白皮书

现代多核空间处理器如何提高无损压缩的数据吞吐量

2024 年 6 月

Teledyne e2v Semiconductors

摘要

Teledyne e2v 认真研究了内部基准测试，验证了现代处理器实现星载无损压缩的能力。这表明，将多核通信处理器与能够处理各种文件格式的现代压缩算法相结合，可以获得系统级的成本和性能优势。

空间任务的带宽和存储能力总是受到成本的限制，因此需要有效的数据管理和传输技术。理想情况下，系统增强可以通过应用有效的数据压缩来实现，在最小化数据集大小的同时保留基本信息。压缩要求数据在传输到地球之前在本地存储并在星上处理(即编码)。先进的无损算法对星载计算能力提出了很高的要求。值得庆幸的是，在过去的几十年里，数据压缩算法和处理器性能都有了很大的进步。正如您将看到的，现在最新的、领先的多核通信处理器可以提供快速的实时压缩。宇航级处理器，如 Teledyne e2v 的新器件，在支持此应用方面非常有效。

本研究的重点是两款基于 ARM 的多核 A72 处理器: LS1046 和 LX2160 通信处理器，并与同等工业级(即非宇航级)处理器进行比较。

本文的观点...

- 由于带宽有限和本地存储有限，空间任务受益于有效的数据压缩和传输
- 现在，压缩可以在最新的空间级处理器的多个核心上实时运行，增强通信链路吞吐量
- 无损压缩方法，如运行长度编码、霍夫曼和 Lempel-Ziv-Welch (LZW)保持数据集保真度
- 性能测试展示了使用 LZ4 无损算法实现压缩率的一系列处理器的对比

我们将详细介绍实现压缩算法的实际操作，并给出一个流行的无损方法(LZ4)的示例。最后，您将看到 MB/s 压缩率的性能测试对比，以验证一系列标准的现代处理平台的功能。

介绍数据压缩——它是什么？

数据压缩的目标是减少数据集大小，降低对本地存储和通信带宽的需求，以实现经济和灵活的任务。压缩删除了冗余数据以减少硬件速度和性能的限制。每个空间应用都有独特的要求。本文将帮助您进一步理解这些问题，以涵盖广泛的压缩案例。

有两种数据压缩方法，这两种方法都减少了正在进行的存储和传输的数据集大小。

有损压缩是指一些数据被丢弃，以达到最佳传输或存储的特定压缩比。虽然有损技术确实可以提供可预测的压缩，从而减少文件大小，但从本质上讲，它也会导致数据质量的降低。而且，一旦压缩，原始数据保真度就会丢失。商业有损算法的例子包括 JPEG(联合摄影专家组)和 MPEG(运动图像专家组)格式。[3]由于有损压缩的性质，专业摄影师坚持将他们的图像保存为 Raw(即未压缩和未处理)文件。

有损算法的例子 (JPEG)

