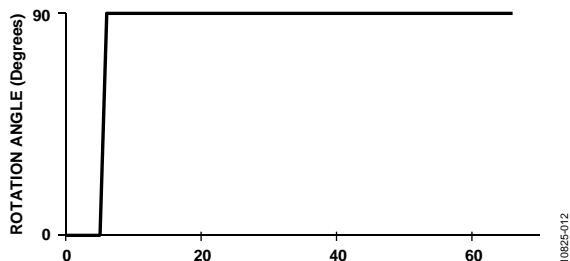


图11. 静态测试激励

和动态测试一样，陀螺仪漂移的协方差固定在 $1e-12$ ，另一个协方差固定在标称值，剩下的其余两个则在 $1e-14$ 至 $1e-4$ 的范围内变动。

垂直方向

图12至图14提供了不同协方差项的响应值，旋转轴为垂直方向。测量方向与理想的90°方向之间的差异已标明。误差封顶为1°，以避免图中到处都是更小的误差。

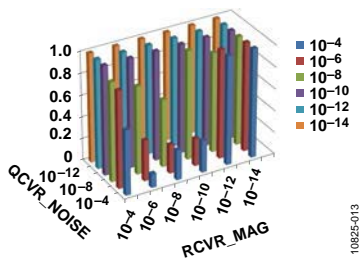


图12. 静态性能，垂直轴， $RCVR_ACC = 1 \times 10^{-8}$

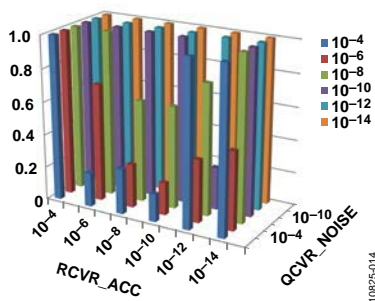


图13. 静态性能，垂直轴， $RCVR_MAG = 1 \times 10^{-8}$

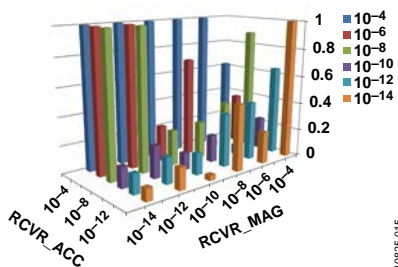


图14. 静态性能，垂直轴， $QCVR_NOISE = 1 \times 10^{-6}$

水平方向

图15至图17数据为旋转轴处于水平方向时获得。

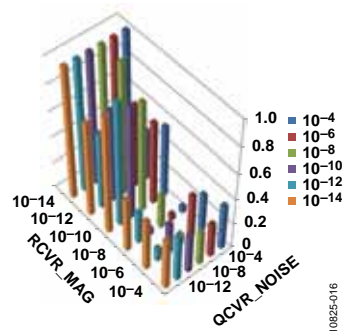


图15. 静态性能，水平轴， $RCVR_ACC = 1 \times 10^{-8}$

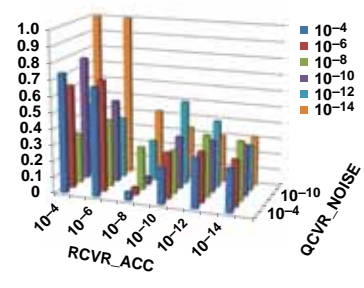


图16. 静态性能，水平轴， $RCVR_MAG = 1 \times 10^{-8}$

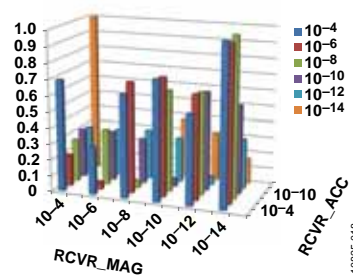


图17. 静态性能，水平轴， $QCVR_NOISE = 1 \times 10^{-6}$

结论

调谐卡尔曼滤波器以获得优化性能是一个多数情况下需要反复试错的过程。本应用笔记提供了一种有助于找到合适协方差值组合的方法。由于每个SNR读数均采用较大的步长，良好的调谐对于最终应用的改进极为关键。

虽然本文中的结论并不适用于所有应用，但可作为选择初始协方差值以供测试的起点。根据所需规格不同，应谨慎检查静态以及动态性能，然后选择优化组合。