

УДК 621.396.96:351.814.33

## ФОРМИРОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К СРЕДСТВАМ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ УМНОГО ГОРОДА

<sup>1</sup>Гришин И.Ю., <sup>2</sup>Тимиргалеева Р.Р., <sup>3</sup>Садаков В.А., <sup>3</sup>Чупаков М.В.

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,  
Москва, e-mail: igrishin@sev.msu.ru;

<sup>2</sup>ФГАУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского»,  
Симферополь, e-mail: renatimir@gmail.com;

<sup>3</sup>ФГБВОУ ВО «Черноморское высшее военно-морское училище имени П.С. Нахимова»,  
Севастополь, e-mail: vialsa@yandex.ru

Работа посвящена исследованию актуальных вопросов организации воздушного движения в пространстве умного города, в котором присутствуют как пилотируемые, так и беспилотные летательные аппараты. При наблюдении за беспилотными летательными аппаратами в целях управления воздушным движением возникает проблема, связанная с их малой эффективной поверхностью рассеяния, а также затенением различными объектами городского ландшафта. Для преодоления указанных трудностей предложено использовать все имеющиеся информационные средства в многопозиционном режиме, причём данные средства могут работать в различных диапазонах и на различных физических принципах. Для оценки потенциальной точности измерения параметров движения беспилотных летательных аппаратов предложена методика преобразования корреляционных матриц ошибок измерения параметров движения в единую систему координат пункта обработки информации и формирования объединённой корреляционной матрицы ошибок измерения, которая зависит от структуры и режимов работы информационных средств. Выбор требуемого состава таких средств осуществляется путём решения оптимизационной задачи, включающей все возможные структуры и режимы работы информационных средств в составе многопозиционного комплекса, а также ограничения, связанные с отсутствием видимости объекта наблюдения, разрешением на работу в определенных областях воздушного пространства и энергетическими ресурсами комплекса.

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат, управление воздушным движением, радиолокатор, многопозиционный комплекс, ошибка измерения

## ESTABLISHMENT OF REQUIREMENTS FOR MEANS OF INFORMATION SUPPORT OF THE INTELLIGENT CITY AIR TRAFFIC CONTROL SYSTEM

<sup>1</sup>Grishin I.Yu., <sup>2</sup>Timirgaleeva R.R., <sup>3</sup>Sadakov V.A., <sup>3</sup>Chupakov M.V.

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, e-mail: igrishin@sev.msu.ru;

<sup>2</sup>V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, e-mail: renatimir@gmail.com;

<sup>3</sup>P.S. Nakhimov Black Sea Higher Naval School, Sevastopol, e-mail: vialsa@yandex.ru

The work is devoted to the study of topical issues of air traffic organization in the space of a smart city, in which both manned and unmanned aerial vehicles are present. Surveillance of unmanned aerial vehicles for the purpose of air traffic control raises the problem of their low effective scattering surface as well as the shading of different urban landscapes. In order to overcome these difficulties, it is proposed to use all available information means in a multiphase mode, and these means can operate in different ranges and on different physical principles. In order to assess the potential accuracy of measuring parameters of movement of unmanned aerial vehicles, a method is proposed for converting correlation matrices of errors of measurement of parameters of movement into a single coordinate system of a point of information processing and for forming an integrated correlation matrix of measurement errors, which depends on the structure and modes of operation of the locational means. The selection of the required composition of such means is carried out by solving the optimization problem, which includes all possible structures and modes of operation of information means in a multi-station complex, as well as limitations related to the lack of visibility of the object of observation, permit to work in certain areas of the airspace and the energy resources of the complex.

**Keywords:** unmanned aerial vehicle, air traffic control, radar, multi-positioning system, measurement error

В настоящее время идеология использования и развития воздушного пространства современного «умного» города обусловлена тем, что в нем наряду с пилотируемыми летательными аппаратами (самолёты, вертолёты) все более активно начинают использоваться беспилотные летательные аппараты (БПЛА) [1–3], которые решают

или будут решать задачи перемещения грузов, людей, мониторинга территорий, обеспечения связи и ряд других. Служба управления воздушным движением (УВД) организована для установления и поддержки необходимого порядка в воздушном движении, предупреждения опасных сближений и столкновений воздушных судов (ВС),

а также для обеспечения информацией и консультациями, необходимыми для безопасного выполнения полётов и оповещения соответствующих органов о ВС, требующих помощи или спасения. При этом ситуация существенно усложняется в воздушном пространстве умных городов в связи с использованием в их воздушном пространстве большого количества БПЛА.

