

УДК 629.78:621.39

## РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ И НАВЕДЕНИЯ СРЕДСТВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ВИЗУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

©2012 В. В. Сбродов, В. П. Свиридов, С. Г. Сафронов

Самарский государственный технический университет

Рассматривается структура комбинированной корреляционно-экстремальной системы обработки и анализа визуальной информации, предназначенной для решения задач управления и наведения подвижных носителей средств дистанционного зондирования и обеспечивающей распознавание заданных фрагментов наблюдаемой сцены в реальном масштабе времени. Описываются алгоритмы функционирования в режимах обнаружения заданных объектов, наведения целевой аппаратуры на опознанные объекты и стабилизации линии визирования целевой аппаратуры на опознанном объекте при движении носителя относительно наблюдаемой сцены. Рассмотрен способ повышения надёжности сопровождения при изменениях текущей информации, возникающих в процессе наведения. Приводятся результаты исследований эффективности распознавания бинарных корреляционных алгоритмов при воздействии таких помех как яркость, изменение контраста, смаза изображения для различных значений сигнала к шуму, а также результаты экспериментальных исследований макетного образца системы на специализированном стенде.

*Управление, навигация, наведение, изображение, корреляция, эталон, экстремум, координаты, дистанционное зондирование, моделирование, структура.*

Стремительное развитие информационных технологий позволило существенно расширить использование методов дистанционного зондирования на автономных мобильных носителях. Системы дистанционного зондирования, размещённые на борту космических аппаратов, позволяют проводить глобальный экологический и климатический мониторинг, исследования природных ресурсов, оценку последствий природных и техногенных катастроф и т.д. [1]. Аппаратура зондирования, установленная на низколетящих и подвижных наземных носителях, позволяет решать аналогичные задачи в региональных и локальных масштабах [2].

Основной целевой задачей средств дистанционного зондирования является получение высококачественной визуальной информации, обеспечивающей возможность надёжного распознавания объектов заданных классов, оценки текущей ситуации на наблюдаемой сцене и построение прогноза её развития.

Наличие на борту носителя аппаратуры наблюдения, а также систем, обес-

печивающих оптимальные условия получения видеоинформации, позволяет ввести в контур управления систему обработки и анализа изображения для получения дополнительной информации, необходимой для навигации и наведения носителя на район наблюдения [3,4]. Использование таких комбинированных систем позволяет реализовать программно-адаптивный принцип управления, т.е. замкнуть контур управления носителя на объект, обеспечивающий решение основной целевой задачи – район наблюдения, и тем самым парировать ошибки основного контура управления, так как результирующая ошибка наведения в этом случае определяется лишь погрешностями системы обработки изображений [5,6].

В работе рассматриваются принципы построения и структура оптико-электронной корреляционной системы, предназначенной для использования в контуре управления подвижных носителей средств дистанционного зондирования, обеспечивающей распознавание заданных фрагментов наблюдаемой сцены в

реальном масштабе времени, определения их координат и наведения линии визирования аппаратуры наблюдения на опознанные объекты.

Принцип действия системы (рис.1) основан на корреляционном сравнении текущего информационного массива, считываемого с первичного преобразователя информации (ППИ) на базе приборов зарядовой связи (ПЗС) с эталонным информационным массивом (ЭИ), хранящимся в библиотеке эталонной информации (БЭИ).

