УДК 681.518

АДАПТИВНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ СО СТРУКТУРНЫМИ ИСКАЖЕНИЯМИ

Костров Б.В., Саблина В.А.

Введение

Процесс регистрации аэрокосмических изображений сопровождается внесением искажений, обусловленных различными факторами, в том числе несовершенством самой формирующей оптико-электронной системы. Например, вследствие неравномерности чувствительности приемных элементов на изображениях появляются структурные искажения в виде характерной «полосатости» [1].

Устранение таких структурных искажений является разновидностью задачи восстановления изображения, которая формулируется как задача воссоздания исходного изображения f(x,y) по наблюдаемому искаженному изображению g(x,y). В результате получается восстановленное изображение $\hat{f}(x,y)$ [2].

Статья посвящена решению задачи устранения смоделированного аддитивного шума исследуемого типа, накладываемого на аэрокосмические изображения земной поверхности, методом адаптивной фильтрации, описана разработанная методика подбора коэффициента адаптации фильтра. В целях снижения требований к вычислительным ресурсам для перехода в спектральную область и обратно использованы алгоритмы быстрого преобразования Уолша (БПУ) [3-5].

Математическая постановка задачи

В настоящей статье рассматриваются искажения, вызванные наличием аддитивного шума:

g(x, y) = f(x, y) + n(x, y). (1)

где g(x, y) – искаженное изображение,

f(x, y) – исходное изображение,

n(*x*, *y*) – аддитивный шум.

Модель процессов искажения и восстановления изображения путем частотной фильтрации представлена на рис. 1. Рассмотрена проблема восстановления аэрокосмических изображений со структурными искажениями. Исследовано применение метода адаптивной фильтрации в целях решения поставленной задачи. Предложен способ моделирования изучаемого шума. Разработана методика выбора коэффициента адаптации фильтра. Интерпретированы результаты проведенных экспериментов.

При восстановлении в частотной области осуществляется разложение искаженного изображения g(x, y) в спектр G(u, v) с последующей фильтрацией. При этом получается спектр восстановленного изображения $\hat{F}(u, v)$:

$$F(u,v) = G(u,v)H(u,v), \qquad (2)$$

где H(u,v) – передаточная функция фильтра, G(u,v) – спектр искаженного изображения.

Затем производится возврат в пространственную область, в результате чего возникает восстановленное изображение $\hat{f}(x, y)$, которое является приближением к неискаженному изображению f(x, y).

В рассмотренной модели особую важность имеет проблема оценки эффективности произведенной фильтрации. В реальных условиях шум обычно носит случайный характер, что мешает абсолютно точному воссозданию исходного изображения, поэтому необходимо решить задачу минимизации отличий восстановленного изображения от исходного.

Количественно для оценки степени отличия изображения от эталонного часто используются такие метрики, как среднеквадратическое отклонение (СКО) и пиковое отношение сигнал/шум (ПОСШ). СКО задается следующим соотношением:



Рис. 1 – Модель процессов искажения/восстановления изображения

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} (\hat{f}(x,y) - f(x,y))^2},$$
(3)

где $M \times N$ – размер рассматриваемого изображения, σ – среднеквадратическое отклонение.

Полученное значение СКО используется для расчета ПОСШ:

$$PSNR = 20\log_{10}\frac{255}{\sigma},\tag{4}$$

где *PSNR* - пиковое отношение сигнал/шум.

Следует отметить, что метрики СКО и ПОСШ не всегда хорошо определяют визуально воспринимаемое качество изображения. В последнее время предпринимается большое количество попыток разработать новые метрики объективной оценки качества изображений, учитывающие свойства зрительной системы человека, что само по себе является довольно сложной задачей. Поэтому на рассматриваемом этапе исследований ограничимся использованием критерия минимизации СКО в целях адаптации создаваемого фильтра.

Для получения спектра искаженного изображения представляется целесообразным использовать прямое дискретное двумерное преобразование Уолша, осуществляемое следующим образом [6]:

$$G(u,v) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1N-1} g(x,y) wal_{(u,v)}(x/M,y/N),$$
(5)

где $wal_{(u,v)}(x/M, y/N)$ - двумерная функция Уолша.

