

# Методология создания системы управления воздушным движением беспилотных транспортных средств «умного города» на основе мониторинга их траекторных параметров многопозиционными локационными комплексами с разнородными элементами\*

И.Ю. Гришин, Р.Р. Тимиргалеева

Проблема использования и развития воздушного пространства «умного города» обусловлена тем, что в нем наряду с пилотируемыми летательными аппаратами используются беспилотные летательные аппараты (БПЛА), которые могут решать задачи перемещения грузов, мониторинга территорий и т. д. Целью работы явилась разработка основных положений теории управления воздушным движением БПЛА для безопасной интеграции таких летательных аппаратов в воздушное движение «умного города» с существующими в нем пилотируемыми летательными аппаратами на основе мониторинга с применением разнородных средств локации, имеющихся на территории и вновь создаваемых, которые объединяются в единую систему, являющуюся источником информации о воздушных объектах для системы управления воздушным движением. В работе решены задачи системного анализа управления воздушным движением, формирования требований к подсистеме мониторинга БПЛА, разработана методология создания такой подсистемы на основе многопозиционного локационного комплекса с разнородными источниками информации, включающая методы классификации воздушных объектов по набору траекторных параметров, методы рекуррентной адаптивной фильтрации измерений динамических параметров интенсивно маневрирующих БПЛА, а также методы управления указанной подсистемой мониторинга.

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат, управление воздушным движением, умный город, многопозиционный локационный комплекс.

\*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №19-29-06081).

## Введение

Прежде всего, важно отметить, что президент Российской Федерации по итогам мероприятий по вопросам развития беспилотных авиационных систем [1], состоявшихся 27 апреля 2023 года, утвердил 13 июня 2023 г. перечень поручений, в которые включен пункт 1-б – «принять исчерпывающие меры по интеграции беспилотных воздушных судов в единое воздушное пространство Российской Федерации, рассмотрев в том числе вопрос о цифровой трансформации организации воздушного движения в части, касающейся си-

стем обслуживания воздушного движения, навигации, посадки, наблюдения, связи и противодействия противоправному применению беспилотных авиационных систем». Это говорит об особой актуальности данной работы, а также полученных результатов, которые должны перейти в сферу практикоориентированных исследований и опытно-конструкторских работ.

Отечественные ученые и практики последовательно занимаются исследованиями, направленными на применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в различных областях [2–4], а также вопросами управления беспилотниками [5–7] и правовыми вопросами их использования [8].

Сформировано направление исследований применения многопозиционной радиолокации в современных условиях [9]. При этом один из основателей современной отечественной многопозиционной радиолокации В.С. Черняк отмеча-



**ГРИШИН**  
Игорь Юрьевич  
профессор, академик РАН,  
Московский государственный  
университет  
им. М.В. Ломоносова



**ТИМИРГАЛЕЕВА**  
Рена Ринатовна  
профессор,  
Крымский федеральный  
университет  
им. В.И. Вернадского

ет, что на протяжении всей истории развития радиолокации наблюдается тенденция роста канальности РЛС с целью увеличения объема и повышения качества радиолокационной информации [10]. Особенно заметной стала эта тенденция после появления антенных решеток. В последние годы наметилось новое направление развития многоканальных РЛС: так называемые «ММО РЛС». Авторами рассмотрены ММО РЛС и их связь с другим классом многоканальных РЛС – многопозиционными РЛС (МПРЛС).

Обзор технологий мониторинга и противодействия несанкционированным БПЛА представлен в работе [11]. Приведены примеры наиболее удачных решений в области радиолокации дронов с малой эффективной площадью рассеивания (ЭПР), вплоть до  $0.01 \text{ м}^2$ . Рассмотрена интеграция технологий противодействия дронам в единую систему.

В работе [2] утверждается, что увеличение длительности полета БПЛА является важной задачей мобильной робототехники. Для достижения этой цели может использоваться автоматизация перезарядки БПЛА с помощью наземных станций обслуживания. Подобный робототехнический комплекс (станция и БПЛА) востребован для охраны и мониторинга объектов различной инфраструктуры. Однако эффективность системы зависит от оптимального количества станций и их расположения для мониторинга заданной площади. В данной работе предложен интеллектуальный алгоритм расчета искомым параметров, основанный на комбинировании имитационного моделирования и генетического алгоритма поиска. Входными параметрами являются координаты зоны мониторинга и областей, запретных для полетов БПЛА; вероятности проникновения нарушителей на охраняемую территорию через внешний периметр; информация о скорости движения и зарядки БПЛА, количестве дронов, хранимых и обслуживаемых на одной станции; скорость движения нарушителя и частота инцидентов. В ходе многократного имитационного моделирования процесса вторжения в рассматриваемую область и перехвата цели с помощью БПЛА происходит оптимизация расположения станций обслуживания. Данный подход следует парадигме обучения с подкреплением. В качестве функции оптимизации используется соотношение эффективного полетного времени для сопровождения цели к общему времени, проведенному всеми БПЛА в воздухе. На основе заданного значения критерия оптимизации происходит подбор минимального числа станций, способных решать требуемую задачу охраны и мониторинга. А в [12] проблема совместного обмена информацией и контроля изучается для роя из трех сотовых БПЛА, расположенных в треугольной формации. В частности, предлагается новый подход для оптимизации работы роя с одновременным учетом задержки беспроводной сети и стабильности системы управления. На основе этого подхода определяется максимально допустимая задержка, необходимая для предотвращения нестабильности роя.

Китайские авторы [13] исследовали некоторые аспекты наблюдения за БПЛА. Предлагаются методы обработки ин-

формации в условиях наблюдения за БПЛА в городской среде; отмечается, что условия очень нестабильные и возможны пропуски измерений. Предлагается модификация фильтра Калмана, позволяющего частично комплексировать данные из нескольких источников. Авторы из Словакии исследуют общие проблемы «умных городов» [14]. Отмечено, что лидеры среди «умных городов» – Сингапур и Лондон, за ними следует Хельсинки. «Умные города» используют в своей практике 12 выявленных передовых технологий. Стратегическое управление в Сингапуре, Лондоне и Хельсинки адаптирует технологии к нуждам и требованиям своих граждан, таким образом соединяя технологический аспект с управленческим и социальными аспектами. Указанное исследование проводилось в сравнении с новым словацким «умным городом».

Таким образом, отмечена тенденция увеличения интенсивности работ в части решения проблем «умных городов» в целом, а также серьезных проблем обеспечения безопасности воздушного движения в пространстве таких городов. Появились отдельные работы, направленные на комплексирование информации РЛС УВД. Однако пока они носят только начальный характер и предлагают использовать радиолокаторы, работающие в одном диапазоне, что не позволит в полной мере использовать все преимущества многопозиционного режима. Следовательно, комплексного подхода к решению проблемы информационного обеспечения системы УВД «умных городов» пока не предложено. При этом отдельные появившиеся работы подтверждают правильность избранного авторами научного направления.

