

ПЕРЕДАЧА И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 004.932

Б.А. Алпатов, П.В. Бабаян, Е.А. Масленников

АЛГОРИТМЫ ОЦЕНИВАНИЯ ОРИЕНТАЦИИ ОБЪЕКТА ПО ЕГО ДВУМЕРНОМУ ИЗОБРАЖЕНИЮ В БОРТОВЫХ СИСТЕМАХ ВИДЕОСЛЕЖЕНИЯ

Рассмотрена задача оценивания пространственной ориентации объекта по его двумерному изображению с использованием известной трехмерной модели объекта. Описан общий подход к решению задачи и три основанных на нем алгоритма оценивания пространственной ориентации. Представлены результаты экспериментальных исследований предложенных алгоритмов.

Ключевые слова: *определение ориентации, углы Эйлера, геосфера, быстрое преобразование Фурье, структурный анализ, текстурный анализ.*

Введение. Актуальными задачами, решаемыми в бортовых системах обработки информации, являются обнаружение и слежение за движущимися объектами. При этом в процессе слежения объекты могут изменять свою пространственную ориентацию, что порождает новую задачу – распознавание ориентации объекта. Примерами ситуаций, в которых возникает необходимость оценить ориентацию объекта, являются: навигация и управление наземными мобильными роботами, автоматическая дозаправка беспилотных и пилотируемых летательных аппаратов, стыковка космических кораблей.

Существующие подходы к решению задачи оценивания пространственной ориентации объектов можно разделить на 3 основные группы.

1. Оценивание пространственной ориентации без использования трехмерной математической модели объекта [1]. Такие алгоритмы обладают достаточной эффективностью при несложной форме объекта (комбинация эллипсоидов и простых многогранников).

2. Оценивание пространственной ориентации объекта с использованием трехмерной математической модели на этапе обучения алгоритма [2]. Трехмерная модель объекта применяется для вычисления набора дескрипторов, соответствующих различным ориентациям объекта. Достоинством алгоритмов из этой группы является то, что сложные расчеты, требующие больших вычислительных затрат, выполняются на

этапе обучения алгоритма. На данном этапе не накладываются жесткие ограничения по времени выполнения. Реализация основного этапа алгоритма при этом требует меньших вычислительных затрат.

3. Оценивание пространственной ориентации объекта с использованием трехмерной математической модели объекта на основном этапе работы алгоритма (в реальном времени) [3]. Достоинством таких алгоритмов является высокая потенциально достижимая точность. Недостатком – значительные вычислительные затраты для объектов сложной формы.

Целью данной работы является разработка алгоритмов, предназначенных для работы в бортовых системах видеослежения. Основные требования, предъявляемые к этим алгоритмам, следующие:

- 1) возможность реализации при ограниченных вычислительных ресурсах;
- 2) универсальность по отношению к типу объекта;
- 3) возможность работы при неточной априорной информации об объекте;
- 4) возможность оценивания ориентации объекта при отсутствии прогнозируемого значения ориентации.

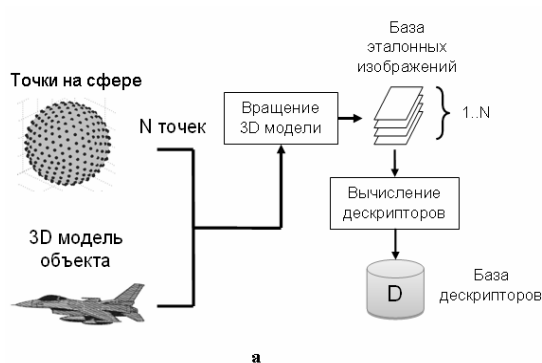
Отметим, что известные алгоритмы [1–3] не в полной мере удовлетворяют заданным требованиям. Вместе с тем алгоритмы, соответствующие второй группе, в наибольшей степени соот-

ветствуют поставленной задаче. Далее будет более подробно описан общий подход к решению задачи оценивания ориентации, относящийся ко второй группе подходов, а также будут представлены три базирующихся на нем алгоритма оценивания пространственной ориентации объекта.

Следует отметить, что для разрабатываемых алгоритмов дальность до объекта интереса считается известной величиной и изображения объекта получаются при фронтальном освещении.

Представление ориентации объекта в пространстве. Для математического описания пространственной ориентации объекта будем использовать углы Эйлера [4] (α, β, γ). Существуют различные соглашения записи углов Эйлера (порядок осей при повороте). Примем соглашение XYZ для нашей задачи. Данное соглашение подразумевает последовательные повороты вокруг осей X, Y, Z в глобальной системе координат. Глобальной системой координат является система координат, привязанная к камере. Таким образом, поскольку ось Z в глобальной системе координат совпадает с оптической осью камеры, третий угол Эйлера γ соответствует углу поворота вокруг оптической оси камеры.

Общий подход к решению задачи. Предлагаемые алгоритмы состоят из двух этапов. *Пер-*



вый этап (этап обучения) выполняется однократно для рассматриваемого объекта. Данный этап содержит наиболее вычислительно-затратные операции и может быть выполнен на высокопроизводительной вычислительной машине.

Этап обучения включает в себя:

- 1) дискретизацию сферы – получение равномерно распределенных точек на сфере (множество дискретных значений первых двух углов тройки Эйлера);
- 2) генерирование эталонных изображений;
- 3) вычисление дескрипторов на каждом эталонном изображении.

Схема этапа обучения алгоритма представлена на рисунке 1,а.

Второй этап выполняется каждый раз при оценке ориентации. Он требует меньших вычислительных затрат, чем этап обучения.

На данном этапе работы алгоритма оцениваются углы α, β и γ путем поиска дескриптора из эталонной базы, максимально соответствующего дескриптору наблюдаемого изображения.

Схематическое представление алгоритма определения пространственной ориентации объекта показано на рисунке 1,б.

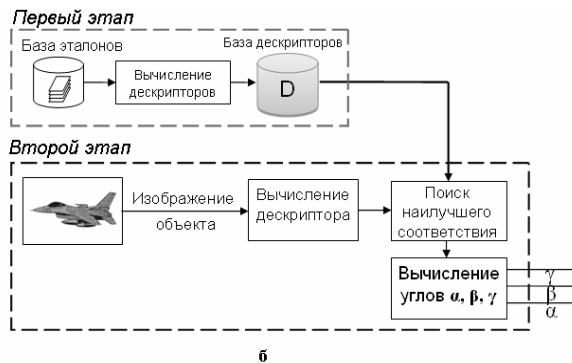


Рисунок 1 – Схема алгоритма оценивания ориентации объекта:
а – схема этапа обучения; б – общая схема алгоритма

На основе описанного общего подхода к решению задачи могут быть построены различные алгоритмы, отличающиеся выбором дескрипторов и функции нахождения наилучшего соответствия. Рассмотрим более подробно этап дискретизации сферы, общий для всех алгоритмов.

Дискретизация сферы. Предлагаемые алгоритмы требуют получения набора эталонных изображений. Этот набор должен достаточно полно охватывать все возможные ориентации объекта. Если представить сферу, внутри которой находится исследуемый объект, то для формирования набора эталонных изображений не-

обходимо получить изображение объекта из различных точек сферы. Для этого необходимо решить задачу дискретизации сферы [5]. Каждая точка на сфере определяет 2 составляющих тройки углов Эйлера для объекта (углы α и β), оставляя третий угол γ свободным. Это означает, что поворотом наблюдаемого изображения объекта можно добиться его совпадения с одним из эталонных изображений с точностью, соответствующей угловому расстоянию между ближайшими точками дискретной сферы.

Рассмотрим некоторые методы дискретизации сферы.

1. Распределение точек на пересечениях параллелей и меридианов сферы (метод I). Данное решение является самым простым в реализации, однако при таком методе дискретизации получается высокая плотность точек на полюсах и низкая – на экваторе.

2. Распределение точек по спирали (метод II).

3. Принцип геосферы (метод III). Частным случаем геосферы является икосаэдр. Точки геосферы получаются путем дробления икосаэдра на n^2 равносторонних треугольников, где величина n называется фактором геосферы.

Было проведено сравнение описанных методов дискретизации сферы. Результаты сравнения приведены в таблице 1. На рисунке 2, а–в отображены дискретные сферы, полученные различными методами дискретизации. На рисун-

ке 2, г–е отображены гистограммы угловых расстояний между точками сферы (в угловых градусах).

Таблица 1 – Результаты сравнения методов дискретизации

Метод дискретизации	Метод I	Метод II	Метод III
Кол-во точек	257	252	252
Среднее угловое расстояние между соседними точками	6,3°	7,0°	6,8°
Разность максимального и минимального угловых расстояний между соседними точками	8,5°	5,7°	1,8°

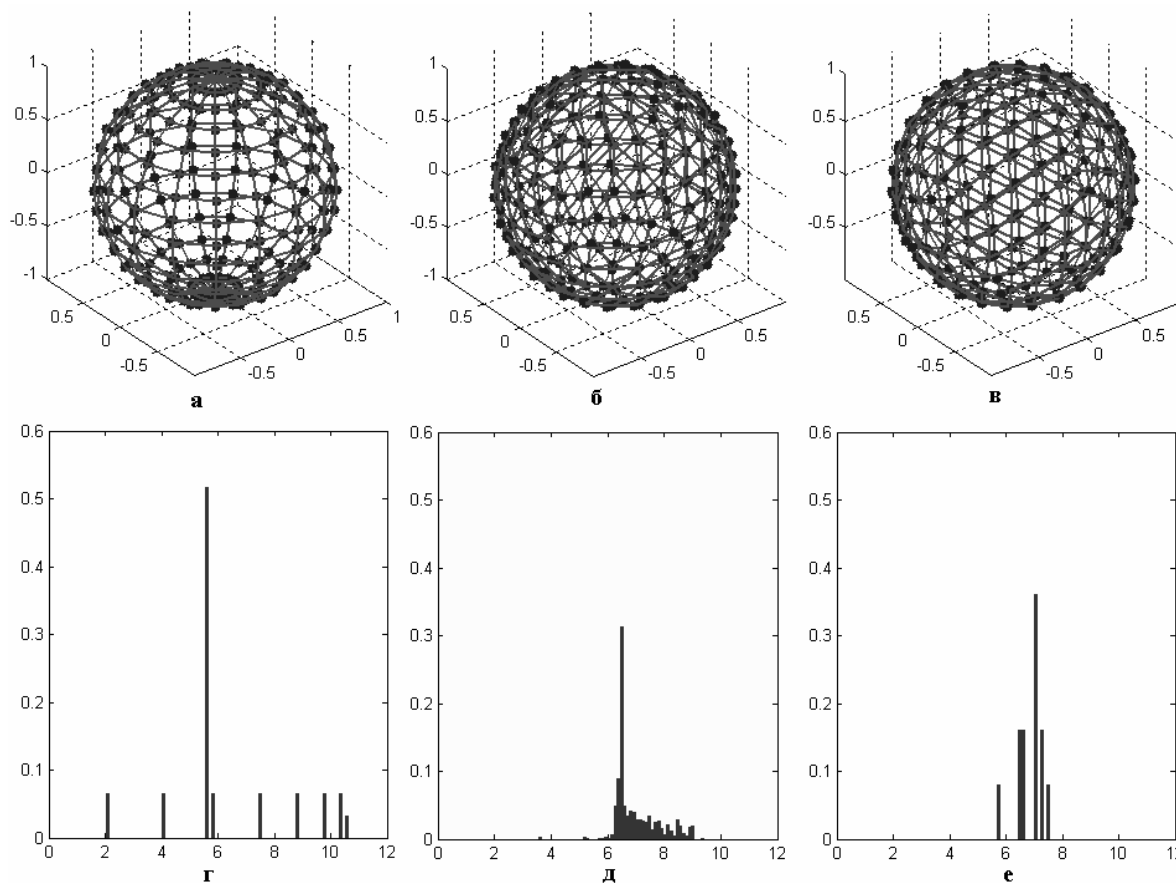


Рисунок 2 – Дискретизация сферы: а – методом разбиения на параллели и меридианы; б – методом распределения точек по спирали; в – методом геосферы; г–е – гистограммы угловых расстояний между точками для соответствующих методов дискретизации (в градусах)

Из гистограмм следует, что метод дискретизации по принципу геосферы позволяет получить наиболее равномерное распределение точек по сфере. Следует отметить, что размах вариации значений угловых расстояний между точками геосферы и гистограмма отличаются от теор-

етических данных в связи с погрешностью рекурсивного алгоритма вычисления точек геосферы.

В дальнейшем рассмотрим основные особенности трех предлагаемых алгоритмов оценивания ориентации объекта.

Алгоритм оценивания пространственной ориентации с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ). Данный алгоритм базируется на свойствах преобразования Фурье, отражающих поведение двумерного спектра Фурье при смещении и повороте изображений. При повороте изображения происходит такой же поворот его амплитудного спектра, а сдвиг не оказывает влияния на амплитудный спектр изображения.

Дескриптор D_i эталонного изображения I_i вычисляется по формуле

$$D_i = F(\text{pol}(\log(|\Phi_i|))), \quad (1)$$

где $|\Phi_i|$ – амплитудный спектр изображения, $\text{pol}()$ – операция перевода в полярную систему координат, $F()$ – дискретное преобразование Фурье (ДПФ).

Углы α^* , β^* и γ^* находятся корреляционным методом [6,7].

Алгоритм оценки пространственной ориентации с помощью структурного анализа. При использовании методов структурного анализа [8] изображение рассматривается как набор особых точек, в качестве которых могут рассматриваться углы, пересечения прямых, специфичные формы.

Из наблюдаемого изображения извлекаются особые точки и вычисляются их дескрипторы. В описываемой реализации были выбраны дескрипторы SURF [9]. Дескриптором эталонного изображения считается набор извлеченных особых точек и вычисленных по ним SURF-дескрипторов. Для определения наиболее совпадающего эталона из базы происходит поиск набора SURF-дескрипторов из базы данных, максимально соответствующего набору дескрипторов наблюдаемого изображения по методу RANSAC [10].

SURF-дескрипторы являются инвариантными к повороту, поэтому эталонный дескриптор, наиболее близкий к дескриптору наблюдаемого изображения, будет соответствовать изображению объекта, расположенного в ориентации, отличающейся углом поворота γ от наблюдаемого объекта. В таком случае оцененные значения α^* и β^* наблюдаемого изображения равны значениям α и β найденного эталона. Для нахождения угла γ^* (поворота камеры) применяется оценивание евклидова преобразования изображения на основе алгоритмов RANSAC или LMS [10, 11].

Алгоритм оценивания пространственной ориентации с помощью текстурного анализа. Данный алгоритм основывается на текстурно-геометрическом описании изображения объекта. Изображение объекта делится на 4 части (четверти). Четверти образуются в результате пересечения главных осей [12] объекта, повернутых на 45° . Привязка границ четвертей к осям объекта придаёт описанному разделению на четверти инвариантность к повороту изображения. Однако из-за отсутствия информации о направлении главных осей очередность четвертей может быть смещена на 180° (рисунок 3).