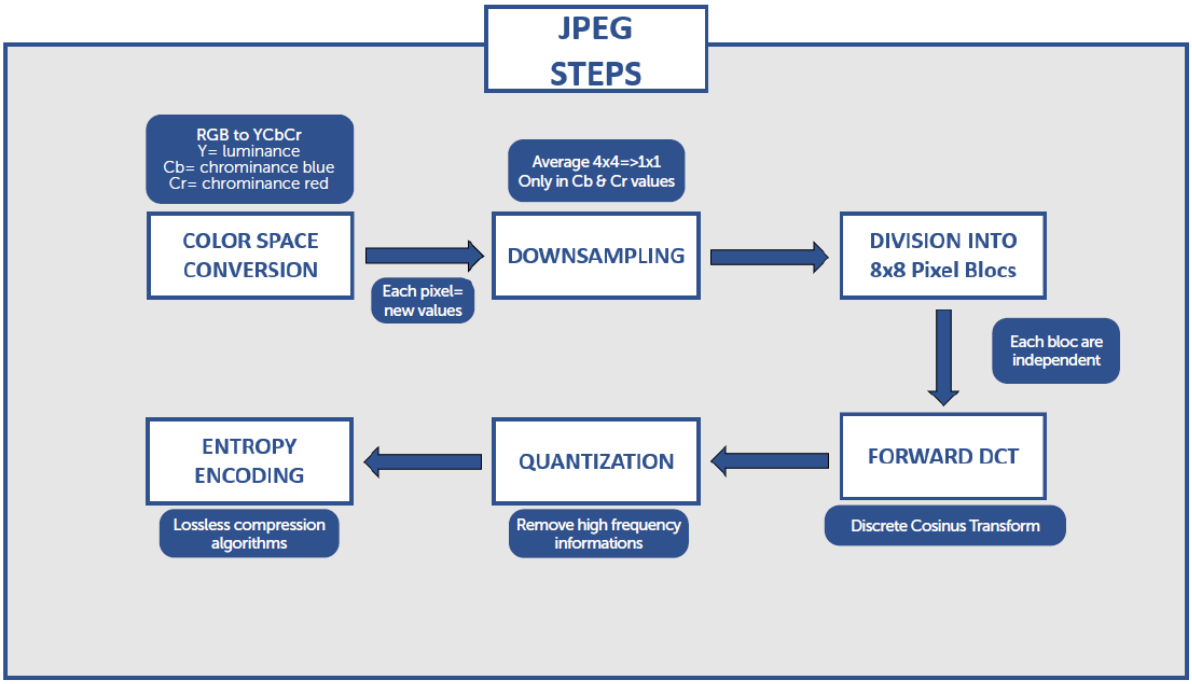


图 1：JPEG 压缩(有损) [5]

卫星压缩的一个重要考虑因素是功耗。与 FPGA 相比，通信处理器由于其精细的工艺，在消耗的 MB/瓦方面具有明显的功率优势。因此，当要使用有损压缩时，处理器可能是最佳的解决方案。

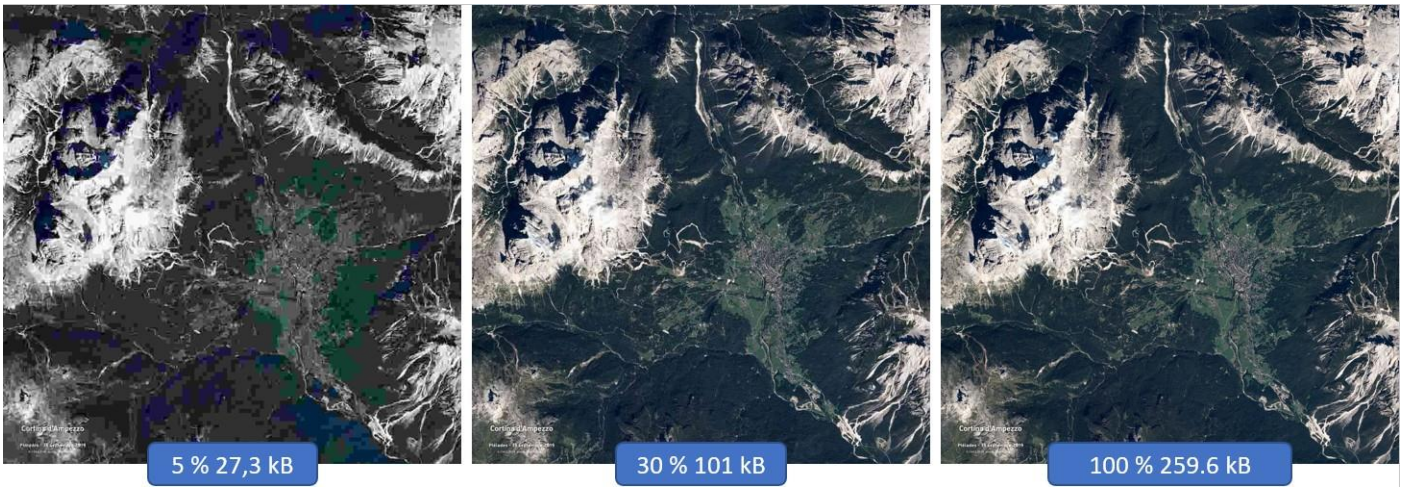


图 2：有损压缩的影响的例子[CNES 图片]

