

УДК 621.396.96

А. В. Мезенцев¹, С. В. Миронюк², А. М. Сотников³, В. А. Таршин³

¹Институт проблем регистрации информации НАН Украины
ул. Н. Шпака, 2, 03113 Киев, Украина

²ГП «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля»
ул. Криворожская, 3, 49008 Днепропетровск, Украина

³Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба
ул. Сумская, 77/79, 61023 Харьков, Украина

Методика выделения информативных участков изображений на основе теории фрактального анализа

Предложена методика локализации информативных участков изображений поверхности визирования, основанная на использовании теории фрактального анализа. Методика используется для оперативного создания эталонных изображений корреляционно-экстремальных систем навигации (наведения).

Ключевые слова: эталонное изображение, метод, объектовая насыщенность, фрактальная размерность, анализ изображений, обработка изображений.

Введение

Эффективное применение современных беспилотных летательных аппаратов (БЛА) и управляемых средств поражения (УСП) выдвигает ряд жестких требований, связанных с обеспечением автономности управления в процессе полета, точности навигации и наведения на цель, оперативности и гибкости формирования полетных заданий. Синтез эталонных изображений (ЭИ) для обеспечения работы автономных корреляционно-экстремальных систем навигации является одним из ключевых моментов в создании систем высокоточного оружия (ВТО).

Постановка проблемы

Не смотря на достаточно большое количество работ, направленных на совершенствование корреляционно-экстремальных систем навигации (КЭСН), существует ряд нерешенных задач, связанных с необходимостью разработки универсальных быстродействующих машинных алгоритмов локализации информативных областей изображений, которые могут быть одинаково хорошо применимы для ана-

лиза изображений различного качества и фоновно-объектового состава [1], устойчивы к различного рода изменениям (искажениям) поверхности визирования (ПВ), воздействию помех и средств маскировки.

В настоящее время, судя по открытым и доступным источникам информации, недостаточно проработаны вопросы оперативного автоматизированного (автоматического) формирования ЭИ. Создание и реализация таких алгоритмов оперативного формирования ЭИ обуславливает сокращение времени от получения разведывательной информации до момента запуска ЛА, что, в свою очередь, уменьшает возможность применения средств маскировки и постановки помех, а также влияние искажений ПВ.

Анализ последних достижений и публикаций

С точки зрения обеспечения требуемой точности решения задач навигации (наведения) БЛА, целесообразно использовать для синтеза ЭИ методы корреляционного анализа (КА) [2–5], однако их использование требует значительных вычислительных ресурсов [1, 4]. Сравнительный анализ быстродействия различных модификаций корреляционных алгоритмов обработки изображений для получения решающей функции (РФ) корреляционно-экстремальных систем навигации приведен в [1, 4].

В [1, 6] показана возможность и вычислительная предпочтительность применения методов фрактального анализа (ФА) изображений и локализации информативных областей для создания ЭИ. Методы ФА [1] и позволяют получить результаты локализации информативных областей слабоконтрастных изображений, близкие к результатам КА. Трудность применения методов ФА состоит в их чувствительности к высокой объектовой (порядка 10 и более объектов) насыщенности (избыточности) исходных изображений.

В [7] предложен способ формирования ЭИ с использованием теории ФА, однако предложенный способ требует уточнения при разработке методик и алгоритмов создания ЭИ для БЛА различного назначения, а также машинной реализации. Применение методов ФА для синтеза ЭИ на участках ПВ с высокой объектовой насыщенностью предполагает устранение информативной избыточности изображений. Возможный уровень снижения информативной избыточности изображений определяется степенью ухудшения помехоустойчивости системы обработки [4]. Однако такой подход эквивалентен снижению разрешения исходного изображения (ИИ) и влияет только на вычислительную реализуемость алгоритмов корреляционной обработки и не влияет на качество локализации информативных участков изображений с большой объектовой насыщенностью методами ФА.

