arXiv:2301.04117v1 [eess.IV] 10 Jan 2023

使用VVC的多光谱图像自适应可扩展压缩

Philipp Seltsam、Priyanka Das、Mathias Wien

亚琛工业大学成像与计算机视觉研究所，
52056 亚琛，德国
firstname.lastname@lfb.rwth-aachen.de

摘要

本文将VVC编解码器应用于多光谱图像（MSI）压缩任务，采用自适应可伸缩编码结构。在“纯”VVC方案中，借鉴图像间时间预测的概念，对多光谱图像的光谱维度进行去相关。本文还进一步评估了将常用的主成分分析（PCA）用于光谱去相关，并结合VVC帧内编码实现空间去相关的效果。该方案称为PCA-VVC。本文提出一种名为HPCLS的新型自适应多光谱图像压缩算法，该算法利用PCA和帧间预测进行光谱去相关，并利用VVC帧内编码进行空间去相关。此外，本文还提出一种新型自适应可伸缩方法，可在压缩文件中提供多光谱图像的光谱缩放预览，且该预览可独立解码。利用预览中包含的信息可以减小文件总体大小。本文在ARAD HS数据集中的图像上评估了所有方案；这些图像包含亮度和颜色变化丰富的室外场景。结果表明，“纯”VVC的性能不及PCA-VVC和HPCLS。对于高于51 dB峰值信噪比的重建质量，与PCA-VVC相比，HPCLS呈现出更优的率失真（RD）性能。本文将可伸缩方法的性能与独立RGB预览分别结合HPCLS或PCA-VVC的方案进行比较。结果显示，可伸缩方法具有显著优势，尤其是在预览质量较高时。

1 引言

多光谱图像（MS）通过一组称为光谱波段的二维强度图像捕捉场景的光谱空间信息，其中每个波段对应电磁谱中的一个波长范围。凭借遥感能力和非侵入性，多光谱成像应用于医学、食品加工和卫星成像等众多领域 [1][2][3]。然而，光谱分辨率越高，三维多光谱图像（MSI）中的频带数量就越多，进而产生较大的图像文件。因此，需要采用多光谱图像压缩技术，除了利用空间相关性外，还能有效利用光谱维度上的高度相关性，从而降低传输和存储成本。

多光谱图像压缩是一个活跃的研究领域，涉及多种技术，可分为无损压缩和有损压缩。在无损压缩中，只丢弃冗余信息以减少数据量。对于有损压缩，则还会根据特定应用确定的重要性标准，丢弃非冗余信息。现有技术中的大多数方法

采用变换编码、预测编码、张量分解和机器学习方法。

线性主成分分析 [4] （PCA）是用于光谱去相关的变换中广受欢迎的一种选择。[5]-[9] 将PCA用于光谱去相关，并结合离散小波变换（DWT）进行空间去相关；后者也用于JPEG2000 [10] 标准中的空间压缩。在 [11], 中，DWT同时作用于空间和光谱方向，从而得到三维离散小波变换，而 [12]则使用三维离散余弦变换 [13]（DCT），随后对离散余弦变换系数进行支持向量机回归，以实现进一步压缩。自JPEG2000标准发布以来，已有多种新的编解码器推出，这促使Kwan等人 [14] 测试J2K、X264、X265和Daala结合PCA进行MSI压缩时的性能。

Karami等人 [15] 将二维离散小波变换与小波系数三维拼接的张量分解相结合，而 [16] Zhang等人提出了一种纯张量分解方法。

在 [17]-[22], 中，采用线性 DPCM预测对多光谱图像进行压缩，其中预测器权重通常通过最小二乘法（LS）确定。带内预测使用同一频带内的像素值进行预测，而带间预测则使用先前编码频带中的像素值来预测当前频带。Toivanen等人 [18] 和 Zhang和Liu [19]尝试采用基于相关性的波段重排序，以提高带间预测性能。Li等人 [20] 采用基于相关性的 K均值聚类，获得一组参考频带，用于预测整个多光谱图像。在 [21], 中，Abrardo等人对空间上互不重叠的矩形图像块分别进行带间预测；而 Karaca 和 G¨ull¨u [22]则提出以超像素为单位进行带间预测，其中超像素通过简单线性迭代聚类算法 [23]获得。

