



## 摘要

太空飞行系统在过去的60年里经历了快速的发展。从军事，到气象，到地球观测，再到电信（特别是随着5G网络的全球发展），一个技术问题贯穿始终——如何选择和实现一款快速、可靠的宇航级微处理器。其基本要求包括计算能力/速度、尺寸、重量、功耗和成本，以满足耐辐射太空/卫星发展的挑战和适应性。未来最先进的密集计算需要下一代的COTS(商用货架产品)宇航级耐辐射处理器，而Teledyne e2v的“LS1046-Space”四核ARM® Cortex®-A72微处理器将为未来几十年的太空/卫星发展的密集计算需求带来革命性的变化。NXP QorIQ® LS1046的GHz级高性能数据处理能力（30K DMIPS@1.8GHz）、天然高速接口和便利的软件编程（和重配置能力），以及Teledyne e2v经过验证的耐辐射技术，使其成为用于智能密集计算太空/卫星平台的最合适的器件。

## 传统太空与新太空：性能和实用性的最前沿

“新太空”指的是最近正在进行的太空发展的商业化。太空/卫星的研发团队必须选择和实现耐辐射电子器件，并结合最新的最先进的COTS技术，以在性能和实用性之间获得平衡。在消费电子产品（游戏、手机、可穿戴设备和物联网）快速崛起之前，政府/军用电子占半导体工业产出的很大比例。这导致军事和航天机构对正在开发的新产品的类型和制造工艺有很大的影响。现在，这种情况已不复存在，因为军事和航天市场的规模（与商业市场相比）并不大，不能吸引半导体供应商的大量投资。这使得宇航/卫星的研发团队必须测试和筛选之前作为COTS集成电路开发的器件，并用于宇航项目中。

宇航/卫星的发展包含两种基本的设计方法：

1. 传统: 使用故障率非常低、价格高昂的防辐射（rad-hard）的专用半导体，这些器件通常没有使用最新的技术
2. 新太空: 更关注保证任务功能，愿意使用耐辐射（rad-tol）的COTS器件，这些器件使用最新的技术，性能卓越



鉴于绝大多数的新太空卫星都在近地轨道（LEO）上运行，其辐射环境不会非常极端，出现灾难性辐射故障的风险也较低（LEO是距地球300km到1000km之间的轨道）。因此，这两种设计方法（传统和新太空）开始融合，使太空/卫星的开发除了传统的防辐射、密封陶瓷封装之外，开始接受一些耐辐射、非密封的有机封装产品。在过去的几十年里，在传统防辐射器件成本上升的背后有很多推动因素：

1. 防辐射设计（包括SOI工艺等）
2. 点屏蔽
3. 错误纠正码（ECC）存储器
4. 三模冗余（TMR）等

近年来，人们也在努力通过使用创新的防辐射技术、大批量的商业晶圆加工以及诸如ARM微处理器（例如：LS1046-Space），降低传统防辐射器件的成本。这些可被用于密集计算的耐辐射平台系统。最先进的计算能力和耐辐射的可靠性促进传统太空开发与新太空开发的融合（见下面的图1）。

