

УДК 621.396.96

В.А. Таршин, А.М. Сотников, Р.Г. Сидоренко

Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков

## ПОДГОТОВКА ЭТАЛОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ КОРРЕЛЯЦИОННО-ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СИСТЕМ НАВИГАЦИИ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРЯМОГО КОРРЕЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА

На основе прямого корреляционного анализа, основ построения и функционирования корреляционно-экстремальных систем навигации и современных подходов к получению эталонной информации предлагаются новые принципы формирования эталонных изображений и оценки информативности исходных изображений, позволяющие определять информативные области исходных изображений для обеспечения высокой точности определения местоположения летательных аппаратов.

**Ключевые слова:** корреляционно-экстремальная система навигации, эталонное изображение, исходное изображение.

### Введение

Общепринятыми этапами планирования боевых операций и применения средств вооружения и военной техники (ВВТ) являются заблаговременная и непосредственная подготовка. С точки зрения планирования и применения летательных аппаратов (ЛА) с корреляционно-экстремальными системами навигации (КЭСН), основное время при выполнении подготовительных работ предусматривает формирование полетного задания и подготовку эталонного изображения (ЭИ). В зависимости от времени, выделяемого на подготовку ЭИ, могут различаться методы оценки информативности исходного изображения (ИИ), применяемые для формирования ЭИ. При отсутствии ограничений на время анализа ИИ и подготовку ЭИ может использоваться классический корреляционный алгоритм либо его модификации [1].

**Постановка проблемы.** Одним из путей обеспечения унимодальности решающей функции при решении задачи наведения (самонаведения) ЛА является выбор информативных участков поверхности визирования (ПВ), которые являются основой формируемых ЭИ. Рассматриваемая в статье проблема решается при условии отсутствия различного рода искажений изображений на временном интервале от получения исходной информации и до применения КЭСН. Фоновно-объектовый состав ПВ классифицируется в пределах предполагаемого множества в соответствии с систематизированными признаками объектовой насыщенности.

**Анализ последних достижений и публикаций.** В работе [1, 2] обоснована рациональность использования для выделения информативных областей изображений взаимной корреляционной функции (ВКФ).

Предлагаемые в работе [3] методы оценки информативности изображений предполагают получение на промежуточных этапах ВКФ.

Однако в указанных работах количественные оценки и практические рекомендации по выбору информативных областей изображений отсутствуют.

**Целью статьи** является разработка метода заблаговременной подготовки ЭИ с оценкой информативности ИИ, позволяющего определять информативные области ИИ.

### Основной материал

Оценка информативности ИИ с использованием метода корреляционного анализа (КА) осуществляется путем определения соответствия (корреляции) между собственно ИИ и отдельным его элементом ЭИ заданных размеров. Формируемое в процессе оценки информативности ЭИ фактически представляет собой скользящее окно, перемещаемое в пределах ИИ на заданное количество пикселей.

В соответствии с используемым для оценки обобщенного показателя качества (ОПК) рассматривается три варианта оценки информативности ИИ.

Первый вариант предусматривает использование яркости элементов ИИ  $f(i, j)$  в качестве информативного параметра яркости. Значения ВКФ в точках  $k$  и  $l$  определяются в соответствии с выражением [2, 4]

$$K_{kl} = \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} f(i, j) \cdot f(i + k - 1, j + l - 1), \quad (1)$$

где  $f(i, j) \in S_{ИИ}$  и  $f(i + k - 1, j + l - 1) \in S_{ИИ}$  имеют одинаковые размеры  $(N_1 \times N_2)$  и отличающиеся на  $k$  и  $l$  положением на  $S_{ИИ}$ .

Для каждой полученной матрицы ВКФ  $\mathbf{K} = \|K_{kl}\|$  определяется обеспечиваемое максимальное значение

$$R_{rs} = \max_{kl} \|K_{kl}\|, \quad (2)$$

где  $\mathbf{R} = \|R_{rs}\|$ ,  $r = 1 \dots M_1 - N_1$ ,  $s = 1 \dots M_2 - N_2$ .

