

Научная статья
УДК 520.344.6, 520.342
DOI: 10.34759/vst-2022-1-184-200

СИСТЕМА ОПТИЧЕСКОГО НАБЛЮДЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА И МЕТОД ЕЕ СТАБИЛИЗАЦИИ

Владимир Юрьевич Лупанчук

Министерство обороны Российской Федерации,
Москва, Россия
raketofflu@mail.ru

Аннотация. Проведен анализ основных функций систем оптического наблюдения, устанавливаемых в качестве полезной нагрузки на беспилотные летательные аппараты, и требований к ним. Рассматривается вариант применения каналов телевизионного и инфракрасного диапазона, лазерного дальномера-целеуказателя в составе системы оптического наблюдения. Предложен метод стабилизации двухосного гиростабилизатора, основанный на построении асимптотического оптимального наблюдателя (идентификатора) переменных состояния в условиях неполного вектора состояния параметров измерений, получаемых от гироскопических устройств, при вибрациях, качке, быстрых разворотах или маневрах беспилотного летательного аппарата.

Цель статьи заключается в обосновании варианта системы оптического наблюдения беспилотного летательного аппарата, обеспечивающего необходимую точность оси визирования оптических приборов, установленных на гиростабилизированной платформе, при её низкой точности стабилизации в условиях неполного вектора состояния параметров измерений и возникновения возмущающих моментов.

Ключевые слова: трехканальная гиростабилизированная система оптического наблюдения, многоцелевой беспилотный летательный аппарат, стабилизация возмущающих моментов, вибрационный акселерометр, идентификатор состояния Льюенбергера

Для цитирования: Лупанчук В.Ю. Система оптического наблюдения беспилотного летательного аппарата и метод ее стабилизации // Вестник Московского авиационного института. 2022. Т. 29. № 1. С. 184-200. DOI: 10.34759/vst-2022-1-184-200

Original article

OPTICAL SURVEILLANCE SYSTEM OF UNMANNED AERIAL VEHICLE AND A METHOD OF ITS STABILIZATION

Vladimir Yu. Lupanchuk

Ministry of Defense of the Russian Federation
Moscow, Russia
raketofflu@mail.ru

© Лупанчук В.Ю., 2022

Abstract

The subject of the article relevance is stipulated by the presence of fundamental possibility of solving the axis of sight stabilization problem of the optical means positioned on the movable base of the unmanned aerial vehicle under conditions of low stabilization accuracy of the gyroscopic platform at rapid u-turns, vibration and aerial vehicles maneuvers.

The purpose of the research of the article consists in accuracy increasing of the axis of sight of optical devices installed on a gyro-stabilized platform of an unmanned aerial vehicle.

The object of the study is the optical surveillance system of an unmanned aerial vehicle.

The subject of the study is the process of objects determining by the optoelectronic system of an unmanned aerial vehicle.

The novelty of the research is stipulated by the development and scientific justification of an optical surveillance system of an unmanned aerial vehicle, as a part of television and thermal imaging information channels, a laser rangefinder-designator, as well as mathematically described method for optical surveillance system stabilizing.

Practical significance lies in application of an unmanned aerial vehicle optical surveillance system for objects capturing and tracking by the operator, as well as for objects automatic capture and tracking.

The article presents a block diagram of the gyroscopic stabilization system, as well as mathematical formulation of the problem of the optical surveillance system stabilization of an unmanned aerial vehicle. The stabilizing method of the optical surveillance system of an unmanned aerial vehicle for determining objects, which allows independently estimate the speed and angles of departure of the biaxial gyrostabilizer platform based on the information on the nature of the platform stabilization system gyroscopes movement is substantiated. The stabilization problem solution is based on building an asymptotic optimal observer (identifier) of the biaxial gyrostabilizer state variables with incomplete stabilization coupling. It was assumed herewith that the system was under the effect of statistically indeterminate disturbances.

In general, the simulation revealed the possibility of employing the said algorithms to evaluate the initial position of the platform and calibrate systematic components of the platform departures of the biaxial gyrostabilizer under conditions of a movable base.

Further trends of the research are the methods for images informativity increasing for identification and auto-tracking of the target detection objects by the unmanned aerial vehicle optical surveillance system in abnormal conditions associated with periodical images distortions.

Keywords: three-channel gyro-stabilized optical surveillance system, multipurpose unmanned aerial vehicle, disturbing moments stabilization, vibration accelerometer, Luenberger state identifier

For citation: Lupanchuk V.Yu. Optical surveillance system of unmanned aerial vehicle and a method of its stabilization. *Aerospace MAI Journal*, 2022, vol. 29, no. 1, pp. 184-200. DOI: 10.34759/vst-2022-1-184-200

Введение

С каждым годом увеличивается количество беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), обеспечивающих решение различного спектра специальных задач, связанных с круглосуточной съемкой земной поверхности и различными видами контроля, радиоэлектронным подавлением и ретрансляцией сигналов радиосвязи, распространением материалов информационного воздействия в районе чрезвычайной ситуации, дозаправкой пилотируемых самолетов в полете и т.д. Круглосуточная съемка земной поверхности достигается путем применения двух- или

трех-четырех канальных гиросtabilизированных оптико-электронных средств или систем оптического наблюдения (СОН), входящих в состав целевого оборудования БПЛА.

Известны разные виды гиросtabilизированных систем оптического наблюдения [1]:

— одноканальные СОН видимого/инфракрасного (ИК) диапазонов, включая гиросtabilизированные оптические системы со сменными вариантами информационных каналов, а также одноканальные СОН видимого/ИК-диапазонов с лазерным дальномером;

- двухканальные гиросtabilизированные СОН видимого и ИК-диапазонов, в том числе с лазерным дальномером/целеуказателем;

- трех-четырёхканальные гиросtabilизированные СОН УФ-, видимого, ИК-(ближнего, среднего, дальнего) диапазонов с лазерным дальномером/целеуказателем;

- цифровые одноканальные и многоканальные аэрофотосистемы (ЦАФС);

- гиперспектральные оптико-электронные системы.

На основе анализа современного состояния СОН БпЛА выделены основные функции, обеспечивающие обнаружение и комплексную обработку текущей информации:

- формирование телевизионного изображения местности в оптическом и тепловом диапазонах;

- поиск по программе полетного задания, обнаружение и распознавание оператором объектов в дневное/ночное время, в простых и ограниченно сложных метеоусловиях и в условиях помех;

- определение координат объектов относительно строительных осей БпЛА;

- измерение дальности до цели; подсвет цели и формирование целеуказания лазерным дальномером-целеуказателем;

- захват и сопровождение объектов оператором, автоматический захват и сопровождение цели;

- определение координат объектов по всему полю кадра в масштабе времени, близком к реальному;

- автоматическая блокировка в случае выхода БпЛА за пределы прямой радиовидимости при взлете и посадке, а также в режиме ручного управления командой с наземного пункта управления.

Анализируя технические характеристики, можно выдвинуть ряд требований к перспективным СОН БпЛА:

- встраивание в СОН до трех-четырех информационных оптических каналов (телевизионный, тепловизионный разных диапазонов);

- обеспечение комплексирования разноспектральных изображений и реализация режима «картинка в картинке»;

- обеспечение возможности автоматического обнаружения, распознавания и идентификации типовых объектов;

- возможность применения гиперспектральных каналов для обнаружения замаскированных объектов;

- обеспечение точности стабилизации линии визирования гиросtabilизированной платформы до 15—30 мкрад;

- обеспечение углов обзора в диапазоне 360° в горизонтальной плоскости, $\pm 90^\circ$ в вертикальной плоскости и скорости переброса линии визирования до 100—120 $^\circ/\text{с}$.

Зарубежными и отечественными учеными рассматриваются модели, методы и алгоритмы контроля функционирования СОН на борту БпЛА, в том числе обеспечивающие их стабилизацию в инерциальном пространстве [2—8]. В лучших мировых образцах гиросtabilизированных СОН БпЛА точность стабилизации достигает 15 мкрад [1].

Обеспечение высокой точности влечет за собой противоречие между возможностями увеличения точности стабилизации СОН и утяжелением целевой нагрузки БпЛА. Также при увеличении числа информационных каналов возрастает информационный поток между БпЛА и оператором. В случаях, когда информационный поток большой, используется бортовой флеш-накопитель и обработка данных выполняется после окончания полета на наземном пункте управления, что, в свою очередь, уменьшает автономность и оперативность выполнения задач [9].

Существует ряд перспективных научно-технических решений [10—15], которые направлены на повышение точности стабилизации СОН, автономности и оперативности обработки текущей информации на борту БпЛА, в том числе при функционировании в сложной помеховой обстановке спутниковой навигации. Это влечет за собой повышение требований к навигационному обеспечению, точности определения географических координат объектов и системам автономного управления БпЛА, а также к СОН.

В статье рассматривается научная задача по разработке моделей, методов и алгоритмов, направленных на повышение стабилизации гиросtabilизированной платформы и визирной оси оптических средств в условиях неполного вектора состояния параметров измерений, получаемых от гироскопических устройств, при вибрациях, качке, быстрых разворотах или маневрах БпЛА.

1. Система оптического наблюдения беспилотного летательного аппарата

Представлена СОН БпЛА, в которую включены каналы: телевизионный, коротковолновый ИК-диапазона, средневолновый ИК-диапазона,

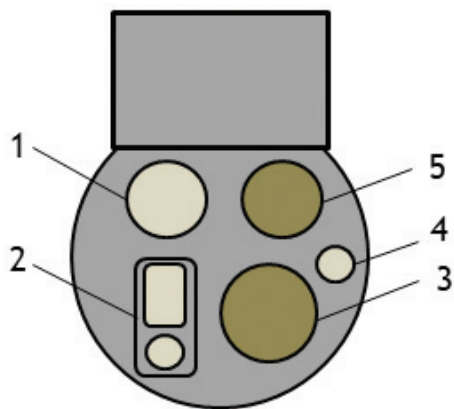


Рис. 1. Внешний вид СОН БПЛА: 1 – телевизионный канал; 2 – лазерный дальномер/целеуказатель; 3 – тепловизионный канал средневолнового инфракрасного диапазона (MWIR); 4 – лазерная указка; 5 – тепловизионный канал коротковолнового инфракрасного диапазона (SWIR)

а также лазерный дальномер-целеуказатель [15]. Внешний вид СОН БПЛА представлен на рис. 1.

