

УДК 004.932.2

**В. В. Юзефович¹, О. Н. Буточнов¹,
А. В. Мезенцев¹, С. В. Миронюк²**

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

Оценка качества эталонных изображений, создаваемых для корреляционно-экстремальных систем навигации

Рассмотрен подход к решению задачи оценки качества эталонных изображений поверхности визирования, создаваемых для коррекции полета управляемых летательных аппаратов, за счет корреляционно-экстремальных систем навигации. Данную задачу предложено решать на основе анализа характеристик критериальной функции сравнения текущих и эталонных изображений, с учетом их возможных искажений.

Ключевые слова: эталонное изображение, текущее изображение, оценка качества, взаимокорреляционная функция, разностная функция.

Введение

Для решения задачи коррекции траектории полета управляемых летательных аппаратов (УЛА), использующих корреляционно-экстремальные системы навигации (КЭСН), необходимо формирование эталонных изображений (ЭИ) поверхности визирования по траектории полета. Сравнение ЭИ с получаемыми с помощью бортовых датчиков информации (БДИ) текущими изображениями (ТИ) позволяет выработать корректирующий сигнал, компенсирующий накопленную ошибку автономной системы навигации. Как правило, ЭИ формируются заблаговременно на основе материалов предварительной съемки в диапазонах волн и с разрешением, близким к возможностям БДИ УЛА.

Результат сравнения ЭИ с ТИ в процессе полета УЛА существенно зависит от того, насколько качественно решена задача синтеза ЭИ в результате обработки исходных материалов (ИМ) — снимков поверхности. В связи с этим, возникает задача предварительной («наземной») оценки качества синтезируемых ЭИ.

Поскольку процесс получения ЭИ является многоэтапным, итерационным и многоальтернативным, оценку качества желательно осуществлять после каждого

преобразования ИМ как для определения целесообразности того или иного преобразования и оценки его результатов, так и для выбора направлений дальнейших преобразований. Кроме того, результаты оценки качества получаемых ЭИ могут быть использованы при обосновании требований к ИМ или для выбора лучшего в некотором смысле ЭИ из возможных. В связи с этим, целесообразной является разработка программного комплекса для многократной оценки качества ЭИ (ПК ОКЭИ).

Учитывая важность задачи оценки качества ЭИ для принятия решения о применимости того или иного эталона, ПК ОКЭИ может рассматриваться и как неотъемлемая часть программного комплекса, решающего задачу формирования ЭИ.

Таким образом, на ПК ОКЭИ могут возлагаться следующие основные задачи:

- оценка качества синтезируемого ЭИ;
- сравнение альтернативных ЭИ;
- оценка качества поэтапных преобразований ИМ для снижения сложности и повышения обоснованности процесса синтеза ЭИ;
- формирование обоснованных требований к ИМ для формирования ЭИ.

Подход к оценке качества ЭИ

В соответствии с системным подходом, в нашем случае, под системой будем понимать программную компоненту формирования ЭИ, а в качестве ее элементов — программные компоненты, реализующие процедуры обработки изображений от получения ИМ до окончательного формирования ЭИ. Одновременно, рассматриваемая система является элементом (подсистемой) системы более высокого порядка (надсистемы). Для компоненты формирования ЭИ такой надсистемой является компонента, реализующая процедуру расчета критериальной функции сравнения ЭИ и ТИ.

Согласно теории сложных систем, любая система должна оцениваться показателями самой системы, однако эти показатели должны выбираться, исходя из «требований» надсистемы [1]. Как правило, таких показателей несколько. В нашем случае, учитывая многоэтапность решения задачи получения ЭИ, помимо выходных показателей системы желательно также иметь набор внутренних показателей качества, характеризующих каждое преобразование. Однако в доступной литературе частные показатели не предложены. В [2] сформулирован ряд требований к ЭИ, при этом «измеряемых» показателей качества ЭИ также не приведено. Вместе с тем, важно иметь хотя бы обобщенный количественный критерий, позволяющий оценить степень достижения главной цели.

