

УДК 629.735.05:621.3

DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-6-25-36

## Комплексная система контроля наземного движения на аэродроме

Э.А. Болелов<sup>1</sup>, А.С. Борзова<sup>1</sup>, Н.М. Романенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет гражданской авиации,  
г. Москва, Россия

**Аннотация:** Безопасность движения воздушных судов, специальных транспортных средств на аэродроме во многом определяется уровнем оснащения аэродрома системами наблюдения и контроля наземного движения на аэродроме, а именно в зоне маневрирования аэродрома, к которой относятся взлетно-посадочная полоса, рулежные дорожки, перрон. Современные системы наблюдения, которые включают радиолокаторы обзора летного поля, аэродромные многопозиционные системы наблюдения и аппаратуру системы автоматического зависящего наблюдения, обладают высокими тактико-техническими характеристиками, позволяющими обеспечивать требуемый уровень безопасности наземного движения на аэродроме. Однако перечисленные системы наблюдения являются радиотехническими системами и в связи с этим подвержены влиянию радиопомех, которые могут существенно ухудшить их тактико-технические характеристики или полностью исключить их использование по назначению. Перспективные системы наблюдения, в частности системы виброакустического контроля, не подвержены влиянию радиопомех, могут функционировать в любую погоду и в любое время года и суток, но обладают существенным недостатком – невозможностью определения координат неподвижных объектов на аэродроме. Возможным выходом из сложившегося противоречия является объединение существующих и перспективных систем в единую комплексную систему наблюдения и контроля движения на аэродроме. В статье на базе марковской теории оценивания случайных процессов разработаны алгоритмы комплексной обработки информации о движении объектов в зоне аэродрома и предложены структурные схемы комплексной системы наблюдения и контроля движения на аэродроме. Сделан вывод о целесообразности создания комплексной системы наблюдения и контроля движения на аэродроме, обладающей возможностью обнаружения аномальной работы системы.

**Ключевые слова:** обзор летного поля, комплексирование измерителей, контроль движения на аэродроме, система наблюдения, виброакустическая система, наземное движение, марковская теория.

**Для цитирования:** Болелов Э.А., Борзова А.С., Романенко Н.М. Комплексная система контроля наземного движения на аэродроме // Научный вестник МГТУ ГА. 2025. Т. 28, № 6. С. 25–36. DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-6-25-36

## Integrated ground movement control system at an airfield

E.A. Bolelov<sup>1</sup>, A.S. Borzova<sup>1</sup>, N.M. Romanenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia

**Abstract:** The safety of the traffic of aircraft and special vehicles at an airfield is largely determined by the level of ground movement surveillance and control systems at the airfield, specifically within the airfield maneuvering zone, which includes the runway, taxiways, and apron. Modern surveillance systems, including airfield surveillance radars, airfield multi-position surveillance systems, and automatic dependent surveillance system equipment, have high tactical and technical characteristics that ensure the required level of ground traffic safety at the airfield. However, these surveillance systems are radio-based and therefore susceptible to radio interference, which can significantly worsen their performance or completely prevent their intended use. Advanced surveillance systems, particularly vibroacoustic monitoring systems, are not susceptible to radio interference and can operate in any weather and at any time of the year and day, however, they have a significant disadvantage – the inability to determine the coordinates of stationary objects at the airfield. A possible solution to the current contradiction is to integrate existing and prospective systems into a single, integrated airfield traffic monitoring and control system. This article, based on Markov theory for estimating random processes, develops algorithms for integrated processing of information on the movement of objects in the

airfield area and proposes structural diagrams for an integrated airfield traffic monitoring and control system. It concludes that it is feasible to create an integrated airfield traffic monitoring and control system capable of detecting abnormal system operation.

**Key words:** overview of the airfield, integration of meters, airfield traffic control, surveillance system, vibroacoustic system, ground movement, Markov theory.

**For citation:** Bolelov, E.A., Borzova, A.S., Romanenko, N.M. (2025). Integrated ground movement control system at an airfield. Civil Aviation High Technologies, vol. 28, no. 6, pp. 25–36. DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-6-25-36

## Введение

Контроль и наблюдение за объектами (воздушными судами (ВС), транспортными средствами (ТСС)), находящимися в зоне маневрирования аэродрома, осуществляется системами наблюдения, входящими в состав системы наблюдения и контроля аэродромного движения (СНКАД). В соответствии с классификацией ИКАО существуют четыре уровня функционала СНКАД (международный термин – A-SMGCS – Advanced Surface Movement Guidance and Control System).

Функционал СНКАД уровня 1 включает функции наблюдения за воздушной и наземной обстановкой, предоставляемые диспетчеру. СНКАД осуществляют траекторную обработку информации, поступающей от измерителей координат и параметров движения объектов в зоне маневрирования аэродрома.

В состав отображаемой информации о зоне маневрирования аэродрома входят: стоянки ВС; границы и осевые линии взлетно-посадочной полосы (ВПП); границы и осевые линии магистральных рулежных дорожек (МРД); границы перронов; осевые линии рулежных дорожек (РД); зоны ограничений; координатные отметки ВС и ТСС и др.

Реализация функций СНКАД уровня 1 не требует участия средств автоматизации и распределена между средствами обработки данных наблюдения и автоматизированными рабочими местами (АРМ) диспетчеров.

Функционал СНКАД уровня 2 включает функции СНКАД уровня 1, а также отображение конфликтов на ВПП диспетчеру.

Функционал СНКАД уровня 3 включает функции СНКАД уровня 2, а также выдачу информации наблюдения всем ВС и ТСС в зоне маневрирования аэродрома; выдачу информации о конфликтах оборудованным ВС

и ТСС; функцию маршрутизации, доступную диспетчеру.

