

Научная статья
УДК 621.396: 629.7
DOI: 10.34759/vst-2022-1-156-170

СПОСОБ ПРОВЕДЕНИЯ ЛЕТНЫХ ПРОВЕРОК НАЗЕМНЫХ СРЕДСТВ РАДИОТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЛЕТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ БЕСПИЛОТНОГО ВОЗДУШНОГО СУДНА

Евгений Викторович Головченко¹ ✉, Леонид Евгеньевич Мистров², Сергей Геннадьевич Думьяк³

^{1,3}Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,
Воронеж, Россия

²Центральный филиал Российского государственного университета правосудия,
Воронеж, Россия

¹evvigo@mail.ru ✉

²mistrov_le@mail.ru

³serezhad41@gmail.com

Аннотация. Применение существующих способов проведения летных проверок наземных средств радиотехнического обеспечения полетов является затруднительным на оперативных аэродромах, на которых требуется оперативное развертывание средств радиотехнического обеспечения полетов и ввод их в эксплуатацию. В условиях воздействия диверсионных групп противника ситуация может значительно усугубляться, обуславливая при этом не только выход из строя технических средств, но и приводя к потерям среди экипажа воздушного судна-лаборатории. В статье предлагается способ, который позволяет исключить использование наземных средств траекторных измерений, разместить аппаратуру летного контроля на борту беспилотного воздушного судна (БВС) и осуществлять управление полетом беспилотного воздушного судна при проведении летной проверки без использования сигналов наземных средств радиотехнического обеспечения полетов авиации, что сокращает эксплуатационные расходы, количество привлекаемого персонала и обеспечивает высокую оперативную готовность задействованных средств.

Ключевые слова: летная проверка, наземные средств радиотехнического обеспечения полетов, беспилотное воздушное судно, устройство летного контроля, радиомаяк

Для цитирования: Головченко Е.В., Мистров Л.Е., Думьяк С.Г. Способ проведения летных проверок наземных средств радиотехнического обеспечения полетов с применением беспилотного воздушного судна // Вестник Московского авиационного института. 2022. Т. 29. № 1. С. 156-170. DOI: 10.34759/vst-2022-1-156-170

Original article

A TECHNIQUE FOR FLIGHT CHECK-UP OF GROUND-BASED RADIO-TECHNICAL SUPPORT FACILITIES FOR FLIGHT SUPPORT WITH UNMANNED AERIAL VEHICLE APPLICATION

Evgeny V. Golovchenko¹ ✉, Leonid E. Mistrov², Sergey G. Dum'yak³

^{1,3}Air force academy named after professor N.E. Zhukovskii and Y.A. Gagarin, Voronezh, Russia

²Central Branch "Russian State University of Justice", Voronezh, Russia

¹evvigo@mail.ru ✉

²mistrov_le@mail.ru

³serezhad41@gmail.com

Abstract

The ground-based facilities are being subjected to flight check-ups at putting into operation, in the process of operation and certain special cases for checking parameters and characteristics of ground-based flight support facilities correspondence to the specified operational requirements. The existing techniques application is, in some cases, cumbersome, for example at operational airfields, where operational deployment of radio-technical flight support facilities and their putting into operation is required. The situation may be drastically aggravated under condition of various intended and unintended destabilizing factors impact, including terroristic groups. Not only the failure of technical facilities herewith, but losses among the crew of the aircraft-laboratory are possible,

In this regard, the purpose of the study consists in developing a technique for flight check-ups to ensure their running under conditions of possible destructive impacts on the aircraft-laboratory, its crew, as well as flight check-ups operative organizing.

The set goal pursuing is being achieved by an unmanned aircraft application instead of a manned aircraft-laboratory, as well as by excluding ground means of trajectory measurements from the flight check-up procedure.

The basis of the proposed method of flight checks of ground-based radio-navigation means is to determine the module of difference between the measured value of the ground-based means parameter and its set value for each set point of the unmanned aircraft flight; to correct the flight trajectory taking into account the value obtained at the previous step; to re-flight the unmanned aircraft on the corrected trajectory.

The following items underlie the proposed technique for the flight check-ups of the ground-based radio-technical aircraft flight support utilities:

- Determining the absolute value of the difference between the measured parameter (of characteristic) value of a ground-based facility and its set value for each set UAV flight point;
- The flight trajectory correction with account for the value obtained at the previous step;
- The UAV reflight along the corrected trajectory.

The number of repeated flights is being determined by the required measurements accuracy.

The article presents a technique for flight check-ups conducting of ground-based radio-technical aircraft flight support facilities employing the UAV, which does not require the ground-based trajectory measuring facilities. A flight control device and a simulation model for the glissade radio beacon testing have been developed. Analysis of its application possibility was performed based on the simulation. The article demonstrates that the landing glissade coordinates determining accuracy is being determined by the coordinates determining accuracy by the UAV.

The proposed method allows

- Excluding the ground means of trajectory measurements application during flight checks;
- Control equipment deployment onboard an unmanned aircraft;

– Performing the UAV flight control of an unmanned aircraft during flight checks-ups without signals from the ground-based radio-technical aircraft flight support facilities.

This will allow reducing operational costs, the number of personnel involved and ensuring high operational readiness of the facilities involved.

Keywords: the flight verification, surface assets of the flight radio technique maintenance, RTM, the unmanned aircraft, the tool for air control, radio transponder

For citation: Golovchenko E.V., Mistrov L.E., Dum'yak S.G. A technique for flight check-up of ground-based radio-technical support facilities for flight support with unmanned aerial vehicle application. *Aerospace MAI Journal*, 2022, vol. 29, no. 1, pp. 156-170. DOI: 10.34759/vst-2022-1-156-170

Введение

Одним из важнейших составных элементов обеспечения выполнения задач авиацией по предназначению является качественное радиотехническое обеспечение полетов авиации (РТОП), которое представляет собой комплекс мероприятий по аэронавигационному обслуживанию пользователей воздушного пространства и органов обслуживания воздушного движения в части предоставления информации от средств наблюдения, радионавигации и посадки на всех этапах полета [1]. Следует отметить, что одной из наиболее важных и сложных задач, решаемых подсистемой РТОП, является обеспечение посадки воздушных судов (ВС). Для ее решения в настоящее время разработано достаточно большое количество различных технологий, основанных как на ручном, так и автоматическом управлении воздушным судном [2]. При этом возможность конфликтной ситуации, создаваемой воздушным судном, заходящим на посадку, с другими воздушными судами, находящимися в воздушном пространстве в районе аэродрома, и наземными транспортными средствами на рабочей площади аэродрома значительно усложняет решение задач обеспечения безопасности полетов [3]. Именно на этом этапе полета задействовано наибольшее количество средств РТОП, развернутых в районе аэродрома.

В свою очередь, эффективное применение средств РТОП определяется качественным и своевременным выполнением мероприятий летной проверки, по результатам которой делается вывод о соответствии параметров и характеристик проверяемых средств эксплуатационным требованиям, изложенным в нормативно-технической документации.

В общем случае летные проверки выполняются с помощью аппаратуры летного контроля (АЛК), размещаемой на борту воздушного судна-лаборатории (ВСЛ), и наземных средств траекторных измерений (СТИ), чаще всего оптических [4]. Совместное применение АЛК и наземных оптических СТИ позволяет довольно просто получить достаточно точные координаты ВСЛ. Применение данных средств позволяет осуществлять контроль наземных средств РТОП на стационарных аэродромах всех видов авиации. Однако применение данного способа становится затруднительным на оперативных аэродромах, на которых требуется оперативное развертывание средств РТОП и ускоренный ввод их в эксплуатацию. В условиях воздействия внешних деструктивных факторов ситуация может значительно усугубляться, обуславливая при этом не только выход из строя технических средств, но и приводя к потерям среди экипажа ВСЛ [5]. Учитывая, что применение различных средств дестабилизирующих воздействий осуществляется после разведки, в первую очередь радиолокационной, в отдельных случаях возникает необходимость выполнять летную проверку в условиях скрытности. При этом основными способами скрытия будут являться снижение радиолокационной заметности воздушных судов, а также осуществление полетов по прямолинейным траекториям [6].

