

# Инструментальная реализация алгоритмов реконструкции искаженных изображений

Кирьянов К.А.

Санкт-Петербургский государственный университет  
информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург  
e-mail: kiryancon@front.ru

## Аннотация

В работе рассматриваются особенности инструментальной реализации алгоритмов реконструкции искаженных (смазанных, дефокусированных или/и зашумленных) изображений [1, 2, 5, 6]. Рассмотрена прямая задача (моделирование искажения или экспериментальное получение реального искаженного изображения) и более сложная и важная для практики обратная задача (реконструкция, восстановление изображения) [1–3, 5, 6].

**Ключевые слова:** искажение изображения, прямая и обратная задачи, основные соотношения

## 1. Реализуемые алгоритмы

Прежде чем вести речь о технической реализации алгоритмов, необходимо сказать несколько слов о самих алгоритмах. Основные соотношения и уравнения, описывающие эти задачи в непрерывном виде, имеют вид [5, 6]:

$$\int_{-\infty}^{\infty} h(x - \xi) w_y(\xi) d\xi = g_y(x) + \delta g, \quad (1)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x - \xi, y - \eta) w(\xi, \eta) d\xi d\eta = g(x, y) + \delta g, \quad (2)$$

где  $h$  – функция рассеяния точки (ФРТ), в большинстве случаев являющаяся пространственно-инвариантной,  $w$  и  $g$  – распределение интенсивности по неискаженному и искаженному изображениям соответственно,  $\delta g$  – помеха. В (1) ось  $x$  направлена вдоль смаза, а  $y$  играет роль параметра.

Интегральное уравнение (ИУ) (1) (точнее, набор 1-мерных интегральных уравнений) обычно используется в задаче смазывания, а (2) – в задаче дефокусирования. Наиболее подходящим методом решения интегральных уравнений (1) и (2) является метод регуляризации Тихонова [2–6]. Так как для инструментальной реализации интерес представляют численные методы, в данной работе им и уделено внимание. При численной реализации метода регуляризации Тихонова для решения обратной задачи используются преобразование Фурье (ПФ) и метод квадратур. Из методов итераций следовало бы упомянуть метод простой итерации Фридмана.

**Метод квадратур.** Данный метод эффективен для решения набора 1-мерных ИУ (1) [10], каждое из которых можно записать в операторной форме:

$$Aw = g + \delta g, \quad (3)$$

где  $A$  – интегральный оператор. Для нахождения функции  $w$  необходимо построить такой оператор  $A^{-1}$ , который давал бы устойчивое приближение к  $w$ . Непрерывным уравнениям (1) можно поставить в соответствие дискретные выражения типа (3). Тогда выражение (3) становится системой линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), где  $A$  – матрица, связанная с ФРТ. Однако задача решения уравнений (1)–(3) является *некорректной*.

В методе регуляризации Тихонова вместо (3) решается:

$$(\alpha E + A^T A) w_\alpha = A^T g, \quad (4)$$

где  $\alpha > 0$  – параметр регуляризации,  $E$  – единичный оператор (единичная матрица). Матрица  $\alpha E + A^T A$  является квадратной, симметричной и положительно-определенной, СЛАУ имеет решение и численно устойчива [11]. В результате получаем решение в виде:

$$w_\alpha = (\alpha E + A^T A)^{-1} A^T g, \quad (5)$$

Способы выбора  $\alpha$  изложены, например, в [2–6].

**Метод регуляризации Тихонова с использованием преобразования Фурье.** Этот метод применим для решения уравнений типа свертки. Рассмотрим частный случай интегрального уравнения Фредгольма I рода – уравнение типа свертки 1-мерное (1) и 2-мерное (2). Если уравнение общего вида (1) при его численном решении методом квадратур требует размещения в компьютерной памяти матрицы СЛАУ и это ограничивает возможности метода, то для решения 1-мерного уравнения типа свертки возможно применение метода преобразования Фурье, оперирующего лишь с векторами, что существенно расширяет возможности метода в отношении памяти и времени решения. Еще серьезнее дело с распределением памяти обстоит при аппаратной реализации метода. Сказанное в еще большей степени характерно для 2-мерного уравнения (2).

