

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

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

Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: esib@samgtu.ru

Рассматривается структура корреляционно-экстремальной системы управления и навигации, работающая по информации с целевой аппаратуры дистанционного зондирования, приводятся алгоритмы функционирования системы в контуре управления носителя и результаты математического моделирования и экспериментальных исследований.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, управление, навигация, корреляция, эталон, моделирование, наведение.

Системы дистанционного зондирования нашли широкое применение в различных областях науки и техники. Аппаратура дистанционного зондирования (наблюдения), размещенная на космических носителях, позволяет проводить глобальный космический мониторинг окружающей среды, исследование природных ресурсов, оценку последствий природных и антропогенных катастроф, оперативно обнаруживать очаги лесных и подповерхностных пожаров и т. д. [1, 2]. Аппаратура зондирования, установленная на низколетящих носителях (самолёт, вертолёт, беспилотный летательный аппарат), обеспечивает решение аналогичных задач в региональных и локальных масштабах, а также ведение наблюдения за малоразмерными объектами в реальном масштабе времени [3].

Наличие на борту носителя видеосенсоров, обеспечивающих решение основной целевой задачи – формирование высококачественных сигналов изображения наблюдаемой сцены, позволяет использовать снимаемую с них видеоинформацию для решения задач управления движением и навигации автономных подвижных носителей аппаратуры зондирования [4-6].

В большинстве систем дистанционного зондирования, размещенных на подвижных носителях, используются линейные или матричные, работающие в режиме временной задержки и интегрирования (т. е. фактически линейные), первичные преобразователи информации (ППИ) на приборах с зарядовой связью (ПЗС). Это объясняется следующими причинами:

- линейные преобразователи имеют значительно меньший разброс чувствительности по сравнению с матричными преобразователями;
- обеспечивается гораздо больший захват поверхности в поперечном направлении (линейные преобразователи имеют в несколько раз больший формат разложения вдоль строки, чем матричные преобразователи);
- обеспечивается съемка поверхности в режиме «подметания поверхности», при котором сканирование в поперечном направлении осуществляется линейным преоб-

разователем, а в продольном – за счёт движения носителя, что позволяет получать практически неограниченный маршрут съёмки;

– имеется возможность усиления видеосигнала в самом фотопреобразователе (режим временной задержки и интегрирования) без потерь разрешающей способности.

В предложенном материале рассматриваются результаты исследования по созданию оптико-электронной системы опознавания ориентиров и определения местоположения, предназначенной для использования в составе комбинированного комплекса управления и навигации подвижного объекта.

Рассматриваемая система использует видеоданные, полученные с ППИ основной функциональной аппаратуры средств дистанционного зондирования, и может работать по сигналам изображения, снимаемых с датчиков видимого и/или инфракрасного диапазонов длин волн электромагнитных колебаний. Система позволяет работать по радиоизображениям, полученным с локаторов с синтезируемой апертурой (в случае синтеза радиоизображений на борту носителя).

Принцип действия системы основан на корреляционном сравнении текущей видеоинформации, снимаемой с ППИ, с эталонными изображениями ориентиров, хранящихся в библиотеке эталонов.

Обобщенная структура оптико-электронной системы приведена на рис.1.

