



Is Now Part of



ON Semiconductor®

**To learn more about ON Semiconductor, please visit our website at
www.onsemi.com**

ON Semiconductor and the ON Semiconductor logo are trademarks of Semiconductor Components Industries, LLC dba ON Semiconductor or its subsidiaries in the United States and/or other countries. ON Semiconductor owns the rights to a number of patents, trademarks, copyrights, trade secrets, and other intellectual property. A listing of ON Semiconductor's product/patent coverage may be accessed at www.onsemi.com/site/pdf/Patent-Marking.pdf. ON Semiconductor reserves the right to make changes without further notice to any products herein. ON Semiconductor makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its products for any particular purpose, nor does ON Semiconductor assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation special, consequential or incidental damages. Buyer is responsible for its products and applications using ON Semiconductor products, including compliance with all laws, regulations and safety requirements or standards, regardless of any support or applications information provided by ON Semiconductor. "Typical" parameters which may be provided in ON Semiconductor data sheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "Typicals" must be validated for each customer application by customer's technical experts. ON Semiconductor does not convey any license under its patent rights nor the rights of others. ON Semiconductor products are not designed, intended, or authorized for use as a critical component in life support systems or any FDA Class 3 medical devices or medical devices with a same or similar classification in a foreign jurisdiction or any devices intended for implantation in the human body. Should Buyer purchase or use ON Semiconductor products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold ON Semiconductor and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that ON Semiconductor was negligent regarding the design or manufacture of the part. ON Semiconductor is an Equal Opportunity/Affirmative Action Employer. This literature is subject to all applicable copyright laws and is not for resale in any manner.

AN-5083

FIS1100 AttitudeEngine™—用于高准确度跟踪应用的低功耗运动协处理器

总结

FIS1100 是一款集成式 6 轴 MEMS 传感器，包括 3D 加速计，3D 陀螺仪和自定义矢量数字信号处理器 AttitudeEngine™。该器件为可选的外部 3D 磁力计提供输入，从而简化了 9 轴惯性测量系统的时间对准。AttitudeEngine 能够处理惯性数据，所需的功耗只是通用处理器内核执行同样计算所需功耗的一小部分。该解决方案允许主机处理器摆脱高速率的计算密集型运行，防止出现对高频数据中断的需要。当 FIS1100 AttitudeEngine 结合 Fairchild XKF3 “9D” 传感器融合算法运行在应用处理器或传感器中枢微处理器上时，执行精确 3D 运动跟踪所产生的功耗可低至 1 mA 或更低，这比采用通用 IMU 的传统架构产生的功耗低一个数量级。FIS1100 AttitudeEngine 及 XKF3 提供理想的架构分区，以保证针对消费电子市场的运动跟踪应用实现较高的运动跟踪准确度，方便系统集成和低功耗。与 FIS RF1100 作为主要组件 FMT 1000 系列移动跟踪模块、AttitudeEngine 是至关重要的性能，[FMT 1000 系列](#)。

该应用指南说明：

- 支持精确运动跟踪应用所需的主要要求。
- 引入 FIS1100，它是一个智能 MEMS 传感器，集成了 3D 加速计、3D 陀螺仪，可选外部 3D 磁力计的输入，以及自定义矢量数字信号处理器，称为 AttitudeEngine。
- 采用 FIS1100 AttitudeEngine 对 3D 运动跟踪应用的好处。
- 评估了结合 Fairchild 的 XKF3 传感器融合使用 FIS1100 AttitudeEngine 带来哪些改进，并从运动跟踪性能和系统功耗角度与传统架构进行了比较。

介绍

基于惯性的定向和位置跟踪早已应用几十年，应用领域从军事、航空电子设备或海上导航、工业平台稳定，到无人机控制等。在最近几年，该解决方案也在消费电子市场上受到很大关注，可用于广泛并且不断扩大的创新型应用：运动和健身跟踪器、机器人、可穿戴传感器、物联网 (IoT)、游戏和控制系统，以及行人航位推算设备只是少数几个例子。这一改革的促成因素是微机电系统 (MEMS) 设计和工艺过程的快速进步。这样，就可能在基于成本低、体积小和功率低的 MEMS 的惯性测量装置 (IMU) 中实现很高的性能，IMU 在单个封装中结合 3D 加速计和 3D 陀螺仪。

然而，为了充分开发针对消费电子市场应用基于 MEMS 的 IMU 的潜能，需要创新型系统架构和信号处理。

事实上，本应用指南中详细讨论了以较高的采样速率（至少几百 Hz 或更高）处理数据的必要性，以便支持精确的运动跟踪应用。

传统的消费电子 MEMS 运动感应解决方案只是将加速计和陀螺仪样本数据流，甚至通常都没有在时间上同步，从 IMU 传输至应用处理器 (AP) 或传感器中枢微处理器侧（主机），然后再进一步处理惯性量。然而，这种方法不能很好地处理消费电子设备通常具有的典型系统级限制和要求。这会导致性能权衡和降级，产生不良的用户体验，无法接受的高功耗，和有问题的系统集成。

为了解决这些局限性，Fairchild 开发了 FIS1100，一款智能传感器模块，它集成了 3D 加速计和 3D 陀螺仪，以及针对具体应用的矢量数字信号处理器 (DSP)，称为 AttitudeEngine™。AttitudeEngine 支持高速率惯性数据处理，所需的功耗仅为普通主机处理器执行相同计算所需功耗的一小部分。该解决方案使主机摆脱了高速率计算密集型运行，从而减少了整体系统级功耗，并且防止出现对主机高频数据中断的需要。同时，为了保证用户对最终应用的愉悦体验，还完全保持了运动数据处理的最高准确度。

AttitudeEngine 在本质上是互补的，用于配合 Fairchild XKF3 传感器融合使用 [1]。XKF3 是由 Fairchild 子公司 Xsens 设计的最优估计算法，XKF3 将公司十多年来在人体和工业运动跟踪应用方面的专长带到消费电子市场。XKF3 基于扩展卡尔曼滤波理论，融合 3D 加速计、3D 陀螺仪和（可选）3D 磁力计数据（“9D”），用于以地心地固坐标系为标准估计 3D 定位和其他参数。在结合 FIS1100 AttitudeEngine 使用时，XKF3 可在普通主机处理器上实现，以极低的更新速率运行。这样，XKF3 可以快速跟踪相对大量的状态并能自动提供几个校正参数（包括偏置误差、磁力计软硬铁效应）的统计最优估计，同时不会增加主机处理器上的功耗，也不会导致对处理性能的过高要求。

正如本应用指南中所介绍的，运行在普通主机上的 FIS1100 AttitudeEngine 与 XKF3 传感器融合算法组合代表理想的架构分区解决方案，目的是为针对消费电子市场的运动跟踪应用提供高性能、方便系统集成和低功耗。