Функционал СНКАД уровня 3 должен позволять каждому ВС и ТСС в зоне маневрирования аэродрома иметь информацию о местоположении всех других ВС и ТСС. Следует отметить, что СНКАД уровня 3 предполагает, что все ВС и ТСС, двигающиеся в зоне маневрирования аэродрома, оборудованы ответчиками системы автоматического зависящего наблюдения АЗН-В.

Функционал СНКАД уровня 4 включает функции СНКАД уровня 3, а также предоставление информации о маршрутах руления оборудованным ВС и ТСС, предоставление информации о конфликтах всем ВС и ТСС, расчет вариантов автоматического разрешения конфликтных ситуаций и их предоставление диспетчеру.

Эксплуатируемая в настоящее время СНКАД «Вега» соответствует СНКАД уровня 2 и обрабатывает информацию от радиолокатора обзора летного поля (РЛ ОЛП), аэродромного обзорного радиолокатора (АОРЛ) и аэродромной многопозиционной системы наблюдения (АМПСН) и системы АЗН-В. Необходимо отметить, что информация от АОРЛ имеет низкий приоритет. Современная автоматизированная система управления воздушным движением (АС УВД) «Галактика», эксплуатируемая в Московском центре автоматизированного управления воздушным движением в качестве резервной, содержит функции СНКАД уровня 4.

Реализация СНКАД уровней 2–4 предполагает высокую точность определения местоположения ВС и ТСС, основывающуюся на требованиях ИКАО и рекомендациях агентства «Евроконтроль». Однако реальная точность определения координат ВС и ТСС напрямую зависит от точности РЛ ОЛП и АМПСН.

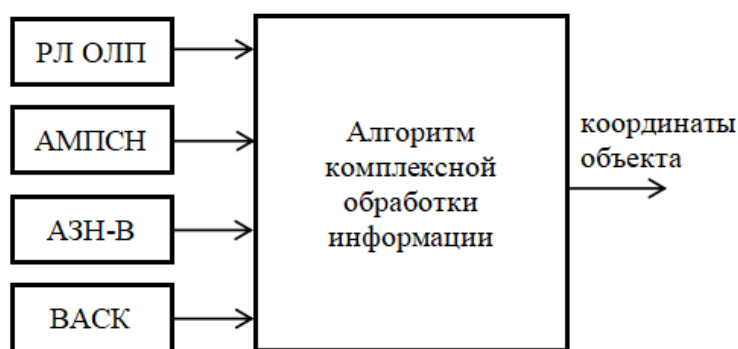


Рис. 1. Обобщенная структура КС НКАД  
Fig. 1. Generalized structure of the A-SMGCS

Анализ уровней реализации СНКАД позволяет сделать вывод, что для определения координат объекта в зоне маневрирования аэродрома в настоящее время используются РЛ ОЛП, АМСН и АЗН-В. Все эти системы являются радиотехническими и несмотря на то, что они работают в различных частотных диапазонах, обладают одним существенным недостатком – зависимостью от уровня радиопомех. Компенсировать этот недостаток возможно путем внедрения систем наблюдения, принцип функционирования которых основан на других физических принципах. К таким системам относятся виброакустические системы контроля (ВАСК) движения на аэродроме. Отечественной разработкой такой системы, успешно прошедшей испытания, является виброакустическая система «Топот» разработки АО «Концерн “МАНС”». ВАСК «Топот» представляет собой набор разнесенных в пространстве и расположенных по периметру площади маневрирования аэродрома чувствительных датчиков акустических волн, работающих по принципу когерентной рефлектометрии [1–3].

Основным достоинством ВАСК является независимое круглосуточное и всепогодное автоматическое обнаружение движущихся ВС, ТСС и других объектов в пределах зоны маневрирования аэродрома. ВАСК является абсолютно помехоустойчивой системой во всем радиодиапазоне. Однако ВАСК обладает и рядом недостатков, а именно: меньшей по сравнению с радиотехническими системами наблюдения точностью, неоднозначностью измерений и, главное, невозможностью

наблюдения неподвижных объектов и их контроля. Очевидно, что объединение систем наблюдения, работающих на различных физических принципах, позволит существенно снизить влияние их недостатков и повысить безопасность движения на аэродроме.

Таким образом, в состав комплексной системы наземного наблюдения и контроля аэродромного движения (КС НКАД) должны входить существующие системы наблюдения – РЛ ОЛП, АМПСН, АЗН-В и перспективная система ВАСК. На рис. 1 приведена обобщенная структура КС НКАД. Основой КС НКАД являются алгоритмы комплексной обработки информации (КОИ) о координатах объектов в зоне маневрирования аэродрома.

Основой КС являются алгоритмы комплексной обработки информации (КОИ) о координатах объектов в зоне маневрирования аэродрома. Синтез алгоритмов КОИ будем осуществлять с использованием марковской теории оценивания случайных процессов (МТОСП) [4, 5].

### **Математические модели выходных сигналов аэродромных систем наблюдения. Постановка задачи синтеза алгоритмов комплексной обработки информации о наземном движении на аэродроме**

Потребность в математических моделях сигналов на выходе аэродромных систем наблюдения неизбежно возникает при разра-

ботке КС НКАД, основанной на методах МТОСП. Чем адекватнее модели реальным процессам, протекающим в системах наблюдения (РЛ ОЛП, А-МПСН, АЗН-В и ВАСК), тем эффективнее будут работать комплексные алгоритмы комплексной обработки информации (КОИ), в основу которых положены эти модели.

Измеренное значение параметра движения объекта на выходе измерителя достаточно часто представляется в виде [6]

$$z_u(t) = z(t) - \varepsilon_z(t), \quad (1)$$

где  $z_u(t)$  – измеренное значение параметра,  $z(t)$  – истинное значение параметра,  $\varepsilon_z(t)$  – ошибка измерителя.

Ошибка измерителя в общем случае имеет постоянную (или медленно меняющуюся) и флуктуационную составляющую.