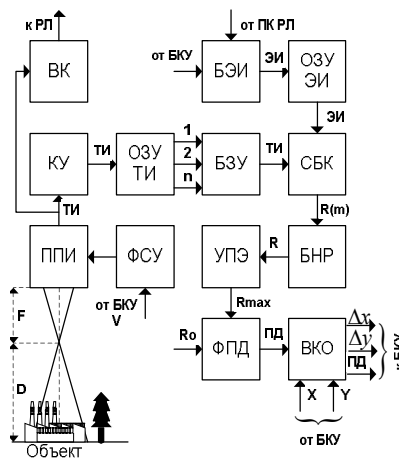


Рис. 1. Обобщенная структура оптико-электронной системы

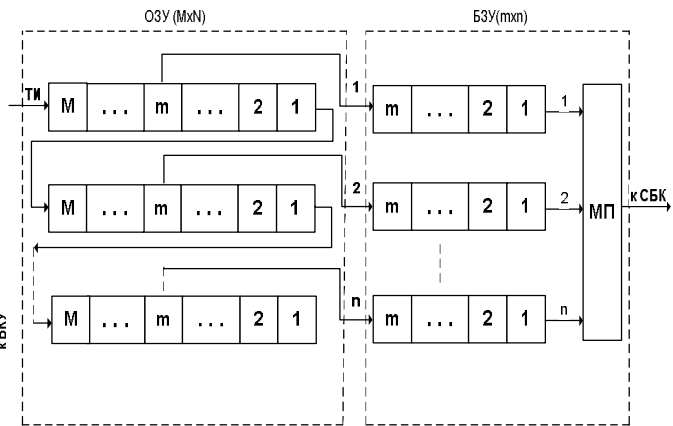


Рис. 2. Структура ОЗУ ТИ емкостью $(M \times N)$ и БЗУ ТИ емкостью $(m \times n)$

Система работает следующим образом. С бортового комплекса управления (БКУ) на формирователь сигналов управления (ФСУ) поступает информация о скорости движения изображения в фокальной плоскости аппаратуры наблюдения, рассчитанной по показаниям основной системы управления и навигации (при наблюдении в надир):

$$V_u = \frac{V_h \cdot F}{D}, \tag{1}$$

где V_h и V_u – скорости движения носителя и изображения, F – фокусное расстояние оптической системы, D – дальность до предметной области.

По этой информации ФСУ рассчитывает время накопления в линейном фотоприемнике:

$$t_q = \frac{\Delta x}{V_{\dot{\epsilon}}} = \frac{\Delta x \cdot D}{V_h \cdot F}, \quad (2)$$

где Δx – размер фотовоспринимающей ячейки ПЗС, t_q – время накопления заряда.

Для получения качественной видеоинформации (без потери разрешающей способности за счет смаза) время накопления должно соответствовать времени движения элемента изображения по фотовоспринимающей ячейке ПЗС.

Зарядовые пакеты, накопленные в течение времени t_q , переносятся в выходной регистр ПЗС и считываются с него с частотой

$$f_T = \frac{M}{t_q} = \frac{M \cdot V_h \cdot F}{n \cdot D}, \quad (3)$$

где M – количество элементов в строке ПЗС, f_T – тактовая частота выходного регистра, n – количество строк ПЗС.

Видеосигнал с линейного ППИ поступает на вход видеоканала основной функциональной аппаратуры носителя и на вход кодирующего устройства (КУ) системы измерения, в котором осуществляется его бинарное кодирование по алгоритму:

$$F_{\sigma}(M, N) = 1, \text{ если } F_{MN} \geq \bar{F}; \quad (4)$$

$$F_{\sigma}(M, N) = 0, \text{ если } F_{MN} < \bar{F}, \quad (5)$$

где F_{MN} – текущий отсчет сигнала яркости:

$$\bar{F} = \frac{1}{I} \sum_1^M F(M, 1). \quad (6)$$

В качестве порога квантования выбирается среднее значение отсчетов яркости по предыдущей строке. Бинарный сигнал подается на вход оперативного запоминающего устройства текущей информации (ОЗУ ТИ), имеющего емкость ($M \times n$) отсчетов яркости, и буферное запоминающее устройство (БЗУ) емкостью ($m \times n$). ОЗУ ТИ имеет n параллельных выходов, соединенных с n входами БЗУ (рис.2). За время формирования информационного массива

$$t_I = t_q \cdot n \quad (7)$$

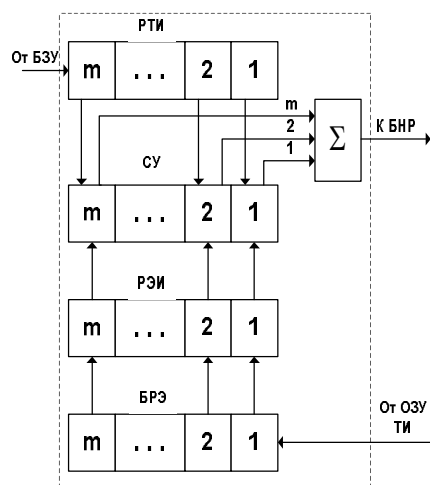
в ОЗУ ТИ происходит запоминание n строк текущей информации, снимаемой с ППИ (где t_q – время формирования строки), а в БЗУ – фрагмента ($m \times n$), соответствующего окну анализа совпадений текущей и эталонной информации.