在 [24], 中，提出采用预先确定结构的非线性多层传播网络进行带间预测；编码阶段训练得到的网络参数只需与预测误差一同传输至解码端。Deng等人在 [25] 中采用自编码器网络，直接学习从多光谱图像到自由度较少的潜在空间表示的映射，该表示构成多光谱图像的压缩版本。

本文将联合视频探索组（JVET）最新发布的视频编解码器通用视频编码（VVC） [26, 27], 应用于多光谱图像（MSI）压缩问题。在“纯”VVC方案中，采用VVC帧间预测进行光谱去相关，并调整图像组（GOP）结构，将MSI图像的光谱维度视为时间维度。该方案作为基准方案，用于与其他压缩算法进行比较。本文还测试了将VVC帧内编码与广受欢迎的主成分分析（PCA）结合进行光谱去相关的方法，称为PCA-VVC。此外，本文提出了两种新颖的自适应压缩算法，它们也采用VVC帧内编码进行空间去相关。混合主成分最小二乘法（HPCLS）采用线性带间预测，根据一组通过PCA获得的参考波段预测整个MSI。随后，使用VVC帧内编码进一步压缩预测误差和参考波段。第四种压缩算法的设计动机是

希望在压缩后的MSI文件中包含一份光谱缩放预览，以展示MSI的内容。RGB最小二乘算法（RGBLS）通过在压缩图像文件中纳入MSI的RGB表示，提供了这样的预览。该算法利用RGB基础层中包含的信息，根据RGB值预测所有MSI波段。与HPCLS类似，RGB图像和预测误差图像均采用PCA和VVC进行编码。本文利用非可扩展的PCA-VVC和HPCLS所得的实验结果，评估光谱缩放方案的性能。

本文其余部分的结构如下：第 2 节简要介绍用于评估的数据集，第 3 节随后介绍所实现的压缩算法。第 4 节介绍实验设置和评估结果，并在第 5 节中进行讨论。第 6 节总结本研究的发现，并提出未来可能的研究方向。

2 数据集

本研究使用了为 NTIRE2020 光谱重建挑战赛发布的 ARAD HS数据集 [28] 。该数据集包含 470 幅室外场景图像，亮度和色彩变化丰富。挑战赛中用作验证数据集的 10 幅图像被选用于评估本文实现的压缩算法。图 1 展示了从该数据集中选取的示例图像的 RGB 版本。每幅多光谱图像包含 31 482×512 大小的波段图像，覆盖可见光 400–700 nm 范围，波长间隔为 10 nm。每幅图像均经过裁剪，得到四幅 $256\times256\times31$ 大小的图像，以适配 VVC编码树单元大小128×128，最终共得到 40 幅评估图像。



图 1：ARAD HS数据集中的示例图像

3 方法

下文介绍的压缩算法将根据其达到的重建质量进行评估，重建质量以峰值信噪比（PSNR）衡量；压缩文件大小则以比特为单位。PSNR 的定义如下：

$$\mathrm{PSNR} = 10 \cdot \log_{10}\left(I_{\max}^2 / \mathrm{MSE}\right) [\mathrm{dB}]\,, \tag{1}$$