图像集(图 2)显示了以不同压缩比对同一图像应用有损 JPEG 压缩的示例。图像质量(清晰度和分辨率)从左到右随文件大小而增加。
有损压缩的替代方案是无损压缩。

现代多核空间处理器如何提高无损压缩的数据吞吐量

2024 年 6 月

TELEDYNE | Teledyne e2v Semiconductors

无损压缩是各种领域的专业人员首选的一系列压缩方法，因为可以在不丢失信息的情况下减小文件大小。事实上，无损压缩是可逆的，它是通过识别和消除数据集中的统计冗余来实现的。

多年来，各种各样的无损方法已经被提出。这个主题很复杂，超出了本文的范围，但是这些方法大致可以分为四类编码类型，即:

- 变换编码(如离散余弦变换)
- 基于预测的编码(如自适应 PCM)
- 熵编码(如霍夫曼)
- 基于字典的编码(例如 LZW 和 LZ4)

压缩信息框…
在信息论中，数据压缩、源编码或比特率降低是使用比原始数据更少的比特对信息进行编码的过程。

压缩算法要么是有损的，要么是无损的。无损压缩是专业人士的首选，它通过识别和消除统计冗余来减少数据集。

有损压缩通过删除数据集中不必要或不太重要的信息来减小数据集的大小。它在接受者处呈现出可接受的最佳质量。

常用的无损算法包括行长编码(RLE)、霍夫曼编码和 Lempel-Ziv-Welch 编码(LZW)。这些技术非常适合专业的星载场景。[2]

无损压缩的强大之处在于恢复原始、预编码文件的能力，预计大多数的空间压缩应用将使用无损编码数据。

下表提供了到目前为止介绍的两种压缩方法的总结。

压缩类型	有损	无损
算法举例	JPEG, MPEG, MP3 等	RLE, 霍夫曼, LZW, LZ4, ZIP
主要压缩目的	高效	数据完整
数据质量由什么决定	用户/市场	应用
优点	权衡成本和效率，支持不同用户的需求	多种方法，适合特定的专业应用
存储影响	为目的而优化	可变 – 取决于算法
传输影响	显著提高	提高 – 取决于算法
CPU 资源	源头部署, 适中	两端部署, 高
缺点	永久丢失数据保真度，可能产生不需要的失真	处理复杂，需要配对的编码和解码能力

表1: 有损压缩和无损压缩方法的总结

基准压缩算法：

Teledyne e2v 进行的基准测试使用了 LZ4 压缩插件。LZ4 是一种应用广泛的无损算法。它提供了良好的压缩比和快速的解压速度，特别适合于快速数据处理的场景。LZ4 代表 Lempel-Ziv 4，表示它与 Lempel-Ziv 算法系列的关系。它们被广泛应用于互联网基础设施和云网络，以提高数据吞吐量。它们在速度和简单性方面很好，但在编码内存方面有缺点，并且不能在数据集上实现最高水平的压缩，特别是那些有限重复的数据集。

算法例子 (LZ4)

LZ4 算法在压缩方面的操作概述：

- 该算法使用滑动窗口来扫描重复的位序列(匹配)和随后的唯一数据模式(文字)，这些模式在输出数据中表示为令牌
- 哈希表用于识别偏移量和长度的匹配，字面量按原样存储
- 该算法产生一个压缩的输出，包括每个表示文字序列(不匹配的数据)或匹配(引用先前发送的序列)的令牌

