

УДК 621.396.96

В.А. Таршин¹, А.М. Сотников¹, Р.Э. Пащенко²¹ Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков² Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины, Харьков

ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОПЕРАТИВНОЙ ПОДГОТОВКИ ЭТАЛОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

На основе анализа вычислительной реализуемости различных методов локализации информативных областей изображений, используемых для формирования эталонных изображений корреляционно-экстремальных систем навигации (наведения) летательных аппаратов, обосновывается целесообразность использования методов фрактального анализа изображений.

Ключевые слова: корреляционно-экстремальная система навигации, эталонное изображение, фрактальная размерность.

Введение

Эффективность решения задачи местоопределения летательных аппаратов (ЛА), использующих для коррекции инерциальную корреляционно-экстремальную систему навигации (КЭСН), во многом определяется качеством используемых эталонных изображений. Современные системы формирования эталонных изображений (ЭИ) должны обеспечивать возможность выбора информативных областей (областей, обеспечивающих наивысшую точность местоопределения ЛА) на исходных изображениях по выбранной совокупности информативных признаков.

Постановка проблемы. При составлении полетных заданий наиболее ценной является информация, полученная непосредственно перед запуском ЛА, поэтому возникает необходимость в разработке современных быстродействующих методов обработки изображений и локализации информативных областей (областей привязки). Кроме того, например, в случае использования КЭСН для навигации беспилотных ЛА может возникать необходимость изменения маршрута полета и выбора новых ЭИ.

Анализ последних достижений и публикаций. Проведенный анализ доступных источников информации свидетельствует о том, что в настоящее время разработано и достаточно подробно изучено большое количество методов обработки изображений, которые могут быть использованы для синтеза ЭИ.

Методы обработки изображений, используемых для обеспечения работы КЭСН, можно разделить на два класса:

методы выделения областей изображений с соответствующими характерными признаками;

методы структурного анализа изображений, позволяющие представить изображение набором структурных элементов [1–4].

Задача методов первого класса состоит в выборе информативных участков изображений, соответствующих определенным требованиям (контраста, яркости, отражающей способности и т.д.) без детального анализа структуры объектов и их взаимного расположения. Такие методы целесообразно применять для формирования ЭИ, используемых при определении местоположения на промежуточных участках полета ЛА. Основными требованиями, предъявляемыми к таким методам, являются точность определения местоположения и быстродействие.

Широко развиваемые в настоящее время методы структурного анализа изображений [1 – 4] обеспечивают идентификацию объектов на поверхности визирования. Такие методы целесообразно применять при анализе окружающей обстановки на борту ЛА в процессе полета, а также на конечном этапе наведения ЛА для поиска и идентификации цели. Эффективное использование их для создания ЭИ возможно только при заблаговременной подготовке полетного задания ЛА и предполагает наличие снимков районов привязки в различное время, с различных ракурсов [5], а также использование трехмерных моделей местности.

Поскольку методы структурного анализа изображений применяются на конечном участке полета ЛА, то именно методы первого класса определяют оперативность создания полетного задания.

В [6] рассмотрены различные варианты оценки информативности изображений, однако наиболее полным и универсальным показателем информативности изображений может служить взаимная корреляционная функция (ВКФ) исходного изображения и формируемого ЭИ.

Вычисление ВКФ на этапе синтеза ЭИ позволяет реализовать те же подходы, что и при корреляционной обработке текущих изображений [7, 8]. Достоинством таких методов является то, что они

позволяют выбирать информативные участки местности для формирования ЭИ с учетом максимально достижимой вероятности правильного местоопределения. К недостаткам корреляционных алгоритмов относится сложная вычислительная реализуемость [7], а также низкая эффективность при выделении информативных участков в условиях слабой контрастности местности. Для улучшения вычислительной реализуемости используют различные модификации корреляционных алгоритмов [7]. Сравнительный анализ быстродействия корреляционных алгоритмов различных модификаций приведен в [7, 9], однако решение задачи синтеза ЭИ требует больших ресурсов, по сравнению с задачей обработки ЭИ и текущих изображений, что делает невозможным их использование для оперативной подготовки ЭИ. Следовательно, возникает необходимость поиска быстродействующих методов и алгоритмов локализации информативных областей изображений.