Система оптического наблюдения БПЛА содержит три основных функциональных узла:

- оптический блок подвижной части, имеющий обтекаемую форму и содержащий полезную оптическую нагрузку: телевизионный и тепловизионный каналы, лазерный дальномер-целеуказатель, систему стабилизации и вычислитель подвижной части;

- подвижную среднюю часть (вилку), содержащую приводы обеих осей вместе с контроллерами, источник питания и комбинированное вращающееся контактное устройство;

- неподвижную часть, содержащую основной вычислитель, блок интерфейсов и механический демпфер.

Система оптического наблюдения БПЛА обеспечивает выполнение следующих функций:

- формирование интегрированных цифровых видеопотоков, полученных от телевизионного и тепловизионного каналов для фиксированных промежуточных значений полей зрения по каждому из каналов;

- круглосуточно в ограниченно сложных метеоусловиях формирование интегрированного цифрового потока данных фоноцелевой обстановки в оптическом контрасте, полученном с помощью телевизионного канала, и тепловом контрасте, полученном с помощью тепловизионного канала;

- формирование двухспектральных интегрированных цифровых изображений фоноцелевой обстановки;

- обнаружение целей по внешнему целеуказанию в видимом и средневолновом ИК-диапазонах длин волн и их автоматическое сопровождение;

- измерение дальности до цели;

- определение координат цели относительно геометрических осей БПЛА;

- лазерный подсвет обнаруженных объектов;

- автоматическое сопровождение объектов;

- формирование регулируемого строба, в соответствии с угловым размером цели, для предъявления оператору изображений целей;

- встроенный контроль функционирования составных частей оптико-электронной системы БПЛА;

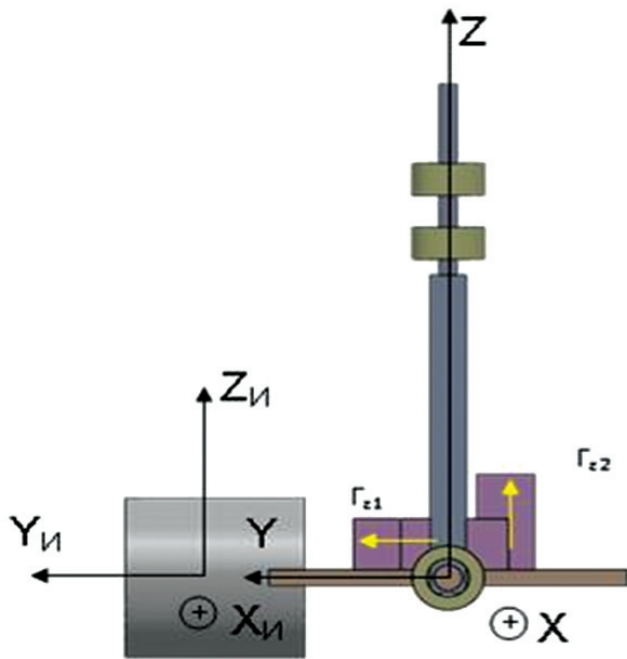
- автоматическая блокировка (приведение в походное положение) СОН при взлете и посадке БПЛА, а также по внешней команде.

Основные недостатки функционирования системы оптического наблюдения БПЛА связаны с низкой точностью стабилизации гироскопической платформы при отсутствии полного вектора измерений параметров состояния и возникновении возмущающих моментов. Точность стабилизации гироскопической платформы корректируется благодаря применению дополнительного блока трехкомпонентных миниатюрных вибрационных акселерометров $A_x A_y A_z$ и совместному их комплексированию с гироскопическими устройствами.

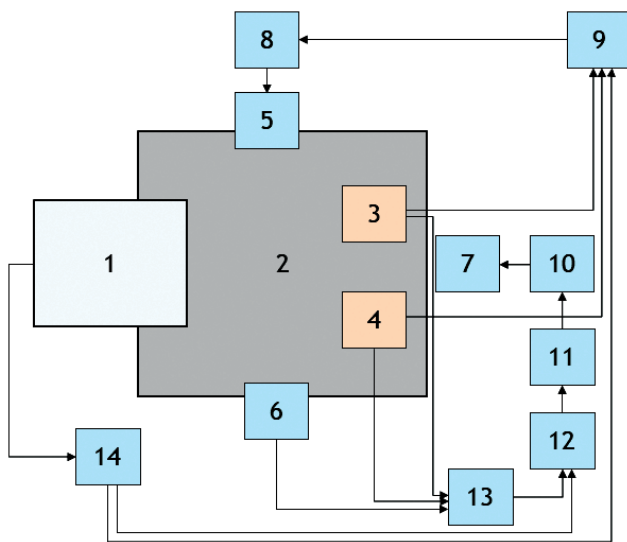
Внешний вид (а), структурная схема (б), взаимное положение осей в связанной системе координат (в) и функциональная схема (г) системы гироскопической стабилизации представлены на рис. 2.

Система гироскопической стабилизации представлена двухосным гиростабилизатором индикаторного типа, который обеспечивает слежение за внешним моментом M_V и с помощью двигателей датчиков момента (привода стабилизации) компенсирует его, удерживая комплекс оптических приборов в неизменном положении (рис. 2,а).

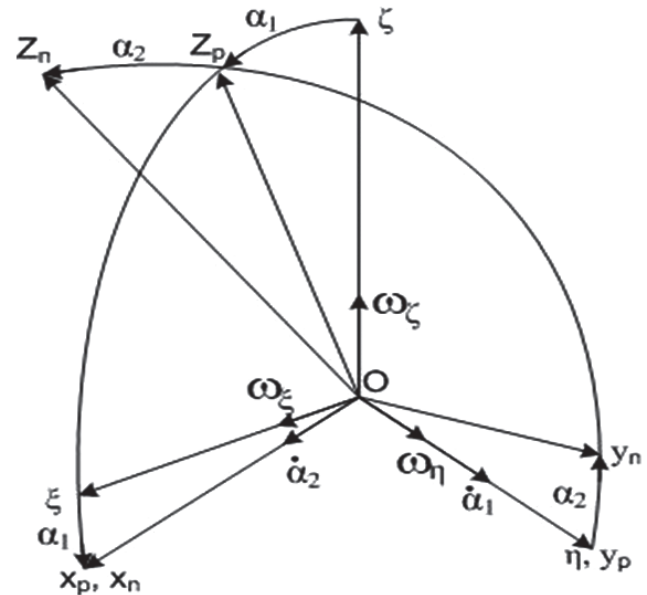
Возмущающий момент по оси стабилизации M_V , действующий на объект стабилизации в двухосном подвесе, вызывает движение объекта стабилизации в инерциальном пространстве. Параметры этого движения углы α и угловые скорости $\dot{\alpha}$ измеряются чувствительным элементом гироскопа, сигнал которого после преобразований, необходимых для получения требуемой точности, удовлетворительных характеристик устойчивости и качества регулирования, поступает на приводы стабилизации.



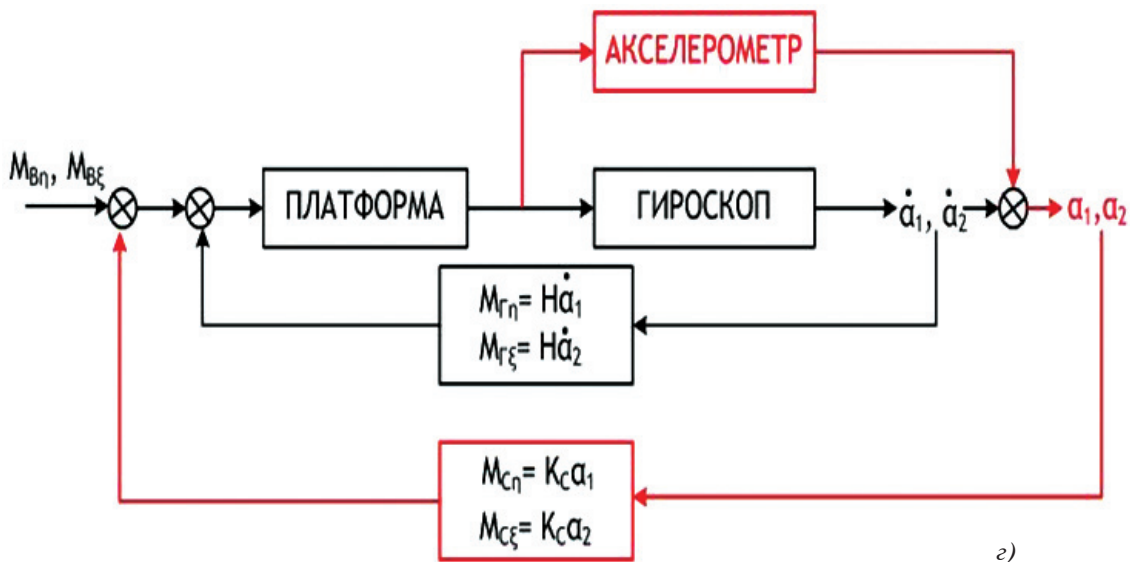
а)



б)



в)



г)

Рис. 2. Внешний вид и структурная схема системы гироскопической стабилизации БПЛА: а — внешний вид; б — структурная схема; в — взаимное положение осей в связанной системе координат; г — функциональная схема

Приводы прикладывают к объекту стабилизации момент обратной связи M_{OS} , уравновешивающий момент внешних сил M_{ν} . При этом движение гироскопа не оказывает силового воздействия на платформу, что позволяет применять в качестве чувствительного элемента гиросtabilизатора малогабаритные гироскопы, а также лазерные, волоконно-оптические и микромеханические гироскопы.

Структурная схема системы гироскопической стабилизации (рис. 2, б) состоит из комплекса оптических приборов 1, гироскопической платформы 2 с установленными на ней блоком 3 гироскопических чувствительных элементов по трем осям $G_X G_Y G_Z$ и блоком 4 трехкомпонентных миниатюрных вибрационных акселерометров $A_X A_Y A_Z$, двухосевого карданова подвеса с консольным креплением оси наружной рамы, привода горизонтальной плоскости 5, датчика угла вертикальной плоскости 6, датчика угла горизонтальной плоскости 7, усилительно-преобразующего устройства сигнала горизонтальной плоскости 8, интегратора сигнала горизонтальной плоскости 9, привода вертикальной плоскости 10, усилительно-преобразующего устройства сигнала вертикальной плоскости 11, интегратора сигнала вертикальной плоскости 12, преобразователя координат 13, блока управления 14.