注意:LZ4 压缩符号库在初始化时不是空的，它预先配置了经典信息，例如字母字符集或最近发送的数据块。

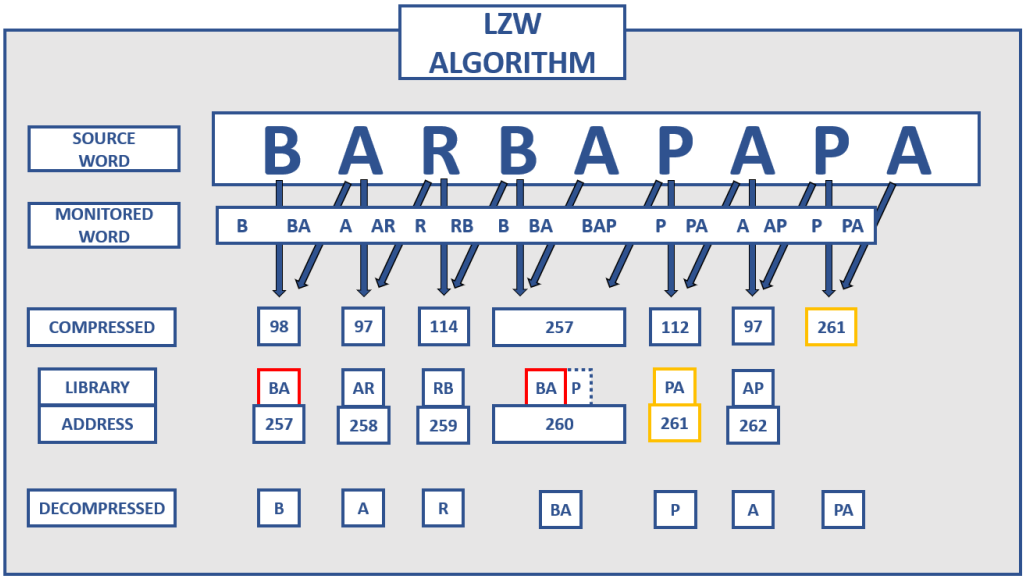


图 3: Lempel-Ziv-Welch 方法的编码流程

图 3 展示了 Lempel-Ziv-Welch 方法的编码流程。它的设计是为了节省解压时间。由于有了 literal 库，解压缩可以比压缩阶段快六倍。在某些情况下，创建针对特定应用程序进行优化的自定义库可能会有好处。

LZ4 算法由于其低延迟而被广泛使用。这包括实时数据处理和通信系统。由于它与许多编程语言和平台的兼容性，它变得流行起来。

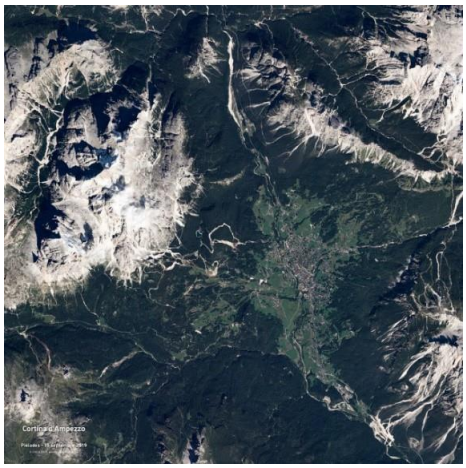
一些插件提供不同的压缩比例，影响性能和压缩速度。级别越高，压缩越大，因此速度越低。在本研究中，对于每个基准文件类型，选择第 9 级 LZ4 压缩作为最优压缩。

与解码相比，LZ4 的编码(压缩)过程需要更多的处理资源。这是由于查找匹配、管理散列表和决定如何最好地压缩数据所涉及的额外计算复杂性。解码更简单，因此更快，主要涉及从编码令牌重建原始数据的直接任务。

现代多核空间处理器如何提高无损压缩的数据吞吐量

2024 年 6 月

TELEDYNE | Teledyne e2v Semiconductors



Lossless
99%
257,0 kB

图 4: 使用LZ4 压缩实现的无损压缩的例子[CNES 图片]

介绍宇航级通信处理器

这是两款功能强大的新型宇航级通信处理器。
LS1046 和 LX2160 都是多核 64 位 ARM Cortex-A72 处理器。它们使用了由 Teledyne e2v 研发的耐辐射设计，可服务于许多需要计算密集型功能的应用。典型的例子包括嵌入式人工智能，因为它们可以运行深度学习和人工智能算法。这有助于图像采集和处理。这种方法实现了在“边缘”预处理源数据的真正技术优势，有助于减少下行链路带宽。
其他终端应用包括:

- 通信卫星、嵌入人工智能和安全
- 着陆和航空电子空间系统，机器人和机械臂控制
- 人类任务探索，科学任务
- 预警、观测卫星——自动态势探测和感知
- 气象卫星

DMIP 是什么?