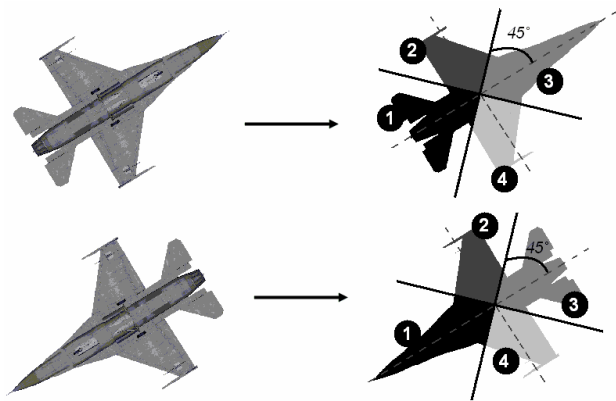


Рисунок 3 – Разбиение на четверти изображения и повернутого на 180° изображения объекта

Для каждой четверти изображения вычисляются текстурные дескрипторы. Статистические меры [12] и характеристики формы, использованные для описания текстуры, приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Составляющие текстурного дескриптора

1	$m = \sum_{i=0}^{L-1} z_i p(z_i)$	Мера средней яркости
2	$\sigma = \sqrt{\mu_2(z)} = \sqrt{\sigma^2}$	Мера средней контрастности
3	$R = 1 - \frac{1}{1 + \sigma^2}$	Мера относительной гладкости области
4	$\mu_3 = \sum_{i=0}^{L-1} (z_i - m)^3 p(z_i)$	Характеристика асимметричности гистограммы
5	$U = \sum_{i=0}^{L-1} p^2(z_i)$	Мера равномерности (однородности)
6	$e = -\sum_{i=0}^{L-1} p(z_i) \log_2 p(z_i)$	Мера случайности (энтропия)
7	$q = \frac{A_i}{A_0}$	Характеристика площади
8	$v = \frac{Y_i}{Y_0}$	Характеристики протяженности

В приведенной таблице приняты следующие обозначения: z_i – значения яркостей элементов изображения, $p(z_i)$ – гистограмма яркости, m – среднее значение яркости, σ^2 – дисперсия яркости, $\mu_n(z)$ – центральный момент порядка n случайной величины z_i , q – отношение площади изображения объекта в данной четверти (A_i) к общей площади изображения объекта (A_0), v – отношение длины главной оси четверти (Y_i) к длине главной оси объекта (Y_0).

Каждая четверть описывается вектором из 8 компонент. Чтобы уменьшить размерность пространства признаков и прийти к более информативным и компактным текстурным дескрипторам, точки 8-мерного пространства преобразуются в точки 3-мерного пространства посредством преобразования главных компонент [13].

Таким образом, дескриптором являются 4 точки в трехмерном пространстве:

$$D_i = [p_1, p_2, p_3, p_4], \quad (2)$$

где i – номер дескриптора, p – точка в трехмерном пространстве, описывающая конкретную четверть.

Обозначим через D_i^R повернутый на 180° дескриптор

$$D_i^R = [p_3, p_4, p_1, p_2]. \quad (3)$$

При поиске наилучшего соответствия используется критериальная функция

$$f_{match}(i) = \min(|D_0 - D_i|, |D_0^R - D_i|), \quad (4)$$

где D_i – дескриптор эталона i , D_0 – дескриптор наблюдаемого изображения, D_0^R – повернутый на 180° дескриптор наблюдаемого изображения.

Значение i^* , при котором достигается глобальный минимум выражения (3), представляет собой индекс наиболее соответствующего эталона

$$i^* = \arg \min \{f_{match}(i)\}. \quad (5)$$

По найденному индексу i^* эталонного дескриптора определяются искомые углы α^* и β^* . Величина угла γ^* находится путем сопоставления силуэтов наблюдаемого изображения с силуэтами поворачиваемого эталонного изображения. Для этого, к примеру, можно воспользоваться разностным корреляционным алгоритмом оценивания геометрических преобразований [6]. Этап определения угла γ^* приводит к необхо-

димости хранения дополнительных эталонных изображений силуэтов в базе данных.

Экспериментальные исследования. Для исследования было сгенерировано 200 изображений объекта в различных ориентациях. Пример сгенерированного изображения представлен на рисунке 4. Каждое изображение подвергалось воздействию аддитивного равномерного шума. Отношение сигнал/шум (ОСШ) на сгенерированных изображениях составляло 100 и 25.



Рисунок 4 – Пример сгенерированного изображения объекта в ориентации $(\alpha, \beta, \gamma) = [-31, 54, 36]$

На рисунке 5 представлены гистограммы ошибок работы алгоритмов. На каждой гистограмме по оси абсцисс отложена величина ошибки в градусах, по оси ординат – частота появления ошибки. В таблице 3 приведены средние значения ошибок.

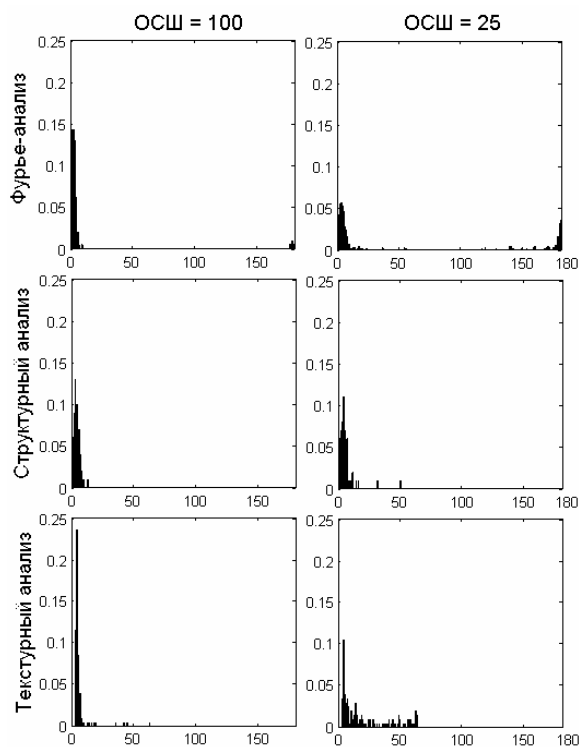


Рисунок 5 – Гистограммы ошибок алгоритмов оценивания пространственной ориентации

Таблица 3 – Результаты сравнения алгоритмов оценивания пространственной ориентации

Алгоритм	ОСШ	Средняя ошибка, °
Фурье анализ	100	9,9
	25	9,1
Структурный анализ	100	4,6
	25	5,5
Текстурный анализ	100	7,5
	25	50,1

Исходя из анализа полученных результатов исследования, можно сделать вывод, что алгоритм на основе структурного анализа является наиболее точным и устойчивым к шуму. Однако данный алгоритм обладает высокой вычислительной сложностью. Алгоритм на основе текстурного анализа оказался неустойчивым к шуму, однако он более прост в реализации. Алгоритм с использованием БПФ оказался довольно устойчивым к шуму, однако при уменьшении ОСШ увеличивается вероятность симметричных ошибок (ошибки ориентации в 180°).

Заключение. Рассмотрен общий подход к решению задачи оценивания пространственной ориентации объекта по его изображению с использованием информации о трехмерной модели. Предложены 3 алгоритма оценивания пространственной ориентации объекта: на основе БПФ, на основе структурного анализа, на основе текстурного анализа. Экспериментально подтверждена работоспособность предложенных алгоритмов, проведены исследования точности при различном уровне зашумления изображений.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (государственный контракт от 16.05.2011 г. №16.740.11.0519).

Библиографический список

1. Saxena A., Driemeyer J., Ng A. Learning 3-D Object Orientation from Images // Robotics and Automation,

IEEE International Conference on, 2009. – P. 794–800.

2. Lablack A., Martinet J., Djeraba C. Head Pose Estimation Using a Texture Model Based on Gabor Wavelets // Pattern Recognition Recent Advances, 2009. – P. 367–377.

3. Henner K., Hans-Hellmut N. 3D Pose Estimation by Directly Matching Polyhedral Models to Gray Value Gradients // International Journal of Computer Vision 23(3), 1997. – P. 283–302.

4. Bekir E. Introduction to Modern Navigation Systems // World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 255 p., 2007.

5. Saff E., Kuijlaars A. Distributing many points on a sphere // The Mathematical Intelligencer. 1997. Vol. 19. No. 1. – P. 5–11.

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

7. Алпатов Б.А., Бабаян П.В., Стротов В.В. Анализ точностных характеристик методов слежения за фоновым изображением для бортовой видеоинформационной системы // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2007. – №20. – С. 3–10.

8. Визильтер Ю.В., Желтов С.Ю., Бондаренко А.В., Ососков М.В., Моржин А.В. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения: Курс лекций и практических занятий. – М.: Физматкнига, 2010. – 672 с.

9. Bay H., Ess A., Tuytelaars T., Gool L. SURF: Speeded Up Robust Features // Computer Vision and Image Understanding (CVIU). 2008. Vol. 110. No. 3. – P. 346–359.

10. Fischler M., Bolles R. Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography // Comm. Of the ACM 24, 1981. – P. 381–395.

11. Hartley R., Zisserman A. Multiple View Geometry in Computer Vision. – Second edition, Cambridge University Press, 2003. – 673 p.

12. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2005. – С. 947–953.

13. Фукунага К. Введение в статистическую теорию распознавания образов. – М.: Наука, 1979. – 368 с.

УДК 004.932:528.852

А.Е. Кузнецов, В.И. Нефедов

МОДЕЛЬ ЦИФРОВОГО СОВМЕЩЕНИЯ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ СПУТНИКОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

Разработана математическая модель цифрового совмещения измерений от сканирующей аппаратуры, устанавливаемой на гидрометеорологических спутниках «Метеор-М». Модель содержит математические соотношения,

на основе которых измерения одного датчика дополняются информацией другого датчика. На ее базе создано программное обеспечение получения нового вида информационно-продукции уровня обработки 1d.

Ключевые слова: модели координатного соответствия, цифровое совмещение, спутники серии «Метеор-М», сканирующие устройства ИКФС-2 и МСУ-МР.

Введение. Гидрометеорологические космические аппараты серии «Метеор-М» предназначены для оперативного получения глобальной информации в целях прогноза погоды, контроля озонового слоя, мониторинга земной поверхности и т. п. [1] Для решения поставленных задач на борту спутников устанавливается различного рода аппаратура наблюдения, например, ИК-зондировщик (ИКФС-2), предназначенный для температурного и влажностного зондирования атмосферы [2], многозональное сканирующее устройство малого разрешения (МСУ-МР), предназначенное для получения изображений облачности, и другие измерительные приборы. Некоторые из практических задач могут успешно решаться по измерениям отдельных датчиков. Однако наиболее качественные результаты по дешифрированию и интерпретации материалов дистанционных наблюдений достигаются при совместной обработке разнородной по спектральному представлению информации. Для этого необходимо выполнить так называемое цифровое совмещение, связанное с дополнением сетки измерений одного датчика (именуемого «целью») информацией от другого датчика (именуемого «совмещаемый»), чтобы получить гиперспектральную информацию о наблюдаемом объекте в системе координат «цели». В отличие от обычного координатного совмещения здесь геометрические характеристики «цели» сохраняются и представляются в удобной для последующей тематической обработки форме, или в виде так называемой выходной продукции уровня обработки 1d.

Таким образом, для решения задачи цифрового совмещения требуется разработать математические модели, которые позволяют установить соответствие между пикселями «совмещаемого» датчика и пикселями «цели» для разных по принципу действия сканирующих устройств.

Модель координатного соответствия при цифровом совмещении. Модель основана на анализе координатного соответствия элементов «цели» и измерений «совмещаемого» датчика и наоборот. Для ее получения воспользуемся аналитическими уравнениями геодезической привязки элементов сканерного снимка, представленными в обобщенном виде выражениями:

$$\varphi_{\text{ц}} = \Phi_{\text{ц}}(n_{\text{ц}}, m_{\text{ц}}), \quad \lambda_{\text{ц}} = \Psi_{\text{ц}}(n_{\text{ц}}, m_{\text{ц}}), \quad (1)$$

$$\varphi_{\text{с}} = \Phi_{\text{с}}(n_{\text{с}}, m_{\text{с}}), \quad \lambda_{\text{с}} = \Psi_{\text{с}}(n_{\text{с}}, m_{\text{с}}), \quad (2)$$

и обратных им уравнений, полученных численным методом,

$$m_{\text{ц}} = \Phi_{\text{ц}}^{-1}(\varphi_{\text{ц}}, \lambda_{\text{ц}}), \quad n_{\text{ц}} = \Psi_{\text{ц}}^{-1}(\varphi_{\text{ц}}, \lambda_{\text{ц}}), \quad (3)$$

$$m_{\text{с}} = \Phi_{\text{с}}^{-1}(\varphi_{\text{с}}, \lambda_{\text{с}}), \quad n_{\text{с}} = \Psi_{\text{с}}^{-1}(\varphi_{\text{с}}, \lambda_{\text{с}}), \quad (4)$$

где $m_{\text{ц}}, m_{\text{с}}, n_{\text{ц}}, n_{\text{с}}$ – номера столбцов и номера строк на снимке-«цели» и «совмещаемом» снимке соответственно, а $\varphi_{\text{ц}}, \varphi_{\text{с}}, \lambda_{\text{ц}}, \lambda_{\text{с}}$ – соответствующие им значения геодезической широты и долготы.

Схему расчета поясним на примере цифрового совмещения данных от ИКФС-2 с полосой обзора на местности порядка 2500 км и размером элемента около 100 км, со снимком датчика МСУ-МР с полосой обзора порядка 2800 км и размером элемента около 1 км. Снимок от датчика ИКФС-2 рассмотрим в качестве «цели». На рисунке 1 представлен вероятный пример взаимного расположения рассматриваемых пар изображений на поверхности Земли.

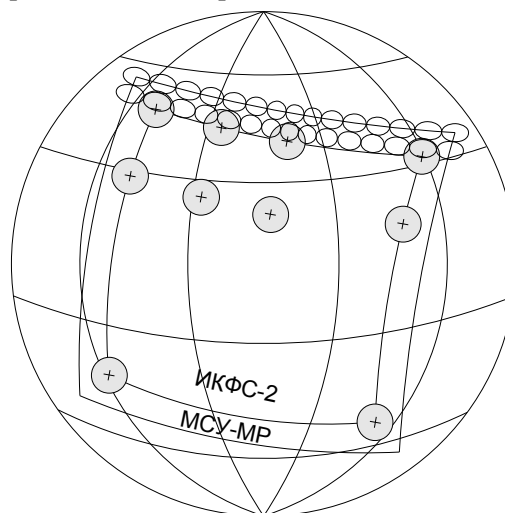


Рисунок 1 – Пример расположения маршрутов ИКФС-2 и МСУ-МР:

⊕ – измерения «цели», ○ – измерения «совмещаемого» датчика

Расчет начнем с поиска оптимальной области определения данных координатного соответ-

ствия на снимке-«цели». Для этого по уравнениям (2) определим геодезические координаты φ_c, λ_c регулярного ряда контурных точек «совмещаемого» снимка МСУ-МР, а затем согласно условию $\varphi_u = \varphi_c, \lambda_u = \lambda_c$ по численным уравнениям (3) найдем соответствующие им точки в системе исходных координат снимка-«цели». Далее, в процессе минимаксного анализа найденных координат, с учетом возможности выхода за пределы изображения, определим границы прямоугольной области на снимке-«цели», вмещающей в себя проекцию «совмещаемого» снимка.

Затем выполним расчет максимального числа элементов «совмещаемого» снимка, накрываемых одним элементом снимка-«цели». Для этого на снимке-«цели» выберем 9 элементов, расположенных регулярным образом в области определения расчетных данных $\Delta M_u \times \Delta N_u$, и с использованием соотношений (1), (4) произведем проектирование 8 контурных точек круговой апертуры с некоторым радиусом r поочередно для каждого из 9 указанных элементов снимка-«цели» на плоскость «совмещаемого» изображения. Далее, в процессе последовательного минимаксного анализа проекционных координат контурных точек 9 рассматриваемых элементов снимка-«цели» с округлением в сторону большего целого найдем максимальную по площади прямоугольную область на «совмещаемом» изображении, охватывающую наибольший проекционный контур (рисунок 2).