В качестве одного из путей снижения вычислительных затрат и повышения оперативности создания ЭИ для КЭСН авторами предлагается использовать методы фрактального анализа (ФА) изображений.

Такие методы достаточно подробно рассмотрены в [10, 11] и хорошо зарекомендовали себя при анализе оптических и радиолокационных изображений местности в задачах дистанционного зондирования Земли.

В [11] показано, как использование свойств фрактальной геометрии может быть применено для описания различного рода поверхностей. Разработаны методы анализа изображений с использованием поля фрактальных размерностей (ПФР), позволяющие выделять области наблюдения на изображении, проводить анализ слабоконтрастных изображений и т.д.

Целью статьи является обоснование целесообразности использования для оперативного формирования ЭИ методов фрактального анализа и оценка их вычислительной реализуемости.

Основной материал

Одним из основных требований при рассмотрении методов оперативного анализа изображений является возможность представления результатов локализации информативных участков поверхности визирования (ПВ) в виде, удобном для программной (аппаратной) их реализации в соответствии с алгоритмом сравнения изображений.

На первоначальном этапе исследований был проведен выбор исходных оптических полутонковых изображений ПВ, на основании которых проводилось сравнение различных методов локализации информативных участков местности.

Пример одного из изображений, содержащего контрастные (населенный пункт) и слабоконтрастные (пустынные) участки местности, приведен на

рис. 1, что соответствует изображению участка ПВ размером 1210×626 м (1003×524) с высоты приблизительно 1500 м.



Рис. 1. Полутонковое исходное изображение, полученное из интернет-ресурса Google Earth

Оценку результатов обработки и локализации информативных областей изображений целесообразно проводить в сравнении классическим корреляционным алгоритмом.

Для выбранного в качестве примера изображения (рис. 1) произведена корреляционная обработка, по результатам которой определено 4 области (обозначенные черными квадратами на рис. 2), обеспечивающие наибольшее значение коэффициента взаимной корреляции ЭИ размером $N_1 \times N_2$ (20×20 пикселей) и исходного изображения (рис. 1).

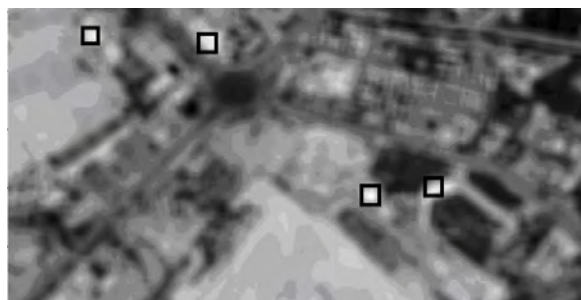


Рис. 2. Результат корреляционной обработки исходного изображения

Алгоритм корреляционной обработки реализуется путем вычисления коэффициента взаимной корреляции K_{kl} ЭИ с координатами k и l при всех возможных сдвигах обрабатываемых изображений в соответствии с выражением [7, 9]

$$K_{kl} = \frac{\sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} [f(i, j) - \bar{f}][g(i+k-1, j+l-1) - \bar{g}_{kl}]}{N_1 N_2 \sigma_f \sigma_g}, \quad (1)$$

$$\bar{f} = \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} t(i, j),$$

$$\bar{g}_{kl} = \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} e(i+k-1, j+l-1),$$

$$\sigma_f^2 = \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} [f(i, j) - \bar{f}]^2,$$

$$\sigma_g^2 = \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} [g(i+k-1, j+1-1) - \bar{g}_{kl}]^2,$$

где K_{kl} – значения коэффициента взаимной корреляции анализируемого изображения и ЭИ с координатами k и l , при $k=1, 2, \dots, M_1 - N_1$, $l=1, 2, \dots, M_2 - N_2$;

$S_f = \|f(i, j)\|$ – матрица контрастности исходного изображения размером $M_1 \times M_2$ (рис.1);

$S_{g_{kl}} = \|g_{kl}(i, j)\|$ – матрица контрастности ЭИ, как элемент исходного изображения $N_1 \times N_2$ с координатами k и l .

Размеры ЭИ при проведении исследований выбирались исходя из условия обеспечения минимального влияния аффинных преобразований на точность и вероятность правильной привязки КЭСН ЛА (20×20 пикселей) [7].