Для управления воздушным движением пилотируемых летательных аппаратов создана система управления воздушным движением, имеющая иерархическую структуру, а оперативное управление осуществляется на основе информации, получаемой в результате измерения параметров движущихся объектов радиолокационными станциями, работающими на принципах активной локации либо локации с активным ответом [4, 5]. В указанных работах на основе методов теории оптимального управления предложен подход к оптимизации функционирования средств измерений, обеспечивающих получение траекторной информации о параметрах движения воздушных судов системой управления воздушным движением. Результаты моделирования позволили сделать вывод о существенном повышении эффективности такой системы. В работе [6] предложена методика, развивающая методический аппарат исследования эффективности функционирования радиолокационных систем с активным ответом в условиях преднамеренных помех с использованием показателя, отражающего оперативную эффективность и возможности постановщиков помех на информационно-техническом уровне; чувствительностью к параметрам, зависящим от заданных радиоэлектронной и оперативно-тактической ситуацией, учётом взаимного расположения и технических характеристик радиоэлектронных средств РЭС, участвующих в конфликтном взаимодействии, а также включает модели пространственно-временного воздействия помех и алгоритм обнаружения запросных сигналов радиолокационных систем с активным ответом.

В работе [7] отмечается, что работа БПЛА часто проводится в воздушном пространстве, населённом как гражданскими, так и военными пилотируемыми летательными аппаратами, что требует применения искусственного интеллекта для распознавания ситуаций и позволяет избежать возможных столкновений. Перечень специальных мероприятий включает разработку операционных архитектур, спецификацию характеристик воздушного пространства в определенных зонах полётов, детальный анализ потенциальных опасностей и разработку

обоснования безопасности, также описываются инструменты и методы моделирования, которые поддерживают многие из этих видов деятельности, и показано, как эта инфраструктура моделирования используется в ряде связанных с безопасностью полётов исследований. В [8] отмечается, что рост авиаперевозок во всем мире и появление беспилотных авиационных систем увеличат плотность и сложность воздушного движения. Безопасная координация воздушного судна потребует более приспособленных технологий для связи, навигации и наблюдения. Проект HSCNA обеспечит основу для технологических и эксплуатационных концепций для размещения значительно большего числа сетевых самолётов. В статье описываются две технические проблемы проекта. Первая техническая задача заключается в разработке концепции операций в многополосных сетях для использования на нескольких этапах полёта и на всех типах линий связи. Вторая заключается в проведении моделирования будущих операций организации воздушного движения с использованием многополосных сетей и технологий. Масштабное моделирование позволит оценить влияние новых интегрированных сетей и технологий по сравнению с сегодняшней системой на будущие потребности воздушного движения. В работе австралийского автора [9] представлена новая аналитическая основа, учитывающая необходимость единого подхода к обеспечению разделения воздушных судов и принципу обнаружения и предотвращения столкновения ВПЛА.

Применение рассмотренных выше в работах источников траекторной информации для случая управления воздушным движением БПЛА часто становится неприемлемым вследствие более плотного потока таких объектов, меньшей ЭПР, невозможно разместить аппаратуру активного ответа на борту БПЛА. Поэтому целесообразно использовать всю имеющуюся совокупность информационных датчиков разнородных локационных средств (радиолокационных, радиотехнических, лазерных, систем с активным ответом) в многопозиционном режиме [10, 11].

Поэтому важнейшей задачей при проектировании средств информационного обеспечения системы управления воздушным движением является задача оценки потенциальной точности траекторных измерений совокупностью информационных средств, доступных в текущий момент времени для проведения измерения параметров движения БПЛА с учётом ограничений, которые, прежде всего, связаны с возможным

затенением зданиями и сооружениями города летательного аппарата для информационных средств. При этом будем полагать, что имеющаяся возможность комплексирования таких средств, работающих на разных физических принципах и в различных диапазонах частот, позволит сопровождать БПЛА в воздушном пространстве умного города и с высокой степенью эффективности решать задачу управления воздушным движением умного города.

Целью статьи является разработка методологии оценки потенциальной точности траекторных измерений совокупностью информационных средств, функционирующих на территории умного города в интересах информационного обеспечения системы управления воздушным движением, которая лежит в основе динамического формирования режимов работы и структуры используемых информационных средств.