Система стабилизации включает в себя два контура обратной связи системы стабилизации и два контура обратной связи системы автоматического управления. При осуществлении ручного режима управления гиросtabilизатором контуры обратной связи системы управления разомкнуты.

В режиме стабилизации по оси Z (горизонтальной оси) при любых вертикальных углах сигналы гироскопических чувствительных элементов поступают в преобразователь координат, где в соответствии с показаниями угла поворота объекта стабилизации формируется комбинированный сигнал гироскопических чувствительных элементов. Сигнал через усилительно-преобразующее устройство поступает на привод стабилизации. Управление по оси Z осуществляется подачей управляющего сигнала с блока управления в канал обратной связи контура стабилизации.

При углах поворота объекта стабилизации вокруг вертикальной оси, близких к 90° , может произойти потеря работоспособности гиросtabilизатора. Для сохранения работоспособности двухосного гиросtabilизатора применяется второй гироскопический чувствительный элемент,

ось чувствительности которого перпендикулярна оси чувствительности первого чувствительного элемента, а также применяется блок трехкомпонентных миниатюрных вибрационных акселерометров в качестве дополнительного источника регистрации возмущений. Гироскопические средства позволяют рассматривать линейные перемещения гироскопической платформы, при совместном применении с вибрационными акселерометрами они позволяют описать нелинейные или квазилинейные перемещения гироскопической платформы.

При любых вертикальных углах работоспособность гиросtabilизатора сохраняется либо путем переключения канала стабилизации по оси Z с одного гироскопического чувствительного элемента на второй в зависимости от вертикального угла, либо комбинацией двух гироскопических чувствительных элементов с весовым коэффициентом, в том числе при условии работоспособности блока трехкомпонентных миниатюрных вибрационных акселерометров.

Режим стабилизации по оси X (вертикальной оси), связанной с изображением, осуществляется посредством подачи сигнала гироскопического чувствительного элемента через усилительно-преобразующее устройство на привод стабилизации, управление осуществляется подачей управляющего сигнала с блока управления в канал обратной связи контура стабилизации.

Состояние и режимы работы системы стабилизации СОН БпЛА: состояние механического арретирования, когда гиросtabilизатор включен, комплекс оптических приборов жестко связан с БпЛА механическими арретирами, оптические оси приборов направлены вертикально вверх, для защиты оптического блока подвижной части; состояние электрического арретирования, когда гиросtabilизатор включен, гироскопическая стабилизация включена, сигналы с датчиков углового положения объекта стабилизации поступают на приводы стабилизации по соответствующим осям, объект стабилизации связан с БпЛА, осуществляется выставка оптических осей приборов в перпендикулярное оси курса положение; состояние гироскопической стабилизации в инерциальном пространстве с возможностью ручного управления в горизонтальной и вертикальной плоскостях, производится обзор земной поверхности, мониторинг и поиск объектов; состояние захвата и сопровождения объектов, гироскопическая стабилизация включена, включена система автоматического управления гиросtabilизатора.

стабилизатором по сигналам отклонения линии визирования от оптической оси, получаемым после обработки изображений с оптических приборов.

Далее предлагается математическое описание метода стабилизации СОН БПЛА, основанного на формировании идентификаторов состояния.

2. Метод стабилизации системы оптического наблюдения БПЛА при определении объектов

Постановка задачи исследования.

Дано: связь параметров модели состояний системы оптического наблюдения БПЛА (отображение $h_i, i \in \overline{1, m}$) в дискретные моменты времени отображается в различные множества результатов измерений Y_i гироскопических устройств и акселерометров, установленных на гироскопической платформе и характеризующих уход гироскопической платформы от первоначального положения, что можно записать в виде уравнения измерений в дискретные моменты времени (рис. 3) [16]:

$$y(t) = h_i [x(t), t] + v(t), \quad (1)$$

где $y(t)$ – вектор результатов измерений; $h_i[\cdot]$ – векторная функция измерений; $x(t)$ – вектор состояний; $v(t)$ – вектор ошибок измерений; t – время перехода к базису некоторого подмножества $x^* \in x$,

$$x^*(t) = g[y(t)] + \eta(t), \quad (2)$$

где $g[\cdot]$ – оператор обратный $h_i[\cdot]$ для подмножества $x^* \in x$; $\eta(t)$ – составляющая методической погрешности оператора $g[\cdot]$;

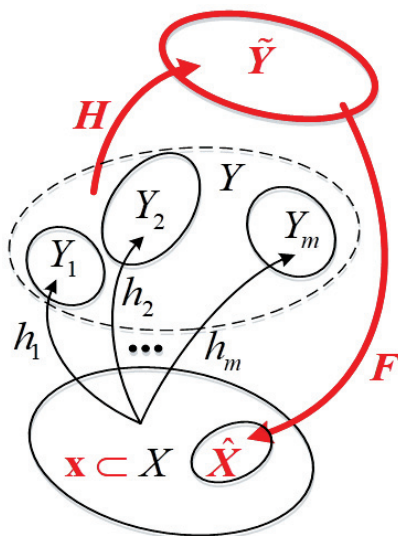


Рис. 3. К формализации задачи исследования

множество временных отсчётов $\tilde{T} = \bigcup_{i=1}^m T_i$ в соответствующих пространствах $Y_i \times T_i$ ($i \in \overline{1, m}$) и $\tilde{Y} \times \tilde{T}$;

множество зарегистрированных измерительных данных отображается (H) в соответствующих пространствах $Y_i \times T_i$ ($i \in \overline{1, m}$) и $\tilde{Y} \times \tilde{T}$;

комплексированное множество \tilde{Y} отображается (отображение F) во множество оценок \hat{X} (параметров ухода): $F: \tilde{Y} \rightarrow \hat{x} \in \hat{X} \subset R^n$ в пространстве $\hat{X} \times \tilde{T} \subset R^n \times R$ конечной размерности, которое не совпадает с исходным пространством $X \times T \subset R^\infty \times R$ реальной физической системы и является его ограниченной проекцией.

Требуется: получить оценку $\hat{x}(t)$ вектора состояний $x(t)$ гироскопической платформы, определить оптимальное положение системы оптического наблюдения БПЛА при проведении мониторинга объектов, а также обеспечить выполнение свойства:

$$\hat{x}(t) - x(t) \rightarrow 0 \text{ при } t \rightarrow \infty.$$

Метод стабилизации СОН БПЛА при определении объектов. Введем обозначения для математической модели измерительной системы и представим как динамическую систему, которой описано состояние системы:

$$x_1 = \dot{\alpha}, x_2 = \alpha, x_3 = \dot{\beta}, x_4 = \beta, x_5 = \alpha_0, x_6 = \beta_0,$$

$$x_7 = \omega_\alpha^0, x_8 = \omega_\beta^0, x_9 = \int_0^t \omega_\alpha, x_{10} = \int_0^t \omega_\beta, x_{11} = M_V,$$

$$x_{12} = V_{\text{ВИБ}}, x_{13} = W_{\text{ВИБ}}, x_{14} = \dot{\epsilon}, x_{15} = \epsilon, x_{16} = \tilde{\alpha},$$

$$x_{17} = \dot{\tilde{\alpha}}, x_{18} = \tilde{\beta}, x_{19} = \dot{\tilde{\beta}}, x_{20} = \Delta \dot{\alpha}, x_{21} = \Delta \alpha,$$

$$x_{22} = \Delta \dot{\beta}, x_{23} = \Delta \beta, x_{24} = \Delta \dot{\epsilon}, x_{25} = \Delta \epsilon,$$

где $\dot{\alpha}, \alpha$ – скорость и угол ухода платформы в горизонтальной плоскости, фиксируются гироскопом; $\dot{\beta}, \beta$ – скорость и угол ухода платформы в вертикальной плоскости, фиксируются гироскопом; α_0, β_0 – начальное положение СОН в горизонтальной и вертикальной плоскостях;

$\int_0^t \omega_\alpha, \int_0^t \omega_\beta$ – приращение угловой скорости ухода платформы в горизонтальной и вертикальной плоскостях; M_V – возмущающий момент; $V_{\text{ВИБ}}, W_{\text{ВИБ}}$ – проекция кажущейся вибрационной скорости и виб-

рационального ускорения корпуса акселерометра на его ось чувствительности; $\dot{\epsilon}, \epsilon$ – скорость и перемещение акселерометра; $\tilde{\alpha}, \dot{\tilde{\alpha}}, \tilde{\beta}, \dot{\tilde{\beta}}$ – расчетное значение отклонения платформы в горизонтальной и вертикальной плоскостях;

$\Delta\dot{\alpha}, \Delta\alpha, \Delta\dot{\beta}, \Delta\beta, \Delta\dot{\epsilon}, \Delta\epsilon$ – отклонение платформы относительно расчетного значения по гироскопическим устройствам и акселерометрам.

Вектор параметров состояния имеет вид

$$x^T = \left[\begin{array}{cccccccccccc} \dot{\alpha} & \alpha & \dot{\beta} & \beta & \alpha_0 & \beta_0 & \omega_\alpha^0 & \omega_\beta^0 & \int_0^t \omega_\alpha & \int_0^t \omega_\beta & M_V & V_{\text{ВИБ}} \\ W_{\text{ВИБ}} & \dot{\epsilon} & \epsilon & \dot{\tilde{\alpha}} & \tilde{\alpha} & \dot{\tilde{\beta}} & \tilde{\beta} & \Delta\dot{\alpha} & \Delta\alpha & \Delta\dot{\beta} & \Delta\beta & \Delta\dot{\epsilon} & \Delta\epsilon \end{array} \right]. \quad (3)$$

Далее рассматривается описание вектора параметров состояния двухосного гиростабилизатора в виде линейной системы и квазилинейной системы для полной и неполной обратной связи стабилизации.

