

УДК 681.325

Д.Б. Жуйков, А.Н. Маковейчук, Г.В. Худов

Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛОКАЛЬНОЙ ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ МАСКИРУЮЩИХ ПОМЕХ

В работе для решения задачи обнаружения объектов в условиях воздействия маскирующих помех предлагается использовать метод определения локальной фрактальной размерности изображения. Указываются условия применения метода, а также при наличии упрощающих предположений получено выражение для определения локальной фрактальной размерности.

Ключевые слова: фрактальная размерность, изображение, маскирующая помеха, компьютерное моделирование.

Введение

Постановка проблемы в общем виде. Известно [1 – 5], что в настоящее время при обработке оптико-электронных изображений в условиях воздействия маскирующих помех естественного и искусственного происхождения предъявляются высокие требования к качеству обработки изображений с целью выполнения требований по их координатной привязке и дешифрированию для решения задачи обнаружения объектов.

Цель статьи – разработка метода обработки оптико-электронных изображений в условиях воздействия маскирующих помех с целью дальнейшего обнаружения объектов на изображениях.

Анализ последних достижений и публикаций. Существующие методы обработки изображений, подверженных воздействию маскирующих помех [1 – 9], направлены в основном на повышение контраста изображения и эффективны только для определённых спектральных диапазонов, а их использование с другими типами данных не всегда даёт хороший результат.

К тому же, существующие методы компенсации дымки на изображениях не решают задачу устранения линии раздела задымленной и незадымленной областей изображения.

Это, в свою очередь, оказывает негативное влияние на последующие этапы обработки изображения, особенно на этапы координатной привязки изображений и обнаружения объектов разведки на изображениях.

Задача устранения линии раздела задымленной и незадымленной областей изображения решена в работах Маковейчука А.Н. [10 – 13] за счет использования методов математической морфологии второго порядка. Однако в работах Маковейчука А.Н. не решена задача обнаружения объектов на изображениях в условиях воздействия маскирующих помех.

Постановка задачи и изложение материалов исследования. Фрактальный анализ изображений в

настоящее время используется для решения задач обнаружения объектов искусственного происхождения [14 – 18].

В работе проводится теоретическое обоснование эффекта восстановления изображения и обоснование ограничения существующих алгоритмов определения фрактальной размерности. Введем основные понятия и определения.

Основной раздел

Традиционный способ расчета фрактальной (емкостной) размерности заключается в том, что исследуемый объект покрывается сеткой с размером ячейки ε и подсчитывается количество ячеек сетки $N(\varepsilon)$, покрывающих объект [19]. С уменьшением размера ε ячейки сетки, количество ячеек $N(\varepsilon)$, покрывающих объект, увеличивается. Емкостная размерность объекта определяется как [19]:

$$D = -\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln N(\varepsilon)}{\ln \varepsilon}.$$

Учитывая то, что для природного фрактала интервал самоподобия ограничен, размер ячейки покрытия для него может варьироваться в определенном диапазоне, максимальное значение которого определяется размерами изображения, а минимальное – его элементарным структурным элементом – пикселем.

Для регулярных самоподобных фракталов емкостная размерность и размерность Хаусдорфа-Безиковича совпадают, поэтому терминологически их часто не различают и говорят просто о фрактальной размерности объекта [19].

Будем называть локальной фрактальной размерностью изображения f в точке с координатами (x, y) емкостную размерность, рассчитываемую по квадратной окрестности размером $w \times w$ с началом в данной точке.

Вычисление фрактальной размерности изображений. Предлагаемый алгоритм вычисления локальной фрактальной размерности состоит в следующем:

1) рассчитываются суммы S_k пикселов по окрестностям точки (x, y) размером $w_k \times w_k$:

$$S_k = \sum_{m=0}^{w_k-1} \sum_{n=0}^{w_k-1} f(x+m, y+n),$$

при этом $w_k = 2^k$, а степень k принимает значения в диапазоне от 0 до некоторого заданного числа K ;

2) методом наименьших квадратов находим параметры D и C аппроксимирующей кривой

$$\ln S_k = D \cdot \ln w_k + C,$$

а локальная емкостная размерность в точке (x, y) определяется угловым коэффициентом D этой прямой и сохраняется в матрице d

$$d(x, y) = D.$$

Рассчитанная матрица $d(x, y)$ определяет изображение локальных фрактальных размерностей, соответствующих заданному изображению $f(x, y)$. Полученное изображение локальных фрактальных размерностей будет смещено на половину максимального размера окрестности 2^{K-1} , поскольку определяется окрестность с началом, а не с центром в точке (x, y) .