При подходе носителя к району коррекции по целеуказаниям бортового комплекса управления (БКУ) из библиотеки эталонной информации (БЭИ) считывается цифровое бинарное изображение ориентира и записывается в ОЗУ эталонной информации (ЭИ).

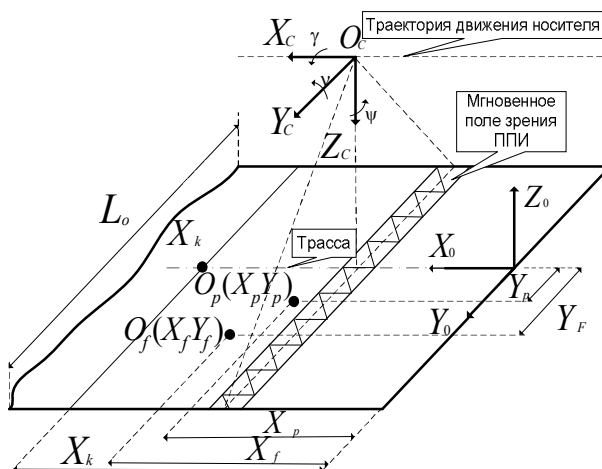
В качестве ориентиров выбираются характерные фрагменты наблюдаемой сцены с известными координатами, лежащие вдоль трассы движения носителя. Содержимое БЭИ при необходимости может дополняться и/или изменяться по программно-командной радиолнии носителя из центра управления.

После выхода носителя на точку начала коррекции из БЗУ считывается первая строка окна анализа и записывается в регистр текущей информации (РТИ) строчного бинарного коррелятора (СБК) (рис. 3). Одновременно из ОЗУ ЭИ считывается первая строка эталона и записывается в регистр эталонной информации (РЭИ). В сравнивающем устройстве (СУ) коррелятора происходит поразрядное сравнение ТИ и ЭИ по заданному алгоритму.

Количество совпадений суммируется в сумматоре Σ , а результат сравнения фиксируется в буферном накопительном регистре (БНР). Затем происходит сравнение второй строки ТИ со второй строкой ЭИ. Результат сравнения суммируется с предыдущим, и т. д.



Р и с . 3 . Структура строчного бинарного коррелятора



Р и с . 4 . Логика работы опто-электронной системы в контуре управления движением

Таким образом, в БНР записывается результат сравнения массива $(m \times n)$ текущей и массива $(m \times n)$ эталонной информации. Анализ проводится за период времени

$$T_T = \frac{1}{f_T}, \quad (8)$$

т. е. времени считывания информации одного элемента с выходного регистра ППИ. При считывании следующего элемента содержимое БЗУ сдвигается на один столбец и сравнение ТИ и ЭИ происходит при новом положении окна анализа. По мере записи новых отсчетов яркости сравнение ТИ и ЭИ будет проводиться при всех возможных положениях ЭИ формата $(m \times n)$ относительно массива ТИ формата $(M \times n)$. В результате в БНР будет регистрироваться значение критериальной функции меры сходства, рассчитанное по алгоритму:

$$R(m, n) = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n F(M, n) \oplus G(M - j, n - i), \quad (9)$$

где $F(M, n)$ – текущий информационный массив, $G(M, n)$ – эталонный информационный массив, $(M \times n)$ – формат текущего массива, $(m \times n)$ – формат эталонного массива.

Отсчеты значений функции меры сходства $R(m, n)$ подаются на устройство поиска экстремума (УПЭ), в котором происходит сравнение предыдущего значения $R_{i-1}(m, n)$ с текущим $R_i(m, n)$. Большее значение $R(m, n)$ запоминается, его положение фиксируется в строчном и кадровом периодах.

Для предотвращения ложных срабатываний значение $R_{\max}(m, n)$ подается на формирователь признака достоверности (ФПД), в котором происходит сравнение

значения $R_{\max}(m, n)$ с порогом R_0 принятия решения о распознавании заданного фрагмента текущей информации. Значение порога рассчитывается заранее при планировании маршрута с учётом условий наблюдения и характера распознаваемого фрагмента изображения исходя из условия получения необходимой вероятности правильного обнаружения при допустимых значениях ложной тревоги.