其中，MSE 表示均方误差，最大像素值指压缩前图像的最大像素值 $I_{\max}$。

3.1 VVC 配置

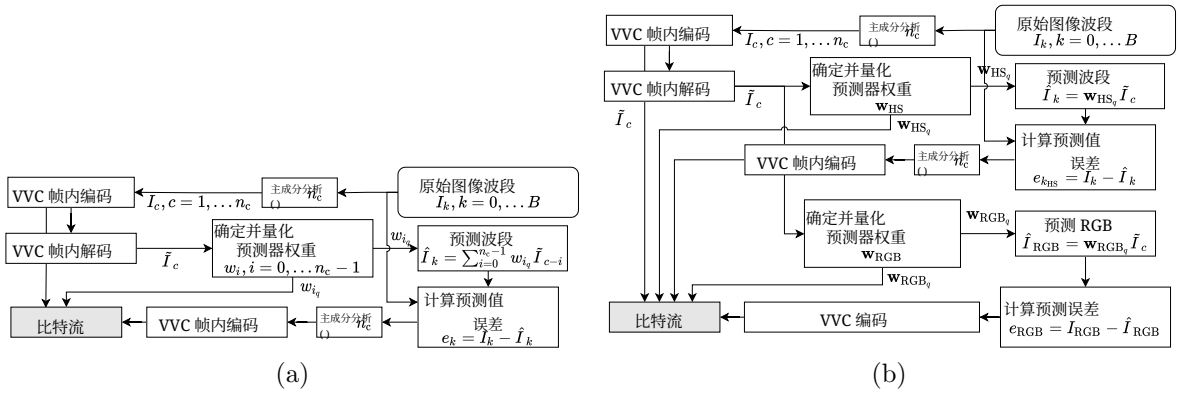
本研究使用 VVC 参考软件 [29]，并在进行 VVC 编码前将多光谱图像量化至 10 位精度。若应用需要，也可直接将这一概念扩展至更高精度（例如 12、14 或 16 位）。对多光谱图像频带进行 VVC 帧内编码时，采用默认的 VTM帧内编码器配置。通过使用 VVC 帧间编码对多光谱图像进行带间预测，我们将时间预测的概念应用于光谱去相关任务。对于多光谱图像的编码，我们对默认的 VTM随机访问配置进行了调整。该配置采用包含 32 张图像的图像组结构（GOP-32），并使用带双向预测的二叉层级结构进行编码。为适配此处使用的多光谱图像数据集，我们去掉该结构中最低层级的首尾图像，从而形成 GOP-30 结构。将首尾频带均作为关键图像（最高层级）编码后，该结构便可直接应用于多光谱图像的 31 个频带。需要注意的是，为简单起见，此处保持频带的顺序不变。除关键图像外，所有频带均使用相同的量化参数；与视频序列中的图像不同，这里假设所有频带的精确重建具有同等重要性。关键图像采用 -3 的量化参数偏移量进行编码。下文将此配置称为“普通”VVC。在一项初步实验中，与其他简单的 GOP结构相比，该配置表现出更优的压缩性能。针对多光谱图像光谱特性设计更复杂的 GOP结构，将作为后续研究课题。

3.2 PCA-VVC

PCA-VVC 描述了用于光谱去相关的 PCA 与用于空间去相关的 VVC 帧内编码的组合。PCA 应用于多光谱图像的光谱像素向量，得到由 B 2D 个主成分（PC）图像串联而成的结果，其中 B 是多光谱图像中的频带数量。编码时，仅保留代表数据中最高能量的前 n_{c} 个主成分，从而实现有损重建。PCA基向量必须与 PC 图像一同传输，以便在解码端进行重建。传输前，使用步长为 $\Delta_v{=}2^{-13}$ 的均匀量化器对PCA基向量进行量化。

3.3 HPCLS

HPCLS 的编码方案如图 2a 所示。为获得用于带间预测的参考波段，如第 3.2 节所述，对多光谱图像应用主成分分析，并保留前 n_{c} 个主成分。对于此主成分分析，n_{c} 对应参考波段的数量 n_{ref}。随后对参考波段进行 VVC 帧内编码。对于每个大小为 $S_{\mathrm{p}} \times S_{\mathrm{p}}$的空间上不重叠的方形多光谱图像块，以及每个频带，使用最小二乘法计算预测器权重 w_i，以根据解码后的参考~波段 I_c预测多光谱图像。为考虑解码端的 w_i 量化，使用量化后的 w_i进行预测，并计算预测结果与原始多光谱图像之间的预测误差。随后使用 PCA-VVC 进一步压缩生成的三维预测误差图像。



Fi图 2：(a) HPCLS 的框图。(b) HPCLS-RGB 的框图 .