DMIP 全称是 Dhrystone Million Instructions Per Second,用来衡量处理器的性能。它源自 20 世纪 80 年代的 Dhrystone 基准测试，用于测试通用整数运算。

DMIP 量化了一款处理器相对于参考机器(VAX 11/780)可以处理多少条指令。

虽然 DIP 对于比较计算性能很有用，但其侧重于整数运算，因此不能完全代表现代浮点运算的工作负载。

本研究旨在证明 Teledyne e2v 通信处理器在执行空间应用数据压缩方面的效率。

图5: LS1046

LS1046-Space 是一款四核处理器，运行速度高达 1.8GHz，可实现 30k DMIPS，包含 ECC 保护的 L1 和 L2 缓存和丰富的外设，例如包处理加速，1/10Gb 以太网，PCIe® Gen3, SPI, I²C, UART.

状态: 经过质量测试，已正式发布
宇航级认证: 高达 Level 1 (NASA EEE-INST-002 - Section M4 – PEMs & ECSS-Q-ST-60-13C).

现代多核空间处理器如何提高无损压缩的数据吞吐量

2024 年 6 月

Teledyne e2v Semiconductors

图 6: LX2160

LX2160-Space 是最新的 16 核处理器，高达 200k DMIPs，运行频率高达 2.2GHz。具有 WRIOP，使其能够处理高速外设，包括 100 GBE，多个 PCIe Gen3.0，硬件 L2 交换，100 Gbps 解压缩/压缩的 DPAA2，以及优化的 50 Gbps 加密引擎。此外还有一系列流行的标准数据接口。

状态: LX2160 正在研发中

影响压缩的处理器设计因素

除了所使用的算法之外，还有几个因素会影响处理器压缩性能。了解这些因素将有助于防止根据初始 DMIP 的要求选择的特定处理器表现不佳。也许最重要的两个因素是硬件并行性(由多核处理器设计辅助)和严谨的缓存和本地内存体系结构。这些因素是如何占主导地位的？为什么？在考虑实现哪种压缩算法时，我们有一些线索。

并行和多核架构

并行性在硬件和软件设计中都起着至关重要的作用。这包括:

- 多核处理器:压缩算法通常涉及可以并行执行的任务，例如同时处理不同的数据块。多核处理器通过跨核分配工作负载来显著加快这些任务的速度。
- SIMD(单指令，多数据)扩展:SIMD 扩展，如 AVX(高级矢量扩展)和 SSE(流式 SIMD 扩展)，允许单个指令并发处理多个数据点。

通过利用多核处理器和 SIMD 功能，压缩算法可以实现更高的吞吐量并减少执行时间。

缓存架构和内存带宽

系统内数据访问和移动的效率对压缩速度有深远的影响。主要方面包括:

- 缓存大小和级别:大型和多级缓存(L1，L2，L3)可以存储频繁访问的数据和指令，物理上更靠近 CPU，减少数据检索延迟。压缩算法通常涉及对相同数据的重复访问，因此它们受益于有效的缓存利用。
- 缓存行大小和预取:优化缓存行大小和实现有效的预取技术可以确保算法所需的数据随时可用，最大限度地减少由于缓存丢失而导致的停机。
- 内存带宽:高内存带宽允许在 CPU 和内存子系统之间快速传输数据。压缩算法本身就需要处理大量数据，这可能会受到慢速内存的瓶颈。高带宽确保稳定的数据流，使 CPU 保持繁忙状态，减少空闲时间。

优化缓存架构和确保足够的内存带宽对于保持高数据速率至关重要。这在 LZ4 编码的情况下尤其重要。但是，可用内存大小也可能影响吞吐量并导致处理延迟。

硬件设置

该性能评估是通过 NXP 的 QLS1046-Space 开发套件和 LX2160ARDB 板实现的，两者都有多个接口可用。在我们的基准测试中使用的是 Linux 操作系统。基准板的设置值得注意的方面有:

QSL1046-Space 评估板安装了 4GB 的 DDR4 内存，而不是更大的 8GB。此外，处理器运行在 1.6GHz，而不是 1.8GHz 最大时钟。

LX2160 处理器具有解压/压缩加速引擎(DCE)，能够处理高达 100Gbps 的数据吞吐率。然而，在本研究的范围内，没有直接评估该加速器，仅评估核心纯计算性能。显然，DCE 提供了更高的压缩速度。另外，我们的基准测试只运行在 2GHz，而不是 2.2GHz 的最大时钟。还要注意，性能受到可用的本地 DDR4 内存的限制。