При выполнении условия

$$R_{\max}(m, n) \geq R_0 \quad (10)$$

ФПД выдает команду на вычислитель координат ориентира (ВКО), который фиксирует положение глобального максимума $R_{\max}(m, n)$ в строчном и кадровом периодах, т. е. фактические координаты (X_φ, Y_φ) ориентира в опорной системе координат $O_0X_0Y_0$.

Логика работы системы в контуре управления и навигации подвижного носителя поясняется рис. 4. При подходе носителя к району коррекции видеoinформация с ППИ через кодирующее устройство (КУ) записывается в ОЗУ ТИ в формате $(m \times n)$. Одновременно по командам с бортового комплекса управления из библиотеки ЭИ считывается цифровое бинарное изображение соответствующего ориентира и записывается в ОЗУ ЭИ. Моменты прохода носителем точек O_0 начала и X_k конца участка коррекции рассчитываются по данным навигационного прогноза с учетом максимально возможных ошибок системы навигации и погрешностей выставки, связанных с носителем системы координат $O_0X_0Y_0Z_0$ относительно базовой $O_\delta X_\delta Y_\delta Z_\delta$ по каналам тангажа ν , рыскания ψ_0 и крена γ . В зависимости от решаемых носителем задач в качестве базовой системы координат могут быть использованы орбитальная, инерциальная и другие системы координат.

По предварительным целеуказаниям комплекса управления рассчитывается программное положение (X_p, Y_p) ориентира в неподвижной опорной системе координат $O_0X_0Y_0Z_0$, центр O_0 которой находится в точке начала участка коррекции и лежит на трассе движения носителя, ось O_0X_0 совпадает с программной трассой и направлена в сторону движения, ось O_0Y_0 лежит поперек направления движения, а ось O_0Z_0 совпадает с местной вертикалью.

Значение программного положения ориентира в опорной системе координат записывается в вычислитель ВКО.

По мере поступления информации с ППИ в блоке корреляционного анализа происходит вычисление критериальной функции меры сходства по алгоритму (9). Значение функции $R(m, n)$ рассчитывается на всем участке коррекции O_0X_k . После прохождения точки X_k участка коррекции в устройстве поиска экстремума (УПЭ) определяется положение глобального максимума $R_{\max}(m, n)$ критериальной функции в строчном и кадровом периодах. По этим данным устройство вычисления координат (ВКО) определяет фактическое положение ориентира в опорной системе координат $O_0X_0Y_0Z_0$ и рассчитывает ошибку целеуказаний основной системы по дальности и боку:

$$\left. \begin{aligned} \Delta X &= X_\varphi - X_p; \\ \Delta Y &= Y_\varphi - Y_p. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Значения отклонений из (11) передаются в бортовой комплекс управления для коррекции его показаний или выдачи команд на исполнительные органы для непосредственного наведения линии визирования целевой аппаратуры на район наблюдения.

Измеренные отклонения имеют две составляющие:

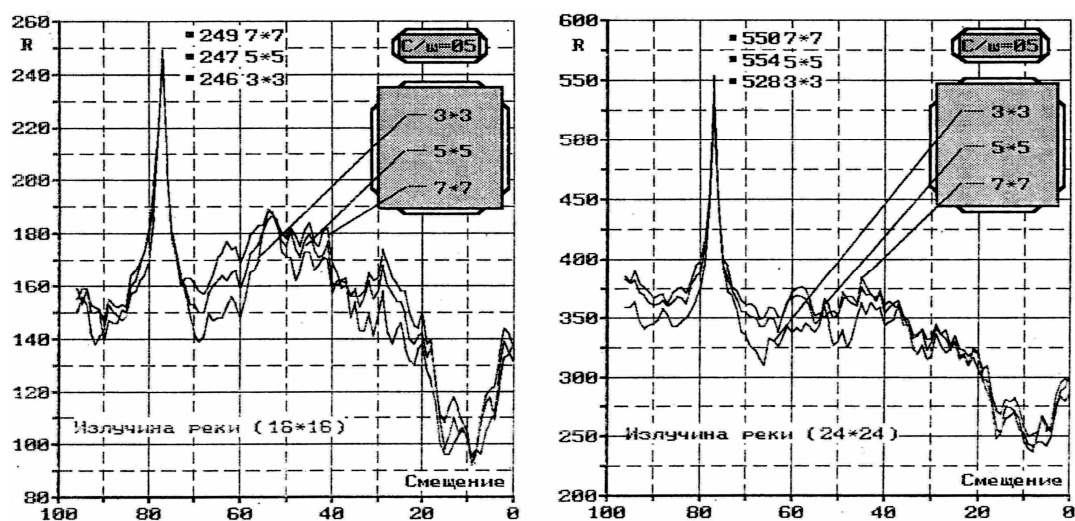
$$(\Delta x, \Delta y) = f_h(\delta x, \delta y) + f_0(\delta v, \delta \psi, \delta \gamma), \quad (12)$$