Целью исследования явилась разработка основных положений теории управления воздушным движением БПЛА для безопасной интеграции таких летательных аппаратов в воздушное движение «умного города» с существующими в нем пилотируемыми летательными аппаратами

на основе мониторинга с применением разнородных средств локации, имеющихся на территории «умного города» и вновь создаваемых, которые объединяются в единую многопозиционную систему, являющуюся источником информации о воздушных объектах для оперативного уровня системы управления воздушным движением «умного города».

### Методы и модели

Рассмотрим основные теоретические положения, использованные для получения следующих ключевых результатов проекта:

- результаты системного анализа, позволившие выявить недостатки существующей системы управления воздушным движением, на основе которых удалось сформулировать требования к отдельным элементам системы, опираясь на методы координации с глобальным показателем самой системы УВД;

- метод идентификации воздушных судов в контролируемом воздушном пространстве, позволяющий снизить зависимость размерности нечеткой сетевой модели верификации соответствующего программного обеспечения от размерности динамических взаимодействующих процессов предметной области, разработанный на базе математического аппарата нечетких раскрашенных сетей Петри;

- новый подход к рекуррентной фильтрации параметров траекторий БПЛА, включая участки интенсивного траекторного маневра. Разработана процедура синтеза адаптивного рекуррентного фильтра на основе принципа разделения;

- методология управления функционированием многопозиционной локационной системы. Разработаны методы и модели оптимального управления динамической системой (локационной системой) на основе математического аппарата принципа максимума в матричном виде.

Основные положения *системного анализа системы управления*

*воздушным движением* и формирования показателя качества управления для подсистемы информационного обеспечения состоят в следующем [15]. Недостатки существующей системы управления воздушным движением проявляются в недостаточной эффективности управления смешанными потоками летательных аппаратов, наличии в контуре управления человека и невозможности обеспечить более плотный поток с заданной степенью безопасности полетов пилотируемых и беспилотных транспортных средств. Определены направления совершенствования системы управления за счет изменения ее структуры, характеристик контура управления. В качестве главного элемента совершенствования выступает система информационного обеспечения, основанная на применении принципов многопозиционной локации с разнородными элементами, функционирующими на разных физических принципах, которая позволит успешно осуществлять мониторинг движения БПЛА в городе в условиях «затенения» зданиями и другими элементами городского ландшафта в различных климатических условиях.

Обоснованы требования к качеству информационного обеспечения и возможному составу дополнительных информационных средств. Показано [15], что достижение необходимых точностных параметров может быть обеспечено только за счет комплексирования различных средств, их работы в многопозиционном режиме, объединения традиционных радиолокационных средств, применения просветных методов локации, использования пассивной локации, где в качестве источника подсвечивающего сигнала могут использоваться сигналы операторов мобильной связи, цифрового телевидения, навигационных систем GPS, Beidou и отечественной ГЛОНАСС. На основе применения теории многоуровневых иерархических систем произведена декомпозиция существующей системы управления воздушным движением, показаны ее наиболее «узкие» места в условиях появления большого количества БПЛА в воздушном пространстве «умных городов», предложены направления совершенствования существующих элементов системы УВД, а также предложены новые элементы, значительно повышающие эффективность управления воздушным движением и его безопасность [15].

Для подсистемы информационного обеспечения получен показатель качества (1), имеющий монотонную связь с показателем качества системы управления воздушным движением. Указанный показатель имеет экспоненциальную зависимость от суммарной шаровой ошибки оценки параметров сопровождаемых беспилотных летательных аппаратов [15]:

$$J = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \text{tr} \left[ \mathbf{h}_i^T(t) \Psi_i(t) \right], \quad (1)$$

где  $\text{tr} \left[ \mathbf{h}_i(t) \Psi_i(t) \right] = \sum_{l=1}^k h_i^{ll}(t) \Psi_i^{ll}(t)$  – след произведения матриц  $\mathbf{h}_i(t)$  и  $\Psi_i(t)$ , который характеризует взвешенную величину погрешности оценивания координат  $i$ -го воздушного судна (пилотируемого или беспилотного). При этом весовая

матрица  $h_i(t)$  задается в зависимости от способа сопровождения и «допоиска» БПЛА в процессе сопровождения, а также от способа принятия решения на управление воздушным движением;  $N$  – количество воздушных судов, обслуживаемых системой управления воздушным движением (в автоматическом режиме или диспетчером);  $T$  – временной интервал сопровождения воздушных объектов в процессе управления.

Полученный показатель качества управления подсистемы информационного обеспечения позволяет синтезировать методы и алгоритмы управления информационными средствами.

Суть разработанного *метода идентификации воздушных судов* в контролируемом воздушном пространстве на основе аппарата нечетких раскрашенных сетей Петри состоит в следующем [16].

Специалисты по защите объектов от воздушных угроз выделяют пять типов проблем, которые вызывают БПЛА на территориях, свободных от военных конфликтов:

- опасное сближение с пилотируемой авиационной техникой;
- полеты над участками, где применение авиационной техники запрещено или неуместно, например, над складами горюче-смазочных материалов;
- криминальное применения БПЛА (переброска на территорию или с территории аэропорта наркотиков и контрабанды);
- столкновение БПЛА с различными зданиями и сооружениями;
- совершение террористических актов с использованием БПЛА.

Основной угрозой для гражданской авиации следует считать малоразмерные БПЛА, особенно мультикоптерного типа. Даже незначительная по массе целевая нагрузка в несколько сот граммов способна причинить значительный ущерб. Исходя из того, что вес полезной нагрузки составляет сегодня 10–30% общей массы БПЛА, можно сделать вывод, что основную угрозу в настоящий момент представляют БПЛА весом от трех до двадцати килограммов.

Причиной нарушений правил использования воздушного пространства является также проблема своевременной и правильной классификации воздушных объектов (ВО), в том числе БПЛА. Для выявления ВО, который представляет угрозу, используются когнитивные подходы, в частности, нечеткие меры и множества.

Процедура классификации воздушного объекта по степени «опасности» включает в себя три этапа:

- формирование и динамическое обновление баз знаний системы контроля воздушного пространства, содержащих информацию, необходимую для определения категорий ВО, прежде всего, описание образов различных категорий ВО;
- совместная обработка и обобщение координатной, полетной, индивидуальной признаковой и другой информа-

ции о ВО, поступающей от источников различного назначения и физической природы;

– определение категорий ВО (собственно классификация ВО по степени «опасности»).

