

Application Brief

使用单线对以太网推动人形机器人发展



Diana Lahl, Dhane Jones

人形机器人变得越来越复杂，也越来越精确，具有更高的自由度 (DOF) 和 AI 驱动的中央计算引擎，现在能够在几毫秒内评估、适应和响应周围环境。设计这些先进的人形机器人需要一个通信系统，其可支持在众多关节控件之间进行实时高带宽数据传输，并且全部都在空间受限的轻量级框架内进行，在噪声大的工业环境中也要保持可靠且稳健。TI 单线对以太网 (SPE) PHY 可以解决这些难题并简化系统架构，以实现人形机器人的无缝运动执行。

使用 SPE 实现更简单的系统架构和更轻的重量

为了实现关节控件的高更新速率和高带宽（高达 1000Mbps），需要一种先进的实时控制系统架构。通过提供可促进多个系统组件之间的数据交换的单一高带宽通信标准，基于以太网的系统简化了架构。进一步使用 SPE (xBASE-T1) 技术（如图 1 所示）和/或菊花链拓扑可以减小线束的整体尺寸，在更大程度地减轻机器人重量方面发挥着至关重要的作用（重量是人形机器人的一个重要因素，减轻重量可以提高机动性、能源效率和平衡性能）。

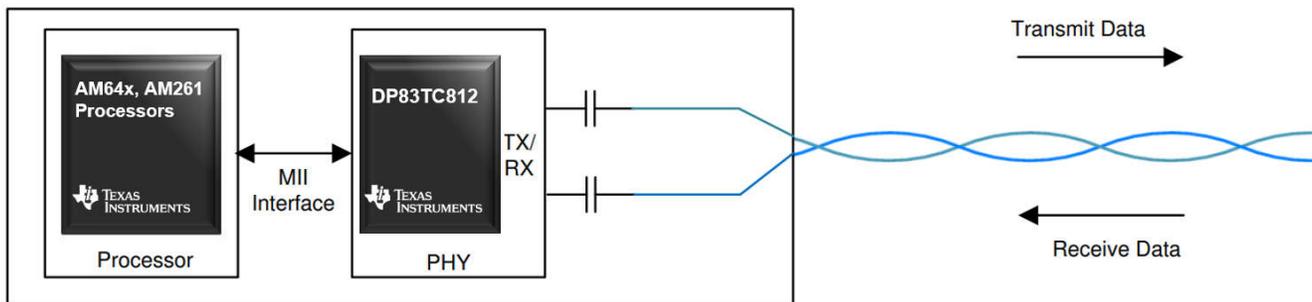


图 1. SPE 接口

使用单线对以太网 PHY 推动机器人发展

TI 的 SPE PHY 产品系列旨在与 TI 的 100BASE-T1 和 1000BASE-T1 PHY 实现封装兼容。单板设计允许在未来的开发中升级功能集或带宽，而无需改动硬件。这种方法有助于加快开发周期并缩短上市时间，从而节省研发成本。

此外，TI SPE 以太网 PHY 集成了一套先进功能，可进一步降低人形机器人设计的复杂性并提高系统性能。

精确的时间同步

利用精确的时间同步，可以增强分布式人形机器人系统，实现关节之间无缝的确定性协调。TI 的 SPE PHY (1000BASE-T1 DP83TG721S-Q1 和 100BASE-T1 DP83TC817S-Q1) 集成了 IEEE 802.1AS，可在控制器和 I/O 节点之间实现精确的网络范围时间同步和单一时间参考。这使得开发人员能够将时间戳处理从处理器卸载到 PHY 上，从而实现低至 1-15ns 的同步精度。

在 SPE PHY 中利用时间戳处理

集成 IEEE 802.1AS 的以太网 PHY 可以改善人形机器人子系统的实时决策和自适应行为。时间戳处理是在生成或接收数据或事件时使用精确的时间信息标记传入和传出数据或事件的过程。如图 2 所示，时间戳处理可以在数据路径上的多个位置实现：在以太网 PHY 的硬件中、在处理器中 MAC IP 的硬件中或在处理器的软件中。TI 的处理器和以太网 PHY 产品系列可支持全部 3 种类型的时间戳处理。时钟数据的精度和抖动可能会在毫秒到纳秒之间变