压缩文件包含预测误差图像和主成分分析基向量、参考波段以及预测器权重。

3.4 HPCLS-RGB

HPCLS-RGB算法是HPCLS的可扩展扩展版本。第二组权重用于对RGB预览图进行线性预测，该预览图通过应用CIE标准观察者的光谱灵敏度从多光谱图像计算得到，方法与 [28]中相同。随后，RGB预览图的预测误差 e_{RGB} 直接使用VVC在GOP-2配置下编码，并与量化后的预测器权重$\mathbf{w}^{\mathrm{RGB}_q}$一起添加到比特流中。图2b展示了该算法的示意图。

4 实验

第3节介绍的压缩算法在第2节所述的评估数据集上，针对不同的参数配置进行了测试。为缩小参数搜索空间，首先在测试环境中运行所有算法，考察更大范围的参数设置。在测试环境中，以二维离散余弦变换替代VVC编解码器进行空间去相关，并完全通过熵计算估算压缩文件大小。预测器权重和PCA基向量也采用相同的方法。随后，针对精心选择的参数设置，使用VVC重复这些测试，结果显示其率失真行为相近。因此，以下各节中的参数预设选择依据测试结果确定。

为了获得 HPCLS 和 HPCLS-RGB 的一条率失真（RD）曲线上的各个点，在 $[5, 50]$ 范围内，VVC 帧内编码预测误差图像的主成分所用的量化参数（QP）每次增加 5。PCA-VVC 的率失真曲线则使用相同的 QP 值对多光谱图像的主成分进行帧内编码生成。随后，对整个 40幅图像评估集的结果取平均，得到最终图表。

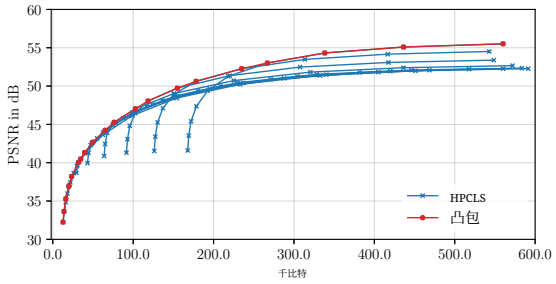


图3：在固定 $n_{\mathrm{ref}}=1$ 和 $n_{\mathrm{c}}=3$ 的情况下， q_{ref} 取不同值时的 HPCLS。较低的 q_{ref} 会使率失真曲线向右侧移动。凸包由性能最佳的率点构成。

4.1 非可伸缩自适应压缩

运行 HPCLS 时， $n_{\mathrm{ref}}\in\{1,2,3\}$，改变参考波段压缩所用的 QP$q_{\mathrm{ref}}\in[5,50]$，并改变预测误差压缩所用的主成分数量 $n_{\mathrm{c}}\in[1,6]$。运行 PCA-VVC 时，使用不同的 $n_{\mathrm{c}}\in[1,10]$。预测块大小预设为$S_p=64$。PCA基向量 v 以及 HPCLS 和 HPCLS-RGB 的预测器权重分别以 $\Delta_v=2^{-13}$ 和 $\Delta_w=2^{-12}$的步长进行量化[1]。图3展示了 HPCLS 的一个示例运行所得到的率失真图，其中仅改变了 q_{ref}，结果以蓝色绘制。为了考察编码器可能达到的最佳性能，报告了通过改变各方案的参数设置而生成的率失真点的凸包。图 4 展示了这一过程。参数自适应的设计有待进一步研究。通过这种方式，在图 4 中绘出了所有经研究的 PCA-VVC 和 HPCLS 配置的凸包率失真曲线，并与对整个多光谱图像进行“常规”VVC 编码所得的曲线进行比较。除修改过的 GOP结构外，VTM配置均保持原样。