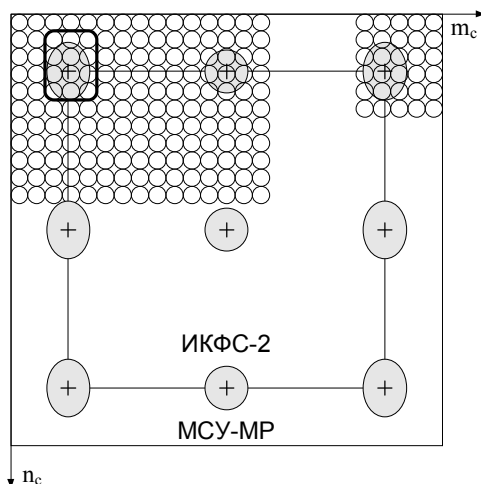


Рисунок 2 – Пример определения максимального числа элементов «совмещаемого» снимка, накрываемых элементом снимка-«цели»

Рассчитанная величина определяет максимальную размерность массива памяти, необходимого для накопления исходных координат элементов «совмещаемого» снимка, накрываемых апертурой «цели». При определении вели-

чины радиуса апертуры ИКФС-2 в плоскости исходного изображения учитывается, что пространственные поля зрения соседних интерферограмм не соприкасаются друг с другом, так как угловой размер отдельной интерферограммы в несколько раз меньше углового расстояния между центрами соседних интерферограмм. Поэтому радиус круговой апертуры r на снимке-«цели» принимается равным $0.5/k$, где k – коэффициент, равный отношению углового расстояния между центрами соседних интерферограмм к угловому размеру отдельной интерферограммы.

Далее, в следующем порядке произведем основной расчет. По описанному выше алгоритму выполним проектирование 8 контурных точек элемента снимка-«цели», выбранного из области определения координатного соответствия $\Delta M_u \times \Delta N_u$, на плоскость «совмещаемого» снимка и найдем прямоугольную область существования элементов, совмещаемых с рассматриваемым элементом «цели» (рисунок 3).

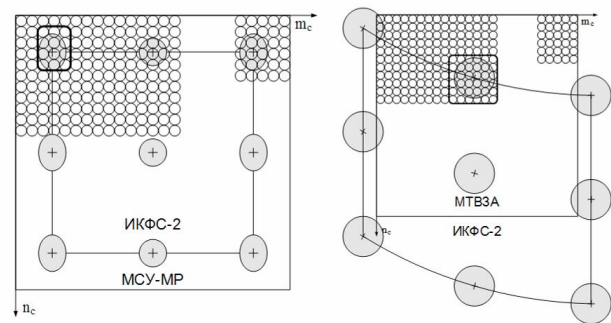


Рисунок 3 – Схема определения исходных координат элементов, совмещаемых с рассматриваемым элементом снимка-«цели»

Очевидно, что для последующего определения попадания некоторого «совмещаемого» элемента из этой области в площадь апертуры «цели» необходимо иметь формальное описание ее контура в системе координат «совмещаемого» изображения. Наиболее удобным и точным способом получения необходимого соотношения представляется аппроксимация рассматриваемого проекционного контура эллипсом, уравнение которого имеет вид

$$\frac{\left((n_c - n_{yc}) \cos \alpha + (m_c - m_{yc}) \sin \alpha \right)^2}{a^2} + \frac{\left((m_c - m_{yc}) \cos \alpha - (n_c - n_{yc}) \sin \alpha \right)^2}{b^2} = 1, \quad (5)$$

где координаты центра эллипса m_{yc}, n_{yc} , угол разворота осей симметрии α и размеры его полуосей a и b являются неизвестными параметрами. Их значения определим с использованием

метода наименьших квадратов из системы уравнений вида (5) по известным проекционным координатам контурных точек эллипса n_{ci}, m_{ci} , где $i=0, \dots, 7$ – порядковый номер контурной точки. Найденное таким образом уравнение проекционного контура апертуры «цели» позволяет обнаруживать «совмещаемые» элементы по простым уравнениям планиметрии, без использования сложных соотношений координатной привязки (1 – 4), в следующем порядке. Сначала определяются координаты рассматриваемого элемента «совмещаемого» снимка относительно центра эллипса $\Delta m = m_c - m_{ic}$, $\Delta n = n_c - n_{ic}$ (рисунок 3). Затем производится поворот в систему координат, совмещенную с осями симметрии проекционного эллипса $\Delta m' = \Delta m \cos \alpha - \Delta n \sin \alpha$, $\Delta n' = \Delta n \cos \alpha + \Delta m \sin \alpha$. Далее рассчитываются длина r и угол наклона φ радиус-вектора «совмещаемого» элемента в системе координат эллипса $r = \sqrt{\Delta n'^2 + \Delta m'^2}$, $\varphi = \arctg(\Delta m' / \Delta n')$. После этого по известному геометрическому уравнению вычисляется длина радиус-вектора эллипса ρ , имеющего такой же угол наклона φ

$$\rho = b / \sqrt{1 - e^2 \cos^2 \varphi},$$

где e – эксцентриситет аппроксимирующего эллипса ($e = \sqrt{1 - b^2/a^2}$). Очевидно, что когда величина r оказывается меньше величины ρ , тогда «совмещаемый» элемент попадает в площадь апертуры «цели» и его исходные координаты заносятся в массив выходных данных, в противном случае они игнорируются.

Рассмотренная модель базируется на функциях геодезического соответствия, поэтому рассмотрим схему их получения.

Модель геодезической привязки информации сканирующих датчиков. Прямые функции геодезического соответствия (1) и (2) основываются на математической модели сканерной съемки подстилающей поверхности. В работе [3] рассматриваются принципы построения таких моделей для различных типов сканирующих устройств. Однако непосредственное использование полученных результатов затруднительно, поскольку особенность задачи цифрового совмещения состоит в том, что необходимо одновременно геокодировать информацию от нескольких различающихся по принципу работы датчиков. С учетом этого требования модель геопривязки необходимо спроектировать так, чтобы у нее имелась общая часть, одинаковая для всех типов сканирующих устройств, и уни-

кальная, учитываемая в моделях работы датчиков. Из-за ограниченного объема статьи не будем приводить детальных математических соотношений, отдельные элементы которых можно найти в [3]. Опустим также математические описания новых видов сканирующих устройств и ограничимся лишь рассмотрением схемы выполнения последовательности координатных преобразований, лежащей в основе модели геопривязки целевой информации от КА «Метеор-М» (рисунок 4).

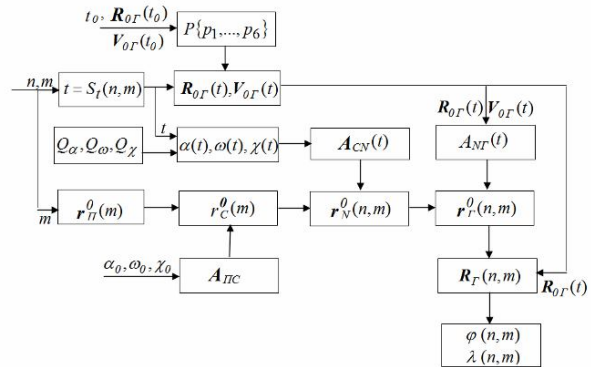


Рисунок 4 – Схема последовательности этапов координатной привязки измерений от сканирующих датчиков

Из ее рассмотрения следует, что исходными данными для процедуры геодезической привязки изображений, кроме координат (n, m) визируемого элемента на снимке, являются следующие параметры:

t_0 – момент времени, на который был произведен расчет начальных условий невозмущенного орбитального движения спутника $\mathbf{R}_{0r}(t_0)$ и $\mathbf{V}_{0r}(t_0)$;

$\mathbf{R}_{0r}(t_0) = [X_{0r}(t_0), Y_{0r}(t_0), Z_{0r}(t_0)]^T$ – вектор начального положения спутника в гринвичской системе координат;

$\mathbf{V}_{0r}(t_0) = [\dot{X}_{0r}(t_0), \dot{Y}_{0r}(t_0), \dot{Z}_{0r}(t_0)]^T$ – вектор начальной скорости спутника в гринвичской системе координат;

$\alpha_0, \omega_0, \chi_0$ – значения установочных углов тангажа, крена и рысканья датчика соответственно, по отношению к посадочной платформе спутника;

$Q_\alpha \{\alpha_1, \dots, \alpha_k\}, Q_\omega \{\omega_1, \dots, \omega_k\}, Q_\chi \{\chi_1, \dots, \chi_k\}$ – множества, включающие в себя k значений телеметрических измерений углов тангажа, крена и рысканья спутника соответственно, произведенных в дискретные моменты времени. Использование одинаковых символьных обозначений для установочных углов датчика на спутни-

ке и для углов ориентации самого спутника обусловлено тождественностью геометрического способа их определения.

Представленные на схеме координатные преобразования производятся в следующем порядке.

На предварительном этапе по заданным начальным условиям $t_0, \mathbf{R}_{o_r}(t_0), \mathbf{V}_{o_r}(t_0)$ определяются шесть параметров кеплеровской орбиты, значения которых необходимы для использования в стандартных уравнениях координатной привязки спутника. На схеме искомые параметры образуют множество P . Для этого сначала производится преобразование начальных значений гринвичских координат и составляющих скорости спутника в абсолютную систему координат, ось абсцисс которой совпадает с направлением на точку весеннего равноденствия.

Затем определяются искомые кеплеровские параметры орбиты.

На следующем этапе предварительных расчетов производится обработка телеметрических значений углов ориентации спутника из дискретных множеств $Q_\alpha, Q_\omega, Q_\chi$ с целью фильтрации недостоверных отсчетов, возникающих из-за сбоев в работе измерительной аппаратуры на борту спутника. Затем по отфильтрованным значениям углов ориентации с использованием курсочно-квадратичной аппроксимации формируются соответствующие множества квадратичных полиномов, позволяющие рассчитывать непрерывные значения углов тангажа, крена и рысканья спутника $\alpha(t), \omega(t), \chi(t)$ в текущий момент времени съемки $t(n, m)$. На заключительной стадии предварительных расчетов определяются элементы матрицы \mathbf{A}_{nc} поворота от приборной системы координат сканера $ox_n y_n z_n$ к связанной системе координат $ox_c y_c z_c$, совмещенной с конструктивными осями спутника.

Основная часть расчета начинается с определения направляющих косинусов $x_n^0(m), y_n^0(m), z_n^0(m)$ визирующего вектора в приборной системе координат $ox_n y_n z_n$ по соответствующим уравнениям закона сканирования рассматриваемого датчика. Под приборной здесь подразумевается система координат, начало которой совмещено с центром масс КА, ось oz_n совпадает с оптической осью прибора и направлена в зенит, ось ox_n совпадает с направлением полета КА, а ось oy_n дополняет систему координат до правой.

После этого найденные значения направ-

ляющих косинусов преобразуются в связанную систему координат $ox_c y_c z_c$ с использованием ранее рассчитанной матрицы \mathbf{A}_{nc} .

Затем производится расчет времени съемки указанного элемента исходного снимка с координатами (n, m) по формуле $t = (n-1)T_c + (m-1)T_s$, где T_c – время формирования строки, T_s – время формирования элемента строки. Для датчиков с механическим принципом строчной развертки $T_s = T_c / M$, M – число элементов в строке, для приборов с электронным способом строчной развертки, сконструированных на ПЗС-линейках, время T_s полагается равным нулю. Далее для рассчитанного момента времени t с использованием соответствующих квадратичных полиномов определяются текущие значения углов ориентации спутника $\alpha(t), \omega(t), \chi(t)$ в нормальной системе координат $ox_n y_n z_n$, начало которой совмещено с центром масс спутника, ось oz_n совпадает с местной вертикалью в текущий момент времени и направлена от точки надира в сторону спутника, ось ox_n располагается в курсовой плоскости и направлена в сторону полета, а ось oy_n дополняет систему координат до правой. После этого рассчитывается матрица \mathbf{A}_{cn} поворота от связанной системы координат к нормальной системе координат.

На заключительном этапе матричных вычислений определяются элементы матрицы \mathbf{A}_{nr} поворота от нормальной системы координат к гринвичской системе координат.

После расчета элементов определителя матрицы \mathbf{A}_{nr} производится преобразование направляющих косинусов визирующего вектора из нормальной системы координат в гринвичскую систему координат.

Необходимые для заключительных расчетов значения гринвичских координат визируемого элемента земной поверхности X_r, Y_r, Z_r определяются стандартными методами аналитической геометрии в точке пересечения визирующего луча, представленного уравнением прямой с известными направляющими косинусами x_r^0, y_r^0, z_r^0 и проходящего через известную точку гринвичского пространства с координатами спутника $X_{o_r}, Y_{o_r}, Z_{o_r}$ с поверхностью земного эллипсоида.

Структура программно-математического обеспечения процесса цифрового совме-

ния. На рисунке 5 представлена схема цифрового совмещения измерений двух датчиков, которая обеспечивает:

– определение параметров взаимно-координатного соответствия пикселей цифровых данных двух совмещаемых датчиков («цели» и «совмещаемого») для различных законов сканирования;

– расчет параметров для «совмещаемого» изображения в случае, если поле зрения прибора-«цели» покрывается несколькими элементами «совмещаемого» прибора;

– вычисление минимального и максимального значений яркости из всех покрывающих измерений, среднего значения и их СКО.

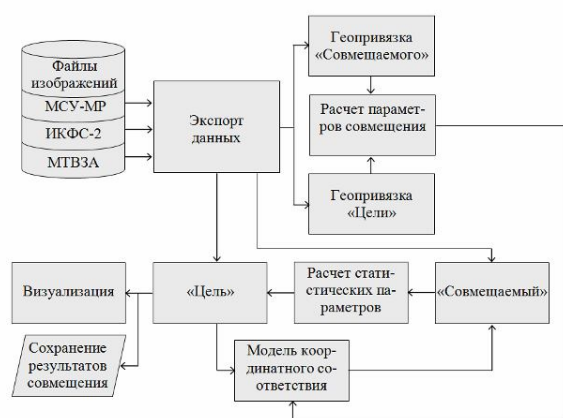


Рисунок 5 – Схема цифрового совмещения измерений двух датчиков

При этом если поле зрения прибора-«цели» покрывается одним элементом «совмещаемого» прибора, то в качестве «совмещаемых» используются непосредственно измерения датчика по каждому спектральному каналу.

По результатам совмещения создается файл, дополняющий изображение «цели» заголовком, который содержит перечень датчиков, описание структуры и формата файла, а также параметры совмещения.

Согласно схеме для информации датчика-«цели» и «совмещаемого» датчика рассчитываются параметры уравнений геопривязки, в соответствии с которыми для каждого пикселя входных изображений рассчитываются их географические координаты. На основе функций геопривязки вычисляются параметры модели координатного соответствия, которая позволяет спроектировать пиксель «цели» в систему координат «совмещаемого» изображения.

С использованием полученной модели для каждого пикселя «цели» рассчитываются статистические параметры совмещения: минимальное и максимальное значения, среднее значение и СКО измерений «совмещаемого» датчика. Полученные значения визуализируются на экране монитора или сохраняются в файле для последующей обработки. При этом информация «цели» сопровождается матрицей геопривязки, что позволяет представить разнородные данные в единой унифицированной форме, не требующей построения сложных моделей геопривязки. Таким образом, в случае цифрового совмещения информация датчика-«цели» дополняется необходимыми численными измерениями, что позволяет проводить последующую координатную обработку и интерпретацию материалов дистанционных наблюдений машинным способом.

Закключение. Рассмотренные в статье модели цифрового совмещения реализованы в составе программного обеспечения PlanetaSintez, которое прошло автономные испытания на модельных данных и внедрено в НИЦ Космической гидрометеорологии «Планета» г. Москва. С его помощью впервые в отечественной практике обеспечивается получение выходных информационных продуктов уровня обработки 1d. Поскольку данные от приборов ИКФС-2 и МСУ-МР предоставляют уникальные возможности по анализу воздушного пространства земной поверхности, то после отработки данной программы на натурной информации КА «Метеор-М» №2 в 2013 г. планируется распространение получаемой продукции и зарубежным пользователям.