Снизить в вышеуказанных случаях радиолокационную заметность, потери персонала и технических средств, обеспечивающих проведение летных проверок, позволяет размещение АЛК не на борту пилотируемого ВСЛ, а на борту БВС [7–11]. В общем случае для мониторинга, одной из задач которого является проведение летных

проверок средств РТОП, возможно использование группы беспилотных летательных аппаратов [12]. При этом возможно существенное повышение эффективности проведения летных проверок [13], сокращение количества привлекаемого к проведению летной проверки наземного персонала, летного и кабинного экипажа не только при летных проверках, но и при эксплуатационном обслуживании средств РТОП. Оценку такого сокращения можно получить с помощью методики, представленной в [14].

Летные проверки могут осуществляться с использованием спутниковых навигационных систем (СНС). Однако для получения высокой точности измерений координат, порядка 0,5–3 м, вместо обеспечиваемых 10–20 м, в районе проверяемого аэродрома должна быть развернута наземная система функционального дополнения, например, локальная контрольно-корректирующая станция [7, 15, 16]. Ее ввод в эксплуатацию на аэродроме также должен быть предварен летной проверкой. В этом случае полет ВС осуществляется по сигналам наземных средств РТОП с фиксацией значений параметров сигналов и определением соответствующих им координат. Однако использование аппаратуры измерения сигналов РТОП в системе управления БВС усложняет ее структуру и не позволяет использовать для летных проверок любое имеющееся в наличии БВС.

Таким образом, проведение летных проверок в условиях влияния большого количества внешних дестабилизирующих факторов почти неизбежно будет сопровождаться выходом из строя используемой при летной проверке авиационной и наземной техники. Ее восстановление будет зависеть от имеющихся ресурсов, что в сложных внешних условиях будет приводить к увеличению времени простоя и, как следствие, к снижению оперативной готовности средств летной проверки и увеличению времени ввода в эксплуатацию аэродрома. Это актуализирует задачу поиска новых способов проведения летных проверок, позволяющих сократить прямые и сопутствующие затраты при их проведении. В связи с чем и с учетом вышеизложенного целью статьи является разработка нового способа проведения летных проверок с применением беспилотного воздушного судна, осуществляющего полет без использования сигналов наземных средств РТОП, а также без использования наземных средств траекторных измерений.

1. Способ проведения летных проверок наземных средств радиотехнического обеспечения полетов

Предлагаемый способ проведения летных проверок на основе БВС базируется на алгоритмической последовательности действий:

- задаются требуемые параметры и характеристики наземных средств РТОП и величина допустимой погрешности измерений, которая определяется бортовым оборудованием БВС;

- задаются траектория и параметры полета БВС в зависимости от заданных требуемых параметров и характеристик наземных средств РТОП;

- производится полет по заданной траектории с одновременным определением координат текущего местоположения БВС и измерением параметров и характеристик наземных средств РТОП;

- для каждой точки траектории движения определяется модуль разности между измеренным значением параметра (или характеристики) и его заданным значением (модуль разности вычисляется по той причине, что сигналы наземных средств РТОП на входе бортовых приемников могут принимать отрицательные значения). При превышении полученного модуля заданной погрешности измерений последующая траектория корректируется пропорционально величине разности между требуемым и измеренным значением, тем самым приближая траекторию полета к траектории, образуемой сигналами наземных средств РТОП;

- производится последующий полет по скорректированной траектории до тех пор, пока величина модуля разности не будет меньше величины заданной погрешности измерений.

Перед проведением летной проверки, с наземного пункта управления, задаются требуемые значения параметров и характеристик наземных средств РТОП и величина допустимой погрешности измерений, определяемая бортовым оборудованием БВС. К измеряемым параметрам и характеристикам наземных средств РТОП относятся, например, зоны действия РМС, отклонение линии курса от установленного положения, крутизна характеристики глиссадного радиомаяка (ГРМ) и т.д. Также задается первоначальная траектория движения БВС, а такие параметры движения БВС, как вертикальная и горизонтальная скорости, задаются исходя из его летных характеристик.

Полет БВС осуществляется по заранее заданной траектории, что позволяет при управлении БВС отказаться от средств навигации, функционирующих на основе сигналов наземных средств РТОП, и использовать комплексную систему навигации. С помощью бортовой комплексной системы навигации [15] измеряются координаты текущего местоположения БВС на заранее заданной траектории полета, что позволяет обеспечить заданную точность определения координат текущего местоположения с использованием алгоритмов оптимальной фильтрации [17, 18].

Для каждой точки в пространстве, в которой происходит измерение параметров и характеристик наземных средств РТОП, вычисляется разность по модулю между измеренным и заранее заданным значениями и сравнивается с заранее заданной погрешностью измерений. Если модуль полученной разности превышает заданную погрешность измерений, то следующая траектория пролета БВС корректируется пропорционально величине этой разности и повторный пролет БВС осуществляется уже по скорректированной траектории, повторяя все действия аналогично предыдущим полетам.

Летная проверка заканчивается, когда траектория полета БВС будет повторять линию в про-

странстве, образованную сигналами наземных средств РТОП, с заданной точностью. В этом случае точность может определяться как модуль разности между измеренными и требуемыми значениями сигналов РТОП.

После проведения летной проверки ее результаты могут быть переданы на наземный пункт управления БВС по радиоканалу. В зависимости от зарегистрированных параметров и характеристик на наземное средство РТОП по линии связи через ретранслятор (РТ) может быть передан сигнал управления для оперативной подстройки его выходных параметров и характеристик.

2. Устройство летного контроля наземных средств РТО полетов

Для реализации предложенного способа разработано устройство летного контроля наземных средств РТОП, размещаемое на борту БВС, обобщенная схема которого представлена на рис. 1. Основу схемы устройства составляет комбинированная замкнутая схема системы автоматического управления [19], включающая: приемник сигналов наземных средств РТОП, блок ввода, блок хранения траектории и параметров движения, блок оптимальной фильтрации, блок хранения результатов измерений, блок сравнения и вычисления разности, блок формирования команд управления БВС, исполнительные элементы БВС, блок управления устройством, передатчик, блок коррекции траектории движения.

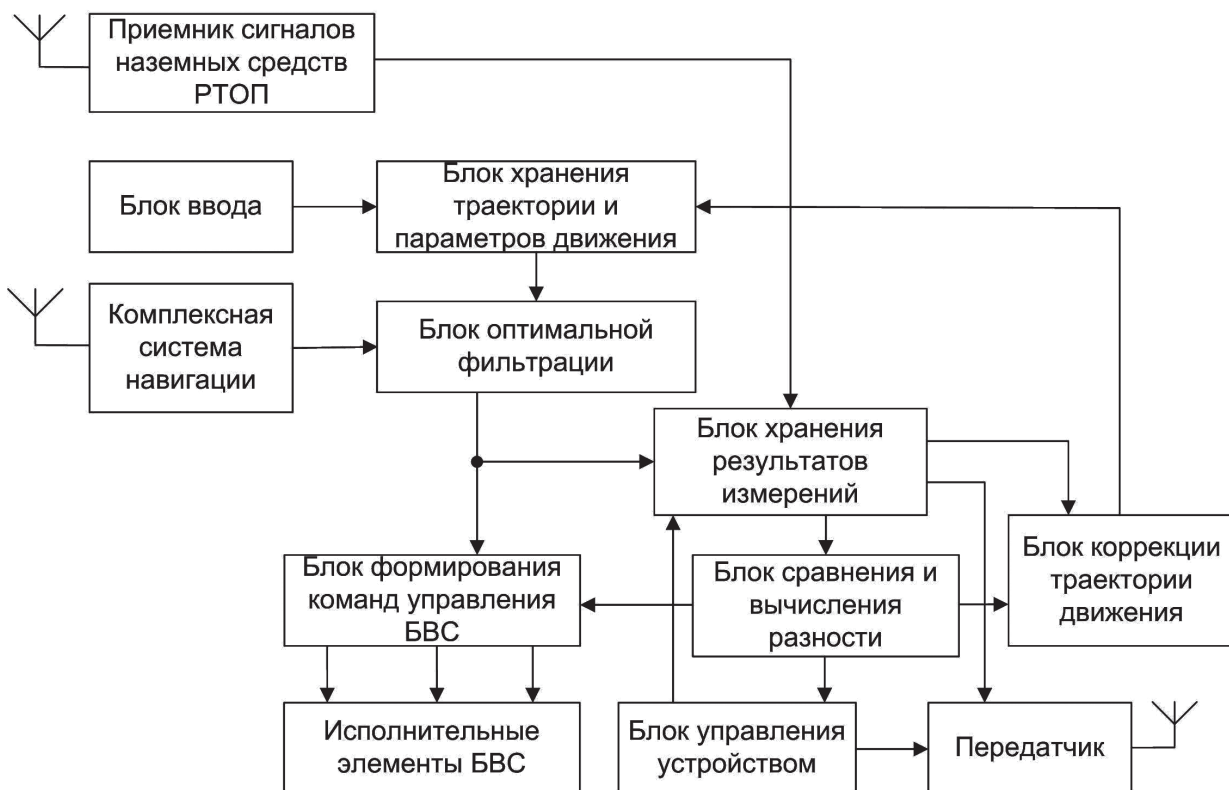


Рис. 1. Обобщенная схема устройства летного контроля

ции координат местоположения, блок хранения результатов измерений, блок формирования команд управления БВС, блок сравнения и вычисления разности, блок коррекции траектории движения, исполнительные элементы БВС, блок управления и передатчик.