Тем не менее, данное определение удобно, так как при четном количестве точек центр окрестности определяется неоднозначно. Удобно также нормировать значения матрицы для того, чтобы привести динамический диапазон к интервалу $[0..1]$:

$$r(x, y) = \frac{d(x, y) - \min d}{\max d - \min d}.$$

Результаты исследования. Восстанавливающее свойство алгоритма. Покажем теперь, что при наличии протяженных маскирующих помех описанный выше алгоритм обладает восстанавливающим свойством, то есть помеха данного вида будет эффективно подавляться.

Рассмотрим суммы S_k . При значениях k достаточно больших имеем

$$S_k = w_k^2 \mu(x, y), \tag{1}$$

где $\mu(x, y)$ – среднее по окрестности точки (x, y) .

Данная формула практически верна для $k > 3$, однако выводы не изменятся, если принять, что (1) справедлива при всех $k > 0$, а при $k = 0$

$$S_0 = f(x, y). \tag{2}$$

Для того чтобы найти параметры аппроксимирующей прямой методом наименьших квадратов построим функционал

$$J = \frac{1}{2} \sum_k (D \cdot \ln w_k + C - \ln S_k)^2.$$

Минимальное значение J достигается при условии равенства 0 частных производных по искомым параметрам

$$\frac{\partial J}{\partial D} = 0, \quad \frac{\partial J}{\partial C} = 0,$$

что приводит к системе двух линейных уравнений относительно переменных D, C

$$\begin{cases} \sum_k (D \cdot \ln w_k + C - \ln S_k) \ln w_k = 0; \\ \sum_k (D \cdot \ln w_k + C - \ln S_k) = 0, \end{cases}$$

которую можно переписать в виде

$$\begin{cases} D \sum_k (\ln w_k)^2 + C \sum_k \ln w_k = \sum_k \ln w_k \ln S_k; \\ D \sum_k \ln w_k + C(K+1) = \sum_k \ln S_k. \end{cases}$$

Учтем теперь, что при $k = 0$ справедливо соотношение (2), а не (1). Наличие множителя $\ln w_k$ в сумме $\sum_k \ln w_k \ln S_k$ оставляет ее без изменений ($\ln w_0 = 0$), а сумма $\sum_k \ln S_k$ переписывается в виде $\sum_k \ln S_k - \ln \mu(x, y) + \ln f(x, y)$.

Таким образом, получаем, что при учете соотношения (2)

$$\begin{cases} D \sum_k (\ln w_k^2) + C \sum_k \ln w_k = \sum_k \ln w_k \ln S_k; \\ D \sum_k \ln w_k + C(K+1) = \sum_k \ln S_k + \ln \frac{f(x, y)}{\mu(x, y)}. \end{cases}$$

Пусть определена матрица

$$M = \begin{pmatrix} \sum_k (\ln w_k^2) & \sum_k \ln w_k \\ \sum_k \ln w_k & (K+1) \end{pmatrix},$$

а $A = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix} = M^{-1}$ – ее обратная матрица, то есть решение системы уравнений можно записать в виде

$$\begin{pmatrix} D \\ C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sum_k \ln w_k \ln S_k \\ \sum_k \ln S_k + \ln \frac{f(x, y)}{\mu(x, y)} \end{pmatrix}.$$

Тогда для параметра D (значение C при этом не важно):

$$D = A_{11} \sum_k \ln w_k \ln S_k + A_{12} \left(\sum_k \ln S_k + \ln \frac{f(x, y)}{\mu(x, y)} \right).$$

Значения коэффициентов A_{11}, A_{12} легко вычислить в явном виде, однако для дальнейшего это не существенно.

Если бы не было добавочного слагаемого $\ln \frac{f(x, y)}{\mu(x, y)}$, то данная система имела бы решения $D = 2$, $C = \ln \mu$ (поскольку

$$\ln S_k = \ln(w_k^2 \mu) = 2 \ln w_k + \ln \mu),$$

то есть

$$A_{11} \sum_k \ln w_k \ln S_k + A_{12} \sum_k \ln S_k = 2,$$

а значит

$$d(x, y) = 2 + A_{12} \ln \frac{f(x, y)}{\mu(x, y)}. \quad (3)$$

Таким образом, вычисление локальной фрактальной размерности изображения эквивалентно преобразованию (3). Заметим, что поскольку выше были сделаны некоторые упрощающие предположения, правильнее писать

$$d(x, y) \approx 2 + A_{12} \ln \frac{f(x, y)}{\mu(x, y)}.$$

Модель формирования изображения в этом случае задается в виде [8]

$$f(x, y) = g(x, y) \cdot s(x, y),$$

где $s(x, y)$ описывает мультипликативную помеху. Примем для простоты, что в искаженной области воздействие помехи приводит к уменьшению яркости в η раз:

$$s(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{для неискаженной области;} \\ 1/\eta & \text{для искаженной области.} \end{cases}$$

