

Спектральная реконструкция гиперспектральных изображений с помощью интерполяционных методов

Д. Р. Шаривзянов*, Д. Ю. Гоношилкин

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

*sonderyx@ya.ru

Аннотация. В работе рассмотрены методы спектральной реконструкции гиперспектральных изображений с целью увеличения их спектрального разрешения. Рассмотрены различные интерполяционные методы для определения неизвестных значений спектральных отсчётов изображения. Проведена оценка качества интерполяции на основе метрик RMSE, PSNR, SSIM и SAM.

Ключевые слова: гиперспектральная система, гиперспектральное изображение, спектральная реконструкция, спектральное разрешение, интерполяция, сплайн

I. ВВЕДЕНИЕ

Гиперспектральный анализ представляет собой технологию, объединяющую классические методы формирования изображений в сочетании со спектроскопией, что позволяет одновременно измерять пространственную и спектральную информацию об объектах. Данная технология активно используется в задачах распознавания и классификации объектов, которые невозможно различить с помощью традиционных цветных телевизионных камер.

Однако гиперспектральные системы с высоким спектральным разрешением, определяемым количеством спектральных каналов, и пространственным разрешением, характеризуемым количеством пикселей, обладают высокой стоимостью из-за высоких требований к технологическим процессам их производства, что существенно ограничивает их применение. В связи с этим одной из ключевых областей исследований стала разработка методов пространственной и спектральной реконструкции гиперспектральных изображений, направленных на увеличение их пространственного и спектрального разрешения, которое может расширить область применения данной технологии, увеличивая качество гиперспектральных изображений (ГСИ) без повышения аппаратных требований к системе [1, 2, 3, 4].

Одним из ключевых этапов обработки гиперспектральных изображений, влияющим на точность пространственной и спектральной реконструкции, является калибровка. Корректная калибровка гиперспектральных данных необходима для приведения измеренных значений к физически обоснованным величинам, а также для минимизации спектральных искажений, что особенно критично при применении алгоритмов реконструкции.

II. КАЛИБРОВКА ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Процедура калибровки гиперспектральных изображений играет ключевую роль в обеспечении точности спектральных данных, что особенно важно при последующей интерполяции и реконструкции спектральных характеристик. Без предварительной коррекции спектральных смещений и других искажений применение методов восстановления спектрального разрешения может приводить к накоплению ошибок. Среди основных этапов калибровки можно выделить следующие:

- радиометрическая калибровка – необходима для коррекции чувствительности фотоприёмника, устранения неравномерности освещения и конвертации измеренных значений в физические величины (например, коэффициент отражения);
- геометрическая калибровка – необходима для коррекции оптических аберраций, таких как трапецеидальное искажение (keystone) и искажению типа улыбка (smile), вызванных не идеальностью оптической схемы прибора [5];
- спектральная калибровка – необходима для коррекции спектрального смещения, вызванного неравномерной дискретизацией спектральных отсчётов из-за особенностей диспергирующей оптической схемы и механическим смещением узлов оптической схемы из-за допусков при изготовлении прибора [6].

Целью данной работы является сравнительный анализ различных алгоритмов интерполяции, применяемых при спектральной калибровке ГСИ. В частности, рассматриваются методы, которые могут быть использованы для спектральной реконструкции – увеличения спектрального разрешения путем восстановления спектральных значений в промежуточных спектральных каналах. Основной задачей исследования является определение наиболее эффективного алгоритма интерполяции, обеспечивающего минимальные ошибки при реконструкции ГСИ.

III. ИНТЕРПОЛЯЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ПРИ СПЕКТРАЛЬНОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ

Для спектральной реконструкции используются математические методы, позволяющие рассчитать неизвестные значения коэффициентов отражения объекта в интересующих спектральных каналах на основе

информации в ближайших измеренных каналах. Для использования классических алгоритмов интерполяции необходимо 2 допущения:

- первое допущение о чётности всех функций, описывающих спектральные характеристики каждого спектрального канала;
- второе допущение об эквивалентности, в частности, равенстве полуширин (FWHM) всех функций, описывающих спектральные характеристики каждого спектрального канала.

Данные допущения позволяют соседним спектральным отсчётам быть изотропно коррелированными относительно друг друга, другими словами, влияние спектральных каналов $n+1$ и $n-1$ на канал n можно считать равновесным (рис. 1).