Приемник сигналов наземных средств РТОП предназначен для приема сигналов проверяемого наземного средства, демодуляции и передачи полученной информации в блок хранения результатов измерений.

С помощью блока ввода в устройство вводят требуемые значения параметров и характеристик наземных средств РТОП, величину допустимой погрешности измерений, а также задают траекторию и параметры полета БВС. Вводимые траектория и параметры полета используются, во-первых, для реализации алгоритма фильтрации координат текущего местоположения, получаемых с использованием комплексной системы навигации, а во-вторых, для формирования команд управления полетом БВС.

Комплексная система навигации обеспечивает определение координат текущего местоположения БВС при движении по заданной траектории. Упрощенная структурная схема комплексной системы навигации, представленная на рис. 2, содержит бортовую аппаратуру спутниковой радионавигационной системы (СРНС), бор-

товую цифровую вычислительную машину (БЦВМ), автономные датчики (АД) (датчики ускорений, СВС, датчики угловых скоростей, ДИСС и др.) и инерциальную навигационную систему (ИНС). В общем случае она может быть реализована на основе известных схем [15, 20].

С учетом того, что при проведении летной проверки полет БВС происходит по заранее задаваемой траектории, уточнение координат с ее учетом осуществляется в блоке фильтрации. Полученные координаты из блока фильтрации фиксируются в блоке хранения результатов измерений и используются в блоке формирования команд управления БВС. Блок фильтрации может быть реализован на основе фильтра Калмана, как показано на рис. 3 [17, 18].

Блок формирования команд управления БВС используется для формирования команд управления исполнительным элементом БВС при полете по заданной траектории, которые включают параметры движения на каждом интервале траектории движения. В общем случае, если устройство летного контроля не имеет связи с устройством управления БВС, то траектория движения корректируется в вычислителе на пункте управления БВС и передается на устройство управления БВС с помощью командной радиолинии. В этом случае устройство летного контроля может быть конструктивно выполнено в виде

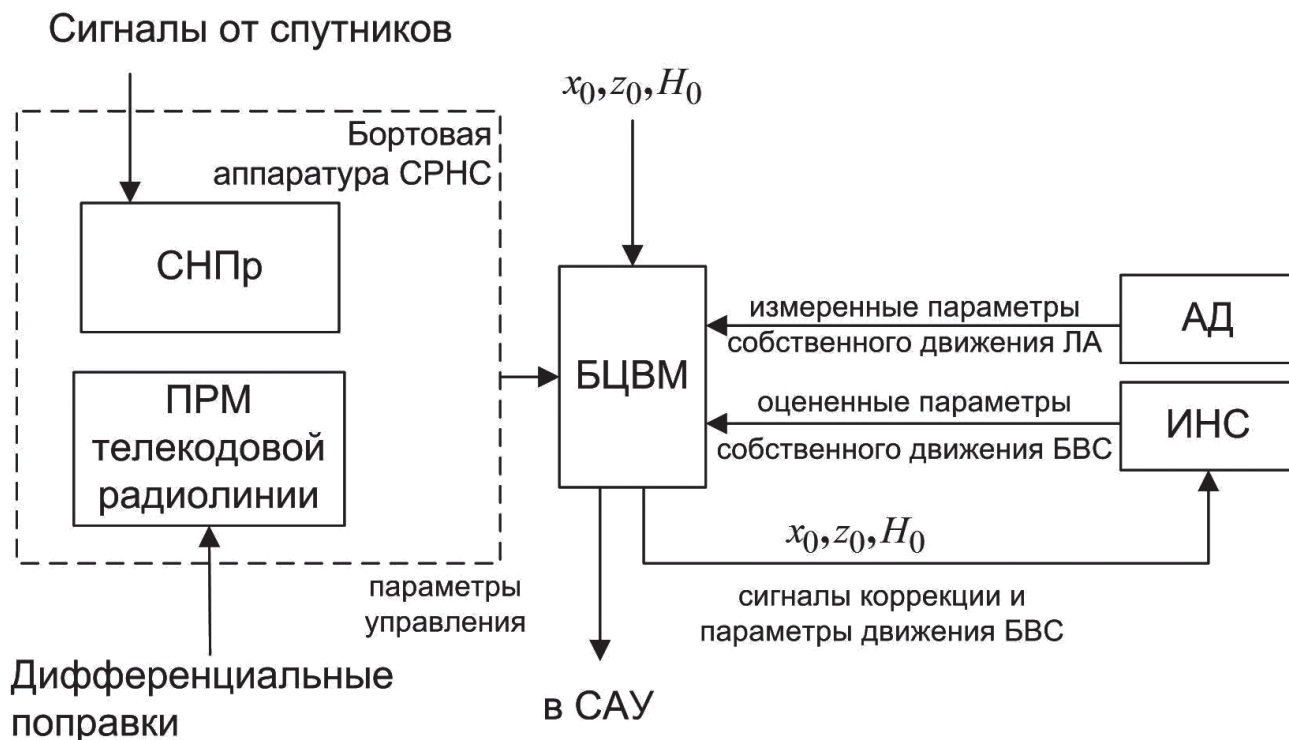


Рис. 2. Обобщенная схема комплексной системы навигации

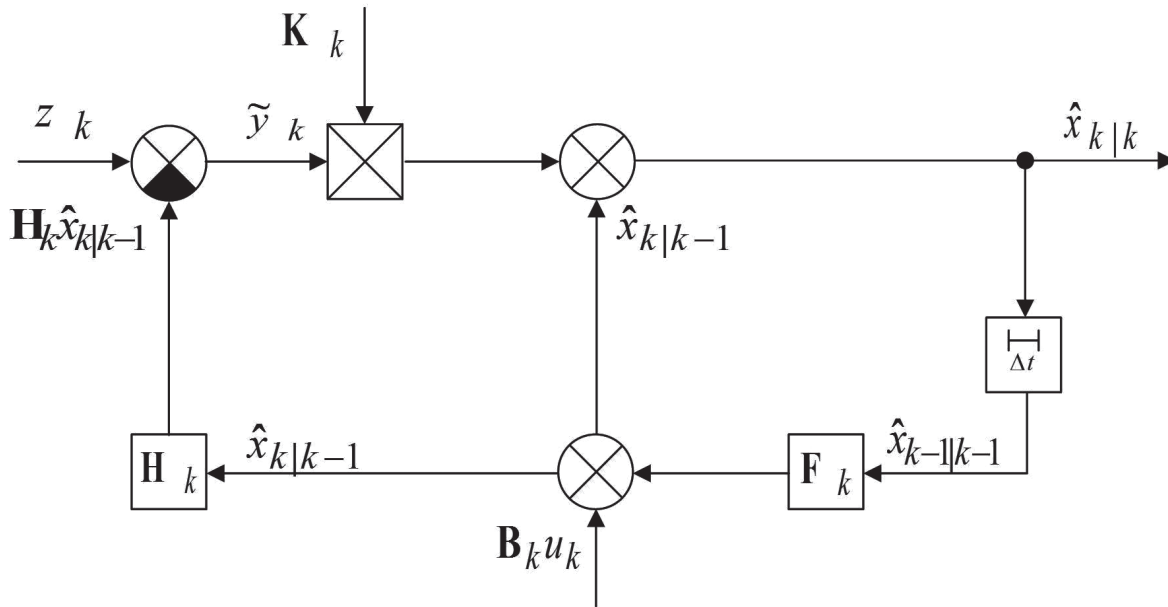


Рис. 3. Структурная схема блока оптимальной фильтрации

контейнера и использоваться с любым типом БВС.

