

Применение алгоритма CCSDS-123.0-B-2 для сжатия гиперспектральных изображений

Я. Д. Скобелев

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

yadskobelev@stud.etu.ru

Аннотация. В статье рассмотрен метод сжатия CCSDS-123.0-B-2 гиперспектральных изображений на основе предсказания. Был проведён анализ и сравнение сжатия с различными параметрами. В качестве метрик использовались средняя квадратичная ошибка; пиковое отношение сигнала к шуму; количество бит на пиксель на канал; метод сопоставления спектральных углов.

Ключевые слова: гиперспектральные системы; гиперспектральное изображение; гиперспектральный анализ; сжатие гиперспектральных изображений; CCSDS-123.0-B-2

I. ВВЕДЕНИЕ

Гиперспектральный анализ представляет большой интерес для исследований. Благодаря спектральному разрешению, большему, чем у снимков с обычных камер, становится возможным анализировать состав объектов и состояние живой материи. Гиперспектральные сенсоры могут собирать данные за пределами видимости человеческого зрения, они собирают значения отражательной способности объектов для разных длин волн в разных диапазонах, образуя куб данных, анализ которого полезен во многих приложениях.

Одной из основных проблем гиперспектральной съёмки является большой объём формируемых снимков, усложняет задачу хранения и передачи архивов. Эта проблема становится особенно заметной при работе с сериями снимков и длительными экспериментами. В связи с этим особый интерес представляют методы сжатия, позволяющие уменьшить объём хранимых данных без существенных потерь спектральной и пространственной информации.

К примеру, снимок в пространственном размере 1024 на 1130 пикселей в 224 каналах с представлением пикселя как шестнадцатитбитное положительное число занимает 494,38 МиБ.

Целью данной работы является проведение детального сравнительного анализа различных параметров алгоритма сжатия CCSDS-123.0-B-2 гиперспектральных изображений на основе предсказания значения пикселей. Для испытаний были использованы снимки планарий (рис. 1) в пространственном размере 1024 на 1130 пикселей в 224 каналах и снимки тканей курицы и свиньи (рис. 2) в 224 каналах в пространственном размере 1024 на 2704 пикселей, снятые на гиперспектральную камеру Specim FX10e [1], разрядность АЦП 12 бит и далее представленные в формате беззнаковых шестнадцатитбитных целых чисел.

В качестве метрик были выбраны [3]:

- bits per pixel per band (BPPPB) — количество бит на пиксель на канал;

- root mean square error (RMSE) — среднеквадратическое отклонение;
- peak signal-to-noise ratio (PSNR) — пиковое отношение сигнала к шуму;
- spectral angle mapper (SAM) — метод сопоставления спектральных углов.

Выбор вышеописанных метрик обусловлен необходимостью оценить эффективность сжатия и качество восстановления гиперспектральных данных. Метрики RMSE и PSNR характеризуют уровень искажений восстановленного изображения в терминах отклонения числовых значений пикселей от исходных.

В работе рассматриваются режимы сжатия без потерь и с контролируемыми потерями. Для сжатия с потерями изменялся параметр Absolute Error Limit (AEL) — предел абсолютной ошибки. Исследование проводилось для значений AEL=3 и AEL=6, а также для первых пятнадцати каналов было задано AEL=15 и AEL=30.

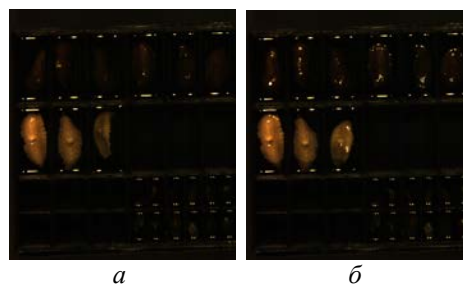


Рис. 1. Снимки планарий: а) снимок 1; б) снимок 2

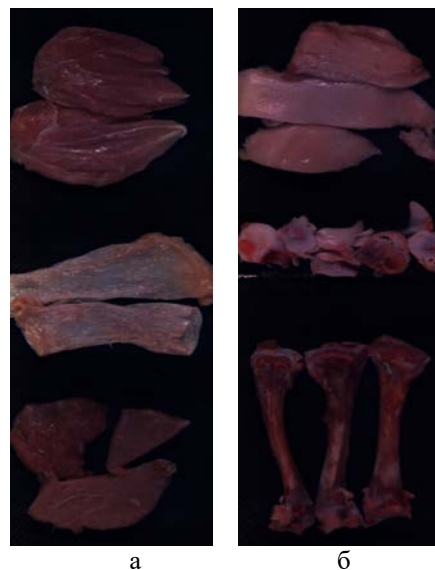


Рис. 1. Снимки тканей курицы и свиньи а) снимок 1; б) снимок 2

II. РАССМОТРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СЖАТИЯ CCSDS-123.0-B-2

Алгоритмы сжатия на основе предсказания основываются на предсказании значения пикселя по соседним и энтропийном сжатии ошибки предсказания. Эффективность таких методов определяется коррелированностью данных, так для коррелированных данных ошибка предсказания имеет меньший размер.

