



摘要

本白皮书讨论了在轨边缘计算的挑战和需求，以及处理器在其中的应用。本文首先概述用于解决在轨挑战的几种处理方法，然后介绍几个使用案例，讨论不同处理方案的应用场景并给出选择处理器的建议。

星载处理的需求和挑战

卫星应用对现代生活有重大的影响。从卫星导航到用于全球银行系统和电信系统的精确授时，以及监测地球的健康和天气，并在某些情况下提供早期预警的地球观测系统，卫星和我们每天的生活密切相关。与这些应用相关的卫星在从 LEO 到 GEO 的多个轨道上运行。它们的尺寸和寿命也各不相同。最小的 LEO 立方体卫星的预计寿命大约为 1 年，重量大约 1kg；而在 GEO 轨道的大型通信卫星重量可达 6500kg，预计寿命大约 15 年。

所有这些卫星都需要处理的能力。处理能力也是使卫星进入正确的轨道的一个关键因素，因为它可保证正确和安全的运行，并与载荷部署密切相关。

无论处理能力是如何实现的，无论是使用微控制器、微处理器、FPGA 或 ASIC，它都使卫星能够控制姿态，与地面站通信，管理载荷，最关键的是，实现载荷的功能。



卫星的处理能力可分为两个不同的方面：平台和载荷。平台的设备负责卫星本身的管理和运行。它包括通信、姿态控制、热管理和电源管理等。另一方面，载荷设备实现卫星的任务。这可能是通信或地球观测，甚至是星际任务。平台的处理可帮助实现所需的载荷功能，如图像处理、摄像机接口或电信波束形成。

显然，当处理应用被部署在宇航应用中时，将面临比地面应用更大的环境挑战。这些处理器必须能够承受温度、冲击、振动和辐射的影响，同时必须达到所需的可靠性。

上述每一项挑战都会以不同的方式影响处理器元件。宽广的温度范围会影响处理器的性能，因为器件通常在低温下运行得更快，高温下运行得更慢。温度也会影响低功率时的启动条件，可能需要更大的电流。在较高的工作温度下，较高的功耗可能会迫使器件降额运行。



冲击和振动可能会导致物理损坏。另外，如果连接器受到冲击和振动的影 响，系统运行可能会受到短期的影响。

在轨处理能力的主要考虑因素是辐射性能。轨道辐射主要有两类：总电离剂量(TID)和单粒子效应(SEE)。总电离剂量是随着时间的推移对器件的长期影响，会造成器件电参数退化。通常，TID 会影响器件的时序和功耗。有时候，器件寿命快结束时，性能会下降，功耗会增加。TID 有一个独特的指标，称为增强低剂量率灵敏度(ELDRS)，即总电离剂量低的时候，器件的参数可能会漂移得更多。ELDRS 主要和双极型工艺以及 BiCMOS 工艺有关。

第二种辐射效应被称为单粒子效应(SEE)，它更被人们熟知。SEE 会导致处理器存储元件中的单位或多位翻转。然而，SEE 对于某些工艺而言可能是破坏性的。对于宇航应用来说，使用不会产生破坏性锁定(SEL)的器件是至关重要的。

开发人员可采取一些方法以减轻宇航级处理器件的辐射效应。最常见的方法是，选择经过宇航应用认证（如 QML V 或 QML Y 认证）的器件。传统的宇航应用通常对器件的认证有很高的要求，导致成本很高，货期很长。新的宇航应用通常使用商业级器件，并不一定要求经过认证的器件，但需经过相关的测试或有类似的项目经历。在某些情况下，新的宇航应用也会使用没有任何经历的器件，当然这会给项目带来风险。

