

УДК 629.735.05:621.3

DOI 10.51955/2312-1327_2025_3_119

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ СИНТЕЗА АЛГОРИТМОВ КОМПЛЕКСНОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ О ДВИЖЕНИИ ОБЪЕКТОВ НА РАБОЧЕЙ ПЛОЩАДИ АЭРОДРОМА С ВОЗМОЖНОСТЬЮ РЕКОНФИГУРАЦИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ КАНАЛОВ

*Нелли Михайловна Романенко,
orcid.org/0009-0004-8319-5014,
аспирант*

*Московский государственный технический
университет гражданской авиации,
Кронштадтский бульвар, 20
Москва, 125493, Россия,
only_n@inbox.ru*

*Эдуард Анатольевич Болелов,
orcid.org/0000-0002-6138-3629,
доктор технических наук, профессор
Московский государственный технический
университет гражданской авиации,
Кронштадтский бульвар, 20
Москва, 125493, Россия,
e.bolelov@mstuca.ru*

*Анжела Сергеевна Борзова,
orcid.org/0000-0002-4538-0268,
доктор технических наук, доцент
Московский государственный технический
университет гражданской авиации,
Кронштадтский бульвар, 20
Москва, 125493, Россия,
a.borzova@mstuca.ru*

Аннотация. Безопасность наземного движения на рабочей площади аэродрома во многом определяется совершенством аэродромных систем наблюдения. В настоящее время для решения задач наблюдения и контроля наземного движения на аэродроме используются радиотехнические системы наблюдения. Несмотря на высокие технические и тактические характеристики эти системы подвержены влиянию естественных и искусственных радиопомех, которые могут существенно ограничить их использование для задач наблюдения и контроля наземного движения, вплоть до полной невозможности использовать информацию от этих систем наблюдения. Перспективной разработкой является виброакустическая система наблюдения, функционирование которой основано на иных физических принципах. Однако и системам виброакустического наблюдения присущи недостатки, основным из которых является невозможность наблюдения неподвижного объекта с выключенными двигателями. Актуальной является задача объединения существующих и перспективных систем наблюдения в единую комплексную систему, в которой недостатки одной системы наблюдения будут компенсированы достоинством другой системы наблюдения. В данной статье рассмотрена постановка задачи синтеза алгоритмов комплексной обработки информации о движении объектов на рабочей площади аэродрома с возможностью реконфигурации информационных каналов.

Ключевые слова: алгоритм комплексной обработки, наземное движение, рабочая площадь аэродрома, математическая модель, радиолокационная станция обзора лётного поля, система наблюдения, многопозиционная система наблюдения, виброакустическая система наблюдения.

THE TASK OF SYNTHESIZING ALGORITHMS FOR COMPLEX PROCESSING OF INFORMATION ABOUT THE MOVEMENT OF OBJECTS IN THE TERRITORY OF AIRFIELD MANEUVERING WITH THE POSSIBILITY OF RECONFIGURATION OF INFORMATION CHANNELS

*Nelli M. Romanenko,
orcid.org/0009-0004-8319-5014,
Graduate student
Moscow State Technical University of Civil Aviation,
Kronshtadtsky Boulevard, 20
Moscow, 125493, Russia
only_n@inbox.ru*

*Eduard A. Bolelov,
orcid.org/0000-0002-6138-3629,
Grand PhD in Engineering sciences, Professor
Moscow State Technical University of Civil Aviation,
Kronshtadtsky Boulevard, 20
Moscow, 125493, Russia
e.bolelov@mstuca.ru*

*Anzhela S. Borzova,
orcid.org/0000-0002-4538-0268,
Grand PhD in Engineering sciences, Associate Professor
Moscow State Technical University of Civil Aviation,
Kronshtadtsky Boulevard, 20
Moscow, 125493, Russia
a.borzova@mstuca.ru*

Abstract. The safety of ground traffic on the airfield movement area is largely determined by the effectiveness of airfield surveillance systems. Currently, radar surveillance systems are used to solve the tasks of monitoring and controlling ground traffic at the airfield. Despite their high technical and tactical characteristics, these systems are subject to the influence of natural and artificial radio interference, which can significantly limit their application for surveillance and traffic control, to the point of making the information unusable. A promising development is a vibroacoustic monitoring system, the functioning of which is based on other physical principles. However, vibroacoustic surveillance systems also have disadvantages, the main of which is the inability to observe a stationary object with the engines turned off. The urgent task is to combine existing and promising surveillance systems into a single integrated system in which the disadvantages of one surveillance system will be compensated by the advantages of another surveillance system. This article discusses the problem of synthesizing algorithms for complex information processing of object movement in the airfield movement area, with the possibility of reconfiguring information channels.