В [8] рассмотрено влияние различного рода изменений на функционирование КЭСН. Для снижения влияния искажений на работу КЭСН предложено использовать инвариантные алгоритмы обработки навигационной информации, однако применение инвариантных алгоритмов обработки влечет за собой потери, связанные с некогерентной обработкой информации.

Целью статьи является разработка методики оперативной локализации информативных областей ПВ в различных условиях фоновно-объектовой обстановки и создания ЭИ.

Основной материал

Постановка задачи. Для локализации информативных областей используется исходное полутоновое изображение размером $M_1 \times M_2$ пикселей, описываемое матрицей $S_f = \|f(i, j)\|$ с неотрицательными элементами $f_{\min} \leq f(i, j) \leq f_{\max}$, где $f(i, j)$ — значение яркости изображения в точке с $(i, j) \in S_f$; $i = 1, 2, \dots, M_1$ — количество строк исходного изображения; $j = 1, 2, \dots, M_2$ — количество столбцов.

Элемент изображения $f(i, j)$ описывается аддитивной смесью элементов фоновых и объектовых составляющих, т.е.

$$f(i, j) = \sum_{v=1}^V F_{O_v}(i, j) + \sum_{w=1}^W F_{\Phi_w}(i, j), \quad (1)$$

где F_{O_v} — изображение v -го объекта; F_{Φ_w} — изображение w -го фона; V — количество объектов различной яркости и формы на ИИ; W — количество фонов на ИИ. Общее количество фонов и объектов на изображении может быть произвольным. При этом

$$\left. \begin{aligned} F_{O_v}(i, j) &= 0 \quad \text{при } (i, j) \notin R_{O_v} \\ F_{\Phi_w}(i, j) &= 0 \quad \text{при } (i, j) \notin R_{\Phi_w} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $R_{O_v} \subset S_f$ — область v -го объекта; $R_{\Phi_w} \subset S_f$ — область w -го фона; $R_{O_1} \cup \dots \cup R_{O_V} \cup R_{\Phi_1} \cup \dots \cup R_{\Phi_W} = S_f$.

Необходимо синтезировать методику оперативной подготовки ЭИ по результатам локализации участков изображения с уникальным, устойчивым к изменениям (искажениям) набором характерных признаков, обеспечивающим формирование унимодальной решающей функции КЭСН. Оценка качества локализации информативных областей исходных изображений может производиться путем сравнения результатов ФА и корреляционного анализа одних и тех же изображений. По результатам ФА необходимо найти такие области ИИ, для которых по результатам корреляционного анализа изображений выполняется условие $K_{\text{нор}} \leq K(i, j) \leq 1$, где $K_{\text{нор}}$ — пороговое значение коэффициента взаимной корреляции (КВК), $K(i, j)$ — значение КВК ИИ и формируемого ЭИ размером $N_1 \times N_2$ с координатами верхнего левого угла (i, j) .

Решение. Сущность ФА раскрыта в [6]. Расчет фрактальной размерности (ФР) с использованием метода покрытия осуществляется в соответствии с выражением

$$D = [\lg C - \lg N(\varepsilon)] / \lg \varepsilon, \quad (3)$$

где C — константа; ε — шаг измерения или размер «сканирующего» окна; $N(\varepsilon)$ — минимальное количество кубов со стороной ε , для покрытия множества S_f .

Для поиска значений $\lg C$ и D выражения (3) используют метод наименьших квадратов, в соответствии с которым необходимо найти уравнения прямой

$$y = \lg C + Dx, \quad (4)$$

наилучшим образом согласующейся с точками, полученными внутри анализируемого («сканирующего») окна, т.е. по имеющемуся набору x_i и y_i необходимо определить наилучшие значения $\lg C$ и D .

Как показано в [6] $\lg C$ и D находятся из решения системы уравнений

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x}) \cdot y_i]}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (5)$$

$$\lg C = \bar{y} - D \cdot \bar{x}, \quad (6)$$

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 [6].