Постоянная составляющая вызвана, например, систематической составляющей методической погрешности измерителя, а также другими факторами. Особенностью постоянной (медленно меняющейся) составляющей ошибки измерителя является ее мед-

ленное, как правило монотонное, изменение с течением времени.

Флуктуационная составляющая обусловлена действием помех, нестабильностями в работе измерителя, траекторными флуктуациями объекта наблюдения и т. д. Флуктуационная составляющая ошибки измерения параметра является непредсказуемой и по знаку, и по величине. Как показывают исследования [7–9], применительно к рассматриваемой задаче флуктуационная составляющая с достаточной степенью адекватности может быть описана стационарным гауссовским случайным процессом с нулевым математическим ожиданием и корреляционной функцией вида

$$R_\varepsilon(\tau) = \sigma_\varepsilon^2 e^{-\alpha_\varepsilon |\tau|}, \quad (2)$$

где  $\sigma_\varepsilon^2$  – дисперсия флуктуационной составляющей ошибки измерителя;  $\alpha_\varepsilon$  – ширина спектра флуктуаций.

В соответствии с (2) флуктуационная составляющая ошибки измерителя может быть описана стохастическим дифференциальным уравнением первого порядка

$$\frac{d\varepsilon_z(t)}{dt} = -\alpha_\varepsilon \varepsilon_z(t) + \sqrt{2\alpha_\varepsilon \sigma_\varepsilon^2} n_\varepsilon(t), \quad \varepsilon_z(t_0) = \varepsilon_{z0}, \quad (3)$$

где  $n_\varepsilon(t)$  – формирующий белый гауссовский шум.

Так как практическая реализация алгоритмов обработки информации в современных СНКАД производится в цифровой форме, сигналы, а следовательно, и ошибки на выходе измерителя должны быть представлены в виде рекуррентных соотношений. Выражения (1) и (3) здесь могут быть записаны в виде

$$z_{uk} = z_k + \varepsilon_{zk}, \quad (4)$$

$$\varepsilon_{zk} = f_\varepsilon \varepsilon_{zk-1} + \gamma_\varepsilon n_{\varepsilon k-1}, \quad \varepsilon_{zk=0} = \varepsilon_{z0}, \quad (5)$$

где  $f_\varepsilon = e^{-\alpha_\varepsilon \Delta t}$ ;  $\gamma_\varepsilon = \sqrt{\sigma_\varepsilon^2 (1 - f_\varepsilon^2)}$ ;  $n_{\varepsilon k}$  – случайная гауссовская величина с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией;  $\Delta t$  – величина шага дискретизации.

Таким образом, сигнал на выходе измерителя СНКАД может быть полностью описан выражениями (4) и (5).

Как показано на рис. 1, в состав измерителей КС НКАД входят системы наблюдения РЛ ОЛП, А-МПСН, АЗН-В и ВАСК. Эти системы определяют координаты объектов, находящихся в зоне маневрирования аэродрома [10–12]. Основываясь на (4) и (5), запишем выражения для сигналов на выходах систем наблюдения:

$$x_k^i = x_k + \varepsilon_{xk}^i, \quad (6)$$

$$\varepsilon_{xk}^i = f_{\varepsilon x}^i \varepsilon_{xk-1}^i + \gamma_{\varepsilon x}^i n_{\varepsilon k-1}^i, \quad \varepsilon_{xk=0}^i = \varepsilon_{x0}^i, \quad (7)$$

$$y_k^i = y_k + \varepsilon_{yk}^i, \quad (8)$$

$$\varepsilon_{yk}^i = f_{\varepsilon y}^i \varepsilon_{yk-1}^i + \gamma_{\varepsilon y}^i n_{\varepsilon k-1}^i, \quad \varepsilon_{yk=0}^i = \varepsilon_{y0}^i, \quad (9)$$

где индекс  $i = 1 \dots 4$  определяет принадлежность параметра к конкретной системе наблюдения (РЛ ОЛП, А-МПСН, АЗН-В и ВАСК соответственно).

Выходные сигналы систем наблюдения определяются выражениями (6)–(9). Для формирования моделей, описывающих изменение во времени истинных значений координат объекта, необходимо задаться гипотезой о характере движения объекта по территории маневрирования аэродрома. Объект может двигаться прямолинейно (равномерно, с ускорением или торможением) или движение может происходить по криволинейной траектории. Модели движения объекта будут различны. При построении КС НКАД в этом случае необходимо учитывать движение объекта в конкретных зонах аэродрома, повороты, развороты и т. д. Примером такого подхода к построению системы комплексной обработки информации являются система обработки данных наблюдения АС УВД «Галактика», где для каждой модели движения объекта (прямолинейное равномерное, прямолинейное ускоренное, криволинейное) сформирован алгоритм оценивания координат объекта. Однако такой подход вряд ли можно считать продуктивным. Кроме этого, как показано в [13], при движении объектов наблюдаются нарушения скоростного режима, нарушения схем движения, несоблюдение дистанции и т. д. Все это говорит о том, что

объективно существует априорная неопределенность характера движения объектов в зоне маневрирования аэродрома.

