УДК 004.9:681

Г. В. Светлов, Н. А. Суменков, Б. В. Костров, Н. С. Фокина

Применение теории дискретных сигналов, определенных на конечных интервалах, для обработки аэрокосмических изображений

Обобщены известные и доказанные авторами положения, позволяющие расширить методологию применения ортогональных преобразований в области обработки аэрокосмических изображений. Создана теоретическая и методологическая основа применения систем функций Виленкина – Крестенсона в нетригонометрической, минимально возможной форме. На основе положений и выводов, следующих из теории дискретных сигналов на конечных интервалах, выбран наиболее приемлемый вариант построения системы базисных функций из всего многообразия функций Виленкина – Крестенсона, для которых сдвиг сигнала определяется как поразрядное сложение чисел по некоторому модулю. Полученные теоретические и методологические положения подкреплены разработкой алгоритмов фильтрации и корреляционного анализа аэрокосмических изображений.

Ключевые слова: аэрокосмические изображения, системы ортогональных функций, спектральный анализ, корреляционный анализ, алгоритмы квазидвумерной фильтрации, алгоритмы корреляционного совмещения.

Введение

Изображение можно рассматривать как дискретный сигнал, определенный на конечном интервале отсчетов координат на плоскости. В настоящее время наибольшие успехи в области обработки аэрокосмических изображений достигнуты при построении алгоритмов в пространственных координатах. При этом пространственно-частотные свойства изображений не учитываются. Сведения об использовании классического гармонического анализа для обработки изображений можно найти в работе [1]. Однако вычислительная сложность реализации преобразования Фурье сдерживает широкое применение данных методов в практике обработки аэрокосмических снимков.

Для решения задач спектрального анализа в общем случае могут быть использованы любые системы, содержащие необходимое количество ортогональных функций. Выбор системы функций будет определяться требованиями удобства вычислений и в конечном счете трудоемкостью алгоритмов реализации искомого преобразования. Для применения альтернативных систем базисных функций требуется методологическое осмысление возможности их применения для решения поставленных задач.

В данной статье обобщены известные и доказанные авторами положения, позволя-

ющие расширить методологию применения ортогональных преобразований в области обработки аэрокосмических изображений. Таким образом, создается теоретическая и методологическая основа для применения систем функций Виленкина – Крестенсона (ВКФ) в нетригонометрической, минимально возможной форме их построения в виде функций Уолша. Полученные теоретические и методологические положения подкреплены примерами разработки алгоритмов фильтрации и корреляционного анализа аэрокосмических изображений.

Основные результаты исследований

На основе анализа принципов и средств формирования аэрокосмических изображений (АКИ) [2] все видеодатчики радиотехнических систем можно разделить на пять групп:

- датчики, построенные на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС-линейки);
- однолучевые датчики с конической или плоскостной разверткой;
- датчики сканового типа;
- радиолокационные станции различного базирования и принципа действия;
- тепловизионные и телевизионные приборы и системы, базирующиеся, как правило, на атмосферных летательных аппаратах или наземных станциях.

С помощью методов и систем съемки формируются видеоданные, которые могут быть зарегистрированы или сохранены любым известным способом. Все они имеют опреде-

© Светлов Г. В., Суменков Н. А., Костров Б. В., Фокина Н. С., 2017

ленную геометрическую структуру, отражают содержательную часть в виде определенной плотности почернения видеотона и могут распространяться по любым известным системам передачи данных на некоторое расстояние, т. е. обладают определенной общностью, что позволяет назвать их общим термином – АКИ.