При использовании преобразования (3) в области наличия искажения множитель $1/\eta$ сокращается:

$$\begin{aligned} d(x, y) &= 2 + A_{12} \ln \frac{f(x, y)/\eta}{\mu(x, y)/\eta} = \\ &= 2 + A_{12} \ln \frac{f(x, y)}{\mu(x, y)}, \end{aligned}$$

что и объясняет восстанавливающее свойство предлагаемого алгоритма.

Среднее значение по окрестности можно определить через свертку

$$\mu(x, y) = h * f(x, y),$$

где ядро свертки $h(m, n) = \frac{1}{w^2}$, $m = 0..w-1$, $n = 0..w-1$. Поэтому преобразование (3) можно представить в виде

$$\begin{aligned} d(x, y) &= \\ &= \text{const}_1 + \text{const}_2 [\ln f(x, y) - \ln (h * f(x, y))], \end{aligned}$$

что совпадает с точностью до несущественных кон-

стант с известным преобразованием Single Scale Retinex (одномасштабная модель Retinex) [20 – 22]. Можно предположить, что расчет локальной фрактальной размерности позволит учесть все характерные масштабы и будет эквивалентен преобразованию Multiply Scale Retinex (многомасштабная модель Retinex) [23 – 25]. Данный вопрос требует дальнейших теоретических и практических исследований. На этом пути возможно получить теоретическое обоснование эффективности алгоритмов Retinex, которые введены эмпирически для имитации механизмов человеческого зрения [20 – 25].

Результаты компьютерного моделирования. Исходное изображение представлено на рис. 1.

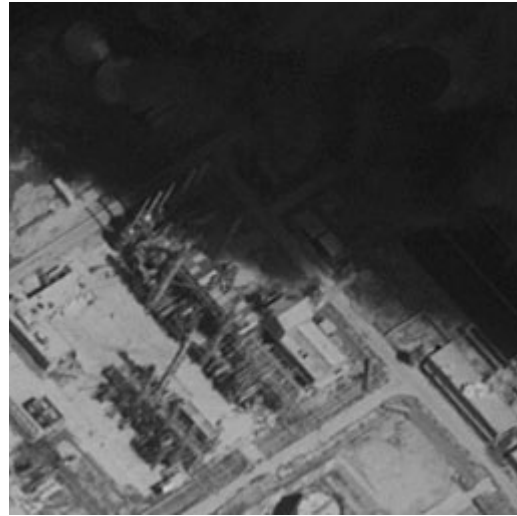


Рис. 1. Исходное изображение

Это изображение территории Ирака во время боевых действий 2003 года «Свобода Ираку», взято с сайта компании Space Imaging [26]. Данное изображение получено с помощью космической системы оптико-электронного наблюдения «Ikonos». Компьютерное моделирование проводилось в системе программирования MATLAB.

На рис. 2 представлено нормализованное изображение матрицы локальных размерностей исходного изображения, параметр $k = 4, 5, 6$. Данное изображение позволяет легко выделить искусственные объекты: нефтеперерабатывающий комплекс в центре и комплекс сооружений в правом нижнем углу.

Следует отметить, что однородные полосы на исходном изображении обнаруживают на карте локальной фрактальной размерности внутреннюю структуру, однако вопрос, не является ли это артефактом обработки остается открытым. Решение его вызывает определенный интерес и является темой дальнейших исследований.

Результат восстановления изображений на основе нормализованного изображения матрицы локальных размерностей исходного изображения, при значениях параметра $k = 0, 1, \dots, 6$ представлен на рис. 3.