В [5] рассматривается способ преодоления априорной неопределенности характера движения объекта. По аналогии с [5] в моделях измерений (6), (8) выразим истинные значения координат через измеренные значения:

$$x_k = x_k^i - \varepsilon_{xk}^i, \quad (10)$$

$$y_k = y_k^i - \varepsilon_{yk}^i. \quad (11)$$

Тогда справедливы следующие уравнения для измерений на выходе двух любых систем наблюдения:

$$\left( x_k^i - \varepsilon_{xk}^i \right) - \left( x_k^{i+1} - \varepsilon_{xk}^{i+1} \right) = 0, \quad (12)$$

$$\left( y_k^i - \varepsilon_{yk}^i \right) - \left( y_k^{i+1} - \varepsilon_{yk}^{i+1} \right) = 0. \quad (13)$$

Перегруппировав элементы в уравнениях (12) и (13) и выполнив замену  $x_k^i - x_k^{i+1} = \Delta_{xk}^j$ ,  $y_k^i - y_k^{i+1} = \Delta_{yk}^j$ , получаем

$$\Delta_{xk}^j = \varepsilon_{xk}^i - \varepsilon_{xk}^{i+1}, \quad (14)$$

$$\Delta_{yk}^j = \varepsilon_{yk}^i - \varepsilon_{yk}^{i+1}. \quad (15)$$

Выражения (14) и (15) представляют собой разность между измерениями на выходе систем наблюдения, которые для определенности назовем разностью измерений (РИ). В (14) и (15)  $j = 1, \dots, L$ , где  $L$  – максимально возможное число РИ. Для рассматриваемых систем наблюдения  $L = 6$ . Подставляя (7) и (8) в (14) и (15), получаем выражения для РИ:

$$\Delta_{xk}^j = f_{\varepsilon x}^i \varepsilon_{xk-1}^i + \gamma_{\varepsilon x}^i n_{\varepsilon k-1}^i - f_{\varepsilon x}^{i+1} \varepsilon_{xk}^{i+1} - \gamma_{\varepsilon x}^{i+1} n_{\varepsilon k-1}^{i+1}, \quad (16)$$

$$\Delta_{yk}^j = f_{\varepsilon y}^i \varepsilon_{yk-1}^i + \gamma_{\varepsilon y}^i n_{\varepsilon k-1}^i - f_{\varepsilon y}^{i+1} \varepsilon_{yk}^{i+1} - \gamma_{\varepsilon y}^{i+1} n_{\varepsilon k-1}^{i+1}. \quad (17)$$

Особенностью функционального и конструктивного построения систем наблюдения является взаимная независимость каналов измерения координат объекта. Следовательно, в дальнейшем целесообразно синтез алгоритмов КОИ выполнять для одного из каналов измерения координат, например координаты  $x$ . Для канала  $y$  алгоритм будет идентичным. Для облегчения записи в дальнейшем индекс « $x$ » опускается.

Анализируя выражения (6)–(9) и (16), (17), применительно к задаче синтеза алгоритмов КОИ на основе марковской теории оценивания случайных процессов (МТОСП) определим вектор состояния, компоненты которого подлежат оцениванию в КС НКАД:

$$\mathbf{X}_k = [\varepsilon_k^1 \quad \varepsilon_k^2 \quad \varepsilon_k^3 \quad \varepsilon_k^4]^T. \quad (18)$$

Динамика вектора состояния описывается уравнением

$$\mathbf{X}_{k+1} = \Phi_{XX} \mathbf{X}_k + \mathbf{G}_X \mathbf{N}_k, \quad (19)$$

где  $\Phi_{XX}$  – матрица состояния, ненулевые компоненты которой имеют вид

$$\Phi_{XX}(1,1) = f_\varepsilon^1, \quad \Phi_{XX}(2,2) = f_\varepsilon^2,$$

$$\Phi_{XX}(3,3) = f_\varepsilon^3, \quad \Phi_{XX}(4,4) = f_\varepsilon^4;$$

$\mathbf{G}_X$  – матрица возмущений, ненулевые компоненты которой имеют вид

$$\mathbf{G}_X(1,1) = \gamma_\varepsilon^1, \quad \mathbf{G}_X(2,2) = \gamma_\varepsilon^2,$$

$$\mathbf{G}_X(3,3) = \gamma_\varepsilon^3, \quad \mathbf{G}_X(4,4) = \gamma_\varepsilon^4;$$

$\mathbf{N}_k$  – вектор возмущений, компоненты которого определяются выражениями (7).

Вектор наблюдения КС НКАД определяется выражениями (16).

$$\mathbf{Y}_k = [\Delta_k^j], j = \overline{1,6}. \quad (20)$$

Динамика вектора наблюдения описывается уравнением

$$\mathbf{Y}_{k+1} = \Phi_{YX} \mathbf{X}_k + \mathbf{G}_Y \mathbf{W}_k, \quad (21)$$

где  $\Phi_{YX}$  – матрица наблюдения, ненулевые компоненты которой имеют вид

$$\Phi_{YX}(1,1) = f_\varepsilon^1, \quad \Phi_{YX}(1,2) = -f_\varepsilon^2,$$

$$\Phi_{YX}(2,1) = f_\varepsilon^1, \quad \Phi_{YX}(2,3) = -f_\varepsilon^3,$$

$$\Phi_{YX}(3,1) = f_\varepsilon^1,$$

$$\Phi_{YX}(3,4) = -f_\varepsilon^4, \quad \Phi_{YX}(4,2) = f_\varepsilon^2,$$

$$\Phi_{YX}(4,3) = -f_\varepsilon^3, \quad \Phi_{YX}(5,2) = f_\varepsilon^2,$$

$$\Phi_{YX}(5,4) = -f_\varepsilon^4,$$

$$\Phi_{YX}(6,3) = f_\varepsilon^3, \quad \Phi_{YX}(6,4) = -f_\varepsilon^4;$$

$\mathbf{G}_Y$  – матрица ошибок измерений, ненулевые компоненты которой имеют вид

$$\mathbf{G}_Y(1,1) = \gamma_\varepsilon^1, \quad \mathbf{G}_Y(1,2) = -\gamma_\varepsilon^2,$$

$$\mathbf{G}_Y(2,1) = \gamma_\varepsilon^1, \quad \mathbf{G}_Y(2,3) = -\gamma_\varepsilon^3,$$

$$\mathbf{G}_Y(3,1) = \gamma_\varepsilon^1,$$

$$\mathbf{G}_Y(3,4) = -\gamma_\varepsilon^4, \quad \mathbf{G}_Y(4,2) = \gamma_\varepsilon^2,$$

$$\mathbf{G}_Y(4,3) = -\gamma_\varepsilon^3, \quad \mathbf{G}_Y(5,2) = \gamma_\varepsilon^2,$$

$$\mathbf{G}_Y(5,4) = -\gamma_\varepsilon^4,$$

$$\mathbf{G}_Y(6,3) = -\gamma_\varepsilon^3, \quad \mathbf{G}_Y(6,4) = -\gamma_\varepsilon^4;$$

$\mathbf{W}_k$  – вектор погрешностей измерений.

