



**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА
(РОСАВИАЦИЯ)**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ
АВИАЦИИ» (МГТУ ГА)**

ФАКУЛЬТЕТ ФАСК

КАФЕДРА ТЭ РЭО ВТ

Направление подготовки 11.06.01 Электроника, радиотехника и системы
(код и наименование направления подготовки)
СВЯЗИ


Направленность Радиолокация и радионавигация
(наименование направленности)

НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

Тема Алгоритмы обработки информации в комплексной системе
контроля движения на аэродроме


Обучающийся:

Романенко Н. М.
(Ф.И.О.)


(Подпись)

Научный руководитель:

Д. т. н., профессор Болелов Э. А.
(уч. степень, уч. звание, Ф.И.О.)


(Подпись)

Рецензенты:

Д. т. н., профессор Васильев О.В.
(уч. степень, уч. звание, Ф.И.О.)


(Подпись)

Д. т. н. Колядов Д.В.
(уч. степень, уч. звание, Ф.И.О.)


(Подпись)

Работа допущена к защите:

Заведующий кафедрой

Д. т. н., профессор Болелов Э. А.
(уч. степень, уч. звание, Ф.И.О.)


(Подпись)

МОСКВА 2025

Безопасность движения воздушных судов, специальных транспортных средств на аэродроме во многом определяется уровнем оснащения аэродрома системами наблюдения и контроля наземного движения. Современные системы наблюдения, к которым относятся радиолокаторы обзора летного поля (РЛ ОЛП), аэродромные многопозиционные системы наблюдения (МПСН-А) и аппаратура системы автоматического зависимого наблюдения (АЗН-В) 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 (ВАСНК), 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. Отечественной разработкой такой системы, успешно прошедшей испытания является виброакустическая система «Топот» разработки АО «Концерн МАНС». ВАСНК «Топот» представляет собой набор разнесенных в пространстве и расположенных по периметру площади маневрирования аэродрома чувствительных датчиков акустических волн, работающих по принципу когерентной рефлектометрии.

В научно-квалификационной работе на базе марковской теории оценивания случайных процессов разработаны алгоритмы комплексной обработки информации о движении объектов в зоне аэродрома, предложены структурные схемы комплексной системы наблюдения и контроля движения на аэродроме, а также сделан вывод о целесообразности создания комплексной системы наблюдения и контроля движения на аэродроме, обладающей возможностью обнаружения аномальной работы системы.

Контроль и наблюдение за объектами (воздушными судами (ВС), транспортными спецсредствами (ТСС) и т.п.), 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 обработки 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 зависимого 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.

Например, 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 МЦ АУВД в качестве резервной, содержит функции СНКАД 4 уровня.

Реализация СНКАД уровней 2, 3, 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.

Таким образом, в состав комплексной системы наземного наблюдения и контроля аэродромного движения (КС НКВД) должны входить существующие системы наблюдения - РЛ ОЛП, АМПСН, АЗН-В и перспективная система ВАСНК. На рисунке 1 приведена обобщённая структура КС НКВД. Основой КС НКВД 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).



Рисунок 1. Обобщенная структура КС НКНД

Реализация метод МТОСП предполагает разработку математических моделей измерителей КС НКНД. Чем адекватнее модели реальным процессам, протекающим в измерителях (РЛ ОЛП, А-МПСН, АЗН-В и ВАСНК), тем эффективнее будут работать комплексные алгоритмы КОИ, в основу которых положены эти модели.

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

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

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 медленное, 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 ни по знаку, ни по величине. Как показывают исследования 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 σ_{ε}^2 – дисперсия флуктуационной составляющей ошибки измерителя; α_{ε} – ширина спектра флуктуаций, определяемая выражением $\alpha_{\varepsilon} = \tau_{\varepsilon}^{-1}$, где τ_{ε} – постоянная времени измерителя.