Полученную матрицу  $\mathbf{R} = \|\mathbf{R}_{rs}\|$  размером  $(M_1 - N_1) \times (M_2 - N_2)$  элементов, характеризующую распределение максимального значения ВКФ (2) в плоскости анализируемого изображения будем называть полем корреляционного анализа (ПКА). При условии, что в процессе оценки информативности размеры ИИ и скользящего окна не изменяются, максимальное значение ВКФ, используемое в качестве элемента ПКА однозначно характеризует остроту пика ВКФ в области максимума. Формируемое на основе оценки яркости по выражению (1) ПКА будем называть полем корреляционного анализа по яркости (ПКАЯ). При выделении информативных участков ИИ с использованием различных ИП, проведения их сравнения и общности представления информации удобно использовать нормированные ПКА

$$\mathbf{R}_{\text{ПКА}} = \mathbf{R} / R_{\text{max}} \quad (3)$$

В этом случае формируемое ПКАЯ будем условно обозначать как  $\mathbf{R}_{\text{ПКАЯ}}$ .

При втором варианте оценки информативности ИИ в качестве ИП используется контраст изображения, в этом случае выражение ВКФ записывается как

$$K_{kl} = \frac{\sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} [f(i, j) - \bar{f}][f(i + k - 1, j + 1 - 1) - \bar{f}_{kl}]}{N_1 N_2} \quad (4)$$

$$\bar{f} = \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} f(i, j), \quad (5)$$

$$\bar{f}_{kl} = \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} f(i + k - 1, j + 1 - 1). \quad (6)$$

В настоящее время существует достаточно большое количество вариантов определения контраста изображений [5], однако принципиально предпочтительным является именно такой подход, который реализуется в системах обработки текучих изображений (ТИ) и формирования решающей функции (РФ) КЭСН. В результате оценки информативности ИИ в соответствии с выражениями (4) – (6) и (2) формируется поле корреляционного анализа ИИ по контрасту (ПКАК), для которого примем условное обозначение  $\mathbf{R}_{\text{ПКАК}}$ . Получаемые в процессе анализа информативности изображений ПКАЯ и ПКАК позволяют ввести третий вариант оценки, описываемый обобщенным показателем качества в соответствии с выражением

$$\mathbf{R}_{\text{ПКА}} = \|\mathbf{R}_{\text{ПКА}}\| = \|\mathbf{R}_{\text{ПКАЯ}} \cdot \mathbf{R}_{\text{ПКАК}}\|, \quad (7)$$

где каждый элемент ПКА представляет собой результат поэлементного перемножения ПКАЯ и ПКАК в точке с координатами  $r$  и  $s$ :

$$R_{\text{ПКА}}\,rs = R_{\text{ПКАЯ}}\,rs \cdot R_{\text{ПКАК}}\,rs, \quad (8)$$

где  $r = 1 \dots M_1 - N_1$ ,  $s = 1 \dots M_2 - N_2$ .

Поскольку любой используемый для решения задач наведения (самонаведения) участок ПВ обладает уникальными свойствами и фоновым объектовым со-

ставом, то наиболее приемлемый вариант проверки эффективности предложенного метода прямой оценки информативности изображений предусматривает математическое моделирование, для которого используемые ИИ должны быть предварительно отнесены к одному из подмножеств описания фоновых объектов обстановки ПВ. Для оценки информативности ИИ и наглядного представления результатов математического моделирования ограничимся случаем анализа оптических полутонковых изображений, поскольку оптические ИИ позволяют использовать как скалярные, так и векторные ИП, а также исследовать влияние искажающих факторов различной физической природы на результат оценки информативности. Для моделирования ИИ в соответствии с условиями наблюдения ПВ выбраны три типа ИИ, которые различаются по объектовой насыщенности (рис. 1 – 3). Приведенные изображения отличаются по фоновому объектовому составу, так рис. 1 размером  $1085 \times 543$  пикселей относится к категории ИИ со слабой объектовой насыщенностью, рис. 2 размером  $251 \times 454$  пикселей имеет нормальную объектовую насыщенность и рис. 3 размером  $1003 \times 524$  пикселей имеет участки как с избыточной, так и недостаточной объектовой насыщенностью.