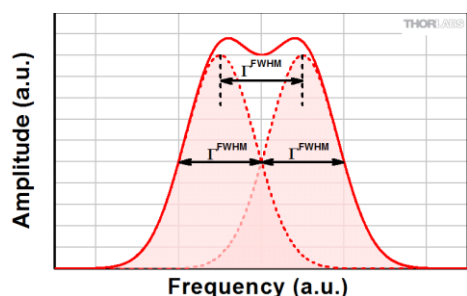


Рис. 1. Наложение чётных квазигaussian-спектральных характеристик двух соседних спектральных каналов [7], характерных для систем на основе призм

В контексте формирования гиперспектральных изображений с помощью методов линейного сканирования, подразумевающих использование диспергирующих оптических элементов, таких как дифракционная решётка и призма, распределение интенсивности падающего света на пиксели фотоприёмника описывается дисперсионным уравнением дифракционной решётки и призмы соответственно, причём данные уравнения зачастую используют квазигaussian-распределение и распределение кардинального синуса (sinc).

Интерполяционные методы классифицируются на глобальные и локальные в зависимости от количества используемых опорных точек.

Глобальные методы позволяют построить единую аппроксимирующую функцию, использующую все доступные опорные точки. Глобальные методы обеспечивают гладкость интерполанта и минимизацию глобальной ошибки, что делает их эффективными для регулярных и гладких зависимостей. Однако их применение к реальным данным, особенно при больших объёмах, может приводить к чрезмерной сглаженности при малых степенях полиномиальной функции, или, наоборот, к численной неустойчивости и осцилляциям, как, например, эффект Рунге при полиномиальной интерполяции больших степеней [8]. В контексте гиперспектральных данных, где спектральные характеристики объектов могут быть немонотонными и содержать резкие изменения и выбросы, обусловленные, в том числе, спектральным поглощением среды при распространении света, глобальные методы зачастую не обеспечивают значительного качества интерполяции. Это снижает их практическую применимость для решения поставленной задачи.

Локальные методы, напротив, используют ограниченное число ближайших опорных точек при вычислении значения в интерполируемой точке. Это позволяет лучше адаптироваться к локальным особенностям данных, что особенно важно при анализе сложных и нестационарных спектральных зависимостей. Локальные методы позволяют сохранить физическую достоверность спектральной формы, учитывая резкие изменения или плавные переходы между соседними диапазонами длин волн. Несмотря на возможные недостатки, такие как разрывы гладкости или повышенная чувствительность к шуму, локальные методы обладают большей релевантностью для решения поставленной задачи.

IV. ЭКСПЕРИМЕНТ

Для нахождения оптимального алгоритма интерполяции был проведён эксперимент, методика которого указана на рис. 2. Исходными данными являются 4 ГСИ тестовых объектов (рис. 3), полученных с помощью гиперспектральной камеры Specim FX10. Дискретизация спектральных каналов используемой камеры является квазиравномерной и, для упрощения расчётов, считается равномерной.



Рис. 2. Методика эксперимента

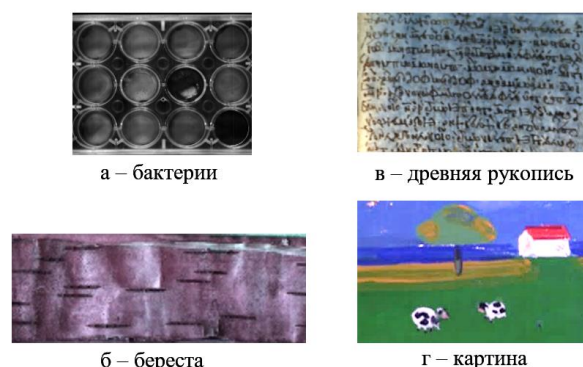


Рис. 3. Тестируемые объекты

Первым этапом эксперимента является децимация спектральных каналов эталонного изображения с помощью удаления каждого чётного спектрального канала. Вторым этапом является расчёт прореженных значений с помощью различных интерполяционных методов – было выбрано 14 различных методов, представленных на рис. 4.