Описание двухосного гиростабилизатора в виде линейной системы с полной обратной связью при стабилизации. Представим двухосный гиростабилизатор в виде объекта управления с полной обратной связью при стабилизации программных движений управляемых динамических систем, который описывается линейной системой вида [17]

$$\dot{x} = \mathbf{P}x(t) + \mathbf{Q}u(t) + \mathbf{f}(t), \quad (4)$$

где $x \in R^n$ – вектор фазового состояния динамической системы; $u \in R^r$ – вектор управлений; \mathbf{P}, \mathbf{Q} – постоянные вещественные матрицы соответствующих размерностей; $\mathbf{f}(t)$ – вещественная, непрерывная вектор-функция, заданная при $t \in [0, \infty)$. Для решения уравнения (4) требуется построить вектор управлений, обеспечивающий стабилизацию объекта управления:

$$u(t) = \sum_{j=1}^N \left(u_j + C(x - x_j) - 2u_j \sum_{i=1, i \neq j}^N \frac{(x_j - x_i)(x - x_j)}{(x_j - x_i)^2} \right) p_j(x, t), \quad (5)$$

где

$$p_j(x, t) = \prod_{i=1, i \neq j}^N \frac{(x - x_i)^2}{(x_j - x_i)^2}, \quad j = \overline{1, N}.$$

Вектор отклонений от программных режимов $(x - x_j)$ считался доступным для измерений, задано уравнение измерений

$$z_j(t) = \mathbf{R}y_j(t), \quad j = \overline{1, N}, \quad (6)$$

где $z_j(t) \in R^m$ – вектор измерений; \mathbf{R} – постоянная, вещественная матрица.

Уравнение (6) является уравнением выхода, а вектор $z_j(t)$ – выходом системы. Зная выход, надо построить такую оценку $\hat{y}_j(t)$ вектора $y_j(t)$, чтобы она обладала свойством

$$y_j(t) - \hat{y}_j(t) \rightarrow 0, \quad t \rightarrow \infty. \quad (7)$$

При движении динамической системы фиксируется некоторое движение $x_k(t)$. С учетом

$$y_k(t) = x(t) - x_k(t), \quad \hat{y}_k(t) = \hat{x}(t) - x_k(t)$$

система (4) примет вид

$$\begin{aligned} \dot{y}_k &= \mathbf{P}y_k + \mathbf{Q}\mathbf{C}\hat{y}_k + \mathbf{H}_k(\hat{y}_k), \\ \mathbf{H}_k(\hat{y}_k) &= \mathbf{Q} \left(\mathbf{C}\hat{y}_k - 2u_k \sum_{i=1, i \neq k}^N \frac{(x_k - x_i)\hat{y}_k}{(x_k - x_i)^2} \right) \times \\ &\times \left(2 \sum_{i=1, i \neq k}^N \frac{(x_k - x_i)\hat{y}_k}{(x_k - x_i)^2} + h_k(\hat{y}_k) \right) + \mathbf{Q}u_k h_k(\hat{y}_k) + \\ &+ \mathbf{Q} \sum_{i=1, i \neq k}^N \left(u_j + \mathbf{C}(\hat{y}_k + x_k - x_j) - \right. \\ &\left. - 2u_j \sum_{i=1, i \neq j}^N \frac{(x_j - x_i)(\hat{y}_k + x_k - x_j)}{(x_j - x_i)^2} \right) p_j(\hat{y}_k + x_k), \end{aligned} \quad (8)$$

где $h_k(\hat{y}_k)$ – скалярная функция, порядок которой по компонентам вектора не меньше двух.

Выражение (8) можно рассмотреть с учетом дискретного управления в виде кусочно-постоянной векторной функции $v_k = \mathbf{C}\hat{y}_k$:

$$\dot{y}_k = \mathbf{P}y_k + \mathbf{Q}v_k + \mathbf{H}_k(\hat{y}_k, v_k). \quad (9)$$

Вектор состояния оценивается с помощью идентификатора состояний. Для выражения (8) в работе [18] предлагается использовать идентификатор вида

$$\dot{\hat{y}}_k = \mathbf{P}\hat{y}_k + \mathbf{Q}v_k + \mathbf{L}(z_k - \mathbf{R}\hat{y}_k) + \mathbf{H}_k(\hat{y}_k, v_k), \quad (10)$$

где \mathbf{L} – матрица параметров идентификатора, которую необходимо определить.

Для отыскания $\mathbf{L}(z_k - \mathbf{R}\hat{y}_k)$ выражения (9), (10) объединяют в одну систему уравнений:

$$\begin{cases} \dot{y}_k = \mathbf{P}y_k + \mathbf{Q}v_k + \mathbf{H}_k(\hat{y}_k, v_k), \\ \dot{\hat{y}}_k = \mathbf{P}\hat{y}_k + \mathbf{Q}v_k + \mathbf{L}(z_k - \mathbf{R}\hat{y}_k) + \mathbf{H}_k(\hat{y}_k, v_k). \end{cases} \quad (11)$$

В выражение (10) вводится оценка, которая отражает качество состояния и может быть использована для анализа оценки выходного значения измерений согласно (6). Тогда (9) имеет вид

$$\begin{pmatrix} \dot{y}_k \\ \dot{\hat{y}}_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{P} + \mathbf{QC} & -\mathbf{QC} \\ 0 & \mathbf{P} - \mathbf{LR} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_k \\ \hat{y}_k \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{H}_k(y_k - \hat{y}_k, \mathbf{C}(y_k - \hat{y}_k)) \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (12)$$

В результате задача стабилизации сводится к выбору матрицы \mathbf{C} и \mathbf{L} таким образом, чтобы нулевое решение системы было асимптотически устойчиво по А.М. Ляпунову [19], когда возмущенное состояние системы стремится вернуться в невозмущенное состояние

$$\sum_{i=1}^n x_i^2(t) < \epsilon, \quad (13)$$

где $x_i(t)$ – совокупность отклонений системы в пространстве состояний, описывается точкой M , при возмущении точка будет описывать траекторию изменения параметров; ϵ – максимальное отклонение системы, характеризующее границу устойчивости системы в задаче стабилизации.

Границу устойчивости системы стабилизации можно представить как нижнюю границу точности измерений v_k для выражения (13), которая может определяться через дисперсию разности между требуемым программным значением состояния системы и ее оценкой согласно [20] и для выражения (13) имеет вид

$$v_k = M[\hat{y}_k(t)\hat{y}_k^T(t)], \quad v_k^j = \hat{x}_k^j - x_k^j. \quad (14)$$

Тогда ошибка системы стабилизации $\mathbf{E}(t)$ определяется как

$$\mathbf{E}(t) = \left[\Psi(t, t_0) z(t_0) + \int_{t_0}^t \mathbf{x}(t, \tau) d\tau \right] - \mathbf{G}(t, v), \quad (15)$$

где $\Psi(t, t_0)$ – дискретная функция в виде матрицы, обладающая свойствами фундаментальной матрицы [21]; $z(t_0)$ – вектор измерений в началь-

ный момент времени; $\int_{t_0}^t \mathbf{x}(t, \tau) d\tau$ – приращение входного вектора состояний; $\mathbf{G}(t, v)$ – функция требуемой ошибки измерений (нижняя граница).

Математическое ожидание ошибки системы $\mathbf{m}_E(t)$ с учетом выражения (15) может определяться в виде

$$\begin{aligned} \mathbf{m}_E(t) &= \left[\Psi(t, t_0) M[z(t_0)] + M \left[\int_{t_0}^t \mathbf{x}(t, \tau) d\tau \right] \right] - \\ &\quad - M[\mathbf{G}(t, v)]; \\ \mathbf{m}_E(t) &= \left[\Psi(t, t_0) \mathbf{m}_Z(t_0) + M \left[\int_{t_0}^t \mathbf{x}(t, \tau) d\tau \right] \right] - \\ &\quad - \mathbf{m}_G(t, v), \end{aligned} \quad (16)$$

где $\mathbf{m}_Z(t_0)$ – математическое ожидание вектора измерений; $M \left[\int_{t_0}^t \mathbf{x}(t, \tau) d\tau \right]$ – математическое ожидание входного вектора состояний; $\mathbf{m}_G(t, v)$ – математическое ожидание требуемой ошибки измерений (нижней границы).

Корреляционная функция скалярной ошибки системы $\mathbf{K}_E(t_1, t_2)$, с учетом формулы центрированной составляющей ошибки и с учетом (16) при условии отсутствия корреляции между входным и выходным векторами имеет вид

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_E(t_1, t_2) &= \Psi(t_1, t_2) D[z(t_0)] + \\ &+ \int_{t_0}^{t_1} \int_{t_0}^{t_2} K_X(\tau_1, \tau_2) d\tau_1 d\tau_2 + K_G(t_1, t_2) - \\ &- \int_{t_0}^{t_1} K_{XG}(\tau, t_2) d\tau - \int_{t_0}^{t_2} K_{XG}(\tau, t_2) d\tau, \end{aligned} \quad (17)$$

где $D[z(t_0)]$ – дисперсия вектора измерений;

$\int_{t_0}^{t_1} \int_{t_0}^{t_2} K_X(\tau_1, \tau_2) d\tau_1 d\tau_2$ – корреляция между двумя ближайшими состояниями; $K_G(t_1, t_2)$ – корреляция между требуемыми ошибками измерений

(нижних границ); $\int_{t_0}^{t_1} K_{XG}(\tau, t_2) d\tau, \int_{t_0}^{t_2} K_{XG}(\tau, t_2) d\tau$ – корреляция между входным состоянием и требуемыми ошибками измерений (нижних границ).

Дисперсия ошибки системы с учетом (16), (17) имеет вид

$$D_E(t) = \left[\Psi(t) D[z(t_0)] + \int_{t_0}^t \int_{t_0}^t K_X(\tau_1, \tau_2) d\tau_1 d\tau_2 - \right. \\ \left. - 2 \int_{t_0}^t K_{XG}(\tau, t) d\tau \right] - D[G(t, v)], \quad (18)$$

где $D[G(t, v)]$ – требуемая дисперсия ошибок измерений (нижней границы).

Представлено математическое описание состояний системы стабилизации, с учетом формирования идентификатора состояния при условии асимптотической устойчивости по А.М. Ляпунову. В качестве границы устойчивости предложено ввести нижнюю границу точности для системы измерений, которая характеризуется дисперсией разности между требуемым программным значением состояния системы и ее оценкой. Сформулированы условия для нахождения ошибки стабилизации, ее математического ожидания, корреляции и дисперсии между программными значениями и текущими оценками состояния системы стабилизации.