На базе математического аппарата нечетких раскрашенных сетей Петри разработан метод идентификации воздушных судов в контролируемом воздушном пространстве, позволяющий снизить зависимость размерности нечеткой сетевой модели верификации соответствующего программного обеспечения от размерности динамических взаимодействующих процессов предметной области [16]. Предложена база нечетких продукционных правил нечеткой логической системы классификации воздушных объектов в процессе контроля использования воздушного пространства, а также разработан обобщенный алгоритм реализации этих правил. Структурно нечеткие продукционные правила при этом отвечают правилам нечеткой логической модели Sugeno первого порядка. Такое представление процесса классификации воздушных объектов с использованием нечеткой логической модели позволяет учесть как нестохастический, так и субъективный характер процесса принятия решения оператором. Разработанный обобщенный алгоритм реализации нечетких продукционных правил в рамках модели Sugeno первого порядка является основой для создания программного обеспечения нечеткой логической системы классификации воздушных объектов.

Автоматизированная классификация выполняется согласно таким правилам:

- класс «свой» присваивается автоматически после определения оператором факта взлета воздушного объекта, выявления и взятия его на сопровождение и по результатам оценки воздушной обстановки, которая отображается на средствах отображения индивидуального и коллективного пользования;

– класс «контрольный» присваивается автоматически по решению оператора тем воздушным объектам, которые являются своими и вылетели для обучения, тренировки и т. п.;

– класс «нарушитель государственной границы» присваивается автоматически или по решению оператора тем воздушным объектам, для которых нет корреляции с «планом полетов» и которые являются иностранными и для которых выявлен факт пересечения государственной границы;

– класс «воздушный противник» присваивается автоматически или по решению оператора исходя из воздушной обстановки, которая складывается в данной зоне контроля воздушного пространства.

Формально правила классификации воздушных объектов, которые определяют матрицу отношений, задаются в виде совокупности таких нечетких продукционных правил.

Значение множества характеристик воздушного объекта  $\{C_i^e\}$  и классы воздушных объектов множества  $\{K_i^e\}$  находятся между собой в бинарном отношении (2):

$$F : X \rightarrow \{K_i^e\}, \tag{2}$$

где  $F$  – множество всех выявленных воздушных объектов;  $X$  – воздушный объект с номером  $N_i^e$ ,  $i = \overline{1, L}$ ,  $L$  – количество выявленных воздушных объектов;  $K_i^e$  – класс воздушного объекта,  $i = \overline{1, 10}$ .

Указанные отношения задаются соответствующей матрицей отношений (3):

$$\rho = [d_{ji}]_{m \times n}, \tag{3}$$

где  $m$  – количество значений характеристик воздушных объектов;  $n$  – количество классов воздушных объектов.

В состав непосредственно обобщенного алгоритма реализации нечетких продукционных правил классификации воздушного объекта (результатов нечеткого логического вывода на соответствующей базе правил) входят такие алгоритмы решения частных задач на основе исполь-

зования механизмов нечеткого логического вывода Sugeno нулевого порядка [16]:

– алгоритм решения частной задачи автоматической классификации воздушного объекта по их характеристикам;

– алгоритм решения частной задачи автоматизированной классификации воздушного объекта по их характеристикам.

Разработан **новый метод адаптивной рекуррентной фильтрации** параметров траекторий БПЛА, включая участки интенсивного траекторного маневра, который позволяет осуществлять устойчивое сопровождение пилотируемых и беспилотных ВО в воздушном пространстве «умного города». Базируется данный метод на принципе разделения, при этом структура предложенного адаптивного фильтра имеет следующий вид (рис. 1) [17]:

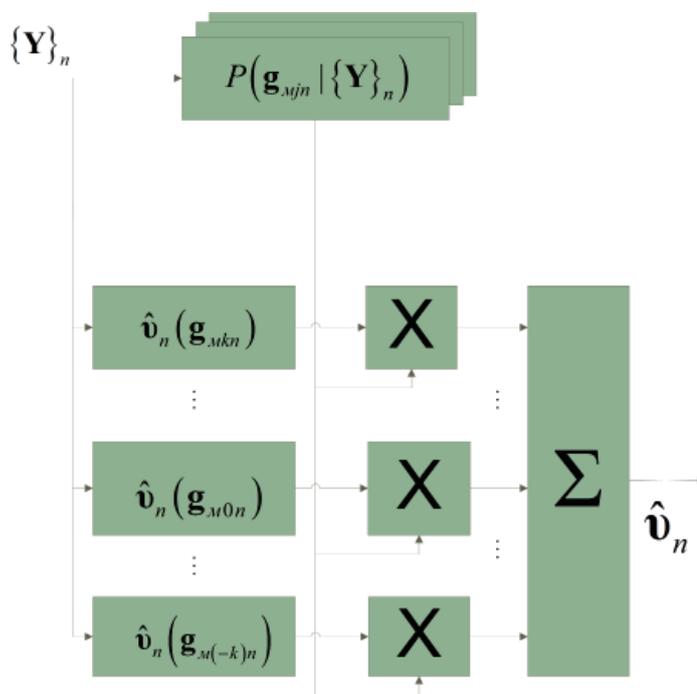


Рис. 1. Структура адаптивного рекуррентного фильтра.

Из анализа рис. 1 следует, что оптимальная оценка вектора параметров наблюдаемого объекта  $\hat{\mathbf{v}}_n$  представляет собой взвешенную сумму оценок параметров  $\hat{\mathbf{v}}_n(\mathbf{g}_{mjn})$ , соответствующих  $j$ -й возможной модели динамики наблюдаемого объекта (движения объекта с параметром интенсивности маневра  $\mathbf{g}_{mjn}$ ). При этом в качестве весового коэффициента выступает условная вероятность  $P(\mathbf{g}_{mjn} | \{\mathbf{Y}\}_n)$  обнаружения наблюдаемого объекта в  $j$ -м состоянии в текущий  $n$ -й момент времени:

$$\hat{\mathbf{v}}_n = \sum_{j=-k}^k \hat{\mathbf{v}}_n(\mathbf{g}_{mjn}) P(\mathbf{g}_{mjn} | \{\mathbf{Y}\}_n), \tag{4}$$

где  $\{\mathbf{Y}\}_n$  – множество измерений параметров движения БПЛА в  $n$ -й момент времени.

Основное содержание важнейшего результата проекта – **методологии управления функционированием много-**

позиционной локационной системы мониторинга движения БПЛА в воздушном пространстве «умного города» – состоит в следующем [18].