На сформированных АКИ в соответствии с физическими принципами формирования и условиями их передачи возникают специфические искажения, среди которых:

- синхронные искажения, обусловленные изменением передаточных характеристик тракта формирования яркостей пикселей и жестко связанные с законом сканирования АКИ (проявляются в виде характерной «синхронной полосатости» вдоль строк или столбцов);

- искажения в виде помех, для которых характерно абсолютно разрушительное действие (проявляются в виде «выбитых пикселей», сгруппированных, как правило, вдоль строки АКИ), связанные с потерями в канале связи;

- несинхронные искажения, не связанные с процессом формирования яркостей пикселей и законом сканирования (проявляются в виде характерной периодической «несинхронной полосатости» со случайным углом наклона к столбцам АКИ). Устранение таких помех является частной задачей фильтрации изображений с периодическими помехами, и в данной статье не рассматривается.

Устранение перечисленных искажений – основная задача предварительной обработки АКИ для формирования условий использования их по назначению.

От того, существует ли изображение в цифровой форме, зависит математический аппарат, применимый для проведения операций по его обработке. Это, прежде всего, дискретные преобразования, определенные на конечных интервалах. Введение понятия «конечность» позволяет избежать противоречий, возникающих при использовании преобразования Фурье, для пространственно-спектрального анализа изображений, описываемых в общем случае нестационарным случайным процессом.

Таким образом, использование основных положений и выводов, следующих из теории

дискретных сигналов на конечных интервалах, представляется оправданным. Данная теория основана на выборе наиболее приемлемого варианта построения системы базисных функций из всего многообразия ВКФ, для которых сдвиг сигнала определяется как поразрядное сложение чисел по некоторому модулю. Понятие ВКФ охватывает в качестве частного случая систему функций Уолша, основанную на двоичной арифметике. Методология применения данной системы функций базируется на следующих свойствах.

1. Все функции системы являются действительными функциями на интервале определения $N = 2^n$.

2. Функции системы принимают только значения $+1$ и -1 , поэтому основные операции при использовании разложения по системе Уолша – сложение и вычитание.

3. Система функций Уолша является ортогональной на интервале определения N , а матрица Адамара, построенная по функциям Уолша, – симметрическая.

4. Матрица Адамара имеет размерность $N \times N$, следовательно, в нее входят N ортогональных функций и ее нельзя дополнить ни одной новой ортогональной функцией. Такая система функций является полной и может быть использована для построения унитарных преобразований негармонического спектрального анализа. Вычислительная сложность такого преобразования будет минимальна, так как все операции заменяются на операции сложения действительных чисел в отличие от дискретных экспоненциальных функций, где все числа комплексные [3].

ВКФ могут быть представлены через функции Радемахера, т. е. комплексные функции, заданные на том же интервале $N = m^n$:

$$R_i(x) = e^{j(2\pi/m)x_i}.$$

Здесь i – порядок функции Радемахера.

Тогда ВКФ могут быть записаны как

$$F(p, x) = \prod_{i=0}^{n-1} [R_i(x)]^{<P_i>}.$$

Для случая $m = 2$ функции Радемахера могут быть заданы следующим образом:

$$r_i(x) = (-1)^{<x_i>},$$

где $\langle x_i \rangle$ – i -й разряд двоичного представления переменной x .

При таком задании все функции Радемахера являются действительными и нечетными на интервале N . Составленная из них система не является полной.

В результате дополнения ее до полной можно записать систему функций Уолша:

$$\text{wal}(w, x) = \prod_{i=1}^n [r_i(x)^{\langle w_i \rangle}],$$

где $\langle w_i \rangle$ – значение i -го разряда номера функции Радемахера, представленного в коде Грея; $i = 1, 2, 3, \dots, n$.

Если в номере функции Радемахера присутствует только одна единица, то функция Уолша совпадает с функцией Радемахера с соответствующим номером.

Таким образом, на интервале определения $N = 2^n$ систему функций Уолша можно разделить на n групп. При этом функция нулевого порядка не учитывается. Если эти группы обозначить номерами $k = 1, 2, 3, \dots, n$, то каждая группа будет начинаться с функции Радемахера r_{n+1-k} . Каждая группа включает 2^{n-k} функций с учетом функции Радемахера. Таким образом, система функций Радемахера является своеобразным «каркасом», на котором строится система Уолша. Эту особенность можно использовать при спектральном анализе сигналов.