Оценку информативности ИИ проведем в соответствии с обоснованным выше подходом с использованием трех вариантов: ПКА яркости ( $\mathbf{R}_{\text{ПКАЯ}}$ ), контраста ( $\mathbf{R}_{\text{ПКАК}}$ ) и ОПК ( $\mathbf{R}_{\text{ПКА}}$ ).

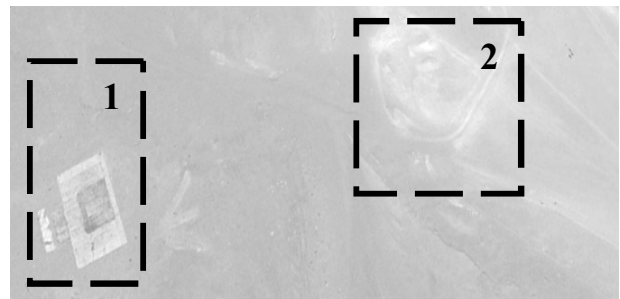


Рис. 1. Изображение участка пустыни поблизости Каира (Google Earth)



Рис. 2. Изображение нефтебазы (Google Earth)



Рис. 3. Изображение ПВ поблизости Каира (Google Earth)

При оценке информативности изображений и построении ПКА одним из основных факторов, влияющих на эффективность применения классического корреляционного алгоритма (ККА) является выбор размеров скользящего окна, причем, рассмотренные в работе [1] подходы к определению оптимальных размеров изображений не могут быть использованы, поскольку при оценке информативности ИИ и формировании ЭИ геометрические искажения отсутствуют. Определяющими при выборе размеров скользящего окна при оценке информативности ИИ являются:

- размеры объектов, которые потенциально могут быть использованы для привязки;
- локальные искажения ИИ, связанные с изменением условий наблюдения объектов на ПВ;
- вычислительные затраты методов оценки информативности ИИ;
- отсутствие аномальных выбросов РФ;
- величина интервала взаимной корреляции сравниваемых элементов изображений.

Минимальный размер скользящего окна  $N_{\min}$  выбирается таким, чтобы исключить появление ложных выбросов РФ, обусловленных влиянием нестационарных (мобильных) объектов на ПВ (легковые, грузовые автомобили), объектов частной застройки (дачные поселки, частные дома и прочее), имеющих периодическую структуру, а также искажений ПВ, обусловленных изменениями условий наблюдения объектов ПВ (изменение положения, формы и размеров теней отбрасываемых объектами). Как показали результаты исследования влияния искажений на процесс формирования РФ, точность и вероятность правильной привязки минимальный размер скользящего окна исходя из неравенства

$$(2 \dots 2.5)N_{Об} \leq N_{\min}, \quad (9)$$

где  $N_{Об}$  – максимальный линейный размер объектов в пикселях, приводящих к возможному появлению ложных выбросов РФ. Поскольку ориентиро-

вочный размер объектов, относящихся к указанной выше категории составляет порядка 10 - 15 м., а разрешение изображений (рис. 1 – 3) 1 - 1.5 м., то, исходя из этого, для выбранных изображений  $N_{\min}$  составляет порядка 15 - 20 пикселей.

Ограничение размеров скользящего окна сверху  $N_{\max}$  обусловлено пропорциональными размеру окна вычислительными затратами, что может быть определяющим при необходимости решения задачи оперативной подготовки ЭИ, а также сглаживанием перепадов яркости (контраста) в процессе анализа ИИ. Таким образом, для удовлетворения сформулированных выше условий качественной оценки информативности изображений ПВ, а также минимизации вычислительных затрат и эффектов размытия ПКА при проведении математического моделирования, размер скользящего окна выбирался из условия (9) путем округления до ближайшего большего удобного значения. Кроме того, для исключения влияния размеров самого скользящего окна на формируемое ПКА при одинаковом разрешении изображений по координатам  $x$  и  $y$  целесообразно использовать квадратное скользящее окно ( $N_1 = N_2 = N$ ).