旋转的非可换性—运动跟踪应用的含义

任何 IMU 的核心部分都是陀螺仪三联组（用于检测角速度）以及加速计三联组（用于检测加速计连接的主体的线性加速度）。然而，在运动跟踪应用中，用户通常对集成数量感兴趣：方位、速度或绑缚 IMU 主体的位置。捷联积分 (SDI) 或航位推算将是角速度和比力（加速度）融合到方位和加速度中的数学程序 [2]-[3]。该运算的结果通常由传感器融合算法以统计最优方式与其他辅助信息（如磁力计、气压计、GPS、图像、超声波等）相结合，从而（自动）校正所用的传感器并提供最优状态估计。例如，XKF3 [1] 算法融合 3D 加速计、3D 陀螺仪和（可选）3D 磁力计数据，以便提供稳定的方位跟踪。需要传感器融合步骤来纠正基本任何捷联式融合系统中都存在的漂移，否则漂移就会不断增大。

为了实现理想性能，需要进行合理的惯性数量融合。然而，将角速度和加速度融合到方位和速度中并不像听起来那么直接。原因在于 3D 旋转的非交换特性 [1]；事实上，需要计算运动的三维积分，起点是在可在空间中自由旋转的坐标系中的测得信号。这就导致，与一维信号相比，对信号处理的要求更严苛。具体来说，根据著名的奈奎斯特准则，线性空间信号需要比足够更高的大带宽和 SDI 速率。

关键的问题是，精确的方位跟踪对于速度或位置跟踪应用也同样重要。事实上，为了获得外部激励提供的比力，需要纠正加速计信号，以获得重力加速度。为此，首先采用通过陀螺仪输出融合获得的方位将测得的加速度（即传感器坐标系中的加速度）旋转到全球地心标准坐标系。只能在这一步减去重力。为了了解合理补偿对重力何等重要，注意 0.1 度的姿态误差决定估计比力中几乎 0.02 m/s^2 的偏置，在短短 10 秒后融合到大约 1 m 的位置误差（漂移）。

下一小节将通过例子进一步讨论执行 SDI 计算以便支持精确运动跟踪的高速率要求。

圆锥运动下的性能

一个众所周知的纯圆锥运动例子¹ 对于展示信号带宽与 SDI 速率与保持运动跟踪应用的准确度非常有用。该运动通常用作战术和导航级 IMU 中 SDI 算法设计规格和验证的标准测试信号，因为圆锥运动是要求最严苛的运动，而在这种情况下正常运行的 SDI 算法通常也满足不同运动中的通用性能要求。因此，圆锥信号可用于评估最坏情况下的场景。然而，需要注意该场景实际上是工业和机器人应用程序的代表，这些应用中基本上都存在因引擎和致动器产生的振动并且这些振动通常都是类似圆锥运动的形式。

¹ 注意本小节仅涉及到圆锥运动的具体情况。类似的，也可以考虑划船运动的情况。当一个陀螺仪和一个正交加速计通道检测到两个具有相同频率的异相振荡，就会发生划船运动 [4]。如果信号采样速度不够快，划船运动就会导致在第三通道上出现速度融合漂移。划船运动分析需要与圆锥运动类似的设计考虑。

在圆锥运动下，IMU 的一个轴（比如说 z - 轴）在空间中扫出一个圆锥，没有绕轴自身的任何旋转 [4]。这种情况下通过古德曼—罗宾逊定理 [5] 可以看出，由理想的陀螺仪三联组测得的 $\omega(t)$ 角速度是：

$$\omega(t) = \begin{bmatrix} \omega_x(t) \\ \omega_y(t) \\ \omega_z(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \cos(2\pi f_0 t) \\ -A \sin(2\pi f_0 t) \\ 2\pi f_0 (1 - \cos(\theta)) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\theta = \text{asin}\left(\frac{A}{2\pi f_0}\right)$$

其中， f_0 和 A 分别定义为圆锥运动频率和圆锥运动幅度。因此，陀螺仪在其传感器坐标系中测量 x 和 y 通道上的两个正弦异相振荡以及 z 通道上的恒定偏置量。为了举例说明，图 1 显示 $\omega(t)$ ，如方程式 (1) 中所示，其中 $A = 100 \text{ deg/s}$ 且 $f_0 = 20 \text{ Hz}$ 。

方程式 (1) 明显说明，若要保持准确度，需要较大的带宽 B 。事实上，若 $B < f_0$ ，则陀螺仪仅测量恒定偏置量 $\omega(t)_z = 2\pi f_0 (1 - \cos(\theta))$ 。假设 $2\pi f_0 \gg A$ （该假设通常有效—注意为了保证测量单位一致， A 表达为（弧度/秒）），对 asin 和 $\cos$ 函数使用泰勒近似，结果是： $\omega(t)_z \sim A^2/(4\pi f_0)$ 。因此，如果 $B < f_0$ ，圆锥运动漂移速度与圆锥运动幅度 A 成正比，与圆锥运动频率 f_0 成反比。例如，图 2 这种情况下产生的圆锥运动漂移比例与 A 和 f_0 的关系。

为了最小化传感器 MEMS 类的圆锥运动漂移，通常需要大约 200 Hz 的信号带宽。

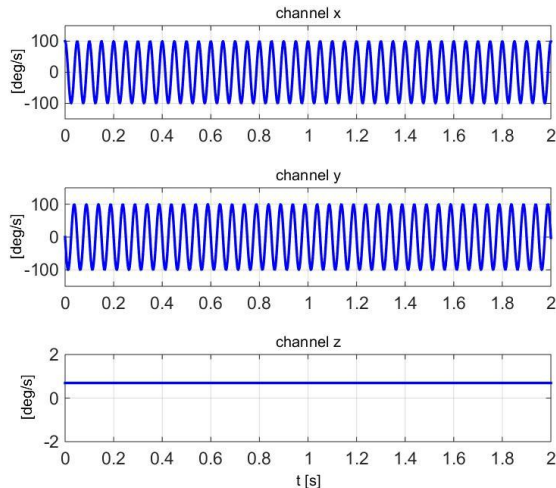


图 1. 纯圆锥运动下 $A = 100 \text{ deg/s}$ 且 $f_0 = 20 \text{ Hz}$ 时陀螺仪三联组测得的信号

为了进一步了解 SDI 速率对于保持运动跟踪准确度的重要性，图 3 显示产生的圆锥运动漂移 (deg/s) 与 SDI 频率 f_s ，其中 $A = 100 \text{ deg/s}$ 。在图表中，考虑了 $f_s > 2f_0$ 。捷联积分是基于公式通过高效准确的四元数计算的，FIS1100 AttitudeEngine 在硬件中执行相同的操作。为了保持性能，高 SDI 速率的相关性就变得很明显；甚至几百 Hz 的 SDI 速率就会导致明显的圆锥运动漂移。从图中可以看出，线性信号对 SDI 速率的要求比奈奎斯特准则要严苛得多，尤其是对于 f_0 值较低时。例如，对于 $f_0 = 5 \text{ Hz}$ ，甚至比圆锥运动频率大一个数量级的采样速率都会导致大约每分钟 5 度的定向漂移。