Описание двухосного гиростабилизатора в виде квазилинейной системы с неполной обратной связью при стабилизации. Двухосный гиростабилизатор рассматривается в виде динамической системы, которая меняет свое фазовое положение с течением времени при условии возмущающих воздействий [22]:

$$\dot{x} = Ax(t) + Bv(t) + f(t) + \mu Q(t, x, v, \mu), \quad (19)$$

где $x(t)$ – n -мерный вектор фазового состояния; $v(t)$ – r -мерный вектор управлений ($u(t) = 0$); $A(t)$, $B(t)$ – матрицы (компоненты) векторов изменения фазового состояния и управления; $Q(t, x, v, \mu)$ – вещественная непрерывно дифференцируемая по компонентам x, u вектор-функция; $\mu \geq 0$ – малый параметр.

При условии отсутствия параметров состояний задача стабилизации с полной обратной связью переходит в задачу стабилизации с неполной обратной связью. Управление с неполной обратной связью имеет вид [23]

$$u(\hat{x}, t) = \sum_{j=1}^N \left(u_j + C(x - x_j) - \right. \\ \left. - 2u_j \sum_{i=1, i \neq j}^N \frac{(x_j - x_i)(\hat{x} - x_j)}{(x_j - x_i)^2} \right) p_j(x, t), \quad (20)$$

где

$$p_j(x, t) = \prod_{i=1, i \neq j}^N \frac{(\hat{x} - x_i)^2}{(x_j - x_i)^2}, \quad j = \overline{1, N}.$$

В общем случае исходная модель преобразуется в уравнения состояний двухосного гиростабилизатора и уравнение измерений (выхода), которые в векторно-матричной форме имеют вид:

$$\dot{x} = Ax(t) + Bu(t) + \mu G(t, x, u, \Delta M); \\ G(t, x, u, \Delta M) = Q(t, x + x_p(t), u + v_p(t), \mu) - \\ - Q(t, x_p(t), v_p(t), \mu); \\ y(t) = Rx(t) + v(t); \quad (21)$$

$$\dot{\hat{x}} = (Ax(t) - KR)\hat{x}(t) + K(Rx(t) + v(t)),$$

где $x(t)$ – вектор состояний; $y(t)$ – вектор измерений в условиях полной информации; $v(t)$ – вектор ошибок измерений; \hat{x} – оценка вектора состояния; K_i – подматрицы коэффициентов идентификатора.

Выражение (21) для трехосного гиростабилизатора описано в научных трудах [24, 25], но не рассматривался вариант формирования идентификаторов с условием временной динамики вектора измерений, при котором выбирается оптимальное соотношение вектора измерений с учетом нижней границы точности.

В качестве идентификатора для неполной обратной связи стабилизации на подвижном основании многоцелевого БПЛА используется идентификатор Люенбергера. Для (20) требуется выбрать комбинации вектора измерений $z(t)$ в условиях неполной информации для компонентов вектора состояний $x(t)$:

$$z(t) = Tx(t), \text{ при условии } M = \begin{pmatrix} T \\ R \end{pmatrix}, z(t) - \hat{z}(t) \rightarrow 0 \\ \text{при } t \rightarrow +\infty. \quad (22)$$

С учетом (21), (22) согласно [26] система уравнений имеет вид

$$\begin{pmatrix} y(t) \\ z(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{T} \\ \mathbf{R} \end{pmatrix} x(t), \quad x(t) = \begin{pmatrix} \mathbf{T} \\ \mathbf{R} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} z(t) \\ y(t) \end{pmatrix},$$

$$\hat{x}(t) = \begin{pmatrix} \mathbf{T} \\ \mathbf{R} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \hat{z}(t) \\ y(t) \end{pmatrix}. \quad (23)$$

С учетом (20), (21), (23) система примет вид

$$\begin{cases} \dot{z} = \mathbf{A}_{zz}(t)z + \mathbf{A}_{zy}(t)y + \mathbf{B}_z(t)u + \mu \mathbf{G}_z(t, z, y, u, \mu), \\ \dot{y} = \mathbf{A}_{yz}(t)z + \mathbf{A}_{yy}(t)y + \mathbf{B}_y(t)u + \mu \mathbf{G}_y(t, z, y, u, \mu); \end{cases}$$

$$\mathbf{MA}(t)\mathbf{M}^{-1} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_{zz}(t) & \mathbf{A}_{zy}(t) \\ \mathbf{A}_{yz}(t) & \mathbf{A}_{yy}(t) \end{pmatrix}, \quad \mathbf{MB}(t) = \begin{pmatrix} \mathbf{B}_z(t) \\ \mathbf{B}_y(t) \end{pmatrix}; \quad (24)$$

$$\mathbf{MG} \left(t, \mathbf{M}^{-1} \begin{pmatrix} z \\ y \end{pmatrix}, u, \mu \right) = \begin{pmatrix} \mathbf{G}_z(t, z, y, u, \mu) \\ \mathbf{G}_y(t, z, y, u, \mu) \end{pmatrix}.$$

Идентификатор Люенбергера для построения оценки $\hat{x}(t)$ имеет вид

$$\dot{\hat{z}} = \mathbf{A}_{zz}\hat{z}(t) + \mathbf{A}_{zy}y(t) + \mathbf{B}_z u(t) + \mu \mathbf{G}_z(t, \hat{z}, y, u, \mu). \quad (25)$$

Для построения стабилизирующего управления при построении идентификатора Люенбергера рассматривается объединенная система уравнений, первое из которых есть уравнение состояний, а второе — уравнение динамики качества оценки вектора измерений. Динамика вектора измерений в условиях неполной стабилизации зависит от временной привязки результатов измерительных средств (синхронизация временных шкал), аппроксимации и приведения результатов измерений к единой шкале временных отчетов, а также от моделирования (восстановления) измерительных данных на интервалах их искажений или пропусков (потерь).

Согласно [27–29] с учетом погрешностей динамика вектора измерений (22) имеет вид:

$$\mathbf{Z}(t) = \mathbf{T}[x(t), t] + \Psi(t);$$

$$\begin{cases} z_1(t) = \mathbf{T}_1[x(t), t] + \psi_1(t), \\ \dots \\ z_i(t) = \mathbf{T}_i[x(t), t] + \psi_i(t), \\ \dots \\ z_m(t) = \mathbf{T}_m[x(t), t] + \psi_m(t); \end{cases}$$

$$\mathbf{Z}(t) = \{z_1(t), z_2(t), \dots, z_m(t)\}; \quad (26)$$

$$\mathbf{T}[x(t), t] = \{\mathbf{T}_1[x(t), t], \mathbf{T}_2[x(t), t], \dots, \mathbf{T}_m[x(t), t]\};$$

$$\Psi(t) = \{\psi_1(t), \psi_2(t), \dots, \psi_m(t)\},$$

где $\mathbf{Z}(t)$ – выходная матрица системы стабилизации для неполной обратной связи; $\Psi(t)$ – матрица погрешностей измерений, характеризуется составляющей «белый шум».

В дальнейшем, принимая во внимание дискретность временных моментов измерений при формировании вектора состояний динамической системы, выбор погрешностей в выборке средств измерений при оценке вектора состояния измерений уравнение (26) можно записать в виде

$$\tilde{z}(t_k^*) = \tilde{\mathbf{T}}[x(t_k^*), t_k^*] + \tilde{\Psi}(t_k^*), \quad (27)$$

где t_k^* – временные моменты измерений из множества временных моментов измерений $T = \bigcup_{i=1}^m \bigcup_{j=1}^N t_{ij}$ привлекаемых измерительных средств и систем; $\tilde{\mathbf{T}}[x(t_k^*), t_k^*]$ – матрица измерений вектора:

$$\tilde{\mathbf{T}}[x(t_k^*), t_k^*] = \begin{bmatrix} \lambda_{1k} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_{1k} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \lambda_{1k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{T}_1[x(t_k^*), t_k^*] \\ \mathbf{T}_2[x(t_k^*), t_k^*] \\ \dots \\ \mathbf{T}_m[x(t_k^*), t_k^*] \end{bmatrix} =$$

$$= \Lambda(t_k^*) \cdot \tilde{\mathbf{T}}[x(t_k^*), t_k^*] \quad (28)$$

$$\text{при } \lambda_{lk} = \begin{cases} 1, & \text{если } t_{il} \in T, \quad \forall l \in [0, N], \\ 0, & \text{если } t_{il} \notin T, \quad \forall l \in [0, N]. \end{cases}$$

Ковариационная матрица векторной случайной помехи $\tilde{\Psi}(t_k^*)$ для модели измерений (27) будет иметь вид

$$\tilde{P}(t_k^*) = \Lambda(t_k^*) \cdot P_\Psi(t_k^*) \cdot \Lambda^T(t_k^*). \quad (29)$$

Требуется получить максимизированную оценку вектора измерений в момент времени t_k^* :

$$\tilde{z}(t_k^*) = \arg \max_{z_m(t) \in Z(t)} f(z_m(t)). \quad (30)$$

Для обеспечения эффективности оценка вектора измерений (30) должна обладать следующими свойствами:

1. Число систем измерений априорно известно.

2. Ошибка измерений $\tilde{\Psi}(t_k^*)$ в (27) является независимой нормально распределенной случайной величиной с нулевым средним $M[\tilde{\Psi}(t_k^*)] = 0$ и известной постоянной дисперсией $D_{\tilde{\Psi}(t_k^*)} = \sigma_{\tilde{\Psi}(t_k^*)}^2$ при всех $i = 1, \dots, m$.

3. Дисперсия отклика систем измерения $\mathbf{Z}(t)$ постоянна или является известной функцией номера наблюдения $i = 1, \dots, m$.

4. Функция распределения $F(z_m(t))$ одинакова при всех $i = 1, \dots, m$.

5. Число измерений существенно больше числа систем измерений.

$$\mathbf{Z}(t) = \mathbf{B}\mathbf{T}[x(t), t] + \Psi(t), \quad (31)$$

где \mathbf{B} – матрица весовых коэффициентов систем измерений.