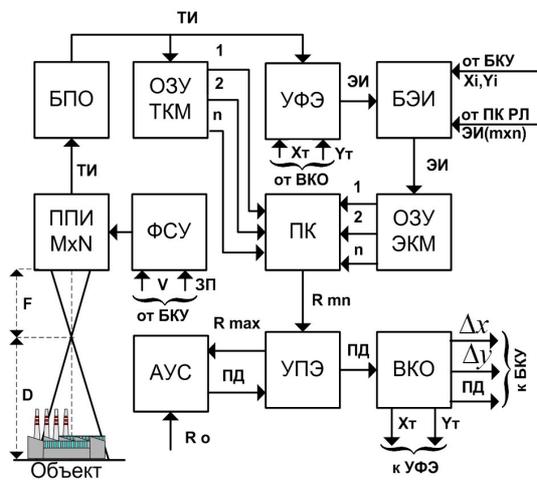


Рис.1. Структура комбинированной системы навигации и наведения

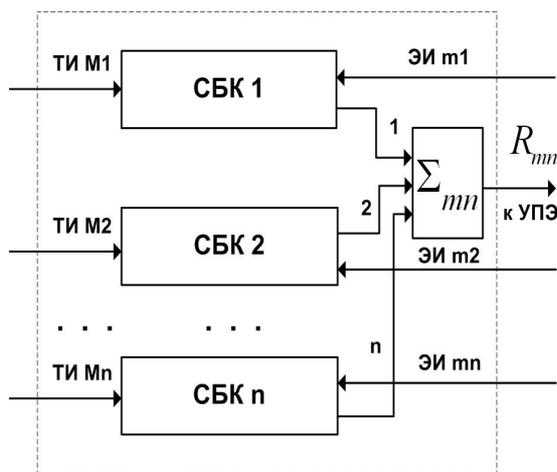


Рис. 2. Структура параллельного бинарного коррелятора

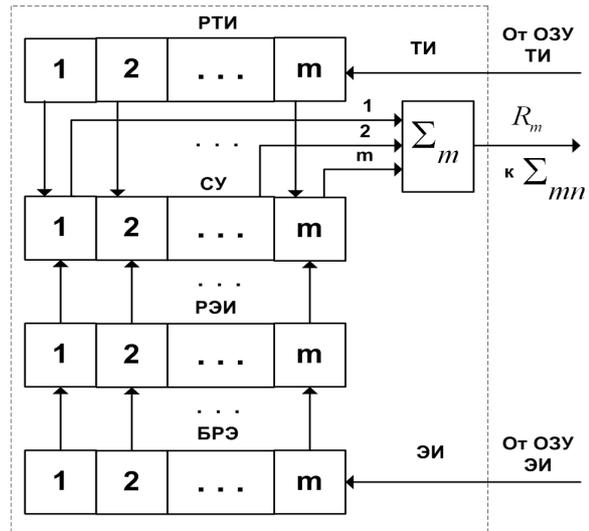


Рис. 3. Структура строчного бинарного коррелятора

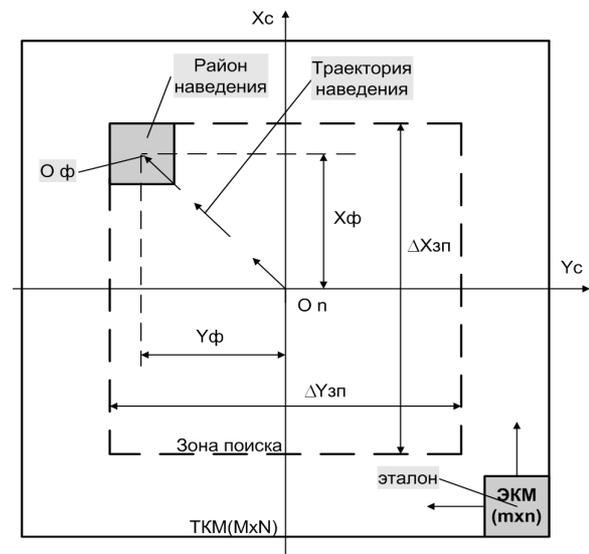


Рис. 4. Алгоритм совмещения ТКМ и ЭКМ и вычисления поправок наведения

Система может работать с сигналами, снимаемыми с ППИ, видимого, инфракрасного или сверхвысокого частотного диапазонов длин волн электромагнитных колебаний. В качестве источника текущей информации (ТИ) может служить основная функциональная аппаратура наблюдения, или собственный блок чувствительных элементов. Эталонная информация выбирается и записывается в БЭИ при планировании маршрута. В качестве эталонов используются цифровые (бинарные) изображения элементов района наблюдения и/или характерные фрагменты

(опорные ориентиры), расположенные вдоль трассы движения на промежуточных участках коррекции траектории носителя.