宇航应用的处理解决方案非常广泛，主要包括下面几类：

- 微控制器(MCU) – 紧密集成的处理解决方案，包含必要的存储器和外设接口。一般来说，微控制器能提供较低的处理能力。
- 微处理器(MPU) – 高性能的处理系统，需要外接支持的器件，如 NV RAM、DDR RAM 等。外围接口可以由外部桥接提供或实现。通常，微处理器可用于需要高性能处理能力的场合。
- FPGA – 可编程逻辑，可被配置为使用逻辑并行特性实现处理解决方案，如实现图像或信号处理管道。顺序结构可通过使用有效状态机或软核微控制器（如 LEON 3FT 或用于复杂控制架构的 NOEL Risc V）实现。通常，FPGA 可用于需要高性能处理和硬实时响应的场合。
- 包含上述器件特性的混合器件

当然，每一种解决方案都有适用的场合，如何选择最合适的方案取决于应用和任务的需求和分析。

微控制器用于集成底层的控制和命令，如通过通信总线接收数据，并根据命令配置系统。一个例子是成像相机的热管理，微控制器用于设定温度点和执行 PID 循环。由于微控制器是一个紧密集成的解决方案，实现的架构要简单得多，通常只需电源架构和时钟。



对于更高性能的应用，微处理器和 FPGA 则是更合适的器件。当需要高性能顺序处理，并需要和高级架构（如 AI/ML 等）协同工作时，微处理器是最理想的选择。FPGA 则更适用于灵活接口的并行方案，或需要高确定性响应的安全性应用。

有时可能会有多种解决方案都适用的情况。例如，微控制器和 FPGA 都适用，或微处理器和 FPGA 都适用。这时，选择的标准取决于设计经验，以及哪个方案的技术风险最低。



选择 MCU、CPU 或 FPGA 的一个关键的因素是应用所需的性能。为了比较处理器的性能，我们可以使用每秒百万指令数(MIPS)或每秒浮点指令数(FLOPS)等指标。通过，这些指标被定义为每 MHz 能实现的 MIPS/FLOPS，使开发人员能够扩展和理解处理器当前配置的性能。这也可用于评估多个核心的性能。同样的方法也可以用于根据 FPGA 内的 DPS 资源确定器件的性能。DPS 资源可提供乘法累积循环的指标，通常以 GMAC 或 TMAC 的形式和相关 FLOPS 的指标一起给出。然而，这种评估方法并不能评估某个架构是否更适合某种类型的操作或计算。

因此，除了处理能力之外，我们还需考虑几个不同的问题和决策点来帮助选择最合适的解决方案。

1. **应用** – 目标应用是否大部分是串行或并行的？一个串行应用的例子是数据包的网络/通信和处理，或卫星载荷的控制和配置。而一个并行应用的例子是电信处理或图像处理。
2. **质量认证** – 所选技术是否符合特定的质量认证（如 QML V）的要求？
3. **飞行经历和技术成熟度(TRL)** – 所选方案是否有飞行经历？其 TRL 是否达到所需的等级，以降低技术和项目的风险？没有飞行经历或较低的 TRL 并不意味着不能使用，但可能需要额外的测试来提高 TRL。
4. **设计重用** – 项目中的模块/IP 块/算法是否支持重用，以减少一次性的开发成本？
5. **工具链和支持的基础设施** – 是否有开发目标器件的必要的工具和许可证？这通常包括调试器、仿真环境和比特率/二进制许可证。
6. **电源管理和功耗** – 许多空间应用都受到电源的限制。选择处理器时要考虑到这一点，这通常与所需的最大功耗和可用的电源管理选项（如关闭不常用的外设和降低时钟频率以降低功耗）有关。
7. **接口** – 数据是否需要输入到器件或从器件输出？



帮助在 FPGA、MCU 或 CPU 之间选择的最佳方法之一是使用加权 **Pugh 矩阵**。Pugh 矩阵列出了重要的参数，并为每个参数打分，以确定存在多个可选方案时的最佳选择。当我们研究不同的案例时，每个案例都会有自己的 Pugh 矩阵，以演示对于该应用的最关键的参数和选择。

器件范围

有各种各样的微控制器、微处理器和 FPGA 可用于宇航应用。这些器件包含完全符合并经过宇航认证的器件和为新宇航应用筛选的商业级器件。主要的处理器和 FPGA 的供应商包括 AMD Xilinx、Teledyne e2v、Microchip、Lattice 和 NanoXplore。

