

ПСЕВДОИНВЕРСНАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОЙ ФОТОСЪЁМКИ В СТАЦИОНАРНЫХ ЗОНАХ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Сыдыхов А.Ш., Арапов С.Ю., Арапова С.П., Сергеев А.П.

ФГАОУ ВПО УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина Институт радиоэлектроники и информационных технологий – РТФ

Рассматривается вопрос точности простейшего псевдоинверсного метода обработки для реконструкции спектров отражения из экспериментальных данных в мультиспектральной фотосъёмке. В качестве основы получаемых решений применяется функциональный базис на основе функций типа интеграла ошибок. Данный подход позволяет отказаться от трудоёмкого предварительного исследования оригинала с помощью спектрофотометра. Приводится сравнение с традиционным методом на основе базиса главных компонент по количественным показателям точности решения. Приведено обоснование применимости псевдоинверсного метода для стационарных зон изображений. Показано, что получаемые решения могут обладать высокой точностью и применяться для решения практических задач.

Ключевые слова: мультиспектральная съёмка, поглощающие светофильтры, спектральная характеристика, спектрофотометр.

PSEUDOINVERSE DATA PROCESSING IN MULTISPECTRAL PHOTOGRAPHY FOR STATIONARY IMAGE AREAS

Sydykov A.W., Arapov S.Y., Arapova S.P., Sergeev A.P.

Examines the accuracy of a simple pseudoinverse processing method for reconstruction of reflectance spectra from the experimental data in multispectral photography. As the basis of the obtained solutions is applied functional basis based on the function type of Error function. This approach eliminates time-consuming preliminary study of the original with a spectrophotometer. Comparison with the traditional method on the basis of principal components for the quantitative indicators of the accuracy of the solution. Explain the rationale for the applicability of the pseudoinverse method for stationary areas of the image. The obtained solution can have a high accuracy and can be used to solve practical problems.

Keywords: multispectral imagery, absorbing filters, spectral response, spectrophotometer.

Введение

Технология мультиспектральной фотосъёмки с помощью стандартных трихроматических цифровых фотокамер и дополнительных светофильтров широко применяется в задачах репродуцирования изображений с конца 90-х годов. по настоящее время. С основными методами и результатами можно ознакомиться в многочисленных зарубежных работах, например, [6, 8–12]. Сложились общие подходы — использование линейной модели формирования регистрируемых экспериментальных данных, описание множества допустимых решений методом главных компонент, применение различные методов фильтрации для повышения устойчивости реконструкции спектров отражения. Следует отметить, что получение базиса главных компонент основывается на результатах предварительного измерения спектрофотометром элементов оригинала что усложняет процесс исследования. Непосредственное псевдообращение исходной линейной модели как правило не используется из-за неустойчивости.

В отечественной литературе подобные работы практически отсутствуют. Мультиспектральная съёмка в основном рассматривается в задачах дистанционного зондирования [1], где реконструкция спектров отражения не является приоритетом, и часто решается на аппаратном уровне. Тем не менее востребованность мультиспектральных методов в таких областях как музейное дело [9, 12], медицина, контроль печатных процессов [8] и др. делает актуальным получение доступных решений нетребовательных к вычислительным ресурсам, не требующего предварительного исследования предъявляемых образцов.

Псевдоинверсная реконструкция спектральных характеристик отражения

Приведенные в настоящей решения основываются на данных, опубликованных в работах [2, 3, 5]. Общая структура подходов для решения рассматриваемой обратной задачи подробно рассмотрена в монографии [4]. Применённая схема мультиспектральной съёмки [5] включает в себя 29 спектральных зон по 10 нм в интервале от 400 до 680 нм, 14 условных сенсоров с индивидуальными спектральными чувствительностями. Она хорошо описывается линейной моделью:

$$b = Hr + \xi, \quad (1)$$

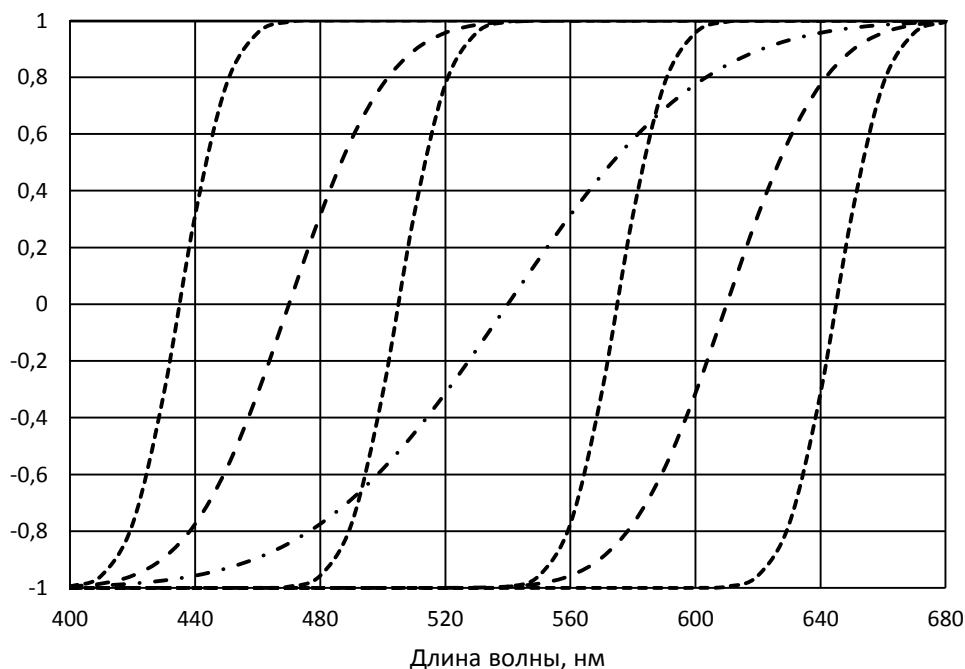
где b — вектор-столбец (14Н1) показателей яркости в точке изображения для всех условных сенсоров, H — матрица рассеяния (14Н29), образованная из значений кривых чувствительности сенсоров мультиспектральной камеры поэлементно умноженных на спектр освещения, r — вектор-столбец (29Н1) искомого спектра отражения, ξ — вектор-столбец (14Н1) случайного шума сенсоров.

Задача реконструкции спектров в этом случае сводится к построению отображения обратного (1). Очевидно, что такая постановка не является корректной как минимум с алгебраической точки зрения, поскольку количество неизвестных превышает количество исходных данных. Эта некорректность может быть снята путём привлечения дополнительной информации об искомом объекте r . Как показывает практика решения обратных задач, при этом модель обычно остаётся плохо обусловленной и даёт неустойчивые решения. Даже минимальный уровень шумов приводит к получению неприемлемых с практической точки зрения результатов. Подробное рассмотрение математических методов, способных разрешить проблему, приводится в [4].

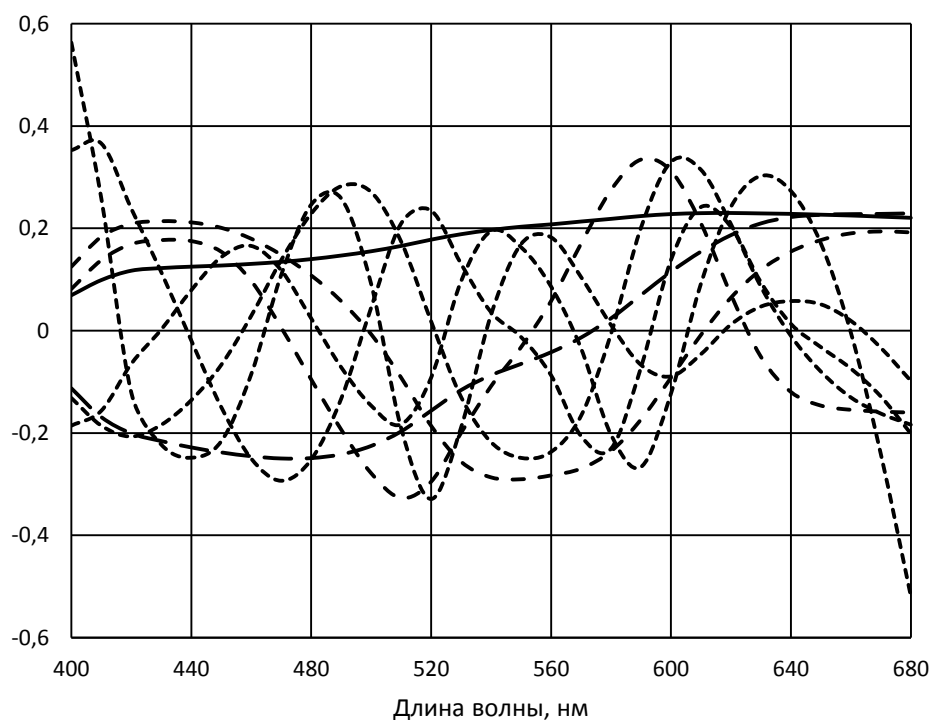
Для снижения размерности обратной задачи можно использовать разложение искомого спектра по функциональному базису [2, 3]. В данной работе использовался базис на основе функций типа интеграла ошибок из [2] (в дальнейшем — Базис 1, рис. 1а), что