При изменении программы движения ЭИ может дополняться и изменяться по программно-командной радиолинии (ПКРЛ) из центра управления и планирования маршрута движения носителя. Система имеет три основных режима функционирования: обнаружения (РО), наведения (РН) и стабилизации (РС).

При подходе к району наблюдения или очередному участку коррекции система начинает работу в режиме обнаружения. При этом с бортового комплекса управления (БКУ) в БЭИ поступает команда на перезапись очередного цифрового бинарного изображения эталона в оперативное запоминающее устройство эталонной картой местности (ОЗУ ЭКМ) формата  $(m \times n)$  элементов разложения, одновременно с БКУ на формирователь сигналов управления ППИ (ФСУ) передается информация о расчётных значениях скорости движения изображения и программных значениях координат ориентира. По этим данным ФСУ рассчитывает время накопления заряда в ППИ, координаты и размер зоны поиска. Перечисленные параметры определяются исходя из следующих соображений.

Время накопления (экспонирования)  $t_q$  влияет на величину смаза изображения (фактически на разрешение) и значения соотношения сигнал/шум и зависит от параметров оптической системы, характеристик фотоприёмника, условий наблюдения и освещённости фокальной плоскости.

Для получения качественного видеосигнала время накопления заряда в ППИ должно соответствовать времени движения элемента изображения по фотовоспринимающей ячейке ПЗС:

$$t_q \approx \frac{\Delta n \cdot D}{V_o \cdot F}, \quad (1)$$

где  $\Delta n$  - размер фотовоспринимающей ячейки;  $D$  - дальность до предметной

плоскости;  $V_o$  - скорость движения носителя;  $F$  - фокусное расстояние оптической системы.

Кроме условия (1) должно выполняться и условие

$$\Psi_p \geq k \frac{E}{E_n}, \quad (2)$$

где  $\Psi_p$  - отношение сигнал/шум на выходе ППИ;  $E$  - освещённость фокальной плоскости;  $E_n$  - пороговая освещённость, соответствующая  $\Psi = 1$ ;  $k$  - коэффициент, зависящий от требуемых значений вероятностей правильного обнаружения ложной тревоги.

Размер зоны поиска определяется исходя из максимально возможных ошибок предварительных целеуказаний БКУ по дальности и боку, погрешностей измерения положения связанной системы координат  $(XYZ)_c$  относительно базовых  $(XYZ)_o$  и др.

На основании рассчитанных данных ФСУ формирует соответствующие команды управления работой ППИ. Видеосигнал с ППИ подаётся в блок предварительной обработки (БПО), в котором осуществляется его фильтрация и бинарное кодирование. Бинарный сигнал записывается в ОЗУ текущей карты местности (ТКМ) ёмкостью  $(M \times n)$  бинарных отсчётов. ОЗУ ТКМ имеет  $n$  параллельных выходов, соединённых с  $n$  входами параллельного коррелятора (ПК) (рис.2). Параллельный бинарный коррелятор (ПК) выполнен на базе  $n$  сверхбольших интегральных схем строчного бинарного коррелятора (СБК), в котором осуществляется параллельное сравнение с  $m$  элементами строки эталонной информации в каждом такте поступления информации из ОЗУ ТИ (рис.3). На другие  $n$  входов ПК поступает информация с ОЗУ ЭКМ. В результате в ПК методом «скользящего окна» в каждом такте поступления информации с ППИ происходит параллельное сравнение текущего и эталонного массивов в окне

$(m \times n)$  при всех возможных положениях эталона в зоне поиска  $(\Delta M \times \Delta N)$  (рис.4).