Библиографический список

1. Космический комплекс гидрометеорологического и океанографического обеспечения «Метеор-3М» с космическим аппаратом «Метеор-М» №1: справочные материалы под ред. Л.А. Макриденко, С.И. Волкова, Ю.В. Трифонова и др. – М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2008. – 142 с.
2. Информационные характеристики летного образца аппаратуры ИКФС-2 / Ф.С. Завелевич, Ю.М. Головин, Ю.П. Маццкий и др. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. – Т. 9, №5. – С. 291–300.
3. Злобин В.К., Еремеев В.В., Кузнецов А.Е., Нефедов В.И. Модели координатной обработки сканерных изображений от природно-ресурсных спутниковых систем // Известия вузов. Геодезия и аэрофотоъемка. 2002. – №5. – С. 141–154.

УДК 004.9: 681.518

В.К. Злобин, Б.В. Костров

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМЫ ФУНКЦИЙ ВИЛЕНКИНА – КРЕСТЕНСОНА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Рассматривается проблема применения функций Виленкина – Крестенсона для обработки аэрокосмических изображений. Приводится ряд теорем, на которых базируется методология применения преобразований, построенных на системе данных функций.

Ключевые слова: ортогональные функции, функции Виленкина – Крестенсона, диадная свертка, функция Радемахера, фильтрация аэрокосмических изображений.

Введение. Для решения задач спектрального анализа изображений, представляющих собой дискретный сигнал, определенный на интервале $N \times N$, могут быть использованы любые системы, содержащие N ортогональных функций. Выбор системы функций будет определяться требованиями удобства вычислений и в конечном счете трудоемкостью алгоритмов реализации искомого преобразования. Наиболее общий подход к решению данной проблемы может быть найден при анализе систем функций Виленкина – Крестенсона (ВКФ). Любая система ВКФ может быть представлена в виде квадратной ортогональной матрицы размером $N \times N$. При этом ВКФ будут периодическими функциями с рациональным периодом, заданным в некоторой m -ичной системе счисления, интервалом существования которых будет являться интервал $N = m^n$, где m и n – целые числа.

Наиболее интересны для практической реализации два простейших случая. Первый при $n = 1$, когда матрица ВКФ представляет собой матрицу дискретных экспоненциальных функций (def):

$$\begin{aligned} \text{def}(p, x) &= \exp[j(2\pi / N)px] = \\ &= \cos[(2\pi / N)px] + j \sin[(2\pi / N)px], \end{aligned} \quad (1)$$

где $p, x = 0, 1, 2, \dots, N - 1$.

Число функций в ВКФ при $n = 1$, очевидно, равно числу отсчетов каждой функции N . Поэтому система def является полной, а ортогональность её не требует доказательства, так как она получена путем перехода от системы комплексных экспоненциальных функций, используемых в континуальном спектральном анализе для разложения сигналов на конечном интервале времени. Таким образом, можно говорить, что система ВКФ при $N = m$ дает основу для по-

строения дискретного преобразования Фурье (ДПФ).

Второй простейший случай возникает при $m = 2$. При этом матрица def вырождается в матрицу Адамара и на основе системы ВКФ можно построить любую из систем функций ВКФ – Адамара, ВКФ – Пэли, ВКФ – Уолша, различия которых определяются методом упорядочения функций в матрице Адамара. Основу всех трех систем составляют функции Уолша, важнейшим из свойств которых является то, что они могут использоваться для разложения произвольного сигнала и, поскольку принимают только два значения (1 и -1), оказываются удобными для вычислений на ЭВМ.

Цель работы. В данной статье проводится теоретическое и методологическое обобщение известных и доказанных авторами ранее положений, а также доказательство новых идей, позволяющих расширить методологию ортогональных преобразований. Основная новизна работы заключается, таким образом, в создании теоретической и методологической основы применения систем ВКФ для обработки изображений.

Ключевым вопросом методологии применения систем ВКФ для обработки изображений является определение порядка упорядочения функций в системе.

Вопрос упорядочения функций в ВКФ не является малозначительным. Имеется мнение [1], что наиболее удобными с точки зрения быстроты сходимости спектров для непрерывных сигналов являются континуальные системы функций Адамара – Уолша и Пэли – Уолша, кроме того, они легче задаются аналитически и генерируются. При переходе к дискретным системам функций Уолша данное утверждение не является бесспорным. Дискретное преобразование Уолша – Адамара выполняется на вычисли-

тельных машинах, а значит, вопрос о порядке размещения функций в матрице преобразования не является принципиальным. При этом выбор упорядочения по Уолшу, или как принято говорить, по частоте, секвенте или по системе Пихлера – Хармута, дает неоспоримое преимущество в представлении спектров сигналов. При таком упорядочении низкочастотные составляющие отвечают за медленно меняющиеся компоненты сигнала, а высокочастотные – за быстроизменяющиеся компоненты. Это в наилучшей степени согласуется с идеологией фильтрации и корреляционного анализа сигналов.

Теоретические исследования. В общем случае ВКФ являются комплексными функциями, определенными выражением [1]

$$VKF(p, x) = \prod_{i=0}^{n-1} w^{\langle p_i, x_i \rangle}, \quad (2)$$

где $w = \exp[j(2\pi/m)]$, p_i и x_i значения коэффициентов в m -ичном представлении чисел p и x .

При $m = 2$, $w = \exp[j\pi] = -1$ и ВКФ совпадает с функциями Уолша

$$VKF(p, x) = (-1)^{\sum_{i=0}^{n-1} \langle p_i, x_i \rangle}. \quad (3)$$

Как уже отмечалось выше, в другом крайнем случае при $n = 1$ значения p и x не превосходят единственного разряда десятичного представления этих чисел и ВКФ переходят в def

$$VKF(p, x) = e^{j[(2\pi/N)px]}. \quad (4)$$

С другой стороны ВКФ могут быть представлены через функции Радемахера – комплексные функции, заданные на том же интервале $N = m^n$:

$$R_i(x) = e^{j(2\pi/m)x_i}. \quad (5)$$

Тогда в соответствии с (2) ВКФ могут быть записаны как

$$VKF(p, x) = \prod_{i=0}^{n-1} [R_i(x)]^{\langle p_i \rangle}. \quad (6)$$

Функции Радемахера являются особыми функциями в системе ВКФ. Так как m -ичное представление чисел p и x состоит из n разрядов, то система ВКФ содержит n обобщенных функций Радемахера. Поскольку переменная x принимает значения от 0 до $N - 1$, то любой её разряд изменяется в пределах от 0 до $m - 1$. Следовательно, функция Радемахера является периодической функцией с количеством периодов m^{i-1} на интервале N . Фаза функций Радемахера при увеличении x_i изменяется по линейному закону:

$$\Psi_i(x) = (2\pi/m)x_i. \quad (7)$$

В связи с этим функции Радемахера носят меандровый характер.

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

$$r_i(x) = (-1)^{\langle x_i \rangle}, \quad (8)$$

где $\langle x_i \rangle$ – есть 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. Дополнение ее до полной приводит к системе функций Уолша:

$$wal(w, x) = \prod_{i=1}^n [r_i(x)^{\langle w_i \rangle}], \quad (9)$$

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 начинается с функции Радемахера r_{n+1-k} и каждая группа включает в себя 2^{n-k} функций с учетом самой функции Радемахера. Таким образом, система функций Радемахера создает своеобразный «каркас», на котором строится система Уолша, при этом неизбежно возникает идея использования данного факта при спектральном анализе сигналов.

Для построения методологических основ применения данной системы можно выделить следующие свойства её функций.

1. Они являются действительными функциями на интервале определения $N = 2^n$.

2. Так как функции системы принимают значения только $+1$ и -1 , то основными операциями при использовании разложения по системе Уолша являются операции сложения и вычитания.

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

4. Поскольку матрица Адамара имеет размерность $N \times N$, то в нее входят N ортогональных функций и, следовательно, ее нельзя дополнить ни одной новой ортогональной функцией. Это значит, что такая система функций является

полной и может быть использована для построения унитарных преобразований негармонического спектрального анализа.

Методология применения такого преобразования базируется на следствиях, вытекающих из ряда теорем. Поскольку рассматриваемое преобразование является разделимым при двумерном представлении, то при дальнейшем рассмотрении, где это возможно, ограничимся одномерным случаем.

1. Теорема о диадной свертке

Если $\{X_n\}$ и $\{Y_n\}$ – цифровые последовательности, заданные на интервале N , то последовательность свертки (корреляции) $\{Z_s\}$:

$$Z_s = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} X_n Y_{n \oplus s} \quad (10)$$

будет определяться следующим образом:

$$Z_s = \sum_{u=0}^{N-1} W_u^s (C_u^X \times C_u^Y), \quad (11)$$

где: W_u^s – функция Уолша порядка s ; C_u^X – спектральные коэффициенты последовательности $\{X_n\}$ и C_u^Y – спектральные коэффициенты последовательности $\{Y_n\}$.

Теорема позволяет понять механизм формирования элементов сигнала после фильтрации в спектральном пространстве. Доказательство данной теоремы для континуального случая можно найти, например, в [2]. Примеры прямого применения данной теоремы можно найти в [3, 4].

2. Теорема о вещественно-диадной свертке (ВДС)

Если $\{X_n\}$ и $\{Y_n\}$ – цифровые последовательности, заданные на интервале N , то последовательность свертки (корреляции) $\{Z_s\}$

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

может быть найдена как

$$Z_s = \sum_{u=0}^{N-1} C_u^X (C_u^Y)_s, \quad (12)$$

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

Теорема позволяет строить сложные спектральные фильтры и эффективные алгоритмы корреляционного анализа. Доказательство теоремы и методы построения корреляционной функции двух изображений можно найти в [5]. Выявление физических принципов функционирования ВДС приводится в [6, 7].

3. Теорема об инвариантности прореженного базиса

Если $\{V_n\}$ – цифровая последовательность, полученная из последовательности $\{X_n\}$ в результате диадного сдвига на l , т.е. $V_n = X_{n \oplus l}$, и

$$C^v = \frac{1}{N} \mathbf{H}_w^0 \mathbf{V} \quad \text{и} \quad C^x = \frac{1}{N} \mathbf{H}_w^0 \mathbf{X}, \quad (13)$$

где C^v – коэффициенты спектра Уолша последовательности $\{V_n\}$, C^x – коэффициенты секвентного спектра последовательности $\{X_n\}$,

\mathbf{H}_w^0 – прореженная произвольным образом матрица Адамара соответственно, то

$$(C^v)^2 = (C^x)^2. \quad (14)$$

Теорема позволяет производить некоторые виды фильтрации в процессе получения спектрального представления, что не свойственно другим системам базисных функции. Доказательство теоремы можно найти в [8], а использование ее в алгоритмах совмещения изображений – в [5].

4. Теорема об энергетической полноте квазидвумерного спектрального представления

Если b – матрица цифрового изображения размером $M \times N$ и C – коэффициенты его квазидвумерного спектрального представления, то справедливо равенство:

$$\frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} b_{ij}^2 = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} C_{iv}^2. \quad (15)$$

Выражение (15) является равенством Парсевалю для квазидвумерного представления двумерных сигналов. Его доказательство не требует особого пояснения, так как оно вытекает из известных свойств спектрального анализа. Использование данной теоремы позволяет в два раза сократить вычислительные затраты и получить некоторые другие преимущества при устранении отдельных видов искажений [5, 9].

5. Теорема об ограничении нетригонометрического спектра

Если n – порядок системы функций Радемахера и k – номер группы функций в системе Уолша, а ограничение спектра осуществляется на уровне функций Радемахера с номером $n+1-k$, то во вновь образованном изображении яркость полученных элементов $b_{ij}^{[N_s]}$ будет равна:

$$b_{ij}^{[N_s]} = \frac{1}{S^2} \sum_{g=1}^S \sum_{p=1}^S b_{gp}, \quad (16)$$

где $S = 2^{k-1}$, $N_s = \frac{N}{S}$, $i, j = \overline{1, N_s}$, зависимость $i(s); j(s); g(i); p(j)$ здесь и далее не показана, чтобы не загромождать написание формул.

Интуитивное использование данного свойства позволило построить двухуровневый алгоритм совмещения изображений, обладающий в десятки раз меньшими вычислительными затратами, чем алгоритмы, описанные в [5]. Пример реализации такого подхода описан в [10], а использование следствий из этой теоремы для построения системы текстурных признаков изображений – в [11].

Доказательство данной теоремы в явном виде пока не найдено, поэтому приводимые далее рассуждения публикуются впервые и обладают в этом смысле новизной.

Матрицу Адамара для системы Уолша – ВКФ при произвольном $N = 2^n$ можно задать непосредственно с помощью простого мнемонического правила, подобного описанному в [1] для ВКФ – Пэли.

Для $N = 2$ элементарная матрица Адамара W_2 имеет один и тот же вид для любого способа упорядочения

$$W_2 = \begin{pmatrix} + & + \\ + & - \end{pmatrix}, \quad (17)$$

где ‘+’ соответствует значению ‘1’, а ‘-’ значению ‘-1’.

Для $N = 4$ необходимо первую строку матрицы (17) записать дважды, а затем к первой из них справа приписать те же элементы, а ко второй противоположные. Вторую строку также надо записать дважды и к первой из них справа записать противоположные элементы, а ко второй – те же самые. Повторяя процедуру необходимое количество раз, можно построить матрицы $W_4, W_8, W_{16} \dots$. Критерием инверсной или неинверсной записи правой части строки служит знакопеременность правого крайнего столбца. Для W_{16} выражения (18) система Уолша делится на $n = 4$ групп. Каждая из них начинается с соответствующей функции Радемахера. Для $k = 1 - r_4; k = 2 - r_3; k = 3 - r_2; k = 4 - r_1$.

$$W_4 = \begin{pmatrix} + + & + + \\ + + & - - \\ + - & - + \\ + - & + - \end{pmatrix};$$

$$W_8 = \begin{pmatrix} + + + + & + + + + \\ + + + + & - - - - \\ + + - - & - - + + \\ + + - - & + + - - \\ + - - + & - - - + \\ + - - + & + - - + \\ + - + - & - + - + \\ + - + - & + - + - \end{pmatrix};$$

$$W_{16} = \begin{pmatrix} + + + + + + + + & + + + + + + + + \\ + + + + + + + + & - - - - - - - - \\ + + + + - - - - & - - - - + + + + \\ + + + + - - - - & + + + + - - - - \\ + + - - - - + + & + + - - - - + + \\ + + - - - - + + & - - + + - - + + \\ + + - - + + - - & - - + + - - + + \\ + + - - + + - - & + + - - + + - - \\ + - - + + - - + & + - - + + - - + \\ + - - + + - - + & - + + - - + + - \\ + - - + - + + - & - + + - + - + - \\ + - - + - + + - & + - - + - + + - \\ + - + - - + - + & + - + - + - + - \\ + - + - + - + - & - + - + - + - + \\ + - + - + - + - & + - + - + - + - \end{pmatrix} \quad (18)$$

Анализируя структуры матриц выражения (18) и учитывая мнемоническое правило их образования, можно сделать вывод, что ограничение спектра на уровне $k = 2$ приведет к его усечению ровно в 2 раза, а значения элементов сигнала (одномерный случай) при таком усечении будут равны (для $N = 16$).

$$\begin{aligned} b_0^{[8]} &= \frac{b_0^{16} + b_1^{16}}{2}; \\ b_1^{[8]} &= \frac{b_2^{16} + b_3^{16}}{2}; \\ &\dots \\ b_7^{[8]} &= \frac{b_{14}^{16} + b_{15}^{16}}{2}; \end{aligned} \quad (19)$$

или в более общем виде:

$$\begin{aligned} b_0^{[N/2]} &= \frac{b_0^N + b_1^N}{2}; \\ b_1^{[N/2]} &= \frac{b_2^N + b_3^N}{2}; \\ &\dots \\ b_{(N-1)/2}^{[N/2]} &= \frac{b_{N-2}^N + b_{N-1}^N}{2}. \end{aligned} \quad (20)$$

Сворачивая выражение (20), можно получить:

$$b_i^{N_s} = \frac{1}{2} \sum_{p=1}^s b_p, \quad (21)$$

где: $N_s = \frac{N}{S} = \frac{N}{2}$ определяет размер полученного сигнала; $S = 2^{k-1} = 2$ определяет количество объединяемых элементов; $i = \overline{0, (N-1)/2}$.