因此，对于传感器 MEMS 类的圆锥运动，需要大约 1 kHz 的 SDI 速率。

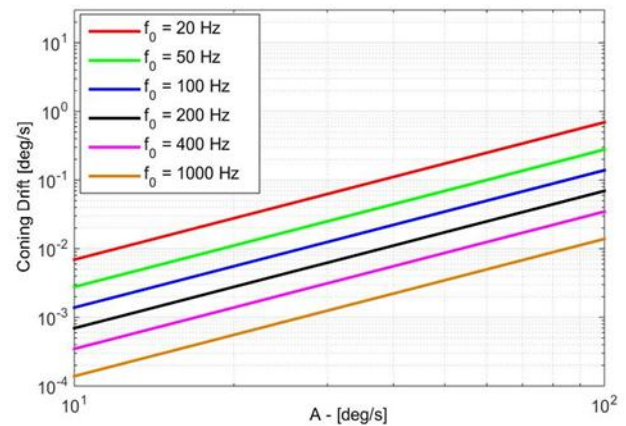


图 2. 不同圆锥运动频率下的圆锥运动漂移与圆锥运动幅度 A ；当系统带宽 B 小于 f_0 时会发生这种漂移。

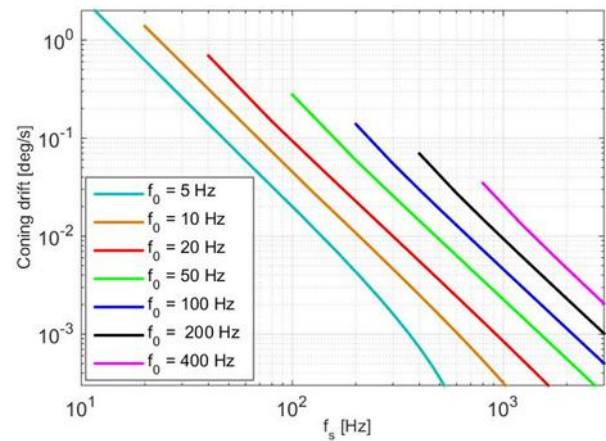


图 3. 不同圆锥运动频率下的圆锥运动漂移与 SDI 速率 f_s （注意图表中 $f_s > 2f_0$ ）。为了最小化圆锥运动下的定向漂移，需要大约 1 kHz 的 SDI 速率。

人体运动跟踪应用的性能

与前面分析的圆锥运动情况相比，人体运动跟踪应用对 SDI 的要求要低些，因为广为接受的观点是人类行为诱导动力学仅在 10 Hz（或类似的随机频率）内具有频率分量，而不是周期性单频率分量模式行为。然而，这仅在一定程度上是对的。事实上，与纯圆锥运动情况类似，人体运动跟踪应用也具有多轴异相激励。另外，人体运动可以轻松生成超过 2000 deg/s^2 的角激励，如在游戏、体育和健身运动中。

由于人体动力学的固有随机本质，提供系统化分析更困难，如前面的纯圆锥运动情况所示。因此，不同 SDI 速率的典型航位推算定向误差显示如下，从实际记录开始。图 4 显示高动态、手持式试验。可以看出在大概 10 秒钟的运动部分，角激励超过 1000 deg/s 且加速度超过 4 g 。该试验是游戏场景的代表。

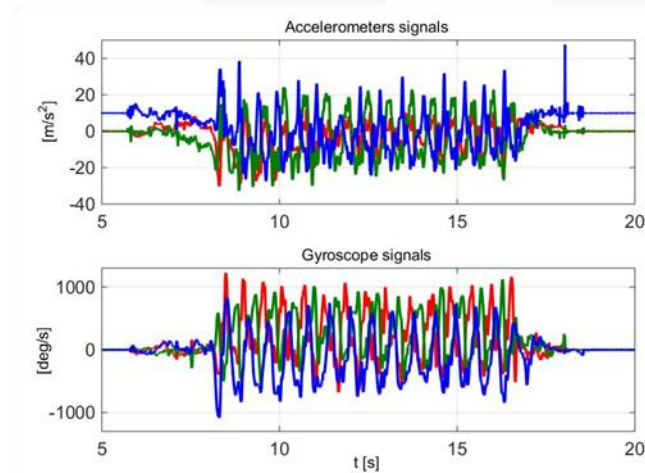


图 4. 高动态，“游戏式”手持试验中的加速计和陀螺仪。

通过每种不同速率信号抽取十分之一，评估不同 SDI 速率的航位推算误差：120 Hz、60 Hz、40 Hz、20 Hz。考虑了两种不同的处理选项：

1. 为了防止混淆，在抽取十分之一前，用带宽为 B 的低通滤波器过滤信号。
2. 总是用 50 Hz 带宽的低通滤波器过滤信号。该选项可能导致 SDI 速率不同于 120 Hz 的混淆。

这两个处理选项的结果显示在图 5 的左手侧和右手侧，提供不同情况下获得的短角³定位误差。第一个处理选项滤波带宽的具体值在图例中给出。从图 5 中可以清楚地看出，SDI 速率降低引起航位推算定向漂移。对于考虑的试验，动态过程中的漂移在 SDI 速率为 120 Hz 时大约为 5 度每分钟，并且在 SDI 速率低于 40 Hz 时漂移显著增加。很明显为了保持人体运动跟踪应用的准确度，至少需要几百 Hz 的 SDI 速率。

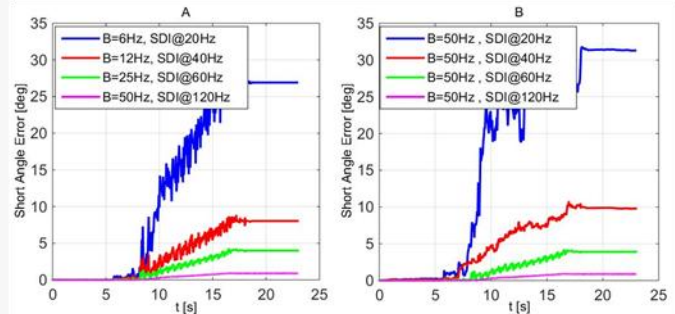


图 5. 高动态手持式试验的短角定位误差与 SDI 速率。在左手侧 (A)，过滤原始信号防止混淆。在右手侧 (B)，保持信号带宽为 50 Hz 存在混淆的可能性。这两种情况下，降低 SDI 速率会导致明显的航位推算误差，即使 $f_s = 120 \text{ Hz}$ 时也是如此。