Задача синтеза оптимального алгоритма комплексной обработки информации о движении объектов в зоне маневрирования аэродрома формулируется следующим образом [14–17]: требуется найти оптимальную оценку вектора состояния  $\mathbf{X}_k^*$ , удовлетворяющую критерию минимума дисперсии ошибки оценивания  $\mathbf{D}_E$ . Ошибку оценивания определим как

$$\mathbf{E}_k = \mathbf{X}_k - \mathbf{X}_k^*.$$

Тогда критерий синтеза определяется выражением

$$\mathbf{X}_k^* : \min \mathbf{D}_E. \quad (22)$$

$$\{\hat{\mathbf{X}}\}$$

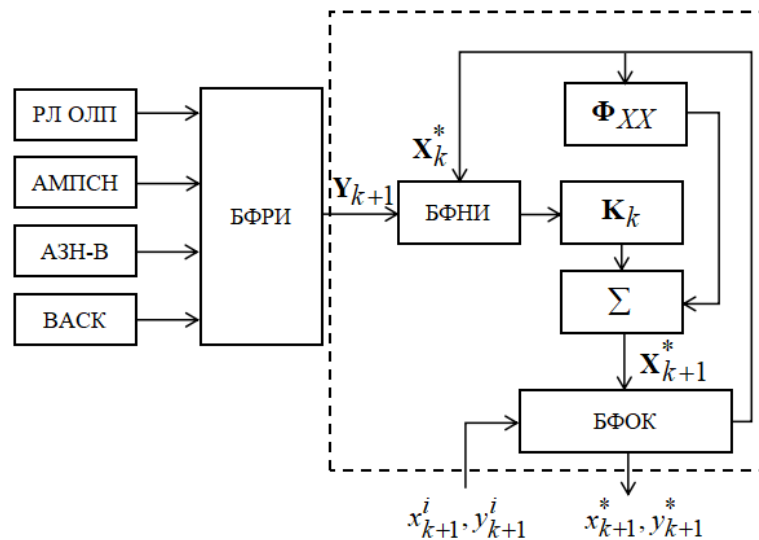


Рис. 2. Структурная схема КС НКАД  
Fig. 2. Structural diagram of the A-SMGCS

## Алгоритм комплексной обработки информации о наземном движении на аэродроме

В соответствии с методикой, изложенной в [5], на основании (18)–(22) получен алгоритм КОИ:

$$\mathbf{X}_{k+1}^* = \Phi_{XX} \mathbf{X}_k^* + \mathbf{K}_{k+1} [\mathbf{Y}_{k+1} - \Phi_{YX} \mathbf{X}_k^*], \quad (23)$$

$$\mathbf{K}_{k+1} = [\Phi_{XX} \mathbf{P}_k \Phi_{YX}^T + \mathbf{B}_{XY}] [\Phi_{YX} \mathbf{P}_k \Phi_{YX}^T + \mathbf{B}_{YY}]^{-1}, \quad (24)$$

$$\mathbf{P}_{k+1} = [\Phi_{XX} \mathbf{P}_k \Phi_{XX}^T + \mathbf{B}_{XX}] - \mathbf{K}_{k+1} [\Phi_{XX} \mathbf{P}_k \Phi_{YX}^T + \mathbf{B}_{XY}]^T. \quad (25)$$

В представленных выражениях  $\mathbf{B}_{XX} = \mathbf{G}_X \mathbf{G}_X^T$ ,  $\mathbf{B}_{XY} = \mathbf{G}_X \mathbf{G}_Y^T$ ,  $\mathbf{B}_{YY} = \mathbf{G}_Y \mathbf{G}_Y^T$ .

Выражение для  $\mathbf{X}_k^*$  определяет структурную схему комплексной системы НКАД, которая представлена на рис. 2.

На структурной схеме введены следующие обозначения: БФРИ – блок формирования разности измерений; БФНИ – блок формирования невязок измерений; БФОК – блок формирования оценок координат. С использованием оценки вектора состояния  $\mathbf{X}_k^*$ , компонентами которого являются ошибки изме-

рений систем наблюдения (18), с помощью выражений (10), (11) в БФОК формируется оценка координат объекта в зоне маневрирования аэродрома.

## Процедура обнаружения аномального режима работы КС НКАД

Недостатком полученных алгоритмов КОИ является то, что для их нормальной работы необходимо штатное функционирование систем наблюдения. Однако в реальных

условиях довольно часто возникают ситуации, когда системы наблюдения работают в аномальном режиме по причине отказов, сбоев и подобного, вызванных, например, ухудшением помеховой обстановки.

Факт отказа системы наблюдения определяется ее встроенными средствами контроля, после чего выходные данные системы не используются в КС НКАД. В случае нарушений функционирования системы наблюдения, не приводящих к потере работоспособности, система контроля не обнаруживает факт отказа и выходные данные системы наблюдения используются в КС НКАД. Это приводит к увеличению, вероятно значительному, ошибки определения координат объекта. Возможны случаи полного подавления помехами системы наблюдения и, следовательно, невозможность использования выходных данных от нее в КС НКАД. Поэтому актуальной задачей является обнаружение аномального режима работы системы наблюдения, входящей в КС НКАД. Для этого КС НКАД следует дополнить процедурой обнаружения аномального режима функционирования систем.