Задача смазывания сводится к решению 1-мерного ИУ Фредгольма I рода типа свертки (1) относительно  $w_y(\xi)$  при каждом фиксированном значении  $y$ , играющем роль параметра. В уравнении (1) ФРТ выражается формулой [3, 5, 6]:

$$h(x) = \begin{cases} 1/\Delta, & -\Delta \leq x \leq 0, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (6)$$

Решение уравнения (1) методом ПФ с регуляризацией Тихонова имеет вид [3, 5, 6]:

$$w_{\alpha y}(\xi) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} W_{\alpha y}(\omega) e^{-i\omega\xi} d\omega, \quad (7)$$

где

$$W_{\alpha y}(\omega) = \frac{H(-\omega)G_y(\omega)}{|H(\omega)|^2 + \alpha\omega^{2p}}, \quad (8)$$

$$H(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(x) e^{i\omega x} dx, \quad G_y(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} g_y(x) e^{i\omega x} dx, \quad (9)$$

где  $p \geq 0$  – порядок регуляризации.

## 2. Особенности технической реализации изложенных алгоритмов

Постепенно отживающие системы аналогового электронного телевидения (ТВ) передают движущееся (постоянно изменяющееся) изображение как последовательность кадров.

Структурная схема устройства формирования аналогового сигнала представлена на рис. 1.

Вся элементная база для систем обработки изображений должна обладать высокой производительностью, о чем под-

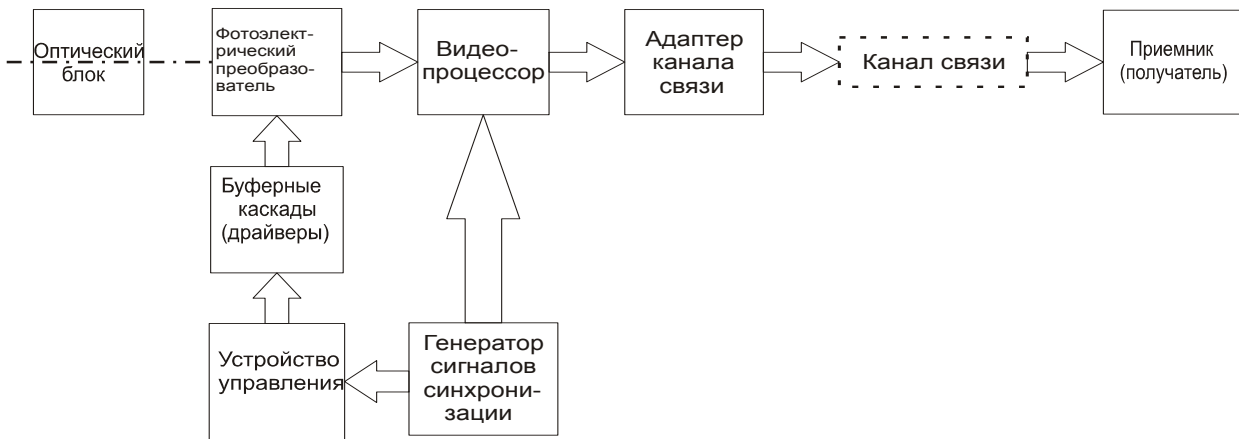


Рис.1. Структурная схема устройства формирования аналогового сигнала

Каждый кадр передается последовательно в виде двух полукадров. Неподвижное изображение в таких системах передается в виде многократного повторения одного и того же кадра. Особенности формирования ТВ-сигнала и используемые в них цветовые модели формируемых изображений изложены в [17, 18]. В таких системах практически невозможно восстановление смазанных и дефокусированных изображений.

Однако задачи (1), (2) довольно успешно решаются с помощью цифровых вычислительных средств. Устройство (или система) цифровой обработки сигналов изображений представляет собой комплекс технических средств, в состав которых входят ЭВМ, специализированные устройства для ввода, обработки и вывода сигнальной информации, а также соответствующее программное обеспечение. В общем случае подобная система помимо обработки должна также обеспечивать ввод, вывод и передачу сигналов и изображений [9]. Под вводом изображения понимаются процедуры преобразования исходного изображения к виду, удобному для его дальнейшей обработки в вычислительной системе. Ввод может производиться в нашем случае с вышеупомянутых телевизионных камер или ПЗС-линеек. Под выводом изображения понимается оперативная визуализация его на видеомониторе, а также архивация с целью долговременного хранения и документирования необходимой информации. Структурная схема такого устройства изображена на рис. 2.