Методология применения такого преобразования базируется на ряде теорем, отличающихся от теорем классического спектрального анализа [3]. Следствия, вытекающие из теорем, рассмотренных ниже, позволяют строить эффективные алгоритмы фильтрации и корреляционного анализа аэрокосмических изображений.

1. Теорема о диадной свертке. Если $\{X_n\}$ и $\{Y_n\}$ – цифровые последовательности, заданные на интервале N , то последовательность свертки (корреляции) $Z_s = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} X_n Y_{n+s}$ будет определяться следующим образом:

$$Z_s = \sum_{u=0}^{N-1} N(C_u^X \times C_u^Y).$$

Здесь C_u^X – спектральные коэффициенты последовательности $\{X_n\}$;

C_u^Y – спектральные коэффициенты последовательности $\{Y_n\}$.

При использовании теоремы о диадной свертке можно понять механизм формирования элементов сигнала в спектральном пространстве после фильтрации. В отличие от соответствующей классической теоремы спектрального анализа, в данной теореме при вычислении автокорреляционной функции экстремум в точке совпадения не образуется. Кроме того, она не может быть применена для построения алгоритмов автоматического совмещения фрагментов изображений.

2. Теорема о вещественно-диадной свертке. Если $\{X_n\}, \{Y_n\}$ – цифровые последовательности, заданные на интервале N , то последовательность свертки (корреляции)

$$\{Z_s\} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} X_n Y_{n-s}$$

$$Z_s = \sum_{u=0}^{N-1} C_u^X (C_u^Y)_s.$$

Здесь $(C_u^Y)_s$ – спектральные коэффициенты, вычисляемые при сдвиге последовательности $\{Y_n\}$.

С помощью теоремы можно строить сложные спектральные фильтры и эффективные алгоритмы корреляционного анализа, использовать ее при построении систем совмещения изображений. Теорема не имеет аналога в классическом спектральном анализе.

3. Теорема об инвариантности прореженного базиса. Положим, что $\{V_n\}$ – цифровая последовательность, полученная из последовательности $\{X_n\}$ в результате диадного сдвига на l (т. е. $V_n = X_{n \oplus l}$), при этом

$$C^v = \frac{1}{N} \mathbf{H}_w \mathbf{V}, \quad C^x = \frac{1}{N} \mathbf{H}_w^0 \mathbf{X},$$

где C^v – коэффициенты спектра Уолша последовательности $\{V_n\}$;

$\mathbf{H}_w$ – исходная матрица Адамара;

C^x – коэффициенты секвентного спектра последовательности $\{X_n\}$;

$\mathbf{H}_w^0$ – матрица Адамара, прореженная произвольным образом.

Тогда

$$(C^v)^2 = (C^x)^2.$$

Теорема позволяет выборочно устранять некоторые спектральные составляющие, производя определенные виды фильтрации в процессе получения спектрального представления, что несвойственно другим системам базисных функций. Доказательство теоремы можно найти в статье [4].

4. Теорема об ограничении нетригонометрического спектра. Положим, что n – порядок системы функций Радемахера, k – номер группы функций в системе Уолша, а ограничение спектра осуществляется на уровне функций Радемахера с номером $n + 1 - k$. Тогда во вновь образованном изображении яркость полученных элементов

$$b_{ij}^{[N_s]} = \frac{1}{S^2} \sum_{g=1}^s \sum_{p=1}^s b_{gp},$$

где $N_s = \frac{N}{S}$;

$$s = 2^{k-1};$$

$$i, j = \overline{1, N_s}.$$

Для компактности записи зависимость $i(s)$; $j(s)$; $g(i)$; $p(j)$ в формуле не показана.