На рис. 4 представлено нормированное ПКАЯ, полученное для слабоконтрастного изображения с низкой объектовой насыщенностью (рис. 1), а его проекция в виде полутонового изображения на рис. 5. Координаты  $x$  и  $y$  соответствуют положению элементов изображения в пикселях. Для ПКАЯ, изображенного на рис. 4, размер используемого для анализа скользящего окна составляет  $20 \times 20$  пикселей.

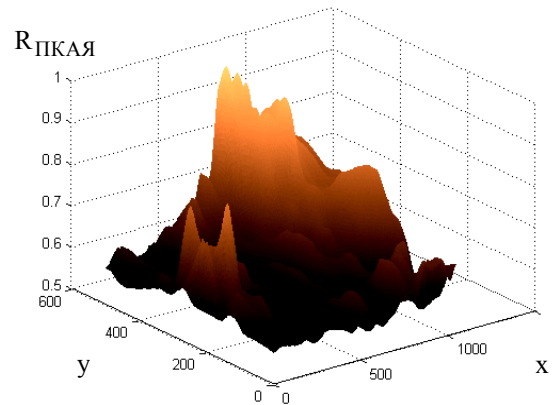


Рис. 4. ПКА яркости ИИ

Результат оценки информативности ИИ состоит в выделении областей, удовлетворяющих условию

$$K_{\text{пор}} \leq R_{\text{ПКА}} \leq 1, \quad (10)$$

что позволяет перейти от рассмотрения ПКА к рассмотрению его горизонтальных сечений с заданными уровнями  $K_z$ :

$$K_1 < R_{\text{ПКА}} \leq K_2, \dots, K_Z < R_{\text{ПКА}} \leq 1, \quad (11)$$

где  $Z$  – количество градаций  $R_{\text{ПКА}}$  с шагом равномерной сетки.

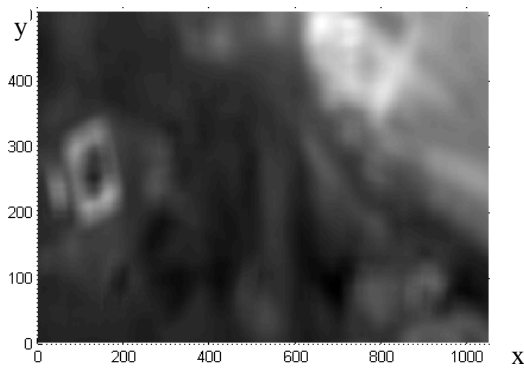


Рис. 5. Проекция ПКА яркости ИИ

Поскольку изначально интерес представляют только те участки ПВ, которые обеспечивают получение унимодальной РФ, то из рассмотрения исключим участки ПВ, для которых  $R_{ПКА} \leq 0.5$ .

Сечения ПКАЯ (рис. 5) слабоконтрастного ИИ (рис. 1) с шагом 0.1, соответствующие условию  $0.5 < R_{ПКАЯ} \leq 1$  представлены на рис. 6. Каждому из интервалов ПКА соответствует свой оттенок сечения, при этом интервалу  $0.5 < R_{ПКАЯ} \leq 0.6$  соответствует наиболее темное (черное) сечение ПКА, а интервалу  $0.9 < R_{ПКАЯ} \leq 1$  – наиболее светлое. Полученные сечения очерчивают области ИИ позволяющие обеспечить необходимый уровень РФ в соответствии с заданными условиями обстановки (рис. 1). Из рис. 6 следует, что соответствующая условию  $0.9 < R_{ПКАЯ} \leq 1$  область ПКАЯ может приходиться на участки изображения обладающие высокой яркостью, но недостаточным контрастом (область 2 рис. 1). В этом случае для выбора участков привязки по ПКАЯ необходимо использовать либо дополнительные ИП, либо дополнительные условия, накладывающие ограничения на размеры информативных областей, например область 1 на рис. 1 и соответствующие ей сечения на рис. 6.