робнее написано ниже.

Многие задачи обработки изображений также могут быть решены на современных персональных ЭВМ, если к скорости обработки не предъявляются высокие требования. В этом случае те или иные процедуры обработки изображений на ПЭВМ реализуются путем создания специального программного обеспечения, в которых ввод изображения в реальном масштабе времени выполняется специализированными устройствами ввода, пример структурной схемы которого приведен на рис. 3. Для обработки сигнальной информации в реальном масштабе времени требуется производительность, превышающая производительность современных ПЭВМ.

Одним из важнейших требований к техническим средствам систем ЦОС является обеспечение режима обработки сигналов в реальном времени (в темпе их поступления) при приемлемых стоимостных и весо-габаритных характеристиках системы. Такое требование, по сути, влечет за собой исключительно жесткие требования к быстродействию, прежде всего, средств предварительной обработки сигналов, что связано с большой интенсивностью входного потока сигнала в системах ЦОС. Так, некоторые технические задачи цифровой обработки изображений (такие, как обнаружение и распознавание самолетов-нарушителей территориальных границ и пр.) требуют быстродействия аппаратных средств порядка  $10^9 - 10^{10}$  оп/сек для обеспечения обработки в реальном времени. Другой особенностью подобных задач является необходимость обработки больших объемов (от 1 Мбайта и более) сложно структурированных многомерных данных, что вносит дополнительные трудности в организацию вычислений.

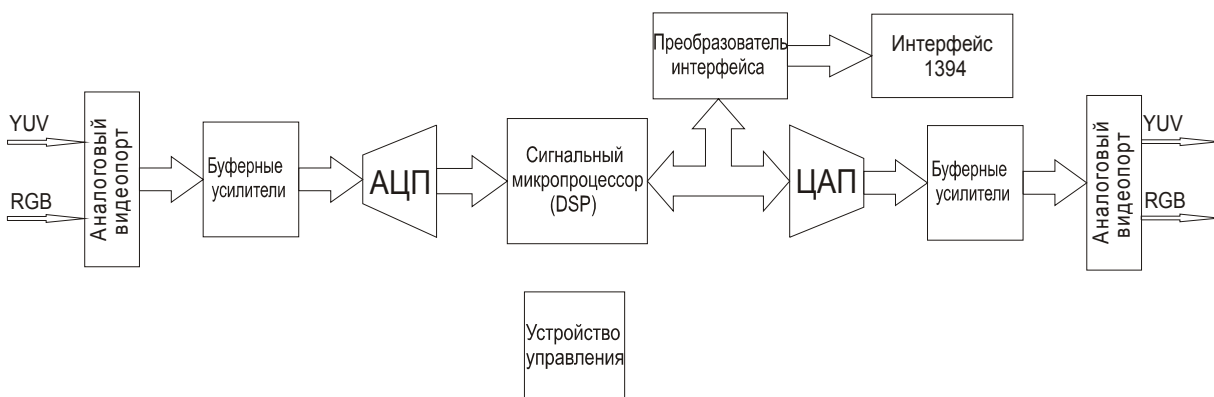


Рис. 2. Устройство цифровой обработки

Аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) является важнейшим узлом, к быстродействию которого предъявляются особые требования. В системах для обработки изображений применяются самые быстрые на сегодняшний день – конвейерные (pipelined) АЦП, частота дискретизации (выборки) которых сегодня достигает единиц ГГц (GSPS) [12–14]. При таком быстродействии на сегодняшний день они разработаны с разрядностью до 16 бит.