Keywords: integrated processing algorithm, ground movement, airfield movement area, mathematical model, airfield survey radar, surveillance system, multi-position surveillance system, vibroacoustic surveillance system.

Введение

Обеспечение безопасности наземного движения на рабочей площади аэродрома (РПА), которая включает в себя рулежные дорожки (РД), взлетно-посадочную полосу (ВПП) и перрон, в условиях возрастающей интенсивности воздушного движения требует определения координат воздушных судов, специальных транспортных средств и других объектов (объектов наблюдения) с высокой точностью. Кроме требований к точности, не менее важными являются требования к достоверности информации о наземном движении на аэродроме. В настоящее время для решения задач наблюдения и контроля за движением объектов наблюдения (ОН) на РПА используются весьма совершенные системы, а именно, радиолокационная станция обзора летного поля (РЛС ОЛП) и аэродромная многопозиционная система наблюдения (МПСН-А) [Емельянов и др., 2014]. Кроме этого, разработаны и проведены испытания перспективной системы наблюдения, а именно, системы виброакустического наблюдения (ВАСН). Примером ВАСН может служить система виброакустического наблюдения и контроля наземного движения «Топот» разработки АО «Концерн МАНС».

Каждая из указанных систем обладает приемлемыми характеристиками точности, обладает определенными достоинствами, но не лишена и недостатков. Для РЛС ОЛП и МПСН-А основным недостатком является зависимость от радиопомех, действие которых может ограничить, а в определённых условиях и полностью исключить возможность применения указанных систем [Алгоритм оценки..., 2024; Емельянов и др., 2014; Оценка параметров..., 2024]. Система ВАСН инвариантна к действию радиопомех, однако она не способна определять местоположение ОН на РПА при его неподвижном состоянии и в случае выключенных двигателей.

Следовательно, актуальной является задача объединения указанных систем наблюдения в единую комплексную систему наблюдения и контроля наземного движения (КС НКНД). Очевидно, что наибольший выигрыш от внедрения КС НКНД может быть получен при решении задачи синтеза алгоритмов комплексной обработки информации (КОИ) о наземном движении на РПА [Радиоэлектронные комплексы..., 2012; Сухомлинов и др., 2014; Ткаченко и др., 2013; Ткаченко и др., 2010; Харин, 2002].

Синтез алгоритмов КОИ предполагает разработку математических моделей выходных сигналов систем, разработку математических моделей информационных и сопутствующих процессов, выбор критерия оптимизации.

Материалы и методы

Существуют различные подходы к разработке математических моделей выходных сигналов систем, частично они рассмотрены в [Радиоэлектронные комплексы..., 2012]. Отличительной особенностью этих подходов является предположение о стационарности ошибок измерения и возможность их описания экспоненциально-коррелированным случайным процессом. Данный подход вполне приемлем, однако, если исследователь располагает реальными экспериментальными данными (выходными сигналами систем наблюдения), то

следует использовать методики разработки математических моделей, основанные на анализе этих экспериментальных данных [Дрейпер и др., 1986; Радиоэлектронные системы..., 2007; Рубцов и др., 2015; Тихонов и др., 1991; Ферстер и др., 1982].

Наиболее продуктивным в этом случае является метод, основанный на представлении ошибок измерения координат ОН уравнениями авторегрессии. Этот метод был использован авторами для получения математических моделей ошибок измерения систем наблюдения.

Суть метода заключается в следующем. Пусть в результате проведенных экспериментальных исследований получен массив выборочных значений случайного векторного процесса:

$$\mathbf{Y}(k) = \{\mathbf{Y}(t_k), k = 1, \dots, N\}. \quad (1)$$

Объем выборки полагается достаточным для того, чтобы методами математической статистики [Ферстер и др., 1982] можно было определить достоверные оценки закона распределения, математического ожидания, дисперсии, коэффициентов эксцесса и асимметрии, а также корреляционной функции каждой компоненты процесса $\mathbf{Y}(k)$.

В предположении, что векторный процесс $\mathbf{Y}(k)$ является гауссовским, статистическая динамика процесса $\mathbf{Y}(k)$ в общем случае может быть описана уравнением авторегрессии вида:

$$\mathbf{Y}(k) = \sum_{i=1}^N \mathbf{B}_i \mathbf{Y}(k-i) + \mathbf{\Gamma} \mathbf{N}(k), \quad (2)$$

где \mathbf{B}_i – неизвестная матрицы постоянных коэффициентов; $\mathbf{N}(k)$ – вектор независимых случайных гауссовских величин с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией; $\mathbf{\Gamma}$ – неизвестная матрица, которая без ограничения общности полагается нижней треугольной и невырожденной.

Таким образом, для решения задачи разработки математических моделей выходных сигналов комплексируемых систем требуется определить матрицы \mathbf{B}_i , $\mathbf{\Gamma}$ уравнения (2). Эта процедура известна и описана, например, в [Ферстер и др., 1982].