Существует несколько возможных подходов к разработке процедуры обнаружения нарушений функционирования системы наблюдения [18–21]. В [20] представлены подходы, связанные с введением в рассмотрение случайного неизвестного вектора  $\Xi_k$ , характеризующего структуру и параметры системы в каждый момент времени. Уравнение состояния (18) и наблюдения (19) оказываются в этом случае зависимыми от изменяющегося в случайные моменты времени вектора  $\Xi_k$ .

Однако введение в рассмотрение вектора  $\Xi_k$  связано с необходимостью описания его динамики во времени, то есть с разработкой математических моделей, описывающих изменение состояния системы наблюдения.

Наиболее простой и вместе с тем продуктивный подход связан с оценкой свойств квадратичной формы невязок измерений. Как показано в [5, 8], квадратичная форма невязок измерений может быть представлена выражением

$$\eta_{k+1} = Z_{k+1}^T \left[ \Phi_{YX} P_k \Phi_{YX}^T + B_{YY} \right]^{-1} Z_{k+1}, \quad (26)$$

где  $Z_{k+1} = \left[ Y_{k+1} - \Phi_{YX} X_k^* \right]$  – вектор невязок

измерений, распределенный по закону  $\chi_m^2$  с  $m$  степенями свободы, при условии, что все системы наблюдения работают в штатном режиме. При этом число  $m$  равно размерности вектора наблюдения.

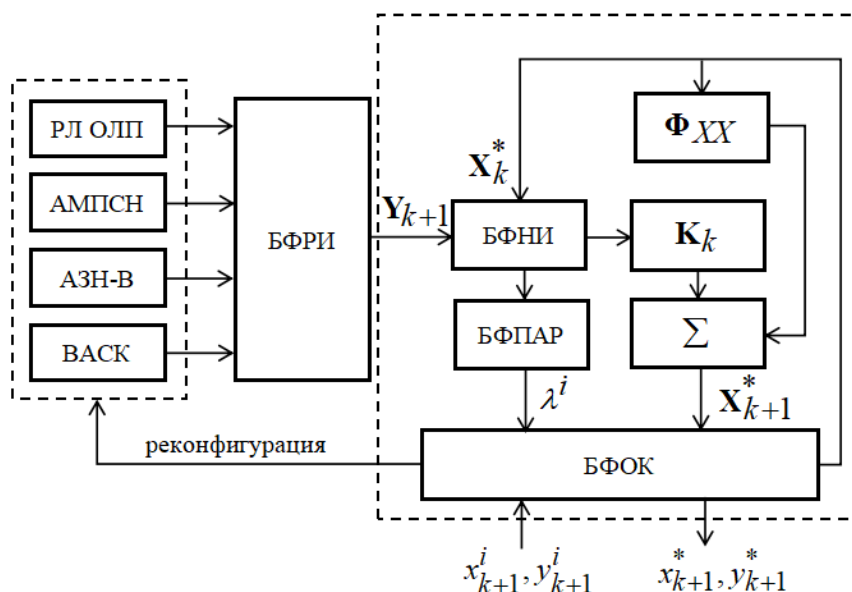
Пусть событие  $F_{k+1}$  является признаком исправной работы всей совокупности информационных каналов, тогда  $P\{F_{k+1}\} = P\{a_{k+1} < \eta_{k+1} < b_{k+1}\} = 1 - q$ , где  $a_{k+1}$  и  $b_{k+1}$  – рассчитанные  $q$  – процентные пороги для случайного числа  $\eta_{k+1}$ . Выполнение условия  $\eta_{k+1} \in (a, b)$  является признаком штатной работы систем наблюдения, признаком аномального режима является условие  $\eta_{k+1} \notin (a, b)$ . Можно провести декомпозицию (26) и определить квадратичные формы невязок измерений для каждой системы наблюдения, входящей в КС НКАД. Тогда квадратичную форму применительно к каждой системе наблюдения обозначим  $\eta_{k+1}^i$ , а условия штатного и аномального режима –  $\eta_{k+1}^i \in (a^i, b^i)$  и  $\eta_{k+1}^i \notin (a^i, b^i)$  соответственно. Введем параметр  $\lambda$ , значение которого будет формироваться по правилу

$$\lambda^i = \begin{cases} 0, & \eta_{k+1}^i \notin (a^i, b^i), \\ 1, & \eta_{k+1}^i \in (a^i, b^i). \end{cases} \quad (27)$$

Выражение (27) определяет правило обнаружения нарушений функционирования системы наблюдения, входящей в КС НКАД.

В БФОК на основе измерений оценка значений координат объектов будет определяться выражениями





**Рис. 3.** Структурная схема КС НКАД (с процедурой обнаружения аномального режима)  
**Fig. 3.** Structural diagram of the A-SMGCS (with the procedure for detecting an abnormal mode)

$$y_k^{*i} = \lambda_y^i (y_k^i - \varepsilon_{yk}^{*i}), \quad (28)$$

$$x_k^{*i} = \lambda_x^i (x_k^i - \varepsilon_{xk}^{*i}). \quad (29)$$

Индексы «х» и «у» у параметра  $\lambda^i$  в (28) и (29) отражают факт принадлежности к каналу измерения соответствующей координаты.

Структурная схема КС НКАД с учетом процедуры определения аномального режима работы систем наблюдения приведена на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что после обнаружения аномального режима работа КС НКАД, а именно одной из систем наблюдения, в БФОК формируется команда на реконфигурацию измерительной части КС НКАД, при этом выходные данные системы наблюдения, подверженной воздействию помех или отказу, исключаются из комплексной обработки.