化，具体取决于时间戳与电缆的接近程度。以太网 PHY 是最靠近电缆的元件，在其中进行的时间戳处理可以提高同步精度，因为它解决了数据通过 PHY 时可能会出现的不确定延迟问题。

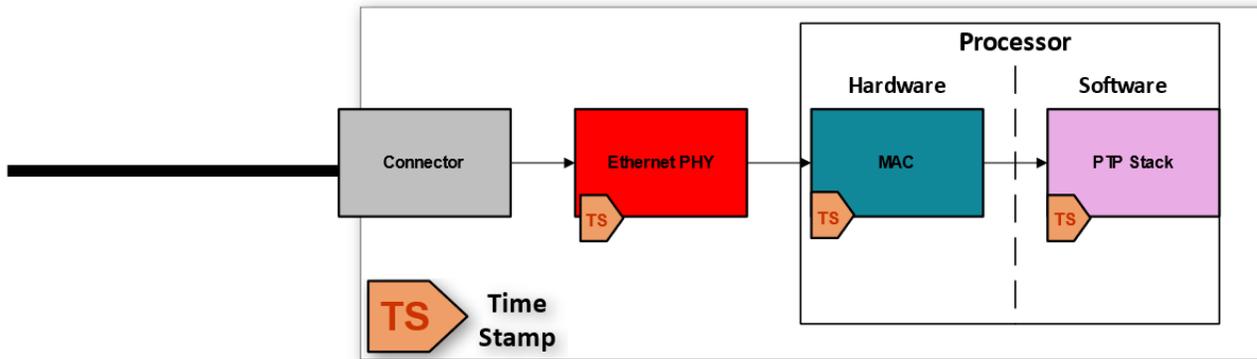


图 2. 可能的时间戳处理位置

GPIO 事件捕获或生成

精确的 GPIO 事件计时功能进一步改善了多个电机控制器之间的同步，并且有利于执行需要在子系统之间进行检测和响应协调的任务。DP83TG721S-Q1 和 DP83TC817S-Q1 都能够在 PHY 硬件（而不是控制器）中创建时间戳和事件触发器。以太网 PHY 不但可以使用集成的 IEEE 802.1AS 存储一天中的时间，而且可以使用它以纳秒级精度在其 GPIO 引脚上捕获事件（图 3）或生成事件（图 4）。生成的事件可以采用模式形式（例如 25MHz 时钟实现），也可以采用特定时间的脉冲形式。