Параллельный коррелятор ПК рассчитывает значение критериальной функции меры сходства изображений по алгоритму

$$R(m, n) = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n F(M, N) \oplus G(m-i, n-j), \quad (3)$$

где  $R(m, n)$  – функция меры сходства;  $G(m, n)$  – текущий информационный массив;  $(m \times n)$  – эталонные изображения;  $(m \times n)$  – формат эталонного изображения;  $M \times N$  – формат текущей карты местности.

Для сокращения времени обнаружения так называемые «пустые зоны» гасятся, т.е. считывание информации с ППИ происходит только в зоне поиска  $(\Delta M \times \Delta N)$ . Коэффициент сокращения временных затрат  $d$ , равный

$$d = \frac{M \cdot N}{\Delta M \cdot \Delta N}, \quad (4)$$

может достигать значения  $d \geq 8 \dots 15$  в зависимости от возможных значений ошибок предварительных целеуказаний БКУ.

Значения отсчётов функции взаимной корреляции  $R_{mn}$  с ПК поступают в устройство поиска экстремума (УПЭ), в котором запоминаются значения глобального максимума  $R_{\max}$  и его положения  $(X_{\phi} Y_{\phi})$  относительно системы координат, связанной с линией визирования  $(XOY)_c$ .

Значение глобального максимума  $R_{\max}$  сравнивается в анализаторе условий сравнения (АУС) с порогом  $R_o$ , который рассчитывается, исходя из условия получения требуемых значений вероятностей правильного обнаружения и ложной тревоги. Если выполняется условие  $R_{\max} > R_o$ , анализатор АУС выдаёт команду в вычислитель координат ориентира (ВКО), в котором вычисляется разность между фактическим и программным положением ориентира:

$$\begin{aligned} \Delta X &= X_{\phi} - X_n, \\ \Delta Y &= Y_{\phi} - Y_n. \end{aligned} \quad (5)$$

Полученные результаты передаются в БКУ вместе с признаком достоверности результатов измерений (ПД). Отклонения  $\Delta X$  и  $\Delta Y$  имеют две составляющие. Первая обусловлена ошибками навигационного прогноза по дальности и боку, вторая возникает из-за погрешности измерения углового положения носителя. При необходимости они могут быть разделены с использованием дополнительной информации со спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС/GPS или других средств носителя.

Признак ПД формируется на основании значений  $R_{\max}$  и сравнения полученных отклонений с максимально возможными ошибками предварительных целеуказаний основной системы управления и навигации.

В случае, если в режиме обнаружения использовался фрагмент района наблюдения, система переходит в режим наведения. При этом УФЭ перезаписывает эталонное изображение опознанного фрагмента (ориентира) с ТКМ в ОЗУ ЭКМ параллельного коррелятора.

В режиме наведения размеры зоны поиска  $(\Delta M \times \Delta N)$  могут быть значительно сокращены, т.к. неопределённость в положении ориентира, обусловленная погрешностями основной системы, будет устранена. Размеры зоны поиска в этом случае определяются только динамикой наведения.

Кроме того, перезапись эталона с ТКМ позволяет существенно повысить надёжность сопровождения ориентира в процессе наведения, т.к. устраняются искажения, возникающие при подготовке эталона и текущих условий наблюдений.

После перезаписи эталона может быть изменён порог принятия решения  $R_o$  с целью оптимизации соотношения между вероятностями правильного обнаружения и ложной тревоги.

В режиме наведения РН система работает следующим образом.

После перезаписи эталона  $G(m, n)$  и коррекции размеров зоны поиска ( $\Delta M_k \times \Delta N_k$ ) производится повторное распознавание ориентира, определение его текущих координат и передача их значения в БКУ, по командам которого исполнительные органы системы управления носителя начинают разворачивать линию визирования в направлении опознанного фрагмента в соответствии с принятым законом наведения. Измерение координат ориентира осуществляется в каждом кадровом периоде. Положение стробов зоны поиска изменяется в соответствии с изменениями положения ориентира в системе координат, связанной с линией визирования аппаратуры наблюдения (рис.4). Дискретность измерений определяется динамическими возможностями системы управления.