Третий этап представляет собой расчёт ошибок – отклонения предсказанных значений от эталонных. В качестве метрик ошибок были выбраны:

- root mean square error (RMSE) – среднеквадратическое отклонение;
- peak signal-to-noise ratio (PSNR) – пиковое отношение сигнала к шуму;

- structural similarity index measure (SSIM) – индекс структурного сходства;
- spectral angle mapper (SAM) – метод сопоставления спектральных углов.

На основе рассчитанных ошибок для каждого тестируемого ГСИ и для каждого интерполяционного метода были составлены табл. 1–4.

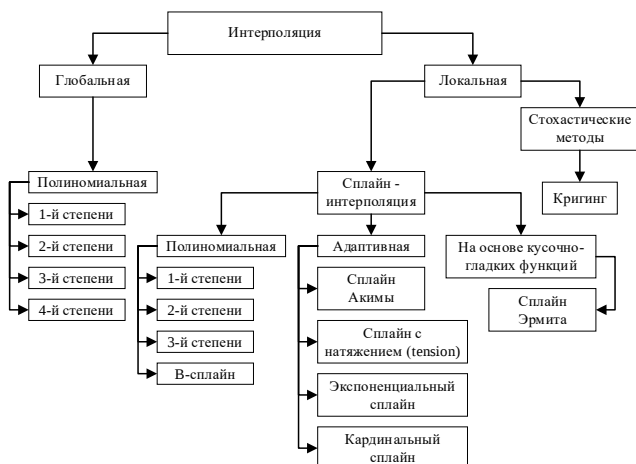


Рис. 4. Типология используемых интерполяционных методов

ТАБЛИЦА I. БАКТЕРИИ

Метод	RMSE	PSNR	SSIM	SAM	Время расчёта, сек
Полиномиальный 1-й степени	243,93	24,50	0,5165	0,3220	52
Полиномиальный 2-й степени	71,05	35,21	0,6147	0,0909	39
Полиномиальный 3-й степени	69,12	35,45	0,6251	0,0880	40
Полиномиальный 4-й степени	27,91	43,33	0,6589	0,0378	38
Сплайн 1-й степени	6,92	55,44	0,8338	0,0128	17
Сплайн 2-й степени	69,92	35,35	0,6259	0,0941	176
Сплайн 3-й степени	6,86	55,51	0,8254	0,0132	90
В-Сплайн	29,44	42,87	0,6704	0,0481	216
Сплайн Акимы	6,70	55,72	0,8308	0,0126	43
Сплайн с натяжением	6,64	55,80	0,8263	0,0128	143
Экспоненциальный сплайн	6,86	55,52	0,8255	0,0132	128
Кардинальный сплайн	6,77	55,63	0,8253	0,0130	274
Сплайн Эрмита	6,79	55,60	0,8305	0,0127	49
Кринг	22,8	45,09	0,6797	0,0328	11281

ТАБЛИЦА II. БЕРЕСТА

Метод	RMSE	PSNR	SSIM	SAM	Время расчёта, сек
Полиномиальный 1-й степени	595,8	16,74	0,7843	0,2650	60
Полиномиальный 2-й степени	317,3	22,21	0,8389	0,1286	62
Полиномиальный 3-й степени	238,2	24,71	0,8743	0,1031	62
Полиномиальный 4-й степени	229,7	25,02	0,8852	0,0997	64
Сплайн 1-й степени	20,0	46,23	0,9579	0,0093	28
Сплайн 2-й степени	235,4	24,81	0,8775	0,1022	292
Сплайн 3-й степени	14,6	48,96	0,9535	0,0069	151
В-Сплайн	221,8	25,32	0,8944	0,0964	359
Сплайн Акимы	16,7	47,77	0,9559	0,0079	71
Сплайн с натяжением	14,4	49,09	0,9544	0,0068	238

Метод	RMSE	PSNR	SSIM	SAM	Время расчёта, сек
Экспоненциальный сплайн	14,6	48,94	0,9536	0,0069	214
Кардинальный сплайн	16,0	48,19	0,9538	0,0075	454
Сплайн Эрмита	17,6	47,31	0,9559	0,0083	82
Кринг	49,7	38,33	0,9271	0,0231	27508