Тогда критерий имеет вид

$$q = \sum_{i=1}^m (z_i(t) - \mathbf{B}\mathbf{T}[x(t), t])^2, q \rightarrow \min. \quad (32)$$

Согласно [30] решение можно получить по методу наименьших квадратов (МНК):

$$\begin{aligned} & [\tilde{\Psi}(t_k^*)]' [\tilde{\Psi}(t_k^*)] = \\ & = [\mathbf{Z}(t) - \mathbf{B}\mathbf{T}[x(t), t]]' [\mathbf{Z}(t) - \mathbf{B}\mathbf{T}[x(t), t]]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & [\tilde{\Psi}(t_k^*)]' [\tilde{\Psi}(t_k^*)] = \mathbf{Z}'(t)\mathbf{Z}(t) - \mathbf{Z}'(t)\mathbf{B}\mathbf{T}[x(t), t] - \\ & - \mathbf{B}'\mathbf{T}'[x(t), t]\mathbf{Z}(t) + \mathbf{B}'\mathbf{T}'[x(t), t]\mathbf{B}\mathbf{T}[x(t), t]; \end{aligned} \quad (33)$$

$$\begin{aligned} & [\tilde{\Psi}(t_k^*)]' [\tilde{\Psi}(t_k^*)] = \mathbf{Z}'(t)\mathbf{Z}(t) - \mathbf{Z}'(t)\mathbf{B}\mathbf{T}[x(t), t] - \\ & - 2\mathbf{B}'\mathbf{T}'[x(t), t]\mathbf{Z}(t) + \mathbf{B}'\mathbf{T}'[x(t), t]\mathbf{B}\mathbf{T}[x(t), t]. \end{aligned}$$

Дифференцируя (33) по \mathbf{B} и приравняв производную к нулю, получим

$$\hat{\mathbf{B}} = (\mathbf{T}'[x(t), t]\mathbf{T}[x(t), t])^{-1} \mathbf{T}'[x(t), t]\mathbf{Z}(t). \quad (34)$$

Тогда

$$\begin{aligned} \tilde{\Psi}(t_k^*) &= \mathbf{Z}(t) - \mathbf{T}'[x(t), t](\mathbf{T}'[x(t), t]\mathbf{T}[x(t), t])^{-1} \times \\ & \times \mathbf{T}'[x(t), t]\mathbf{Z}(t). \end{aligned} \quad (35)$$

С учетом (21)–(24) получим оптимальную оценку вектора состояния

$$\hat{\mathbf{x}}(t_k^*) = \begin{pmatrix} \tilde{\mathbf{T}}[x(t_k^*), t_k^*]^{-1} \\ \mathbf{R}[x(t), t] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{z}(t_k^*) \\ y(t) \end{pmatrix}. \quad (36)$$

Идентификатор Люенбергера для построения оценки $\hat{\mathbf{x}}(t_k^*)$ имеет вид

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\mathbf{x}}} &= \mathbf{A}_{zz}\tilde{z}(t_k^*) + \mathbf{A}_{zy}y(t) + \\ & + \mathbf{B}_z u(t) + \mu \mathbf{G}_z(t, \tilde{z}(t_k^*), y, u, \mu). \end{aligned} \quad (37)$$

Однако использование идентификатора в таком виде затруднительно ввиду большой его размерности. Задача существенно упрощается, если учесть другую особенность, связанную с принятой конкретной схемой динамической системы, заключающуюся в возможности рассмотрения уравнений стабилизации только для двух взаимосвязанных каналов, что позволяет снизить размерность идентификатора.

С учетом выражения (27) идентификатор имеет вид

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\mathbf{x}}} &= \mathbf{A}_{zz}\tilde{z}(t_k^*) + \mathbf{A}_{zy}y(t) + \\ & + \mathbf{B}_z u(t) + \mathbf{K}(\tilde{\mathbf{T}}[x(t_k^*), t_k^*] + \tilde{\Psi}(t_k^*)). \end{aligned} \quad (38)$$

Таким образом, получены уравнения для вывода идентификатора состояния системы измерений для неполной обратной связи стабилизации на подвижном основании БПЛА.

Ошибка системы стабилизации может определяться в виде

$$\mathbf{E}(t) = \left[\varphi(t, t_0)z(t_0) + \omega(t, t_0) \int_{t_0}^t x(\tau) d\tau \right] - \mathbf{G}(t, v), \quad (39)$$

где $\omega(t, t_0)$ – весовая функция вектора измерений.

Математическое ожидание ошибки системы $\mathbf{m}_E(t)$ с учетом выражения (39)

$$\begin{aligned} \mathbf{m}_E(t) &= [\Psi(t, t_0) \mathbf{m}_Z(t_0) + \\ & + \Omega(t, t_0) M \left[\int_{t_0}^t x(\tau) d\tau \right]] - \mathbf{m}_G(t, v), \end{aligned} \quad (40)$$

где $\Omega(t, t_0)$ – матрица весовых коэффициентов вектора измерений.

Корреляционная функция скалярной ошибки системы $\mathbf{K}_E(t_1, t_2)$, с учетом выражения (40) при условии отсутствия корреляции между входным и выходным векторами имеет вид

$$\begin{aligned}
 \mathbf{K}_E(t_1, t_2) = & \Psi(t_1, t_2) D[z(t_0)] + \Omega(t, t_0) \times \\
 & \times \left[\int_{t_0}^{t_1} \int_{t_0}^{t_2} K_X(\tau_1, \tau_2) d\tau_1 d\tau_2 - \int_{t_0}^{t_1} K_{XG}(\tau, t_2) d\tau - \right. \\
 & \left. - \int_{t_0}^{t_2} K_{XG}(\tau, t_2) d\tau \right] + K_G(t_1, t_2). \quad (41)
 \end{aligned}$$

Дисперсия ошибки системы с учетом (39), (40) имеет вид

$$\begin{aligned}
 \mathbf{D}_E(t) = & \left[\Psi(t) D[z(t_0)] + \Omega(t, t_0) \times \right. \\
 & \times \left. \left[\int_{t_0}^t \int_{t_0}^t K_X(\tau_1, \tau_2) d\tau_1 d\tau_2 - 2 \int_{t_0}^t K_{XG}(\tau, t) d\tau \right] \right] - \\
 & - D[\mathbf{G}(t, v)]. \quad (42)
 \end{aligned}$$

Представлено математическое описание состояний системы стабилизации, с учетом формирования идентификатора состояния для неполной связи при стабилизации (отсутствие параметров измерений). Идентификатор сформирован для условий временной динамики вектора измерений, при этом выбирается оптимальный вариант соотношений параметров измерений. Сформулированы условия для нахождения ошибки стабилизации, ее математического ожидания, корреляции и дисперсии между программными значениями и текущими оценками состояния системы стабилизации для неполной связи стабилизации.

Результаты применения метода стабилизации системы оптического наблюдения БпЛА

Для оценки разработанного метода в режиме определения горизонтальных отклонений платформы двухосного гиросtabilизатора, функционирующего на подвижном основании, от исходного положения, проведено моделирование при различных вариантах предлагаемых алгоритмов оценивания и идентификации с использованием программы MatLab.

Случайные возмущающие моменты по осям стабилизации платформы, осям прецессии гироскопов и осям вращения акселерометров задавались с помощью случайных формирующих фильтров (белый шум), обеспечивающих случайные отклонения платформы двухосного гиросtabilизатора (рис. 4). Моделирование проводилось в диапазоне 0–200 с.

Согласно [24] по осям прецессии гироскопов могут быть заданы постоянные моменты $M_p = 0.00015$ гс·см, $M_B = M_T = 0.0003$ гс·см (на графиках им соответствуют скорости ухода платформы $4.412 \cdot 10^{-8}$ и $8.824 \cdot 10^{-8}$ рад/с). На рис. 5 представлена зависимость между скоростью ухода платформы в горизонтальной плоскости и временем моделирования процесса стабилизации.

При оценивании скорости ухода платформы двухосного гиросtabilизатора относительно горизонтальной плоскости использовались значения коэффициентов идентификатора, обеспечивающего стабилизацию при неполной обратной связи. Показан процесс стабилизации скорости