#### Материалы и методы исследования

Несмотря на значительный прогресс, достигнутый за последние десятилетия, в технике основных элементов и устройств информационного обеспечения, прежде всего – в радиолокационной технике, возросшие требования к качеству траекторной информации в системе управления воздушным движением в условиях умного города не удаётся удовлетворить в рамках традиционного построения и использования таких систем.

Наиболее перспективным направлением является переход от отдельных средств информационного обеспечения к многопозиционным информационным системам, состоящим из разнесённых в пространстве умного города передающих и приёмных позиций, совместно ведущих наблюдение беспилотных и пилотируемых летательных аппаратов. При этом следует особо подчеркнуть, что в качестве информационных средств умного города могут применяться как радиолокаторы, так и лазерные и акустические локаторы, оптические средства наблюдения, совокупность пассивных локационных устройств.

Основная идея многопозиционной локации состоит в том, чтобы наиболее эффективно использовать информацию, заключённую в пространственных характеристиках электромагнитного и других типах информационных полей, используемых в процессе наблюдения за БПЛА.

Таким образом, многопозиционную локационную систему отличают следующие признаки: наличие нескольких разнесённых в пространстве позиций, совместная обработка информации о воздушных объектах,

а также возможность работы элементов таких систем на основе различных физических принципов.

Известно, что в однопозиционных локационных системах для построения траекторий наблюдаемых объектов широко используют простейшие рекуррентные фильтры [12], так называемые  $\alpha$ ,  $\beta$ -фильтры. В случае же применения многопозиционного режима работы информационных средств такие фильтры становятся неэффективными, поэтому применяют более сложные рекуррентные фильтры Калмана [10], в которых для каждого момента времени  $t_{k+1}$  формируется сглаженная оценка вектора состояния наблюдаемого объекта  $\hat{\mathbf{a}}_{k+1}$  на основе оценки  $\hat{\mathbf{a}}_k$ , полученной по предыдущим  $k$  наблюдениям объекта в моменты времени  $t_1, t_2, \dots, t_k$  и измерения  $\hat{\mathbf{a}}_{\text{ИЗМ}}(k+1)$ , поступившего в текущий момент времени:

$$\hat{\mathbf{a}}_{k+1} = \hat{\mathbf{a}}_{k+1/k} + \mathbf{K}_{k+1}(\hat{\mathbf{a}}_{\text{ИЗМ}}(k+1) - \hat{\mathbf{a}}_{k+1/k}), \quad (1)$$

где  $\hat{\mathbf{a}}_{k+1/k}$  – прогноз вектора состояния  $\mathbf{a}$  на момент  $t_{k+1}$  по оценке  $\hat{\mathbf{a}}_k$  в момент времени  $t_k$  на основании модели движения воздушного объекта,  $\mathbf{K}_{k+1}$  – матрица коэффициентов усиления фильтра. Будем считать модель движения линейной на коротких промежутках времени, тогда

$$\hat{\mathbf{a}}_{k+1/k} = \mathbf{A}_k \hat{\mathbf{a}}_k \quad (2)$$

Здесь  $\mathbf{A}_k$  – динамическая матрица движения воздушного объекта, имеющая следующий вид:

$$\mathbf{A}_k = \begin{pmatrix} \Phi_{\vartheta} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \Phi_{\vartheta} \end{pmatrix} \quad (3)$$

В (3) матрица экстраполяции соответствующей части вектора состояния объекта

$$\Phi_{\vartheta} = \begin{pmatrix} 1 & \tau_{\vartheta} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \text{ а } \mathbf{0} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ – нулевая матрица. При этом вектор состояния}$$

При этом вектор состояния

$$\hat{\mathbf{a}}_k = (\hat{x}_{n-1}, \hat{\dot{x}}_{n-1}, \hat{y}_{n-1}, \hat{\dot{y}}_{n-1}, \hat{z}_{n-1}, \hat{\dot{z}}_{n-1})^T$$

включает в себя соответствующие координаты и их производные в прямоугольной топоцентрической системе координат [12].

Основой алгоритмов построения траекторий наблюдаемых объектов в многопозиционных системах, как и в однопозиционных, является модель движения объекта. При этом модель прямолинейного движения может быть принята в качестве базовой, что значительно упростит алгоритмы обработки информации, а манёвр можно рассматривать как случайное возмущение, описываемое гауссовским процессом типа белого шума.