Соответственно, возврат в пространственную область после фильтрации выполняется с помощью обратного дискретного двумерного преобразования Уолша:

$$\hat{f}(x,y) = \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} \hat{F}(u,v) wal_{(u,v)}(x/M, y/N).$$
(6)

Из пары преобразований (5) и (6) видно, что для прямого и обратного преобразования Уолша используются одни и те же базисные функции с точностью до нормировочного коэффициента 1/MV. Таким образом, матрицы прямого и обратного преобразования Уолша совпадают, что удобно для программной реализации алгоритма. Расчет спектра Уолша требует только многократного выполнения операций сложения и вычитания, что также удобно для программной реализации алгоритма.

В свою очередь, быстрое преобразование Уолша (БПУ), описанное в научной литературе [7,8], позволяет понизить сложность алгоритма с N^4 операций сложения, необходимых для вычисления обычного двумерного дискретного преобразования Уолша (ДПУ) до всего лишь $2N^2 \log_2 N$ операций сложения для изображений размерами $N \times N$, где N является степенью двойки. Аналогично вычисляется и обратное быстрое преобразование Уолша (ОБПУ).

Однако использование преобразования Уолша имеет не только преимущества, но и некоторые недостатки. Трудности проведения фильтрации в спектре Уолша вытекают из отсутствия соотношений, позволяющих производить эффективное вычисление циклической свертки с переходом в спектральное пространство [9]. В случае преобразования Уолша, в отличие от преобразования Фурье, известны соотношения для вычисления диадической свертки. Тем не менее указанные трудности не препятствуют осуществлению описанных в настоящей статье исследований.

В соответствии с вышесказанным основной задачей, возникающей при восстановлении изображения с помощью фильтрации, является нахождение такой передаточной функции фильтра H(u,v), которая обеспечивает наилучшее приближение восстановленного изображения к исходному, что при выбранном критерии подбора фильтра эквивалентно минимизации значения среднеквадратического отклонения σ .

Модель шума

На изображении, сформированном при помощи линейки ПЗС-элементов, часто возникают искажения, связанные с неравномерностью чувствительности приемников излучения. Визуально такие искажения представляются в виде полосовых помех на изображении.

В статье рассматривается модель аддитивного шума n(x, y), искажающего одинаково каждый столбец изображения:

$$n(x, y) = n(x, 0).$$
 (7)

В простейшем случае можно рассмотреть неслучайный шум, представляющий собой попеременное чередование полос, осветляющих либо затемняющих исходное изображение.

Такой шум математически описывается следующим образом:

$$n(x, y) = \begin{cases} A \operatorname{пpu} (2l-2)s \le x < (2l-1)s, \\ -A \operatorname{пpu} (2l-1)s \le x < 2ls, \end{cases}$$
(8)

где *A* – амплитуда шума, *l* – натуральное число, *s* – ширина одной полосы в пикселях.

Путем варьирования амплитуды шума *A* можно получить шум различного уровня.

Например, при A = 0 шум вообще отсутствует. Чтобы приблизить модель к реальным типам шума, необходимо исследовать шум, имеющий случайный характер.

Такой шум задается выражением:

$$n(x, y) = \xi_{l} \operatorname{пpu}(l-1)s \le x < ls,$$
(9)

где $\zeta_l - l$ -ая реализация случайной величины ζ , l - натуральное число, S – ширина одной полосы в пикселях.

Исследования проводились на примере аддитивного равномерного по строке шума, для которого функция плотности распределения вероятностей имеет вид:

$$p(\xi) = \begin{cases} \frac{1}{2A} \operatorname{при} - A \le \xi \le A, \\ 0 = 1 \\ 0 = 1 \\ 0 = 1 \\ 0 = 1 \end{cases}$$
(10)

0 в остальных случаях.

Здесь значение A задает диапазон возможных амплитуд шума, поэтому в отличие от неслучайного шума при таком же значении A получается в среднем более низкий уровень шума.