案例研究

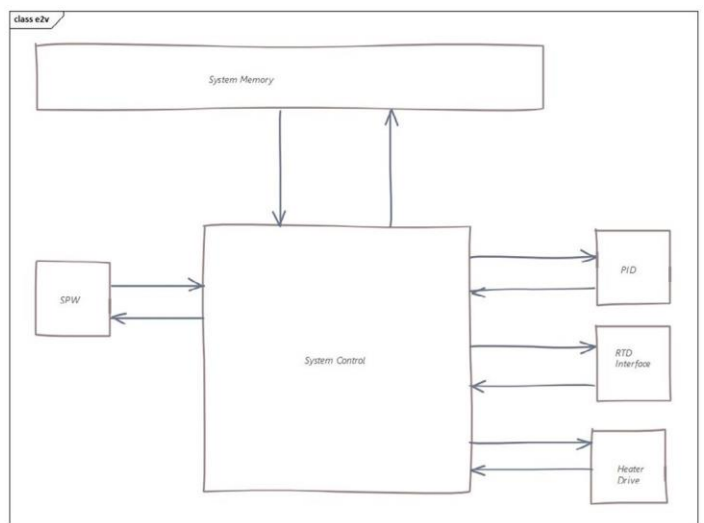
A. 热管理



第一个案例研究是平台温度控制子系统。它们通常用于成像卫星，用于地球观测或宇宙科学探索任务。载荷的任务是控制成像卫星的光学系统的温度。系统需通过 SpaceWire 接口接收设定值和配置数据。这些设定值和配置数据随后被用于采样温度传感器并计算加热组件需输出的驱动功率，以保证光学系统处于一个稳定的温度。光学系统包含几个铂 RTD 传感器和加热组件。对于每个加热器驱动都会运行 PID 循环，从一个或多个温度传感器获取温度输入。所需的设定值温度和 PID 约束都通过 SpaceWire 接口提供。加热器驱动与温度传感器的关联也通过 SpaceWire 接口定义。这是一个非常灵活的解决方案。然而，这个方案需使用多个配置寄存器——可能是几百个。在工作中，每个 PID 循环都需运行并更新加热器驱动。一旦所有 PID 循环运行完毕，系统将停止，直到下一个设定的启动时间。PID 循环的更新时间可通过 SpaceWire 链路配置，通常在 5 到 20 秒之间。

这个应用是高度串行的，它的配置和控制信息通过通信接口定义，每个 PID 循环按顺序运行。每个 PID 循环涉及的操作也是顺序的。系统需读取所需数量的温度传感器，运行 PID 循环，并输出更新的加热器驱动。该方案的核心需求包括：

1. 实现 SpaceWire 接口
2. 能够存储配置数据
3. 实现 PID，对时间没有严格的要求，精度更重要。性能也不是关键的需求。
4. 与模拟前端铂 RTD 的接口——通常使用低速 ADC
5. 基于合适的模拟扩展的加热器驱动 PWM——GPIO 和 PWM 组件是关键





	FPGA	Microprocessor	Microcontroller	Comment
Application	1	3	5	PID Algorithm, large configuration, system management
Throughput	5	5	5	Soft Real Time system
Interface	5	3	5	PWM, GPIO, I2C and SPI Required
Power	3	1	5	Low Power

我们将 Pugh 矩阵应用于这个方案。可以看到，对于这类任务，最佳的选择是 MCU。该矩阵表明，当考虑到应用、吞吐量、接口和功耗时，微控制器是最佳的选择。

空间连线的独特接口意味着需要使用专门的 MCU 或 FPGA。如果选择 FPGA 解决方案，要实现内存映射的顺序处理会复杂得多。MCU 是这类应用的理想选择。在这样一个简单的应用中，微控制器可以当成纯粹的硬件抽象架构使用，也可以使用简单的实时操作系统，以帮助管理任务调度和执行顺序。