Авторы на основании имеющихся экспериментальных данных разработали математические модели погрешностей РЛС ОЛП, МПСН-А и ВАСН и сформулировали постановку задачи синтеза алгоритмов КОИ. Экспериментальные данные получены в ходе проведения исследований АО «Концерн МАМС» на экспериментальном аэродроме Орловка.

Результаты

Выходные сигналы комплексируемых систем наблюдения требуется пересчитать в единую систему координат, т.к. каждая система использует свою систему координат, в которой выполняются измерения координат объектов наблюдения. Так, РЛС ОЛП измеряет наклонную дальность и азимут объекта $\begin{bmatrix} D_{РЛ}(k) \\ \theta_{РЛ}(k) \end{bmatrix}$ в полярной системе координат, МПСН-А и ВАСН измеряют координаты объекта $\begin{bmatrix} x_{МПСН}(k) \\ y_{МПСН}(k) \end{bmatrix}$ и $\begin{bmatrix} x_{ВАСН}(k) \\ y_{ВАСН}(k) \end{bmatrix}$, соответственно, в прямоугольной декартовой системе координат с началом в центре ВПП. Кроме этого, ВАСН измеряет составляющие скорости движения объекта наблюдения $\begin{bmatrix} W_{xВАСН}(k) \\ W_{yВАСН}(k) \end{bmatrix}$. Для алгоритма КОИ требуется пересчёт координат объекта и составляющих скорости его движения в единую систему координат, в которой производится комплексная обработка информации. В качестве такой системы выберем систему ПЗ-90, по аналогии с системой обработки данных наблюдения АС УВД «Галактика».

В этом случае справедливы соотношения:

$$\begin{bmatrix} \varphi_i(k) \\ \lambda_i(k) \end{bmatrix} = \mathbf{C}_{\Pi}^i \begin{bmatrix} x_i(k) \\ y_i(k) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} W_{\varphi i}(k) \\ W_{\lambda i}(k) \end{bmatrix} = \mathbf{C}_{\Pi W}^i \begin{bmatrix} W_{xi}(k) \\ W_{yi}(k) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где: $\begin{bmatrix} \varphi_i(k) \\ \lambda_i(k) \end{bmatrix}$ – координаты объекта, измеренные i -й системой после преобразования координат; $\begin{bmatrix} x_i(k) \\ y_i(k) \end{bmatrix}$ – координаты объекта, измеренные i -й системой до преобразования координат; \mathbf{C}_{Π}^i – известная матрица пересчёта координат для i -й системы наблюдения; $i=1,...,3$; $\begin{bmatrix} W_{\varphi i}(k) \\ W_{\lambda i}(k) \end{bmatrix}$ – составляющие скорости объекта наблюдения после преобразования координат; $\begin{bmatrix} W_{xi}(k) \\ W_{yi}(k) \end{bmatrix}$ – составляющие скорости объекта наблюдения до преобразования координат; $\mathbf{C}_{\Pi W}^i$ – известная матрица пересчёта составляющих скорости движения объекта наблюдения. Для определённости будем полагать, что $i=1$ (РЛС ОЛП), $i=2$ (МПСН-А), $i=3$ (ВАСН). Очевидно, что для рассматриваемого случая, в

выражении (2) и последующих соотношениях для составляющих скорости движения объекта наблюдения $i=3$.

Математическая модель сигналов с выхода i -й системы наблюдения может быть представлена в виде:

$$\begin{bmatrix} \varphi_i(k) \\ \lambda_i(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi(k) \\ \lambda(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta\varphi_i(k) \\ \Delta\lambda_i(k) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} W_{\varphi i}(k) \\ W_{\lambda i}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_{\varphi}(k) \\ W_{\lambda}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta W_{\varphi i}(k) \\ \Delta W_{\lambda i}(k) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где: $\begin{bmatrix} \varphi(k) \\ \lambda(k) \end{bmatrix}$ – вектор истинных координат объекта наблюдения; $\begin{bmatrix} \Delta\varphi_i(k) \\ \Delta\lambda_i(k) \end{bmatrix}$ – вектор погрешностей измерения i -й системы наблюдения.