Окончательно обобщая для двумерного случая, и учитывая что при $k = 2 - S = 2; k = 3 - S = 4; k = 4 - S = 8$ и т.д. и $b_2 = \frac{N}{2} \times \frac{N}{2}; b_3 = \frac{N}{4} \times \frac{N}{4}; b_4 = \frac{N}{8} \times \frac{N}{8}$ и т.д. получаем:

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

где $i = \overline{1, N/S}$ и $j = \overline{1, N/S}$.

Что и требовалось доказать.

Результаты экспериментальных исследований и выводы. Наиболее просто понять работу данной теоремы на примере ограничения спектра изображения. Суть проведенного эксперимента состоит в следующем: при ограничении спектра изображения в два раза примерно во столько же раз должно ухудшиться его разрешение. В случае замены отброшенных спектральных составляющих нулями при восстановлении изображения из спектрального пространства это приведет к образованию укрупненных пикселей размером 2×2 элемента с усредненной яркостью. Результат такой операции представлен на рисунке 1,а. При отбрасывании ограниченных спектральных составляющих размер изображения уменьшится вдвое, а в качестве элементов этого изображения будут выступать пиксели с усредненной яркостью. Результат такого преобразования приводится на рисунке 1,б и 1,в.

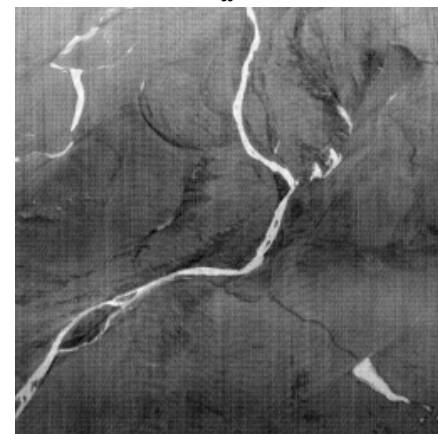
Те же самые операции можно осуществить в пространстве изображения, что можно принять за эталон правильности их выполнения. Сравнить два полученных результата можно путем попиксельного вычитания одного изображения из другого или путем нахождения среднеквадратического отклонения всех пикселей двух изображений. Результаты такого сравнения приводятся в таблице 1. Там же приведены результаты замеров времени выполнения спектральных преобразований при использовании быстрого преобразования Уолша (БПУ) при $b_s = \frac{N}{2} \times \frac{N}{2}$. Выполнение аналогичных операций по ограничению спектра в базисе *def* приводит к значительным выбросам в попиксельной разности и к соответствующему увеличению СКО. Полученные результаты представлены на рисунке 2. В таблице 2 приведены также временные затраты на выполнение преобразований.

Таблица 1

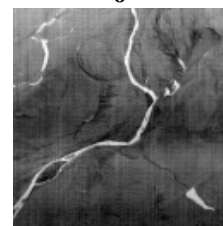
Характеристики для БПУ разность =0, СКО=0	
Время БПУ для 512x512 (с)	0,1905
Время восстановления изображения из спектра Уолша 256x256 (с)	0,0153
Время восстановления изображения из спектра Уолша 128x128 (с)	0,0047



а



б



в

Рисунок 1 – Результат ограничения спектра Уолша при $S = 2$: а – восстановление из спектра Уолша при $b = N \times N$; б – исходное изображение; в – восстановление из спектра Уолша при

$$b = \frac{N}{2} \times \frac{N}{2}$$

Для сравнения на рисунке 2 приводится выполнение тех же действий для матрицы ВКФ при $n = 1$, что соответствует преобразованию по *def*, выполняемому по быстрому алгоритму (БПФ), сравнение по характеристикам, аналогичным рисунку 1 – в таблице 2.

Полученные результаты с учетом следствий, вытекающих из теоремы об ограничении нетригонометрического спектра, позволяют создать теоретическую и методологическую базу применения систем функций Виленкина – Крестенсона для создания эффективных алгоритмов обработки аэрокосмических изображений.



Рисунок 2 – Ограничение спектра для быстрого преобразования Фурье (БПФ)

Таблица 2

Характеристики для БПФ разность $\min = -67.3351$; $\max = 60.5136$, СКО = 7.0542	
Время БПФ для 512x512 (с)	0,6117
Время восстановления изображения из спектра Фурье 256x256 (БОПФ) (с)	0,0482
Время восстановления изображения из спектра Фурье 128x128 (БОПФ) (с)	0,024

Библиографический список

1. Трахтман А.М., Трахтман В.А. Основы теории дискретных сигналов на конечных интервалах. – М.: Сов. радио, 1975. – 208 с.
2. Проектирование специализированных информационно-вычислительных систем / под ред. Ю.М. Смирнова. – М: Высшая школа, 1984. – 359 с.
3. Костров Б.В., Костров В.В., Саблина В.А. Алгоритм восстановления изображений с периодическими низкочастотными искажениями//Радиотехника. № 11. 2009. – С. 92–95.

4. Костров Б.В., Саблина В.А. Адаптивная фильтрация изображений со структурными искажениями// Цифровая обработка сигналов. №4. 2008. – С. 49–53.

5. Злобин В.К., Колесенков А.Н., Костров Б.В. Корреляционно-экстремальные методы совмещения аэрокосмических изображений // Вестник Рязанского государственного радиоуниверситета № 3 (Вып. 37). – Рязань, 2011. – С. 12-17.

6. Костров Б.В. Корреляционно-экстремальный метод обнаружения цифровых сигналов// Цифровая обработка сигналов. № 2. 2011. – С. 46–51.

7. Колесенков А.Н., Костров Б.В., Саблина В.А. Применение вещественно-диадной свертки для идентификации аэрокосмических изображений//В мире научных открытий. № 1 (13). 2011. Серия «Математика. Механика. Информатика». – С. 122–127.

8. Колесенков А.Н., Костров Б.В. Метод прореживания базисных функций в корреляционно-экстремальных алгоритмах // Вопросы радиоэлектроники. Сер.ОТ. 2010. /Вып.1. – С. 176–184.

9. Костров Б.В., Некрасова О.С., Свирина А.Г. Метод квазидвумерной фильтрации групповых помех// Методы и средства обработки и хранения информации: межвуз. сб. науч. тр. – Рязань: РГРТУ. – 2010. – С. 144–147.

10. Колесенков А.Н., Костров Б.В. Технология повышения производительности корреляционных алгоритмов совмещения для информационной системы космического мониторинга// Научное творчество XXI века: материалы IV Всерос. НПК с международным участием. Приложение к журналу «В мире научных открытий». – Красноярск, 2011. /Вып.2. – С. 80–82.

11. Костров Б.В., Саблина В.А. Построение векторов секвентных текстурных признаков// Научное творчество XXI века: материалы IV Всерос. научно-практ. конференции с международным участием. Приложение к журналу «В мире научных открытий». – Красноярск, 2011. /Вып.2. – С. 139–141.

УДК 681.518.3

Б.А. Алпатов, О.Е. Балашов, А.И. Степашкин

ИЗМЕРЕНИЕ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ ЛИНИИ ВИЗИРОВАНИЯ В ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

Рассматривается один из возможных вариантов построения нацеленной системы позиционирования, а также предложен алгоритм вычисления угловых координат линии визирования оператора.

Ключевые слова: нацеленная система позиционирования, измерение угловых координат.

Введение. Многие современные летательные аппараты, наземные транспортные средства

оснащаются нацеленными системами позиционирования (НСП). В авиационной технике НСП

часто входят в комплекс бортового оптико-механического оборудования. НСП позволяют легко управлять бортовыми оптико-механическими платформами, осуществляющими автоматическое сопровождение объектов.

НСП предназначена для измерения угловых и линейных перемещений шлема оператора (или его визирной линии, формируемой с помощью спецочков, жестко закрепленных на шлеме) в заданной системе координат, направление осей которой совпадает с направлением строительных осей носителя, начало системы координат привязано к некоторой точке носителя [1, 2]. В настоящее время предпочтение отдается оптическим НСП [2, 3]. В подобных системах угловые и линейные перемещения шлема оператора измеряются по координатам реперных точек, получаемых путем обработки изображений, формируемых установленными в кабине носителя видеодатчиками (ВД).

Цель работы – разработка алгоритма измерения угловых координат линии визирования оператора по данным видеодатчиков НСП.

Принцип построения нашлемной системы позиционирования. Измерение направления (азимут, угол места) визирной линии оператора можно производить различными способами. В оптико-электронных НСП (рисунок 1) угловые координаты по азимуту θ_{EA} , по углу места φ_{EA} линии визирования (шлема оператора) вычисляются по измеренным пространственным координатам светодиодных реперов A, B, C , установленных на шлеме оператора.

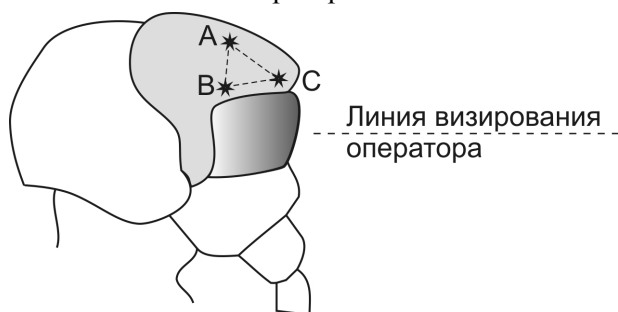


Рисунок 1 – Нашлемный модуль с реперным треугольником

В бортовых НСП под углами поворота линии визирования (шлема) оператора понимаются углы поворота системы координат $O_1X_1Y_1Z_1$, связанной со шлемом, относительно системы координат, привязанной к строительным осям носителя. При нулевых углах поворота шлема оператора оси системы координат $O_1X_1Y_1Z_1$ параллельны соответствующим осям строительной системы координат носителя. Чтобы в дальнейшем не учитывать пространственное смещение систем координат друг относительно друга, не

влияющее на их взаимную угловую ориентацию, при вычислении матриц перехода из одной системы координат в другую считаем их начала совмещенными.

В общем случае для вычисления угловых координат линии визирования необходима информация о координатах минимум трех реперов, не лежащих на одной прямой и образующих реперный треугольник. Пространственная ориентация последнего может быть описана системой координат O_2KLM , которая привязана к треугольнику ABC следующим образом. Поместим начало системы координат (точка O_2) в точку H (на рисунке не показана), лежащую на отрезке BC так, чтобы отрезок AH являлся высотой $\triangle ABC$. Ось O_2L пусть проходит через два репера (B и C). Ось O_2M проходит через высоту AH (плоскость O_2LM является плоскостью треугольника). А ось O_2K перпендикулярна к плоскости треугольника и образует правую систему координат (рисунок 2).

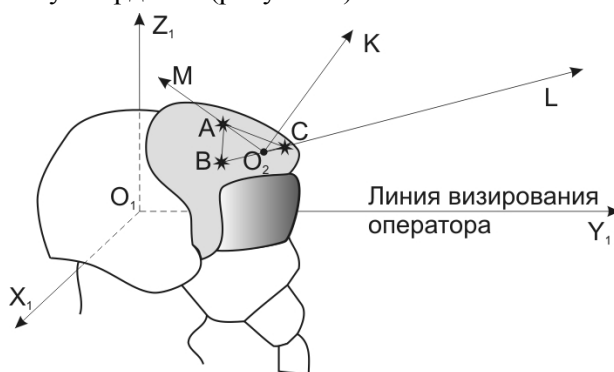


Рисунок 2 – Системы координат шлема и реперного треугольника

Будем считать, что на этапе производства НСП измерены ориентация и положение реперного треугольника относительно системы координат, связанной со шлемом оператора $O_1X_1Y_1Z_1$. При этом система координат шлема ориентирована так, что одна из осей совпадает с линией визирования (ось O_1Y_1 , рисунок 2). В результате, определив расположение в пространстве системы координат O_2KLM , можно вычислить ориентацию шлема и направление визирной оси оператора.

Для измерения координат [1] центров изображений реперов $A(x_A, y_A, z_A)$, $B(x_B, y_B, z_B)$, $C(x_C, y_C, z_C)$ в бортовых оптико-электронных НСП производится обработка последовательности видеоизображений [4], получаемых от ВД системы позиционирования. Все вычисления удобно производить в строительной системе координат носителя.

Вычислить ориентацию системы координат реперного треугольника в системе координат носителя возможно по координатам единичных базисных векторов системы координат треугольника. Направляющие косинусы базисного вектора \bar{l} по оси O_2L могут быть найдены по координатам вектора \overline{BC} по выражению:

$$\bar{l} = (x_l, y_l, z_l) = \left(\frac{x_C - x_B}{|\overline{BC}|}, \frac{y_C - y_B}{|\overline{BC}|}, \frac{z_C - z_B}{|\overline{BC}|} \right), \quad (1)$$

где $|\overline{BC}| = \sqrt{(x_C - x_B)^2 + (y_C - y_B)^2 + (z_C - z_B)^2}$ – длина вектора \overline{BC} .

Базисный вектор \bar{m} по оси O_2M является частью прямой, проходящей через высоту \overline{AH} . Вычислим направляющие косинусы вектора \bar{m} по координатам точек A и H . Если треугольник ABC является равносторонним или равнобедренным ($AB = AC$), то координаты точки H можно вычислить по следующему выражению:

$$H = \left(\frac{x_C + x_B}{2}, \frac{y_C + y_B}{2}, \frac{z_C + z_B}{2} \right). \quad (2)$$

В противном случае для вычисления координат точки H рассмотрим прямоугольный треугольник ABH . Длина стороны BH вычисляется как

$$BH = AB \cos(\angle ABH);$$

$$\cos(\angle ABH) = \frac{(\overline{AB}, \bar{l})}{|\overline{AB}| |\bar{l}|} =$$

$$= \frac{(x_B - x_A) \frac{x_C - x_B}{|\overline{BC}|} + (y_B - y_A) \frac{y_C - y_B}{|\overline{BC}|} + (z_B - z_A) \frac{z_C - z_B}{|\overline{BC}|}}{|\overline{AB}|} = \quad (3)$$

$$= \frac{(x_B - x_A)(x_C - x_B) + (y_B - y_A)(y_C - y_B) + (z_B - z_A)(z_C - z_B)}{|\overline{AB}| |\overline{BC}|};$$

$$AB = |\overline{AB}| =$$

$$= \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 + (z_B - z_A)^2}.$$

На основе данной информации координаты точки H могут быть найдены по выражению:

$$H = (x_H, y_H, z_H) = (x_B + x_l \cdot BH, y_B + y_l \cdot BH, z_B + z_l \cdot BH). \quad (4)$$

Тогда координаты базисного вектора \bar{m} вычисляются по выражению:

$$\bar{m} = (x_m, y_m, z_m) = \left(\frac{x_A - x_H}{|\overline{HA}|}, \frac{y_A - y_H}{|\overline{HA}|}, \frac{z_A - z_H}{|\overline{HA}|} \right); \quad (5)$$

$$|\overline{HA}| = \sqrt{(x_A - x_H)^2 + (y_A - y_H)^2 + (z_A - z_H)^2}.$$

Направляющие косинусы базисного вектора \bar{k} по оси O_2K могут быть вычислены по выражению:

$$\bar{k} = (x_k, y_k, z_k) = [\bar{l}, \bar{m}] = (y_l z_m - y_m z_l, x_l z_m - x_m z_l, x_l y_m - x_m y_l). \quad (6)$$

Вычислив направляющие косинусы базисных векторов системы координат O_2KLM в системе координат носителя, можно найти углы поворота первой системы координат относительно второй.