где $f_h(\delta x, \delta y)$ – ошибка навигационного прогноза, $f_0(\delta v, \delta \psi, \delta \gamma)$ – погрешность формирования базовой системы координат, обусловленная уходом giroприборов основной системы управления.

Без наличия дополнительной информации эти составляющие неразделимы. Возможны два варианта использования измеренных отклонений. В первом случае значения отклонений используются для вычисления поправок в углы визирования оптико-электронной аппаратуры при ее непосредственном наведении на район наблюдения. Этот вариант реализуем, если за интервал времени от прохода носителем точки коррекции до района наблюдения уходы giroприборов малы, что в условиях реальной эксплуатации практически всегда выполняется.

Во втором варианте система используется в режиме траекторной коррекции, при котором предполагается наличие в составе бортовой аппаратуры приемника глобальных спутниковых систем навигации ГЛОНАСС/GPS и/или астродатчиков. В этом случае составляющие результирующей погрешности разделяются и управление наведением носителя осуществляется классическим методом.

В ходе проведения исследований по возможности создания оптико-электронной системы определения местоположения и наведения проводилось математическое и физико-математическое моделирование алгоритмов предварительной обработки видеoinформации, алгоритмов распознавания фрагментов наблюдаемой сцены, а также отработка макетного образца системы на специальном автоматизированном двухкоординатном стенде с имитацией параметров движения носителя относительно наблюдаемой сцены и фоново-целевой обстановки.



Р и с . 5 . Вид функции $R(m, n)$ в районе точки совпадения для ориентира типа «Излучина реки»

Математическое моделирование проводилось с целью оценки влияния на эффективность распознавания таких факторов, как отношение «сигнал/шум» на входе

ПШИ, размер и характер распознаваемого фрагмента, вид предварительной обработки и т. д.

На рис. 5 приведен вид кривых функции меры сходства при соотношении «сигнал/шум» $\psi = 5$, формате распознавания фрагмента (16×16) и (24×24) элемента разложения для различных способов бинарного кодирования видеoinформации [7].

Физико-математическое моделирование проводилось с целью определения требований к характеру эталонной информации и точности ее подготовки при планировании маршрута движения носителя.