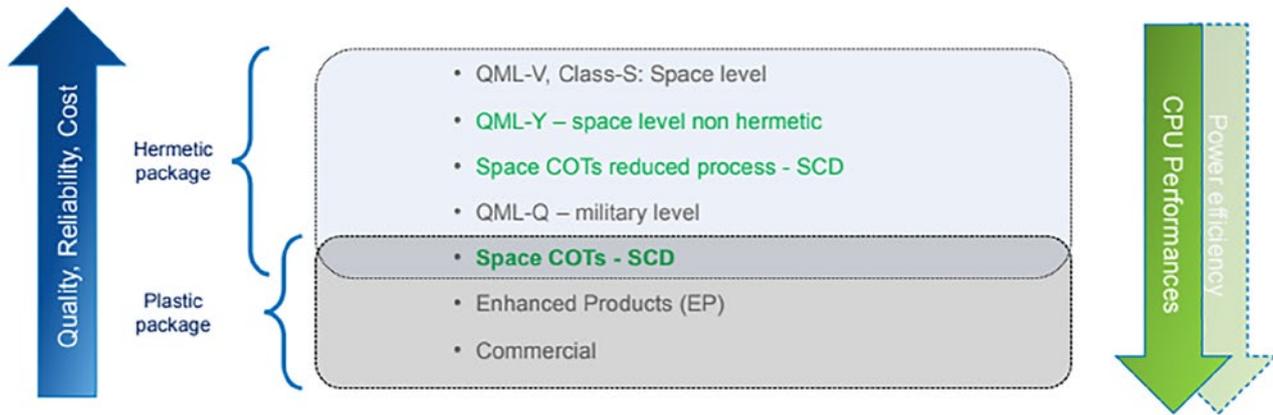


图 1 - 随着质量、可靠性和成本的上升（从塑料到陶瓷封装），CPU的性能显著下降。交叉点是宇航COTS-SCD。

当然，影响宇航电子系统的总体成本和可靠性的另一个主要因素是软件。若能使用最新的商业软件开发工具，将对开发宇航/卫星平台带来极大的好处。在创建并验证了可靠的软件模块之后，若能重用这些模块，也会非常有利于开发。特别是新太空领域，已经显露出一种使用软件可编程架构的趋势，这种架构可以非常迅速地开发、调整和重用。这减少了产品的开发时间，并通过重用已知良好的软件模块提高了可靠性。

卫星的研发也可按照小卫星和大卫星分为两类。随着技术的进步，小卫星为太空服务和应用提供了一个低成本的框架，其更轻的重量便于发射，设计成本低廉，允许将任务分解。小卫星是在很短的时间内利用最先进的COTS技术建造的，可实现复杂的功能，同时减小对复杂机制和可部署结构的依赖。

立方体卫星的发展体现了太空商业化的明显特征。它的主要目的是为小型卫星定义一个标准的机械接口和部署系统。立方体卫星(1U)的基本结构是一个10cm宽、质量可达1.3kg的立方体，可以自主工作。因此，更大尺寸（10x10x20cm, 10x10x30cm, 10x20x30cm, 20x20x30cm）的立方体卫星（2U, 3U, 6U, 12U）可以采用类似的结构实现。这些小卫星的研发成本很低，足以吸引越来越多的客户的兴趣，包括宇航局、新太空私营公司和研究所。

目前，新太空的设计方法的趋势是将立方体卫星用于低成本的宇航服务和任务。相对于载荷，立方体卫星可以执行的任务范围是一个重要的问题。立方体卫星在重量和体积方面有严格的限制。因此，如何改进传统的载荷，使其可以被集成在立方体卫星中，是一个很大的挑战。在讨论立方体卫星的载荷适配问题时，必须考虑下面的两个关键因素：

1. 电子小型化: 用较少的微处理器满足整个系统的计算要求，同时功耗低、重量轻
2. 成本: 建造和发射多颗立方体卫星比建造带有冗余平台的单一载荷大空间架构（LSS）便宜



## 实现密集计算太空/卫星平台和服务

当今全球驱动的经济和环境市场对密集计算太空/卫星平台和服务要求更高的自主性和更高的定位精度。这需要耐辐射密集计算微处理器和防辐射微控制器（图2），以及可用的人工智能(AI)和机器语言(ML)软件。此外，对小型彗星和小行星的高精度空间定位，月球和行星的进入、降落和着陆（EDL），以及与合作和非合作目标的会和和接近操作（RPO）都需要基于视觉的软件和硬件系统提供的传感和感知能力。如前所述，之前这类技术几乎完全是采用“传统方法”开发的。但是现在，新太空/私营公司也在积极推动基于视觉的技术的发展，如自主卫星服务、登月、基于视觉的AI和机器学习。