## Заключение

Полученные алгоритмы КОИ, дополненные процедурой обнаружения аномального режима функционирования аэродромных си-

стем наблюдения, дают возможность формирования оценок координат объектов в зоне маневрирования аэродрома и реконфигурации измерительной части КС НКАД.

Для определения полученных алгоритмов целесообразно на основе статистических данных погрешностей измерений уточнить параметры математических моделей выходных сигналов систем наблюдения и оценить потенциальные и фактически достижимые характеристики качества алгоритмов КОИ методом математического моделирования.

## Список литературы

1. Алексеев А.Э., Тезадов Я.А., Потанов В.Т. Статистика интенсивности обратнорассеянного излучения полупроводникового лазера в одномодовом оптическом волокне // Письма в Журнал технической физики. 2012. Т. 38, № 2. С. 74–81.
2. Листвин А.В., Листвин В.Н. Рефлектометрия оптических волокон. М.: ЛЕСАРпт, 2005. 150 с.
3. Горшков Б.Г. Распределенный датчик внешнего воздействия на основе фазочувствительного волоконного рефлектометра / Б.Г. Горшков, В.М. Парамонов, А.С. Курков,

А.Т. Кулаков, М.В. Зафирный // Квантовая электроника. 2006. Т. 36, № 10. С. 963–965.

4. Тихонов В.И., Миронов М.А. Марковские процессы. М.: Советское радио, 1977. 488 с.

5. Ярлыков М.С., Миронов М.А. Марковская теория оценивания случайных процессов. М.: Радио и связь, 1993. 464 с.

6. Тихонов В.И., Харисов В.Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. М.: Радио и связь, 1991. 608 с.

7. Харин Е.Г. Комплексная обработка информации навигационных систем летательных аппаратов. М.: Изд-во МАИ, 2002. 264 с.

8. Миронов М.А. Обнаружение изменения свойств наблюдаемых и ненаблюдаемых случайных процессов // Радиотехника. 2007. № 1. С. 39–45.

9. Рубцов В.Д., Сеньявский А.Л. Метод вычисления распределений помехи и ее смеси с сигналом с использованием экспериментальных кривых распределения огибающей помехи // Информатизация и связь. 2015. № 2. С. 57–61.

10. Ерохин В.В. Оценка параметров многопозиционной системы наблюдения на основе адаптивного фильтра Калмана / В.В. Ерохин, Б.В. Лежанкин, Э.А. Болелов, Д.Ю. Урбанский // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2024. № 46. С. 9–19.

11. Лежанкин Б.В. Алгоритм оценки координат воздушного судна в многопозиционной системе наблюдения на основе методов адаптивной фильтрации сигналов / Б.В. Лежанкин, В.В. Ерохин, А.В. Федоров, Д.Ю. Урбанский // Вестник СПбГУ ГА. 2024. № 2 (43). С. 114–122.

12. Лежанкин Б.В. Алгоритм комплексной обработки информации в интегрированной инерциально-спутниковой системе навигации на основе адаптивного расширенного фильтра Калмана / Б.В. Лежанкин, В.В. Ерохин, Н.П. Малисов, А.В. Федоров // Вестник СПбГУ ГА. 2025. № 1 (46). С. 117–134.

13. Иванов Р.А. Организация движения спецтранспорта и средств перронной механизации на аэродроме Пулково (Санкт-Петер-

бург) // Актуальные исследования. 2023. № 9 (139). С. 17–20.

14. Аврамов А.В. Метод и алгоритмы комплексной обработки информации на борту воздушного судна в интересах определения принадлежности целей // Успехи современной радиоэлектроники. 2021. Т. 75, № 1. С. 86–104. DOI: 10.18127/j20700784-202101-05

15. Кузьмин В.В., Ачкасов Н.Б. Алгоритм комплексного оценивания пространственных характеристик объектов в районе сбора информации // Известия ТулГУ. Технические науки. 2022. № 2. С. 474–480. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-2-474-480

16. Горбай А.Р., Расолько Н.М. Методики комплексной обработки информации радиолокационной станцией и станцией воздушной разведки на борту авиационного комплекса // Радиотехника. 2022. Т. 86, № 8. С. 96–102. DOI: 10.18127/j00338486-202208-10

17. Arasaratnam I., Haykin S. Square root quadrature Kalman filtering // IEEE Transactions on Signal Processing. 2008. Vol. 56, no. 6. Pp. 2589–2593. DOI: 10.1109/TSP.2007.914964

18. Болелов Э.А., Сбитнев А.В., Шалупин С.В. Математическая модель сигналов на выходе бортовых радионавигационных систем, учитывающая их внезапные отказы // Научный вестник МГТУ ГА. 2014. № 210. С. 160–162.

19. Болелов Э.А., Цыкарев А.В., Сбитнев А.В. Алгоритм контроля технического состояния бортового пилотажно-навигационного комплекса, учитывающий информационную избыточность комплекса // Научный вестник МГТУ ГА. 2015. № 222 (12). С. 175–181.

20. Гришин Ю.П., Казаринов Ю.М. Динамические системы, устойчивые к отказам. М.: Радио и связь, 1985. 176 с.

21. Соболев С.П. Контроль целостности в бортовом комплексе спутниковой системы посадки // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2007. № 4. С. 62–70.