Показано, что модифицированный показатель качества управления системой разнородных локационных средств имеет вид [18]:

$$J = \sum_{i=1}^N \left\{ \sum_{t=1}^T \text{tr}(\mathbf{h}_i(t) \Psi_i(t)) + \sum_{j=1}^M \sum_{t=0}^T [\alpha^{ij}(t) \Gamma_j(t) + \alpha^{ij}(t)(1-x^{ij}(t))\gamma_j(t)] \right\} = \sum_{i=1}^N \left\{ \sum_{t=1}^T \text{tr}(\mathbf{h}_i(t) \Psi_i(t)) + \sum_{t=0}^{T-1} \sum_{j=1}^M \alpha^{ij}(t) [\Gamma_j(t) + (1-x^{ij}(t))\gamma_j(t)] \right\}. \quad (5)$$

Поскольку модели движения объектов в течение периода наблюдения обычно изменяются слабо, характеристики (в том числе точностные) каналов наблюдения за ВО также не изменяются, поэтому временной аргумент при матрицах экстраполяции  $\Phi_i(t)$ , наблюдения  $\mathbf{H}_j(t)$  и ковариационной матрицы ошибок измерения  $\mathbf{R}_j(t)$  можно опустить, тогда уравнения состояния динамической системы мониторинга будут иметь вид [18]:

$$\begin{aligned} \Psi_i(t+1) - \Psi_i(t) &= \mathbf{F}_i(t, \Psi_i(t), \alpha(t)) = \Phi_i \Psi_i(t) \Phi_i^T - \\ &- \Psi_i(t) - \Phi_i \Psi_i(t) \Phi_i^T \times \\ &\times \sum_{j=1}^M \left\{ \alpha^{ij}(t) \mathbf{H}_j^T (\mathbf{H}_j \Phi_i \Psi_i(t) \Phi_i^T \mathbf{H}_j^T + \right. \\ &\left. + \mathbf{R}_j)^{-1} \mathbf{H}_j \right\} \Phi_i \Psi_i(t) \Phi_i^T, \\ \mathbf{X}(t+1) - \mathbf{X}(t) &= \mathbf{F}_{N+1}(t) = \alpha(t) - \mathbf{X}(t), \\ \Psi_i(0) &= \Psi_{i0}, \mathbf{X}(0) = 0, i = 1, 2, \dots, N; t = 1, 2, \dots, T-1. \end{aligned} \quad (6)$$

В таком случае задача управления разнородным измерительным комплексом в режиме наблюдения за ВО заключается в минимизации функционала (5) по матрице управления  $\alpha(t)$ .

Предложен метод решения данной оптимизационной задачи на основе математического аппарата дискретного аналога принципа максимума в матричном виде в комбинации с методом последовательных приближений и случайного поиска [18].

На базе рассмотренных методов в ходе реализации проекта разработаны алгоритмы, реализованные программно в виде статистической модели для оценки качества принятых решений в ходе теоретической работы [18].

## Результаты и обсуждение

Структура комплексной имитационной модели функционирования измерительного информационного комплекса мониторинга движения пилотируемых аппаратов и БПЛА, которая создана для оценки эффективности разработанных методов, представлена на рис. 2.

В качестве базовой системы для реализации представленной на рис. 2 модели была выбрана система имитационного моделирования AnyLogic [19], так как она позволяет применить несколько подходов к моделированию систем и эффективно управлять процессом моделирования.

Произведена оценка метода идентификации воздушных судов в контролируемом воздушном пространстве на базе математического аппарата нечетких раскрашенных сетей Петри. Разработанный обобщенный алгоритм реализации нечетких продукционных правил в рамках модели Sugeno первого порядка является основой для создания программного обеспечения нечеткой логической системы классификации воздушных объектов «умного города». Результаты моделирования показали повышение качества классификации на 20–40% относительно традиционных алгоритмов классификации.

Построена модель работы синтезированных адаптивных фильтров и осуществлен сравнительный анализ предложенных фильтров с традиционными, который показал повышение точности оцениваемых траекторных параметров БПЛА на 50–70% на участке интенсивного траекторного маневра. При этом оценены разработанные алгоритмы обработки траекторной информации интенсивно маневрирующих БПЛА, а также обеспечение их устойчивого сопровождения [20].

В зависимости от возможных маневренных характеристик БПЛА применимы следующие подходы: ускорение считается случайным процессом и может оцениваться статистическими методами (ускорение представляет собой случайную, распределенную по нормальному закону переменную с нулевым средним и заданной дисперсией, предполагается некоррелированность величин ускорений в разные моменты времени); ускорение является детерминированным процессом и оценивается в реальном времени по результатам наблюдения за БПЛА (лучше учесть-