Блок сравнения и вычисления разности обеспечивает вычисление разности между измеренными и заданными значениями соответствующих параметров и характеристик наземных средств РТОП и сравнения модулей полученных разностей с заданными погрешностями измерений.

Блок коррекции траектории движения предназначен для коррекции траектории движения в

соответствии с величиной разности между заданными и измеренными значениями параметров и характеристик наземных средств РТОП.

Блок управления устройством предназначен для формирования отчета о результатах летной проверки и формирования команды управления на завершение авиационных работ.

В общем случае обобщенная схема проведения летной проверки может иметь вид, представленный на рис. 4, при этом БВС может базиро-

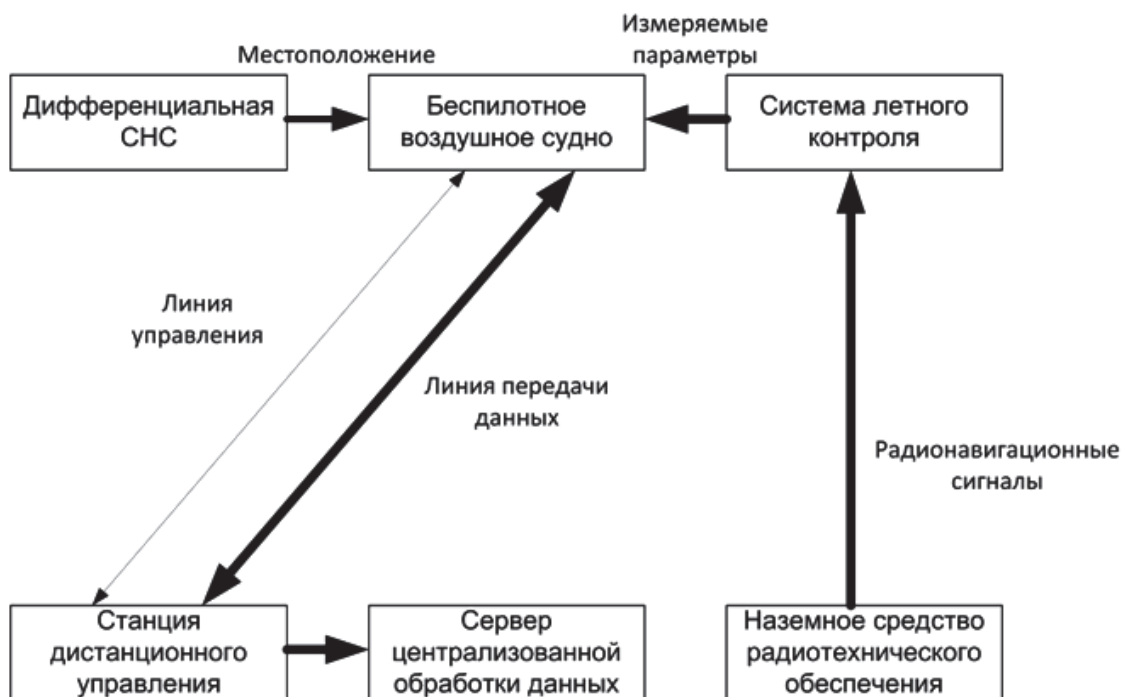


Рис. 4. Обобщенная схема проведения летной проверки

ваться на другом аэродроме и управляться удаленно.

Для централизованного контроля состояния наземных средств радиотехнического обеспечения полетов может создаваться единая база данных [21], что позволит обеспечить своевременное планирование и организацию проведения летных проверок.

3. Алгоритм определения положения линии глиссады снижения при летной проверке глиссадного радиомаяка

Рассмотрим реализацию способа применительно к самым тяжелым условиям его применения — определения положения линии глиссады наземного радиомаяка, необходимой для проверки угла глиссады снижения.

Наиболее сложным элементом способа является определение положения в пространстве характерных линий и точек, создаваемых сигналами наземных средств РТОП. Так как наземные средства СТИ в способе отсутствуют, то при полете БВС по сигналам РТОП точное определение местоположения БВС в пространстве затруднительно, поэтому предлагается полет БВС осуществлять по заранее заданным траекториям. При этом определение координат БВС осуществляется путем комплексирования координат заданной траектории и координат, определяемых с помощью бортовых систем навигации, например, комплексной системы навигации.

Пусть идеальная глиссада исследуемого направления посадки аэродрома задана углом места α , значение которого вводится в устройство летного контроля через блок ввода. Кроме того, дополнительно вводятся значения начальной высоты z_0 , начального удаления от точки приземления (проекция наклонной дальности) x_0 , значения вертикальной v_B и горизонтальной v_Γ скоростей снижения, а также интервалы измерения местоположения Δt . Данные значения используются для расчета начальной траектории полета при проведении летной проверки.

В общем виде уравнение фильтрации имеет вид [17, 18]:

$$\hat{\mathbf{A}}_{k|k} = \hat{\mathbf{A}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k \hat{\mathbf{y}}_k \quad (1)$$

Здесь $\hat{\mathbf{A}}_{k|k}$ — оценка вектора состояния БВС на шаге k , содержащего координаты БВС и скорости, имеет следующий вид:

$$\hat{\mathbf{A}}_{k|k} = \begin{bmatrix} z_{k|k} \\ x_{k|k} \\ y_{k|k} \\ v_B \\ v_\Gamma \\ v_\Pi \end{bmatrix},$$

где $z_{k|k}$, $x_{k|k}$, $y_{k|k}$ — текущее значение высоты БВС, удаления от расчетной точки приземления (проекция наклонной дальности на горизонтальную плоскость), удаления от положения линии курса соответственно; v_B , v_Γ , v_Π — вертикальная, горизонтальная и продольная скорость БВС (скорости считаются постоянными, и применять к ним обозначения каждого шага не будем);

$\hat{\mathbf{A}}_{k|k-1}$ — экстраполированный вектор состояния БВС на предыдущем шаге ($k-1$),

$$\hat{\mathbf{A}}_{k|k-1} = \mathbf{F} \hat{\mathbf{A}}_{k-1|k-1}, \quad (2)$$

где $\hat{\mathbf{A}}_{k-1|k-1}$ — оценка вектора состояния БВС, полученная на предыдущем шаге ($k-1$):

$$\hat{\mathbf{A}}_{k-1|k-1} = \begin{bmatrix} z_{k-1|k-1} \\ x_{k-1|k-1} \\ y_{k-1|k-1} \\ v_B \\ v_\Gamma \\ v_\Pi \end{bmatrix},$$

$z_{k-1|k-1}$, $x_{k-1|k-1}$, $y_{k-1|k-1}$ — предыдущие значения координат;

\mathbf{F} — матрица эволюции процесса, которая имеет вид:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -\Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -\Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -\Delta t \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где Δt — интервал измерений.

Как следует из уравнений (1) и (2), процесс фильтрации значений координат включает этапы экстраполяции и коррекции. На этапе экстраполяции рассчитывается вектор состояния

БВС $\hat{A}_{k|k-1}$ на шаге k по оценке состояния БВС на предыдущем шаге ($k-1$). В свою очередь, ковариационная матрица P для экстраполированного вектора состояния БВС вычисляется так:

$$P_{k|k-1} = FP_{k-1|k-1}F^T + Q_k.$$

В этом случае ковариационная матрица процесса Q определяется в соответствии со следующим выражением:

$$Q = \begin{bmatrix} \sigma_z^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_x^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_y^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{v_B}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{v_r}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{v_{\Pi}}^2 \end{bmatrix},$$

где $\sigma_z^2, \sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_{v_B}^2, \sigma_{v_r}^2, \sigma_{v_{\Pi}}^2$ — дисперсия в модели движения по высоте, удалению от расчетной точки приземления, удалению от линии курса, вертикальной скорости, горизонтальной и продольной скоростям соответственно.