Целью формирования ЭИ является получение (посредством ряда преобразований имеющихся ИМ) изображения, в определенном смысле «похожего» на ТИ, получаемое БДИ УЛА в процессе полета. Чем выше это сходство, тем лучше ЭИ. Для оценки такого сходства на борту УЛА используются различные критериальные функции, позволяющие оценивать степень вероятностной связи ЭИ и ТИ. Многие из таких критериальных функций (КФ) нашли свое применение в квази-оптимальных корреляционных алгоритмах и условно поделены на пять групп: корреляционные, разностные, спектральные, парные и ранговые [2]. Такое множество критериальных функций свидетельствует о том, что ни одна из них не яв-

ляется «лучшей». Предпочтение тому или иному виду КФ сравнения в основном формируется на основе анализа результатов оценки требуемых вычислительных затрат, ее «устойчивости» к предполагаемым (априорно неустранимым) искажениям ТИ (например, различным шумам на ТИ, наличию дополнительных (динамических) объектов на них, несовпадением ракурса и масштаба и т.п.), а также сложности «рельефа» получаемой КФ, который во многом определяет вычислительные затраты на поиск глобального экстремума). Вместе с тем, способ применения ЭИ на борту УЛА указывает на возможность оценки качества таких изображений на основе предварительного расчета КФ сравнения ЭИ с ТИ и анализа ее характеристик в процессе формирования ЭИ.

Учитывая отсутствие, в нашем случае, требований реального времени расчета КФ и каких-либо «серьезных» ограничений на вычислительные ресурсы, а также тот факт, что многие КФ связаны аналитически (могут быть пересчитаны друг в друга, а иногда и совпадают с точностью до констант), для предварительной оценки качества ЭИ может использоваться любая из известных критериальных функций. В качестве примера на рис. 1 показан результат расчета распространенных взаимокорреляционной (рис. 1,а) и одной из разностных — средний модуль разности (рис. 1,б), КФ сравнения изображений для одних и тех же исходных данных (для сопоставления разностная КФ была инвертирована). Несмотря на различия в абсолютных значениях функций, на качественном уровне изображения выглядят схожими.

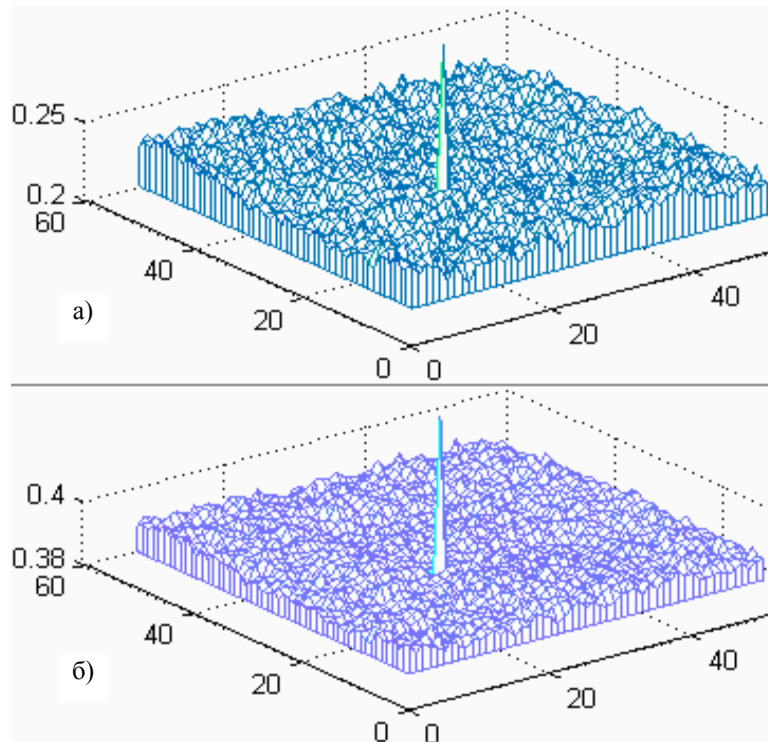


Рис. 1. Критериальные функции сравнения изображений:
а) взаимокорреляционная; б) разностная