Результаты экспериментальных исследований

Исследования проводились с помощью специально разработанного программного средства, позволяющего моделировать указанные типы шума, накладывать его на исходные изображения, рассчитывать БПУ, проводить фильтрацию в спектре Уолша, а также оценивать СКО и ПОСШ. Так как изучаемые типы шума оказывают влияние только на спектральные составляющие, для которых u = 0, то в качестве передаточной функции фильтра была выбрана следующая функция:

$$H(u,v) = \begin{cases} 1/k(v) \operatorname{при} u = 0, \\ 1 \operatorname{прu} u \neq 0. \end{cases}$$
(11)

где k(v) – функция адаптации фильтра.

Далее подробно описан выбор фильтра для случая s = 1, так как модель шума с полосами шириной в один пиксель наиболее приближена к реальным типам шума, когда такой искаженный столбец изображения формируется одним и тем же элементом из линейки ПЗС-элементов [1].

Поскольку при ширине полос в один пиксель при случайном шуме для его спектральных составляющих не наблюдается зависимости от v, то можно рассматривать в качестве k(v) просто некоторый коэффициент K:

$$k(v) = \begin{cases} 1 \text{ при } v = 0, \\ K \text{ при } v \neq 0, \end{cases}$$
 (12)

где К - коэффициент адаптации фильтра.

При v = 0 оставляем k(v) = 1, то есть H(0,0) = 1, чтобы сохранить среднюю яркость изображения неизменной.

Необходимо найти оптимальный коэффициент адаптации фильтра, обеспечивающий наилучшее качество результатов фильтрации.

Очевидно, что искомое значение коэффициента K будет зависеть от амплитуды шума A: чем сильнее шум, тем больше его необходимо подавлять.

Таким образом, задача исследования сводится к разработке методики выбора коэффициента $K = K_{opt}$ при заданном значении A = const, который минимизирует значение СКО:

$$\sigma(K,A) \to \min$$
, (13)

Аналитическое нахождение зависимости оптимального $K_{opt}(A)$ представляется затруднительным, проведенное экспериментальное исследование позволяет легко построить ее эмпирически.

Основные этапы экспериментов описаны на примере двух тестовых изображений, представляющих собой фрагменты изображений земной поверхности размерами 128×128 пикселей (рисунки 2 и 3) и имеющие 256 градаций яркости.



Рис. 2 – Тестовое изображение 1



Рис. 3 - Тестовое изображение 2

На тестовые изображения накладывался шум с различной амплитудой A. Рассматривались варианты случайного и неслучайного шума. Пример наложения случайного шума с A=16 приводится на рис. 4.

Для заданного значения A проводилась фильтрация в спектре Уолша с различным коэффициентом адаптации K, начиная от K = 1, когда обрабатываемое изображение не изменяется. Логично предположить, что при слишком малых значениях K еще остается шум, а при слишком больших значениях K теряется информация о самом изображении. Это должно приводить к наличию точки минимума функции $\sigma(K)$, что в дальнейшем и подтвердилось экспериментально. Таким образом, при построении исследуемых зависимостей имеет смысл увеличивать значение K от 1 и до начала возрастания $\sigma(K)$.



Рису. 4 – Изображение 1, искаженное случайным шумом

В результате были получены таблицы $\sigma(K, A)$ зависимостей среднеквадратического отклонения от коэффициента адаптации фильтра K и амплитуд A от 0 до 39.

Для шума, который носит случайный характер, значения СКО были усреднены по 100 реализациям шума.

Фрагмент таблицы СКО для изображения 1 со случайным шумом приводится в таблице 1.