На этапе коррекции выполняется коррекция экстраполированного вектора местоположения БВС — получение оценки местоположения БВС $\hat{A}_{k|k}$ при помощи комплексной системы навигации:

$$\hat{A}_{k|k} = \hat{A}_{k|k-1} + K_k \hat{y}_k,$$

где K_k — коэффициент усиления фильтра Калмана на шаге k ,

$$K_k = P_{k|k} H^T S_k^{-1};$$

S_k — ковариационная матрица для вектора состояния на шаге k ,

$$S_k = H P_{k|k-1} H^T + R;$$

R — ковариационная матрица шума измерений,

$$R = \begin{bmatrix} \sigma_{KCH_z}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{KCH_x}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{KCH_y}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{KCH_{v_B}}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{KCH_{v_r}}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{KCH_{v_{\Pi}}}^2 \end{bmatrix},$$

$$\sigma_{KCH_z}^2, \sigma_{KCH_x}^2, \sigma_{KCH_y}^2, \sigma_{KCH_{v_B}}^2, \sigma_{KCH_{v_r}}^2, \sigma_{KCH_{v_{\Pi}}}^2$$

— дисперсия сигнала комплексной системы навигации по высоте, удалению от расчетной точки приземления, удалению от линии курса, вертикальной, горизонтальной скорости и продольной скоростям, соответственно.

Расчет отклонения наблюдения \hat{y}_k , полученного на шаге k наблюдения, от наблюдения, ожидаемого при произведенной экстраполяции:

$$\hat{y}_k = \hat{b}_k - H \hat{A}_{k|k-1},$$

где \hat{b}_k — оценка истинного вектора состояния БВС.

В качестве матрицы измерений H , связывающей истинный вектор состояния БВС и вектор произведенных измерений, принимается единичная матрица вида:

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Далее рассчитывается ковариационная матрица оценки местоположения БВС $P_{k|k}$:

$$P_{k|k} = (I - K_k H) P_{k|k-1},$$

где I — единичная матрица.

Одновременно с определением местоположения БВС происходит прием сигнала ГРМ приемником сигналов наземных средств РТОП. Полученные координаты от блока фильтрации и измеренные значения разности токов записываются в память блока хранения результатов измерений.

В блоке сравнения и вычисления разности вычисляется разность между измеренными значениями параметров ГРМ (в данном случае — разности токов на входе приемника) и заданными (на заданной траектории значение разности токов на входе приемника наземных средств РТОП на каждом шаге измерений должно равняться нулю):

$$\Delta I_{изм k} - \Delta I_{зад k} = \Delta I,$$

где $\Delta I_{изм k}$ — измеренное значение разности токов на входе приемника на k -м шаге; $\Delta I_{зад k}$ — за-

данное значение на k -м шаге (в данном случае для каждого шага равно нулю).

Далее модули полученных значений сравниваются с допустимой погрешностью измерений и в случае:

$$|\Delta I_k| > \delta_{\text{доп}},$$

где $\delta_{\text{доп}}$ — допустимая погрешность измерений, с помощью блока коррекции траектории движения происходит коррекция траектории последующего полета пропорционально величине разности между соответствующими измеренными и требуемыми значениями:

$$\Delta I_k = a l_k, z_k = \hat{z}_k + \Delta I_k,$$

где l_k — параметр коррекции траектории движения по высоте; a — коэффициент, связывающий ΔI_k и l_k .

Скорректированная траектория движения записывается в блок хранения траектории и параметров движения, и далее в блоке формирования команд управления формируется команда управления для повторного захода на посадку в соответствии со скорректированной траекторией.

В случае когда $|\Delta I_k| < \delta_{\text{изм}}$, принимается решение о завершении летной проверки. Блок управления устройством формирует отчет о результатах летной проверки и команды управления на завершение летной проверки исполнительным элементам БВС и передатчику — для передачи отчета на НПУ БВС.

Для достижения требуемой точности определения положения линии глissады, формируемой ГРМ, необходимо осуществить несколько пролетов с коррекцией параметров движения каждого полета.

Схема алгоритма летной проверки глissадного радиомаяка при определении положения линии глissады снижения представлена на рис. 5.

Для проверки работоспособности разработанного способа и алгоритма на языке Python была разработана имитационная модель летной проверки глissадного радиомаяка при определении положения линии глissады снижения. Схема алгоритма работы имитационной модели летной проверки глissадного радиомаяка при определении положения линии глissады снижения представлен на рис. 6.

При моделировании угол наклона линии глissады снижения α принимался равным 3° . Остальные исходные данные для моделирования приведены в таблице.

На рис. 7 и 8 приведены результаты имитационного моделирования глissадного радиомаяка при определении положения линии глissады снижения. На рис. 7 показаны траектории полета БВС при первом проходе по глissаде снижения: сигнальная линия глissады в пространстве, формируемая ГРМ; траектория полета БВС, полученная с помощью КСН, и траектория полета БВС полученная после фильтрации.

На рис. 8 представлены траектория полета БВС и сигнальная линия глissады в пространстве, формируемая ГРМ при третьем пролете по

Исходные данные для моделирования

Параметр	Обозначение	Значение
Начальная высота	z_0	1200 м
Начальное удаление от точки приземления	x_0	22000 м
Вертикальная скорость	v_v	10 м/с
Горизонтальная скорость	v_r	20 м/с
Интервал измерений	Δt	1с
Количество отчетов	N	1200
СКО движения БВС в вертикальной плоскости	σ_z	2 м
СКО определения вертикальной координаты БВС с помощью КНС	$\sigma_{\text{КНС}z}$	9 м