这个简单的基准测试目标是针对各种应用程序中使用的各种类型的处理器，以获得足够的数据来比较压缩性能。

基准测试在几个处理器平台上执行，其中包含空间应用程序中典型使用的多种文件类型。一些处理器直接由 Teledyne e2v 测试，而对于其他处理器，我们参考了参考书目中获得的先前测试[1]。

Teledyne e2v 测试的处理器

处理器	测试频率 (最大频率) - GHz	测试的核心数量 (最大)	架构	宇航认证	典型应用
Texas Instruments DM3730	1	1	ARM	NO	导航
Amlogic S805	1.5	4	ARM	NO	电视盒子
LS1046	1.6 (1.8)	4	ARM	YES	宇航
Intel® Atom™ D525	1.8	2	x86	NO	台式电脑
Intel® Core™ i7-2630QM	2	4	x86	NO	手机
LX2160	2 (2.2)	16	ARM	YES	宇航
Intel® Core™ i5-1145G7	2.6	4	x86	NO	台式电脑
Intel® Core™ i3-2105	3.1	2	x86	NO	台式电脑
Intel® Core™ i5-2400	3.1	4	x86	NO	台式电脑
Intel® Xeon® Processor E3-1225	3.2	4	x86	NO	服务器

表2: 测试的处理器

在这个基准测试中，我们忽略了几个低性能、抗辐射的处理器，因为它们无法处理压缩任务负载。例如，Microchip 的 SAMRH71 采用 Arm Cortex M7 内核，可提供高达 200 DMIPS。这比 LX2160 的吞吐量低 1000 倍。

测试文件场景

压缩基准测试使用了几种不同的文件类型。这些文件类型被认为是空间应用的典型代表。JPEG 或 RAW 图像数据是典型的图像格式，它们是可能的压缩方案，因为压缩可以加快图像下载时间，接近实时执行文件，可以部署为“在轨”软件更新或促进卫星系统上 AI 插件的升级。

测试文件的参数如下所示:

名字	类型	描述	源	大小(MB)
x-ray	X 射线	X 射线医疗图片	医疗图片[1]	8.5
dickens	.txt	Charles Dickens 的著作集	Gutenberg 项目[1]	10.2
image	.raw	未压缩的图片	Teledyne e2v	19.1
nci	数据库	化学数据库	CACTVS[1]	33.5
mozilla	.exe	Tarred executables of Mozilla 1.0	Mozilla 项目[1]	51.2
fireworks	.jpeg	一个 JPEG 图像	Snappy[1]	112

表3: 基准测试流程使用的文件类型

下面是关于所列文件类型的一些观察。首先，jpeg 图像已经被压缩，再应用压缩可能毫无意义，但是了解 LZ4 是否可以提供进一步的压缩仍然是有必要的。这里使用了 RAW 图像进行测试以比较差异。此外，文本文件代表了一个有趣的测试案例，因为 LZ4 算法被构建为具有单词库的结构。可执行文件与文本文件类似，因为相关的代码结构可能显示出相当大的数据冗余。最后，一个数据库文件(例如这里的 nci)很值得评估，因为它代表了表格结构。

基准测试

这个基准测试被设计成在单个处理器内核上压缩文件，以确保最大的性能和快速的结果。下面是对其工作原理的快速解释:

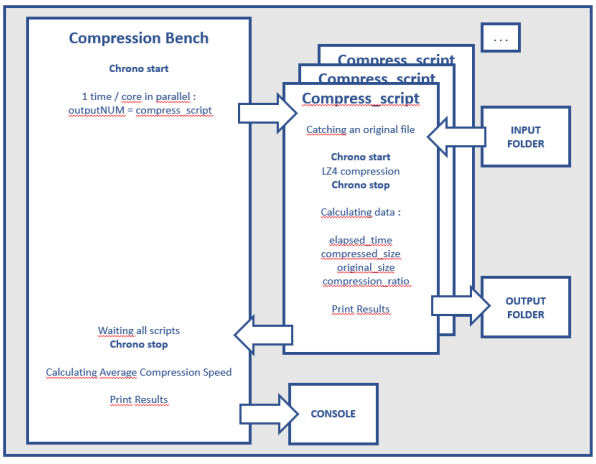


图 7: 基准测试算法的框图

并行处理:基准测试同时执行几个压缩脚本来压缩文件。这种并行处理显著减少了文件压缩所需的总时间。

性能指标:基准测试测量压缩编码时间并计算以 MB/s 为单位的压缩速度。此外，还测量了所有线程所花费的时间，并确定了所有脚本的总压缩速度(以 MB/s 为单位)。