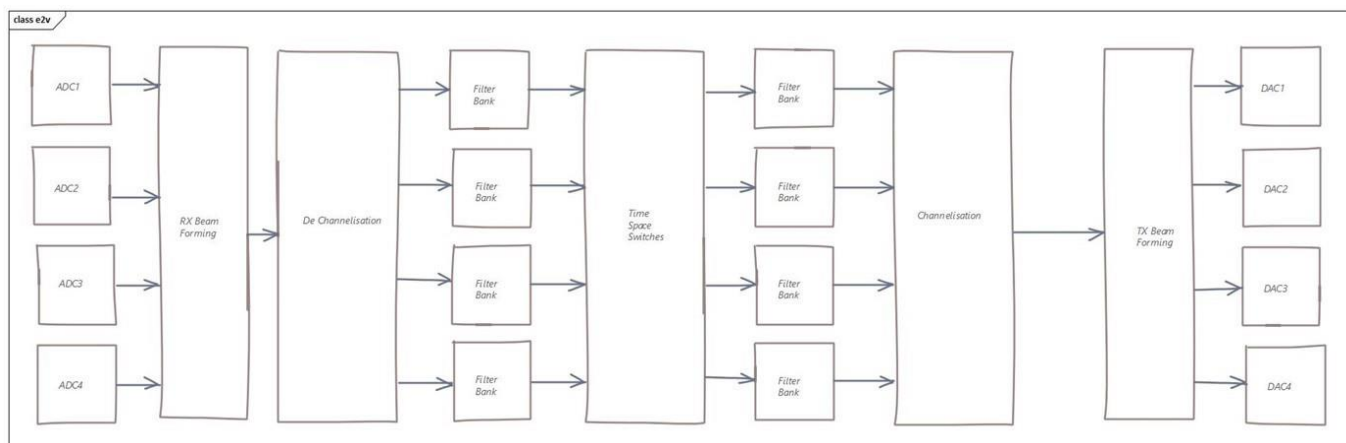
B. 电信



第二个案例研究是通常部署在 GEO 同步轨道上的电信处理器，用于实现全球民用和军事通信。通常，这些电信处理器只处理接收到的射频波形，不执行解码或重新编码。因此，这些电信处理器接收波形，去通道化，并在通道化和波束形成之前按要求路由信号。这需要使用高速大带宽 ADC 和 DAC 来接收和生成信号。ADC 和 DAC 的接口通常使用 LVDS 或 CML 技术来支持带宽要求。

在处理方面，需要较高性能的处理能力，以实现多个 ADC 和 DAC 的接口，以及执行多个去通道化和通道化的功能 (IFFT 和 FFT 操作)。

电信处理器提供了向点波束和从点波束向下行链路的双向传输数据的能力。这些点波束通常会覆盖全球的范围。为了实现这一点，一般会使用下面的架构。





在接收和发射通道上形成的数字波束必须是所需的点波束。数字波束可通过 N 点 FFT 实现，FFT 的大小取决于波束形成元件的数量。工作频率取决于采样率，采样率一般在 500MHz 到 1GHz 之间。后波束形成需要执行去通道化，以分离每个单独的通道。这是使用加权重叠累加 FFT(WOLA FFT)实现的。WOLA FFT 可用于执行通道化和去通道化。WOLA FFT 的乘法率是 $\frac{1}{2} BK \log_2 K$ ，这里 B 是采样率，K 是通道数。为了确保在通道化过程的输出上没有通道间干扰滤波，滤波器的乘法率为 $3K2B$ 。

以 400MHz 采样率和 100 个通道为例，相当于 WOLA FFT 速率为每秒 132 G 次乘法，同时滤波器需要执行大量的乘法实现通道滤波，这需要每秒 6T 次乘法。系统需要两个 WOLA FFT（通道化和去通道化），整个过程是高度确定性的，需要所有环节并行执行。