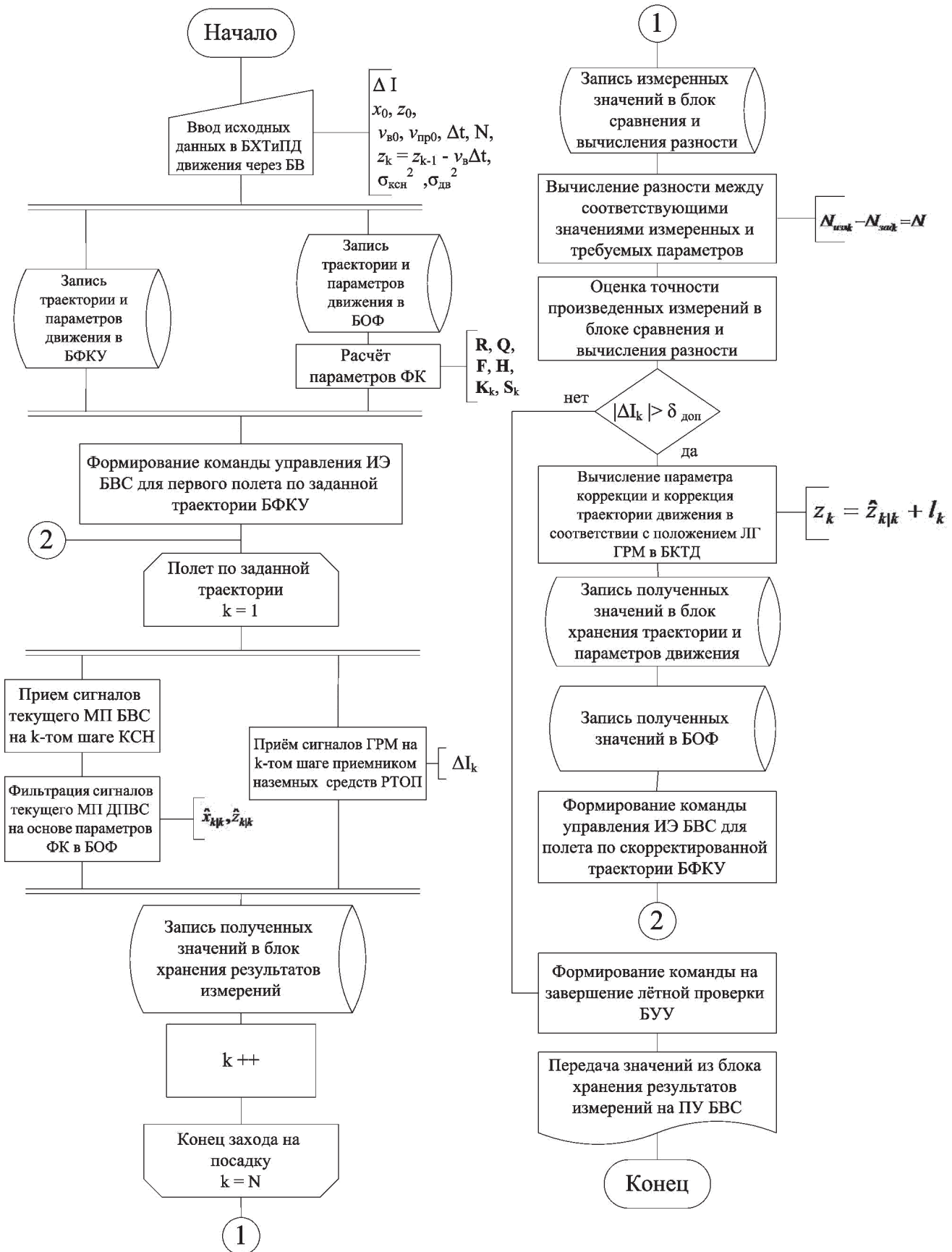


Рис. 5. Схема алгоритма лётной проверки глиссидного радиомаяка при определении положения линии глиссиды снижения

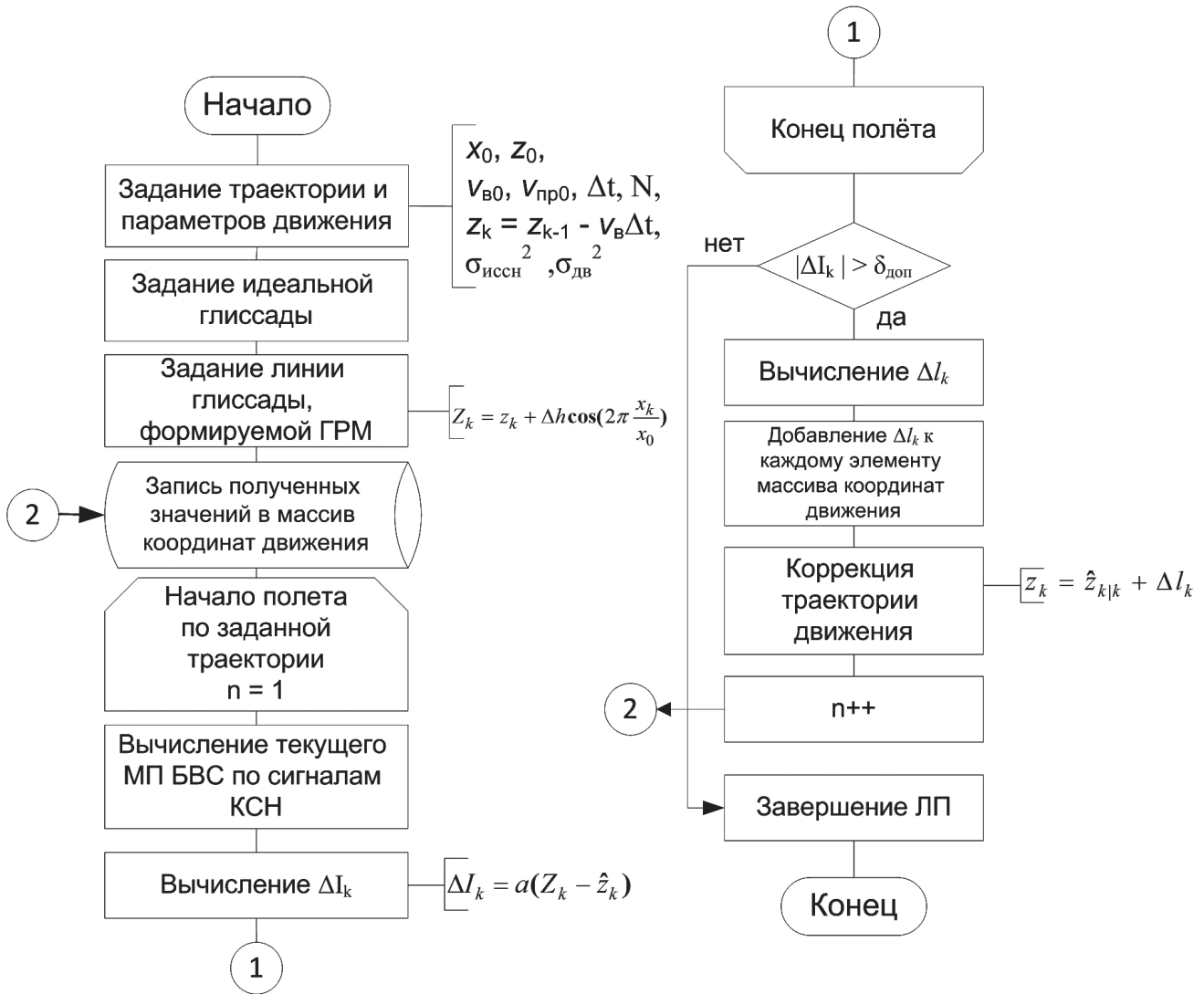


Рис. 6. Схема алгоритма работы имитационной модели летной проверки глиссадного радиомаяка при определении положения линии глиссады снижения

глиссаде снижения. Как видно из рисунка, после трех пролетов траектория полета БВС точно повторяет сигнальную линию глиссады в пространстве, формируемую ГРМ, тем самым получая ее точные координаты в пространстве. Далее полученные координаты используются для расчета угла глиссады снижения [1], значение которого сравнивается с заданным для данного аэродрома.

Однако необходимо отметить, что точность предлагаемого способа определяется точностью используемой на борту БВС системы навигации, что будет определяющим для летной проверки конкретного аэродрома.

Выводы

Анализ приведенных расчетов и результатов имитационного моделирования показывает, что

предлагаемый способ позволяет проводить летные проверки средств радиотехнического обеспечения полетов. К основным достоинствам способа относятся: использование БВС в качестве носителя аппаратуры летного контроля; отсутствие необходимости применения наземных средств траекторных измерений, что позволяет проводить летную проверку дистанционно, а БВС базировать на других аэродромах, управление полетом БВС при проведении летной проверки осуществлять без использования сигналов наземных средств РТОП. Это определяет невысокую стоимость используемого оборудования, простоту восстановления, минимально возможный перечень необходимого оборудования и привлекаемого к летной проверке персонала и как следствие — повышение оперативной готовности средств, используемых для проведения летных