Процесс наведения заканчивается при совмещении линии визирования с центром опознанного фрагмента района наблюдения.

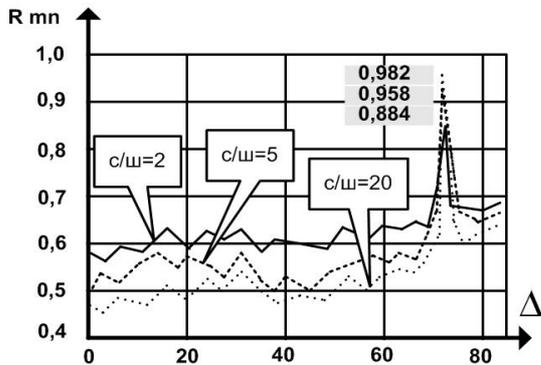


Рис. 5. Вид функции  $R_{mn}$  для эталона типа «Излучина реки» формата (32x32) элемента

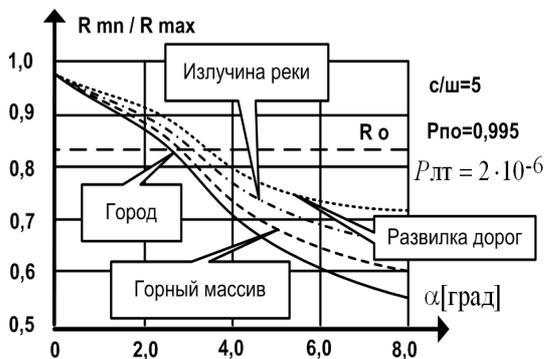


Рис. 6. Диаграмма функции  $R_{mn}$  в зависимости от изменений угла ориентации ТИ относительно ЭИ

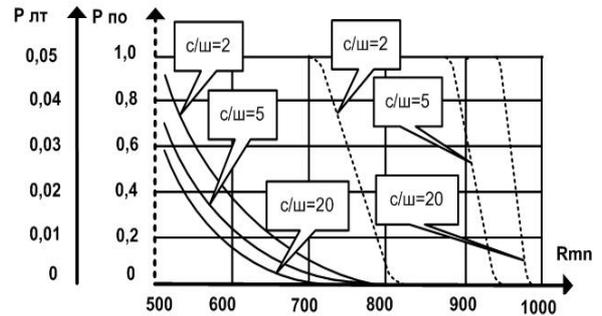


Рис. 7. Вероятность правильного обнаружения  $P_{по}$  и ложной тревоги  $P_{лт}$  для эталона типа «Излучина реки» формата (32x32)

Для предотвращения срыва сопровождения из-за изменений условий наблюдения ориентира предусмотрена динамическая перезапись эталона в процессе наведения. С этой целью в анализаторе АУС производится сравнение максимального значения функции меры сходства  $R_{max}(m, n)$ , полученного после перезаписи эталона, с её текущими значениями  $R_i(m, n)$ . Если в процессе наведения деградация текущих значений максимумов  $R_i(m, n)$  достигает некоторого порогового значения

$$\Delta_p = R_{max}(m, n) - R_i(m, n),$$

при котором возможен срыв сопровождения, АУС выдаёт команду в устройство УФЭ на перезапись эталона.

После совмещения линии визирования с центром ориентира система может переходить на работу в режиме стабилизации линии визирования при выполнении стереосъёмки и решении ряда других задач. В режиме стабилизации РС система обеспечивает измерение отклонений  $\Delta X$  и  $\Delta Y$  и парирование искажений ориентира при изменении положения носителя относительно наблюдаемой сцены по ал-

горитму, аналогичному режиму наведения РН. Время стабилизации наблюдаемой сцены определяется требуемыми размерами стереобазы.