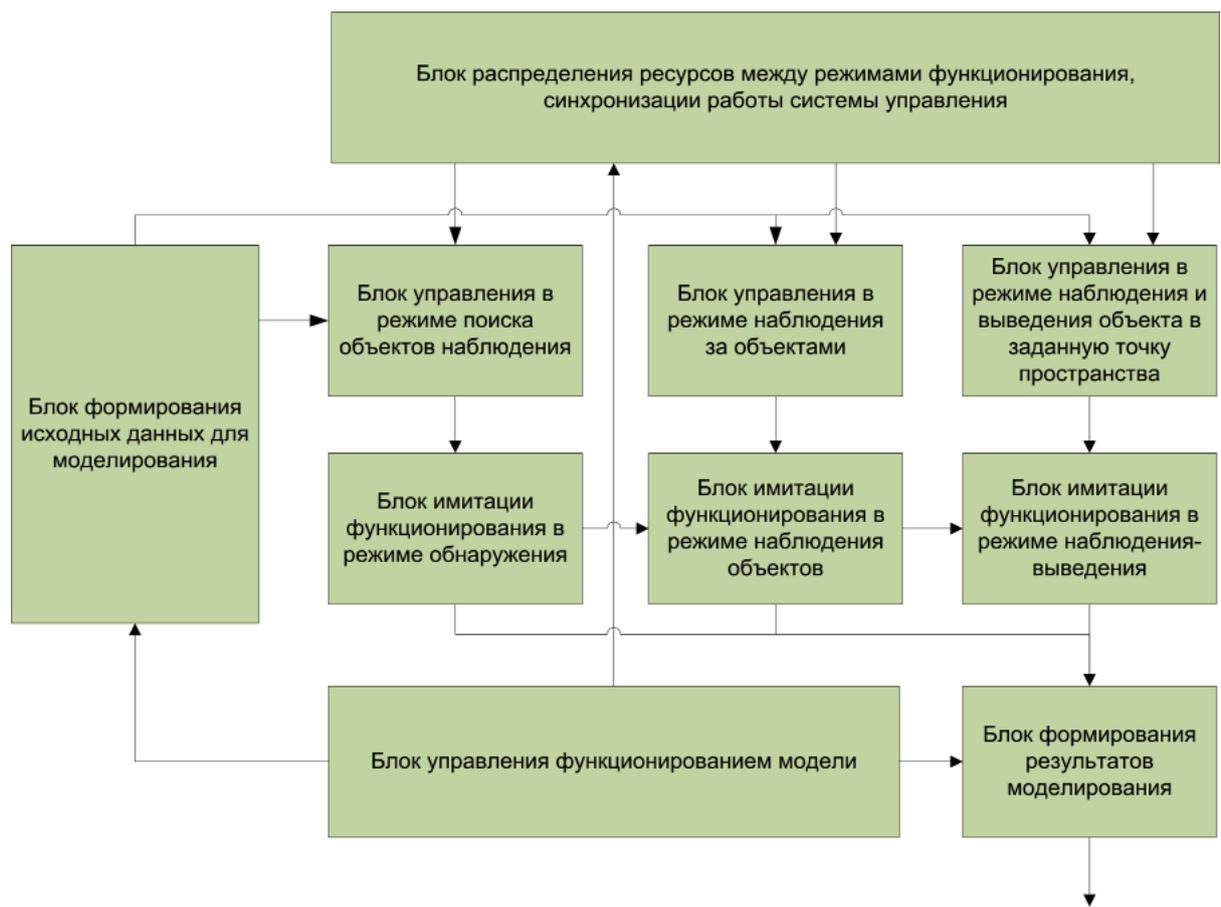


Рис. 2. Комплексная имитационная модель функционирования.

вает реальные особенности маневра БПЛА модель на основе коррелированного случайного процесса с нулевым математическим ожиданием и недиагональной корреляционной матрицей интенсивностей маневра). В первом случае (обычно для небольших интенсивностей возможного маневра) могут использоваться различные, в том числе авторские, модификации рекуррентных фильтров, а во втором – фильтры с обнаружителем маневра, но лучше – адаптивные [20].

Осуществлена оценка разработанных методов управления функционированием многопозиционной разнородной локационной системы [18]. Рассмотрены методы и модели оптимального управления динамической системой (локационной системой) на основе математического аппарата принципа максимума в матричном виде, для решения использован комплексный метод последовательных приближений (в авторском варианте), поскольку оптимизируемая система является нелинейной.

Разработаны и реализуемые на практике локально-оптимальные методы, и алгоритмы, имеющие невысокую вычислительную сложность.

Главным показателем эффективности разработанных методов управления является повышение пропускной способности такой системы только за счет разработанно-

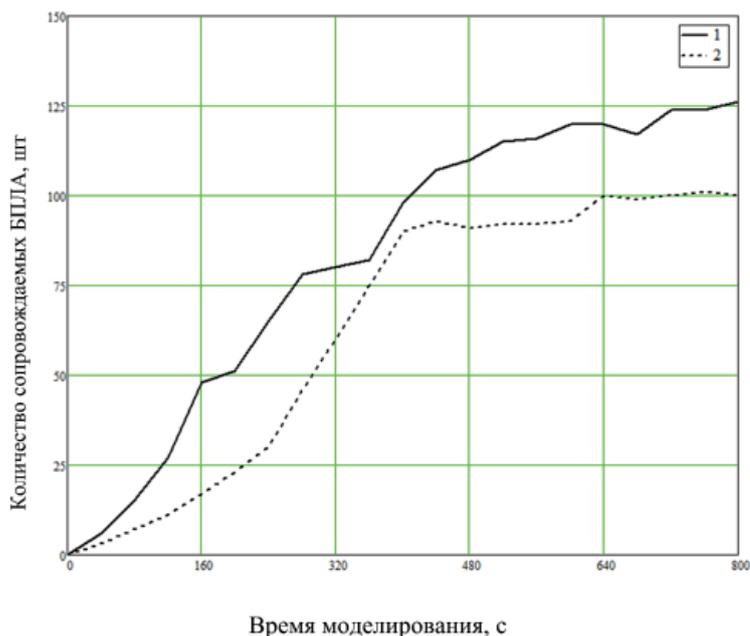


Рис. 3. Оценка производительности системы мониторинга: пунктир (---) – традиционные методы, сплошная линия (—) – предложенные методы.

го программно-алгоритмического обеспечения системы управления. На *рис. 3* приведены сравнительные зависимости пропускной способности системы мониторинга, из которых видно, что пропускная способность увеличивается на 15–30%, при этом чем более плотный поток БПЛА в контролируемой области, тем больший выигрыш в производительности получен [18].

## Выводы

Проведенное исследование позволило разработать основные положения теории управления воздушным движением беспилотных летательных аппаратов для их безопасной интеграции в воздушное пространство «умного города» с существующими в нем пилотируемыми летательными аппаратами на основе мониторинга с применением разнородных средств локации, имеющихся на территории «умного города» и вновь создаваемых, которые объединяются в единую многопозиционную систему, являющуюся источником информации о воздушных объектах для оперативного уровня системы управления воздушным движением «умного города».

Показано, что современные измерительные информационные системы чаще всего оказываются сложными, и к ним классические методы управления неприменимы. Наиболее эффективным средством их изучения и управления ими является системный подход. Для разработки эффективной системы управления предложена адекватная модель управляемой системы. При этом обоснование показателя качества управления является одной из наиболее важных задач, которая была решена при синтезе методов управления таким важным классом сложных систем, как измерительные информационные системы.

Предложена иерархическая четырехуровневая система классификации воздушных объектов, позволяющая определить опасные воздушные объекты, которые нуждаются

в особом внимании со стороны операторов. При этом применение указанного метода позволяет повысить качество классификации на 20–40% относительно традиционных алгоритмов классификации.

Показано, что наиболее эффективным инструментом для мониторинга движения беспилотных летательных аппаратов в процессе воздушной навигации и управления воздушным движением являются статистические измерительные информационные системы, позволяющие с заданным уровнем точности определять составляющие вектора положения, скорости и других параметров летательного аппарата.

Получено решение задачи оптимизации параметров режима сопровождения радиолокационного комплекса, которое сводится к выбору оптимального темпа локации и, в отличие от ранее известных результатов, определяет адаптивное управление темпом локации в зависимости от степени неопределенности в знании динамики цели и уровня шумов в канале измерений, а также временного ресурса, выделенного на сопровождение цели. В результате пропускная способность увеличивается на 15–30%, при этом выигрыш возрастает с увеличением плотности потока БПЛА в контролируемой области.