4.2 可伸缩自适应压缩

HPCLS-RGB算法采用与HPCLS相同的参数设置运行，同时额外改变用于编码RGB预览图的QP。这样便可评估压缩方法在不同RGB预览图质量下的性能。与HPCLS的设置相同，预测器权重量化步长和预测块大小分别预设为 $\Delta_w=2^{-12}$ 和 $S_p=64$。要使HPCLS-RGB成为一种可行的可伸缩压缩方案，与直接将RGB预览图添加到非可伸缩方法生成的压缩文件中相比，它应提供更优的率失真性能。下文将后一种技术称为“同步广播”。图 5比较了不同预览图质量（以峰值信噪比衡量）下的可伸缩 HPCLS-RGB与HPCLS和PCA-VVC的同步广播版本。图中还加入了HPCLS/PCA-VVC的非可伸缩编码曲线，以说明可伸缩性功能的编码开销。请注意，HPCLS的凸包

[1]目前， w_i 和PCA基向量均采用固定长度编码，而编码开销很可能可以降低，例如通过增加熵编码阶段来实现。

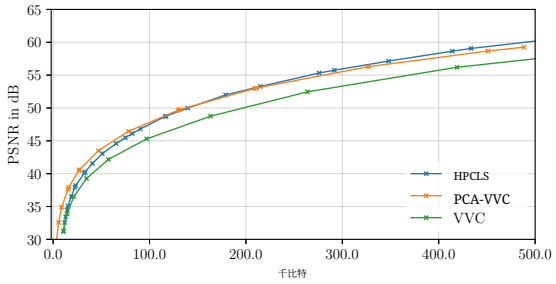


图 4：HPCLS、PCA-VVC 与“纯”VVC 的比较。

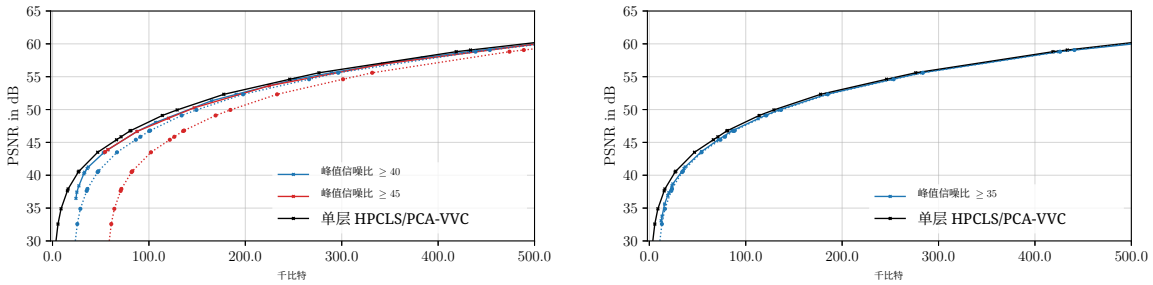


图 5：采用自适应和可扩展编码结构的同步广播 HPCLS/PCA-VVC（虚线）与 HPCLS-RGB（实线）的比较，针对 RGB 预览图的三种不同质量（35、40 和 45 dB 峰值信噪比）绘制，并与不提供预览图的单层 HPCLS/PCA-VVC 进行对比。

与PCA-VVC的凸包已合并为一条性能最佳的HPCLS/PCA-VVC曲线。

5 讨论

图 4 中绘制的结果表明，在所评估的图像集上，当重建质量高于 51 dB 峰值信噪比时，所提出的自适应 HPCLS 算法优于 PCA-VVC 方法。值得注意的是，若为 HPCLS 预测器权重开发一种熵编码方案，这一交叉点可能会显著向更低的峰值信噪比移动。因此，HPCLS 是一种可行的选择，因为多光谱图像通常用于极高质量场景。对于 30 至 60 dB 的重建质量，PCA-VVC 和 HPCLS 均优于“纯”VVC 编码。在 50 dB 时，PCA-VVC 和 HPCLS 的压缩比均约为 1:100。

与 HPCLS 和 PCA-VVC 的非可伸缩同时广播版本相比，所提出的可伸缩 HPCLS-RGB 的压缩性能取决于 RGB 预览图和重建的多光谱图像的目标质量。如图 5 所示，HPCLS-RGB 的性能显著优于同时广播配置。