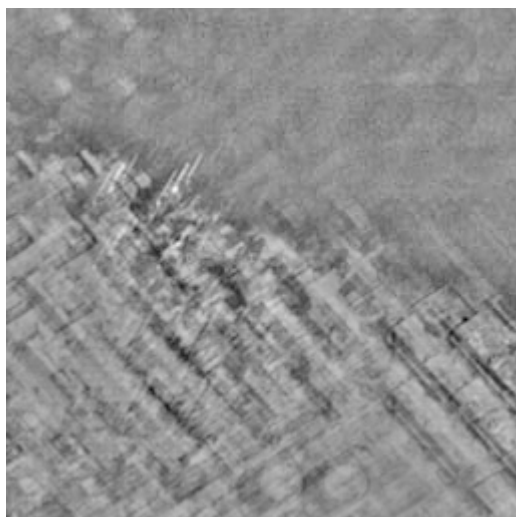


Рис. 2. Нормализованное изображение матрицы локальных размерностей, $k = 4, 5, 6$



Рис. 3. Нормализованное изображение матрицы локальных размерностей, $k = 0, 1, \dots, 6$ (эффект восстановления)

Для сравнения, на рис. 4 приводится результат восстановления по формуле (3). Данные изображения являются практически идентичными, что позволяет говорить о правомерности использования выражения (3) для аналитического расчета локальной размерности, не смотря на принятые упрощения. Тем не менее, следует отметить, что на изображении рис. 3 присутствуют мелкие детали (обведены кружком), не обнаружимые на рис. 4 (например, тени от труб нефтеперерабатывающего комплекса, падающие на проходящую рядом дорогу).

Выводы и направления дальнейших исследований

Таким образом, при наличии упрощающих предположений получено явное выражение для локальной фрактальной размерности изображения – выражение (3). Показано, что полученное преобра-

зование совпадает с известным преобразованием Retinex, которое широко используется для восстановления изображений при воздействии протяженных маскирующих помех [10 – 12].



Рис. 4. Нормализованное изображение, полученное по выражению (3)

Показано, что для получения адекватных результатов при расчете фрактальной размерности необходимо брать $k > 3$. При учете малых значений $k \leq 3$ данный алгоритм позволяет эффективно восстанавливать изображения, подверженные воздействию маскирующих помех.

В дальнейших исследованиях необходимо рассмотреть вопросы применения предложенного метода для решения задачи обнаружения объектов на цветных изображениях в условиях воздействия маскирующих помех.

Список литературы

1. Бейтс Р. Восстановление и реконструкция изображений / Р.Бейтс, М. Мак-Доннелл; пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 336 с.
2. Методы компьютерной обработки изображений / под ред. В.А. Сойфера. – 2-е изд., испр. – М.: Физматлит, 2003. – 784 с.
3. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р.Вудс. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
4. Ярославский Л.П. Цифровая обработка сигналов в оптике и голографии: Введение в цифровую оптику / Л.П. Ярославский. – М.: Радио и связь, 1987. – 296 с.
5. Оппенгейм А.В. Цифровая обработка сигналов / А.В. Оппенгейм, Р.В. Шафер; пер. с англ. / под ред. С.Я. Шаца. – М.: Связь, 1979. – 416 с.
6. Маслов А.А. Программный пакет Scanex Image Processor и его применение в лесоустройстве и мониторинге / А.А. Маслов, А.В. Сонюшкин // *Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении и лесном хозяйстве: Доклады IV Международной конференции (Москва, 17 – 19 апреля 2007 г.)*. – М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2007. – С. 64-67.
7. Кичигин А.Г. Аппаратно-программный комплекс для оперативного космического мониторинга территорий / А.Г. Кичигин // *Земля из космоса – наиболее эффек-*

тивные решения. – М.: ООО «Сити принт», 2009. – Вып. 1. – С. 49-53.

8. Гершензон В.Е. Сетевые технологии ScanNet в оперативном спутниковом мониторинге / В.Е. Гершензон, А.А. Кучейко // Земля из космоса – наиболее эффективные решения. – М.: ООО «Сити принт», 2009. – Вып. 3. – С. 14-17.

9. Лоцинин А.А. «Триатерра» – система управления данными о пространственных объектах / А.А. Лоцинин, С.И. Михайлов, Д.Г. Зегебарт // Земля из космоса – наиболее эффективные решения. – М.: ООО «Сити принт», 2009. – Вып. 3. – С. 59-63.

10. Маковейчук А.Н. Методы улучшения качества изображений по результатам натуральных экспериментов / А.Н. Маковейчук // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2004. – № 2(8). – С. 38-41.

11. Маковейчук О.М. Алгоритми реставрації дефокусованих зображень / О.М. Маковейчук, В.О. Подліпаєв // Системи озброєння і військова техніка. – Х.: ХУПС, 2005. – № 3-4. – С. 99-103.

12. Маковейчук А.Н. Теоретическое обоснование методики защиты видовых изображений от воздействия маскирующих помех / А.Н. Маковейчук, В.А. Подлипаев, Г.В. Худов // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2005. – Вып. 6. – С. 62-71.