Наиболее часто оценка степени схожести (взаимозависимости) изображений основывается на расчете взаимокорреляционной функции ЭИ и ТИ [2]. Нормированная двумерная дискретная взаимокорреляционная функция рассчитывается в соответствии с выражением [2, 3]

$$K_{BK\Phi}(m, n) = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [S_{ЭИ}(i, j) S_{ТИ}(i - m, j - n)]}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N S_{ЭИ}^2(i, j) \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N S_{ТИ}^2(i - m, j - n)}}, \quad (1)$$

где m, n — смещение (сдвиг) ТИ относительно ЭИ по плоскостным координатам в пикселях; M, N — размеры ЭИ и ТИ в пикселях (для совпадения размеров изображений ТИ (в нашем случае) дополняется нулями до размеров ЭИ); $S_{ЭИ}(i, j)$, $S_{ТИ}(i, j)$ — яркость эталонного и текущего изображений в точке изображений с координатами (i, j) (при использовании серого клина — интенсивность серого).

Для получения изображения КФ сравнения ЭИ и ТИ на основе расчета среднего модуля разности, показанного на рис. 1,б, использовалось выражение:

$$K_{CMP}(m, n) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |S_{ЭИ}(i, j) - S_{ТИ}(i - m, j - n)|}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N S_{ЭИ}^2(i, j) \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N S_{ТИ}^2(i - m, j - n)}}. \quad (2)$$

Применение для проверки соответствия ЭИ предъявляемым требованиям критериальной функции сравнения ЭИ и ТИ обладает следующими преимуществами:

- достаточностью (единственностью) проверки;
- чувствительностью к параметрам ЭИ;
- соответствием целевой задаче разработки ЭИ.

Использование для этих целей взаимокорреляционной функции обладает дополнительным достоинством, заключающимся в ее четком физическом смысле.

Недостатками такого подхода являются:

- необходимость получения (формирования) ТИ;
- зависимость результатов оценки от качества используемого ТИ, его обработки;
- влияние на результат оценки ЭИ качества решения задачи расчета критериальной функции сравнения.

Кроме того, расчет взаимокорреляционной функции характеризуется большими вычислительными затратами (по сравнению с рядом других известных критериальных функций сравнения).

Что касается необходимости получения ТИ, то ИМ для формирования ЭИ по сути являются некоторым множеством «текущих» изображений области визиро-

вания и могут использоваться для проведения эксперимента по оценке качества ЭИ. Обработка такого ТИ должна быть полностью тождественна той обработке, которую предполагается осуществлять на борту УЛА (кроме процедуры приведения параметров изображения в соответствие параметрам и возможностям БДИ). В свою очередь, расчет КФ сравнения является строгой и однозначной математической процедурой, что исключает (при условии ее правильной программной реализации) искажающее влияние ее расчета на результаты модельного эксперимента. И, наконец, вычислительные затраты, как уже указывалось, не являются решающим фактором, поскольку задача проверки соответствия ЭИ требованиям осуществляется не на борту УЛА.

Таким образом, в основу подхода к оценке качества ЭИ на этапе их подготовки положена процедура, основанная на расчете и анализе критериальной функции сравнения (поиска схожести) изображений. В качестве такой критериальной функции предлагается использовать взаимокорреляционную или разностную (среднего модуля разности) функцию ЭИ и ТИ. Отметим, что в общем случае, таких критериальных функций может быть реализовано несколько.

Для расчета КФ сравнения используются матрицы ЭИ и ТИ ($M_{ЭИ}$ и $M_{ТИ}$), размеры которых равны размерам изображений в пикселях ($M \times N$ и $K \times L$), а значения элементов матриц соответствуют уровню яркости изображений в каждой точке — S_{ij} .