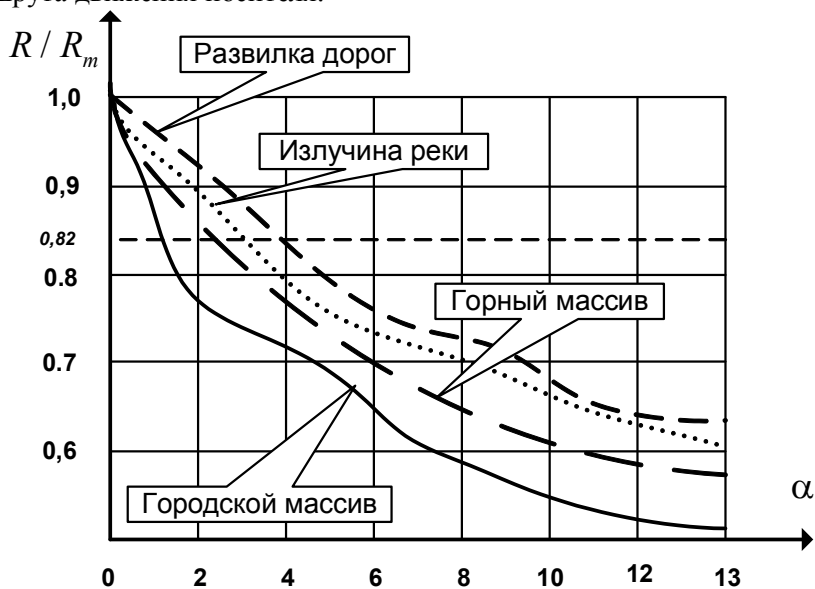


Рис. 6. Зависимость деградации максимума функции $R(m, n)$ от изменений ориентации и масштаба ГИ относительно ЭИ

На рис. 6 приведена зависимость деградации максимума функции меры сходства от изменения ориентации и масштаба текущего информационного массива относительно эталонного для различных типов распознаваемых изображений. Физико-математическое моделирование проводилось на установке, включающей в свой состав: поворотный стол с точностью выставки угла ± 1 угловая минута, однокоординатную автоматическую подвижную платформу с точностью позиционирования ± 5 мкм и пределами перемещения ± 100 мм, а также телевизионную камеру на линейной и/или матричной ПЗС, установленную на штанге и обеспечивающую изменение дальности до наблюдаемой сцены в пределах от 500 мм до 1500 мм с точностью ± 1 мм. Алгоритмы предварительной обработки и корреляционного анализа моделировались программными средствами. Анализ показал, что система определения положения ориентиров обеспечивает надежное функционирование при воздействии допустимых геометрических искажений по ориентации $\pm 2^\circ$, масштабу $\pm 10\%$ и отношению «сигнал/шум» $\psi \geq 5$ при вероятности правильного обнаружения $P \approx 0,82$. Точность определения координат центра опознанного фрагмента соответствует одному элементу разложения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Гарбук С.В., Гершензон В.Е.* Космические системы дистанционного зондирования Земли. – М.: АиБ, 1995. – 296 с.
2. *Казанцев В.М., Белов В.М., Орлов В.Н.* Оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды / Под. ред. В.Н. Рождествина. – М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 528 с.
3. *Белоглазов И.Н., Джинджгава Г.И., Чигин Г.П.* Основы навигации по геофизическим полям. – М.: Наука, 1991. – 396 с.
4. *Сбродов В.В., Леонович Г.И.* Телевизионная система опознавания ориентиров и наведения линии визирования // Труды 1-й Всероссийской науч.-техн. конференции «Технологии двойного назначения», Поволжская СПП МО и РАН. – Самара, 1995. – С. 64-67.
5. *Сбродов В.В., Свиридов В.П., Абрамов А.Д.* Оптико-электронная система опознавания и наведения // Труды юбилейной науч.-техн. конференции «Датчик-98». Т.2. – Гурзуф: Госстандарт, 1998. – С. 314-317.
6. *Баклицкий В.К.* Корреляционно-экстремальные методы навигации и наведения. – Тверь: Книжный клуб, 2009. – 360 с.
7. *Сбродов В.В., Свиридов В.П., Давыдов В.Г.* Исследование эффективности алгоритмов опознавания ориентиров в комбинированных системах управления подвижных объектов // Вестник СамГТУ. Сер. Технические науки. Вып. 8. – Самара, 2002. – С. 179-186.

Статья поступила в редакцию 9 июня 2011 г.

UDK 621.391:629.78

UTILIZING REMOTE SENSING SYSTEMS TO ADDRESS TASKS OF CONTROLLING MOVING OBJECTS

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

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100

The paper dwells on the structure of the correlation and extremum control and navigation unit working from targeting devices of the remote sensing system, and sets out algorithms of the system functioning in the carrier control loop. Outcomes of mathematical modeling and experimental tests are described.

Keywords: *remote sensing, control, navigation, correlation, reference, modeling, targeting.*

*Vladimir V. Sbrodov – Candidate of Technical Sciences, Associate professor.
Vyacheslav P. Sviridov – Candidate of Technical Sciences, Associate professor.
Sergei G. Safronov – Postgraduate student.*