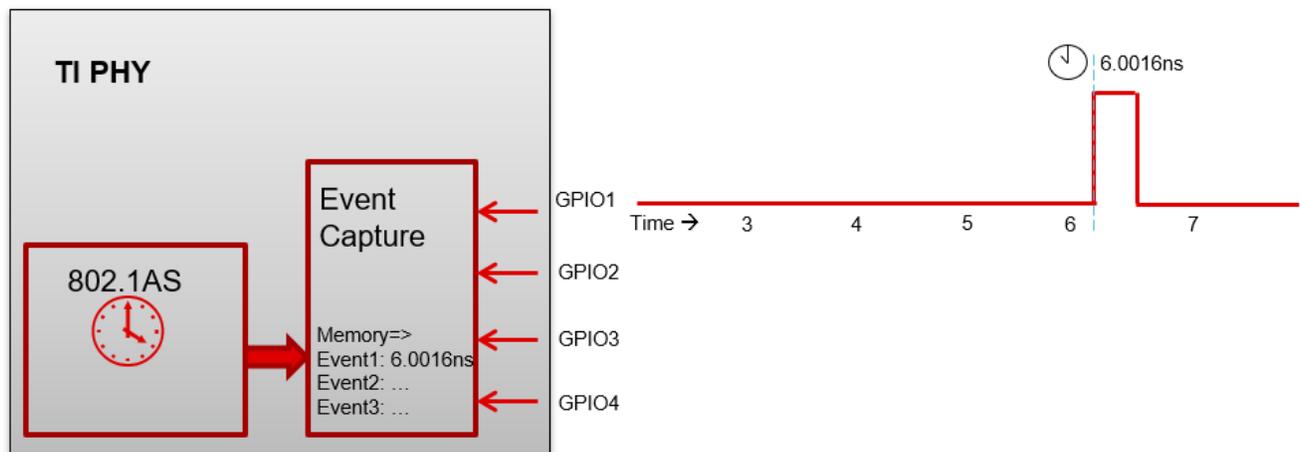


图 3. 使用 TI PHY 捕获 GPIO 事件

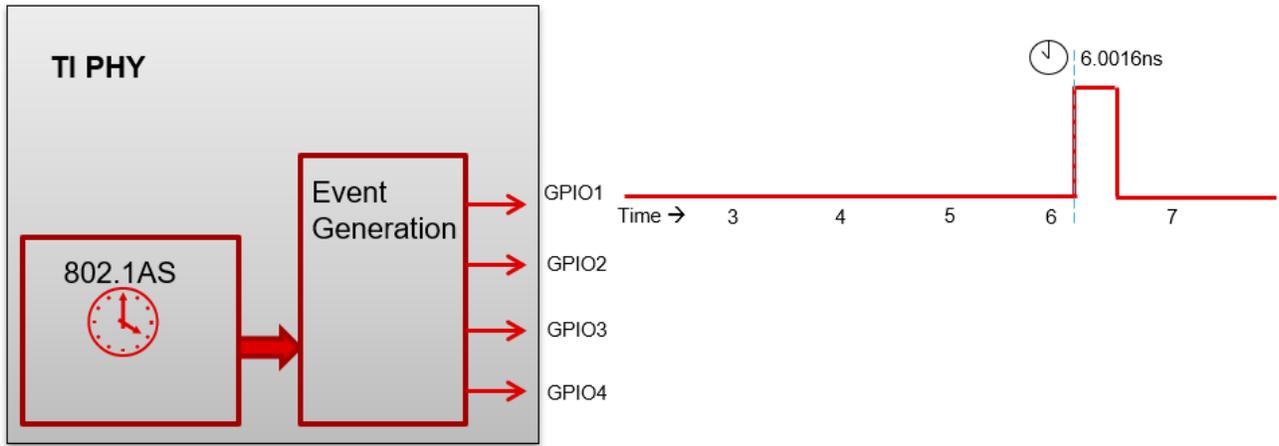


图 4. 使用 TI PHY 生成 GPIO 事件

兼具稳定性

克服 EMI 和 EMC 难题

人形机器人是一个空间受限的系统，其中包含多个电子元件、电机、传动器和电力电子器件，所有这些都可能会产生干扰。因此，管理电磁兼容性 (EMC) 至关重要，因为电磁干扰 (EMI) 可能会破坏机器人内部的传感器读数和控制信号。TI 的 100BASE-T1 和 1000BASE-T1 以太网 PHY 设计为符合 OPEN Alliance EMI/EMC 标准，可在汽车市场提供成熟的稳健性，现在，在机器人应用中至关重要。通过使用电隔离的稳健架构来应对噪声（如图 5 所示），使得 TI 器件能够符合 EMI/EMC 的工业 IEC 和 CISPR 标准。有关更多详细信息，请参阅[单线对以太网的 EMC/EMI 合规性设计](#)应用手册。

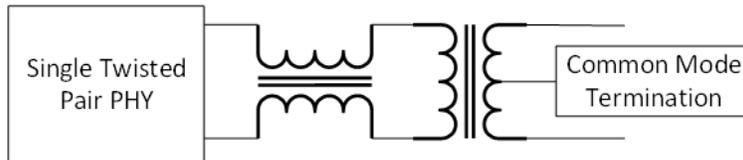


图 5. 电耦合概念

电缆诊断

在封闭的机器人系统中，由于接触内部元件/组件受到限制，排除网络故障可能是一项艰巨的任务。凭借可通过串行管理接口 (SMI) 访问的以太网 PHY 的内置电缆诊断功能（如信号质量指示器 (SQI) 和时域反射计 (TDR)），基于 SPE 的网络可以更大限度地减少排除网络问题和电缆故障所需的停机时间。

SQI 通过评估信号强度、噪声水平和传输错误来监控链路质量，以提供连接健康状况的实时状态。在人形机器人等封闭系统中，SQI 可以及早检测信号衰减或不稳定情况，以便进行主动维护，或者确定网络的哪个部分出现问题。任何给定时间的 SQI 值都存储在寄存器中，可通过简单的计算与信噪比 (SNR) 相关联。图 6 显示了 SQI 值随噪声的增加而增加的示例。