Матрица ТИ смещается на (m, n) элементов относительно полученной матрицы ЭИ, где $m = [0 \dots M - K + 1]$, $n = [0 \dots N - L + 1]$, а общее количество смещений: $(M - K + 1) \times (N - L + 1)$. (В данном случае принято, что ЭИ больше ТИ, для обратного случая осуществляется смещение ЭИ относительно ТИ). Пример расчета взаимокорреляционной функции показан на рис. 2. Расчет реализован для размеров ЭИ 300×300 точек, ТИ — 50×50 точек. Координаты максимума взаимокорреляционной функции соответствуют координатам положения ТИ на ЭИ.

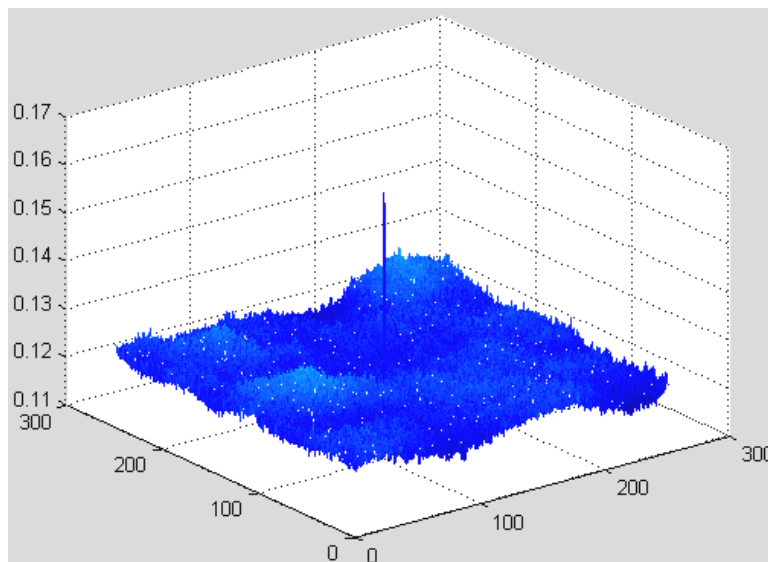


Рис. 2. Пример расчета взаимокорреляционной функции (среда расчета — MatLab)

Как указывалось выше, расчет КФ предполагает использование «готового» ТИ, получение которого предполагает ряд преобразований отобранного для этой задачи ИМ.

Первым этапом преобразований является обработка изображения, аналогичная той, которую ТИ будет претерпевать на борту УЛА. Эти преобразования напрямую связаны с алгоритмами обработки изображений, используемыми при подготовке ЭИ. Такие преобразования могут быть условно названы детерминированными, и конкретные способы их реализации в нашем случае являются исходными данными.

Второй этап преобразований обусловлен необходимостью учета возможного влияния различных искажающих факторов на ТИ, которые нельзя заранее учесть (полностью компенсировать) при формировании ЭИ, поскольку они являются случайными. По характеру влияния на изображение эти искажения ТИ делят на геометрические и яркостные.

К случайным факторам, вносящим геометрические искажения, относятся: ошибка оценки ракурса визирования объекта наведения (ориентиров на местности), ошибка оценки масштаба изображения, а также ошибки, являющиеся следствием наличия некомпенсируемой ошибки позиционирования УЛА в пространстве. На рис. 3 показаны возможные виды геометрических искажений ТИ и указаны основные причины их возникновения. Методы преобразования ТИ для моделирования геометрических искажений полностью аналогичны методам, используемым при формировании ЭИ для приведения изображений к единому масштабу, повороту и т.п. Поэтому указанные преобразования ТИ в данной статье не рассматриваются.