Целесообразность применения методов (ФА) обусловлена их более простой вычислительной реализуемостью и представлением результатов обработки в виде селективного изображения [11], позволяющего локализовать информативные участки изображения поверхности визирования.

При фрактальном методе обработки изображения рассматривается как объединение областей с одинаковыми фрактальными размерностями. При этом значение фрактальной размерности лежит в пределах $2 \leq D \leq 3$, т.е. является дробным. Отличительной особенностью фрактальной размерности является то, что она характеризует степень заполнения пространства, в которой существует физическая система [11].

Величина фрактальной размерности D определяется как наклон логарифмической зависимости [11]:

$$S(\varepsilon) = k\varepsilon^{-D}, \quad (2)$$

где S – измеряемый параметр (длина линии, периметр, площадь объекта);

ε – шаг измерения (размер сканирующего окна);

k – коэффициент пропорциональности.

При рассмотрении применимости методов ФА изображений для локализации областей привязки ЛА с КЭСН использован метод покрытия, реализованный в программном комплексе [11].

Метод покрытия предполагает нахождение уравнения прямой

$$y = \lg C + Dx, \quad (3)$$

наилучшим образом согласующейся с точками, полученными внутри анализируемого окна, т.е. по имеющемуся набору x_i и y_i необходимо определить наилучшие значения $\lg C$ и D . В выражении (3) C – константа.

Как показано в [11], $\lg C$ и D находятся из решения системы уравнений

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x}) \cdot y_i]}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (4)$$

$$\lg C = \bar{y} - D \cdot \bar{x}, \quad (5)$$

где $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$, $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$ – средние значения;

n – количество точек прямой, полученных по методу наименьших квадратов [11]. Значение D определяется для всех элементов изображения с заданным шагом сканирования и представляется в виде матрицы ПФР.

С использованием программного комплекса [11] опытным путем определено, что для решения задач выделения областей привязки ЛА на местности наиболее целесообразно использовать размер сканирующего окна 8×8 и 16×16 . Для выделения областей привязки строятся селективные изображения.

Локализация информативных областей изображений фрактальным методом осуществляется путем построения селективных изображений [11] в заданном диапазоне фрактальных размерностей $D_{\min} \leq D \leq D_{\max}$.

Путем обобщения результатов исследований с использованием достаточно большого количества изображений различного фоновно-объектового состава удалось выяснить, что использование методов ФА позволяет получать результаты локализации информативных участков слабоконтрастных изображений аналогичные результатам корреляционного анализа. Пример такого изображения приведен на рис. 3. и, соответствующего ему, селективного изображения – на рис. 4. Количество объектов, выделяемых на изображении, определяется выбором D_{\min} и D_{\max} . Размер изображений (рис. 3, рис. 4) аналогичен размеру изображения на рис. 1.

Фрактальный анализ изображений с высокой объектовой насыщенностью (рис. 1) за счет выбора D_{\min} и D_{\max} позволяет локализовать лишь контрастные (рис. 5) либо неконтрастные участки изображений (рис. 6).

Вид селективного изображения оказывается чувствительным к изменению D_{\min} и D_{\max} , что не позволяет локализовать области, указанные на рис. 2.

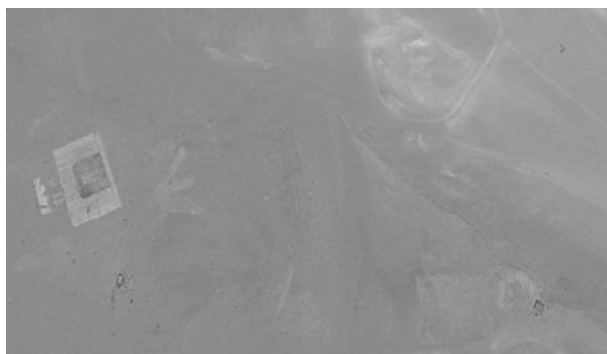


Рис. 3. Изображение участка пустыни
поблизости Каира (Google Earth)