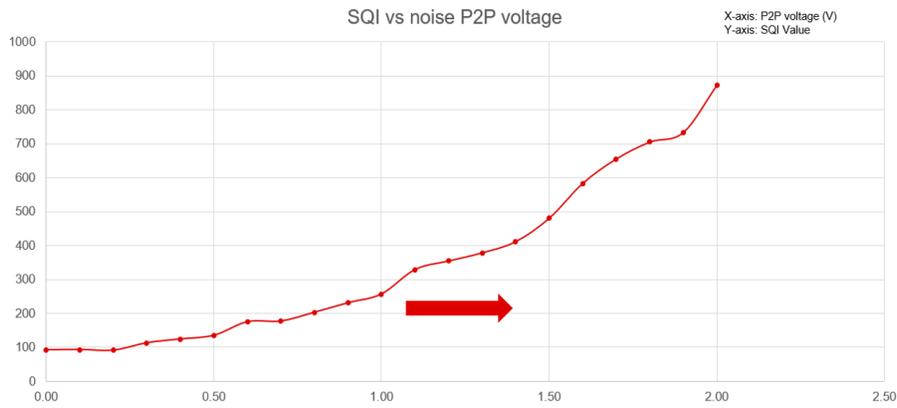


图 6. SQI 示例

TDR 可识别整个电缆长度范围内的故障（例如短路或开路），以及与 PHY 的距离。图 7 (Buntz 和 Daimler AG, 2017) 显示了可使用 TDR 功能检测到的不同类型的故障。这种诊断方法对于精确定位电缆中故障的确切位置非常有用。

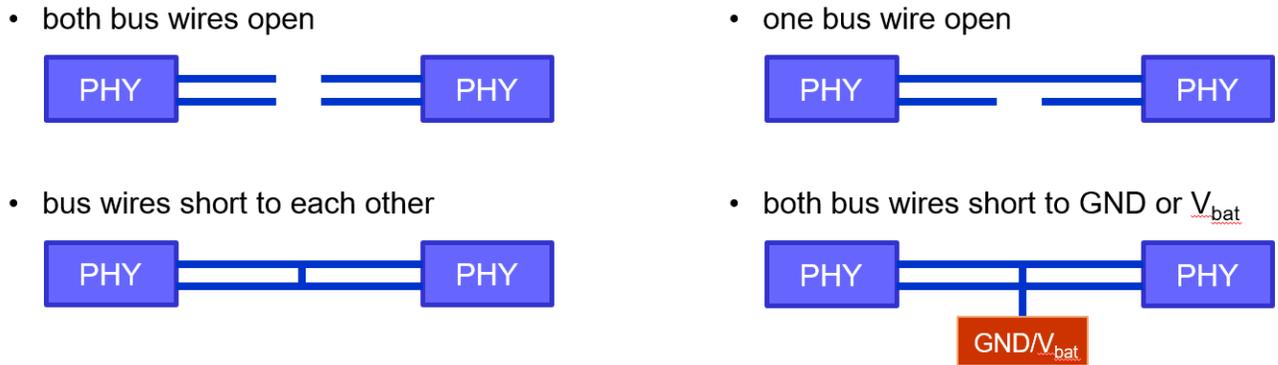


图 7. 电缆中可能出现的故障

如图 8 所示，TDR 的工作原理是向电缆中注入高能脉冲并测量反射信号（同相、异相或无脉冲）。当 PHY 之间没有有效链路时，通常会运行 TDR 测试来查找根本原因。