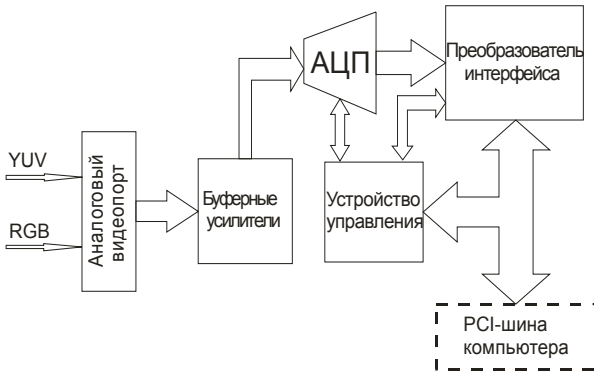


Рис. 3. Устройство ввода изображения в компьютер

При выборе вычислительного устройства, которое осуществляет цифровую обработку (DSP – Digital Signal Processing), существует два основных подхода при реализации систем обработки изображений.

Первый подход состоит в том, что для реализации того или иного вида обработки изображений на базе программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) реализуется конечный автомат, способный выполнять только одну функцию. При этом достигается максимально-возможная производительность, которая определяется используемой разработчиком и производителем ПЛИС технологией изготовления (ALTERA, XILINX), но гибкость решения присутствует лишь в той мере, в которой ее предусмотрел разработчик. Для задачи реконструкции изображений при решении методом квадратур необходимо правильно сформировать матрицу  $A$ , произвести ее транспонирование  $A^T$ , получить уравнение (4), перемножив транспонированную матрицу на исходную и на правую часть, и решить уравнение Тихонова (5), которое может быть решено методом Гаусса-Жордана, и схема такого устройства предложена в [8]. Сложность здесь только в том, что размерность матрицы нельзя сделать больше определенной величины, которая закладывается при разработке.

Точно также можно реализовать решение и для метода регуляризации Тихонова с преобразованием Фурье. Последнее реализуется лучше всего для данной задачи с помощью многоканальной систолической матрицы, особенности реализации которой описаны в [7]

Второй подход заключается в использовании специализированных процессоров (DSP). Такой подход обеспечивает максимальную гибкость, так как обработка реализуется программными методами. Здесь оба метода, как и на персональной ЭВМ можно реализовать как на языке ассемблера для используемого микропроцессора, так и на языке программирования C++, что гораздо проще на практике. Алгоритм более гибкий, структура устройства не меняется, так как реализация сводится к пошаговому выполнению инструкций. Но в то же время производительность даже специализированного процессора всегда меньше, чем производительность

специализированного аппаратного блока, реализованного на ПЛИС. Особое внимание следует уделять выбору сигнального микропроцессора. Наиболее часто используемыми в обработке видео в реальном времени находят применение процессоры Texas Instruments, несколько реже Analog Devises [15, 16].

В настоящее время подход выбирается в зависимости от сложности алгоритма обработки и требований по временным параметрам. Довольно часто выбирают комбинированный подход, где присутствует как программируемая логика, так и цифровой сигнальный процессор.

В схемотехнике камер сложность цифрового блока определяется разрешающей способностью камеры (ПЗС-матрицы). На сегодняшний день пока не существует таких камер, где реализован алгоритм восстановления смазанных и дефокусированных изображений. Пример цифровой камеры приведен на рис. 4. В таком устройстве в принципе может быть реализован рассмотренный алгоритм.

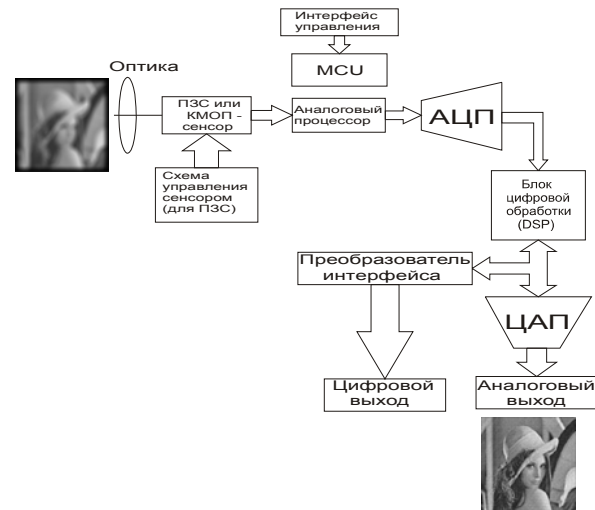


Рис 4. Структурная схема цифровой камеры

### 3. Выводы

Новизна выполненной работы состоит в инструментальной реализации новых приемов в обработке изображения: «усечение», «размытие краев» и «поворот» при использовании известных методов преобразования Фурье или квадратур с регуляризацией Тихонова. Прием усечения используется для того, чтоб избежать так называемых «граничных условий» [2]. Прием размытия краев используется для понижения эффекта Гиббса (эффекта ложных волн на изображении). Прием поворота используется для решения задачи смазывания при произвольном угле. Подробности этих новых приемов изложены в работе [6].