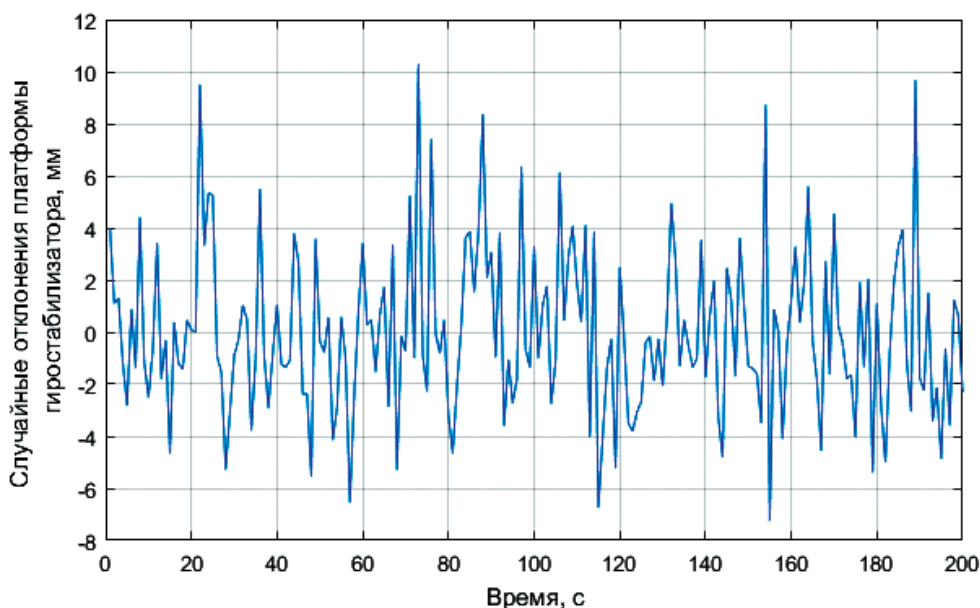


Рис. 4. График случайного отклонения платформы двухосного гиросtabilизатора

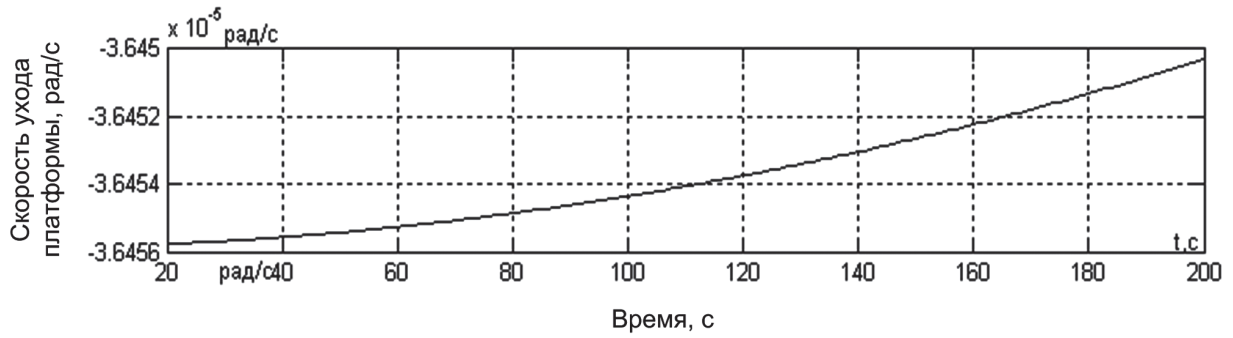


Рис. 5. Скорость ухода платформы в горизонтальной плоскости

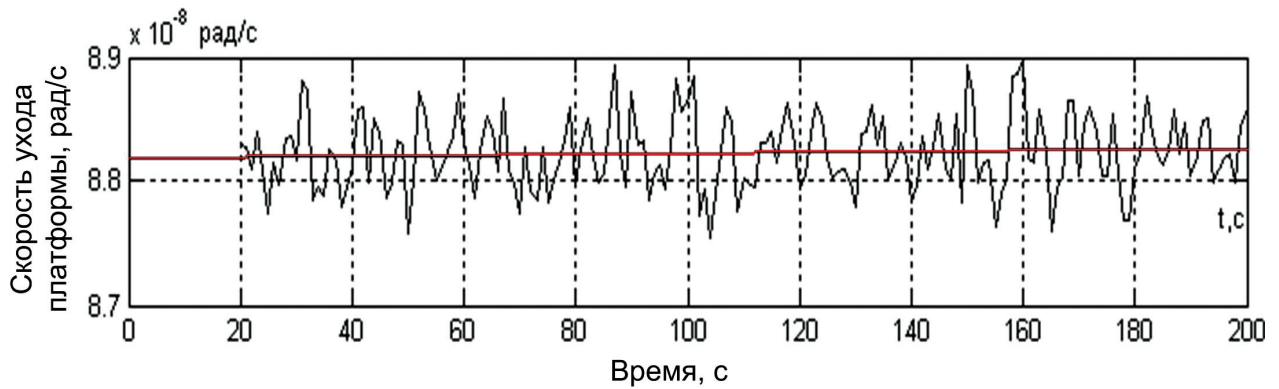


Рис. 6. Стабилизация скорости ухода платформы двухосного гиросtabilизатора по горизонтальной оси и его линейная составляющая

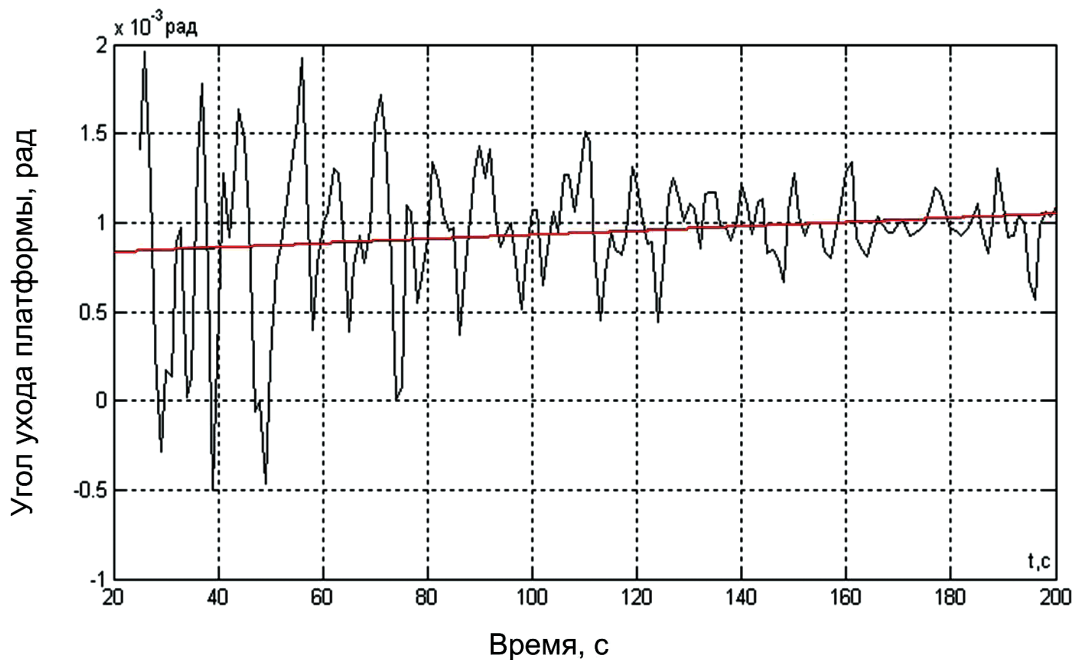


Рис. 7. Стабилизация угла платформы двухосного гиросtabilизатора по горизонтальной оси и его линейная составляющая

ухода платформы двухосного гиросtabilизатора по горизонтальной оси и выделена его линейная составляющая (рис. 6).

Представлен процесс идентификации (калибровки) угла ухода платформы двухосного гиросtabilизатора относительно горизонтальной оси и его линейная составляющая (рис. 7).

В целом моделирование показывает возможность использования метода стабилизации для оценивания исходного положения платформы и калибровки систематических составляющих уходов платформы двухосного гиросtabilизатора в условиях вибраций, качки, быстрых разворотов или маневров БПЛА.

Выводы

В статье представлена система оптического наблюдения БПЛА, в которой учтена стабилизация визирной оси оптических приборов в условиях неполного вектора состояния параметров измерений, получаемых от гироскопических устройств, при вибрациях, качке, быстрых разворотах или маневрах БПЛА.

Точность стабилизации гироскопической платформы при возмущениях, воздействующих на платформу двухосного гиросtabilизатора, улучшается благодаря применению дополнительного блока трехкомпонентных миниатюрных вибрационных акселерометров и применению метода стабилизации, основанного на формировании стабилизации при полной или неполной обратной связи.

Представлено математическое описание состояний системы стабилизации, с учетом формирования идентификатора состояния для неполной связи стабилизации (отсутствие параметров измерений). Идентификатор сформирован с условием временной динамики вектора измерений, при этом выбирается оптимальный вариант соотношений параметров измерений. Сформулированы условия для нахождения ошибки стабилизации, ее математического ожидания, корреляции и дисперсии между программными значениями и текущими оценками состояния системы стабилизации для полной или неполной обратной связи стабилизации.

Объектом дальнейших исследований являются методы повышения информативности изображений для идентификации и автосопровождения объектов системой оптического наблюдения БПЛА в аномальных условиях, связанных с периодическими искажениями изображений.

Список источников

1. *Верба В.С., Татарский Б.Г.* Комплексы с беспилотными летательными аппаратами: В 2 кн. — Кн. 1. Принципы построения и особенности применения комплексов с БЛА. — М.: Радиотехника, 2016. — 507 с.
2. *Односторонцев А.А., Односторонцева Д.А., Фёдоров Р.В.* и др. Алгоритм управления беспилотными

ми летательными аппаратами в процессе визуального сопровождения объектов с изменяемой траекторией движения // Приборы и методы измерений. 2021. Т. 12. № 1. С. 46-57. DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-1-46-57

3. *Tiwari A.* Position control of an unmanned aerial vehicle from a mobile ground vehicle. Open Access Master's Thesis, — Michigan Technological University, 2017. — 141 p. DOI: 10.37099/mtu.dc.etrdr/470
4. *Nicholas J.B.* Control system development for small UAV Gimbal. A Thesis for the Degree Master of Science in Aerospace Engineering. — California Polytechnic State University, San Luis Obispo, 2012. — 113 p. <https://digitalcommons.calpoly.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1884&context=theses>
5. *Lemaire P., Crispim-Junior C., Robinault L., Tougne L.* Jitter-free registration for Unmanned Aerial Vehicle Videos // In: *Bebis G. et al. (eds) Advances in Visual Computing. International Symposium on Visual Computing (21 October 2019, Lake Tahoe, NV, US).* Vol. 11844, pp 529-539. DOI: 10.1007/978-3-030-33720-9_41
6. *Sushchenko O.A., Goncharenko A.V.* Design of Robust Systems for Stabilization of Unmanned Aerial Vehicle Equipment // *International Journal of Aerospace Engineering.* 2016. DOI: 10.1155/2016/6054081
7. *Шинко В.В.* Пассивное определение координат и параметров движения наземных и надводных целей оптико-электронной системой беспилотного летательного аппарата: монография. — Воронеж: Научная книга, 2021. — 92 с.
8. *Волокитин Д.А., Князева В.В., Румянцев Д.С.* Система стабилизации и управления видеокамерой для аэровидеосъемки с беспилотного летательного аппарата // *Труды МАИ.* 2015. № 83. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=62159>
9. *Верба В.С., Татарский Б.Г.* Комплексы с беспилотными летательными аппаратами: В 2 кн. — Кн. 2. Робототехнические комплексы на основе БЛА. — М.: Радиотехника, 2016. — 821 с.
10. *Гончаров В.М., Лупанчук В.Ю.* Методика определения высоты полета БПЛА для коррекции бесплатформенной инерциальной навигационной системы с использованием интеллектуальной системы геопространственной информации // *Нейрокомпьютеры: разработка, применение.* 2020. № 1. С. 18-30. DOI: 10.18127/j19998554-202001-02
11. *Лупанчук В.Ю., Куканков С.Н., Гончаров В.М.* Способ коррекции бесплатформенной инерциальной навигационной системы беспилотного летательного аппарата малой дальности с использованием интеллектуальной системы геопространственной информации. Патент RU 2722599 С1. Бюл. №16, 02.06.2020.
12. *Гончаров В.М., Зайцев А.В., Лупанчук В.Ю.* Совершенствование методов координатометрии беспилотного летательного аппарата в условиях ано-