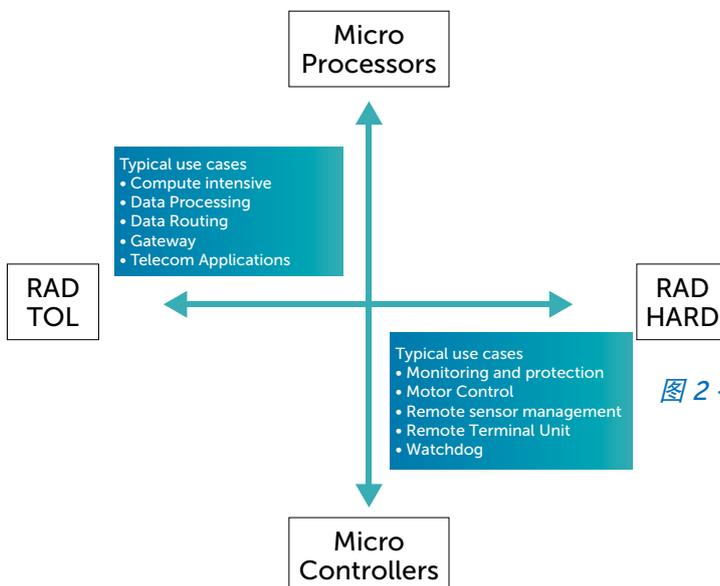


图2 - 密集计算应用（电信、数据处理等）趋于使用耐辐射微处理器 vs 低计算应用使用防辐射微控制器

随着人工智能(AI)和机器语言(ML)软件的开发越来越容易，能够满足必要的密集计算负载需要的可靠的耐辐射微处理器(LS1046-Space)变得必不可少。单个智能密集计算卫星平台也可成为新的太空星座（或卫星群、卫星簇）的一个组件。传统和新太空的设计方法不断提出分布式架构，使宇航产业发生了巨大的变化。

在卫星群和卫星簇中实现的分布式宇航系统(DSS)，将提升可重新配置的能力，提高灵活度、升级能力、响应度，并适应结构和功能的变化。基于小航天器的大卫星群可在任务运行的时候升级或替换有缺陷的部件，增强任务的自主性。卫星群和卫星簇的DSS包含一系列自主卫星，这些卫星的任务相同，并需要通过通信和协作来实现这个任务。在卫星簇中，卫星以紧密的编队运行，人们需要精确地观察和控制卫星的位置和姿态，以协调它们的行动。

除了卫星网络自动化（卫星群和卫星簇星座）之外，由于全球移动设备和无线接入的应用，即将到来的综合5G卫星网络也将在规模和复杂度方面显著增加。在大多数情况下，由于复杂的环境和太多的不确定性，很难找到合适的陆地-卫星网络管理模型。对于这样的开发，研发快速、高质量的分析模型并不总是可行的选择。因此，随着“传统的”网络管理的测试和验证方法的复杂性和可靠性的要求不断提高，研发工作将是一件具有挑战性、耗时并耗资的工作。网络运营商越来越不愿意在未测试/未优化的情况下部署复杂的卫星电信网络。而具有密集计算能力、自我优化和自我组织能力，采用AI和ML技术的智能卫星，非常适合这种复杂的应用。



## 电信、数据采集/服务和地球观测

卫星电信正在进行创新发展, 在新星座类型、星上处理能力、非地面网络和天基数据采集/处理等领域发展迅速。一些最有前途的应用正在开发中: 5G集成、空间通信、地球观测、航空和海洋跟踪和通信。此外, 基于互联网的应用也正在开发中, 其更关注用于数据服务(包括宽带数据)的航天级系统的设计。数据采集和服务通常用来:

1. 以流媒体代替线性媒体广播
2. 迫切需要将宽带覆盖扩展到服务不足的地区(例如发展中国家、航空/海洋、农村等)

此外, 5G集成的一个重要里程碑是多种有线和无线技术的融合。在这方面, 卫星电信的发展使得利用智能/自适应卫星核心密集计算微处理器, 针对特定应用的集成变为可能。



新星座配置(传统的GEO卫星)主要用于卫星通信, 因为其可避免终端和卫星收发机之间的快速移动, 并允许使用单个卫星进行广泛覆盖。人们也专门开发了多波束卫星系统, 以便在覆盖区域里实现有效的频率复用和高吞吐量宽带速率, 类似于地面蜂窝网络。此外, 由于先进的通信技术和低发射成本的驱动, 新星座配置也在开发中。在这个方面, 人们有很大的兴趣研发大型LEO星座, 以提供低延迟的大吞吐量宽带服务。

星上处理能力一直是高级卫星电信发展的瓶颈。大多数的卫星作为中继运行, 主要用于转换、放大和转发通信信号, 因此星载微处理器需要高速DMIPS处理能力。由于卫星进入轨道后无法修复或更换, 星载微处理器和相应的技术必须是快速、超可靠和耐辐射的。最近的计算效率技术的发展以及新的数字处理器件(如Teledyne e2v的LS1046-Space四核ARM® Cortex®-A72微处理器)允许增强的星上处理, 可用于创新的通信技术, 如灵活路由/信道化、波束形成、自由空间光学甚至是信号再生。LS1046-Space的四核架构采用3路无序解码、Speculative issue和超标量管线技术。此外, 使用可用的ARM软件模块, LS1046-Space能够完全满足星上电信的处理的需求, 也支持在卫星生命周期里升级。