Локализация информативных областей изображений методом ФА предполагает выделение участков ПФР, удовлетворяющих заданному диапазону ФР $D_{\min} \leq D \leq D_{\max}$, на основе анализа гистограммы ПФР [6]. С точки зрения локализации информативных областей изображений [1, 6] интерес представляют хвосты гистограммы ПФР.

Пример фрактального анализа слабоконтрастного объекто-ненасыщенного изображения и выделения информативной области приведен в [1]. Вместе с тем показана значительная чувствительность ФА к объектовой насыщенности изображений. Пример объекто-насыщенного изображения приведен на рис. 1,а, а соответствующая ему гистограмма ПФР на рис. 1,б. Интересующая область гистограммы ПФР обозначена штриховкой.

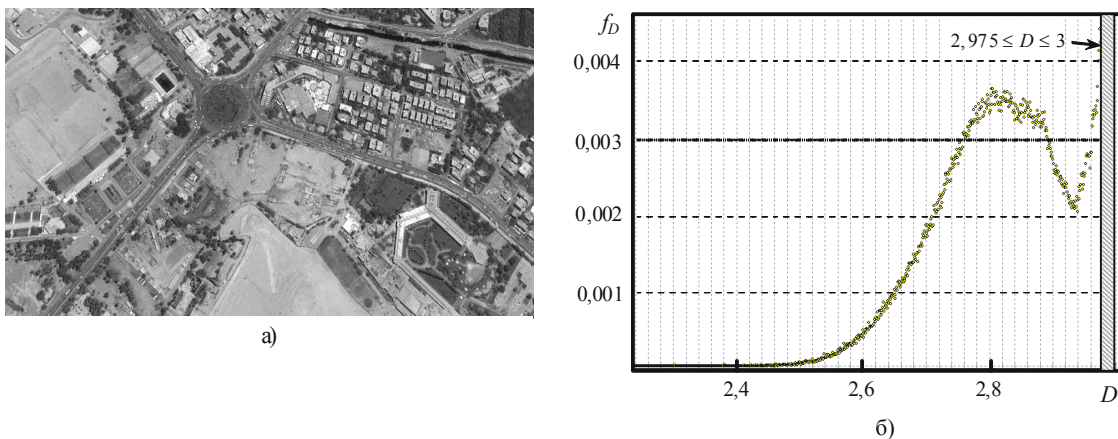


Рис. 1. а) полутоновое исходное изображение (Google Earth);
б) гистограмма ПФР изображения

Для изображений типа рис. 1 достаточно сложно выделить информативные области по гистограмме ПФР из-за чувствительности ПФР к выбору границ интервала ФР D_{\min} и D_{\max} .

Реализация преимуществ ФА при решении задач локализации объектов на снимках с высокой объектовой насыщенностью и оперативного синтеза ЭИ достигается снижением информативной (объектовой) избыточности ИИ. Для снижения информативной (объектовой) избыточности предлагается проводить предварительное окрашивание ИИ гауссовским шумом с известными (заданными) параметрами. Тогда изображение для последующего фрактального анализа формируется как аддитивная смесь исходного изображения S_f с высокой объектовой насыщенностью (рис. 1) и матрицы гауссовского шума S_I

$$S = S_f + S_I, \quad (7)$$

где $S_I = \|I(i, j)\|$ — матрица стационарного гауссовского шума размером $M_1 \times M_2$ с заданными математическим ожиданием m_I и дисперсией σ_I^2 . m_I определяется как среднее значение диапазона яркостей исходного изображения, а σ_I^2 — по форме гистограммы яркостей изображения S . Критерием выбора приемлемого значения σ_I^2 может быть появление на гистограмме яркостей изображения S выраженных пиков в областях, близких к f_{\min} и f_{\max} .