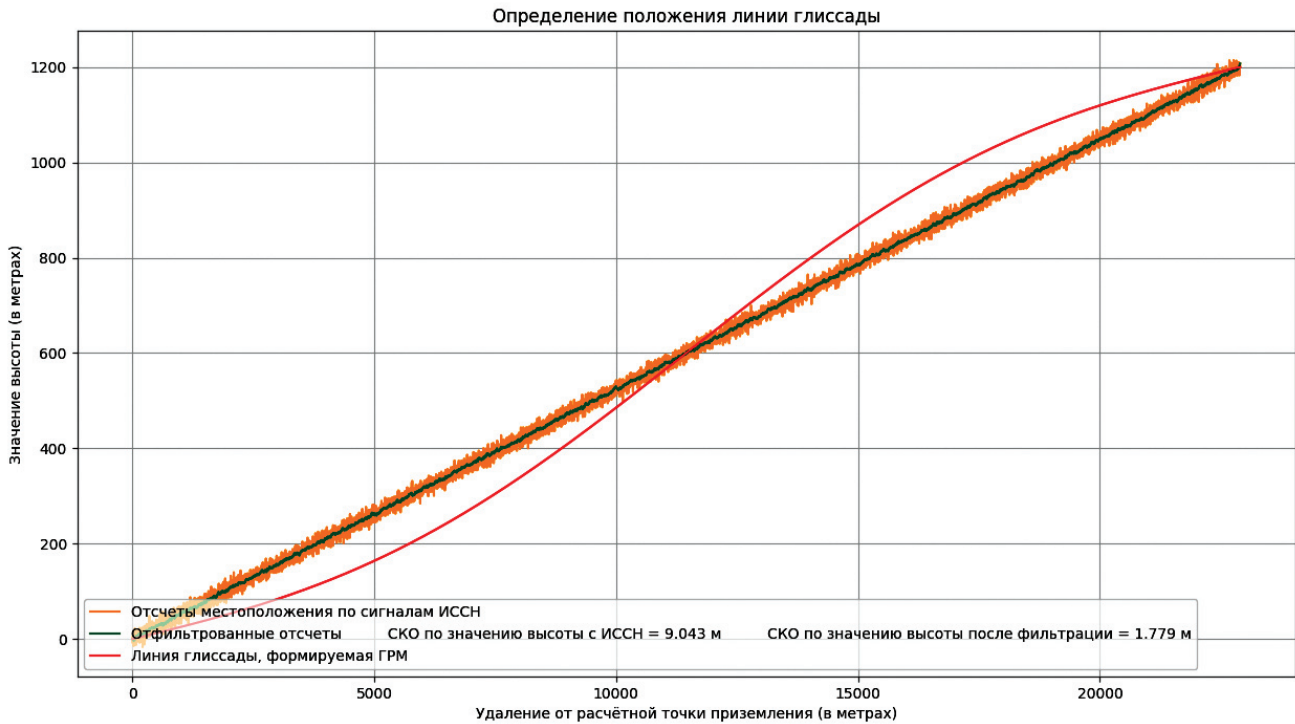


Рис. 7. Результат имитационного моделирования первого захода на посадку по заданной траектории

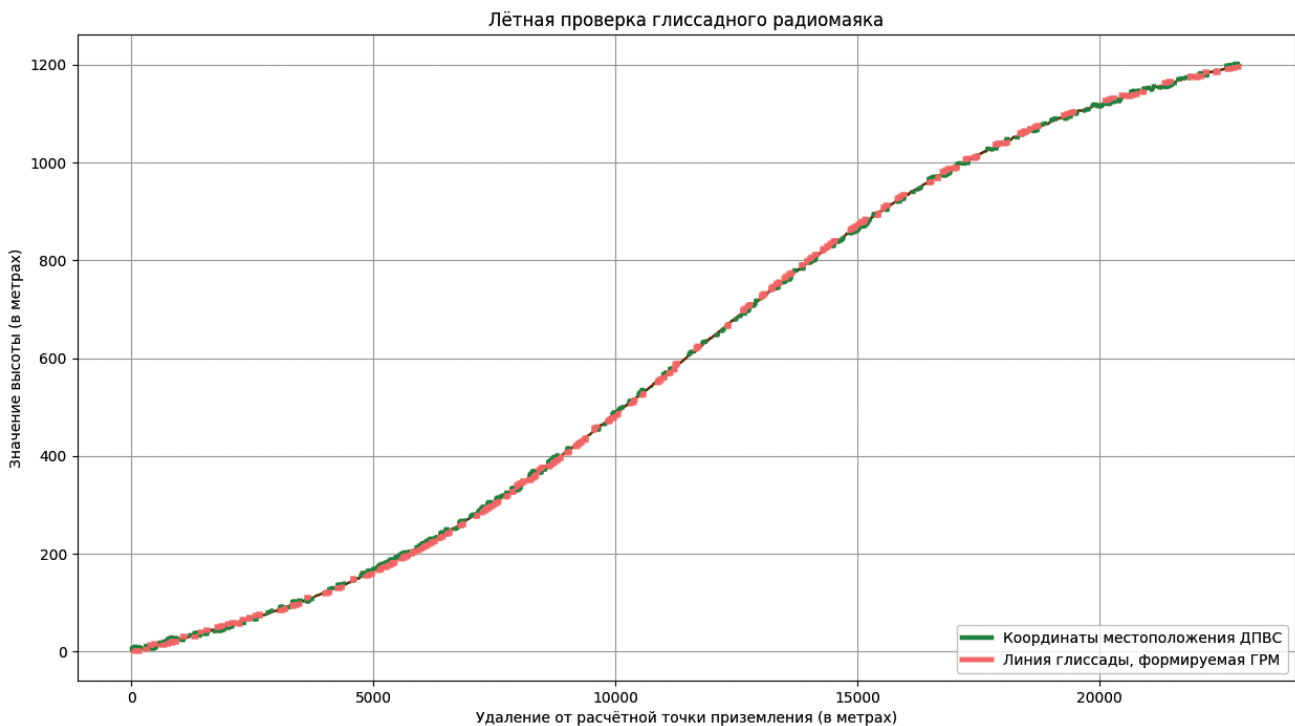


Рис. 8. Результат имитационного моделирования последнего захода на посадку по скорректированной траектории

проверок в условиях воздействия внешних дестабилизирующих факторов.

В общем случае оценить эффективность функционирования системы радиотехнического обеспечения в рамках обеспечения полетов це-

лесообразно с помощью метода преобразования неформализуемых качественных и количественных показателей соответствующих мероприятий в иерархическую систему приоритетов [11, 22].

Список источников

1. Manual on Testing of Radio Navigation Aids. Volume I – Testing of Ground-based Radio Navigation Systems. — 5th ed. International Civil Aviation Organization (ICAO), Montreal, 2018. — 166 p.
2. *Погосян М.А., Верейкин А.А.* Управление положением и движением летательных аппаратов в системах автоматической посадки: Аналитический обзор // Вестник Московского авиационного института. 2020. Т. 27. № 3. С. 7-22. DOI: 10.34759/vst-2020-3-7-22
3. *Дьяченко М.В., Анюточкина А.С., Рубцов Е.А.* Система учета и анализа траекторий движения воздушных судов и транспортных средств для прогнозирования конфликтов на рабочей площадке аэродрома // Вестник Московского авиационного института. 2020. Т. 27. № 3. С. 209-218. DOI: 10.34759/vst-2020-3-209-218
4. *Додонов А.Г., Путиянин В.Г.* Наземные оптические, оптико-электронные и лазерно-телевизионные средства траекторных измерений // Математические машины и системы. 2017. № 4. С. 30-56.
5. *Togola S., Kiemde M.A., Kora A.D.* Real Time and Post-Processing Flight Inspection by Drone: A Survey // 43rd International Conference on Telecommunications and Signal Processing – TSP (7–9 July 2020; Milan, Italy). 2020, pp. 399-402. DOI: 10.1109/TSP49548.2020.9163498
6. *Курсанов А.П.* Скрытое движение воздушных объектов в зоне обнаружения бортовой доплеровской радиолокационной станции по прямолинейным траекториям // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26. № 4. С. 191-199. DOI: 10.34759/vst-2019-4-191-199
7. *Barrado C., Ramirez J., Pérez-Battle M., Santamaria E., Prats X., Pastor E.* Remote Flight Inspection Using Unmanned Aircraft // Journal of Aircraft. 2013. Vol. 50. No. 1, 38-46. DOI: 10.2514/1.c031450
8. *De Oliveira Costa D., Oliveira N.M.F., d'Amore R.* The Feasibility of Remotely Piloted Aircrafts for VOR Flight Inspection // Sensors. 2020, Vol. 20. No. 7. DOI: 10.3390/s20071947
9. *Войтович Н.И., Жданов Б.В.* Способ летных проверок наземных средств радиотехнического обеспечения полетов и устройства для его применения. Патент RU 2501031 C2. Бюл. № 34, 10.12.2013.
10. *Wilkens C.-S., Heinke T., Seide R.* Application of Unmanned Aircraft Systems as an Instrument in Flight Inspection // International Flight Inspection Symposium (16–20 April 2018; Monterey, California), pp. 237–242. URL: http://www.icasco.org/sites/aauploads/documents/20th_IFIS_Papers/Papers/IFIS18-0022.pdf
11. *Будко П.А., Винограденко А.М., Меженев А.В., Чикирев А.А.* Способ и устройство интеллектуального экспресс-контроля технического состояния наземных средств связи и радиотехнического обеспечения полетов // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 1. С. 235-283. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10108
12. *Максимов Н.А., Склеймин Ю.Б., Шаронов А.В.* Модель для оценки эффективности системы мониторинга с использованием группы беспилотных летательных аппаратов // Вестник Московского авиационного института. 2015. Т. 22. № 3. С. 30-39.
13. *Веремеенко К.К., Желтов С.Ю., Ким Н.В. и др.* Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов. — М.: Физматлит, 2009. — 552 с.
14. *Марон А.И., Марон М.А., Липатников А.Ю.* Определение количества сотрудников для реализации проектов доработки наземных средств радиотехнического обеспечения полетов // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26. № 3. С. 190-200.
15. *Ярлыков М.С., Богачев А.С., Меркулов В.И., Дрогалин В.В.* Радиоэлектронные комплексы навигации, прицеливания и управления вооружением летательных аппаратов. Т. 2. Применение авиационных радиоэлектронных комплексов при решении боевых и навигационных задач / Под ред. М.С. Ярлыкова. — М.: Радиотехника, 2012. — 256 с.
16. *Косенко В.Е., Марарескул Д.И., Ермоленко В.И. и др.* Навигационное обеспечение посадки воздушных судов с применением ГЛОНАСС-технологий // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2010. Т. 53. № 1. С. 15–20.
17. *Балакришнан Л.* Теория фильтрации Калмана / Пер. с англ. С.М. Зуева; Под ред. А.А. Новикова. — М.: Мир, 1988. — 168 с.
18. *Chui C.K., Chen G.* Kalman Filtering: with Real-Time Applications. — 4th. ed. — Springer Publishing Company, Incorporated, 2008. — 244 p.
19. *Разоренов Г.Н., Бахрамов Э.А., Тутов Ю.Ф.* Системы управления летательными аппаратами (баллистическими ракетами и их головными частями): Учебник для вузов. — М: Машиностроение, 2003. — 584 с.
20. *Blake W., Siegele K., Burns R.* A UAV avionics system to facilitate VHF depth sounding and SAR // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium – IGARSS (23–28 July 2007; Barcelona, Spain). DOI: 10.1109/igarss.2007.4422878
21. *Atkinson L.E.* Routine Instrument Landing System (ILS) Flight Inspections Conducted From a Remote Location // 15th International Flight Inspection Symposium — IFIS'08 (June 2008; Oklahoma City, OK, USA). URL: http://www.icasco.org/sites/aauploads/documents/resources/15th_int_flight_inspection_symposium/ils_remote.pdf
22. *Ломакин М.И., Мистров Л.Е., Морозов В.П.* Метод определения приоритетов сравниваемых элементов по совокупности неформализуемых показателей качества // Стандарты и качество. 2017. № 1(995). С. 76–79.