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, то сигналы, а, следовательно, и ошибки на выходе измерителя должны быть представлены в виде рекуррентных соотношений. Выражения (1) и (3) в этом могут быть записано в виде

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

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

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

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

Как показано на рисунке 1 в состав измерителей КС НКНД входят системы наблюдения: РЛ ОЛП, А-МПСН, АЗН-В и ВАСНК. Эти системы определяют координаты объектов, находящихся в зоне маневрирования аэродрома. Основываясь на (4) и (5) запишем выражения для сигналов, на выходах систем наблюдения:

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

$$\varepsilon_{xk}^i = f_{\varepsilon x}^i \varepsilon_{xk-1}^i + \gamma_{\varepsilon x}^i n_{\varepsilon k-1}^i,$$

$$\varepsilon_{xk=0}^i = \varepsilon_{x0}^i, \quad (7)$$

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

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

$$\varepsilon_{yk}^i = f_{\varepsilon y}^i \varepsilon_{yk-1}^i + \gamma_{\varepsilon y}^i n_{\varepsilon k-1}^i,$$

$$\varepsilon_{yk=0}^i = \varepsilon_{y0}^i, \quad (9)$$

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

Выходные сигналы систем наблюдения определяются выражениями (6)-(9). Необходимо сформировать модели, описывающие изменение во времени истинных значений координат объекта. Для этого необходимо задаться гипотезой о характере движения объекта по территории маневрирования аэродрома. Однако, характер движения различных объектов различен, например, движение ВС по ВПП, рулежным дорожкам, перрону и движение спецтранспорта, а также других объектов носит различный характер и не может быть описано единой моделью с достаточной степенью адекватности. Следовательно, имеет место априорная неопределенность моделей изменения во времени координат объектов на территории маневрирования аэродрома.

Для преодоления этой априорной неопределенности 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

$$(x_k^i - \varepsilon_{xk}^i) - (x_k^{i+1} - \varepsilon_{xk}^{i+1}) = 0, (12) \quad (y_k^i - \varepsilon_{yk}^i) - (y_k^{i+1} - \varepsilon_{yk}^{i+1}) = 0. \quad (13)$$

Перегруппировав элементы в уравнении (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

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

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

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 объекта, 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 МТОСП определим вектор состояния, компоненты которого подлежат оцениванию в КС НКНД:

$$X_k = [\varepsilon_k^1, \varepsilon_k^2, \varepsilon_k^3, \varepsilon_k^4]^T. \quad (18)$$

Динамика вектора состояния описывается уравнением:

$$X_{k+1} = \Phi_{XX} X_k + G_X N_k, \quad (19)$$

где Φ_{XX} - матрица состояния, ненулевые компоненты которой имеют вид:

$$\Phi_{XX}(1,1) = f_{\varepsilon}^1, \quad \Phi_{XX}(2,2) = f_{\varepsilon}^2, \quad \Phi_{XX}(3,3) = f_{\varepsilon}^3, \quad \Phi_{XX}(4,4) = f_{\varepsilon}^4;$$

\mathbf{G}_X - матрица возмущений, ненулевые компоненты которой имеют вид:

$$\mathbf{G}_X(1,1) = \gamma_\varepsilon^1, \mathbf{G}_X(2,2) = \gamma_\varepsilon^2, \mathbf{G}_X(3,3) = \gamma_\varepsilon^3, \mathbf{G}_X(4,4) = \gamma_\varepsilon^4;$$

$\mathbf{N}_k = \begin{bmatrix} n_{\varepsilon k}^1 & n_{\varepsilon k}^2 & n_{\varepsilon k}^3 & n_{\varepsilon k}^4 \end{bmatrix}^T$ - вектор возмущений, компоненты которого определяются выражениями (7).

Вектор наблюдения КС НКНД, определяется выражениями (16)

$$\mathbf{Y}_k = [\Delta_{k1} \ \Delta_{k2} \ \Delta_{k3} \ \Delta_{k4} \ \Delta_{k5} \ \Delta_{k6}]^T, \quad (20)$$

Динамика вектора наблюдения описывается уравнением:

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

где Φ_{YX} - матрица наблюдения, ненулевые компоненты которой имеют вид:

$$\begin{aligned} \Phi_{YX}(1,1) &= f_\varepsilon^1, \Phi_{YX}(1,2) = -f_\varepsilon^2, \Phi_{YX}(2,1) = f_\varepsilon^1, \Phi_{YX}(2,3) = -f_\varepsilon^3, \Phi_{YX}(3,1) = f_\varepsilon^1, \\ \Phi_{YX}(3,4) &= -f_\varepsilon^4, \Phi_{YX}(4,2) = f_\varepsilon^2, \Phi_{YX}(4,3) = -f_\varepsilon^3, \Phi_{YX}(5,2) = f_\varepsilon^2, \Phi_{YX}(5,4) = -f_\varepsilon^4, \\ \Phi_{YX}(6,3) &= f_\varepsilon^3, \Phi_{YX}(6,4) = -f_\varepsilon^4; \end{aligned}$$