系统架构的含义

正如上一小节详细说明的，为了保持运动跟踪应用的准确度，需要以非常高的速率执行惯性量的 SDI。事实上，为了最大程度地减少因旋转的非交换性产生的潜在误差，SDI 至少应该以 1 kHz 的速率运行。这个要求赋予系统架构选择重大的意义，尤其对于采用电池供电的消费电子应用中的 IMU 应用，如可穿戴设备、机器人、健身跟踪器、手机、游戏遥控器等，这些应用需要与通用主机处理器集成。通常来说，主机处理器忙于处理很多其他任务，或者需要尽量频繁地进入低功耗休眠状态，以节省电力。这些要求各不相同，如果不能满足，就会限制 MEMS IMU 应用于要求较低的用途如屏幕定位、计步和活动分类。

² 注意一个通道上的圆锥漂移与其余两个上的信号幅度乘积成正比。

³ 短角定向误差定义为两个定向矢量之间的空间角标准。

传统采用的解决方案只是将加速计和陀螺仪样本数据流从 IMU 侧发送至主机处理器侧，然后适当求取惯性量的捷联积分。然后，传感器融合算法使用积分值提供所需的输出。方位跟踪滤波器的架构原理图如图 6 所示。

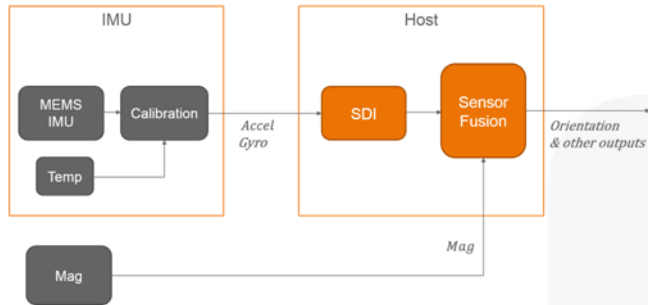


图 6. IMU—主机—传统架构融合。左侧为 IMU 加速计和陀螺仪流数据。右侧为主机及 SDI 和传感器融合功能模块。

在使用该传统架构时，需要以非常高的速率将加速计和陀螺仪信号数据流从 IMU 发送至主机处理器侧，以便保持运动跟踪准确度。然而，向主机处理器高速传输数据本身是不必要的，因为最终应用需要的实际更新速率通常是从步行导航等应用需要的几 Hz（或更低），到游戏、健身跟踪和机器人控制应用需要的几十 Hz（30、50、60 Hz）或更具挑战性应用如 VR/AR 等需要的大约 100 Hz。因此，高速发送惯性数据流的唯一理由是能够准确求取加速度和角速度的数值积分。

然而，高速传输数据流的必要性带来一个基本的缺陷，因为主机处理器需要处理非常频繁的数据中断。这会阻止主处理器尽可能频繁地进入低功率休眠模式，从而显著增加了系统整体功耗。

即使当在 IMU 侧使用 FIFO 缓冲器规避上述问题时，仍然存在几个问题：

- 需要主机处理器处理更多数据，因而会浪费计算资源和功率。
- 在无线应用中丢包的可能性很高。
- 当很多周边设备共享同一总线时，SPI/I2C 上总线争用/冲突的可能性增加。
- 需要高速串联总线模式如 SPI。
- 主机处理器上总是需要高效 DMA 支持。
- FIFO 和/或计算引入额外延迟。这对于高度实时化的应用至关重要，如越来越流行的 AR/VR 应用和机器人控制。

所有这些缺陷和局限性实际上会产生对权衡的需要，导致性能降级、不可接受的高功耗、系统集成存在问题、高成本和整体不良的用户体验。

FIS1100 AttitudeEngine™

为了解决传统架构中的上述局限性，Fairchild 采用 FIS1100 开发的解决方案可在 IMU 侧实现捷联积分算法。

当在 AttitudeEngine 模式下使用 FIS1100 时⁴，加速计和陀螺仪信号被转换到数字域，并通过大约 200 Hz 的带宽进行低通滤波。然后，AttitudeEngine 通过硬件处理以 1 kHz 的输入速率进行 SDI 计算。这就确保运动积分数字计算中产生的误差实际上对任何应用来说都是可以忽略的。

在这种模式下，FIS1100 发送编码为定位和速度增量（ Δ 量）的运动数据流，而不是传统的角速度和加速样本。将在下面章节更详细介绍，以固定的高输入速率计算的定位和速度增量总是准确的，与所选的输出速率无关。低输出速率只会导致表示运动数据的时间更粗略，但数据自身是准确的。这样，就可以根据具体应用的要求选择输出速率，而不是由执行高准确度数字合成需要驱动。

⁴ 注意 FIS1100 还提供“典型”模式，在这种模式下，加速计和陀螺仪样本数据流被直接传输至输出。本文档不对典型模式做进一步讨论。有关该模式的更多详情，请参考 FIS1100 数据表 [6]。

与传统架构相比具有的优势

与传统架构相比，使用 AttitudeEngine 模式的 FIS1100 具有下列优势：

低功耗—SDI 是高频运行。因此，在专用 ASIC 硬件实现而不是在通用主机处理器上实现是个很自然的选择，因为可以实现很大程度的定制和优化。通过允许主机处理器更频繁地进入低功耗休眠模式和减少传输数据量，能够节省更多能量。所有这些都支持针对消费电子应用实现低功耗运动处理架构。

高准确度—为了规避前面讨论过的传统 IMU—主机处理器架构集成中的传输和功率要求，通常根据具体的应用需要和权衡选择 IMU 侧的输出数据速率 (ODR)。例如，对于典型的 MEMS 消费电子级 IMU，ODR 的范围从步行导航应用的 32 Hz 到游戏和 VR/AR 应用的 1000 Hz。然而，在选择较低的 ODR 时，任何高频运动都会导致不理想的融合偏移，并导致整体性能恶化。这个问题被 FIS1100 AttitudeEngine 很自然地解决，因为组合总是以非常高的速率计算。不管选择什么样的输出数据速率，运动信息都会保持准确。

方便系统集成—AttitudeEngine 提供的一个关键优势是提供独特的系统集成灵活性，因为需要的 SDI 功能模块在 IMU 侧实现。这会显著减少对主机处理器的系统要求，从而支持运动跟踪应用。事实上，总线速度受限或者需要在多个外围设备间共享同一总线时，FIS1100 更容易与主机处理器集成。由于主机内核的通用特性，后面的情况实际很典型。类似的，考虑到需要适度的数据传输速率，主机侧没有 DMA 时的丢包鲁棒性有了很大改善。针对计算需求，也有同样的考虑。所有这些优势使得 FIS1100 适合各种（电池供电）平台的集成。