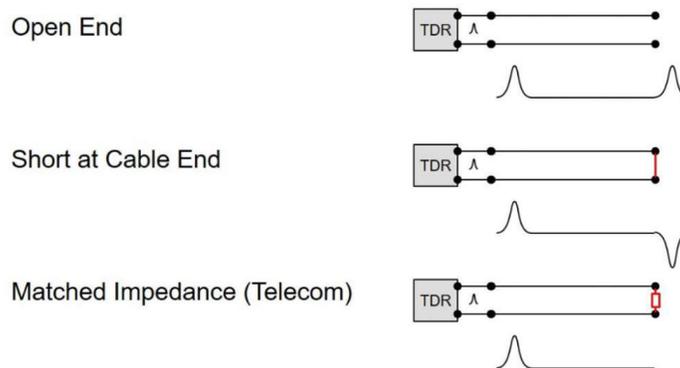


图 8. TDR 概念

在人形机器人中使用时，这些强大且高效的故障隔离工具可以提高整体系统可靠性并延长正常运行时间。

系统实现

TI 的应用特定 MCU (ASM) (例如 [C2000 系列](#) 和 [基于 Arm 的 MCU 产品系列](#)) 与多种实时以太网通信协议兼容，也可以用于标准以太网技术。此外，TI 开发的 [SORTE](#) 协议可以实现 $4\ \mu\text{s}$ 的周期时间，与基于 Arm 的 MCU 系列兼容，适用于需要更高吞吐量并实施 [SPE](#) 的应用。有关更多详细信息，请参阅 [支持 PRU-ICSS 的简单开放实时以太网 \(SORTE\) 器件](#) 参考设计。设计功能安全型以太网 PHY 并与第三方合作认证 MCU 软件栈，可确保满足机器人系统内部的功能安全要求。

在人形机器人中，[SPE](#) 用于点对点或菊花链配置，以连接用于在各种子系统之间协调运动的电机控制器。通常采用基于网关的架构来管理多个控制器和电机子系统。借助 [ASM + DP83TC812S-Q1 \(100BASE-T1 SPE PHY\)](#) 评估模块，TI 展示了多节点实时系统如何实现 [60ns 抖动性能](#)，从而实现确定性且可预测的系统行为。有关测试设置的更多信息，请联系 TI。

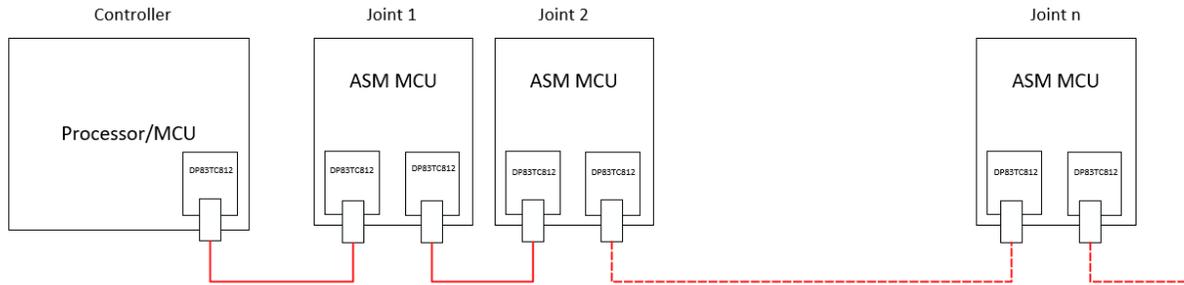


图 9. 特定于应用的 MCU 和 100BASE-T1 SPE PHY 评估模块

总结

[SPE](#) 技术在推动人形机器人发展方面发挥着变革性的作用，并通过解决受限空间中的高带宽实时通信、精确的时间同步和 [EMI/EMC](#) 噪声稳健性等关键设计难题，为未来的可扩展性铺平道路。通过集成 [IEEE 802.1AS](#) 和 [GPIO](#) 事件触发器等功能，单对以太网可实现最准确的系统反应和响应。基于这些功能，TI 高度集成的 MCU 产品系列经过优化，可与 TI 以太网 PHY 驱动器无缝配合使用，提供兼容性并简化系统开发，以满足现代人形机器人的高性能需求。

其他资源

请参阅以下出版物，详细了解有关使用单线对以太网进行机器人开发的 TI 资源。

- [DP83TC812-IND-SPE 子卡](#)
- [DP83TG720-IND-SPE-EVM 子卡](#)
- [适用于单线对以太网，符合 EMC/EMI 标准的设计](#)
- [支持 PRU-ICSS 的简单开放实时以太网 \(SORTE\) 器件](#)
- [如何以及为何要在工业机器人环境中使用单对双绞线以太网 \(SPE\)](#)

参考资料

[适用于汽车级以太网 PHY 的先进诊断功能](#)，Buntz, S. 和 Daimler AG.(2017).

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他功能安全、信息安全、监管或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司