13. Маковейчук О.М. Об'єктивна оцінка якості обробки зображень / О.М. Маковейчук // Системи озброєння і військова техніка. – Х.: ХУПС, 2008. – № 3(15). – С. 135-137.

14. Новейшие методы обработки изображений / А.А. Потапов, А.А. Пахомов, С.А. Никитин, Ю.В. Гуляев. – М.: Физматлит, 2008. – 496 с.

15. О классификации изображений по их текстурным признакам / Г.А. Андреев, А.А. Потапов, Т.В. Галкина, А.И. Колесников, Т.И. Орлова, Я.Л. Хлявич // Исследование Земли из Космоса. – 1990. – № 2. – С. 91-96.

16. Потапов А.А. Фракталы в дистанционном зондировании / А.А. Потапов // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. – 2000. – № 6. – С. 3-65.

17. Иванов В.К. Фрактальный анализ изображений лесных массивов / В.К. Иванов, Р.Э. Пащенко, А.М. Стадник, С.Е. Яцевич // Успехи современной радиоэлектроники. – 2005. – № 12. – С. 55-62.

18. Фрактальный анализ процессов, структур и сигналов. Коллективная монография / под ред. Р.Э. Пащенко. – Х.: ХООО «НЭО «ЭкоПерспектива», 2006. – 348 с.

19. Гринченко В.Т. Введение в нелинейную динамику. Хаос и фракталы / В.Т. Гринченко, В.Т. Мацыпура, А.А. Снарский. – Изд. 2. – М.: УРСС, 2007. – 263 с.

20. Jobson D.J. Retinex processing for automatic image enhancement / D.J. Jobson, Z. Rahman, G.A. Woodell // Human Vision and Electronic Imaging VII, SPIE Symposium on Electronic Imaging, Porc. SPIE 4662, (2002).

21. Rahman Z. Retinex Image Enhancement: Application to Medical Images presented at the NASA workshop on New Partnerships in Medical Diagnostic Imaging / Z. Rahman, G.A. Woodell, D.J. Jobson. – Greenbelt, Maryland, July 2001.

22. Jobson D.J. A Multi-Scale Retinex For Bridging the Gap Between Color Images and the Human Observation of Scenes / D.J. Jobson, Z. Rahman, G.A. Woodell // IEEE Transactions on Image Processing: Special Issue on Color Processing, July 1997.

23. Rahman Z.A Comparison of the Multiscale Retinex With Other Image Enhancement Techniques / Z. Rahman, G.A. Woodell, D.J. Jobson // Proceedings of the IS&T 50th Anniversary Conference, May 1997.

24. Jobson D.J. A Multi-Scale Retinex For Bridging the Gap Between Color Images and the Human Observation of Scenes // D.J. Jobson, Z. Rahman, G.A. Woodell // IEEE Transactions on Image Processing: Special Issue on Color Processing, July 1997.

25. Thompson B.A Multi-scale Retinex for Improved Performance In Multi-Spectral Image Classification // B. Thompson, Z. Rahman, S.Park // SPIE International Symposium on AeroSense, Visual Information Processing IX, April 2000.

26. Сайт американской компании Space Image. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.spaceimaging.com/gallery/default.htm>.

Поступила в редколлегию 20.10.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Д.В. Голкин, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ЛОКАЛЬНОЇ ФРАКТАЛЬНОЇ РОЗМІРНОСТІ ЗОБРАЖЕННЯ В УМОВАХ ДІЇ МАСКУЮЧИХ ПЕРЕШКОД

Д.Б. Жуйков, О.М. Маковейчук, Г.В. Худов

У роботі для вирішення завдання виявлення об'єктів в умовах дії маскуючих перешкод пропонується використовувати метод визначення локальної фрактальної розмірності зображення. Указуються умови застосування методу, а також за наявності спрощуючих припущень отриманий вираз для визначення локальної фрактальної розмірності.

Ключові слова: фрактальна розмірність, зображення, маскуюча перешкода, комп'ютерне моделювання.

METHOD OF DETERMINATION OF LOCAL FRACTAL DIMENSION OF IMAGE IN THE CONDITIONS OF INFLUENCE OF MASKING HINDRANCES

D.B. Zhuykov, A.N. Makoveychuk, G.V. Khudov

In-process for a decision task of finding out objects in the conditions of influence of masking hindrances it is suggested to utilize the method of determination of local fractal dimension of image. The terms of application of method are specified, and also at presence of simplifying suppositions expression for determination of local fractal dimension is got.

Keywords: fractal dimension, image, masking hindrance, computer design.