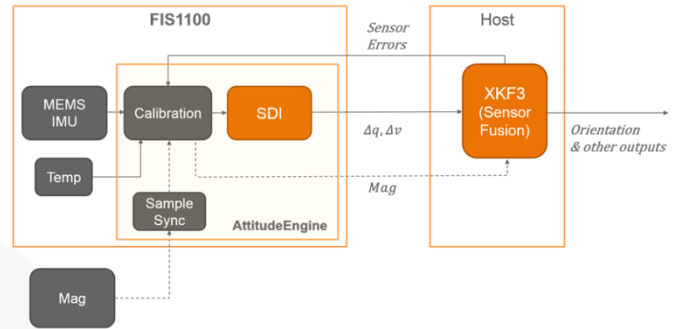


图 7. IMU—主机—创新型架构集成；FIS1100 AttitudeEngine 执行高速率 SDI 计算，并将低速率定位和速度增量数据流发送至主机侧运行的 XKF3 传感器融合算法。

FIS1100 AttitudeEngine 功能说明

图 7 显示使用 FIS1100 AttitudeEngine 实现的详细新架构分区。在图 7 中，FIS1100 配合主机侧运行的传感器融合滤波器 XKF3 工作。由于计算密集型的高速 SDI 计算是在 FIS 模块内进行的，只需要将低速率运动数据流传输至主机运行 XKF3，运动编码到融合方位增量 Δq 和速度增量 Δv 。

下面小节将更详细地介绍图 7 中显示的主要功能模块和数据流。重点放在实际包含 FIS1100 AttitudeEngine 的模块。有关 XKF3 的更多详情，请参考[1]。

SDI—SDI 模块将校正后的高速率陀螺仪和加速计样本转换为低速率方位增量和速度增量。

为了了解基本的实现原理，首先考虑与角速度和定位有关的微分方程：

$$\dot{q}(t) = q(t) \circ \frac{1}{2} \omega(t) \quad (2)$$

其中， $q(t)$ 是 t 时刻外部 t 标准坐标系中的传感器四元组方位， $\circ$ 是指四元数乘法， $\dot{\cdot}$ 是指导数运算，加粗符号表示矢量。

方程式 (2) 中的积分提供以下表达式，更新一般输出速率 $f_R = 1/T_R$ 下外部坐标系中的传感器定位：

$$q(t + T_R) = q(t) \circ \int_{\tau=t}^{t+T_R} \delta q(\tau) \circ \frac{1}{2} \omega(\tau) d\tau, \\ q(0) = [1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

其中， $\delta q(\tau)$ 表示 τ 时刻附近的初等旋转增量。

因此，如果 f_R 与 t 时刻之间的旋转增量定义如下，能够以一般输出速率 $t + T_R$ 更新定位：

$$\Delta \mathbf{q}(t + T_R) \triangleq \int_{\tau=t}^{t+T_R} \delta \mathbf{q}(\tau) * \frac{1}{2} \boldsymbol{\omega}(\tau) d\tau \quad (3)$$

计算正确。

类似的，在一般时间 t 与外部标准坐标系中的速度 $\mathbf{v}(t)$ 和传感器坐标系中的加速度 $\mathbf{a}(t)$ 相关的微分方程式是：

$$\dot{\mathbf{v}}(t) = \mathbf{R}_{G(t),S(t)} \mathbf{a}(t) + \mathbf{g} \quad (4)$$

其中， $\mathbf{R}_{G(t),S(t)}$ 是 t 时刻从外部坐标系到传感器坐标系的旋转矩阵， $\mathbf{g}$ 是外部坐标系中的地球重力矢量。方程式 (4) 求积分得到：

$$\mathbf{v}(t + T_R) = \mathbf{v}(t) + T_R \mathbf{g} + \mathbf{R}_{G(t),S(t)} \int_{\tau=t}^{t+T_R} \mathbf{R}_{S(t),S(t+\tau)} \mathbf{a}(\tau) d\tau$$

其中， $\mathbf{R}_{S(t),S(t+\tau)}$ 是表示 t 与 $t + \tau$ 时刻之间传感器旋转的矩阵。在这种情况下，如果与时刻之间的速度增量定义如下，还能以一般速率 f_R 精确 $t + T_R$ 更新速度：

$$\Delta \mathbf{v}(t + T_R) \triangleq \int_{\tau=t}^{t+T_R} \mathbf{R}_{S(t),S(t+\tau)} \mathbf{a}(\tau) d\tau \quad (5)$$

计算正确。

Fairchild 专门针对 AttitudeEngine 矢量 DSP 架构优化了积分方程式 (3) 和 (5) 中的数字实现。结果是 SDI 方程式的硬件实现，能够保持所需的完全数值准确度，但只消耗了普通主机处理器上同样实现所需的一小部分功率。AttitudeEngine 只需要大约 30 μA 就能够以 1 kHz 输入速率实现复杂的 SDI 计算；这在整体 “9D” 运动跟踪功率预算中实际上是可以忽略的。

表 1 总结了 AttitudeEngine 的主要 SDI 性能参数。AttitudeEngine 当前支持的 SDI 输出速率范围从 1 Hz 到 64 Hz；这通常足以涵盖关注的应用⁵。这可以进一步看出功耗与所选的输出速率无关。

表 1. AttitudeEngine SDI 参数

SDI 输出速率 [Hz]	1	2	4	8	16	32	64
SDI 输入速率 [Hz]	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
SDI 功耗 [μA]	30	30	30	30	30	30	30

样本同步—为了保持理想的运动跟踪准确度，需要保证来自不同传感器的数据之间具有合理的时序。为此，FIS1100 进行 3D 加速计和 3D 陀螺仪传感器的同步采样。六个并行 $\Sigma\text{-}\Delta$ ADC 确保惯性数据通道之间具有理想的时序。

如图 7 所示，FIS1100 还支持通过主 I2C 连接可选的外部磁力计。当使用额外的外部磁力计时，AttitudeEngine 确保 3D 磁力计样本与 IMU 数据在时间上精确对准。磁力计同步准确度在 1 ms 以下保持地很好。这也能够保持 XKF3 执行最优的 “9D” 传感器融合所需的准确度。有关当前支持的外部磁力计列表，请参考 FIS1100 数据表 [6]。