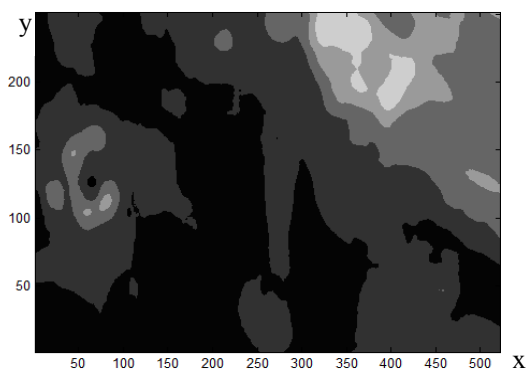


Рис. 6. Сечение ПКА яркости слабоконтрастного ИИ ( $N_1 = N_2 = 20$ ,  $R_{ПКАЯ} = 0.5...1$ )

Таким образом, использование ПКА яркости при анализе изображения (рис. 1) дает возможность выделять участки, соответствующие максимальной

яркости, однако такой подход не дает возможности однозначного определения фрагментов изображений с требуемым контрастом, в то же время распределение яркости может быть использовано в качестве дополнительного ИП.

Для определения участков ПВ с наибольшим контрастом построим ПКАК. В соответствии с (4) результаты построения ПКАК в виде проекций и сечений приведены на рис. 7 и 8 соответственно.

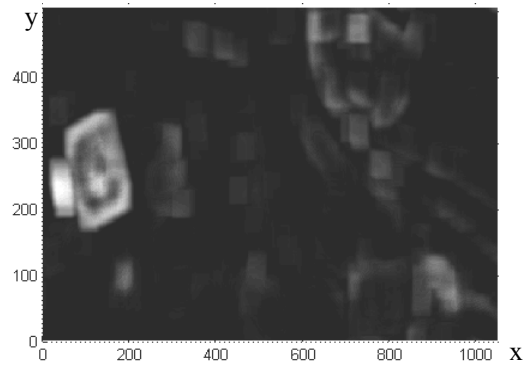


Рис. 7. Проекция ПКА контраста ИИ

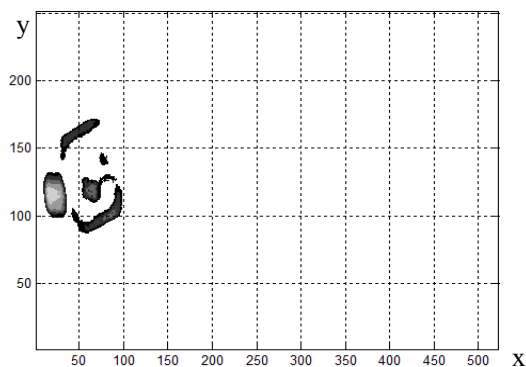


Рис. 8. Сечения ПКА контраста для уровней  $R_{ПКАК} = 0.5...1$

При построении ПКАК были сделаны следующие допущения:

- искажения ИИ отсутствуют согласно условиям существования ситуации (рис. 1);
- выполняются условия обеспечения унимодальности РФ согласно условий (1) – (10);
- ограничения по контрасту выбраны на уровне 0,5.

Анализ проекций (рис. 7) и сечений ПКАК (рис. 8), показывает, что предлагаемый подход позволяет выделять по локальному контрасту необходимые для формирования однозначных унимодальных РФ информативных областей. При этом, не возникает неоднозначности в трактовании полученных результатов.

Результаты проведенных исследований, которые иллюстрируются примером на рис. 1, и результатами оценки информативности на рис. 4 – 8 позволяют сделать вывод целесообразности выделения

информативных участков слабоконтрастного объектово ненасыщенного ИИ по ПКАК, при этом ПКАЯ представляет собой дополнительную информацию, которая может быть использована при выборе размера ЭИ, анализе цветных изображений оптического диапазона, а также при комплексировании информации от датчиков различной физической природы в комбинированных КЭСН.

На рис. 9 приведены сечения ПКА по обобщенному показателю качества, построенные в соответствии с выражением (7). Из рис. 9 следует, что сечения, построенные для ОПК более четко отражают локализацию объектов на ИИ с учетом ярких и контрастных особенностей ИИ.