A. Сжатие без потерь

CCSDS (Consultative Committee for Space Data Systems) – консультативный комитет по системам космических данных. Выпустил стандарт сжатия CCSDS-123.0-B-2 [3] описывающий сжатие без потерь и с минимальными потерями. CCSDS-123.0-B-2 основан на адаптивном предсказании и энтропийном кодировании ошибок предсказания. Для каждого пикселя прогнозируется значение на основе пространственных соседей и предыдущих спектральных каналах, после чего вычисляется остаток между реальным и предсказанным значением. Полученная последовательность остатков затем кодируется адаптивным энтропийным кодером (sample-adaptive, hybrid или block-adaptive). Для сжатия с потерями было использовано фиксированное значение предела абсолютной ошибки (зависимый от канала) (AEL) одинаковый для каждого канала.

ТАБЛИЦА I.

Снимок	BPPPB
Планарии 1 без потерь	5,118
Планарии 2 без потерь	5,032
Ткани 1 без потерь	4,586
Ткани 2 без потерь	4,541

Для исследованных изображений значение BPPPB находится в диапазоне от 4,541 до 5,118, а среднее значение по всем четырём снимкам составляет 4,819. Для снимков тканей значения BPPPB оказались ниже, чем для снимков планарий, что может следовать из большей предсказуемости данных.

B. CCSDS-123.0-B-2 с потерями с пределом абсолютной ошибки.

Для сжатия с потерями было использовано фиксированное значение предела абсолютной ошибки (зависимый от канала) (AEL) одинаковый для каждого канала.

ТАБЛИЦА II.

Снимок	BPPPB	RMSE	SAM	PSNR
AEL=3	2,154			
Планарии 1	2,485	1,999	0,266	90,309
Планарии 2	2,394	1,999	0,277	90,309
Ткани 1	1,886	1,998	0,159	90,313
Ткани 2	1,850	1,998	0,156	90,314
AEL=6	1,458			
Планарии 1	1,753	3,726	0,496	84,905
Планарии 2	1,690	3,724	0,515	84,908
Ткани 1	1,210	3,659	0,290	85,061
Ткани 2	1,178	3,651	0,285	85,081

Результаты испытаний показывают, что даже небольшое увеличение предела абсолютной ошибки позволяет существенно снизить объём сжатых данных. При использовании AEL=3 среднее значение BPPPB по всем изображениям составляет 2,154, тогда как для режима без потерь оно равно 4,819. Использование

AEL=3 влечёт сравнительно малое ухудшение метрик качества, что делает такой режим потенциально подходящим для задач, где требуется сохранить информативность данных для последующей обработки. Переход к сжатию с малыми потерями позволяет уменьшить средний объём сжатых данных более чем в два раза.

При дальнейшем увеличении параметра AEL до 6 достигается ещё показатель BPPPB, равный 1,458. Однако увеличение степени сжатия сопровождается ухудшением показателей качества восстановления, средние значения RMSE и SAM возрастают, среднее значение PSNR уменьшается.

C. CCSDS-123.0-B-2 с повышенным пределом абсолютной ошибки для выбранных каналов

Важность целостности информации в некоторых каналах может быть низкой. Если хранить меньше информации из них, можно уменьшить объём сжатого изображения. Для опыта были выбраны следующие параметры: для первых 15 каналов был выбран одно значение параметра AEL(AELF), для остальных каналов было выбрано другое значение параметра AEL(AELR). При этом метрики RMSE, SAM и PSNR для сжатия с разными AELF и AELR вычислялись только для последних 209 каналов. Таким образом, эти показатели характеризуют целостность не всего гиперспектрального изображения, а только той части каналов, что несёт в себе наиболее важную информацию.

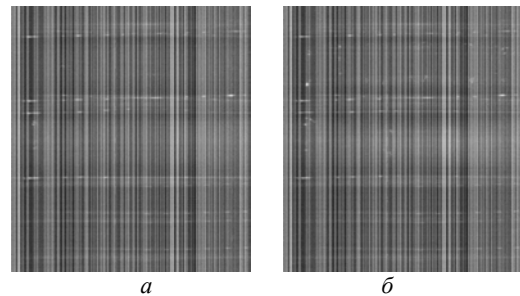


Рис. 2. Первый канал снимков планарий: а) снимок 1; б) снимок 2

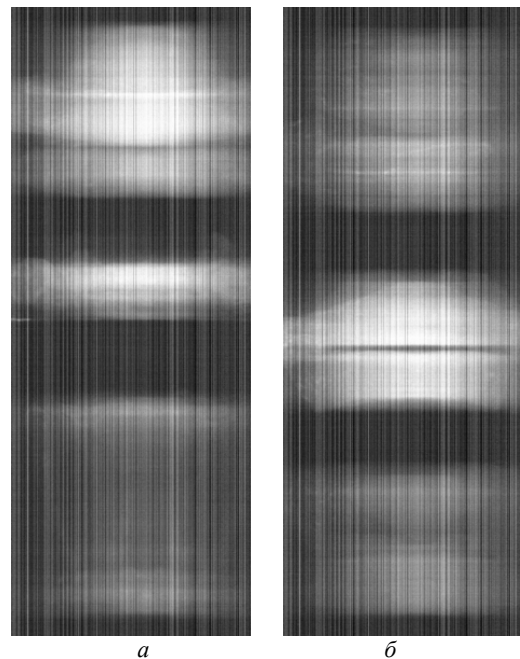


Рис. 2. Первые каналы снимков тканей курицы и свиньи а) снимок 1; б) снимок 2

ТАБЛИЦА III.