В результате обработки информации от систем наблюдения формируются массивы выборочных значений погрешностей измерений координат объекта, которые представляют собой реализации случайных процессов. Анализ этих данных позволяет судить о том, что массивы выборочных значений погрешностей измерений близки к стационарным гауссовским процессам. Используя методику получения оптимальных оценок параметров модели авторегрессии векторных нормальных процессов по экспериментальным данным, были получены значения оптимальных оценок параметров моделей погрешностей измерений координат каждой из комплексируемых систем в виде уравнений авторегрессии первого, второго и третьего порядка и проведен их анализ, который позволил сделать важный вывод о том, что модель погрешностей измерений координат объекта наблюдения для комплексируемых систем с высокой адекватностью можно описать разностным стохастическим уравнением авторегрессии второго порядка:

$$\begin{bmatrix} \Delta\varphi(k+1) \\ \Delta\lambda(k+1) \end{bmatrix} = \mathbf{B}_1^* \begin{bmatrix} \Delta\varphi(k) \\ \Delta\lambda(k) \end{bmatrix} + \mathbf{B}_2^* \begin{bmatrix} \Delta\varphi(k-1) \\ \Delta\lambda(k-1) \end{bmatrix} + \mathbf{\Gamma}^* \mathbf{N}_{\Delta}(k), \quad (7)$$

где: \mathbf{B}_1^* , \mathbf{B}_2^* , $\mathbf{\Gamma}^*$ – оптимальные оценки коэффициентов разностного уравнения авторегрессии, $\mathbf{N}_{\Delta}(k)$ – вектор формирующих дискретных стандартных белых гауссовских шумов (БГШ).

Модель погрешностей измерений составляющих скорости движения объекта наблюдения с высокой адекватностью можно описать разностным стохастическим уравнением авторегрессии первого порядка:

$$\begin{bmatrix} \Delta W_{\varphi}(k+1) \\ \Delta W_{\lambda}(k+1) \end{bmatrix} = \mathbf{B}_W^* \begin{bmatrix} \Delta W_{\varphi}(k) \\ \Delta W_{\lambda}(k) \end{bmatrix} + \mathbf{\Gamma}_W^* \mathbf{N}_W(k), \quad (8)$$

где \mathbf{B}_W^* и $\mathbf{\Gamma}_W^*$ – оптимальные оценки коэффициентов разностного уравнения авторегрессии; $\mathbf{N}_W(k)$ – вектор формирующих дискретных стандартных БГШ.

Анализ выражений (7) и (8) позволяет говорить о том, что случайный процесс, описываемый выражением (8), является марковским, а случайный процесс, описываемый выражением (7), марковским не является и относится к процессам типа Юла-Уокера.

Для представления модели (7) в виде марковского процесса преобразуем её к виду:

$$\begin{bmatrix} \Delta\varphi(k+1) \\ \Delta\lambda(k+1) \end{bmatrix} = \mathbf{B}_1^* \begin{bmatrix} \Delta\varphi(k) \\ \Delta\lambda(k) \end{bmatrix} + \mathbf{B}_2^* \begin{bmatrix} \Delta\tilde{\varphi}(k) \\ \Delta\tilde{\lambda}(k) \end{bmatrix} + \mathbf{\Gamma}^* \mathbf{N}_\Delta(k), \quad (9)$$

где:
$$\begin{bmatrix} \Delta\tilde{\varphi}(k) \\ \Delta\tilde{\lambda}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta\varphi(k-1) \\ \Delta\lambda(k-1) \end{bmatrix}.$$

Таким образом, полученные выражения (5), (6) и (8), (9) представляют собой математическую модель выходных сигналов i -й системы наблюдения в системе координат ПЗ-90.

Синтез алгоритмов КОИ с использованием измеренных значений координат и параметров движения объектов наблюдения на аэродроме предполагает описание статистической динамики объекта и других сопутствующих параметров [Радиоэлектронные комплексы..., 2012; Харин, 2002; Ярлыков и др., 1993]. Однако, такой подход представляется мало продуктивным, так как корректное описание динамики объектов движения на аэродроме с учётом их разнообразных манёвров требует привлечения достаточно большого числа параметров, отражающих динамику конкретного типа объекта наблюдения (ВС, транспортное средство и др.), и приводит к весьма сложным математическим моделям, а следовательно к увеличению размерности вектора состояния, что в свою очередь увеличивает кратно объем вычислительных операций. Синтез алгоритмов КОИ без привлечения сложных априорных моделей динамики объектов наблюдения может быть выполнен на основе метода распределения информации.

Координаты объекта наблюдения в системе ПЗ-90 в первом приближении при малых $\Delta t = t_{k+1} - t_k$ в дискретные моменты времени можно представить соотношениями:

$$\varphi(k+1) = \varphi(k) + W_\varphi(k) \Delta t, \quad (10)$$

$$\lambda(k+1) = \lambda(k) + W_\lambda(k) \Delta t. \quad (11)$$

Априорная неопределённость о динамике компонент составляющих скорости $W_\varphi(k)$, $W_\lambda(k)$ ОН может быть устранена путём использования измеренных значений компонент скорости ВАСН. Для этого выразим истинные