## Литература

1. *Перечень поручений по итогам участия Президента в мероприятиях по вопросам развития беспилотных авиационных систем*, утв. Президентом РФ 13.06.2023 №Пр-1176. (<http://kremlin.ru/acts/assignments/orders/71423>).
2. **И.Ю. Данилов, И.М. Афанасьев**  
В Труды Пятого Всероссийского научно-практического семинара «Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта» (БТС-ИИ-2019): Труды семинара (РФ, Санкт-Петербург, 22–24 мая, 2019), РФ, Переславль-Залесский, Российская ассоциация искусственного интеллекта, 2019, с. 181–190. ([http://www.ai-uv.ru/images/aiuv2019/proc/aiuv2019\\_book.pdf](http://www.ai-uv.ru/images/aiuv2019/proc/aiuv2019_book.pdf)).
3. **Н.Н. Долженков, Д.Г. Пантенков, В.П. Литвиненко, А.А. Ломакин, А.Т. Егоров, А.А. Гриценко**  
*Вестник Воронежского государственного технического университета*, 2019, 15(3), 102. DOI 10.25987/VSTU.2019.15.3.015.
4. **I.Yu. Grishin, R.R. Timirgaleeva, V.V. Selivanov, A.N. Kazak**  
В *E3S Web of Conferences*, 2023, 376, 04034. DOI: 10.1051/e3sconf/202337604034.
5. **А.М. Горюнова, В.А. Шестаков**  
*Теория и практика современной науки*, 2018, №2(32), 466. ([https://www.modern-j.ru/\\_files/ugd/b06fdc\\_a2a7b9195e1a4dfcb7cd68a0b61f3ae5.pdf?index=true](https://www.modern-j.ru/_files/ugd/b06fdc_a2a7b9195e1a4dfcb7cd68a0b61f3ae5.pdf?index=true)).
6. **Н.В. Рощина**  
*Вестник Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны*, 2019, №1(4), 68.
7. **Ю. Гриднев, Ю. Яцына, А. Русецкий, С. Пручковский**  
*Наука и инновации*, 2017, №2(168), 17.
8. **Р.П. Кошкин**  
*Научный вестник ГосНИИ ГА*, 2015, №11(322), 23.
9. **Г.А. Еришов, В.А. Завьялов, В.А. Сеницын**  
В *Инновационные технологии и технические средства специального назначения: Труды одиннадцатой общероссийской научно-практической конференции, в 2 тт.*, Сер. «Библиотека журнала «Военмех. Вестник БГТУ»», РФ, Санкт-Петербург, 2019, с. 21–24.
10. **В.С. Черняк**  
*Успехи современной радиоэлектроники*, 2011, №2, 5.
11. **А.В. Швецов**  
*Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций*, 2019, №5, 89.

12. Д.Ю. Ермилов  
В Сб. докл. Российская научно-техническая конференция с международным участием. Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике (РФ, Москва, 11–12 апреля, 2019), РФ, Москва, Изд. Физико-технологический институт РТУ МИРЭА, 2019, с. 182–185.
13. Z. Shi, X. Chang, C. Yang, Z. Wu, J. Wu  
*IEEE Trans. Veh. Technol.*, 2020, **69**(3), 2731.  
DOI: 10.1109/TVT.2020.2964110.
14. J. Vodak, D. Sulyova  
*Sustainability*, 2021, **13**(10), 5746. DOI: 10.3390/su13105746.
15. И.Ю. Гришин, Р.Р. Тимиргалеева, И.И. Линник  
Методология создания системы управления воздушным движением беспилотных транспортных средств, РФ, Майкоп, ООО «Электронные издательские технологии», 2020, 161 с. DOI: 10.34754/EP.2020.14.81.004.
16. I. Linnik, E. Linnik, I. Grishin, R. Timirgaleeva  
В Proc. 29<sup>th</sup> Conference of Open Innovations Association FRUCT, (FI, Tampere, 12–14 May, 2021), FI, Tampere, IEEE Publ., pp. 240–246. DOI: 10.23919/FRUCT52173.2021.9435536.
17. И.Ю. Гришин, Р.Р. Тимиргалеева, В.Г. Морозова  
В Мат. Ежегодной научной конференции МГУ «Ломоносовские чтения» (РФ, Севастополь, 12–15 апреля, 2023), РФ, Севастополь, Филиал МГУ в «г. Севастополе», 2023, с. 25–26.
18. И.Ю. Гришин, Р.Р. Тимиргалеева  
Управление воздушным движением беспилотных транспортных средств «умного» города на основе мониторинга их траекторных параметров. Монография, РФ, Севастополь, МГУ им. М.В. Ломоносова, 2023, 223 с. DOI: 10.35103/v8102-7899-8963-m.
19. В.Д. Боев  
*Прикладная информатика*, №4(34), 2011, 50.
20. I. Grishin, R. Timirgaleeva, I. Linnik  
В Proc. 30<sup>th</sup> Conference of Open Innovations Association FRUCT (FI, Oulu, 27–29 October, 2021), pp. 64–70. DOI: 10.23919/FRUCT53335.2021.9599972.

English

## Methodology for Creating an Air Traffic Control System for Unmanned Vehicles of a Smart City Based on Monitoring of Their Trajectory Parameters by Multi-Position Location Complexes with Heterogeneous Elements\*

Igor Yu. Grishin

Professor,

Lomonosov Moscow State University  
1 Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia  
igrishin@sev.msu.ru

Rena R. Timirgaleeva

Professor,

Vernadsky Crimean Federal University  
4 Akademik Vernadsky Ave., Simferopol, 295007, Republic of  
Crimea, Russia  
renatimir@gmail.com

### Abstract

The problem of using and developing the airspace of a “smart city” is due to the fact that, along with manned aircraft, unmanned aerial vehicles (UAVs) are used in it, which can solve the problems of moving goods, monitoring territories, *etc.* The purpose of the work was to develop the main provisions of the theory of UAV air traffic control for the safe integration of such aircraft into the air traffic of a “smart city” with existing manned aircraft based on monitoring using heterogeneous means of location, existing on the territory and newly created, which are combined into a single system, which is a source of information about air objects for the air traffic control system. The paper solves the problems of system analysis of air traffic control, the formation of requirements for the UAV monitoring subsystem, the methodology for creating such a subsystem based on a multi-position location complex with heterogeneous sources of information, including methods for classifying air objects according to a set of trajectory parameters, methods of recurrent adaptive filtering of measurements of dynamic parameters of intensively maneuvering UAVs, as well as methods for controlling the specified UAV, as well as methods for controlling the specified UAV monitoring subsystem.