该解决方案的关键需求包括：

1. 支持多个高速 ADC 和 DAC 接口
2. 高度并行处理——必须同时处理多个通道
3. 可能需要扩展解码和波形重生成的功能，以提高信噪比性能
4. 能够实现波束形成计算，用于返回路径
5. 节能处理方案

	FPGA	Microprocessor	Microcontroller	Comment
Application	5	3	1	FFT, IFFT, Space Time Switching, WOLA FFT etc
Throughput	5	1	1	Very High Through put, hard real time demands
Interface	5	1	1	Bespoke High-Performance ADC/ DAC Interfaces
Power	3	3	1	Power dissipation will be high, offer good W/MHz processed

对于这个应用，FPGA 是正确的处理解决方案。因为其需要高性能和大吞吐量，而现代的 FPGA 能执行多达 22 T MAC。FPGA 能实现所需的 6.3 T 次乘法，而 Arm® Cortex®-A72 处理器只能实现大约每秒 14G 次乘法。选择 FPGA 的另一个原因是其 I/O 灵活，性能高，支持高速 ADC 和 DAC。FPGA 的并行特性允许实现多个 FFT 和 IFFT 结构，并允许同时处理多个通道。如果一个 FPGA 不够，可以使用多个互联的 FPGA 通过高速串行链路实现解决方案。虽然 FPGA 可能功耗较大，但在这个应用中，FPGA 将为实现和设计方案提供最高效的 FLOPS/Watt。例如，未使用的通道可配置为通过时钟控制，进一步降低功耗。

C.地球观测卫星

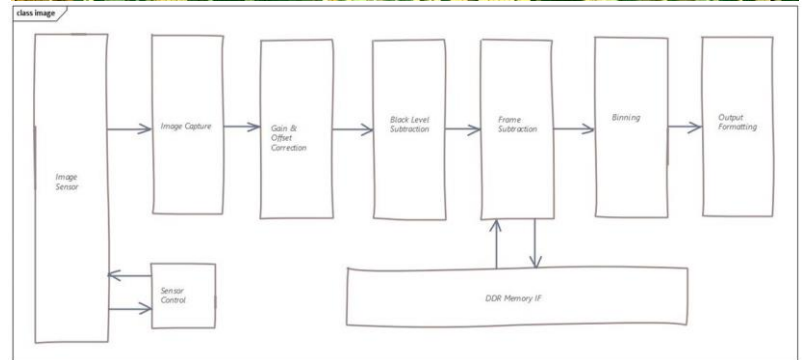
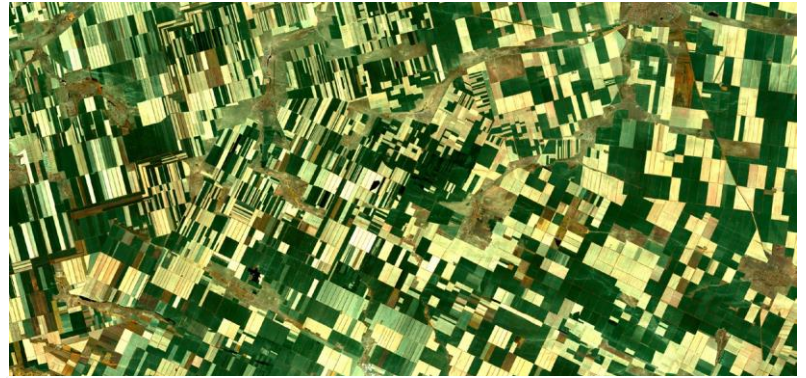
下面让我们看一看地球观测成像系统。这个系统在飞过正上方时成像。它产生的数据量相当大，典型的 EOS 观测方案的传感器将产生 3Gbps 的数据率。1000km 的长度需要大约 143 秒，产生大约 428.6Gbit(53.58GB)的数据。这些数据通常使用 CML（可能是定制的）或行业标准（如 SMPTE）进行格式化。



一旦获取了图像，图像将被后期处理，以确定图像的覆盖级别（例如图像被云层覆盖，或被天气因素遮挡）。在成像时，图像传感器每秒会产生多个 GB 的图像数据，需要被 EOS 成像系统捕捉。在图像数据被捕捉并保存在前端的电子器件中之后，必须按照覆盖级别对这些图像进行分类。