значения компонент вектора скорости через измеренные ВАСН значения параметров движения ОН и погрешности измерений:

$$W_{\varphi}(k) = W_{\varphi BACH}(k) - \Delta W_{\varphi BACH}(k), \quad (12)$$

$$W_{\lambda}(k) = W_{\lambda BACH}(k) - \Delta W_{\lambda BACH}(k). \quad (13)$$

Подставив в (10) и (11) в (8) и (9), соответственно, получим:

$$\varphi(k+1) = \varphi(k) + (W_{\varphi BACH}(k) - \Delta W_{\varphi BACH}(k))\Delta t, \quad (14)$$

$$\lambda(k+1) = \lambda(k) + (W_{\lambda BACH}(k) - \Delta W_{\lambda BACH}(k))\Delta t. \quad (15)$$

На основании рассмотренных математических моделей выходных сигналов систем наблюдения и рассмотренных моделей (14) и (15) определим вектор состояния

$$\mathbf{X}^T(k) = [\varphi(k), \lambda(k), \Delta\varphi(k), \Delta\lambda(k), \Delta\tilde{\varphi}(k), \Delta\tilde{\lambda}(k), \Delta W_{\varphi}(k), \Delta W_{\lambda}(k)]. \quad (16)$$

Динамика вектора состояния описывается векторно-матричным разностным уравнением [Ярлыков и др., 1993]:

$$\mathbf{X}(k+1) = \Phi_{XX}\mathbf{X}(k) + \Phi_{XZ} + \Gamma_X\mathbf{N}_X(k), \quad (17)$$

где ненулевые элементы матриц имеют вид:

$$\Phi_{XX}(1,1) = \Phi_{XX}(2,1) = 1, \quad \Phi_{XX}(1,7) = \Phi_{XX}(2,8) = -\Delta t, \quad \Phi_{XX}(3,3) = \mathbf{B}_1^*(1,1),$$

$$\Phi_{XX}(3,4) = \mathbf{B}_1^*(1,2), \quad \Phi_{XX}(3,5) = \mathbf{B}_2^*(1,1), \quad \Phi_{XX}(3,6) = \mathbf{B}_2^*(1,2),$$

$$\Phi_{XX}(4,3) = \mathbf{B}_1^*(2,1), \quad \Phi_{XX}(4,4) = \mathbf{B}_1^*(2,2), \quad \Phi_{XX}(4,5) = \mathbf{B}_2^*(2,1),$$

$$\Phi_{XX}(4,6) = \mathbf{B}_2^*(2,2), \quad \Phi_{XX}(5,1) = 1, \quad \Phi_{XX}(6,2) = 1, \quad \Phi_{XX}(7,7) = \mathbf{B}_W^*(1,1),$$

$$\Phi_{XX}(7,8) = \mathbf{B}_W^*(1,2), \quad \Phi_{XX}(8,7) = \mathbf{B}_W^*(2,1), \quad \Phi_{XX}(8,8) = \mathbf{B}_W^*(2,2),$$

$$\Phi_{XZ}(1,7) = \Delta W_{\varphi BACH}(k)\Delta t, \quad \Phi_{XZ}(2,8) = \Delta W_{\lambda BACH}(k)\Delta t,$$

$$\Gamma_X(1,1) = \Gamma^*(1,1), \quad \Gamma_X(2,1) = \Gamma^*(2,1), \quad \Gamma_X(2,2) = \Gamma^*(2,2), \quad \Gamma_X(7,7) = \Gamma_W^*(1,1),$$

$$\Gamma_X(8,7) = \Gamma_W^*(2,1), \quad \Gamma_X(8,8) = \Gamma_W^*(2,2),$$

$\mathbf{N}_X(k)$ – вектор формирующих БГШ.

В соответствии с математическими моделями выходных сигналов систем наблюдения определим вектор наблюдения:

$$\mathbf{Z}^T(k) = [\varphi_{PL}(k), \lambda_{PL}(k), \varphi_{MPCN}(k), \lambda_{MPCN}(k), \varphi_{BACH}(k), \lambda_{BACH}(k)]. \quad (18)$$

В векторно-матричной форме динамика изменения во времени вектора наблюдения может быть определена выражением [Ярлыков и др., 1993]:

$$\mathbf{Z}(k+1) = \Phi_{ZX} \mathbf{X}(k+1) + \Phi_{ZZ} + \Gamma_Z \mathbf{N}_Z(k), \quad (19)$$