校正—AttitudeEngine 连续校正最常出现的传感器误差：非线性、偏置和比例因子变化，并纠正这些参数对温度的依赖性。

当使用外部磁力计时，AttitudeEngine 还要对软硬铁效应以及 IMU 和磁力计之间的错位进行补偿。

某些校正参数是在出厂时 FIS1100 校正程序中决定的恒定值。然而，为了补偿校正参数随时间的随机变化（如因老化发生的变化），以及补偿外部磁化期间可能发生的任何变化，XKF3 会随时间持续自动校正大多数误差。如图 7 所示，XKF3 周期性将这些误差的估计反馈到 FIS1100 AttitudeEngine。这样就能保证最佳性能，同时不需要任何具体的用户输入。在后台持续监控，透明跟踪所有的传感器误差，因而支持始终在线的精确运动跟踪应用。

AttitudeEngine 输出模式

AttitudeEngine 提供两种不同的输出模式，将在下面更详细的介绍。

单机模式—这是最常用的 AttitudeEngine 输出模式。在这种模式下，以预先配置的固定 ODR 传输旋转和速度增量数据流。根据具体的应用需要改变 ODR；然而，设置 ODR 后，连续输出增量之间的时间间隔就变得恒定。表 1 提供单机模式下支持的 AttitudeEngine SDI 输出速率。注意该模式在概念上类似于传统 IMU 中使用的模式，其中加速度和角速度数据流以固定的 ODR 传输。

⁵ 注意 SDI ODR 直接决定提供给应用的 XKF3 定位输出速率。XKF3 执行核心传感器融合的内部速率是固定，且独立于所选的 ODR。参考 [1]，查看有关这方面的更多详细信息。

按需运动模式—在这种运行模式下，没有预先配置的 ODR。反而，AttitudeEngine 根据方程式 (3)、(5) 即使融合定位和速度增量，直到主机向 FIS1100 发送数据请求。在收到数据请求后，AttitudeEngine 向主机发送一对增量数据流：

$$\Delta \mathbf{q}(t + T_{Req}), \Delta \mathbf{v}(t + T_{Req}) \quad (6)$$

其中， T_{Req} 是与上次收到请求之间的时间间隔，该时间间隔对不同输出样本是可变的。很明显在这种情况下，输出增量也是准确的，与 T_{Req} 具体的值无关。

按需运动运行模式对于需要与其他传感器数据精确同步惯性数据的应用而言是理想模式，其他传感器数据可能在本质上是周期性的。例如在机器人应用中，同步惯性数据和测距数据很常见。在该应用中，通常以不规则的时间间隔读取车轮角度编码器读数。另一个例子是与呈现具有可变复杂度的数字场景之间的同步，会在显示帧率上有细微差异。

按需运动模式提供的输出时间分辨率等于 SDI 输出间隔，即 1 ms。这个值足够低，能够提供与其他传感器数据或输出生成之间理想的同步水平。

因此，按需运动输出模式支持仅在应用需要的准确时间传输运动信息。这样，可以非常有效地利用系统级资源，从而允许大量数据传输和功耗节省。这提供一些基本的优势，例如在无线传感器网络中，以便最小程度地利用无线资源并允许高效集中的同步、调度和媒体访问控制。

有关按需运动模式下 FIS1100 与主机处理器之间握手机制的更多详情，参考 FIS1100 数据表 [6]。

注意已经授予了专利并且将在此处描述的很多概念 [7]-[12] 上实行。

与传统架构相比有哪些改进

本节进一步讨论 FIS1100 AttitudeEngine 在与 XKF3 结合使用时性能和功耗方面的优势。

性能改进—与传统架构相比，在发送到 AP 的相同 ODR 数据流的航位推算准确度方面评估了采用 FIS1100 AttitudeEngine 带来的性能改进。本节考虑的试验包含超过一分钟的手持式高动态运动。试验中的加速计和陀螺仪信号如图 8 所示。

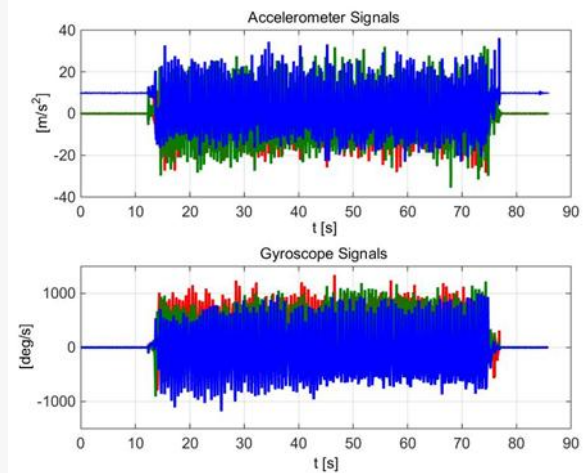


图 8. 高动态“游戏式”手持记录中记录的加速计和陀螺仪信号。

图 9 显示 FIS1100 AttitudeEngine 和传统架构中 30 秒航位推算后出现的定位误差与所选 ODR 的关系。这两种情况下的事实是计算定位积分并且高速准确地公式化 SDI 方程式。因此，图 9 仅显示在计算运动积分时因为使用低数据速率而引入的误差。

在使用 FIS1100 AttitudeEngine 时，产生的定位航位推算漂移仅为大约 0.12 度，与所选 ODR 无关。因此这种情况下超过 64 Hz 的 ODR 实际上是不需要的。相反，在使用传统架构时，甚至 250 Hz 的 ODR 也会引入大约 2 度的漂移。在这种情况下对于低于 64 Hz 的 ODR 而言，误差是很大的。

图 10 显示速度航位推算误差的同一图表⁶。这种情况下具有类似的考虑：FIS1100 仅有大约 0.25 m/s 的误差，而传统架构即使在 ODR = 125 Hz 时也不能提供任何可接受的性能。

⁶ 注意对于基于 MEMS 的传感器而言，这种动态过程中 30 秒的速度航位推算对实际应用来说是极限。

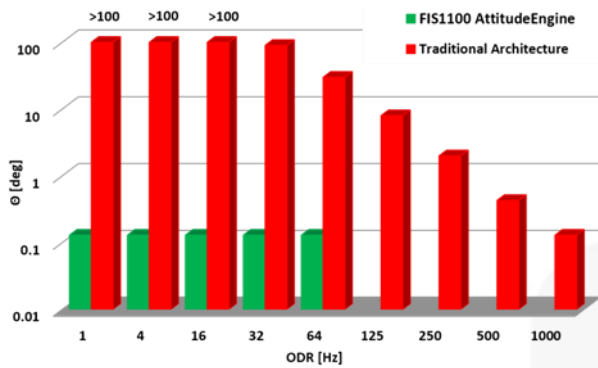


图 9. 使用传统架构和 FIS1100 AttitudeEngine 时 30s 航位推算后的短角定位误差与 ODR 的关系。注意在后面情况下，航位推算误差与 ODR 无关。