Окрашивание ИИ шумом (рис. 2,а) приводит к изменению гистограммы ПФР (рис. 1) и проявлению ее сходства с гистограммой ПКА (рис. 3). Степень сходства гистограмм определяется дисперсией использованного для окрашивания шума σ_I^2 и близостью размеров ЭИ (при корреляционной обработке) и «скользящего» окна (при ФА). Основная часть гистограммы ПФР, соответствующая объектам, близким к фоновым, смещается к середине, а практически не искаженными шумом оказываются объекты с наибольшей (наименьшей) яркостью. На рис. 2,б представлено селективное изображение, построенное для указанного на рис. 2 диапазона ФР $2,88 \leq D \leq 3$. Статистическая связь результатов выделения информативных участков изображений методами корреляционного анализа изображений [1] и методами ФА (рис. 2,б) подтверждается результатами сравнительного анализа достаточно большого количества изображений различного фоновно-объектового состава.

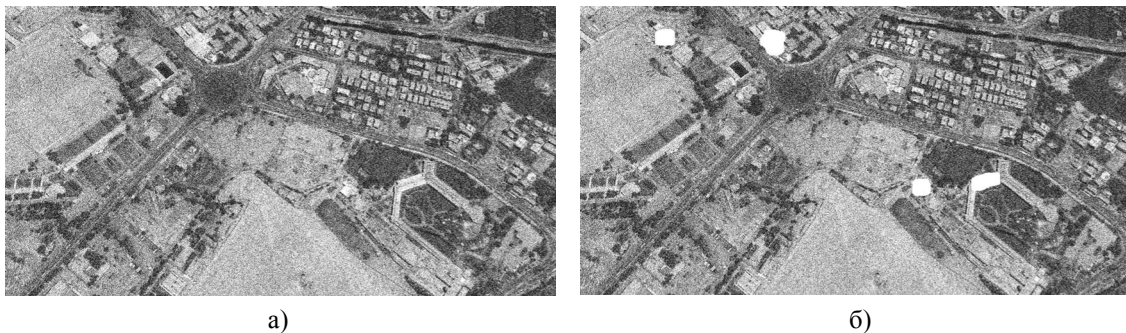


Рис. 2. Окрашенное шумом ($m_I = 127$, $\sigma_I = 0,03$) (а) и селективное ($D_{\min} = 2,88$, $D_{\max} = 3$) (б) изображения ПВ

Предварительное окрашивание шумом ИИ с высокой объектовой насыщенностью позволяет полноценно применять аппарат ФА для локализации информативных областей изображений различного объектового состава. Как показали результаты исследований, вычислительная предпочтительность предлагаемого метода синтеза ЭИ сохраняется, несмотря на необходимость выполнения процедур окрашивания изображений шумом.

Одним из необходимых условий высокоточного определения местоположения летательных аппаратов является устойчивость используемых для формирования ЭИ информативных признаков к различного рода изменениям (сезонным, суточным, погодным и др.). При подготовке ЭИ устойчивость информативных признаков (выбранных участков изображений) к различного рода изменениям (искажениям) может быть проанализирована с использованием совокупности разносезонных снимков одних и тех же участков ПВ. Показателем устойчивости локальных участков изображений к изменениям (искажениям) может служить универсальный индекс качества (УИК) [9].

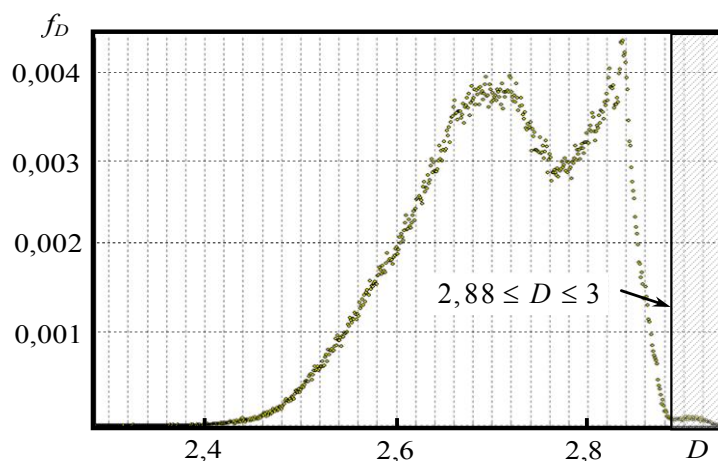


Рис. 3. Гистограмма ПФР изображения, окрашенного шумом

Универсальный индекс качества вычисляется для локальной области $L \times L$ попарно анализируемых изображений в соответствии с выражением