Таблица 1

Пример таблицы значений СКО

0	1	2	3	4	5	6	7
0	0,71	1,2205	1,7647	2,3343	2,9072	3,4962	4,0761
1,6979	1,8203	1,9485	2,1389	2,3495	2,6255	2,9204	3,2368
2,5587	2,63	2,6898	2,7621	2,86	3,0066	3,1458	3,3295
3,0835	3,1329	3,1512	3,22	3,2621	3,351	3,44	3,5377
3,4709	3,4763	3,4984	3,525	3,5571	3,6015	3,666	3,7321
	0 0 1,6979 2,5587 3,0835 3,4709	0 1 0 0.71 1.6979 1.8203 2.5587 2.63 3.0835 3.1329 3.4709 3.4763	0 1 2 0 0.71 1.2205 1,6979 1,8203 1.9485 2,5587 2,63 2,6898 3,0835 3,1329 3,1512 3,4709 3,4763 3,4984	0 1 2 3 0 0.71 1.2205 1.7647 1.6979 1.8203 1.9485 2.1389 2.5587 2.63 2.6998 2.7621 3.0835 3.1329 3.1512 3.22 3.4709 3.4763 3.4984 3.525	0 1 2 3 4 0 0.71 1.2205 1.7647 2.3343 1.6979 1.8203 1.9485 2.1389 2.3495 2.5587 2.63 2.6898 2.7621 2.86 3.0835 3.1329 3.1512 3.22 3.2621 3.4709 3.4763 3.4984 3.525 3.5571	0 1 2 3 4 5 0 0.71 1.2205 1.7647 2.3343 2.9072 1.6979 1.8203 1.9485 2.1389 2.3495 2.6255 2.5587 2.63 2.6898 2.7621 2.86 3.0066 3.0835 3.1329 3.1512 3.22 3.2621 3.351 3.4709 3.4763 3.4984 3.525 3.5571 3.6015	0 1 2 3 4 5 6 0 0.71 1.205 1.7647 2.3343 2.9072 3.4962 1.6979 1.8203 1.9485 2.1389 2.3495 2.6255 2.3204 2.5587 2.63 2.6898 2.7621 2.86 3.0066 3.1458 3.0835 3.1329 3.1512 3.22 3.2621 3.351 3.44 3.4709 3.4763 3.4984 3.525 3.5571 3.6015 3.666

По таким таблицам, считая A = const, можно построить семейства графиков зависимостей $\sigma(K, A)$, где A = 0, 3, ..., 39. По этим графикам можно оценить вид соответствующих зависимостей, например, для изображения 1 со случайным шумом такое семейство представлено на рис. 5.

Эмпирический характер построенных зависимостей, а также случайный характер шума обуславливают появление неровностей на графиках, особенно заметных для сильных шумов. Перед дальнейшим исследованием можно произвести аппроксимацию функций зависимостей $\sigma(K)$.



Рис. 5 – Семейство графиков зависимостей СКО от коэффициента адаптации фильтра *К*

Тогда можно заметить, что рассматриваемые функции, начиная с некоторого значения A, имеют точку экстремума, которая с увеличением A сдвигается в сторону увеличения K.

Это означает, что для совсем малых шумов не имеет смысла проводить фильтрацию, а для сильного шума следует выбирать большее значение коэффициента адаптации фильтра K.

Также можно построить графики зависимостей $\sigma(K_{opt}(A), A)$ минимальных СКО от A для оптимальных значений коэффициента адаптации фильтра $K = K_{opt}$.

На рис. 6 представлены такие графики для различных рассмотренных вариантов изображений и шумов.



Рис. 6 – Графики зависимостей минимально достижимого значения СКО от амплитуды шума A

Видно, что при использовании описанной методики восстановления изображения, искаженного моделируемым шумом, СКО восстановленного изображения $\widehat{f}(x, y)$ лежит в пределах 1,5÷2% при изменении амплитуды шума A от ±10 до ±30 градаций яркости.

Соответственно найденным значениям минимальных СКО для A = const определяются и оптимальные значения коэффициента $K = K_{out}$.

Таким образом, находятся решения задачи $\sigma(K, A) \to \min$ для каждого A.

Отсюда можно построить аппроксимированные графики зависимостей $K_{opt}(A)$, которые представлены на рис. 7.



Рис. 7 – Аппроксимированные графики зависимостей оптимального значения коэффициента адаптации фильтра K_{out} от амплитуды шума A

Пример изображения, восстановленного по предлагаемой методике, приводится на рис. 8.



Рис. 8 - Восстановленное изображение 1

Заключение

Предложена методика выбора фильтра для восстановления изображения со структурными искажениями. Условием применения данной методики является наличие априорной информации о характере шума, позволяющей отнести его к одному из рассмотренных типов.