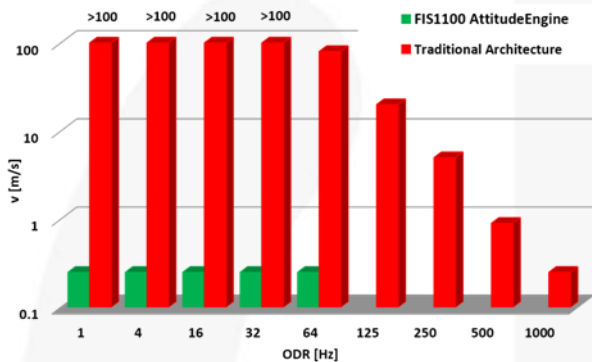


图 10. 使用传统架构和 FIS1100 AttitudeEngine 时 30s 航位推算后的速度误差指标与 ODR 的关系。注意在后面情况下，航位推算误差与 ODR 无关。

功耗改进—本节讨论使用推荐的架构分区带来的功耗方面的改进，在这种分区中，由 FIS1100 AttitudeEngine 和以较低速率运行在通用处理器上的 XKF3 执行 SDI 算法。

需要强调的是实际改进通常不仅取决于所用平台和架构分区，还取决于方位跟踪算法的具体实现。例如，在暴力破解实现中，方位跟踪滤波器可以直接以惯性数据流传输的速率运行，从而导致功耗显著增加。这种情况下在 [1] 中进行了更详细的说明，因此在下面不再进一步介绍。

相反，本节中进行的对比限制于高度优化的相同方位跟踪滤波器 XKF3 以非常低的速率 (32 Hz) 运行在通用 MCU 上。分析的两种情况是 FIS1100 AttitudeEngine 发送方位和速度增量数据流和普通 IMU 向 XKF3 发送加速计和陀螺仪样本数据流。注意在后面情况下，需要由主处理器执行 SDI 计算。

方位采用 FIS1100 AttitudeEngine 的情况，输出定位和速度增量数据流的速率为 32 Hz。请再次注意运动积分是由 AttitudeEngine 根据加速度和角速度样本以 1 kHz 的速率在内部计算的，确保了理想的准确度。

对于采用传统架构的情况，需要考虑三种不同场景：

- 以 1 kHz 的速率对加速度和角速度进行采样，并以相同的速率直接将数据流传输至 MCU。
- 以 250 Hz 的速率对加速度和角速度进行采样，并以相同的速率直接将数据流传输至 MCU。
- 以 250 Hz 的速率对加速度和角速度进行采样，并将数据缓存到 IMU FIFO 中。然后，在间歇模式下以 30 Hz 速率发送 FIFO 数据流。

注意在进行的试验中，采用传统架构时，无法以 1 kHz 对惯性数据进行采样，然后将样本缓存在 IMU FIFO 中并以 32 Hz 间歇速率传输数据流，原因是由于使用了速度相对较低的 I²C 总线会导致大量丢包。当然，这可以作为实际实施传统架构时可能出现的额外缺点。

图 11 显示四种不同情况下，以 32 Hz 输入速率在 Cortex M4F 上运行 XKF3 的功耗。可以看出，在使用 FIS1100 AttitudeEngine 时，处理器执行传感器融合消耗的功率仅为 1.0 mA。而在使用传统架构并且以 1 kHz 速率传输加速计和陀螺仪样本数据流时，MCU 消耗的功率大约为 12.6 mA，高出不止一个数量级。再次注意这只是考虑的三种传统架构能够实现同等运动跟踪性能情况中的一种。

当在传统架构中惯性数据采样速率为 250 Hz 时，若以准确度交换功耗，对于数据流直接传输至 MCU，以及首先将数据缓存在 IMU FIFO 中然后在间歇模式下以 32 Hz 发送数据流这两种情况，MCU 功耗分别是 4.05 mA 和 3.0 mA。在后面两个场景中，尽管与基于 FIS1100 AttitudeEngine 的架构相比功耗要高出很多，运动跟踪性能还是降级了，原因是实际计算捷联式积分的速率较低。

为了完整起见，在 Cortex M0+ 处理器上完成了相同的分析。结果如图 12 所示。注意在传统架构以 1 kHz 的速率传输数据流的场景中，会导致丢失样本，对跟踪性能有不良影响。

可以看出尽管数字通常会不同，但会得到相同的结论。使用 FIS1100 AttitudeEngine 执行高速率 SDI 计算，结合在通用 MCU 上以低速率运行的 XKF3 就是能够在运动跟踪中显著减少整体功耗并完全保持最高准确度的最优解决方案。

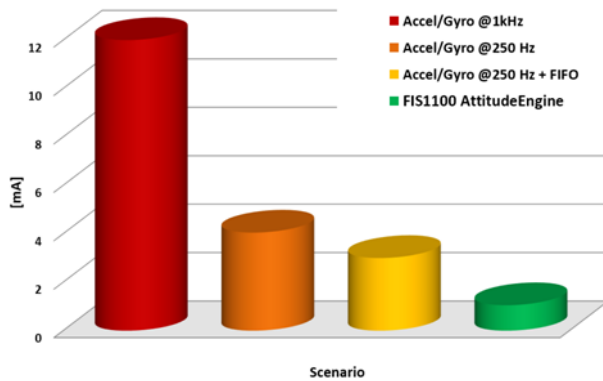


图 11. 在采用 FIS1100 AttitudeEngine 时以及在采用传统架构从 IMU 直接传输加速计和陀螺仪数据流时，在 Cortex M4F 运行 XKF3 的功耗。

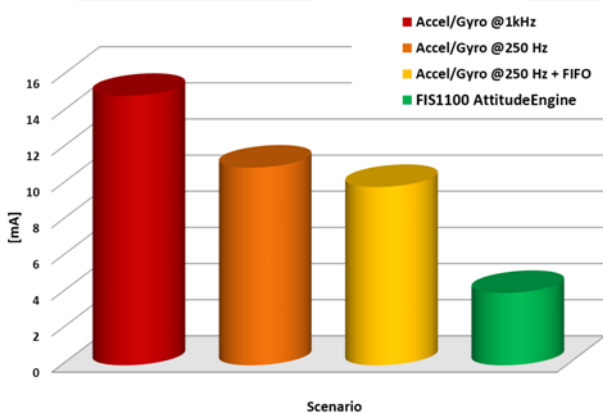


图 12. 在采用 FIS1100 AttitudeEngine 时以及在采用传统架构从通用 MCU 中直接发送加速计和陀螺仪数据时，在 Cortex M0+ 上运行 XKF3 的功耗。