Координаты базисных векторов системы координат O_2KLM могут быть вычислены по следующим выражениям:

$$\bar{k} = M(\theta, \varphi, \psi) \bar{x}; \quad \bar{l} = M(\theta, \varphi, \psi) \bar{y}; \quad \bar{m} = M(\theta, \varphi, \psi) \bar{z}, \quad (7)$$

где $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ – базисные векторы измерительной системы координат; $\bar{k}, \bar{l}, \bar{m}$ – базисные векторы системы координат O_2KLM , $M(\theta, \varphi, \psi)$ – матрица преобразования координат одной системы координат в другую, повернутую относительно первой на углы θ, φ, ψ (порядок вращения важен, в данном случае вращение осуществляется в следующем порядке: по азимуту; по углу места; по крену). Координаты векторов $\bar{k}, \bar{l}, \bar{m}$ в системе координат носителя вычисляются по выражениям (1), (5), (6). Векторы $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ в системе координат носителя имеют следующие координаты:

$$\bar{x} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \bar{y} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \bar{z} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

С учетом (8) матричные уравнения (7) можно записать в виде системы уравнений с тремя неизвестными:

$$\begin{cases} \cos \theta \cos \psi - \sin \theta \sin \varphi \sin \psi = x_k; \\ -\sin \theta \cos \varphi = y_k; \\ \cos \theta \sin \psi + \sin \theta \sin \varphi \cos \psi = z_k; \\ \sin \theta \cos \psi + \cos \theta \sin \varphi \sin \psi = x_l; \\ \cos \theta \cos \varphi = y_l; \\ \sin \theta \sin \psi - \cos \theta \sin \varphi \cos \psi = z_l; \\ -\cos \varphi \sin \psi = x_m; \\ \sin \varphi = y_m; \\ \cos \varphi \cos \psi = z_m. \end{cases} \quad (9)$$

Из принципов построения НСП и размещения реперных светодиодов на шлеме на углы поворота системы координат O_2KLM относительно системы координат носителя можно на-

ложить ограничения, описываемые следующими выражениями:

$$\begin{cases} \theta \in (0, \pi); \\ \varphi \in (-\pi/2, \pi/2); \\ \psi \in (-\pi/2, \pi/2). \end{cases} \quad (10)$$

С учетом (10) решение системы уравнений (9) может быть найдено по следующим выражениям:

$$\begin{cases} \theta = \arccos \frac{y_l}{\cos \varphi}; \\ \varphi = \arcsin(y_m); \\ \psi = -\arcsin \frac{x_m}{\cos \varphi}. \end{cases} \quad (11)$$

Углы (11) являются текущими углами поворота системы координат O_2KLM относительно системы координат носителя. Будем считать, что известны углы поворота системы координат реперного треугольника относительно системы координат шлема $(\theta_1, \varphi_1, \psi_1)$.

Система координат реперного треугольника получается из системы координат носителя путем поворота по азимуту, углу места, крену на углы θ, φ, ψ (перенос начала системы координат не учитывается). Конструктивно реперы жестко закреплены на шлеме оператора, поэтому из системы координат носителя можно сначала путем поворота на углы $\theta^\theta, \varphi^\theta, \psi^\theta$ перейти в систему координат шлема, а далее – в систему координат реперного треугольника поворотом на углы $\theta_1, \varphi_1, \psi_1$. Тогда текущие углы поворота системы координат шлема относительно системы координат носителя можно вычислить по выражениям:

$$\theta^\theta = \theta - \theta_1; \varphi^\theta = \varphi - \varphi_1; \psi^\theta = \psi - \psi_1. \quad (12)$$

Без потери общности рассуждений зададим для шлема оператора начальную ориентацию в пространстве относительно системы координат носителя $(\theta_0^\theta, \varphi_0^\theta, \psi_0^\theta)$ так, чтобы направления осей $O_1X_1Y_1Z_1$ совпадали с направлениями осей системы координат носителя. В этом случае начальные углы поворота шлема (системы координат шлема) будут равняться нулю. Для начальной ориентации шлема справедливы выражения:

$$\theta_0^\theta = \theta^\theta = 0; \varphi_0^\theta = \varphi^\theta = 0; \psi_0^\theta = \psi^\theta = 0. \quad (13)$$

Обозначим начальные углы поворота системы координат O_2KLM относительно носителя как $\theta_0, \varphi_0, \psi_0$. Тогда, исходя из выражения (12) и равенства нулю углов поворота системы коор-

динат $O_1X_1Y_1Z_1$ относительно системы координат носителя, будем иметь:

$$\begin{aligned} \theta_0 - \theta_1 = \theta_0^\theta = 0; \theta_1 = \theta_0; \\ \varphi_0 - \varphi_1 = \varphi_0^\theta = 0; \varphi_1 = \varphi_0; \\ \psi_0 - \psi_1 = \psi_0^\theta = 0; \psi_1 = \psi_0. \end{aligned} \quad (14)$$

Таким способом могут быть вычислены углы поворота системы координат реперного треугольника относительно системы координат шлема.

В НСП для увеличения диапазона измерения углов поворота шлема оператор используют несколько реперных треугольников, переключение между которыми производится из условия видимости камерами НСП реперных вершин треугольников. Обычно для измерений выбирается реперный треугольник, площадь которого на изображениях, формируемых видеодатчиками НСП, максимальна. Для работы НСП к каждому реперному треугольнику необходимо привязать свою систему координат (система координат O_2KLM привязывается к центральному реперному треугольнику) и измерить углы поворота относительно системы координат шлема. Измерять соответствующие углы для центрального треугольника $(\theta_1, \varphi_1, \psi_1)$ удобно в начале работы с НСП путем проведения оператором определенной процедуры. Измерение углов поворота для соседних реперных треугольников можно производить перед переключением на работу с соответствующим треугольником. Для этого необходимо, чтобы по изображениям были вычислены координаты вершин [1] обоих треугольников. Расчет углов делается на основе текущих углов поворота систем координат треугольников, полученных путем решения двух систем уравнений, аналогичных (9), составленных для соответствующих треугольников, и измеренных ранее углов ориентации системы координат текущего рабочего реперного треугольника относительно системы координат носителя.

Заключение. Зная текущие и начальные углы поворота системы координат реперного треугольника, текущее угловое отклонение шлема оператора (нашлемного модуля) $\theta^\theta, \varphi^\theta, \psi^\theta$ в системе координат носителя вычисляем по выражениям (12). Угловыми координатами линии визирования оператора $\theta_{E\dot{A}}, \varphi_{E\dot{A}}$ будут являться угол азимута θ^θ и угол места φ^θ .

Исследования выполнены при поддержке государственного контракта №14.740.11.1083 от 24 мая 2011г., заключенного с Министерством образования и науки.

Библиографический список

1. Балашов О.Е., Степашкин А.И. Нашлемная система обзора и целеуказания // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – Рязань, 2011. – Вып. 4 (38). – С. 40–44.

2. Алпатов Б.А., Балашов О.Е., Степашкин А.И., Трофимов Д.В. Алгоритм измерения угловых координат линии визирования оператора // Информационно-управляющие системы. 2012. № 3. – С. 18–21.

3. Алпатов Б.А., Балашов О.Е., Степашкин А.И., Трофимов Д.В. Алгоритм вычисления угловых координат линии визирования оператора в нашлемной системе позиционирования // Информационно-управляющие системы. 2012. № 6. –С. 7–11.

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

УДК 519.248:681.51

С.И. Елесина, А.А. Логинов, М.Б. Никифоров

МЕТОДИКА ОТБОРА АЛГОРИТМОВ ПОИСКА ГЛОБАЛЬНОГО ЭКСТРЕМУМА МНОГОЭКСТРЕМАЛЬНОЙ ФУНКЦИИ

Предложена методика отбора алгоритмов поиска глобального экстремума многоэкстремальной функции на примере совмещения изображений в корреляционно-экстремальной навигационной системе.

Ключевые слова: методы оптимизации, глобальный экстремум, алгоритм поиска глобального экстремума, критерии оценки эффективности алгоритмов, целевая функция.

Введение. Поиск глобального экстремума (ГЭ) многоэкстремальной функции является актуальной задачей, которая возникает при создании многих практически значимых систем. Подобная задача решается и в системе улучшенного и синтезированного видения. Эта система являлась одной из базовых при исследовании, результаты которого представлены в настоящей статье. В ней одной из основных операций является совмещение двух и более изображений для улучшенной визуализации окружающего пространства с целью повышения безопасности полетов и выполнения посадки. В этой системе сравниваются изображения от различных сенсоров систем технического зрения (СТЗ) летательного аппарата (ЛА) и изображения виртуальной модели местности. Другая предметная область – корреляционно-экстремальные навигационные системы (КЭНС), которые используются для автономного определения координат ЛА. В такой системе выполняется совмещение текущего изображения (ТИ), полученного от СТЗ ЛА, и эталонного изображения (ЭИ) из бортовой базы данных. Следует отметить, что к этим системам предъявляются достаточно жесткие требования реального времени.

В обоих представленных выше приложениях осуществляется поиск ГЭ целевой функции (ЦФ), которая достигает своего максимума при наилучшем совмещении изображений.

Причем ЦФ является явно выраженной мультимодальной, количество локальных экстремумов у которой может достигать нескольких сотен. Характерный вид ЦФ корреляционного совмещения ТИ и ЭИ, полученных от бортовой РЛС, показан на рисунке 1. В качестве ЦФ выбрана нормированная взаимная корреляционная функция [1]:

$$f(x, y) = \frac{\sum_i^M \sum_j^N (S_{\text{Э}}(i, j) \cdot S_T(i-x, j-y))}{\sqrt{\sum_i^M \sum_j^N S_{\text{Э}}^2(i, j) \cdot \sum_i^M \sum_j^N S_T^2(i-x, j-y)}}$$

где $S_{\text{Э}}(i, j)$, $S_T(i, j)$ – яркость эталонного и текущего изображений в точке (i, j) ; M, N – размеры ЭИ.

Простейший способ поиска глобального экстремума ЦФ – перебор всех возможных взаимных положений ЭИ и ТИ. Такой способ дает очень хорошие результаты по надежности и точности совмещения ТИ и ЭИ. Однако он неприемлем для КЭНС, так как время его реализации превышает требования к системам реального времени. По этой причине возникает необходимость выбора наиболее эффективного для данной прикладной области метода поиска ГЭ, который наилучшим образом отвечает требованиям точности совмещения ТИ и ЭИ за приемлемое время.

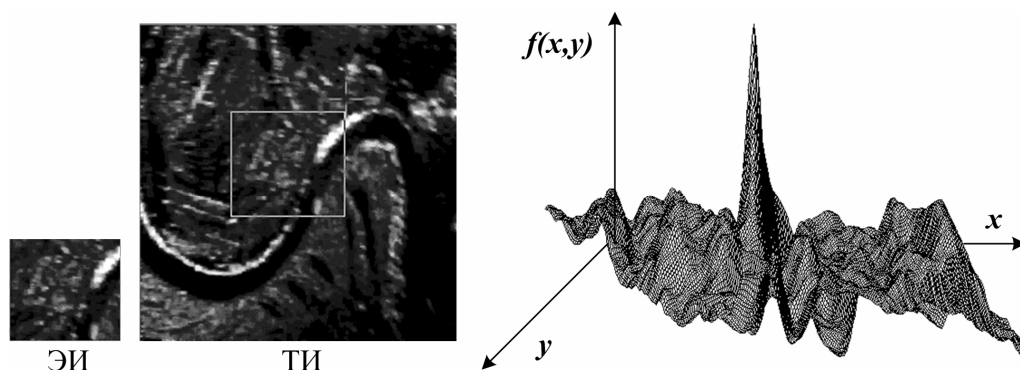


Рисунок 1 – Характерный вид целевой функции при совмещении ТИ и ЭИ

Существуют три подхода к исследованию эффективности алгоритмов, решающих сформулированную выше задачу, а именно - аналитический, экспериментальный и теоретико-экспериментальный. Первый подход может быть использован только для относительно ограниченного класса задач в связи с трудностями их формализации и строгого математического описания. Теоретико-экспериментальный подход базируется на методах теории и планирования эксперимента, первичной информацией в которых в любом случае являются результаты испытаний. В ряде случаев эти результаты уже позволяют судить об эффективности алгоритмов и представляют возможность производить их сравнительный анализ.

Целью работы является разработка методики экспериментального отбора алгоритмов поиска экстремумов при корреляционно-экстремальном совмещении изображений.

Предлагаемая в настоящей статье методика отбора алгоритмов поиска ГЭ ЦФ иллюстрируется рисунком 2.

Методы, применяемые в настоящее время для решения задач оптимизации, довольно многочисленны [2, 3]. Среди них отсутствует метод, который оказался бы наилучшим во всех или в подавляющем большинстве практических случаев.

Можно выделить следующие признаки для классификации методов оптимизации.

– По их направленности на поиск глобального экстремума: в зависимости от возможности нахождения алгоритмом локального либо глобального экстремума они делятся на алгоритмы локального и глобального поиска.

– По виду оптимизации: условная или безусловная. Для того чтобы решить поставленную в данной работе задачу, необходимости в использовании специальных методов оптимизации с ограничениями не возникает. Поиск экстремума осуществляется в ограниченной области и контроль за выходом из этой области можно

предусмотреть в алгоритме.

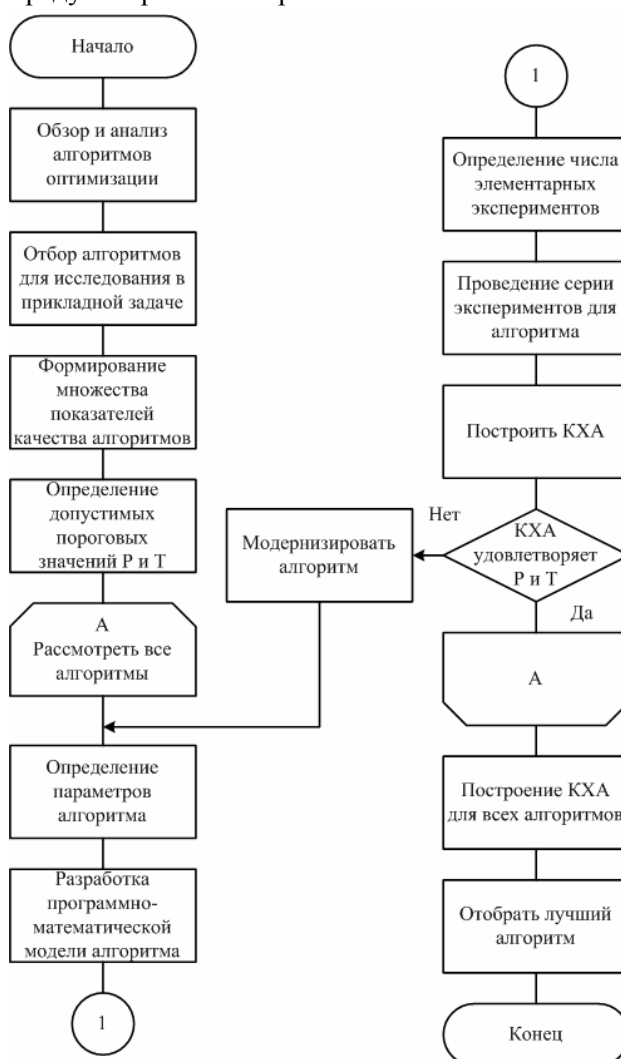


Рисунок 2 – Алгоритм отбора лучшего алгоритма поиска ГЭ

– По использованию производных. В глобальной оптимизации основной задачей является выявление тенденции глобального поведения целевой функции, тогда как производные характеризуют лишь ее локальное поведение. Кроме того, вычисление производных, и особенно производных второго порядка, представляет собой достаточно вычислительно сложную задачу, по-

этому методы, использующие производные, из рассмотрения исключаем.