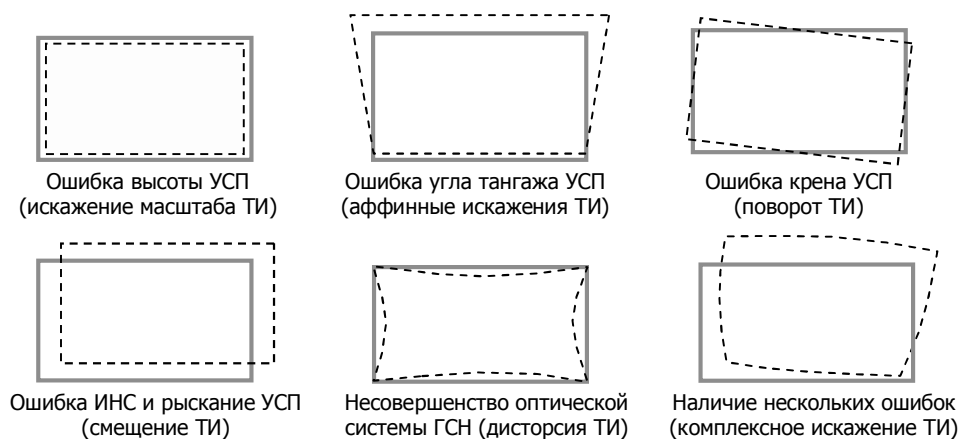


Рис. 3. Основные виды геометрических искажений ТИ

Случайные яркостные искажения интенсивности изображений возникают ввиду влияния метеорологических или сезонных условий, шумов в каналах обработки изображений, влияния помех и т.д.

Считается, что основным источником шума на цифровом изображении является сам процесс его получения [3]. Наиболее часто рассматриваются следующие типы шумов.

Аддитивный шум. Описывается соотношением

$$G(i, j) = S(i, j) + \eta(i, j), \quad (3)$$

где $S(i, j)$ — яркость исходного изображения; $G(i, j)$ — яркость зашумленного изображения; $\eta(i, j)$ — аддитивный и не зависящий от сигнала шум с гауссовым (или другим) распределением функции плотности вероятности.

Мультипликативный шум. Описывается соотношением

$$G(i, j) = S(i, j) \cdot \eta(i, j). \quad (4)$$

Импульсный шум. Описывается соотношением

$$G(i, j) = (1 - p) \cdot S(i, j) + p \cdot I(i, j), \quad (5)$$

где $I(i, j)$ — интенсивность (яркость) импульсного шума; p — параметр, принимающий значения 0, или 1 в соответствии с заданной вероятностью возникновения импульсного шума.

Шум квантования. Является шумом, зависящим от характера изображения и выбранного шага квантования. Такой шум может приводить к появлению нежелательных артефактов на изображении (например, ложных контуров вокруг объектов) или устранять низкоконтрастные детали на изображении.

Спекл-шум. Класс шумов, зависящих от самого сигнала изображения.

На данном этапе рассмотрим модели аддитивных шумов — гауссовского и спекл-шума, поскольку гауссовский аддитивный шум считается характерным для телевизионного (видимого оптического) и тепловизионного (инфракрасного) изображений, а спекл-шум наиболее характерен для радиолокационных изображений. БДИ УЛА данных типов являются наиболее распространенными [2]. Целесообразность моделирования других видов шума будет определена по результатам дальнейших исследований.

Плотность распределения гауссовского шума определяется выражением (см. формулу (3))

$$f[\eta(i, j)] = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma[\eta(i, j)]^2}} e^{-\frac{(\eta(i, j) - m[\eta(i, j)])^2}{2\sigma[\eta(i, j)]^2}}, \quad (6)$$

где $m[\eta(i, j)]$ — математическое ожидание случайной величины; $\sigma[\eta(i, j)]^2$ — дисперсия шума.

Для моделирования спекл-шума используется распределение χ^2 (распределение Пирсона) [4]. Случайная величина ξ , распределенная по данному закону, определяется как

$$\xi = \sum_{i=1}^k \eta_i^2, \quad (7)$$

где k — число степеней свободы распределения Пирсона; η_i^2 — независимые случайные величины, распределенные по нормальному закону с математическим ожиданием равным нулю и единичной дисперсией.

Для радиолокационных изображений считается характерным спекл-шум, мгновенные значения которого распределены по закону χ^2 со значениями $k = 2$, или $k = 3$ [4].