在分类之后，图像和相关级别将被传递到数据处理单元。这个应用的核心参数包括：

1. 能够接收高带宽数据（如摄像头数据）的高性能接口
2. 高性能并行处理——图像接收和格式化
3. 能够实现用于云层覆盖等级排名的高吞吐量 ML 推理
4. 支持用于缓冲图像块的高带宽存储器
5. 并行处理



	FPGA	Microprocessor	Microcontroller	Comment
Application	5	5	1	Image Capture and Image Processing
Throughput	3	3	1	Hard Real time processing requirement on Image capture
Interface	5	5	1	Bespoke or Standard interface high performance
Power	3	3	1	Power dissipation will be high, offering good W/MHz processed

在这类应用中，可使用 FPGA 或高性能多核处理方案接收图像并运行机器学习推理。构建高性能多核处理器方案需要使用特定任务专用的核心，如图像接收、图像处理和前向传输的格式化。支持向量处理扩展和单指令多数据(SIMD)的架构特性可显著地增强性能，以帮助实现所需的功能。高性能多核方案的实现还需要使用操作系统。操作系统能够抽象出系统级功能。常用的操作系统有嵌入式 Linux 或 RTEMS 等。如果需要更高的安全性，也可使用实时操作系统。OpenCV 等库也可用于图像处理应用的开发。

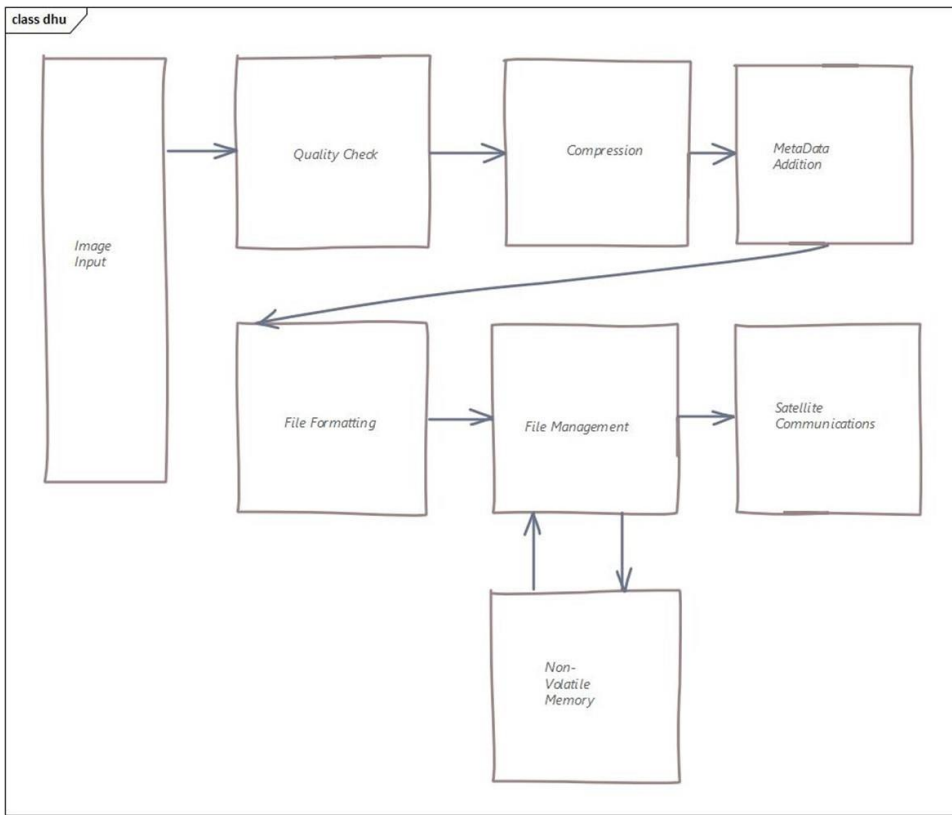
基于软件的方法的主要优势之一是项目的开发与 FPGA 开发相比可大大缩短。FPGA 开发的时间可能会相当长，而且取决于监管环境，如 ESA 合规性。软件应用的开发可利用操作系统、常用库等提供的功能。