$$R(x_r, y_r) = H(x_r, y_r) \cdot C(x_r, y_r) \cdot S(x_r, y_r), \quad (8)$$

где x_r и y_r — локальные окрестности первого и второго анализируемых изображений, соответственно;

$$H(x_r, y_r) = \frac{2\mu_{x_r} \mu_{y_r}}{\mu_{x_r}^2 + \mu_{y_r}^2} \quad (9)$$

— функция, характеризующая искажение локальной яркости;

$\mu_{x_r} = \frac{1}{L^2} \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L x_r(i, j)$ — локальная яркость матрицы x_r размера $L \times L$ первого изображения;

$\mu_{y_r} = \frac{1}{L^2} \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L y_r(i, j)$ — локальная яркость матрицы y_r размера $L \times L$ второго изображения;

$$C(x_r, y_r) = \frac{2\sigma_{x_r} \sigma_{y_r}}{\sigma_{x_r}^2 + \sigma_{y_r}^2} \quad (10)$$

— функция, характеризующая искажение локального контраста;

$\sigma_{x_r} = \sqrt{\frac{1}{L^2 - 1} \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L (x_r(i, j) - \mu_{x_r})^2}$ — локальный контраст матрицы x_r на первом изображении;

$\sigma_{y_r} = \sqrt{\frac{1}{L^2 - 1} \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L (y_r(i, j) - \mu_{y_r})^2}$ — локальный контраст матрицы y_r на втором изображении;

$$S(x_r, y_r) = \frac{\sigma_{x_r y_r}}{\sigma_{x_r} \sigma_{y_r}} \quad (11)$$

— функция, характеризующая искажение локальной структуры;

$$\sigma_{x_r y_r} = \frac{1}{L^2 - 1} \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L z_r(i, j),$$

где $z_r(i, j)$ — матрица взаимной поэлементной корреляции матриц x_r и y_r , центрированных относительно соответствующих математических ожиданий этих матриц.

Совместное использование результатов фрактального и сравнительного анализа разносезонных, разносуточных искажений позволяет формировать ЭИ, обладающие необходимым набором информативных признаков, устойчивых к различного рода искажениям ПВ.

Методика оперативного синтеза ЭИ для высокоточных КЭСН может быть проиллюстрирована структурной схемой алгоритма, приведенной на рис. 4. Она предусматривает:

— проведение сравнительного анализа совокупности разносезонных, разносуточных и разноспектральных аэрофотоснимков для формирования ЭИ с устойчивым набором информативных признаков изображений. Для проведения анализа используются как интегральный показатель (8), так и его составляющие (9)–(11). Устойчивыми к изменениям считаются такие участки ПВ, для которых обеспечивается наибольшее значение $R(x_r, y_r)$. При решении задач создания ЭИ считается

ся, что используются аэрофотоснимки, для которых произведена привязка к местности с точностью, превышающей точность определения местоположения ЛА;