позволило заменить задачу поиска значений для 29 спектральных зон поиском 8 коэффициентов разложения. Этот шаг по сути означает привлечение априорной информации о том, что любой искомый спектр хорошо аппроксимируется линейной комбинацией выбранных базисных функций. Для сравнения решений, по аналогии с зарубежными работами, брался так же базис из 8 главных компонент спектров отражения тестовой шкалы X-Rite Color Checker (в дальнейшем — Базис 2, рис. 1б).

Следующий, ещё более существенный шаг, заключается в принятии предположения о нулевом уровне шума в модели (1) для используемого процесса обработки полей изображений контрольных шкал. Априори считая, что все точки поля контрольной шкалы имеют одинаковый спектр отражения, разумно предположить, что и соответствующие тоновые-яркостные значения b должны быть одинаковы для всех пикселей изображения поля, чего никогда не бывает на практике. В случае, когда выборочные значения фотометрических сигналов пикселей сенсора распределены по Нормальному закону, что вполне справедливо для больших значений световых потоков, следует взять в качестве оценки истинного значения тона среднее арифметическое по некоторой зоне пикселей в пределах изображения поля шкалы. Такая оценка является несмещённой, состоятельной и эффективной.



а)



б)

Рис. 1. Базисные функции, использованные для снижения размерности обратной задачи, а — Базис 1, б — Базис 2

В наших экспериментах использовались зоны от 49 до 441 пикселей. Подставляя в (1) усреднённые по зонам значения b предполагалось, что они точно соответствуют искомому спектру и уровень шума ξ принимался равным нулю. В этом случае из (1) легко получить искомое решение:

$$r = A(HA)^+ b, \quad (2)$$

где A — матрица (29×8) , столбцы которой являются элементами базиса из работы [9] либо главными компонентами набора спектров отражения, а $(\cdot)^+$ — означает операцию псевдообращения матрицы.

Сравнение методов

Для сравнительного анализа были результаты псевдоинверсного восстановления (2) спектров отражения первых 18 полей стандартной тестовой шкалы X-Rite Color Checker. Примеры такого решения представлены на рис. 2.