软件开发也可更容易地实现系统的调试，因为在软件调试里寄存器、存储器和变量具有更大的可见性。由于构建和验证的工作显著加快，软件开发的迭代时间也更少。

选择 FPGA 或基于处理器的解决方案取决于使用经验、技术基础和偏好。

D. 数据处理单元



最后一个案例研究是数据处理单元(DHU)。在图像处理卫星中，DHU 负责接收来自于前端的电子设备（如相机接口）的图像，进行压缩，存储在文件系统中，并根据请求为下行链路重新调用。这意味着 DHU 必须能跟上成像操作产生的图像数据率。在成像阶段，传入的图像必须被压缩并存储在文件系统中，以方便之后的下行链路。除了下行链路的操作，DHU 只需简单地从存储器接收请求的图像并将其转发到射频链路。

	FPGA	Microprocessor	Microcontroller	Comment
Application	3	5	1	Image compression & file management, communication with satellite systems
Throughput	3	5	1	Compression needs high performance,
Interface	5	5	1	Standard High-Performance interfacing used e.g. 10G, PCIe
Power	3	5	1	Power dissipation will be high, offer good W/MHz processed

这个应用的关键参数包括：

1. 支持成像操作的高性能处理
2. 能够管理文件格式
3. 能够从 NV RAM 系统执行图像恢复
4. 能够在高吞吐量的情况下进行无损压缩

数据可以从前端电子器件通过高速接口（如 PCIe 或 10G 以太网）接收。假设前端电子器件的数据率是 3Gbps，那么 PCIe 和 10G 以太网都可提供足够的带宽。



可以采用 JPEG-LS、JPEG-2000 和 CCSDS 等压缩算法实现无损压缩。假设无损压缩率是 50%，则需使用上述的算法之一压缩 1.5Gbps 的数据。多核处理器（如 ARM A72）可达到高达每核心 14 GFlops 或四核 56 GFlops。这样的高性能可以容易地实现所需的功能。由于压缩的图像需要存储在文件系统中（例如 EOS 任务中常用的 SAFE 文件格式），通常需要使用操作系统管理图像块的存储和恢复。

这个系统需要高性能的处理能力，以支持并行和串行混合处理。因此，高性能处理器是最佳的方案，它可以接收图像块并处理压缩。此外，还需要串行处理以与卫星通信、管理文件管理系统以及检索和管理非易失性存储器中的文件。

结论

卫星需要大量的处理和功能以实现其任务。本文提出了几种不同的选择标准，结合最终的应用，可帮助确定最合适的解决方案。这包括与设计直接相关的要素，包括应用、吞吐量、接口和功耗。除了这些设计的要素，选择的标准还依赖于技术成熟度、使用经历和技术水平。

每个应用都有不同的选择标准。我们可以建立一个初始决策矩阵，以提供合适的技术指标作为决策的基础。

	<i>Most Appropriate</i>	<i>Consider</i>	<i>Do not consider</i>
<i>High performance & Hard Real Time Response</i>	FPGA	Microprocessor	Microcontroller
<i>High Performance Image or AI/ML</i>	Microprocessor / FPGA		Microcontroller
<i>High Performance Data Handling</i>	Microprocessor	FPGA	Microcontroller
<i>System Configuration</i>	Microcontroller	FPGA	Microprocessor

对于工程师而言，关键是在工具箱中有一系列的工具，并能选择最合适的工具用于手头的任务。



更多信息，请联系：

Thomas Guillemain,
市场和业务发展,
数据处理方案

thomas.guillemain@teledyne.com



更多信息，请联系：

Thomas Porchez,
应用支持,
数据处理方案

thomas.porchez@teledyne.com