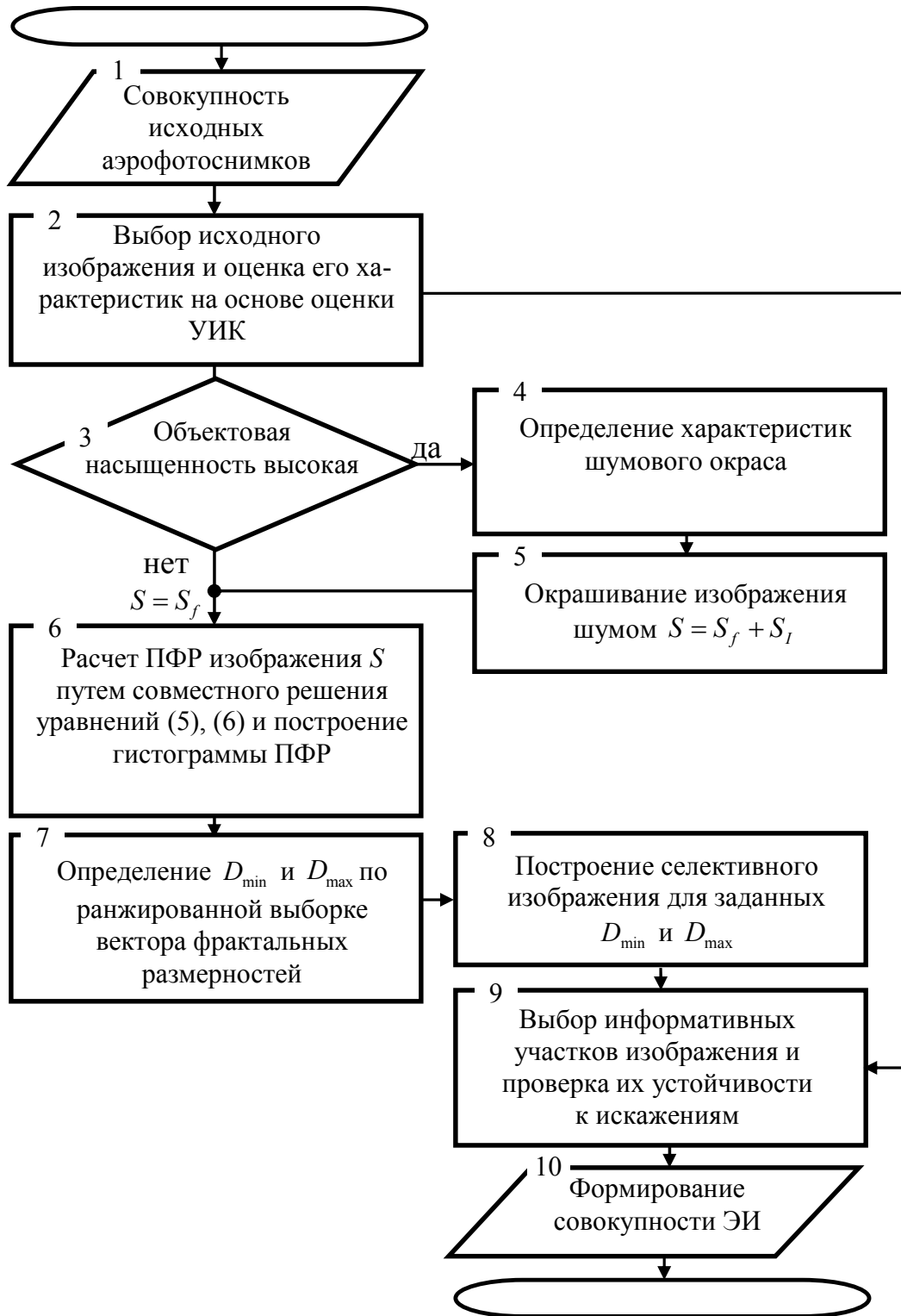


Рис. 4. Реализация методики синтеза ЭИ в виде структурной схемы алгоритма

— объектовая насыщенность анализируемых изображений может оцениваться либо по результатам анализа гистограммы ПФР изображений, либо на основе распределения показателя $S(x_r, y_r)$ на плоскости;

— в случае высокой объектовой насыщенности (>10 объектов) принимается решение о ее окрашивании гауссовским шумом. Параметры шума определяются по гистограмме яркости изображения, выбранного в качестве основного (изображения, для которого из совокупности обеспечивается наилучшее распределение значений $R(x_r, y_r)$). Для снимков с низкой объектовой насыщенностью процедура расчета ПФР осуществляется без предварительного окрашивания шумом;

— принципы выбора интервала $[D_{\min}, D_{\max}]$ для сегментации изображений и построения селективных изображений приведены в [6];

— выбор информативных участков изображения и проверка их устойчивости к искажениям подразумевает совместное использование уникальности топологической структуры изображений и влияния искажений на качество ЭИ. Кроме того, при формировании ЭИ могут накладываться дополнительные ограничения, обусловленные свойствами объектов ПВ, особенностями применения ЛА, реализованными моделями функционирования КЭСН [10], возможным применением средств маскировки и др.;

— в результате проведенных действий формируется выходная совокупность ЭИ. При наличии нескольких локальных информативных областей, попадающих в зону визирования датчика внешней информации, могут формироваться сложные ЭИ [11].