## References

1. **Alekseev, A.E., Tezadov, Y.A., Potapov, V.T.** (2012). Statistics of intensity of backscattered semiconductor laser radiation in single-mode optic fiber. *Technical Physics Letters*, vol. 38, no. 1, pp. 89–92. DOI: 10.1134/S1063785012010178
2. **Listvin, A.V., Listvin, V.N.** (2005). Reflectometry of optical fibers. Moscow: LESARart, 150 p. (in Russian)
3. **Gorshkov, B.G., Paramonov, V.M., Kurkov, A.S., Kulakov, A.T., Zazirnyi, M.V.** (2006). Distributed external-action sensor based on a phase-sensitive fibre reflectometer. *Quantum Electronics*, vol. 36, no. 10, pp. 963–965. DOI: 10.1070/QE2006v036n10ABEH013273
4. **Tikhonov, V.I., Mironov, M.A.** (1977). Markov processes. Moscow: Sovetskoye radio, 488 p. (in Russian)
5. **Yarlykov, M.S., Mironov, M.A.** (1993). Markov theory of estimating random processes. Moscow: Radio i svyaz, 464 p. (in Russian)
6. **Tikhonov, V.I., Kharisov, V.N.** (1991). Statistical analysis and synthesis of radio engineering devices and systems. Moscow: Radio i svyaz, 608 p. (in Russian)
7. **Kharin, E.G.** (2002). Complex processing of information from aircraft navigation systems. Moscow: Izdatelstvo MAI, 264 p. (in Russian)
8. **Mironov, M.A.** (2007). Detection of the property changes of observed and nonobserved stochastic processes. *Radiotekhnika*, no. 1, pp. 39–45. (in Russian)
9. **Rubtsov, V.D., Senyavsky, A.L.** (2015). Method for calculating the noise distribution and its mixture with the signal from the experimental distribution curves ispolzovaniemi envelope interference. *Informatizatsiya i svyaz*, no. 2, pp. 57–61. (in Russian)
10. **Erokhin, V.V., Lezhankin, B.V., Bolelov, E.A., Urbansky, D.Yu.** (2024). Estimation of parameters of a multi-position surveillance system based on an adaptive Kalman filter. *Scientific Bulletin of the State Scientific Research Institute of Civil Aviation (GosNII GA)*, no. 46, pp. 9–19. (in Russian)
11. **Erokhin, V.V., Lezhankin, B.V., Fedorov, A.V., Urbansky, D.Y.** (2024). Algorithm for estimating aircraft coordinates in a multi-position surveillance system based on adaptive signal filtering methods. *Vestnik SPbGU GA*, no. 2 (43), pp. 114–122. (in Russian)
12. **Erokhin, V.V., Lezhankin, B.V., Malisov, N.P., Fedorov, A.V.** (2025). Algorithm of comprehensive information processing in the integrated inertial-satellite navigation system based on the adaptive extended Kalman filter. *Vestnik SPbGU GA*, no. 1 (46), pp. 117–134. (in Russian)
13. **Ivanov, R.A.** (2023). Organization special-purpose vehicles and apron mechanization equipment traffic at Pulkovo Airport (St Petersburg). *Aktualnyye issledovaniya*, no. 9 (139), pp. 17–20. (in Russian)
14. **Avramov, A.V.** (2021). Method and algorithms of complex information processing onboard the aircraft for the benefit of definition of accessory of the purposes. *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki*, vol. 75, no. 1, pp. 86–104. DOI: 10.18127/j20700784-202101-05 (in Russian)
15. **Kuzmin, V.V., Achkasov, N.B.** (2022). The algorithm of complex estimation of spatial characteristics of objects. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskiye nauki*, no. 2, pp. 474–480. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-2-474-480 (in Russian)
16. **Gorbai, A.R., Rasolko, N.M.** (2022). Methods of complex data processing from the radar and the air reconnaissance station of the aviation complex. *Radioengineering*, vol. 86, no. 8, pp. 96–102. DOI: 10.18127/j00338486-202208-10 (in Russian)
17. **Arasaratnam, I., Haykin, S.** (2008). Square root quadrature Kalman filtering. *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 56, no. 6, pp. 2589–2593. DOI: 10.1109/TSP.2007.914964
18. **Bolelov, E.A., Sbitnev, A.V., Shalupin, S.V.** (2014). The mathematical model of the signals at the output of onboard navigation systems, taking into account their sudden failures. *Nauchnyy vestnik MGTU GA*, no. 210, pp. 160–162. (in Russian)

**19. Bolelov, E.A., Tsykarev, A.V., Sbitnev, A.V. (2015).** An algorithm for monitoring the technical condition of an on-board flight and navigation complex, taking into account the information redundancy of the complex. *Nauchnyy vestnik MGTU GA*, no. 222 (12), pp. 175–181. (in Russian)

**20. Grishin, Yu.P., Kazarinov, Yu.M. (1985).** Dynamic systems resistant to failures.

Moscow: Radio i svyaz, 1985. 176 p. (in Russian)

**21. Sobolev, S.P. (2007).** Integrity monitoring in airborne satellite landing system. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedeniy Rossii. Radioelektronika*, no. 4, pp. 62–70. (in Russian)

### Сведения об авторах

**Болелов Эдуард Анатольевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технической эксплуатации радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта МГТУ ГА, e.bolelov@mstuca.ru.

**Борзова Анжела Сергеевна**, доктор технических наук, доцент, проректор по учебно-методической работе и молодежной политике МГТУ ГА, a.borzova@mstuca.ru.

**Романенко Нелли Михайловна**, аспирант МГТУ ГА, only\_n@inbox.ru.

### Information about the authors

**Eduard A. Bolelov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, the Head of the Technical Maintenance of Air Transport Radio-Electronic Equipment Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, e.bolelov@mstuca.ru.

**Angela S. Borzova**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Vice-Rector for Teaching, Guiding and Youth Policy, Moscow State Technical University of Civil Aviation, a.borzova@mstuca.ru.

**Nelly M. Romanenko**, Postgraduate Student, Moscow State Technical University of Civil Aviation, only\_n@inbox.ru.

|                               |            |                          |            |
|-------------------------------|------------|--------------------------|------------|
| Поступила в редакцию          | 31.03.2025 | Received                 | 31.03.2025 |
| Одобрена после рецензирования | 17.06.2025 | Approved after reviewing | 17.06.2025 |
| Принята в печать              | 20.11.2025 | Accepted for publication | 20.11.2025 |