References

1. *Manual on Testing of Radio Navigation Aids. Volume I – Testing of Ground-based Radio Navigation Systems*. 5th ed. International Civil Aviation Organization (ICAO), Montreal, 2018, 166 p.
2. Pogosyan M.A., Vereikin A.A. Position and motion control of aerial vehicles in automatic landing systems: analytical review. *Aerospace MAI Journal*, 2020, vol. 27, no. 3, pp. 7-22. DOI: 10.34759/vst-2020-3-7-22
3. D'yachenkova M.V., Anyutochkina A.S., Rubtsov E.A. Aircraft and vehicle motion path registering and analyzing system for conflicts prediction at the aerodrome movement area. *Aerospace MAI Journal*, 2020, vol. 27, no. 3, pp. 209-218. DOI: 10.34759/vst-2020-3-209-218
4. Dodonov A.G., Putyanin V.G. *Matematicheskie mashiny i sistemy*, 2017, no. 4, pp. 30-56.
5. Togola S., Kiemde M.A., Kora A.D. Real Time and Post-Processing Flight Inspection by Drone: A Survey. *43rd International Conference on Telecommunications and Signal Processing – TSP (7-9 July 2020; Milan, Italy)*, 2020, pp. 399-402. DOI: 10.1109/TSP49548.2020.9163498
6. Kirsanov A.P. Stealthy movement of aerial object along rectilinear paths in the onboard doppler radar station detection zone. *Aerospace MAI Journal*, 2019, vol. 26, no. 4, pp. 191-199. DOI: 10.34759/vst-2019-4-191-199
7. Barrado C., Ramírez J., Pérez-Batlle M., Santamaria E., Prats X., Pastor E. Remote Flight Inspection Using Unmanned Aircraft. *Journal of Aircraft*, 2013, vol. 50, no. 1, 38-46. DOI: 10.2514/1.c031450
8. De Oliveira Costa D., Oliveira N.M.F., d'Amore R. The Feasibility of Remotely Piloted Aircrafts for VOR Flight Inspection. *Sensors*, 2020, vol. 20, no. 7. DOI: 10.3390/s20071947
9. Voitovich N.I., Zhdanov B.V. *Patent RU 2501031 C2*, 10.12.2013.
10. Wilkens C.-S., Heinke T., Seide R. Application of Unmanned Aircraft Systems as an Instrument in Flight Inspection. *International Flight Inspection Symposium (16-20 April 2018; Monterey, California)*, pp. 237-242. URL: http://www.icasco.org/sites/faa/uploads/documents/20th_IFIS_Papers/Papers/IFIS18-0022.pdf
11. Budko P.A., Vinogradenko A.M., Mezhenov A.V., Chikirev A.A. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti*, 2020, no. 1, pp. 235-283. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10108
12. Maximov N.A., Skleimin Y.B., Sharonov A.V. A model for evaluating the effectiveness of the monitoring system using a group of unmanned aerial vehicles. *Aerospace MAI Journal*, 2015, vol. 22, no. 3, pp. 30-39.
13. Veremeenko K.K., Zheltov S.Yu., Kim N.V. et al. *Sovremennyye informatsionnyye tekhnologii v zadachakh navigatsii i navedeniya bespilotnykh manevrennykh letatel'nykh apparatov* (Modern information technologies in the tasks of navigation and guidance of unmanned maneuverable aircraft), Moscow, Fizmatlit, 2009, 552 p.
14. Maron A.I., Maron M.A., Lipatnikov A.Y. Defining the number of employees for project realization of ground-based radio engineering flight support means upgrade. *Aerospace MAI Journal*, 2019, vol. 26, no. 3, pp. 190-200.
15. Yarlykov M.S., Bogachev A.S., Merkulov V.I., Drogalin V.V. *Radioelektronnyye komplekсы navigatsii, pritselivaniya i upravleniya vooruzheniem letatel'nykh apparatov. T. 2. Primenenie aviatsionnykh radioelektronnykh kompleksov pri reshenii boevykh i navigatsionnykh zadach* (Radio-electronic complexes of aircraft navigation, aiming and weaponry control. Vol. 2. Application of aviation radio-electronic complexes in solving combat and navigation tasks), Moscow, Radiotekhnika, 2012, 256 p.
16. Kosenko V.E., Marareskul D.I., Ermolenko V.I. et al. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie*, 2010, vol. 53, no. 1, pp. 15-20.
17. Balakrishnan A.V. *Kalman filtering theory (University Series in Modern Engineering)*. Springer, 1984, 222 p.
18. Chui C.K., Chen G. *Kalman Filtering: with Real-Time Applications*. 4th. ed. Springer Publishing Company, Incorporated, 2008, 244 p.
19. Razorenov G.N., Bakhranov E.A., Titov Yu.F. *Sistemy upravleniya letatel'nyimi apparatami: ballisticheskimi raketami i ikh golovnymi chastyami* (Aircraft control systems: ballistic missiles and their warheads), Moscow, Mashinostroenie, 2003, 584 p.
20. Blake W., Siegele K., Burns R. A UAV avionics system to facilitate VHF depth sounding and SAR. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium – IGARSS (23-28 July 2007; Barcelona, Spain)*. DOI: 10.1109/igarss.2007.4422878
21. Atkinson L.E. Routine Instrument Landing System (ILS) Flight Inspections Conducted From a Remote Location. *15th International Flight Inspection Symposium - IFIS'08 (June 2008; Oklahoma City, OK, USA)*. URL: http://www.icasco.org/sites/faa/uploads/documents/resources/15th_int_flight_inspection_symposium/ils_remote.pdf
22. Lomakin M.I., Mistrov L.E., Morozov V.P. *Standarty i kachestvo*, 2017, no. 1(995), pp. 76-79.

Статья поступила в редакцию 11.10.2021; одобрена после рецензирования 17.11.2021; принята к публикации 17.11.2021.

The article was submitted on 11.10.2021; approved after reviewing on 17.11.2021; accepted for publication on 17.11.2021.