Одной из проблем при создании корреляционно-экстремальных систем является обеспечение их надёжного функционирования при воздействии различного рода помех. Поэтому при проведении исследований по созданию системы обнаружения и наведения проводилось математическое моделирование методов обработки и анализа визуальной информации, а также экспериментальная отработка элементов системы с целью оценки влияния на её функционирование различных мешающих факторов. В частности, исследовалось влияние изменений освещённости, контрастности, смаза изображения, отношения сигнала к шуму на выходе фотоэлектрического преобразователя на эффективность алгоритмов распознавания [7].

Модель текущего искажённого изображения, снимаемого с матричного фотоэлектрического преобразователя, представлялась в виде

$$F(i, j) = \frac{a}{e+1} \times \left[ \sum_0^e F(i+e, j) \pm b \frac{1}{M \times N} \sum_1^M \sum_1^N F(i, j) \right] + H(i, j), \quad (6)$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $e$  - параметры яркостных, контрастных искажений и смаза изображения соответственно;  $H(i, j)$  - аддитивный случайный шум.

Дисперсия шумового поля  $H(i, j)$  определялась из выражения

$$d_{\text{ш}}^2 = \frac{d_c^2}{\psi}, \quad (7)$$

где  $\psi$  - заданное отношение сигнала к шуму;  $d_c^2$  - дисперсия сигнала изображения.

На рис.5 приведён вид критериальной функции меры сходства  $R_{mn}$  в районе зоны поиска по изображению типа «излучина реки» с разрешением  $r \approx 10\text{м}$  для

различных значений отношения сигнала к шуму, при размере эталона  $(32 \times 32)$  элемента разложения и бинарном кодировании маской  $(5 \times 5)$ .

Отработка оптико-электронной системы проводилась на специальной установке, обеспечивающей изменение ориентации, масштаба углов визирования и линейного перемещения наблюдаемой сцены. Имитация фоновой обстановки обеспечивалась аэрокосмическими снимками и объёмными моделями некоторых объектов. Экспериментальные исследования проводились с использованием макетного образца системы.

На рис. 6 приведены графики зависимости деградации функции  $R_{mn}$  от изменения углов ориентации ТКМ относительно ЭКМ для различных типов изображений с разрешением от  $r \approx 0,5\text{м}$  («Развилка дорог») до  $r \approx 25\text{м}$  («Горный массив») при отношении сигнала к шуму  $\psi = 5$  и формате эталонов  $(32 \times 32)$  элементов разложения. На рис.6 показан порог принятия решения  $R_o \approx 0,83$ , соответствующий вероятности правильного обнаружения  $P_{no} \approx 0,995$  и ложной тревоги  $P_{лт} \approx 2 \times 10^{-6}$ .

На рис. 7 приведены зависимости вероятностей правильного обнаружения  $P_{no}$  и ложной тревоги  $P_{лт}$  от значения порога принятия решений  $R_o$  для различных значений отношения сигнала к шуму для изображения типа «Излучина реки» при формате эталона  $(32 \times 32)$  элемента разложения и бинарном кодировании входного сигнала изображения маской  $(5 \times 5)$ .

Анализ результатов математического моделирования и экспериментальной отработки показывает, что рассмотренная оптико-электронная система обработки и анализа визуальной информации может быть использована в системах управления и навигации подвижных автономных аппаратов и обеспечивает решение следующих задач:

- распознавание заданных фрагментов наблюдаемой сцены;
- определение взаимного положения аппарата и опознанного фрагмента;
- наведение аппаратуры наблюдения на опознанный фрагмент;
- стабилизацию линии визирования на опознанном фрагменте.