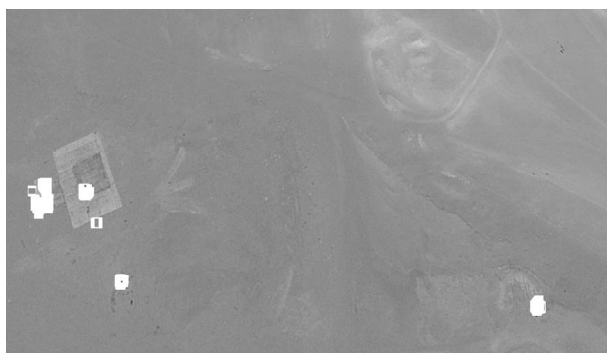


Рис. 4. Селективное изображение
($D_{\min} = 2,872, D_{\max} = 2,91, L = 16$)

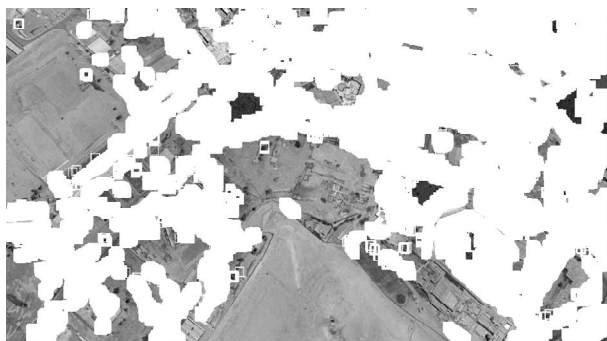


Рис. 5. Селективное изображение
($D_{\min} = 2,5, D_{\max} = 2,77, L = 16$)



Рис. 6. Селективное изображение
($D_{\min} = 2,975, D_{\max} = 3, L = 16$)

Анализ вычислительной реализуемости методов ФА целесообразно проводить также в сравнении с корреляционными методами, используемыми для обработки текущих изображений (ТИ) и ЭИ.

Приблизительное выражение для оценки вычислительной реализуемости корреляционного алгоритма анализа, используемого для синтеза ЭИ путем последовательного сдвига ЭИ размера $N_1 \times N_2$ с шагом в 1 пиксель, количество операций умножения может быть получено из [7] и имеет вид

$$A_{КА} \approx N_1 N_2 M_1 M_2 (M_1 - N_1) (M_2 - N_2), \quad (6)$$

где M_1, M_2 – количество элементов исходного (анализируемого) изображения, которое в рассматриваемых примерах составляет 1003×524 пикселей.

В этом случае для реализации корреляционного алгоритма анализа изображений при размере ЭИ 20×20 пикселей необходимо выполнить $A_{КА} > 10^{14}$ операций умножения, что на используемом для моделирования оборудовании может достигать нескольких десятков часов.

Количество операций умножения, необходимое для выделения информативных участков изображений методом покрытия, определяется из системы выражений (4), (5) и для скользящего окна размером $L \times L$ описывается формулой

$$A_{ФА} = 2L(M_1 - L)(M_2 - L), \quad (7)$$

где $L = 2^{(n-1)}$ – размер скользящего окна анализа.

Для ФА изображений, выбранных в качестве примера (рис. 1, рис. 3), и размера скользящего окна 16×16 количество необходимых операций умножения составляет $A_{ФА} \approx 1,6 \cdot 10^7$. Выигрыш от использования фрактального метода выделения информативных участков изображения по сравнению с корреляционным приблизительно можно оценить, если выбор размеров ЭИ основывается на существующих условиях [7].

ЭИ является квадратным и его размер приблизительно совпадает с размером скользящего окна ($N_1 = N_2 = N \approx L$). В этом случае выигрыш от применения методов ФА анализа изображений оценивается отношением

$$\begin{aligned} \frac{A_{\hat{E}\hat{A}}}{A_{\hat{O}\hat{A}}} &= \\ &= \frac{N^2 M_1 M_2 (M_1 - N) (M_2 - N)}{2L(M_1 - L)(M_2 - L)} = \frac{1}{2} N M_1 M_2 \end{aligned} \quad (8)$$

и определяется размером окна анализа и линейными размерами исходного изображения.