在地面物联网机器/传感通信方面, 尽管该技术采用了低成本的复杂传感器/执行器, 全球传感器的绝对数量将产生可观的通信流量, 从而对未来的空间通信网络产生巨大影响。因此, 未来的卫星需要通过回程技术卸载地面网络的工作, 或仅在地面网络无法达到的时候保证服务的连续性。这个特殊的应用可根据卫星支持的项目和物联网传感器在地面上的分布方式来分类。例如: “广域”物联网服务分布在广阔的区域, 并由中央服务器控制汇报信息。卫星可发挥“广域”作用的典型应用包括:

1. 能源: 对石油/天然气基础设施(如管道状态)的关键监视
2. 交通: 车队管理、资产跟踪、数字标牌、远程道路警报
3. 农业: 牲畜管理、养殖
4. 本地物联网服务: 这类应用中的物联网设备用于采集本地数据并报告给中央服务器。典型的应用包括智能电网子系统(高级计量)或车载移动平台服务(如货轮、卡车或火车上的集装箱)
5. 航空和海事跟踪与通信: 这些系统通常和其他类型的设备对设备(D2D)通信和物联网有相似之处。这些相似之处包括低数据率、通信的偶发性和协议的简单性。



## 空间防御和网络安全

世界各地的国防部和国防机构都从传统和新太空的商业卫星的发展中受益。这些机构已经发现使用商业卫星“托管”他们的传感器和/或通信包可以更快、更经济地实现在轨能力。通过与商业公司分担开发、发射和地面系统的费用，能大大降低成本。使用托管的载荷也可帮助促进在轨的“载荷扩散”，使对手难以摧毁整个系统。随着商业电信卫星数量的迅速增加，国防机构能够开发用于空中和海上的防空应用的互联网战术网络。

“托管”背后的想法是简单地利用正在开发的商业通信卫星星座，以降低国防成本，并提高可靠性和数据吞吐量。例如，在这一领域的许多核心项目中，国防机构正在开发利用持续可用的大带宽、超视距通信技术，在各种固定和移动的操作位置之间无缝转移和共享数据的能力。这种新能力被称作“路径无关通信”，因为它使军事用户能够可靠地与世界上的任何地点通信，无需特别规定使用通讯网络的某个节点。由于以商业卫星为基础的商业空间互联网的不断发展，研发路径无关的通信系统变为可能。如前所述，商业宇航/卫星公司计划建立由数百至数千颗卫星组成的太空互联网星座，从而促进全球互联网服务的发展。随着宇航发展的技术和成本障碍逐渐减少，更多的国防机构和商业公司在卫星建设、太空发射、太空探索和载人航天方面广泛合作。虽然这些进步创造了新的机会，但是空间服务也显现了新的风险。某些国防机构在了解到太空行动的优势后，转而发展威胁其他国防机构利用太空的能力。这种能力包括太空行动和反太空系统，如干扰和网络空间的能力等。在国防和网络安全方面，NSA的一个例子是机密行动的商业解决方案（CSfC）。CSfC允许开发人员在如何设计和组织机密/敏感数据方面具有更大的灵活性，同时依然保持较高的IT安全标准。与强制使用政府现货(GOTS)设备不同，CSfC使开发者能够利用商用货架产品(COTS)和微处理器构建替代的解决方案，从而为网络安全提供更大的技术灵活性（如Teledyne e2v的LS1046-Space四核ARM® Cortex®-A72微处理器）。CSfC解决方案必须符合一套严格的安全要求，例如，希望发送和接收移动数据（包括语音和视频电话）的用户需要使用双VPN隧道加密数据。通过CSfC构建的双VPN隧道将快速创建解决方案，并具有更强的计算能力和更高的可靠性。

## 空间级应用的人工智能和机器学习

面对日益复杂、变化的环境，为了适应不断变化的系统需求，太空/卫星网络继续朝着自动化和自主运行的方向发展。系统内部对“智能”和“密集计算”的需求也在呈指数级增长。下面是关于系统级智能的设计和发展的的一些基本术语：