где ненулевые элементы матриц имеют вид:

$$\begin{aligned} \Phi_{ZX}(1,1) &= 1, \quad \Phi_{ZX}(1,3) = \mathbf{B}_1^*(1,1), \quad \Phi_{ZX}(1,4) = \mathbf{B}_1^*(1,2), \quad \Phi_{ZX}(1,5) = \mathbf{B}_2^*(1,1), \\ \Phi_{ZX}(1,6) &= \mathbf{B}_2^*(1,2), \quad \Phi_{ZX}(2,2) = 1, \quad \Phi_{ZX}(2,3) = \mathbf{B}_1^*(1,1), \quad \Phi_{ZX}(2,4) = \mathbf{B}_1^*(1,2), \\ \Phi_{ZX}(2,5) &= \mathbf{B}_2^*(2,1), \quad \Phi_{ZX}(2,6) = \mathbf{B}_2^*(2,2), \quad \Phi_{ZX}(3,1) = 1, \quad \Phi_{ZX}(3,3) = \mathbf{B}_1^*(1,1), \\ \Phi_{ZX}(3,4) &= \mathbf{B}_1^*(1,2), \quad \Phi_{ZX}(3,5) = \mathbf{B}_2^*(1,1), \quad \Phi_{ZX}(3,6) = \mathbf{B}_2^*(1,2), \quad \Phi_{ZX}(4,2) = 1, \\ \Phi_{ZX}(4,3) &= \mathbf{B}_1^*(1,1), \quad \Phi_{ZX}(4,4) = \mathbf{B}_1^*(1,2), \quad \Phi_{ZX}(4,5) = \mathbf{B}_2^*(2,1), \\ \Phi_{ZX}(4,6) &= \mathbf{B}_2^*(2,2), \quad \Phi_{ZX}(5,1) = 1, \quad \Phi_{ZX}(5,3) = \mathbf{B}_1^*(1,1), \quad \Phi_{ZX}(5,4) = \mathbf{B}_1^*(1,2), \\ \Phi_{ZX}(5,5) &= \mathbf{B}_2^*(1,1), \quad \Phi_{ZX}(5,6) = \mathbf{B}_2^*(1,2), \quad \Phi_{ZX}(6,2) = 1, \quad \Phi_{ZX}(6,3) = \mathbf{B}_1^*(1,1), \\ \Phi_{ZX}(6,4) &= \mathbf{B}_1^*(1,2), \quad \Phi_{ZX}(6,5) = \mathbf{B}_2^*(2,1), \quad \Phi_{ZX}(6,6) = \mathbf{B}_2^*(2,2), \quad \Phi_{ZZ} = 0, \\ \Gamma_Z(1,1) &= \Gamma^*(1,1), \quad \Gamma_Z(2,1) = \Gamma^*(2,1), \quad \Gamma_Z(2,2) = \Gamma^*(2,2), \\ \Gamma_Z(3,3) &= \Gamma^*(1,1), \quad \Gamma_Z(4,4) = \Gamma^*(2,1), \quad \Gamma_Z(4,5) = \Gamma^*(2,2), \\ \Gamma_Z(5,5) &= \Gamma^*(1,1), \quad \Gamma_Z(6,5) = \Gamma^*(2,1), \quad \Gamma_Z(6,6) = \Gamma^*(2,2), \\ \mathbf{N}_Z(k) &\text{ – вектор, компонентами которого являются БГШ.} \end{aligned}$$

Таким образом, выражения (17) и (19) полностью определяют модели векторов состояния и наблюдения.

Задачу синтеза алгоритмов комплексной обработки информации о движении объектов на РПА для рассматриваемого случая можно сформулировать следующим образом. Имея априорные сведения о векторе состояния (17) и располагая наблюдениями (19), необходимо определить наилучшую оценку вектора состояния $\mathbf{X}^*(k+1)$, которая должна удовлетворять критерию минимума апостериорного среднего риска [Ярлыков и др., 1993]:

$$\mathbf{X}^* : \min_{\{\hat{\mathbf{X}}\}} \left\{ \int c(\mathbf{X}, \hat{\mathbf{X}}) p\{\mathbf{X} | \mathbf{Z}_0^{k+1}\} d\mathbf{X} \right\}, \quad (20)$$

где $p\{\mathbf{X} | \mathbf{Z}_0^{k+1}\}$ – апостериорная плотность вероятности отсчёта $\mathbf{X}(k+1)$ по результатам наблюдения реализации; $c(\mathbf{X}, \hat{\mathbf{X}})$ – функция потерь, задаваемая на основании выбранного критерия оптимизации (для данной задачи – квадратичная).

При квадратичной функции потерь оптимальная оценка вектора состояния (17) по наблюдениям (19) представляет собой апостериорное математическое ожидание.

Дискуссия

Алгоритмы КОИ, получаемые в результате решения задачи синтеза, требуется дополнить алгоритмом контроля целостности информационных каналов. Существуют подходы к контролю целостности информационных каналов [Бортовые системы..., 2005; Гришин и др., 1985; Соболев, 2007], отличающиеся по сложности реализации, достоверности контроля целостности, необходимости модернизации алгоритмов КОИ. Рассмотрим достаточно простой и вместе с тем продуктивный подход к разработке алгоритма контроля целостности информационных каналов системы КОИ.