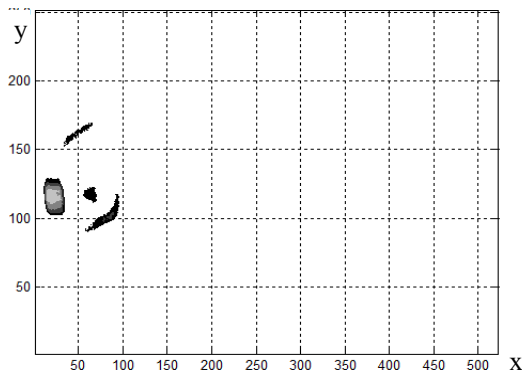


Рис. 9. Сечения ПКА для уровней  $R_{ПКА} = 0.5 \dots 1$

Исследование информативности изображений с нормальной и высокой объектовой насыщенностью позволяет сделать заключение о том, что ПКАК не связаны с размерами и формой объектов в отличие от ПКАЯ, которое является косвенной характеристикой объектов ПВ, указывающей на геометрические размеры синтезируемых ЭИ. Совместное использование ПКАЯ и ПКАК согласно выражению (7), как показано выше, позволяет выбирать для формирования такие области ИИ, которые удовлетворяют условиям как необходимой яркости, так и контраста.

## Выводы

Разработан метод заблаговременной подготовки ЭИ, предполагающий проведение прямого корреляционного анализа изображений с использованием различных типов информативных полей. Метод позволяет на этапе формирования ЭИ определить потенциальные обеспечиваемые значения решающей функции, которые используются при оценке качества полетного задания ЛА.

Впервые предложено совместное использование полей корреляционного анализа по яркости и контрасту для выделения информативных участков изображений. Метод применим для анализа изображений, полученных с использованием различных ДРФП, однако имеет ограничения в вычислительной реализуемости, поэтому может быть использован при заблаговременной подготовке ЭИ.

## Список литературы

1. Баклицкий В.К. Корреляционно-экстремальные методы навигации и наведения / В.К. Баклицкий. – Тверь: ТО «Книжный клуб», 2009. – 360 с.
2. Таршин В.А. Обоснование применения методов фрактального анализа для оперативной подготовки эталонных изображений / В.А. Таршин, А.М. Сотников, Р.Э. Пащенко // Системы обработки информации. – Х.: ХУПС, 2014. – № 1 (117). – С. 62–66.
3. Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных летательных аппаратов / Под. ред. М.Н. Красильщикова, Г.Г. Серебрякова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 556 с.
4. 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.
5. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB / Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С – М.: Техносфера, 2006. – 616 с.

Поступила в редколлегию 12.03.2015

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

## ПІДГОТОВКА ЕТАЛОННИХ ЗОБРАЖЕНЬ ДЛЯ ВИСОКОТОЧНИХ КОРЕЛЯЦІЙНО-ЕКСТРЕМАЛЬНИХ СИСТЕМ НАВИГАЦІЇ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ ПРЯМОГО КОРЕЛЯЦІЙНОГО АНАЛІЗУ

В.А. Таршин, О.М. Сотніков, Р.Г. Сидоренко

На основі прямого кореляційного аналізу, основ побудови і функціонування кореляційно-екстремальних систем навігації та сучасних підходів до здобуття еталонної інформації пропонуються нові принципи формування еталонних зображень і оцінки інформативності вихідних зображень, що дозволяють визначити інформативні області вихідних зображень для забезпечення високої точності визначення місця розташування літальних апаратів.

**Ключові слова:** кореляційно-екстремальна система наведення, еталонне зображення, вихідне зображення.

## PREPARATION OF REFERENCE PATTERNS FOR HIGH-FIDELITY CROSS-CORRELATION-EXTREME SYSTEMS OF NAVIGATION ON BASIS OF THE USE DIRECT CROSS-CORRELATION ANALYSIS

V.A. Tarshyn, O.M. Sotnikov, R.G. Sydorenko

On the basis of direct cross-correlation analysis, bases of construction and functioning of the cross-correlation-extreme systems of navigation and modern going near the receipt of standard information new principles of standard picture generation and estimations of informing of initial images, allowing to determine the informing areas of initial images for providing of high exactness of position-fix aircrafts are offered.

**Keywords:** correlation-extreme navigation system, reference image, initial image.