1. AI: 人工智能。计算机执行需要人类智能的任务。
2. ML: 机器学习。一种AI的应用程序，提供输入以自动训练计算机模型如何工作。学习通常是通过一个“训练”模型的应用来监管的，被称作“推理”。利用群集分析，学习也可在无监管的情况下进行。
3. NN: 神经网络。一类ML算法，既可以是CNN(卷积)，也可以是RNN(递归)。
4. DL: 深度学习。使用大神经网络的ML。
5. CV: 计算机视觉。计算机中用于感知图像的技术。

根据以上定义，AI和CV之间的层级结构是显而易见的。密集计算“并行”处理，与“分层”处理，都是微处理器和软件所需要的。所需的软件算法在开发完成后，将在产品硬件上验证和实现。这一过程由于需要优化星上处理资源而变得复杂，而星上处理资源又受到能够用于恶劣太空辐射环境下的密集计算硬件的可用性的限制。作为这种优化的一部分，部分算法通常分布于FPGA和各种计算机处理器之间。划分这些功能增加了设计的复杂度和所需的工程“模块”的数量。



航天工业已经注意到了这些问题。虽然用于计算机视觉的人工智能和机器学习的天基部署还处于发展阶段，各个组织已经在地面部分的生产系统中采用了机器学习技术。最初的主要发展是地基航天器健康监测和地理空间分析。为了降低运营成本，大型的卫星运营商一直致力于推动将机器学习用于飞行器的健康监测。这些运营商可以从一个控制中心监测多个卫星。如有需要，工程师能对错误和故障做出反应。工程师负责监测卫星的健康状况，并可以借助机器学习的帮助进行趋势分析。通过使用机器学习模型来补充，而不是取代控制中心里负责根据新信息采取行动的工程师，可保证低风险水平。运营商在数据中心处理的航天器遥测数据可用于训练算法，在某些情况下，这种算法能够先于人类分析出发展的趋势，减少了实时遥测数据对人眼的需求。不断发展的技术和逐步积累的知识正在提高航天产业对机器学习的接收程度，并可能用于未来的高度自主航天器的机器学习。

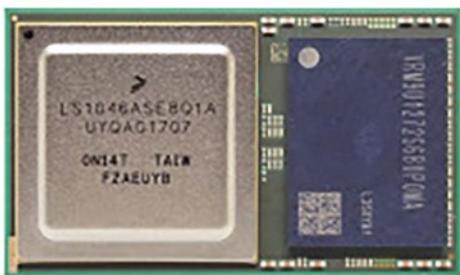
由于光学图像技术的应用，地理空间分析（或处理成像卫星提供的地球遥感数据）提供了使用密集计算和机器学习的另一个机会。地理空间分析的机器学习支持星载处理，通过选择要传输到地面的相关数据，减少了所需的下行链路带宽。下行链路带宽的减少是一个关键的优点，因为可用的频带正变得越来越拥挤，越来越昂贵。此外，不断提高的处理需求使得手工编写算法代码变得异常困难。机器学习非常适合需要处理大量数据的应用，如农业景观分类、农作物产量规划、商场停车场汽车的检测和分类等。

LS1046-Space微处理器包含四个64位ARM® Cortex®-A72的核心和包处理加速以及高速外设，可完成空间级AI、ML和数据处理（如上所述）所需的密集计算。

LS1046-Space采用QorIQ系列的最新的Layerscape(LS)架构，包含数据路径加速架构(DPAA)提供的功能，可在软件或硬件中实现。Layerscape架构是一种可编程的数据平面引擎网络架构，提供了先进的高性能数据路径和网络外设接口。LS1046还包含一个加密引擎，在安全通信和国防应用中非常有用。通过机器学习软件，LS1046-Space能够学习、推理和适应，以在面临最小延迟和带宽的挑战的时候实时做出决策。

## TELEDYNE LS1046-SPACE的性能特点和QLS1046-4GB-SPACE

Teledyne e2v是经过宇航认证的防辐射器件制造商，最近发布了一款微处理器LS1046-Space。原始的LS1046是NXP 64位ARM® Layerscape系列的一款产品，实现了四核Arm® Cortex® A72的设计，用尽可能小的尺寸提供了无与伦比的性能，同时使用户可以使用与Arm®技术兼容的庞大的软件服务、应用程序和工具的生态系统。Teledyne e2v的LS1046-Space 是一款1.8GHz的处理器，集成了包处理加速和高速外设，具有高性能的架构和业内领先的计算密度。LS1046-Space的计算性能超过45,000 CoreMarks®，带有双路10Gb以太网、PCIe Gen3、SATA Gen3等接口，适合用于一系列高可靠性的空间应用。此外，作为Teledyne e2v半导体生命周期管理计划(SLiM™)的一部分，这款器件的生命周期长达15年，避免了器件过时的问题。