### Библиографический список

1. Гарбук, С. В. Космические системы дистанционного зондирования земли [Текст] / С. В. Гарбук, В. Е. Гершензон - М.: «АиБ», 1995. – 296 с.
2. Казанцев, В. М. Оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды [Текст] / В. М. Казанцев, В. М. Белов, В. Н. Орлов / Под. ред. В. Н. Рождествина - М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 528 с.
3. Баклицкий, В. К. Корреляционно-экстремальные методы навигации и наведения [Текст] / В. К. Баклицкий - Тверь: ТО «Книжный клуб», 2009. – 360 с.
4. Белоглазов, И. Н. Основы навигации по геофизическим полям [Текст] / И. Н. Белоглазов, Г. И. Джинджава, Г. П. Чигин - М.: Наука, 1991 – 396 с.
5. Сбродов, В. В. Оптико-электронная система опознавания и наведения [Текст] / В. В. Сбродов, В. П. Свиридов, А. Д. Абрамов // Труды юбилейной научно-технической конференции «Датчик-98» Т.2: Гурзуф: Госстандарт, 1998.
6. Красильщиков, М. Н. Управление и наведение беспилотных маневренных аппаратов на основе современных информационных технологий [Текст] / Под. ред. М. Н. Красильщикова и Г. Г. Серебрякова - М.: Физматлит, 2005. - 280 с.
7. Сбродов, В. В. Исследование эффективности алгоритмов опознавания ориентиров в комбинированных системах управления подвижных объектов [Текст] / В. В. Сбродов, В. П. Свиридов, В. Г. Давыдов // Вестник СамГТУ - Самара: серия «Технические науки». – 2002. - Вып.8.

## SOLVING TASKS OF CONTROL AND TARGETING FOR REMOTE SENSING DEVICES BY SYSTEMS OF PROCESSING AND ANALYSIS OF VISUAL INFORMATION

© 2012 V. V. Sbrodov, V. P. Sviridov, S. G. Safronov

Samara State Technical University

The article addresses the structure of combined correlation and extreme system for processing and analysis of visual information to assist control and targeting of moving carriers and remote sensing devices, and to ensure real-time recognition of certain fragments of the surveyed scene. The authors describe algorithms of functioning in the following modes: identification of given objects, direction of targeting systems onto the identified objects, stabilization of sightline of the identified object while the carrier keeps moving relative to the surveyed scene. The article also dwells on a method to improve the reliability of guidance in conditions of current information changing in the process of direction. The results of the research in the efficiency of recognition of binary correlation algorithms under such interference as brightness, changes of contrast, picture smearing for different signal-to-noise ratios are presented. The results of experimental tests of the system prototype on a specialized bench are also given.

*Control, navigation, direction, image, correlation, reference, extreme, coordinates, remote sensing, modeling, structure.*

### **Информация об авторах**

**Сбродов Владимир Васильевич**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электронные системы и информационная безопасность», Самарский государственный технический университет. E-mail: [esib@samgtu.ru](mailto:esib@samgtu.ru). Область научных интересов: обработка и анализ информации, системы управления и навигации.

**Свиридов Вячеслав Павлович**, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Электронные системы и информационная безопасность», Самарский государственный технический университет. E-mail: [esib@samgtu.ru](mailto:esib@samgtu.ru). Область научных интересов: обработка и анализ информации, системы управления и навигации.

**Сафронов Сергей Геннадьевич**, аспирант кафедры «Электронные системы и информационная безопасность», Самарский государственный технический университет. E-mail: [esib@samgtu.ru](mailto:esib@samgtu.ru). Область научных интересов: обработка и анализ информации, системы управления и навигации.

**Sbrodov Vladimir Vassilievich**, candidate of technical sciences, associate professor, “Electronic systems and Information Security” department, Assoc. Prof., State educational institution of higher professional education “Samara State Technical University”. E-mail: [esib@samgtu.ru](mailto:esib@samgtu.ru). Area of research: information processing and analysis, control and navigation systems.

**Sviridov Vyacheslav Pavlovich**, candidate of technical sciences, associate professor, “Electronic systems and Information Security” department, professor, state educational institution of higher professional education “Samara State Technical University”. E-mail: [esib@samgtu.ru](mailto:esib@samgtu.ru). Area of research: information processing and analysis, control and navigation systems.

**Safronov Sergei Gennadievich**, “Electronic systems and Information Security” department, postgraduate student, state educational institution of higher professional education “Samara State Technical University”. E-mail: [esib@samgtu.ru](mailto:esib@samgtu.ru). Area of research: information processing and analysis, control and navigation systems.