Известно, что оценки первичных координат различными позициями чаще всего не являются коррелированными. Обычно для снижения вычислительной сложности рекуррентного фильтра в каждом цикле фильтрации формируется объединённый вектор измерений путём сжатия данных, поступающих от всех позиций многопозиционного комплекса, в момент  $t_{k+1}$  вместо вектора  $\hat{a}_{\text{изм}(k+1)}$  из соотношения формируется вектор  $\hat{\xi}_{k+1}$ , размерность которого равна максимальной размерности вектора измерений в отдельной позиции. Сжатие данных требует предварительного преобразования координат в единую систему, которая обычно связана с координатами размещения пункта обработки информации. При этом оценка максимального правдоподобия для таких преобразованных взаимно некоррелированных векторов измерений  $\hat{\xi}_{k+1}$ ,  $i = 1, m_{k+1}$  ( $m_{k+1}$  – количество используемых позиций комплекса в момент  $t_{k+1}$ ). Этот вектор  $\hat{\xi}_{k+1}$  может быть рассчитан в соответствии с выражением

$$\hat{\xi}_{k+1} = \left( \sum_{i=1}^{m_{k+1}} \mathbf{B}_{\xi(k+1),i}^{-1} \right)^{-1} \sum_{i=1}^{m_{k+1}} \mathbf{B}_{\xi(k+1),i}^{-1} \hat{\xi}_{k+1,i} \quad (4)$$

где  $\mathbf{B}_{\xi(k+1)}$  – корреляционная матрица ошибки измерения  $i$ -й позицией в момент  $t_{k+1}$  в системе координат пункта обработки информации. При этом корреляционная матрица ошибок указанного в вектора вычисляется с использованием соотношения

$$\mathbf{B}_{\xi(k+1)} = \left( \sum_{i=1}^{m_{k+1}} \mathbf{B}_{\xi(k+1),i}^{-1} \right)^{-1} \quad (5)$$

Таким образом, задача разработки методологии оценки потенциальной точности траекторных измерений совокупностью информационных средств решена. Найдено соотношение, которое позволяет оценить потенциальную точность измерений параметров воздушного объекта в соответствии со складывающейся воздушной обстановкой в текущий момент времени и выбирать оптимальные режимы работы информационных средств в многопозиционном режиме.

#### Результаты исследования и их обсуждение

Рассмотрим технологию применения полученных результатов в системе управления воздушным движением умного города. Обычно измерение координат объектов

производится в радиолокационной сферической системе координат, а рекуррентное оценивание параметров – в прямоугольной топоцентрической системе координат (связанной с центром обработки информации о воздушных объектах [10]).

Предположим, что имеются две позиции, на каждой производится измерение дальности и угла в сферической системе координат  $\hat{a}_{\text{изм}(k+1)} = (r_i, \beta_i)_{k+1}$ , а оцениваются параметры

$$\hat{a}_{k+1} = (\hat{x}_{k+1}, \hat{y}_{k+1}, \hat{z}_{k+1}, \hat{\alpha}_{k+1}),$$

пересчёт измеренных координат в прямоугольную систему осуществляется по формулам

$$x_{k+1} = r_{k+1} \cos \beta_{k+1}; \quad y_{k+1} = r_{k+1} \sin \beta_{k+1} \quad (6)$$

Для преобразования корреляционной матрицы ошибок измерений  $\Psi$  в прямоугольную топоцентрическую систему координат вводится линеаризованный матричный оператор  $\mathbf{H}$ . Далее полученную корреляционную матрицу ошибок измерений необходимо преобразовать в прямоугольную топоцентрическую систему координат центра обработки информации с помощью матрицы  $\mathbf{K}$ , осуществляющей поворот на соответствующее количество углов Эйлера. Тогда формула в рассматриваемом частном случае примет вид

$$\mathbf{B}_{\xi(k+1)} = \left( \sum_{i=1}^2 \left( \mathbf{K}_i \mathbf{H}_i \Psi_{\xi(k+1),i} \mathbf{H}_i^T \mathbf{K}_i^T \right)^{-1} \right)^{-1} \quad (7)$$

Следуя предложенной методике, могут быть определены все возможные структуры и режимы работы многопозиционного локационного комплекса с учётом складывающейся воздушной обстановки в умном городе и выбрано наиболее эффективное измерение параметров конкретного воздушного объекта в соответствии с критерием

$$\min_j \left( Sp \mathbf{B}_{\xi(k+1),j} \right) \quad (8)$$

где  $Sp \mathbf{B}_{\xi(k+1),j}$  представляет собой шаровую ошибку измерения с использованием  $j$ -й структуры в момент  $t_{k+1}$ .