\mathbf{G}_Y - матрица ошибок измерений, ненулевые компоненты которой имеют вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{G}_Y(1,1) &= \gamma_\varepsilon^1, \mathbf{G}_Y(1,2) = -\gamma_\varepsilon^2, \mathbf{G}_Y(2,1) = \gamma_\varepsilon^1, \mathbf{G}_Y(2,3) = \gamma_\varepsilon^3, \mathbf{G}_Y(3,1) = \gamma_\varepsilon^1, \mathbf{G}_Y(3,4) = -\gamma_\varepsilon^4, \\ \mathbf{G}_Y(4,2) &= \gamma_\varepsilon^2, \mathbf{G}_Y(4,3) = -\gamma_\varepsilon^3, \mathbf{G}_Y(5,2) = \gamma_\varepsilon^2, \mathbf{G}_Y(5,4) = -\gamma_\varepsilon^4, \mathbf{G}_Y(6,3) = -\gamma_\varepsilon^3, \mathbf{G}_Y(6,4) = -\gamma_\varepsilon^4; \end{aligned}$$

$\mathbf{W}_k = \begin{bmatrix} n_{\varepsilon k}^1 & n_{\varepsilon k}^2 & n_{\varepsilon k}^3 & n_{\varepsilon k}^4 \end{bmatrix}^T$ - вектор погрешностей измерений.

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

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

Тогда критерий синтеза определяется выражением:

$$\mathbf{X}_k^* : \min_{\{\hat{\mathbf{X}}\}} \mathbf{D}_E = M \left\{ \mathbf{E}_k \mathbf{E}_k^T \right\} \quad (22)$$

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

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

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

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

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 вторичной обработки выходных сигналов систем наблюдения, реализующую алгоритмы КОИ, которая представлена на рисунке 2.

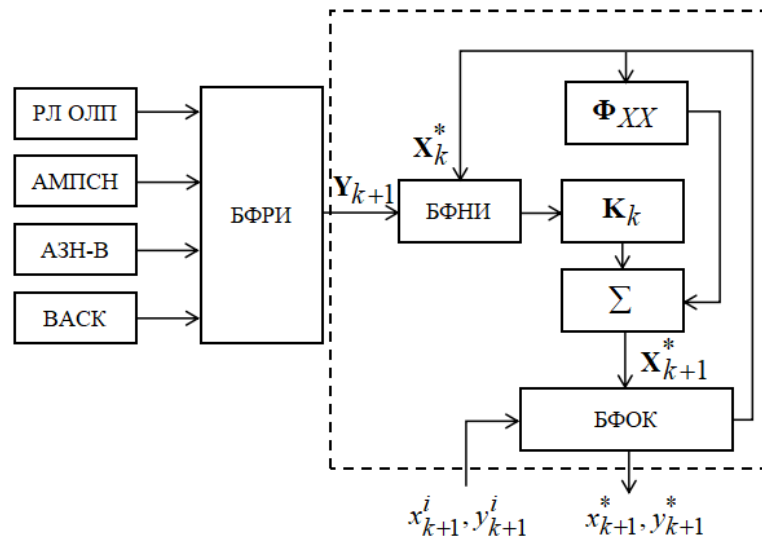


Рисунок. 2. Структурная схема КС НКНД

На структурной схеме введены следующие обозначения: БФРИ – блок формирования разности измерений; БФНИ – блок формирования невязок измерений; БФОК – блок формирования оценок координат. Используя оценку

вектора состояния X_k^* , компонентами которого являются ошибки измерений систем наблюдения (18) с помощью выражений (10), (11) в БФОК формируется оценка координат объекта в зоне маневрирования аэродрома.

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 т.п., вызванных, например, ухудшением помеховой обстановки.

Факт отказа системы наблюдения определяется ее встроенными средствами контроля, после чего выходные данные системы не используются в КС НКНД. 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 НКНД. Это приводит к увеличению, возможно значительному, ошибки определения координат объекта. Возможны случаи полное подавление помехами системы наблюдения и следовательно невозможность использования выходных данных от нее в КС НКНД. Под аномальным режимом работы в дальнейшем будем понимать такое функционирование системы наблюдения, при котором она формирует выходные сигналы, но ее средства контроля не могут обнаружить факт наличия нарушений ее функционирования. Поэтому, актуальной задачей является обнаружение аномального режима работы системы наблюдения, входящей в КС НКНД. Для этого полученные алгоритмы (23) – (25) следует дополнить процедурой обнаружения нарушений функционирования системы.