Теория об ограничении нетригонометрического спектра не имеет аналога в классическом спектральном анализе. Ее можно использовать при построении систем совмещения изображений. Интуитивное использование данного свойства позволяет построить двухуровневый алгоритм совмещения, при использовании которого вычислительные затраты в десятки раз меньше. Пример реализации такого подхода описан в работе [1].

5. Теорема об энергетической полноте квазидвумерного спектрального представления. Если $\mathbf{b}$ – матрица цифрового изображения размером $M \times N$, C – коэффициенты его квазидвумерного спектрального представления, то справедливо равенство

$$\frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} \mathbf{b}_{ij}^2 = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} C_{iv}^2.$$

Выражение является равенством Парсеваля для квазидвумерного представления двумерных сигналов. Для его доказательства не требуется особое пояснение, так как оно

вытекает из известных свойств спектрального анализа. Рассмотрение теоремы об энергетической полноте квазидвумерного спектрального представления имеет важное методологическое значение, поскольку служит обоснованием использования без потери энергетической значимости изображения одномерного его спектра при двумерной фильтрации. Это позволяет сократить вычислительные затраты в два раза и получить некоторые другие преимущества при устранении отдельных видов искажений.

6. Теорема о постоянной составляющей спектра. Если предположить, что $b(x, 0) = 0$ – конкретное значение элемента изображения в каждой строке, то нет необходимости передавать постоянную составляющую изображения через канал связи – ее всегда можно восстановить по формуле

$$C_0 = - \sum_{v=1}^{N-1} C(x, v-1) (-1) \sum_{i=1}^n \langle (v-1)_i x_i \rangle.$$

Передаваемый спектр в этом случае не имеет постоянной составляющей [5]. Теорема свойственна только данному виду преобразований, являясь следствием его алгебраической структуры.

Алгоритмы фильтрации, передачи и корреляционного анализа аэрокосмических изображений

Результат использования теорем 1 и 5 для фильтрации изображения с синхронными помехами [6] приведен на рис. 1.

Идея алгоритма базируется на применении усредняющего фильтра по горизонтали изображения. В соответствии с теоремой 1 при этом происходит потеря части энергии отдельных спектральных составляющих, что нарушает требования теоремы об энергетической полноте. Производится восстановление постоянных составляющих путем введения поправочного коэффициента на основе сравнения постоянных составляющих по столбцам изображения до и после фильтрации.

Алгоритм квазидвумерной фильтрации изображений с помехами в виде «выбитых пикселей» (рис. 2) выполняется в два этапа [7]. На первом этапе на основе обнаружения спектральных строк с отклонениями по энергетике

а

б

Рис. 1. Пример фильтрации изображения с синхронной помехой:
а – исходное изображение при СКО = 7,4184; б – результат фильтрации при СКО = 2,77

а

б

Рис. 2. Результаты применения алгоритма квазидвумерной фильтрации изображений с помехами в виде «выбитых пикселей»:

а – изображение с помехой при СКО = 14,06; б – результат фильтрации при СКО = 1,71

от всех остальных автоматически формируется множество «выбитых пикселей». На втором этапе – осуществляется интерполяционная фильтрация на основе учета значений спектральных составляющих вблизи «выбитых пикселей». После восстановления в пространство изображения получаем снимок, пригодный для анализа.

Идея алгоритма передачи изображений без постоянной составляющей [5] напрямую вытекает из теоремы 6. Если в исходное изображение ввести столбец с заранее известными значениями (0 или 256), то передача спектральной составляющей, соответствующей постоянной составляющей, может не осуществляться,

а ее значение будет вычисляться на приемной стороне. Организация такого режима передачи возможна, так как поле зрения оптической системы всегда больше, чем размеры считывающего элемента, и на изображении присутствуют так называемые теневые зоны. На качество передачи применение данного алгоритма практически не влияет (рис. 3). Однако

при этом возникают дополнительные возможности оптимизации процесса передачи, в том числе сжатия изображений. Пример передачи изображения городской застройки со сжатием приведен на рис. 4.