NXP市场经理Altaf Hussain表示：“在航天和国防行业，我们看到了一个新的64位Arm®产品发展趋势，即Teledyne e2v使用我们的Layerscape商业处理器技术制造的高等级器件。我们相信Teledyne e2v的客户不仅能利用这些器件的先进计算性能，还可使用支持Arm®的生态系统，为系统设计创造新的可能性。”

Teledyne e2v的产品系列包括众多基于PowerPC®的处理器，如NXP QorIQ® P系列和T系列，甚至更古老的PowerQUICC®器件。客户可以继续使用Power架构的软件和应用，Teledyne e2v也会继续

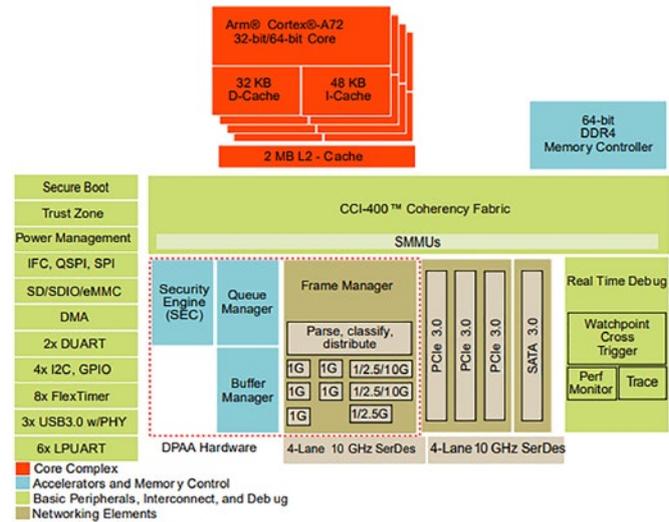
# 未来就在眼前: Teledyne e2v的四核ARM® Cortex®-A72耐辐射微处理器为太空系统和卫星项目的密集计算带来革命性的发展

2020年12月



基于NXP的新技术（如ARM®）研发新的解决方案。客人可以移植到基于ARM®的解决方案，也可使用NXP的Power®的解决方案开始新的设计。LS1046-Space也将被集成到Teledyne e2v最新的Qormino®计算模块QLS1046-4GB-Space中，其包含一片4GB耐辐射的DDR4存储器和一片LS1046，如右图所示。

LS1046A block diagram



## 结语

目前，由于对密集计算微处理器的需求，航天飞行系统的设计正进入一个关键的发展阶段。人工智能和机器语言算法的发展和普及，以及先进的基于互联网的应用和服务的发展，加速了宽带、高速、超可靠、低延迟通讯的发展，其应用领域包括：军事、气象、地球观测和电信（特别是随着5G网络在全球的发展）。每一个太空/卫星设计的核心都是对独立可靠的宇航级耐辐射微处理器的需求，这种微处理器的计算能力、速度、可靠性必须满足这些“全球”太空/卫星发展的需要。Teledyne e2v的LS1046-Space四核ARM® Cortex®-A72微处理器将为未来几十年的智能密集计算太空/卫星的发展带来革命性的变化。利用GHz级高性能数据处理（30K DMIPS @ 1.8GHz），结合方便的软件编程（和重配置的能力），以及无与伦比的耐辐射宇航质量测试流程，Teledyne e2v的LS1046-Space微处理器加速了密集计算太空/卫星的开发并使在轨实时重配置变为可能。

注：Teledyne e2v LS1046-Space项目由CNES（法国航天局）通过ESA ARTES项目提供支持。



更多信息，请联系：

**Byron Gao,**

技术应用工程师

[Peng.Gao@Teledyne.com](mailto:Peng.Gao@Teledyne.com)



更多信息，请联系：

**Yuki Chan,**

市场传讯经理

[yuki.chan@teledyne.com](mailto:yuki.chan@teledyne.com)