Алгоритм контроля целостности информационных каналов системы комплексной обработки информации с возможностью реконфигурации может быть реализован на основе оценки свойств квадратичной формы невязок измерений. В [Ярлыков и др., 1993] показано, что квадратичная форма невязок измерений может быть представлена выражением:

$$\xi(k+1) = \left[\mathbf{Z}(k+1) - \Phi_{ZX} \mathbf{X}^*(k+1) \right]^T \Psi(k) \left[\mathbf{Z}(k+1) - \Phi_{ZX} \mathbf{X}^*(k+1) \right], \quad (21)$$

где: $\Psi(k) = \left[\Phi_{ZX} \mathbf{R}(k) \Phi_{ZX}^T + \mathbf{B}_{ZZ} \right]^{-1}$.

В (19) $\left[\mathbf{Z}(k+1) - \Phi_{ZX} \mathbf{X}^*(k+1) \right]$ представляет собой невязку измерений. Введём в рассмотрение событие $A(k+1)$, которое является признаком штатной работы всей совокупности информационных каналов (РЛС ОЛП, МПСН-А, ВАСН), тогда можно записать:

$$P\{A(k+1)\} = P\{d_1(k+1) < \xi(k+1) < d_2(k+1)\} = 1 - q, \quad (22)$$

где: $d_1(k+1)$ и $d_2(k+1)$ – рассчитанные q – процентные пороги для случайного числа $\xi(k+1)$.

Выполнение условия $\xi(k+1) \in (d_1, d_2)$ является признаком штатной работы систем наблюдения, признаком аномального режима является условие $\xi(k+1) \notin (d_1, d_2)$.

Если провести декомпозицию выражения (19) и определить квадратичные формы невязок измерений для каждого информационного канала (системы наблюдения) комплексной системы обработки информации о движении объектов на РПА, то применительно к каждому информационному каналу можно сформулировать условия его штатного и аномального режима работы $\xi_i(k+1) \in (d_{1i}, d_{2i})$, $\xi_i(k+1) \notin (d_{1i}, d_{2i})$.

Для обеспечения реконфигурации информационных каналов комплексной системы обработки информации о движении объектов на РПА аэродрома достаточно определить значение параметра:

$$\eta_i(k+1) = \begin{cases} 0, & \xi_i(k+1) \in (d_{1i}, d_{2i}), \\ 1, & \xi_i(k+1) \notin (d_{1i}, d_{2i}). \end{cases} \quad (23)$$

Выражение (23) определяет правило обнаружения нарушений функционирования информационных каналов для последующего исключения выходных данных аномально функционирующего канала из комплексной обработки информации.

Вывод

Рассмотренная постановка задачи синтеза алгоритмов КОИ о наземном движении на аэродроме позволяет формализовать процесс синтеза алгоритмов КОИ, получить структуру КС НКНД и оценить её эффективность, определив потенциальные и фактически достижимые характеристики точности и помехоустойчивости обработки информации о движущихся объектах на РПА.

Библиографический список

- 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 Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. 2024. № 2(43). С. 114-122. EDN FBHRYV.
- Бортовые системы функционального дополнения спутниковых радионавигационных систем с реконфигурацией структуры алгоритмов комплексной обработки информации / М. А. Миронов, А. В. Башаев, Е. Б. Горский, С. А. Полосин // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2005. № 90. С. 72-81. EDN JXKXXV.
- Гришин Ю. П. Динамические системы, устойчивые к отказам / Ю. П. Гришин, Ю. М. Казаринов. М.: Радио и связь, 1985. 176 с.
- Дрейпер Н. Прикладной регрессионный анализ: пер. с англ. 2-е издание перераб. доп. / Н. Дрейпер, Г. Смир. М.: Финансы и статистика, 1986. 366 с.
- Емельянов В. Е. Техническая эксплуатация авиационного радиоэлектронного оборудования / В. Е. Емельянов, А. И. Логвин. М.: МОРКНИГА, 2014. 730 с. EDN IUCMEA.
- 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. EDN MXQBRJ.
- Радиоэлектронные комплексы навигации, прицеливания и управления вооружением летательных аппаратов. Том 1. Теоретические основы: монография / М. С. Ярлыков, А. С. Богачев, В. И. Меркулов, В. В. Дрогалин / науч. ред. М. С. Ярлыкова. М.: Радиотехника, 2012. 504 с.
- Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория: справочник / Я. Д. Ширман, С. Т. Багдасарян, А. С. Маляренко, Д. И. Леховицкий; под ред. Я. Д. Ширмана. М.: Радиотехника, 2007. 512 с.
- Рубцов В. Д. Метод вычисления распределений помехи и ее смеси с сигналом с использованием экспериментальных кривых распределения огибающей помехи / В. Д. Рубцов, А. Л. Сенявский // Информатизация и связь. 2015. № 2. С. 57-61. EDN TXTNQT.
- Соболев С. П. Контроль целостности в бортовом комплексе спутниковой системы посадки // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2007. № 4. С. 62-70. EDN THUJUT.