Следует отметить, что использование УИК для оценки текущих изображений на этапе получения и обработки навигационной информации позволяет оценивать степень воздействия различного рода искажений, влияние помех и применение средств маскировки объектов.

Выводы

Разработанная методика оперативной локализации информативных областей изображений и подготовки эталонов предполагает выполнение всех процедур машинным способом, что, в свою очередь, позволяет сократить интервал времени между получением исходных данных и формированием полетного задания, а также уменьшить появление искажений поверхности визирования и их влияние на результат навигации (наведения) БЛА.

Методика реализует современные подходы к анализу и сегментации изображений, формированию эталонных изображений, а также предложенный метод уменьшения информативной избыточности исходных изображений.

1. *Таршин В.А.* Обоснование применения методов фрактального анализа для оперативной подготовки эталонных изображений / В.А. Таршин, А.М. Сотников, Р.Э. Пашенко // Системы обработки информации. — 2014. — №1(117). — С. 62–66.

2. Белоглазов И.Н. Основы навигации по геофизическим полям/ И.Н. Белоглазов, Г.И. Джанджгава, Г.П. Чигрин. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1985. — 328 с.
3. Красовский А.А. Теория корреляционно-экстремальных навигационных систем / А.А. Красовский, И.Н. Белоглазов, Г.П. Чигин. — М.: Наука. — 1979. — 448 с.
4. Баклицкий В.К. Корреляционно-экстремальные методы навигации и наведения / В.К. Баклицкий. — Тверь: ТО «Книжный клуб», 2009. — 360 с.
5. *Современные* информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных летательных аппаратов; под ред. М.Н. Красильщикова, Г.Г. Серебрякова. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. — 556 с.
6. Буданов П.Ф. Фрактальный анализ процессов, структур и сигналов: коллективная монография; под ред. Р.Э. Пашенко. — Харьков: ХООО «НЭО «Экоперспектива», 2006. — 348 с.
7. Пат. 93034 Україна, МПК (2014.01) G01S 1/00/ Спосіб фрактального аналізу зображень з високою об'єктивною насиченістю для синтезу еталонних зображень кореляційно-екстремальних систем навігації літальних апаратів / Таршин В.А., Сидоренко Р.Г. Сотников О.М. Пашенко Р.Е., Лупадін В.А.; заявник та патентовласник Харківський університет Повітряних Сил. — № u 2014 04979; заявл. 12.05.2014; опубл. 10.09.2014. — Бюл. № 17.
8. Щербинин В.В. Построение инвариантных корреляционно-экстремальных систем навигации и наведения летательных аппаратов / В.В. Щербинин. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. — 230 с.
9. Wang Z. Why is image quality assessment so difficult? / Z. Wang, A.C. Bovik, L. Lu // Proc. IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech, and Signal Processing. — 2002. — Vol. 4. —P. 3313–3316
10. Сотников А.М. Обоснование принципов построения и разработка модели корреляционно-экстремальной системы наведения комбинированного типа / А.М. Сотников, В.А. Таршин // Системи управління навігації та зв'язку. — 2012. — № 4(24). — С. 7–11.
11. Таршин В.А. Принципы формирования сложных эталонных изображений для высокоточных корреляционно-экстремальных систем навигации / В.А. Таршин, А.М. Сотников // Системи обробки інформації. — 2014. — № 6(122). — С. 86–89

Поступила в редакцию 10.06.2015