Фильтрация осуществляется в спектре Уолша, при этом для построения фильтра, обеспечивающего наилучшее приближение восстановленного изображения к оригиналу, можно использовать зависимости, представленные на рис. 7. Для других типов шума нужно предварительно построить аналогичные зависимости, провести дополнительные исследования. Описанная методика обладает таким преимуществом как высокая скорость вычислений, достижимая за счет использования алгоритма БПУ.

Литература

- 1. В.К. Злобин, В.В. Еремеев Обработка аэрокосмических изображений. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 288 с.
- Р. Гонсалес, Р. Вудс Цифровая обработка изображений. -М.: «Техносфера», 2006. – 1072 с.
- Б.В. Костров Основы цифровой передачи и кодирования информации. – М.: «ТехБук», 2007. –192 с.
- Л.А. Залманзон Преобразования Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях. – М.: «Наука», 1989. – 496 с.
- Проектирование специализированных информационновычислительных систем. Под ред. Ю.М. Смирнова. – М: Высшая школа, 1984. – 359 с.
- 6. В.А. Саблина, Б.В. Костров О возможностях использования преобразования Уолша для спектрального анализа изображений //Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций: Материалы 15-й Международной научно-технической конференции. Часть 2. Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет. 2008. С. 129-132.
- H.F. Harmuth Sequency Theory. Foundations and Applications. - New York, San Francisco, London: Academic Press, Inc., 1977. – 526 p.
- Н. Ахмед, К.Р. Рао Ортогональные преобразования при обработке цифровых сигналов. – М: Связь, 1980. – 248 с.
- Э. Прэтт Цифровая обработка изображений. М.: Мир, 1982. – Кн. 1. – 312 с.

новые книги

Цифровая обработка сигналов. Практическое руководство для инженеров и научных работников (+CD) / Стивен Смит; пер. с англ. А. Ю. Линовича, С.В. Витязева., И.С. Гусинского. — М. : Додэка-ХХІ, 2008. — 720 с. : ил. — (Серия «Схемотехника»). ISBN 978-5-94120-145-7

Заказ: www.dokabooks.ru

В книге изложены основы теории цифровой обработки сигналов. Акцент сделан на доступности изложения материала и объяснении методов и алгоритмов так, как они понимаются при практическом использовании. Цель книги — практический подход к цифровой обработке сигналов, позволяющий преодолеть барьер сложной математики и абстрактной теории, характерных для традиционных учебников. Изложение материала сопровождается большим количеством примеров, иллюстраций и текстов программ (которые вы также можете найти на прилагаемом CD). Книга предназначена научным работникам и инженерам, желающим применять методы цифровой обработки в различных технических сферах. Рекомендуется аспирантам и студентам, изучающим цифровую обработку сигналов.

Методы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление / Б.А. Алпатов, П.В. Бабаян, О.Е. Балашов, А.И. Степашкин – М.: Радиотехника, 2008. – 176 с.

Освещены вопросы пространственно-временной обработки и анализа последовательностей изображений применительно к задачам обнаружения и сопровождения объектов. Значительное внимание уделено алгоритмам управления приводами поворотных устройств систем сопровождения объектов. Книга предназначена для научных и инженерных работников, аспирантов, студентов старших курсов, интересующихся задачами, связанными с разработкой систем обнаружения и сопровождения объектов по данным видеонаблюдений. www.radiotec.ru

Логическое проектирование цифровых систем на основе программируемых логических интегральных схем / В.В. Соловьев, А.М. Климович – М.: Горячая линия – Телеком, 2008. – 376 с.

Книга посвящена проблемам логического проектирования отдельных цифровых устройств на основе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). Предлагаются методы синтеза комбинационных схем, конечных и микропрограммных автоматов, позволяющие эффективно использовать архитектурные особенности ПЛИС, а также учитывать системные требования. Представлены новые модели конечных автоматов, позволяющие значительно снизить стоимость реализации и повысить быстродействие проектируемых устройств. Изложение материала сопровождается большим числом примеров. Предназначена для разработчиков цифровых систем, может быть использована в качестве учебного пособия для аспирантов и студентов. www.techbook.ru/solovjev.html