6 结论

本研究将 VVC 编解码器应用于采用自适应和可扩展编码结构的多光谱图像压缩任务。研究发现，在对多光谱图像进行光谱去相关方面，主成分分析优于 VVC 帧间预测。本文提出了 HPCLS，这是一种结合变换编码与预测编码理念的新型自适应多光谱图像压缩算法；当重建质量高于 51 dB 峰值信噪比时，其性能优于结合主成分分析进行光谱压缩和 VVC 帧内编码进行空间压缩的方案。此外，本文还提出了一种自适应可伸缩方法，可提供多光谱图像内容的可独立解码 RGB 预览图。与将 RGB 预览图直接添加到非可伸缩方法生成的压缩文件中相比，该可伸缩方法的率失真性能更优。

未来在研究可扩展多光谱图像压缩时，可以重新设计预览图，以更充分地利用其中的光谱信息进行预测。例如，可以用针对压缩任务优化得更好的颜色变换的输出替代 RGB 预览图。对于 HPCLS-RGB 和 HPCLS，可以用小型多层感知机或卷积网络替代线性预测器，并针对每幅图像分别训练和传输该网络。我们还将使用其他多光谱数据集进一步评估所提出的压缩算法。

参考文献

[1] L. M. Crane, G. Themelis, R. G. Pleijhuis, N. J. Harlaar, A. Sarantopoulos, H. J. Arts, A. G. van der Zee, N. Vasilis, and G. M. van Dam，“用于宫颈癌前哨淋巴结检测的术中多光谱荧光成像：一种新概念”，《分子影像与生物学》，第 13 卷，第 5 期，第 1043–1049 页，2011年。[2] J. Qin, K. Chao, M. S. Kim, R. Lu, and T. F. Burks，“用于评估食品安全与质量的高光谱和多光谱成像”，《食品工程学报》，第 118 卷，第 2 期，第 157–171 页，2013年。[3] A. T. Hudak, P. Morgan, M. J. Bobbitt, A. M. Smith, S. A. Lewis, L. B. Lentile, P. R. Robichaud, J. T. Clark, and R. A. McKinley，“多光谱卫星影像与火灾即时影响之间的关系”，《火生态学》，第 3 卷，第 1 期，第 64–90 页，2007年。[4] I. T. Jolliffe，特殊类型数据的主成分分析。Springer，2002年。[5]R. Nagendran and A. Vasuki，“采用混合变换和不同基于小波的变换编码进行高光谱图像压缩”，《国际小波、多分辨率与信息处理期刊》，第 18 卷，第 01 期，文章编号 1941008，2020年。[6] Q. Du, W. Zhu, H. Yang, and J. E. Fowler，“用于高光谱影像并行压缩的分段主成分分析”，《*IEEE* 地球科学与遥感快报》，第 6 卷，第 4 期，第 713–717 页，2009年。[7] Q. Du and J. E. Fowler，“使用 JPEG2000 和主成分分析进行高光谱图像压缩”，《*IEEE* 地球科学与遥感快报》，第 4 卷，第 2 期，第 201–205 页，2007年。[8] S. Mei, B. M. Khan, Y. Zhang, and Q. Du，“使用折叠主成分分析和 JPEG2000 进行低复杂度高光谱图像压缩”，载于*IGARSS 2018-2018 IEEE* 国际地球科学与遥感研讨会。IEEE，2018年，第 4756–4759 页。