Все это может найти применение в таких областях, как томография (возникновение смазывания из-за случайных движений пациента во время обследования), обнаружение самолетов-нарушителей территориальных границ и т.п. Здесь необходима реализация методик на современной элементной базе, специализированной для обработки сигналов и адаптированной для быстрых алгоритмов. В процессе работы был проведен анализ имеющейся элементной базы и выяснилось, что более всего подходят для решения задачи компоненты фирмы Texas Instruments: процессор TMS320C6457, АЦП ADS5522 и ЦАП THS5661. Задача является актуальной на сегодняшний день.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 09-08-00034-а).

## Список литературы

1. *Бейтс Р., Мак-Доннелл М.* Восстановление и реконструкция изображений. М.: Мир, 1989. 336 с.
2. *Гонсалес Р., Вудс Р.* Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2006. 1072 с.
3. *Бакушинский А.Б., Гончарский А.В.* Некорректные задачи. Численные методы и приложения. М.: Изд-во МГУ, 1989. 199 с.
4. *Верлань А.Ф., Сизиков В.С.* Интегральные уравнения: методы, алгоритмы, программы. Киев: Наук. думка, 1986.
5. *Сизиков В.С.* Математические методы обработки результатов измерений. СПб.: Политехника, 2001. 240 с.
6. *Сизиков В.С., Римских М.В., Мирджамолов Р.К.* Реконструкция смазанных и зашумленных изображений без использования граничных условий // Оптический журнал. 2007. Т. 76. № 5. С. 38–46.
7. *Кухарев Г.А., Тропченко А.Ю., Шмерко В.П.* Систематические процессоры для обработки сигналов. Минск: Беларусь, 1988. 127 с.
8. *Кухарев Г.А., Тропченко А.Ю.* Систематический процессор для обращения матриц // Изв. вузов. Приборостроение. 1990. Т. 33. № 11. С. 23–27.
9. *Тропченко А.Ю.* Аппаратные средства для цифровой обработки сигналов. Уч.-методическое пособие по дисциплине "Методы обработки сигналов и изображений". СПб.: Изд-во СПбГУ ИТМО, 2005. 138 с.
10. *Поршнев С.В.* Вычислительная математика. Курс лекций. СПб.: БХВ-Петербург, 2004. 304 с.
11. *Киреев В.И., Пантелеев А.В.* Численные методы в примерах и задачах. М.: Высшая школа, 2006. 480 с.
12. *Texas Instruments.* 2009. Amplifier and Data Converter Guide. [www.ti.com/dataconverters](http://www.ti.com/dataconverters)
13. Кестер У. Как выбрать тип АЦП для ваших приложений // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2006. № 4. С. 12–17.
14. *Загорский В.* Передовые методы постобработки для высокоскоростных систем аналого-цифрового преобразования // Компоненты и технологии. 2004.
15. *Texas Instruments.* Digital Signal Processors & ARM Microprocessors. [www.ti.com/dsp](http://www.ti.com/dsp)
16. *Analog Devices.* Embedded processing and DSP. <http://www.analog.com/dsp>
17. *Самойлов В.Ф., Хромой Б.П.* Основы цветного телевидения. М.: Радио и связь, 1982. 1047 с.
18. *Фисенко В.Т., Фисенко Т.Ю.* Компьютерная обработка и распознавание изображений. Уч. пособие. СПб.: Изд-во СПбГУ ИТМО, 2008. 192 с.

## 5. Автор

Кирьянов Константин Александрович, аспирант СПбГУ ИТМО, контактный адрес kiryancon@front.ru