结论

本文介绍了 FIS1100 AttitudeEngine 运动协处理器。AttitudeEngine 在 1 kHz 输入速率下以非常高的准确度计算捷联式运动积分，然后以较低的输出速率传输方位和速度增量数据流，消耗大约 30 μ A。该解决方案允许主机处理器摆脱高速率的计算密集型运行，防止出现对高频数据中断的需要。在 FIS1100 AttitudeEngine 结合运行在通用应用处理器或传感器中枢上的 XKF3 定位跟踪滤波器使用时，处理器功耗会显著减少：这种情况下，在 CortexM4F 处理器上执行传感器融合只需要大约 1 mA。为了在使用通用 IMU 的传统架构中实现通用的性能水平，大约需要消耗 13 mA。

因此，FIS1100 AttitudeEngine 结合 XKF3 和其他用于跟踪 3D 运动算法使用可以提供理想的架构分区，以便确保针对消费电子市场的 3D 运动跟踪应用实现高性能、方便系统集成和低功耗。

参考文献

- [1] M. Schepers、H. Luinge、G. Bellusci、P. Slycke, “XKF3: 通过陀螺仪、加速计和磁力计提供低功耗的最优 3D 定位估计”, Fairchild AN-5084 应用指南。
- [2] P.G. Savage, “捷联式惯性导航积分算法设计第 1 部分: 姿态算法”, Journal of Guidance, Control and Dynamics 期刊, 第 21 卷, 第 2 期, 19-28 页, 1998 年。
- [3] P.G. Savage, “捷联式惯性导航积分算法设计第 2 部分: 速度和位置算法”, Journal of Guidance, Control and Dynamics 期刊, 第 21 卷, 第 2 期, 208-221 页, 1998 年。
- [4] “1559-2009 - IEEE 惯性系统术语标准”, IEEE 2009 年。
- [5] L.E. Goodman、A.R. Robinson, “有限旋转对陀螺感应设备的影响”, ASME 技术论文 57-A-30, 1957 年。
- [6] “采用运动协处理器的 FIS1100 6D 惯性测量装置”, 飞兆数据表。
- [7] “支持主设备与传感器设备之间无线通信的方法和系统”, 美国专利: 8947206。
- [8] “支持主设备与传感器设备之间无线通信的方法和系统”, 欧洲专利申请 EP 2320288 A1。
- [9] “降低 SDI 的 IMU/AP 连接要求”, 美国专利: 8952785。
- [10] “降低惯性测量装置 (IMU/AP) 对捷联式惯性系统 (SDI) 的连接要求” 欧洲专利申请: EP 2645061 A2。
- [11] “压缩输送至 AP 的 IMU 数据”, 美国专利: 8981904。
- [12] “压缩输送至 AP 的 IMU 数据”, 欧洲专利申请: EP 2645110 A1。

索引词 — FIS1100, AttitudeEngine, XKF3, 运动协处理器, 运动跟踪, 捷联式积分 (SDI), 微机电系统 (MEMS), 加速计, 陀螺仪, 惯性测量装置 (IMU), 定位, 航位推算, 传感器融合。

相关数据手册

[FIS1100 产品文件夹](#)

[FMT 产品信息。](#)

作者

Giovanni Bellusci, Raymond Zandbergen, Marwan Ashkar, Per Slycke

DISCLAIMER

FAIRCHILD SEMICONDUCTOR RESERVES THE RIGHT TO MAKE CHANGES WITHOUT FURTHER NOTICE TO ANY PRODUCTS HEREIN TO IMPROVE RELIABILITY, FUNCTION, OR DESIGN. FAIRCHILD DOES NOT ASSUME ANY LIABILITY ARISING OUT OF THE APPLICATION OR USE OF ANY PRODUCT OR CIRCUIT DESCRIBED HEREIN; NEITHER DOES IT CONVEY ANY LICENSE UNDER ITS PATENT RIGHTS, NOR THE RIGHTS OF OTHERS.

LIFE SUPPORT POLICY

FAIRCHILD'S PRODUCTS ARE NOT AUTHORIZED FOR USE AS CRITICAL COMPONENTS IN LIFE SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN APPROVAL OF THE PRESIDENT OF FAIRCHILD SEMICONDUCTOR CORPORATION.

As used herein:

1. Life support devices or systems are devices or systems which, (a) are intended for surgical implant into the body, or (b) support or sustain life, or (c) whose failure to perform when properly used in accordance with instructions for use provided in the labeling, can be reasonably expected to result in significant injury to the user.
2. A critical component is any component of a life support device or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or system, or to affect its safety or effectiveness.

ON Semiconductor and  are trademarks of Semiconductor Components Industries, LLC dba ON Semiconductor or its subsidiaries in the United States and/or other countries. ON Semiconductor owns the rights to a number of patents, trademarks, copyrights, trade secrets, and other intellectual property. A listing of ON Semiconductor's product/patent coverage may be accessed at www.onsemi.com/site/pdf/Patent-Marking.pdf. ON Semiconductor reserves the right to make changes without further notice to any products herein. ON Semiconductor makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its products for any particular purpose, nor does ON Semiconductor assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation special, consequential or incidental damages. Buyer is responsible for its products and applications using ON Semiconductor products, including compliance with all laws, regulations and safety requirements or standards, regardless of any support or applications information provided by ON Semiconductor. "Typical" parameters which may be provided in ON Semiconductor data sheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "Typicals" must be validated for each customer application by customer's technical experts. ON Semiconductor does not convey any license under its patent rights nor the rights of others. ON Semiconductor products are not designed, intended, or authorized for use as a critical component in life support systems or any FDA Class 3 medical devices or medical devices with a same or similar classification in a foreign jurisdiction or any devices intended for implantation in the human body. Should Buyer purchase or use ON Semiconductor products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold ON Semiconductor and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that ON Semiconductor was negligent regarding the design or manufacture of the part. ON Semiconductor is an Equal Opportunity/Affirmative Action Employer. This literature is subject to all applicable copyright laws and is not for resale in any manner.

PUBLICATION ORDERING INFORMATION

LITERATURE FULFILLMENT:

Literature Distribution Center for ON Semiconductor
19521 E. 32nd Pkwy, Aurora, Colorado 80011 USA
Phone: 303-675-2175 or 800-344-3860 Toll Free USA/Canada
Fax: 303-675-2176 or 800-344-3867 Toll Free USA/Canada
Email: orderlit@onsemi.com

N. American Technical Support: 800-282-9855 Toll Free
USA/Canada
Europe, Middle East and Africa Technical Support:
Phone: 421 33 790 2910
Japan Customer Focus Center
Phone: 81-3-5817-1050

ON Semiconductor Website: www.onsemi.com

Order Literature: <http://www.onsemi.com/orderlit>

For additional information, please contact your local Sales Representative