Предложенная методика легко применима для реальных многопозиционных систем, осуществляющих измерение в активном режиме 3–4 координат (дальность, радиальная скорость, азимут, угол места), а в пассивном режиме – двух угловых координат (азимут, угол места).

### Заключение

В результате выполненной работы разработана методика оценки потенциальной точности измерений параметров движения БПЛА в воздушном пространстве умного города, в основе которой лежит преобразование корреляционных матриц ошибок измерения отдельных информационных средств в единую систему координат пункта обработки информации с целью формирования результирующей корреляционной матрицы ошибок измерения многопозиционным комплексом для выбора наилучшего состава и режимов работы информационных средств в текущий момент времени с учётом условий наблюдения БПЛА в конкретной области воздушного пространства.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-06081.*

### Список литературы

1. Герасимов П.К., Егоров Д.А. Аспекты безопасности управления автономными беспилотными летательными аппаратами в городской среде // *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения*, МИРЭА. Т. 14. № 5. 2014. С. 130–132.
2. Лебедев Г.Н., Малыгин В.Б. Интеллектуальная поддержка в задаче приоритетного обслуживания группы пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов при выборе маршрутов полёта и контроля безопасности их движения // *Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации*. 2015. № 221 (11). С. 125–137.
3. Бурый А.С., Фомичев И.Д. Модели и алгоритмы обеспечения безопасности движения группы беспилотных летательных аппаратов // *Проблемы управления безопасностью сложных систем*. Труды XXI Международной конференции. 2013. С. 241–243.
4. Grishin I.Yu., Timirgaleeva R.R. Air Navigation: Optimisation Control of Means Cueing of the Air-Traffic Control System. Proceedings of the 2017 21ST Conference of Open Innovations Association (FRUCT), Helsinki, Finland, Nov 06–10, 2017. IEEE. P. 134–140.
5. Grishin I.Yu., Timirgaleeva R.R. Air Navigation: Automation Method for Controlling the Process of Detecting Aircraft by a Radar Complex. Proceedings of the 2019 24th Conference of Open Innovations Association (FRUCT), Moscow, Russia, 8–12 April 2019, IEEE. P. 110–115.
6. Леньшин А.В., Попов С.А., Лебедев В.В. Оценка качества управления воздушным движением и безопасностью полётов в условиях помех с использованием беспилотных летательных аппаратов // *Фундаментально-прикладные проблемы безопасности, живучести, надёжности, устойчивости и эффективности систем*. 2017. С. 254–259.
7. Lutz Robert R., Frederick Paul S., Walsh Patricia M., Wasson Kimberly S., Fenlason Norm L. Integration of Unmanned Aircraft Systems into Complex Airspace Environments. Johns Hopkins Apl Technical Digest. 2017. V. 33. Is. 4. P. 291–302.
8. Davis Paul, Boisvert Benjamin. Hyper-Spectral Networking Concept of Operations and Future Air Traffic Management // 2017 IEEE/AIAA 36th Digital Avionics Systems Conference (DASC) Simulations, St Petersburg, Sep 17–21, 2017.
9. Kapoor Rohan, Ramasamy Subramanian, Gardi Alessandro, Sabatini Roberto. UAV Navigation Using Signals of Opportunity in Urban Environments: An Overview of Existing Methods // 1st International Conference on Energy and Power (ICEP), DEC 14–16, 2016, RMIT Univ, Melbourne, Australia. Energy Procedia. 2016. V. 110. P. 377–383.
10. Гришин И.Ю. Актуальные проблемы оптимизации управления в технических и экономических системах. Ялта: РИО КГУ, 2010. 252 с.
11. Гришин И.Ю., Тимиргалева Р.Р. Воздушная навигация: концепция мониторинга движения беспилотных транспортных средств умного города на основе информации от разнородных датчиков // *Информационные системы и технологии в моделировании и управлении*. IV Всероссийская научно-практическая конференция (с международным участием). Симферополь, 2019. С. 183–186.
12. Саврасов Ю.С. Алгоритмы и программы в радиолокации. М.: Радио и связь, 1985. 216 с.