Возможность дополнительного сжатия изображений в процессе передачи возникает после применения теоремы 6 в алгоритме пе-

а

б

Рис. 3. Пример передачи изображения с восстановлением постоянной составляющей:
а – исходное изображение; б – переданное изображение при СКО = 0,012

а

б

Рис. 4. Пример передачи изображения:
а – исходное изображение размером 512×512 пикселей (объем – 256 КБ, время передачи – 210 мс);
б – после сжатия со степенью сжатия 0,2 при СКО = 7,0 (объем – 21 КБ, время передачи – 16 мс)

Рис. 5. Процесс совмещения изображений:

а – исходные и эталонные изображения; б – изображения первого этапа (теорема 4) и корреляционная функция по горизонтали и вертикали, полученная на первом этапе; в – корреляционная функция по горизонтали и вертикали, полученная на втором этапе

редачи изображений без постоянной составляющей. В результате работы данного алгоритма передаются спектральные составляющие, соответствующие только изменяющейся части изображений. При этом не все составляющие спектра энергетически значимы и их можно безболезненно исключить. Кроме того, нарушаются условия теоремы об энергетической полноте квазидвумерного спектрального представления, поэтому в протоколе передачи изображения предусматриваются поля для передачи поправок, обеспечивающих выполнение данных условий [8].

Подходы и преимущества корреляционного анализа для совмещения одноименных фрагментов изображений подробно рассмотрены в статье [9]. В данной статье приводится пример работы двухэтапного алгоритма поиска эталонного изображения на текущем изображении, формируемом в процессе съемки земной поверхности (рис. 5). На первом этапе осуществляется грубый, но быстрый поиск, результаты которого уточняются на втором этапе.

Заключение

В связи с большими объемами обрабатываемых данных при решении задач обработки АКИ необходимо постоянно искать методы и средства ускорения этого процесса, совершенствовать математический аппарат, применяемый для построения соответствующих алгоритмов, прежде всего для дискретных преобразований, определенных на конечных интервалах. Введение понятия конечности позволяет уйти от противоречий, вызванных использованием преобразования Фурье, для пространственно-спектрального анализа изображений, описываемых в общем случае нестационарным случайным процессом.

Рассмотренные примеры позволяют понять методологию применения преобразования Уолша для построения алгоритмов устранения синхронных помех, а также помех, связанных с потерей пикселей в процессе передачи изображений. Качество получаемых изображений вполне пригодно для дальнейшего их использования (СКО не более 7,0). Алгоритмы передачи и сжатия изображений позволяют достичь временных показателей, соответствующих передаче видеопотока со скоростью 50 кадр/с. Алгоритмы корреляционного совмещения изображений позволяют решать задачи сшивки снимков соседних маршрутов летательных аппаратов и строить системы автономной навигации по цифровым картам местности. Применение двухэтапного подхода позволяет сократить время решения задачи нахождения одноименных сюжетов в десять и более раз.

Список литературы

1. Злобин В. К., Костров Б. В., Свирина А. Г. Спектральный анализ изображений в конечных базисах. М.: КУРС; ИНФРА-М, 2016. 172 с.