[9] P. L. Dragotti, G. Poggi, and A. R. Ragozini, “采用三维 SPIHT 算法压缩多光谱图像”，*IEEE* 地球科学与遥感汇刊，第 38 卷，第 1 期，第 416–428 页，2000年。[10] M. Rabbani，“JPEG2000：图像压缩基础、标准与实践”，《电子成像杂志》，第 11 卷，第 2 期，文章编号 286，2002年。[11] X. Tang and W. A. Pearlman，“基于三维小波的高光谱图像压缩”，载于《高光谱数据压缩》。Springer，2006年，第 273–308 页。[12] A. Karami, S. Beheshti, and M. Yazdi，“利用三维离散余弦变换和支持向量机学习进行高光谱图像压缩”，载于*2012* 年第 *11* 届信息科学、信号处理及其应用国际会议（*ISSPA*）。IEEE，2012年，第 809–812 页。[13] N. Ahmed, T. Natarajan, and K. Rao，“离散余弦变换”，*IEEE* 计算机汇刊，第 C-23 卷，第 1 期，第 90–93 页，1974 年 1 月。[14] C. Kwan, J. Larkin 等，“高光谱图像感知无损压缩的新成果”，《信号与信息处理杂志》，第 10 卷，第 03 期，文章编号 96，2019 年。[15] A. Karami, M. Yazdi, and G. Mercier，“利用离散小波变换和 Tucker 分解压缩高光谱图像”，*IEEE* 应用地球观测与遥感专题期刊，第 5 卷，第 2 期，第 444–450 页，2012年。[16] L. Zhang, L. Zhang, D. Tao, X. Huang, and B. Du，“采用张量方法压缩高光谱遥感图像”，《神经计算》，第 147 卷，第 358–363 页，2015 年。[17] M. A. Klimesh，“ 通过自适应滤波实现低复杂度高光谱影像无损压缩”，帕萨迪纳，NASA 喷气推进实验室，技术报告 42-163，2005年。[18]P. Toivanen, O. Kubasova, and J. Mielikainen，“用于高光谱探测仪数据无损压缩的基于相关性的波段排序启发式方法”，《*IEEE* 地球科学与遥感快报》，第 2 卷，第 1 期，第 50–54 页，2005年。[19] J. Zhang and G. Liu，“一种面向高光谱图像的高效重排序预测式无损压缩算法”，《*IEEE* 地球科学与遥感快报》，第 4 卷，第 2 期，第 283–287 页，2007年。[20] R. Li, Z. Pan, and Y. Wang，“用于高光谱图像压缩的线性预测矢量量化”，《多媒体工具与应用》，第 78 卷，第 9 期，第 11 701–11 718 页，2019年。[21] A. Abrardo, M. Barni, and E. Magli，“高光谱和超光谱图像的低复杂度预测有损压缩”，载于*2011*年 *IEEE* 声学、语音与信号处理国际会议（*ICASSP*）。IEEE，2011年，第 797–800 页。[22] A. C. Karaca and M. K. G¨ull¨u，“用于高光谱图像无损压缩的基于超像素的递归最小二乘法”，《多维系统与信号处理》，第 30 卷，第 2 期，第 903–919 页，2019 年。[23] R. Achanta, A. Shaji, K. Smith, A. Lucchi, P. Fua, and S. S¨usstrunk，“SLIC 超像素”，洛桑联邦理工学院，技术报告 149300，2010年。[24]R. Dusselaar and M. Paul，“一种用于高光谱图像压缩、采用多层传播神经网络的基于块的波段间预测器”，*arXiv* 预印本 *arXiv:1902.04191*，2019年。[25] C. Deng, Y. Cen, and L. Zhang，“通过生成式神经网络实现基于学习的高光谱影像压缩”，《遥感》，第 12 卷，第 21 期，文章编号 3657，2020年。[26] B. Bross, Y.-K. Wang, Y. Ye, S. Liu, J. Chen, G. J. Sullivan, and J.-R. Ohm，“通用视频编码（VVC）标准及其应用综述”，第 31 卷，第 10 期，第 3736–3764 页。

[27]国际电信联盟电信标准化部门和 ISO/IEC JTC 1，《通用视频编码》，ITU-T H.266 建议书和 ISO/IEC 23090-3（VVC），技术报告，2020年 8 月。 [在线]。获取地址：https://www.itu.int/rec/T-REC-H.266[28]B. Arad、R. Timofte、O. Ben-Shahar、Y.-T. Lin 和 G. D. Finlayson，《NTIRE 2020 挑战赛：从 RGB 图像进行光谱重建》，载于 *IEEE/CVF* 计算机视觉与模式识别会议研讨会论文集，2020年，第 446–447 页。[29] “VVC 参考软件 VTM 15.0。” [在线]。获取地址：https://vcgit.hhi.fraunhofer.de/jvet/VVCSoftware VTM/-/tree/VTM-15.0