- мальности (искажения) спутниковых сигналов // Вестник Московского авиационного института. 2020. Т. 27. № 4. С. 206-221. DOI: 10.34759/vst-2020-4-206-221
13. Федулин А.М., Никадров Г.В. Перспективы применения систем технического зрения для повышения автономности крупноразмерных беспилотных летательных аппаратов большой продолжительности полета // Роботизация Вооруженных сил Российской Федерации: Сб. статей V военно-научной конференции (25-27 сентября 2019; Анапа, Россия). Анапа: ВИТ «ЭРА», 2020. С. 66-71.
 14. Князь В.А., Вишняков Б.В., Визильтер Ю.В., Горбачев В.С., Выголов О.В. Технологии интеллектуальной обработки информации для задач навигации и управления беспилотными летательными аппаратами // Информатика и автоматизация (Труды СПИИРАН). 2016. № 2(45). С. 26-44. DOI: <https://doi.org/10.15622/sp.45.2>
 15. Лупанчук В.Ю., Чаровский М.А., Сергеев Ю.А. и др. Стабилизированная оптико-электронная система беспилотного летательного аппарата мультироторного типа. Патент RU 202176 U1. Бюл. № 4, 05.02.2021.
 16. Кузнецов В.И. Статистическая идентификация. Комплексирование измерительных данных // Промышленные АСУ и контроллеры. 2014. № 12. С. 30-33.
 17. Александров М.А., Смирнов Н.В. Асимптотически устойчивый гибридный идентификатор в задаче многопрограммной стабилизации // Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 10. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2011. № 2. С. 81-89.
 18. Смирнов Н.В. Синтез гибридного идентификатора полного порядка в задаче многопрограммной стабилизации // Автоматика и телемеханика. 2006. № 7. С. 41-52.
 19. Воронов А.А. (ред.) Теория автоматического управления: Учебное пособие: В 2 ч. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Высшая школа, 1986. Ч. 1 — 367 с.
 20. Степанов О.А. Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Ч. 1. Введение в теорию оценивания. — СПб.: Электроприбор, 2017. — 509 с.
 21. Андреев Н.И. Теория статистически оптимальных систем управления. — М.: Наука, 1980. — 415 с.
 22. Шахов Я.А. Идентификаторы в квазилинейных системах // Вестник СГТУ. Серия: физ-мат. науки. 2010. № 5(21). С. 258-262.
 23. Смирнов Н.В. Многопрограммная стабилизация линейных и билинейных систем в случае неполной обратной связи // Известия РАН. Теория и системы управления. 2001. № 3. С. 40-44.
 24. Камкин Е.Ф., Орлов И.Н., Сивков М.А. О применении инерциального режима для азимутального ориентирования платформы трёхосного гиросtabilизатора на подвижном основании // Труды ФГУП «НПЦАП». Системы и приборы управления. 2016. № 3. С. 5-13.
 25. Камкин Е.Ф. О применении идентификаторов состояния для оценивания уходов гиросtabilизатора на подвижном объекте // Труды ФГУП «НПЦАП». Системы и приборы управления. 2014. № 3. С. 43-50.
 26. Шахов Я.А. Многопрограммные управления в квазилинейных динамических системах: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. — СПб.: СПбГУ, 2011. — 16 с.
 27. Кузнецов В.И. Статистическая идентификация. Модели состояний и измерений // Промышленные АСУ и контроллеры. 2014. № 3. С. 45-51.
 28. Кузнецов В.И. Статистическая идентификация. Совместное оценивание состояний и идентификация параметров // Промышленные АСУ и контроллеры. 2015. № 6. С. 55-59.
 29. Кузнецов В.И. Статистическая идентификация. Учет неравномерности временных отсчетов // Промышленные АСУ и контроллеры. 2014. № 8. С. 32-35.
 30. Большаков А.А., Каримов Р.Н. Методы обработки многомерных данных и временных рядов: Учеб. пособие. — М.: Горячая линия — Телеком, 2007. — 520 с.

References

1. Verba V.S., Tatarskii B.G. *Kompleksy s bespilotnymi letatel'nymi apparatami. V 2 knigakh. Kn. 1. Printsipy postroeniya i osobennosti primeneniya kompleksov s BLA* (Complexes with unmanned aerial vehicles. In 2 books. Book 1. Principles of development and application specifics of complexes with UAVs), Moscow, Radiotekhnika, 2016, 507 p.
2. Adnastarontsau A.A., Adnastarontsava D.A., Fiodortsev R.V. et al. Algorithm for Control of Unmanned Aerial Vehicles in the Process of Visual Tracking of Objects with a Variable Movement's Trajectory. *Devices and Methods of Measurements*, 2021, vol. 12, no. 1, pp. 46–57. DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-1-46-57
3. Tiwari A. *Position control of an unmanned aerial vehicle from a mobile ground vehicle*. Open Access Master's Thesis, Michigan Technological University, 2017, 141 p. DOI: 10.37099/mtu.dc.etr/470
4. Nicholas J.B. *Control system development for small UAV Gimbal*. A Thesis for the Degree Master of Science in Aerospace Engineering, California Polytechnic State University, San Luis Obispo, 2012, 113 p. <https://digitalcommons.calpoly.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1884&context=theses>
5. Lemaire P., Crispim-Junior C., Robinault L., Tougne L. Jitter-free registration for Unmanned Aerial Vehicle Videos. In: Bebis G. et al. (eds) *Advances in Visual*

- Computing. International Symposium on Visual Computing (21 October 2019; Lake Tahoe, NV, US)*. Vol. 11844, pp. 529-539. DOI: 10.1007/978-3-030-33720-9_41
6. Sushchenko O.A., Goncharenko A.V. Design of Robust Systems for Stabilization of Unmanned Aerial Vehicle Equipment. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2016. DOI: 10.1155/2016/6054081
 7. Shipko V.V. *Passivnoe opredelenie koordinat i parametrov dvizheniya nazemnykh i nadvodnykh tselei optiko-elektronnoi sistemoi bespilotnogo letatel'nogo apparata* (Passive determination of coordinates and motion parameters of ground and surface targets by the optoelectronic system of an unmanned aerial vehicle), Voronezh, Nauchnaya kniga, 2021, 92 p.
 8. Volokitin D.A., Knyazeva V.V., Rumyantsev D.S. *Trudy MAI*, 2015, no. 83. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=62159>
 9. Verba V.S., Tatarskii B.G. *Kompleksy s bespilotnymi letatel'nymi apparatami. V 2 knigakh. Kn. 2. Robototekhnicheskie komplekсы na osnove BLA* (Complexes with unmanned aerial vehicles. In 2 books. Book 2. Robotic complexes based on UAVs), Moscow, Radiotekhnika, 2016, 821 p.
 10. Goncharov V.M., Lupanchuk V.Yu. *Neirokomp'yutery: razrabotka, primeneniye*, 2020, no. 1, pp. 18-30. DOI: 10.18127/j19998554-202001-02
 11. Lupanchuk V.Yu., Kukankov S.N., Goncharov V.M. *Patent RU 2722599 C1*, 02.06.2020.
 12. Goncharov V.M., Zaitsev A.V., Lupanchuk V.Y. Coordinates measuring techniques improving of unmanned aerial vehicle in conditions of abnormality (distortion). *Aerospace MAI Journal*, 2020, vol. 27, no. 4, pp. 206-221. DOI: 10.34759/vst-2020-4-206-221
 13. Fedulin A.M., Nikadrov G.V. *Sbornik statei V Voennonauchnoi konferentsii "Robotizatsiya Vooruzhennykh sil Rossiiskoi Federatsii" (25-27 September 2019; Anapa, Russia)*, Anapa, VIT "ERA", 2020, pp. 66-71.
 14. Knyaz' V.A., Vishnyakov B.V., Vizil'ter Yu.V., Gorbatsevich V.S., Vygolov O.V. *Informatika i avtomatizatsiya (Trudy SPIIRAN)*, 2016, no. 2(45), pp. 26-44. DOI: <https://doi.org/10.15622/sp.45.2>
 15. Lupanchuk V.Yu., Charovskii M.A., Sergeev Yu.A. et al. *Patent RU 202176 U1*, 05.02.2021.
 16. Kuznetsov V.I. *Promyshlennye ASU i kontrolyery*, 2014, no. 12, pp. 30-33.
 17. Aleksandrov M.A., Smirnov N.V. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Seriya 10. Prikladnaya matematika. Informatika. Protsessy upravleniya*. 2011, no. 2, pp. 81-89.
 18. Smirnov N.V. *Avtomatika i telemekhanika*, 2006, no. 7, pp. 41-52.
 19. Voronov A.A. (ed) *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. V 2 chastyakh* (Theory of automatic control. In 2 parts), Moscow, Vysshaya shkola, 1986. Part 1, 367 p.
 20. Stepanov O.A. *Osnovy teorii otsenivaniya s prilozheniyami k zadacham obrabotki navigatsionnoi informatsii. Chast' 1. Vvedeniye v teoriyu otsenivaniya* (Fundamentals of estimation theory with applications to navigation information processing tasks. Part 1. Introduction to the theory of evaluation), St. Petersburg, Elektropribor, 2017, 509 p.
 21. Andreev N.I. *Teoriya statisticheski optimal'nykh sistem upravleniya* (Theory of statistically optimal control systems), Moscow, Nauka, 1980, 415 p.
 22. Shakhov Ya.A. *Vestnik SGTU. Seriya Fiziko-matematicheskie nauki*, 2010, no. 5(21), pp. 258-262.
 23. Smirnov N.V. *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya*, 2001, no. 3, pp. 40-44.
 24. Kamkin E.F., Orlov I.N., Sivkov M.A. *Trudy FGUP "NPTsAP". Sistemy i pribory upravleniya*, 2016, no. 3, pp. 5-13.
 25. Kamkin E.F. *Trudy FGUP "NPTsAP". Sistemy i pribory upravleniya*, 2014, no. 3, pp. 43-50.
 26. Shakhov Ya.A. *Mnogoprogrammnye upravleniya v kvazilineinykh dinamicheskikh sistemakh* (Multi-program controls in quasi-linear dynamic systems), Abstract of doctor's thesis, St. Petersburg, SPbGU, 2011, 16 p.
 27. Kuznetsov V.I. *Promyshlennye ASU i kontrolyery*, 2014, no. 3, pp. 45-51.
 28. Kuznetsov V.I. *Promyshlennye ASU i kontrolyery*, 2015, no. 6, pp. 55-59.
 29. Kuznetsov V.I. *Promyshlennye ASU i kontrolyery*, 2014, no. 8, pp. 32-35.
 30. Bol'shakov A.A., Karimov R.N. *Metody obrabotki mnogomernykh dannykh i vremennykh ryadov* (Methods of multidimensional data and time series processing), Moscow, Goryachaya liniya – Telekom, 2007, 520 p.

Статья поступила в редакцию 05.01.2022; одобрена после рецензирования 16.01.2022; принята к публикации 16.01.2022.

The article was submitted on 05.01.2022; approved after reviewing on 16.01.2022; accepted for publication on 16.01.2022.