Плотность распределения случайной величины, распределенной по закону Пирсона, определяется выражением

$$f_{\chi^2(k)}[\xi] = \frac{(1/2)^{k/2}}{\Gamma\left(\frac{k}{2}\right)} \xi^{\frac{k}{2}-1} e^{-\frac{\xi}{2}}, \quad (8)$$

где $\Gamma(\cdot)$ — гамма-функция.

Уровень задаваемого шумового воздействия на ТИ (интенсивность зашумления снимка) задается относительной величиной — отношением сигнал/шум (q), которое определяется отношением мощности полезного сигнала к мощности шума. Применительно к изображениям q^2 может определяться как отношение квадрата диапазона изменения яркости ТИ к дисперсии задаваемого шума:

$$q^2 = \frac{(\max[S(i, j)] - \min[S(i, j)])^2}{\sigma[\eta(i, j)]^2}, \text{ или } q = \frac{\max[S(i, j)] - \min[S(i, j)]}{\sigma[\eta(i, j)]}. \quad (9)$$

С учетом вышеизложенного, структурная схема процедуры оценки качества ЭИ будет иметь вид, показанный на рис. 4. Процедура оценки качества ЭИ предусматривает циклическое изменение случайных и детерминированных факторов, вносящих геометрические и яркостные искажения в ТИ для проверки диапазона применимости предлагаемого ЭИ, что также (наряду с рассчитываемыми параметрами КФ) является важной характеристикой для сравнения альтернативных ЭИ.

Естественно, что на начальном этапе оценивания проверка качества ЭИ должна осуществляться в условиях отсутствия искажающих факторов для того, чтобы исключить из рассмотрения заведомо «плохие» ЭИ. Данная схема оценки может быть также применена на этапе создания ЭИ, поскольку каждое преобразование ИМ должно приводить к повышению (не уменьшению) степени схожести получаемого изображения с ТИ. Поэтому оценку качества ЭИ по виду КФ сравнения можно считать достаточной как для оценивания различных этапов формирования ЭИ, так и для комплексной оценки получаемых ЭИ.

Для предварительной (грубой) оценки качества ЭИ может использоваться визуальный анализ графического изображения КФ. Аналитический анализ характеристик КФ предполагает помимо определения ее экстремума (в нашем случае

глобального максимума) расчет относительного уровня и числа боковых лепестков (локальных экстремумов) КФ, ширины глобального экстремума, а также возможного смещения координат экстремума относительно истинного положения ТИ на ЭИ — $\Delta m = m - m^*$, $\Delta n = n - n^*$, где (m, n) — истинные координаты смещения ТИ относительно ЭИ, (m^*, n^*) — координаты глобального экстремума КФ.