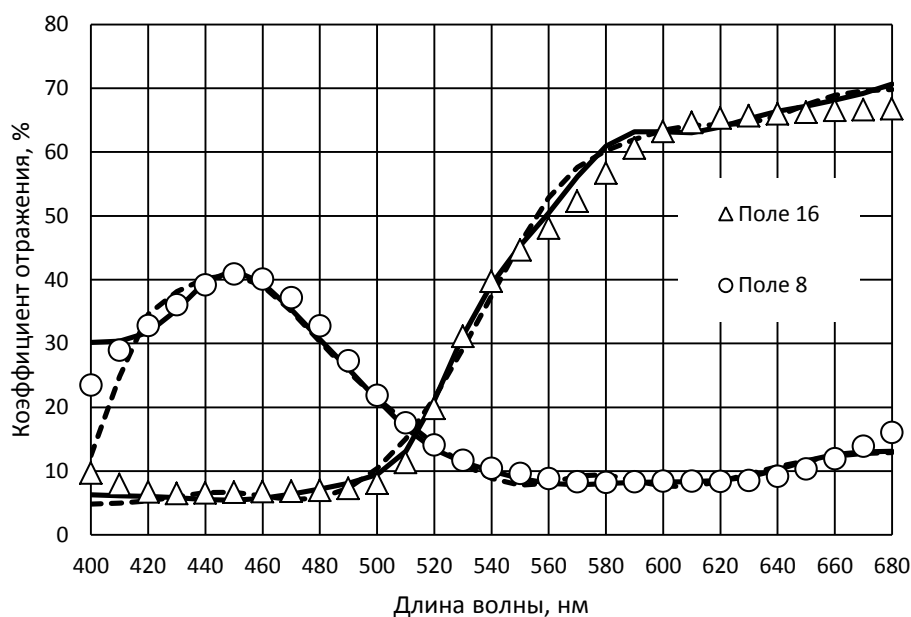


Рис. 2. Пример восстановления спектрального коэффициента отражения для двух полей шкалы Color Checker. Маркерами показаны значения, измеренные спектрофотометром, сплошной линией — результат расчёта по формуле (2) и Базиса 1, пунктирной линией — то же и Базиса 2

Сравнение результатов псевдоинверсной обработки экспериментальных данных производилась по показателям среднеквадратического отклонения RMS (root mean square), коэффициента подобия формы GFC (goodness fitting coefficient), и визуально воспринимаемого цветового различия ΔE_{ab} . Результаты приведены в таблице 1. Из значений в таблице 1 следует что в рассматриваемой ситуации предпочтительнее решение на основе Базиса 1.

Таблица 1 - Сравнение показателей качества псевдоинверсных решений на основе различных базисов

Сравнительные показатели	Базис 1	Базис 2
RMS, % средн. (мин./макс.)	1,73 (0,80/2,94)	2,02 (1,06/3,20)
GFC средн. (мин./макс.)	0,0020 (0,00042/0,0079)	0,0035 (0,00065/0,0209)
ΔE_{ab} средн. (мин./макс.)	9,4 (2,2/16,6)	9,8 (2,0/19,6)

Кроме обработки выборочных средних значений тона контрольных полей была предпринята попытка использования выражения (3) для попиксельного восстановления всего изображения без усреднения. Полученное мультиспектральное изображение открывалось и анализировалось визуально с помощью набора специальных утилит в MATLAB, взятого из авторитетного открытого источника [7] (рис. 3).

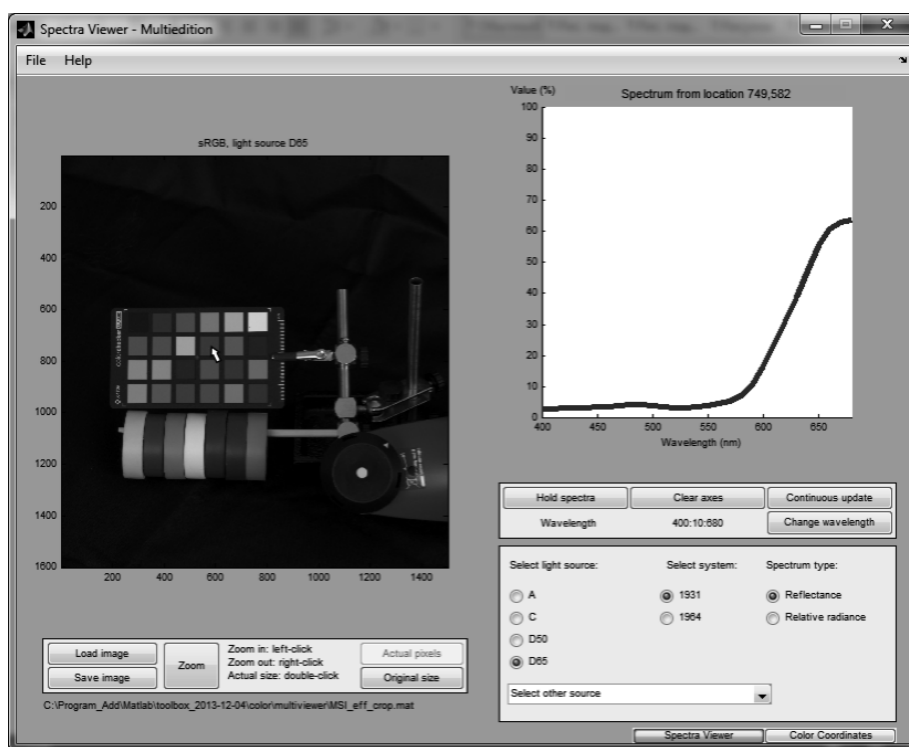


Рис. 3. Пример визуализации мультиспектрального изображения, рассчитанного по формуле (3). Указатель мыши находится в красном поле (№ 15) шкалы Color Checker, в окне справа выведен соответствующий пикселу спектр отражения