连续运行:算法在无限循环中运行，可以连续压缩文件。该过程被持续监控。

压缩速度结果

这种基准测试集中在一个单一的压缩性能因素上，即压缩速率或速度。
计算速度是比较处理器的一个重要因素。

雷达图(图 8)显示了有趣的结果。首先，与 Intel®Core™i5-1145G7 相比，LX2160 显示出显著的处理优势。有趣的是，请注意压缩速度(图的形状)与图的辐条上标记的单个文件类型的相似性。对于每个处理器，该算法的处理速度影响似乎相同。因此，这张图强调了算法选择的重要性。此外，该图还强调了 LX2160 与较慢的 LS1046 和 Intel i5-1145G7 之间的 4 倍速度优势。

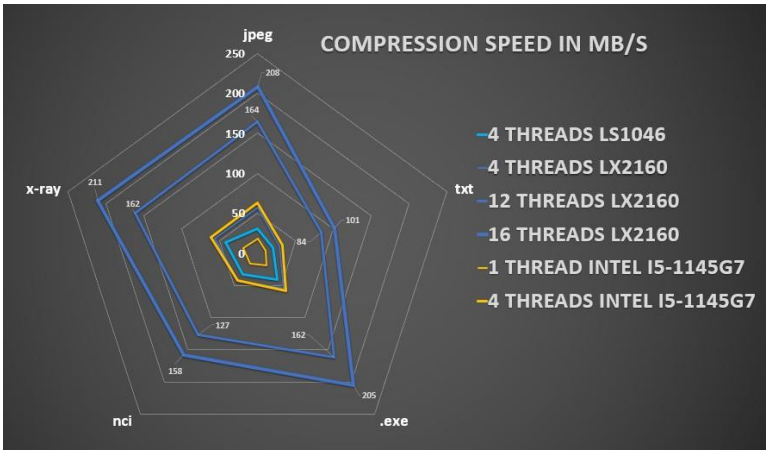


图 8: 使用Teledyne e2v 的处理器的测试文件的压缩数据

为了将 Teledyne e2v 的处理器与一系列常见的商业器件进行比较，我们使用了公共基准测试的结果。很明显，公共结果只显示单个线程操作。为了比较的公平性，所有公开的结果都乘以可用内核的数量。但是，要认识到这种简单的方法产生的近似性是未经测试的。但这也是合理的，因为这个基准测试也低估了处理器的压缩能力。需要注意的是，对于某些文件类型，特别是.nci 文件，乘积的线程速度会高估性能。