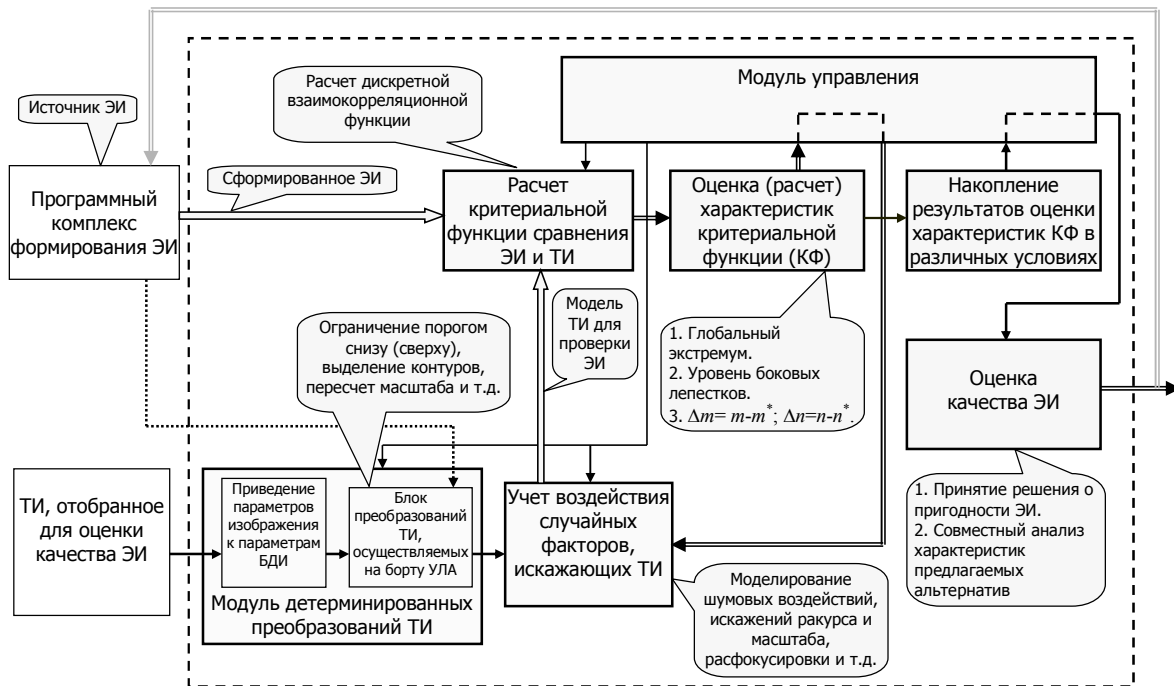


Рис. 4. Общая структурная схема решения задачи оценки качества ЭИ

Отметим, что задача определения глобального экстремума КФ не является тривиальной [2, 4], однако, учитывая возможность визуального анализа КФ, в ходе оценки качества ЭИ эта задача может быть значительно упрощена. Отметим также, что показатель числа боковых лепестков (локальных экстремумов) КФ важен только лишь с точки зрения реализованной в КЭСН процедуры поиска ее глобального экстремума.

Поскольку ЭИ проверяется (оценивается) в различных условиях, процедура оценки качества ЭИ должна предусматривать накопление рассчитываемых характеристик КФ с последующим принятием решения о качестве ЭИ на основе их совместного анализа.

Предложенная структурная схема оценки качества ЭИ может быть положена в основу соответствующего программного комплекса (ПК ОКЭИ).

Выводы

Предложен подход к оценке качества ЭИ для КЭСН, используемых УЛА для корректировки траектории движения, основанный на получении и анализе крите-

риальной функции сравнения ЭИ и ТИ — двумерной дискретной взаимокорреляционной функции ЭИ и ТИ, или двумерной функции среднего модуля разности.

Для проверки диапазона условий применимости ЭИ предлагается моделировать воздействие на изображение детерминированных и случайных факторов. Детерминированные преобразования аналогичны преобразованиям, используемым при формировании ЭИ.

В качестве моделей шумовых воздействий, искажающих ТИ, предлагается реализовать аддитивный гауссовский шум и спекл-шум. Интенсивность (степень) зашумления ТИ задается отношением сигнал-шум. Возможность и целесообразность расширения перечня моделируемых шумовых воздействий будут определены в ходе дальнейших исследований.

В результате предложена структурная схема решения задачи оценки качества ЭИ, которая может быть положена в основу соответствующего программного комплекса. Программный комплекс оценки качества ЭИ может являться неотъемлемой частью программного комплекса формирования ЭИ.

1. *Конторов Д.С.* Введение в радиолокационную системотехнику / Д.С. Конторов, Ю.С. Голубев-Новожилов. — М.: Советское радио, 1971. — 367 с.

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

3. *Полякова М.В.* Мультифрактальный метод автоматизированного распознавания помех на изображении / М.В. Полякова, В.Н. Крылов // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. Межвузовский журнал. — Херсон, 2006. — № 1 (17). — С. 60–69.

4. *Елесина С.И.* Алгоритмы совмещения радиолокационных изображений в корреляционно-экстремальных системах реального времени: дис...канд. техн. наук / С.И. Елесина. — Рязань, 2011. — 184 с.

Поступила в редакцию 09.10.2014