**Keywords:** unmanned aerial vehicle, air traffic control, smart city, multi-position location complex, optimal control.

\*The work was financially supported by RFBR (project 19-29-06081).

Images & Tables

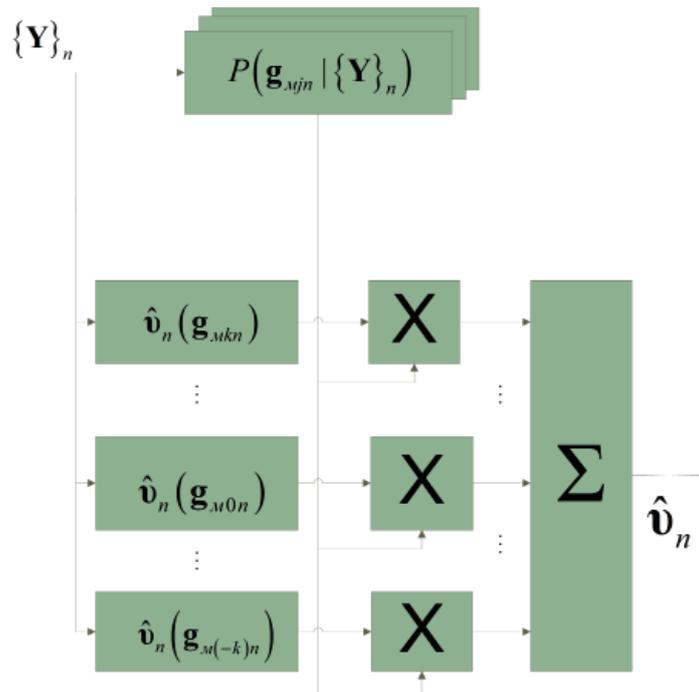


Fig. 1. Structure of an adaptive recurrent filter.

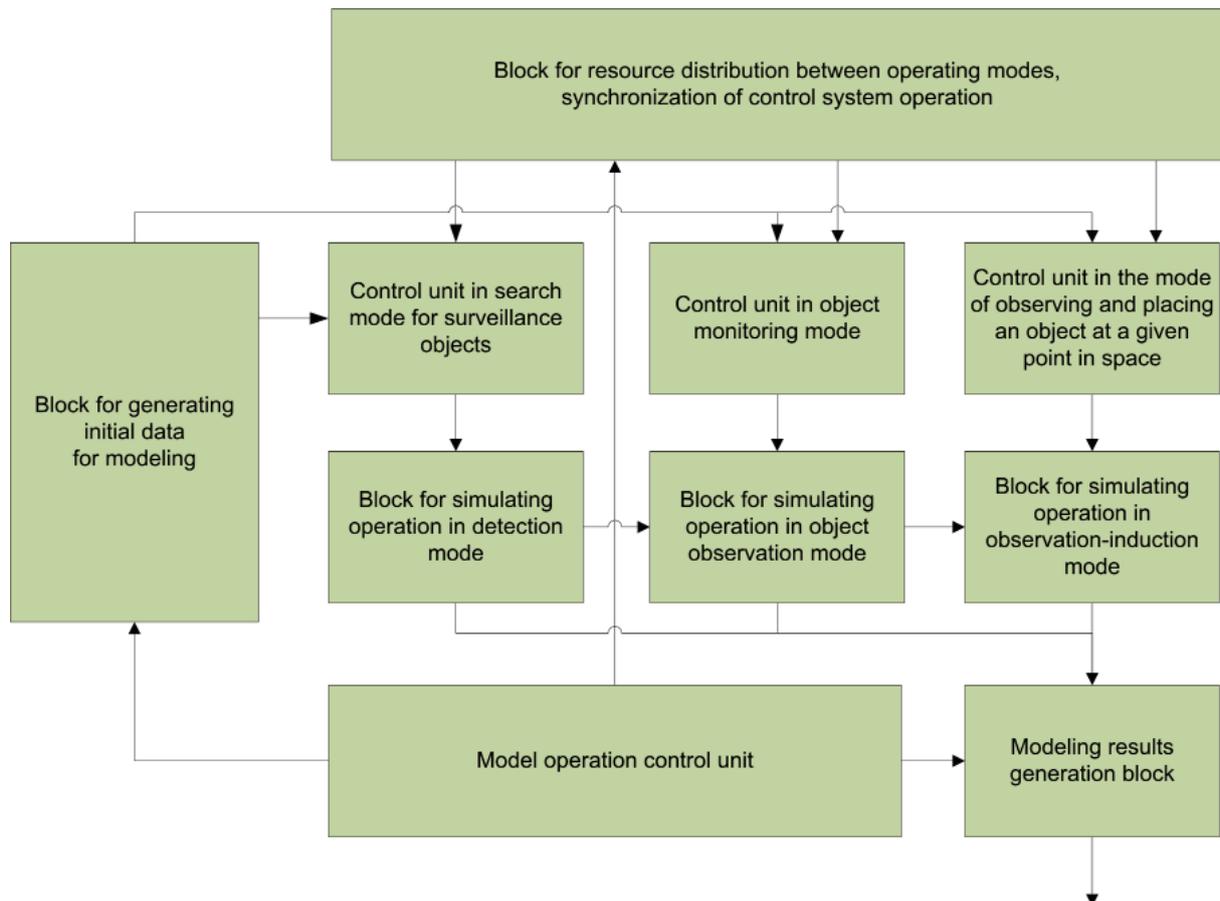


Fig. 2. Complex simulation model of functioning.

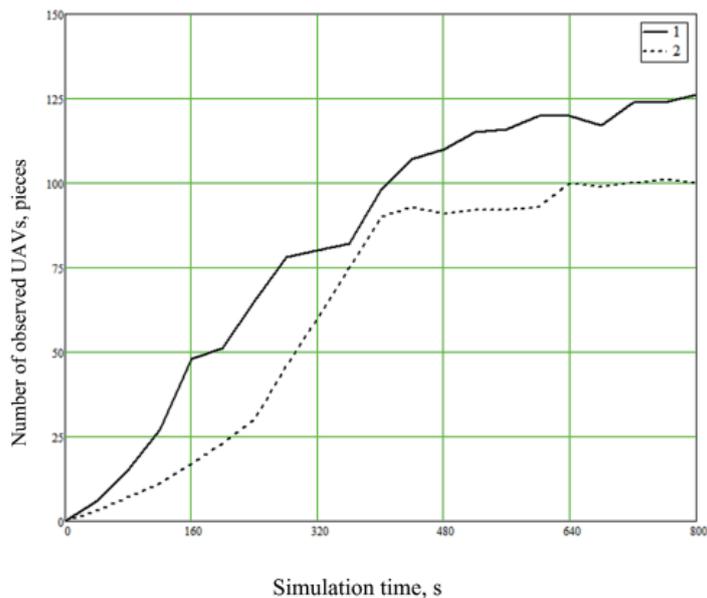


Fig. 3. Evaluation of the monitoring system performance (1 – proposed methods, 2 – traditional methods).