ТАБЛИЦА III. ДРЕВНЯЯ РУКОПИСЬ

Метод	RMSE	PSNR	SSIM	SAM	Время расчёта, сек
Полиномиальный 1-й степени	513,3	18,04	0,7233	0,3075	17
Полиномиальный 2-й степени	192,0	26,58	0,7884	0,1346	17
Полиномиальный 3-й степени	159,3	28,20	0,8370	0,1104	17
Полиномиальный 4-й степени	152,8	28,56	0,8575	0,1048	18
Сплайн 1-й степени	15,7	48,35	0,9420	0,0115	7
Сплайн 2-й степени	162,0	28,06	0,8375	0,1144	82
Сплайн 3-й степени	11,3	51,21	0,9374	0,0091	42
В-Сплайн	153,5	28,53	0,8610	0,1074	98
Сплайн Акимы	13,2	49,85	0,9403	0,0100	19
Сплайн с натяжением	11,2	51,28	0,9386	0,0089	68
Экспоненциальный сплайн	11,3	51,20	0,9373	0,0091	59
Кардинальный сплайн	12,0	50,67	0,9382	0,0095	126
Сплайн Эрмита	153,5	28,53	0,8610	0,1074	98
Кринг	43,2	39,53	0,8969	0,0267	7569

ТАБЛИЦА IV. КАРТИНА

Метод	RMSE	PSNR	SSIM	SAM	Время расчёта, сек
Полиномиальный 1-й степени	249,8	24,29	0,4963	0,2621	10
Полиномиальный 2-й степени	185,1	26,90	0,5504	0,1929	10
Полиномиальный 3-й степени	135,9	29,58	0,5763	0,1557	11
Полиномиальный 4-й степени	113,1	31,17	0,6027	0,1247	10
Сплайн 1-й степени	6,8	55,61	0,8692	0,0104	6
Сплайн 2-й степени	125,7	30,26	0,5834	0,1505	46
Сплайн 3-й степени	7,0	55,33	0,8638	0,0110	27
В-Сплайн	71,4	35,17	0,6339	0,0882	57
Сплайн Акимы	6,8	55,61	0,8680	0,0105	13
Сплайн с натяжением	6,9	55,42	0,8649	0,0108	38
Экспоненциальный сплайн	7,0	55,34	0,8639	0,0110	36
Кардинальный сплайн	7,0	55,34	0,8646	0,0110	120
Сплайн Эрмита	6,8	55,58	0,8677	0,0105	15
Кринг	11,9	50,75	0,7035	0,0172	18080

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе результатов можно сделать вывод, что оптимальными интерполяционными методами для задачи увеличения спектрального разрешения гиперспектрального изображения по критерию минимизации ошибок является сплайн с натяжением, однако он требует больших вычислительных затрат. По критерию скорости вычисления с несущественным уменьшением качества оптимальными являются полиномиальный сплайн 1-й степени и сплайн Акимы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Zhou, H., Liu, Z., Huang, Z., Wang, X., Su, W., Zhang, Y. ICTH: Local-to-global spectral reconstruction network for heterosource hyperspectral images // Remote Sensing. 2024. T. 16. №. 18. C. 3377.
- [2] Fsian AN., Thomas J.B., Hardeberg J.Y., Gouton P. Spectral Reconstruction from RGB Imagery: A Potential Option for Infinite Spectral Data? // Sensors. 2024. T. 24. №. 11. C. 3666.
- [3] Lin Y. T., Finlayson G. D. Physically plausible spectral reconstruction from RGB images // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops. 2020. C. 532-533.
- [4] Cao, X., Lian, Y., Liu, Z., Li, J., Wang, K. Unsupervised spectral reconstruction from RGB images under two lighting conditions // Optics Letters. 2024. T. 49. №. 8. C. 1993-1996.
- [5] Smile and keystone / Specim technical note. URL: <https://www.specim.com/smile-and-keystone/> (дата обращения 10.02.2025).
- [6] Automatic Image Enhancement and Unified Spectral Calibration / Specim technical note. URL: <https://www.specim.com/aie-and-spectral-calibration/> (дата обращения 10.02.2025).
- [7] Fabry-Perot Interferometer Tutorial / Thorlabs technical resources. URL: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=9021 (дата обращения 10.02.2025).
- [8] Runge C. Über empirische Funktionen und die Interpolation zwischen äquidistanten Ordinaten // Zeitschrift für Mathematik und Physik. 1901. T. 46. №. 224-243. C. 20.