– По размерности задачи. В целом решается двухмерная задача. Однако в локальных методах возможно использование одномерных алгоритмов поиска.

В данной работе исследовались следующие методы поиска ГЭ:

– одноэтапное и двухэтапное сканирование – самый простой в плане реализации;

– мультистарт – метод локального поиска из случайных начальных точек [4];

– генетический алгоритм – один из самых распространенных видов эволюционных алгоритмов [5];

– метод редукции размерности – многомерный обобщенный алгоритм с редукцией размерности с помощью разверток типа кривой Пеано-Гильберта;

– модифицированный метод деформируемого многогранника [6, 7].

При выборе метода локальной оптимизации были исключены методы 1-го и 2-го порядка. Несомненно, градиентные методы отличаются быстрой сходимостью, то есть выполняются за меньшее количество итераций. Однако здесь не принимается во внимание трудоемкость каждой отдельно взятой итерации метода. При решении конкретной задачи выгоднее применять метод, который сходится медленнее и требует большого числа итераций. Вместе с тем, каждая итерация метода осуществляется просто и общий суммарный объем вычислений оказывается меньшим. В качестве метода локальной оптимизации выбран метод деформируемого многогранника [8]. В этом методе сразу выбираются три точки для начального поиска экстремума, а не одна как в других методах. Такой подход позволяет лучше использовать пространство поиска, что создает предпосылки для улучшения метода с целью повышения вероятности попадания в ГЭ.

Для оценки эффективности алгоритмов оптимизации введем набор показателей качества метода поиска ГЭ – $Q_M = \{q_{M1}, q_{M2}, \dots, q_{Mn}\}$. В качестве q_{Mi} в него входят следующие критерии оценки эффективности алгоритмов [8]:

- точность определения координат ГЭ;
- вероятность нахождения ГЭ;
- трудоемкость алгоритма поиска ГЭ.

Приемлемая погрешность (точность) определения координат ГЭ задается требованиями области приложения задачи решения поиска ГЭ. Обычно приемлемая погрешность задается в виде параметрического ограничения вида:

$$|E| \leq \varepsilon^*,$$

где $|E| = \left\| (\varepsilon_x, \varepsilon_y) \right\|$ – норма вектора по координатным погрешностям; ε^* – допустимое значение погрешности.

При формировании критериальной функции при совмещении ТИ и ЭИ или просто двух изображений обычно требуется пиксельная или даже субпиксельная погрешность определения координат $x^* \in R^2$. В рассматриваемой работе использовалась Евклидова норма вектора и значения порога при целочисленных координатах $\varepsilon^* = 1 \dots 4$. Погрешность определения координат ГЭ зависит от критериев окончания вычислительной процедуры.

Для ярко выраженной мультимодальной ЦФ на передний план выходит критерий надежности нахождения ГЭ среди множества локальных. По этой причине необходимо учитывать не только точность нахождения экстремума, но и вероятность нахождения именно ГЭ с заданной погрешностью.

Третий критерий – трудоемкость алгоритма поиска ГЭ. При решении поставленных задач целесообразно использовать не абсолютные величины трудоемкости, такие как время реализации алгоритма, а относительные – количество вызовов ЦФ N или количество итераций, необходимых для достижения определенной точности. Итерация для данной задачи означает выбор нового направления поиска. Безусловно, первый критерий лучше, чем критерий, использующий число итераций, поскольку последний меняется в очень широких пределах для разных алгоритмов.

Таким образом, в качестве показателей эффективности Q_M для алгоритмов поиска ГЭ целесообразно принять пару показателей $Q_M = (N, P)$, где P – вероятность попадания в ГЭ с заданной погрешностью ε^* ; N – количество вызовов ЦФ, использованное для этого.

При наличии искажений изображения множество показателей качества метода поиска ГЭ примет следующий вид: $Q_M = (N, P, Q_3)$, где $Q_3 = \{q_{31}, q_{32}, \dots, q_{3n}\}$ – подмножество показателей степени искажений изображений, q_{3i} – величина, обратная отношению сигнал/шум (ОСШ) по яркости, геометрические искажения (поворот, масштаб) и другие.

Максимально допустимое значение количества итераций N , равное N^* , определяется требованиями реального времени соответствующей предметной области применения алгоритмов

поиска ГЭ. Из анализа технических требований к СТЗ ЛА следует, что время, необходимое для вычисления N^* раз критериальной функции, составляет величину порядка от 0,1 с до 10 с, вероятность P правильного определения ГЭ должна находиться в диапазоне от 0,95 до 0,98.

Каждому i -му методу в координатах (N, P) соответствует уравнение вида:

$$F_i(N, P)_{\gamma_i} = 0, \quad (1)$$

где γ_i является параметром i -го метода, изменение которого позволяет перераспределить соотношения между показателями P и N . Параметр может быть один, например, при методе сканирования – это шаг сканирования, а у генетического алгоритма два параметра – размер популяции и количество поколений. Указанную пару показателей удобно изобразить на плоскости точкой с координатами (N, P) . Каждому алгоритму поиска можно сопоставить множество таких точек, соответствующих различным значениям параметров, входящих в описание алгоритма.

Решение уравнения (1) для различных γ_i называется качественной характеристикой алгоритма (КХА). Если при выбранном значении N качественная характеристика одного алгоритма лежит выше качественной характеристики другого алгоритма, то первый алгоритм обеспечивает большую вероятность попадания в ГЭ при тех же затратах на поиск. Если при выбранном значении P качественная характеристика одного алгоритма лежит левее качественной характеристики другого алгоритма, то первый алгоритм требует меньших затрат для достижения той же вероятности попадания в ГЭ (рисунок 3). Таким образом, качественные характеристики позволяют сравнивать различные алгоритмы поиска ГЭ.

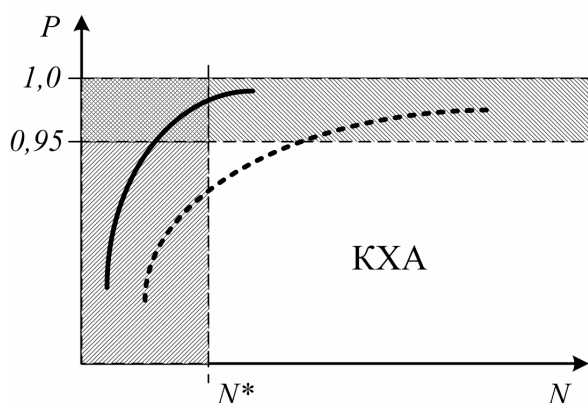


Рисунок 3 – Качественные характеристики алгоритмов

Предметом самостоятельного исследования является анализ КХА в плоскости (N, P) , так как в многих приложениях удается почти полностью скомпенсировать взаимные искажения.

Следующие шаги методики: разработка программно-математической модели метода и определение числа элементарных экспериментов.

При обработке результатов проведенных экспериментов осуществляется оценка вероятности правильного попадания в ГЭ P по частоте

$$P^* = \frac{m}{n},$$

где m – число успехов в n элементарных испытаниях. Число n формируется за счет использования различных тестовых изображений и различных случайных положений ЭИ в рамках выбранного ТИ. Общий объем используемых тестовых изображений v в программе тестовых испытаний составлял $12 \div 20$. Количество случайных положений ЭИ k относительно выбранного тестового изображения колебалось в пределах $100 \div 500$ в различных экспериментах. Таким образом, общий объем элементарных испытаний (опытов) $n = v \cdot k$ менялся в диапазоне от 1200 до 10000. При оценке вероятности по частоте в случае, если вероятность P очень велика, доверительный интервал строят исходя из точного закона распределения частоты [9]. При этом число появления благоприятного события (попадания в ГЭ) в n опытах распределено по биномиальному закону:

$$P_{m,n} = C_n^m p^m q^{n-m},$$

где $q = 1 - P$. В этом случае необходимо найти интервал частот $[p_1^*, p_2^*]$, в который с вероятностью $\beta = 1 - \alpha$ попадает частота события P^* . Здесь β – доверительная вероятность, α – вероятность промаха в доверительный интервал. В [9] приведены области (интервалы частот) для каждого значения n и заданного значения, внутри которых значение вероятности P совместимо с наблюдаемым значением частоты P^* , с доверительной вероятностью β . В частности, при значении $\beta = 0,9$ и полученной частоте $P^* = 0,95$ значение вероятности P будет лежать в пределах от 0,94 до 0,955 при проведении $n = 1000$ элементарных опытов. При снижении n до 100 доверительный интервал увеличивается до величины от 0,91 до 0,96. Таким образом, общее число проведения элементарных опытов $n = 1200 \div 10000$ является обоснованным и достаточным для оценки вероятности по частоте с доверительной вероятностью $\beta = 0,9$ при достижении частоты событий порядка $0,95 \div 0,98$.

Далее проводится серия экспериментов для каждого алгоритма и строится КХА, по которой определяется, соответствует ли данный алгоритм допустимым значениям N и P . Если алгоритм не отвечает заданным требованиям, то его, если есть возможность, необходимо модернизировать. В публикациях [5, 6, 7] представлена модернизация генетического алгоритма и метода деформируемого многогранника. И далее перейти к исследованию модернизированного метода. После того как будут получены КХА всех исследуемых алгоритмов, необходимо выбрать тот, который наилучшим образом отвечает требованиям по трудоемкости и вероятности правильно совмещения изображений.

Предложенная методика позволяет обосновано выбрать сначала лучшие методы поиска ГЭ в координатах (N, P) , то есть для случая, когда текущее и эталонное изображения максимально приведены к сравнимому виду. А затем, методы, выбранные на первом этапе, исследуются при наличии искажений в координатах (N, P, φ) , $(N, P, Scale)$, $(N, P, \varphi, Scale)$, $(N, P, ОСШ)$, где ОСШ – отношение сигнал/шум, при воздействии шума на яркостную составляющую текущего изображения, φ – угол поворота и $Scale$ – коэффициент масштабирования при воздействии геометрических искажений на текущее изображение.

Вывод. Применительно к рассматриваемой в статье прикладной задаче предложенная методика позволила из большого многообразия известных и разработанных алгоритмов поиска глобального экстремума многокритериальной функции выбрать наиболее эффективный.

Изложенная методика может быть использована при решении других прикладных задач, а следовательно, и при других ЦФ.

Библиографический список

1. Елесина С.И., Логинов А.А., Никифоров М.Б. Методика оценки качества критериальной функции совмещения изображений // Информационные технологии: теоретический и прикладной научно-технический журнал. 2013. – № 3. – С. 24–28.
2. Жиглявский А.А., Жилинскис А.Г. Методы поиска глобального экстремума. – М.: Наука, 1991. – 248 с.
3. Орлянская И.В. Современные подходы к построению методов глобальной оптимизации // Электронный журнал «Исследовано в России» – (<http://zhurnal.ape.relam.ru/articles/2002/189.pdf>).
4. Елесина С.И., Никифоров М.Б. Исследование особенностей метода мултистарта в глобальной оптимизации // Проектирование и технология электронных средств. – 2011. – № 2. – С. 45–49.
5. Елесина С.И., Никифоров М.Б. Повышение эффективности генетического алгоритма // Информационные технологии: теоретический и прикладной научно-технический журнал. 2012. – № 3. – С. 49–54.
6. Елесина С.И., Логинов А.А. Модифицированный метод деформируемого многогранника // Вестник РГРТУ. 2009. – № 4. – С. 100–103.
7. Бабаев С.И., Елесина С.И., Костров Б.В. Сравнение модифицированного поискового и генетического алгоритмов нахождения глобального экстремума в интеллектуальных системах навигации // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ОТ. 2010. – Вып.1. – С. 145–152.
8. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. – М.: Мир, 1975. – 536 с.
9. Венцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1964. – 576 с.

УДК 621.319

Ч.Т. Нгуен

АЛГОРИТМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ РАДИОИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ДОПЛЕРОВСКОЙ ФИЛЬТРАЦИИ И ОЦЕНИВАНИЯ КООРДИНАТ

Предложены алгоритмы формирования трехмерных изображений земной поверхности в бортовых доплеровских радиолокационных станциях, основанные на методах оценивания угловых координат. Представлены результаты моделирования работы алгоритмов. Дана оценка вычислительных затрат.

Ключевые слова: *трехмерное радиоизображение, доплеровская фильтрация, оценивание координат.*

Введение. В публикации [1] была представлена математическая модель бортовой радиолокационной системы (РЛС) наблюдения за земной поверхностью на основе узкополосной доплеровской фильтрации, поставлена задача формирования трехмерных радиоизображений (РИ) земной поверхности в такой системе и указаны варианты ее решения. В данной статье конкретизируется описание алгоритмов, приводятся результаты моделирования их работы и дается оценка вычислительных затрат.

Цель работы – разработка алгоритмов формирования трехмерных РИ земной поверхности в бортовых доплеровских РЛС, моделирование их работы и оценка вычислительных затрат.

Постановка задачи. Наблюдение земной поверхности ведется в антенной прямоугольной системе координат o_a, x_a, y_a, z_a , ось $o_a z_a$ совпадает с центральным направлением излучения и приема отраженных сигналов. Диаграмма направленности антенны (ДНА) описывается в угловых координатах φ, θ , где φ – угол между осью $o_a z_a$ и геометрической проекцией луча РЛС на горизонтальную плоскость o_a, x_a, z_a ; θ – угол в проекции на вертикальную плоскость o_a, y_a, z_a . Антенна выполнена в форме плоской решетки с Q элементами, работающими на излучение и прием отраженных сигналов. Центры приемных элементов антенны расположены в точках $M(\pm(2i-1)d, \pm(2j-1)d, 0)$, $i=1, \dots, N$, $j=1, \dots, N$ ($4N^2 = Q$) в антенной прямоугольной системе координат ($2d$ – расстояние между центрами соседних элементов по горизонтали и вертикали).

Принимаемые в q -х приемных элементах антенны комплексные сигналы \dot{S}_q , $q=1, \dots, Q$, проходят через тракт первичной обработки [2, 3] в q -х каналах (параллельно или последовательно), в результате чего выделяются i -е составляющие сигнала ($i=1, \dots, m$) в m элементах разрешения дальности R_i и j -е составляющие ($j=1, \dots, n$) в n элементах разрешения доплеровской частоты f_j . Получаем совокупность комплексных сигналов $\dot{S}_q(i, j)$, математическая модель которых [1] представлена следующими выражениями:

$$\dot{S}_q(i, j) = \dot{U}(\varphi, \theta) \dot{G}_q(\varphi, \theta) + \dot{P}_q(i, j), \quad (1)$$

$$q = 1, \dots, Q,$$

$$\dot{U}(\varphi, \theta) = \gamma U(\varphi, \theta) \exp\{i\xi\}, \quad \xi = \varepsilon - 4\pi R / \lambda,$$

$$\dot{G}_q(\varphi, \theta) = G(\varphi, \theta) \exp\{-i4\pi\delta_q / \lambda\},$$

$$G(\varphi, \theta) = \exp\{-k_0(\varphi^2 + \theta^2) / \Delta^2\},$$

где $\dot{U}(\varphi, \theta)$ – комплексная амплитуда сигнала отражения; множитель i под знаком экспоненты – мнимая единица; ξ – изменение фазы сигнала при приеме в i -м элементе дальности; ε – неизвестное изменение фазы в i -м элементе дальности, которое в i -м элементе дальности можно считать неизменным, а на множестве i -х элементов – случайным, равномерно распределенным на $[0, 2\pi]$; λ – длина волны; $\dot{G}_q(\varphi, \theta)$ – комплексная нормированная ДНА, амплитудная часть которой $G(\varphi, \theta)$ – известная функция φ и θ (k_0 – известный коэффициент); Δ – ширина ДНА по φ и θ ; $\delta_q = \delta_q(\varphi, \theta)$ – опережение или запаздывание приемного сигнала по фазе в q -м приемном элементе по сравнению с центром антенны; \dot{P}_q – комплексный гауссовский белый шум с нулевым математическим ожиданием; γ – мультипликативная помеха, вызванная нестабильностью работы каналов, случайная величина с единичным математическим ожиданием.