Сухомлинов Д. В. О комплексировании данных в информационно-управляющей системе летательного аппарата / Д. В. Сухомлинов, А. Н. Медведь // Двигатель. 2014. № 5(95). С. 38-41. EDN TDOMSD.

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

Ткаченко С. С. Алгоритм комплексной обработки информации в подсистеме навигационно-связной идентификации / С. С. Ткаченко, С. Л. Иванов, А. Ю. Трущинский // Теория и техника радиосвязи. 2013. № 4. С. 26-30. EDN RLNOWH.

Ткаченко С. С. Координатно-связное опознавание на основе теории дискретной фильтрации и статистической обработки опытных данных / С. С. Ткаченко, А. В. Аврамов // Успехи современной радиоэлектроники. 2010. № 11. С. 15-20. EDN OPBRDJ.

Ферстер Э. Методы корреляционного и регрессионного анализа: пер. с нем. / Э. Ферстер, Б. Ренц. М.: Финансы и статистика, 1982. 304 с.

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

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

References

Draper N., Smir G. (1983). Applied regression analysis: translated from English. 2nd edition. Moscow: Finance and Statistics, 1986. 366 p. (In Russian)

Erokhin V. V. [et al.] (2024). Evaluation of the parameters of a multi-position monitoring system based on an adaptive Kalman filter. *Scientific Bulletin of the State Research Institute of GA*. 46: 9-19. (In Russian)

Foerster E., Rents B. (1982). Methods of correlation and regression analysis: translated from German. Moscow: Finance and Statistics, 1982. 304 p. (In Russian)

Grishin Yu. P., Kazarinov Y. M. (1985). Dynamic systems resistant to failures. Moscow: Radio and Communications, 1985. 176 p. (in Russian)

Kharin E. G. (2002). Complex information processing of aircraft navigation systems. Moscow: Publishing House of MAI, 2002. 264 p. (In Russian)

Lezhankin B. V. [et al.] (2024). An algorithm for estimating aircraft coordinates in a multi-position surveillance system based on adaptive signal filtering methods. *Bulletin of the St. Petersburg State University of Civil Aviation*. 2(43): 114-122. (In Russian)

Mironov M. A. [et al.] (2005). On-board systems for functional augmentation of satellite radio navigation systems with reconfiguration of the structure of algorithms for complex information processing. *Scientific Bulletin of MSTU GA*. 90: 72-81. (In Russian)

Rubtsov V. D., Senyavsky A. L. (2015). A method for calculating the distributions of interference and its mixture with a signal using experimental interference envelope distribution curves. *Informatization and communication*. 2: 57-61. (In Russian)

Shirman J. D. [et al.] (2007). Radio-electronic systems. Fundamentals of construction and theory: a reference book. Moscow: Radio Engineering, 2007. 512 p. (In Russian)

Sobolev S. P. (2007). Integrity control in the on-board complex of the satellite landing system. *Izvestiya vuzov Rossii. Radioelectronics*. 4: 62-70. (In Russian)

Sukhomlinov D. V., Medved A. N. (2014). On data integration in the information and control system of an aircraft. *Engine*. 2014. № 5(95). pp. 38-41. (In Russian)

Tikhonov V. I., Kharisov V. N. (1991). Statistical analysis and synthesis of radio engineering devices and systems. Moscow: Radio and Communications, 1991. 608 p. (In Russian)

Tkachenko S. S., Avramov A. V. (2010). Coordinate-connected identification based on the theory of discrete filtering and statistical processing of experimental data. *Successes of modern radio electronics*. 11: 15-20. (In Russian)

- Tkachenko S. S., Ivanov S. L., Truschinsky A. Y.* (2013). Algorithm of complex information processing in the subsystem of navigation-connected identification. *Theory and technology of radio communication*. 4: 26-30. (In Russian)
- Yarlykov M. S. [et al.]* (2012). Electronic systems for navigation, aiming and control of aircraft armament. Volume 1. Theoretical foundations. Monograph. Moscow: *Radio Engineering*, 2012. 504 p. (In Russian)
- Yarlykov M. S., Mironov M. A.* (1993). Markov's theory of estimating random processes. Moscow: *Radio and Communications*, 1993. 464 p. (In Russian)
- Yemelyanov V. E., Logvin A. I.* (2014). Technical operation of aviation radio-electronic equipment. Moscow: *Morkniga*, 2014. 730 p. (In Russian)