Результат восстановления получился вполне визуально приемлемым за счёт метамерности. Однако попиксельный анализ мультиспектрального изображения, как и ожидалось, показал недостаточную устойчивость восстановления спектров с помощью (3) на уровне отдельных пикселов. Для корректного восстановления в этом случае требуются иные методы [4], учитывающие статистические характеристики шума в выражении (1) и использующие фильтрацию получаемых решений.

Выводы

Предложен и обоснован простейший псевдоинверсный метод обработки получаемых экспериментальных данных. Его практическое применение возможно для таких специфических объектов как поля на контрольных шкалах оттисков. Простота расчётов по данному методу позволяет его реализацию даже на маломощных процессорах.

Большим преимуществом псевдоинверсной процедуры обработки на основе Базиса 1 (интеграла ошибок) является отсутствие необходимости трудоёмкого предварительного исследования оригинала спектрофотометром. Неожиданно низкие показатели качества решений на основе Базиса 2 (главных компонент) объясняются, по-видимому, невысоким качеством самого базиса из-за малого количества данных (всего 18 полей).

Список литературы

1. Модели формирования и некоторые алгоритмы обработки гиперспектральных изображений / Р.Н. Ахметов [и др.] // Исследование Земли из космоса .– 2014 .– № 1 .– С. 17–28.7. www.cis.rit.edu_jwgu_research_camspec_db.php.
2. Моделирование спектров отражения на основе базиса из функций типа интеграла ошибок / С.Ю. Арапов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. – 2012. – № 6. – С. 017–029.
3. Моделирование спектров отражения суперпозицией полиномов / Д.А. Тарасов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. – 2012. – № 5. – С. 059–066.
4. Терибиж В.Ю. Введение в статистическую теорию обратных задач. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005 – 376 с.
5. Экспериментальный комплекс мультиспектральной фотосъёмки на основе стандартной цифровой камеры / С.П. Арапова, С.Ю. Арапов, А.Г. Тягунов // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. – 2014. – № 5. – С. 45–54.
6. Beyond Red–Green–Blue (RGB): Spectrum-Based Color Imaging Technology / Masahiro Y., Hideaki H., Nagaaki O., // J. Imaging Sci. Technol. – 2008. – № 52(1), Jan.-Feb. P. 10201-1–10201-15.
7. Colorlab Toolbox .[Электронный ресурс] Режим доступа: http://cs.joensuu.fi/colorlab_toolbox.
8. Comparative performance analysis of spectral estimation algorithms and computational optimization of a multispectral imaging system for print inspection / E.M.Valero [et al.]. – Color Research & Application, Wiley. – 2014. – P. 16–27.
9. Imai, F.H. Spectral estimation using trichromatic digital cameras / F.H. Imai, R.S. Berns // Proceedings of the Internat. Symposium on Multispectral Imaging and Color Reproduction for Digital Archives : Society of Multispectral Imaging of Japan .– Chiba, 1999 .– P. 42–48
10. Multispectral image acquisition and simulation of illuminant changes / Hardeberg J.Y [et al.] – Colour Imaging: Vision and Technology, L. W. MacDonald and R. Luo, eds. – 1999. – John Wiley & Sons Ltd. – P. 145–164.
11. Real-Time Multispectral Rendering with Complex Illumination / B. Darling [et al.] // Color and Imaging Conference : 19th Color and Imaging Conference Final Program and Proceedings .– San Jose, California .– 2011 .– P. 345–351)
12. System design for accurately estimating the spectral reflectance of art paintings / Haneishi H. [et al.] // Appl. Opt. – 2000. – № 39. – P. 6621–6632.