2. Костров Б. В. Особенности формирования аэрокосмических изображений радиотехническими системами // Проектирование и технология электронных средств. 2011. № 1. С. 41–43.
 3. Злобин В. К., Костров Б. В., Саблина В. А. Место и роль методов секвентного анализа в обработке аэрокосмических изображений // Радиотехника. 2012. № 3. С. 64–72.
 4. Колесников А. Н., Костров Б. В. Метод про-реживания базисных функций в корреляционно-экстремальных алгоритмах совмещения изображений // Вопросы радиоэлектроники. Общетеchnическая серия. 2010. Вып. 1. С. 176–184.
 5. Костров Б. В., Гринченко Н. Н., Степанов Д. С., Унакова А. Г. Алгоритм передачи изображения с восстановлением постоянной составляющей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. Вып. 9. Ч. 1. С. 244–249.
 6. Костров Б. В., Саблина В. А. Адаптивная фильтрация изображений со структурными искажениями // Цифровая обработка сигналов. 2008. № 4. С. 49–53.
 7. Костров Б. В., Унакова А. Г. Квазидвумерная фильтрация синхронных помех на изображении // Проектирование и технология электронных средств. 2012. № 1. С. 32–35.
 8. Костров Б. В., Бастрычкин А. С. Сжатие изображений на основе ортогональных преобразований // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. № 9. Ч. 1. С. 134–140.
 9. Злобин В. К., Костров Б. В. Теоретические и методологические аспекты применения системы функций Виленкина – Крестенсона для обработки изображений // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2013. № 3. Вып. 45. С. 14–19.
- Поступила 30.11.16**

Светлов Геннадий Валентинович – кандидат экономических наук, генеральный директор Акционерного общества «Рязанское производственно-техническое предприятие «Гранит», г. Рязань.
Область научных интересов: системы повышения качества разработки и эксплуатации сложных систем.

Суменков Николай Александрович – доктор технических наук, главный инженер – заместитель генерального директора Акционерного общества «Рязанское производственно-техническое предприятие «Гранит», г. Рязань.
Область научных интересов: эксплуатация сложных радиотехнических комплексов.

Костров Борис Васильевич – доктор технических наук, профессор, заместитель начальника отдела автоматизированной системы управления Акционерного общества «Рязанское производственно-техническое предприятие «Гранит», г. Рязань.
Область научных интересов: обработка изображений, искусственный интеллект, информационные технологии.

Фокина Наталья Сергеевна – советник генерального директора Акционерного общества «Рязанское производственно-техническое предприятие «Гранит», г. Рязань.
Область научных интересов: применение информационных технологий и мультимедийных систем в обработке изображений.

The theory of discrete signals determined at finite intervals and its application for aerospace image processing

The purpose of the work was to generalize the well-known and proved by the authors ideas allowing us to expand the methods of applying orthogonal transformations in the field of aerospace image processing. A theoretical and methodological basis for application of Vilenkin – Krestenson's function systems has been built in a non-trigonometric, minimally possible form. According to the provisions and findings resulting from the theory of discrete signals at finite intervals, we offer the most viable option for constructing the basis functions system from the entire variety of Vilenkin – Krestenson's functions for which the signal shift is defined as the bitwise addition of numbers by a certain modulus. The theoretical and methodological provisions obtained are supported by the development of the algorithms for filtering and correlation analysis of aerospace images.

Keywords: aerospace images, orthogonal function systems, spectral analysis, correlation analysis, quasi-two-dimensional filtration algorithms, correlation alignment algorithms.

Svetlov Gennadiy Valentinovich – Candidate of Economical Sciences, Director General, Joint Stock Company “Ryazan Production and Technological enterprise “Granit”, Ryazan.

Science research interests: systems for improving the quality of development and operation of complex systems.

Sumenkov Nikolay Aleksandrovich – Doctor of Engineering Sciences, Chief Engineer – Deputy Director General, Joint Stock Company “Ryazan Production and Technological enterprise “Granit”, Ryazan.

Science research interests: operation of complex radio engineering facilities.

Kostrov Boris Vasilevich – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Deputy Head of Automated Control System Department, Joint Stock Company “Ryazan Production and Technological enterprise “Granit”, Ryazan.

Science research interests: image processing, artificial intelligence, IT.

Fokina Natalya Sergeevna – Adviser Director General, Joint Stock Company “Ryazan Production and Technological enterprise “Granit”, Ryazan.

Science research interests: IT and multimedia systems application in image processing.