Указанный в (8) выигрыш может быть получен при анализе слабоконтрастных изображений

(рис. 3). В случае контрастных изображений (рис. 1) улучшение вычислительной реализуемости применением методов ФА достигается за счет предварительного исключения слабоконтрастных участков изображений (рис. 6) и дальнейшим корреляционным анализом изображений.

Развитие быстродействующих методов синтеза ЭИ предполагает проведение исследований в следующих направлениях:

обоснование критериев определения диапазона фрактальной размерности для локализации информативных областей изображений;

разработка специальных методов снижения избыточной информативности изображений, связанной с высокой объектовой насыщенностью, для выделения необходимого количества участков привязки ЛА (рис. 2) без использования корреляционных методов.

Выводы

Таким образом, на основе проведенных исследований можно сделать вывод о высокой вычислительной реализуемости и целесообразности дальнейшего развития быстродействующих методов фрактального анализа изображений для оперативной подготовки эталонных изображений КЭСН.

Для полной реализации преимуществ методов фрактального анализа необходимо разработать методы и алгоритмы локализации информативных участков изображений различной фоновой и объектовой структуры.

Список литературы

1. Пытьев Ю.П. Задачи морфологического анализа изображений / Ю.П. Пытьев // *Мат. методы исслед. природных ресурсов Земли из космоса*. – М.: Наука, 1984. – С. 41-83.

2. Пытьев Ю.П. Морфологические методы анализа изображений / Ю.П. Пытьев, А.И. Чуличков. – М.: Физматлит, 2010. – 336 с.

3. Serra J. *Image Analysis and Mathematical Morphology* / J. Serra. – L.: Academic Press, 1982. – 621 p.

4. Serra J. *Introduction to mathematical morphology* / J. Serra // *Computer Vision, Graphics and Image Processing*. – 1986. – V. 35, no. 3. – P. 283-305.

5. Белоглазов И.Н. Теоретические аспекты и приложения стереоскопических систем навигации, наведения и дистанционного зондирования местности / И.Н. Белоглазов // *Техническое зрение в системах управления мобильными объектами-2010: Труды научно-технической конференции-семинара*. – М.: КДУ, 2011. – Вып. 4. – С. 63-91.

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

7. Баклицкий В.К. Корреляционно-экстремальные методы навигации и наведения / В.К. Баклицкий. – Тверь: ТО «Книжный клуб», 2009. – 360 с.

8. Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных летательных аппаратов / К.К. Веремеенко, С.Ю. Желтов, Н.В. Ким и др.; под ред. М.Н. Красильщикова, Г.Г. Серебрякова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 556 с.

9. Антюфеев В.И. Сравнительный анализ алгоритмов совмещения изображений в корреляционно-экстремальных системах навигации летательных аппаратов / В.И. Антюфеев, В.Н. Быков // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2008. – №1(48). – С. 70-74.

10. *Новейшие методы обработки изображений* / Под ред. А.А. Потапова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 496 с.

11. *Фрактальный анализ процессов, структур и сигналов: коллективная монография; под ред. Р.Э. Пащенко*. – Х.: ХОО «НЭО «Экоперспектива», 2006. – 348 с.

Поступила в редколлегию 10.01.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.И. Сухаревский, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

ОБГРУНТУВАННЯ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОЇ ПІДГОТОВКИ ЕТАЛОННИХ ЗОБРАЖЕНЬ

В.А. Таршин, О.М. Сотніков, Р.Е. Пащенко

На основі аналізу обчислювальної реалізації різних методів локалізації інформативних областей зображень, використуваних для формування еталонних зображень кореляційно-екстремальних систем навігації (наведення) літальних апаратів, обґрунтовується доцільність використання методів фрактального аналізу зображень.

Ключові слова: кореляційно-екстремальна система наведення, еталонне зображення, фрактальна розмірність.

ARGUMENTATION FOR THE APPLICATION OF FRACTAL ANALYSIS METHODS TO OPERATIONAL PREPARATION REFERENCE IMAGES

V.A. Tarshyn, A.M. Sotnikov, R.E. Pashchenko

On basis the analysis of the computational feasibility of the various methods of localization of informative regions images used to form the reference image correlation-extremal navigation systems aircraft, the reasonability of using methods of fractal analysis of images.

Keywords: correlation-extremal navigation system, reference image, fractal dimension.