Снимок	BPPPВ	RMSE	SAM	PSNR
AELF=15; AELR=3	2,068			
Планарии 1	2,401	2,861	0,381	87,199
Планарии 2	2,310	2,859	0,396	87,205
Ткани 1	1,799	2,595	0,256	88,045
Ткани 2	1,763	2,601	0,168	88,028
AELF=15; AELR=6	1,414			
Планарии 1	1,709	4,172	0,556	83,921
Планарии 2	1,646	4,169	0,579	83,927
Ткани 1	1,165	3,948	0,391	84,401
Ткани 2	1,133	3,957	0,256	84,382
AELF=30; AELR=3	2,049			
Планарии 1	2,375	4,083	0,399	84,111
Планарии 2	2,285	4,080	0,561	84,116
Ткани 1	1,786	3,399	0,331	85,699
Ткани 2	1,749	3,510	0,226	85,422
AELF=30; AELR=6	1,394			
Планарии 1	1,684	5,088	0,676	82,198
Планарии 2	1,621	5,085	0,703	82,203
Ткани 1	1,151	4,518	0,444	83,231
Ткани 2	1,120	4,606	0,298	83,062

Повышение AEL для первых 15 каналов показал, что изменение этого параметра даёт дополнительное увеличение степени сжатия, однако небольшое, таким образом, при AELR=3 и AELF=15, AELF=30 средний показатель BPPPВ по четырём снимкам равен 2,068 и 2,049 соответственно, что незначительно ниже результата для AEL=3, равного 2,154. Аналогичный вывод можно сделать для AELR=6 и AELF=15, AELF=30. Это показывает, что для улучшения степени сжатия необходимо отбрасывать больше информации из первых каналов.

Также метрики качества, вычисленные для последних 209 каналов, претерпели деградацию, это показывает, что уменьшение хранимой информации для первых каналов уменьшает точность предсказания оставшихся каналов. Это явление можно объяснить тем, что в алгоритмах предсказательного сжатия ранние спектральные каналы могут влиять на точность прогнозирования последующих. Даже если первые каналы имеют меньшую контрастность, они всё равно учитываются для формирования предсказания и задают часть спектрального контекста, поэтому увеличение предела допустимой ошибки в этих каналах может приводить к потере точности не только в них, а ещё и в дальнейших каналах.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённое исследование показало, что алгоритм CCSDS-123.0-B-2 сжимает гиперспектральные изображения без потерь в среднем до 4,819 бит на пиксель на канал, что позволяет использовать этот алгоритм сжатия для задач хранения архивов. Увеличение AEL до 3 позволило уменьшить средний объём до 2,154 бит на пиксель на канал при сохранении высоких значений PSNR и низких значений SAM, а увеличение AEL до 6 позволило уменьшить средний объём до 1,458 бит на пиксель на канал, уменьшив значение PSNR и увеличив значение SAM, что требует учёта допустимого уровня искажений в зависимости от прикладной задачи. Для задач визуального хранения такой режим может быть приемлемым.

Увеличение AEL для каналов с низкой контрастностью не дало большого прироста в степени сжатия при AEL для последних каналов равным 3 и при AEL равном 15 и 30 для первых 15 каналов, средний объём составил 2,068 и 2,049 бит на пиксель на канал соответственно, при AEL равном 6 для последних каналов и AEL равном 15, коэффициент сжатия даже ухудшился, и составил 1,414 бит на пиксель на канал, при AEL 30 для первых 15 каналов средний объём составил 1,394 бит на пиксель на канал. Таким образом проведённые испытания показали, что выборочное повышение предела абсолютной ошибки для первых 15 каналов может в отдельных случаях позволять повысить степень сжатия, но этот эффект зависит от изображения и конкретного сочетания параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Specim FX10 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.specim.com/products/specim-fx10/> (дата обращения: 02.04.2026).
- [2] Chen C., Wang Y., Zhang N., Zhang Y., Zhao Z. A Review of Hyperspectral Image Super-Resolution Based on Deep Learning [Электронный ресурс] // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15, no. 11. Art. 2853. URL: <https://www.mdpi.com/2072-4292/15/11/2853> (дата обращения: 02.04.2026).
- [3] Low-Complexity Lossless and Near-Lossless Multispectral and Hyperspectral Image Compression [Электронный ресурс]. CCSDS 123.0-B-2. Washington, DC, 2019. URL: <https://ccsds.org/Pubs/123x0b2e2c3.pdf> (дата обращения: 02.04.2026).