Сигналы $\dot{S}_q(i, j)$, $q=1, \dots, Q$, модели (1) соответствуют пространственному элементу разрешения РЛС, который ограничен сферическими поверхностями i -го элемента дальности, конечной поверхностью ДНА и почти плоскими (в пределах узкой ДНА) сечениями j -го элемента разрешения по доплеровской частоте. Такой элемент разрешения оказывается протяженным по угловым координатам φ, θ .

Задача заключается в уменьшении угловых размеров протяженного элемента разрешения в несколько раз (задача сверхразрешения) за счет нахождения оценок угловых координат $\varphi_{ij}, \theta_{ij}$ элемента отражения поверхности, расположенного в i -м элементе дальности на j -й линии доплеровской частоты f_j . Рассмотрим алгоритмы решения задачи.

Алгоритм 1. Первый алгоритм решения задачи использует четыре канала ($Q = 4$) первичной обработки и основан на моноимпульсном методе измерения угловых координат [4]. Центры приемных элементов находятся в точках $M_1(d, d, 0)$, $M_2(-d, d, 0)$, $M_3(-d, -d, 0)$, $M_4(d, -d, 0)$. Алгоритм сводится к следующим операциям.

1. На основе измерений четырех каналов $\dot{S}_q(i, j)$, $q=1, 2, 3, 4$, вычисляем суммарный и разностные сигналы $\dot{S}_\Sigma, \dot{S}_\varphi, \dot{S}_\theta$ для всех значений i и j :

$$\dot{S}_\Sigma = \dot{S}_1(i, j) + \dot{S}_2(i, j) + \dot{S}_3(i, j) + \dot{S}_4(i, j),$$

$$\dot{S}_\varphi = \dot{S}_2(i, j) + \dot{S}_3(i, j) - \dot{S}_1(i, j) - \dot{S}_4(i, j),$$

$$\dot{S}_\theta = \dot{S}_3(i, j) + \dot{S}_4(i, j) - \dot{S}_1(i, j) - \dot{S}_2(i, j).$$

2. Выделяем действительную часть суммарного сигнала $\text{Re}\{\dot{S}_\Sigma\}$ и мнимые части разностных сигналов $\text{Im}\{\dot{S}_\varphi\}$, $\text{Im}\{\dot{S}_\theta\}$. Получаем пеленгационные характеристики:

$$U_1 = \text{Im}\{\dot{S}_\varphi\} / \text{Re}\{\dot{S}_\Sigma\} = \text{tg}(\mu\varphi),$$

$$U_2 = \text{Im}\{\dot{S}_\theta\} / \text{Re}\{\dot{S}_\Sigma\} = \text{tg}(\mu\theta),$$

$$\mu = 4\pi d / \lambda.$$

3. Находим оценки угловых координат φ_{ij} , θ_{ij} :

$$\varphi_{ij} = (1/\mu) \arctan(U_1) \approx U_1 / \mu,$$

$$\theta_{ij} = (1/\mu) \arctan(U_2) \approx U_2 / \mu.$$

4. На множестве ij вычисляем прямоугольные координаты точек отражения $x_{ij} = \varphi_{ij} R_i$, $y_{ij} = \theta_{ij} R_i$, $z_i = R_i$. Совокупность таких точек представляет трехмерное изображение земной поверхности в зоне видимости РЛС (в пределах ширины ДНА).

Алгоритм 2. Второй алгоритм использует большее (по сравнению с первым алгоритмом) число каналов Q и основан на применении метода восстановления изображений [5]. В соответствии с данным методом модель сигнала уточняется – в ней рассматриваются k -е составляющие сигнала по k -м элементам дискретизации линии j -й доплеровской частоты, уравнение которой [1] связывает координаты φ и θ в зависимости от частоты f_j :

$$\dot{S}_q(i, j) = \sum_k \dot{U}(\varphi_k, \theta_k) \dot{G}_q(\varphi_k, \theta_k) + \dot{p}_q,$$

$$q = 1, \dots, Q.$$

$$\theta_k = \arccos[f_j(\lambda/2v) / \sin \varphi_k],$$

$$\varphi_k \in [\varphi_{\min}, \varphi_{\max}],$$

где v – скорость движения носителя РЛС; $[\varphi_{\min}, \varphi_{\max}]$ – диапазон изменения угла φ в пределах ДНА. Алгоритм сводится к следующим операциям.

1. Заранее (до обработки) для всех значений j вычисляем дискретные q, k -е значения ДНА $\dot{G}_q(\varphi_k, \theta_k)$, $q = 1, \dots, Q$, $k = 1, \dots, K$ (K – число элементов дискретизации) и помещаем их в $Q \times K$ -матрицу G . На основе матрицы G вычисляем $K \times Q$ -псевдообратную матрицу G^+ (например, в среде Matlab).

2. В рабочей части алгоритма записываем

измерения \dot{S}_q , $q = 1, \dots, Q$, в Q -вектор S . Умножаем вектор S справа на матрицу G^+ и получаем K -вектор оценок \hat{U} :

$$\hat{U} = G^+ S. \quad (2)$$

Практически (2) сводится к умножению комплексных измерений \dot{S}_q на известные комплексные весовые коэффициенты \dot{w}_{kq} – элементы матрицы G^+ и суммированию:

$$\hat{U}_k = \sum_q \dot{w}_{kq} \dot{S}_q, \quad k = 1, \dots, K.$$

3. Для найденных оценок $\hat{U}_k = \dot{U}(\varphi_k, \theta_k)$, $k = 1, \dots, K$, вычисляем модули $|\hat{U}_k|$, $k = 1, \dots, K$, и выбираем k -й элемент, превышающий порог обнаружения полезного сигнала и имеющий максимальную амплитуду: $\max |\hat{U}_k|$. Угловые координаты (φ_k, θ_k) выбранного элемента дают искомые оценки $\varphi_{ij}, \theta_{ij}$, а $\max |\hat{U}_k|$ – оценку амплитуды $U_{ij}(\varphi, \theta)$.

4. Вычисляем координаты точек $x_{ij} = \varphi_{ij} R_i$, $y_{ij} = \theta_{ij} R_i$, $z_i = R_i$ трехмерного изображения контролируемого участка поверхности.

Результаты моделирования работы алгоритмов. Работа алгоритмов моделировалась в одном элементе дальности в условиях стабильной и нестабильной работы каналов. При моделировании стабильной работы принималось следующее. Значение наклонной дальности $R = 1000 \text{ м}$. Длина волны $\lambda = 0,03 \text{ м}$. Параметр $\mu = 4\pi d / \lambda$, где $d = 0,2 \text{ м}$ – координата центра приемного элемента антенны. Угловая ширина ДН в 1° : $\Delta = \pi/180 \approx 0,017 \text{ рад}$, что соответствует линейной ширине примерно 17 м на указанной дальности. Коэффициент ДНА $k_0 = 0,7$.

Угловые координаты φ , θ элемента отражения в каждой реализации эксперимента выбирались на $[-\Delta/2, \Delta/2]$ по равномерному закону. Амплитуда полезного сигнала $U(\varphi, \theta) = 10$. Случайная составляющая фазы ε выбиралась на $[0, 2\pi]$ по равномерному закону на множестве реализаций. Комплексный шум \dot{p}_q задавался на множестве реализаций в каждом q -м канале по нормальному закону с нулевым средним и СКО действительной и мнимой частей σ_p , т.е. с суммарной дисперсией $2\sigma_p^2$ и соответственно СКО $\sqrt{2}\sigma_p$. Число реализаций случайных составляющих – 1000.

Точность работы алгоритмов оценивалась величиной расстояния между моделируемой точкой с координатами $x = \varphi R$, $y = \theta R$ и найденной алгоритмами точкой с координатами $\hat{x} = \hat{\varphi} R$, $\hat{y} = \hat{\theta} R$ в антенной прямоугольной системе координат. На множестве реализаций вычислялись средняя ошибка оценивания (среднее расстояние) и СКО ошибки в метрах (в таблицах соответственно обозначено: “Ошибка” и “СКО”). Результаты моделирования представлены в таблицах 1–3. Из-за неустойчивой работы алгоритма 1 дан диапазон колебаний указанных характеристик.

В таблице 1 показано влияние аддитивного шума \dot{P}_q на точность работы алгоритма 1 – зависимости указанных характеристик от отношения сигнал – шум $20 \lg(U/\sqrt{2}\sigma_p)$ в дБ (в таблицах обозначено: “С/Ш”). Знак “ ∞ ” означает недопустимо большие (неудовлетворительные) значения ошибок и СКО. В таблице 2 показаны аналогичные зависимости для алгоритма 2, полученные при числе каналов $Q = 16$ и числе элементов дискретизации $K = 40$. Работа алгоритмов считалась удовлетворительной, если средняя ошибка и ее СКО не превышали 1 м.

Преимущество алгоритма 2 по точности очевидно – он обладает высокой устойчивостью в смысле сохранения удовлетворительных характеристик в широком диапазоне значений сигнал-шум, начиная с 30 дБ. Однако уступает алгоритму 1 в экономичности, что обусловлено большим числом каналов Q . Рабочий диапазон алгоритма 1 ограничен: он работает более устойчиво при отношении сигнал – шум свыше 60 дБ.

Исследования показали, что при отсутствии шумов ($\sigma_p = 0$) наличие мультипликативной помехи, действующей одинаково во всех Q каналах (имитация стабильной работы каналов), не влияет заметно на характеристики точности оценивания координат в рабочем диапазоне обоих алгоритмов. Основное влияние (особенно на алгоритм 1) оказывает аддитивный шум.

При моделировании нестабильности каналов мультипликативная помеха выбиралась по нормальному закону независимо как на множестве реализаций эксперимента, так и в каждом измерительном канале. Исследования показали, что нестабильная работа каналов первичной обработки приводит к резкому ухудшению характеристик алгоритма 1: начиная с СКО мультипликативной помехи $\sigma_\gamma = 0,01$ и выше, характеристики алгоритма 1 оказываются неудовлетвори-

тельными даже при отношении сигнал-шум в 70 дБ. Для алгоритма 2 при 70 дБ устойчивая работа сохранялась при отклонении амплитуды до 2 % относительно $U = 10$, что показано в таблице 3 для показателя $(2\sigma_\gamma/U)100\%$, имеющего смысл % отклонения амплитуды за счет мультипликативной помехи на $\pm\sigma_\gamma$ относительно U .

Таблица 1 – Влияние аддитивного шума на алгоритм 1

С/Ш дБ	20	30	40	50	60	70
Ошибка (м)	4-8	2-4	12	0,8-1,2	0,7-1	0,7-0,8
СКО (м)	∞	∞	2 - 14	1,5 - 10	0,6 - 1	0,65 - 0,9

Таблица 2 – Влияние аддитивного шума на алгоритм 2

С/Ш	20	30	40	50	60	70
Ошибка	2,68	0,82	0,78	0,76	0,72	0,72
СКО	3,60	0,74	0,62	0,61	0,60	0,60

Таблица 3 – Влияние мультипликативной помехи на алгоритм 2

Помеха	0(%)	1	1,4	1,8	2,2	2,6
Ошибка	0,72	0,76	0,78	0,80	0,89	1,22
СКО	0,60	0,61	0,63	0,78	1,08	1,92

Оценка вычислительных затрат. Для формирования трехмерных изображений на базе доплеровской РЛС требуется выполнить операции, обеспечивающие разрешение по дальности, по доплеровской частоте и оценивание угловых координат. Первые операции выполняются стробированием по времени и являются типовыми для всех РЛС. Они реализуются на программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС). Вторые операции выполняются независимо для каждого i -го элемента дальности ($i = 1, \dots, n$) и каждого q -го приемного канала антенны ($q = 1, \dots, Q$). В случае применения БПФ [3] число операций умножения-сложения составит $Qmn \log_2 n$, что характеризует сложность обработки для разрешения по частоте (не касаясь требуемой памяти). Для нахождения оценок угловых координат для алгоритма 1 потребуется порядка $20mn$ операций умножения-сложения и для алгоритма 2 – $2QKmn$ подобных операций.

Пусть $m = n = 256$, $Q = 16$, $K = 32$, тогда для решения задачи алгоритму 1 потребуется $4mn \log_2 n + 20mn = 50mn = 3276800$ тактов процессора и алгоритму 2 – $16mn \log_2 n + 32^2 mn = 1152mn = 75497472$ тактов. Если реализацию предложенных алгоритмов осуществлять на одной из современных платформ цифровых сигнальных процессоров – процессорах TMS320DM6437 фирмы Texas Instruments [6] с тактовой частотой, равной 700 МГц, то время

решения задачи алгоритмом 1 составит 4,7 мс и алгоритмом 2 – 108 мс. Для промежутка времени синтезирования (формирования радиоизображения) длительностью 125 мс задача формирования радиоизображения решается обоими алгоритмами в реальном масштабе времени.

Заключение. Предложены алгоритмы формирования трехмерных изображений в радиолокационных системах наблюдения с доплеровской частотной обработкой отраженных сигналов. Алгоритм, основанный на моноимпульсном методе измерения угловых координат, наиболее экономичен по числу каналов обработки, но работоспособен при отношении сигнал – шум выше 60 дБ при условии стабильной работы всех каналов обработки сигналов. Алгоритм, основанный на оптимальном восстановлении изображений, показывает устойчивую работу в широком диапазоне значений сигнал – шум, начиная с 20 дБ, и менее подвержен влиянию мультипликативной помехи, вызванной нестабильностью каналов. Реализация обоих алгоритмов возможна в реальном времени на базе существующих бортовых РЛС.

Библиографический список

1. Клочко В.К., Нгуен Ч.Т. Математическая модель системы формирования трехмерных радиоизображений на основе доплеровской фильтрации и оценивания координат // Вестник РГРТУ. 2013. № 2 . – С. 11–18.
2. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / А.Н. Антипов, В.Т. Горяинов, А.Н. Кулин и др.; под ред. В.Т. Горяинова. – М.: Радио и связь, 1988. – 304 с.
3. Витязев В.В., Колодько Г.Н., Витязев С.В. Способы и алгоритмы формирования радиолокационного изображения в режиме доплеровского облучения луча // Цифровая обработка сигналов. – 2006. № 3. –С. 31–41.
4. Леонов А.И., Фомичев К.И. Моноимпульсная радиолокация. – М.: Радио и связь, 1984. – 312 с.
5. Клочко В.К. Математические методы восстановления и обработки изображений в радиотеплоэлектронных системах. – Рязань: РГРТУ, 2009. – 228 с.
6. Клочко В.К., Витязев С.В., Нгуен Ч.Т. Формирование трехмерных радиоизображений в системах доплеровской фильтрации / MECO 2013. 2nd Mediterranean Conference on Embedded Computing. Budva, Montenegro. June 16–20, 2013. – С. 121–123.