Существует несколько возможных подходов к разработке процедуры обнаружения нарушений функционирования системы наблюдения. В ряде монографий представлены подходы, связанные с введением в рассмотрение случайного неизвестного вектора γ_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 γ_k .

Однако, введение в рассмотрение вектора γ_k связано с необходимостью описания его динамики во времени, т.е. 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. Квадратичная форма невязок измерений может быть представлена выражением

$$\eta_{k+1} = \mathbf{Z}_{k+1}^T \left[\Phi_{YX} \mathbf{P}_k \Phi_{YX}^T + \mathbf{B}_{YY} \right]^{-1} \mathbf{Z}_{k+1} \quad (26)$$

где $\mathbf{Z}_{k+1} = \left[\mathbf{Y}_{k+1} - \Phi_{YX} \mathbf{X}_k^* \right]$ - вектор невязок измерений, распределенный по закону χ_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 η_{k+1} .

Выполнение условия $\eta_{k+1} \in (a, b)$ является признаком штатной работы систем наблюдения КС НКНД, 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 НКНД. Тогда квадратичную форму применительно к каждой системе наблюдения обозначим η_{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. Введём параметр λ , 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 НКНД.

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

$$x_k^{*i} = \lambda_x^i (x_k^i - \varepsilon_{xk}^{*i}), \quad (28)$$

$$y_k^{*i} = \lambda_y^i (y_k^i - \varepsilon_{yk}^{*i}). \quad (29)$$

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

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

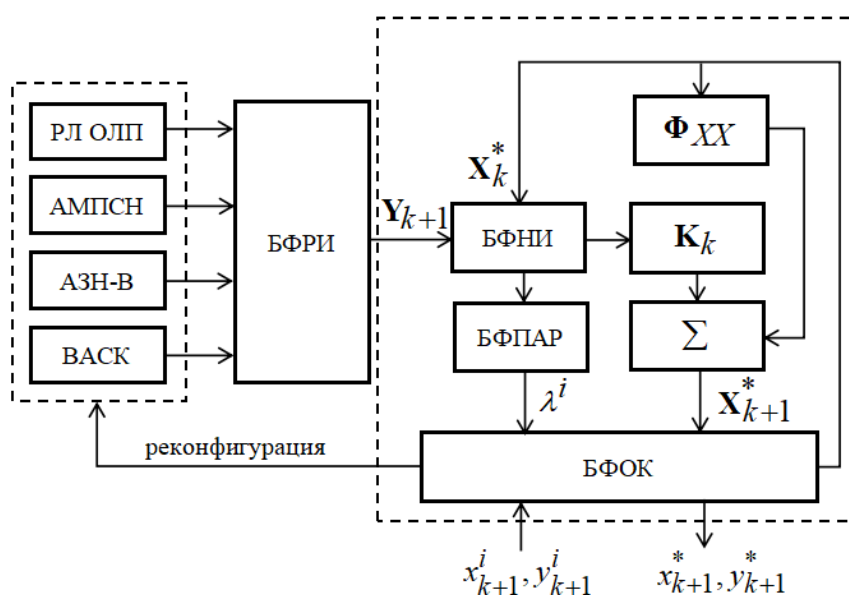


Рисунок 3. Структурная схема КС НКНД(с процедурой обнаружения аномального режима)

Таким образом, по результатам выполнения НКР можно сформулировать следующие выводы:

1. Проведен анализ существующих и перспективных систем наблюдения и контроля движения объектов на территории аэродрома, который позволил установить, что каждая из систем обладает рядом принципиально неустранимых

недостатков, которые могут быть компенсированы в комплексной системе наблюдения и контроля движения (КС НКНД) на территории аэродрома, использующей выходные данные систем наблюдения.

2. Разработаны математические модели выходных сигналов систем наблюдения, отличающиеся от известных тем, что они разработаны на основе экспериментальных данных. Погрешности выходных сигналов представляю собой уравнения авторегрессии первого и второго порядка.

3. На основе теории оценивания марковских случайных процессов разработаны алгоритмы комплексной обработки информации дополненные процедурой контроля целостности информационных каналов и отличающиеся возможностью реконфигурации информационной части КС НКНД.

4. Разработана структурная схема КС НКНД на территории аэродрома.