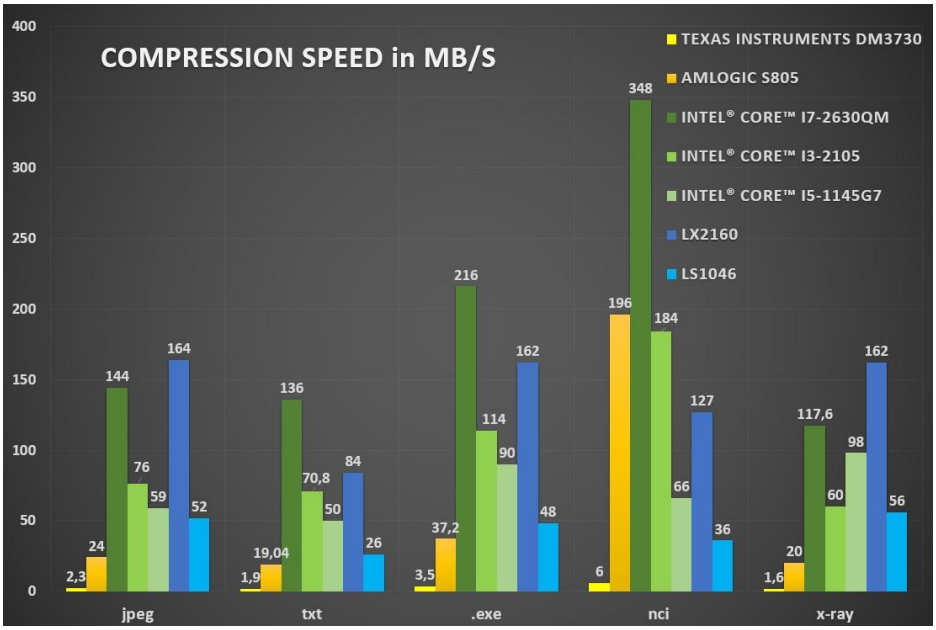


图 9:所有处理器的测试文件的压缩速度

图 9 总结了测试的结果。我们使用十个不同的处理器压缩了五种文件类型。LX2160 在这里的表现很亮眼。对于某些文件类型，它处于领先，例如 X 射线文件的测试结果(162 MB/s)。然而，英特尔处理器在其他文件类型上也有优势，例如 nci 文件类型。但这个结果应该被谨慎对待，因为它没有直接测试，很可能需要用评估其速度的简单测试进行修正。

结论

本白皮书讨论了 Teledyne e2v 的令人印象深刻的具有 64 位计算能力的空间处理器，并考虑了两种压缩类型，即有损压缩和无损压缩。本文针对特定的压缩算法进行了一些思考，并重点介绍了基准测试中使用的 LZ4 算法。此外，本文还强调了在考虑压缩方法时重要的关键处理器性能因素。

我们尝试使用一系列 10 个处理器对 5 种文件类型的压缩进行基准测试，其中两个是由 Teledyne e2v 制造的耐辐射宇航级器件。LS1046 在压缩速度(MB/s)方面与英特尔的商用处理器相当。最新的 LX2160 在压缩能力方面比 LS1046 提高了 4 倍。与其他处理器相比，它的压缩速度也令人印象深刻。请注意，这个基准测试是在没有使用 DCE(片上解压缩/压缩加速引擎)的情况下实现的。它的数据传输速率高达 100Gbps。

由于这两款宇航级处理器提供的强大性能，用户可以处理和压缩飞行中产生的大型数据集;即使是面对当前最新的高分辨率和扩展采样率的传感器。AI 也可以用于星载应用[7]，以提取重要数据，然后传输到地面站。这进一步降低了带宽需求。

将来我们可能会扩展此分析，以对商业处理器执行更详细的分析并测试其多线程功能。同样，使用有损压缩应用程序，分析 FPGA 压缩的性能也是相当重要的。最后，这个研究对评估所有商业器件的每瓦压缩率也是很有帮助的。

TELEDYNE | Teledyne e2v Semiconductors

参考文献:

[1] Squash Compression Benchmark (quixdb.github.io)
[2] Lossless Compression: A Complete Guide | Adobe
[3] Lossy Compression: Everything You Need to Know | Adobe
[4] Lossless bit compression (article) | Khan Academy
[5] JPEG Compression Explained | Baeldung on Computer Science
[6] La compression de données - La compression de Lempel Ziv Welch (univ-mlv.fr)
[7] Deep-learning AI in Space enabled by Qormino® processing module | Teledyne e2v Semiconductors (teledyneimaging.com)
Executable Usage • Vitis Libraries • Reader • AMD Adaptive Computing Documentation Portal (xilinx.com)
https://ark.intel.com/content/www/fr/fr/ark/products
LZW (Lempel–Ziv–Welch) Compression technique - GeeksforGeeks

TELEDYNE e2v Semiconductors

For further information, please contact:

Manuel Blanco,
Applications Engineer,
Data Processing Solutions
Manuel.BLANCO@Teledyne.com

TELEDYNE e2v Semiconductors

For further information, please contact:

Vincent Thibault,
Applications Engineer,
Data Processing Solutions
Vincent.THIBAULT@Teledyne.com

TELEDYNE e2v Semiconductors

For further information, please contact:

Guillaume Nezot,
Applications Engineer,
Data Processing Solutions
Guillaume.Nezot@Teledyne.com

TELEDYNE e2v Semiconductors

For further information, please contact:

Thomas Guillemain,
Marketing & Business Development,
Data Processing Solutions
thomas.guillemain@teledyne.com