## References

1. List of Instructions Based on the Results of the President's Participation in Events on the Development of Unmanned Aircraft Systems, Appr. President of the Russian Federation on 06.13.2023 No. Pr-1176 [Perechen porucheniy po itogam uchastia Prezidenta v meropriyatiyakh po voprosam razvitiya bespilotnykh aviatsionnykh sistem] (in Russian). (<http://kremlin.ru/acts/assignments/orders/71423>).
2. I. Yu. Danilov, I.M. Afanasev  
In Proc. Fifth All-Russian Scientific and Practical Seminar "Unmanned Vehicles with Elements of Artificial Intelligence" (BTS-II-2019) [Trudy Pyatogo Vserossiiskogo nauchno-prakticheskogo seminaru "Bespilotnye transportnye sredstva s elementami iskusstvennogo intellekta"] (RF, St. Petersburg, 22–24 May, 2019), RF, Pereslavl-Zalessky, Russian Association of Artificial Intelligence Publ., 2019, pp. 181–190 (in Russian).
3. N.N. Dolzhenkov, D.G. Pantenkov, V.P. Litvinenko, A.A. Lomakin, A.T. Egorov, A.A. Gritsenko  
Bulletin of Voronezh State Technical University [Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta], 2019, 15(3), 102 (in Russian). DOI: 10.25987/VSTU.2019.15.3.015.
4. I.Yu. Grishin, R.R. Timirgaleeva, V.V. Selivanov, A.N. Kazak  
In E3S Web of Conferences, 2023, 376, 04034. DOI: 10.1051/e3sconf/202337604034.
5. A.M. Goryunova, V.A. Shestakov  
Theory and Practice of Modern Science [Teoriya i praktika sovremennoy nauki], 2018, №2(32), 466 (in Russian).
6. N.V. Roshchina  
Bulletin of the Yaroslavl Higher Military School of Air Defense [Vestnik Yaroslavskogo vysshego voennogo uchilishcha protivovozdushnoi obrony], 2019, №1(4), 68 (in Russian).
7. Yu. Gridnev, Yu. Yatsyna, A. Rusetsky, S. Pruchkovsky  
The Science and Innovation [Nauka i innovatsii], 2017, №2(168), 17 (in Russian).
8. R.P. Koshkin  
Scientific Bulletin of the State Research Institute of Civil Aviation [Nauchny vestnik GoSNII GA], 2015, №11(322), 23 (in Russian).
9. G.A. Ershov, V.A. Zavyalov, V.A. Sinitsyn  
In Innovative Technologies and Special-Purpose Technical Means: Proc. Eleventh All-Russian Scientific and Practical Conference [Innovatsionnye tekhnologii i tekhnicheskie sredstva spetsialnogo naznacheniya: Trudy odinadtsatoy obshcherossiiskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii], in 2 Vols, Ser. "Biblioteka zhurnala "Voenmekh. Vestnik BGTU"", Saint Petersburg, 2019, pp. 21–24 (in Russian).
10. V.S. Chernyak  
Achievements of Modern Radioelectronics [Uspekhi sovremennoy radioelektroniki], 2011, №2, 5 (in Russian).
11. A.V. Shvetsov  
Security and Emergency Issues [Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsii], 2019, №5, 89 (in Russian).
12. D.Yu. Ermilov  
In Proc. Russian Scientific and Technical Conference with International Participation. Computer Science and Technology. Innovative Technologies in Industry and Computer Science [Sb. Dokl. Rossiiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem. Informatika i tekhnologii. Innovatsionnye tekhnologii v promyshlennosti i informatike. Sbornik dokladov konferentsii] (RF, Moscow, 11–12 April, 2019), RF, Moscow, Institute of Physics and Technology RTU MIREA, 2019, pp. 182–185 (in Russian).
13. Z. Shi, X. Chang, C. Yang, Z. Wu, J. Wu  
IEEE Trans. Veh. Technol., 2020, 69(3), 2731. DOI: 10.1109/TVT.2020.2964110.
14. J. Vodak, D. Sulyova  
Sustainability, 2021, 13(10), 5746. DOI: 10.3390/su13105746.
15. I.Yu. Grishin, R.R. Timirgaleeva, I.I. Linnik  
Methodology for Creating an Air Traffic Control System for Unmanned Vehicles [Metodologiya sozdaniya sistemy upravleniya vozdushnym dvizheniem bespilotnykh transportnykh sredstv], RF, Maykop, OOO "Ehlektronnye izdatelskie tekhnologii", 2020, 161 pp. (in Russian).
16. I. Linnik, E. Linnik, I. Grishin, R. Timirgaleeva  
In Proc. 29<sup>th</sup> Conference of Open Innovations Association FRUCT, (FI, Tampere, 12–14 May, 2021), FI, Tampere, IEEE Publ., 2021, pp. 240–246. DOI: 10.23919/FRUCT52173.2021.9435536.
17. I.Yu. Grishin, R.R. Timirgaleeva, V.G. Morozova  
In Proc. Annual Scientific Conference of Moscow State University "Lomonosov Readings" [Mat. Ezhegodnoi nauchnoi konferentsii MGU "Lomonosovskie chteniya"] (RF, Sevastopol, 12–15 April, 2023), RF, Sevastopol, Publ. Branch of Moscow State University in Sevastopol, 2023, pp. 25–26 (in Russian).
18. I.Yu. Grishin, R.R. Timirgaleeva  
Air Traffic Control of Smart City Unmanned Vehicles Based on Monitoring of Their Trajectory Parameters. Monograph [Upravlenie vozdushnym dvizheniem bespilotnykh transportnykh sredstv «umnogo» goroda na osnove monitoringa ikh traektornykh parametrov: Monografiya], RF, Sevastopol, Lomosov MSU Publ., 2023, 223 pp. (in Russian). DOI: 10.35103/v8102-78998963-m.
19. V.D. Boev  
Russ. J. Applied Informatics [Prikladnaya informatika], №4(34), 2011, 50 (in Russian).
20. I. Grishin, R. Timirgaleeva, I. Linnik  
In Proc. 30<sup>th</sup> Conference of Open Innovations Association FRUCT (FI, Oulu, 27–29 October, 2021), pp. 64–70. DOI: 10.23919/FRUCT53335.2021.9599972.