

**Kebkal Konstantin Georgievich** – Sevastopol State University; e-mail: konstantin.kebkal@latena.ru; Sevastopol, Russia; dr. of eng. sc.; leading researcher at the Research Laboratory of Robotics and Intelligent Control Systems.

**Kabanov Aleksey Aleksandrovich** – e-mail: kabanovaleksey@gmail.com; phone: +79787622582; cand. of eng. sc.; associate professor of the department «Informatics and Control in Technical Systems».

**Alchakov Vasilii Viktorovich** – e-mail: alchakov@mail.ru; phone: +79787489941; cand. of eng. sc.; associate professor of the department «Informatics and Control in Technical Systems».

**Kramar Vadim Aleksandrovich** – e-mail: kramarv@mail.ru; phone: +79787927340; dr. of eng. sc.; associate professor of the department «Informatics and Control in Technical Systems».

**Dimin Maksim Eduardovich** – e-mail: dimin.maksim@yandex.ru; phone: +79788112909; laboratory research assistant, Research Laboratory "Robotics and Intelligent Control Systems".

УДК 004.02:007.52

DOI 10.18522/2311-3103-2024-1-213-225

**Ю.С. Баричев, О.П. Гойдин, В.П. Носков, С.А. Собольников**

**ФОРМИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННО-НАВИГАЦИОННОГО ПОЛЯ  
РОБОТОВ ВОЗДУШНОГО И НАЗЕМНОГО БАЗИРОВАНИЯ  
В УРБАНИЗИРОВАННОЙ СРЕДЕ**

*Обоснована возрастающая в последнее время востребованность использования гетерогенных групп роботов (роботов воздушного и наземного базирования) повышенной автономности при проведении спецопераций в индустриально-городских средах, включая здания. Сформулирована актуальная задача формирования по данным бортовых систем технического зрения беспилотного летательного аппарата информационно-навигационного поля, обеспечивающего автономный целенаправленный безопасный полет и движение роботов воздушного и наземного базирования в экранированных зонах урбанизированной среды. Формирование обобщенной геометрической модели внешней среды можно обеспечить путем задания множества целевых положений в плане рабочей зоны, которые должен посетить БПЛА в заданной последовательности и вернуться в точку старта. В процессе посещения достижимых целевых точек формируется обобщенная геометрическая модель внешней среды и определяются текущие координаты БПЛА. Описаны методы и алгоритмы построения различных моделей внешней среды и решения навигационной задачи, которые обеспечивают планирование и отработку целенаправленных безопасных траекторий движения в реальном времени по данным бортовых средств, что и является основой автономного управления в том числе и управления гетерогенной группой роботов. В основу систем автономного управления движением роботов воздушного и наземного базирования положены методы и алгоритмы выделения семантических объектов (плоскостей опорной поверхности и вертикальных стен), которыми изобилуют урбанизированные среды, и экстремальной навигации по двумерным горизонтальным сечениям 3D-изображений (облакам точек), полученным с помощью лидара или камеры глубины. Приведены результаты работы созданных программно-аппаратных средств систем автономного управления роботами воздушного и наземного базирования по формированию информационно-навигационных полей и решению навигационных задач по данным бортовых систем технического зрения в реальной индустриально-городской среде, подтвердившие эффективность и практическую ценность предлагаемых методов и алгоритмов. Использование единого информационно-навигационного поля, с одной стороны, существенно повышает автономность группы роботов за счет возможности самостоятельного планирования действий при выполнении сложных спецопераций, а с другой стороны, повышает ситуационную осведомленность операторов роботов, предоставляя в удобной форме информацию о месте проведения работ.*

*Беспилотный летательный аппарат, наземный мобильный робот, групповое управление, локализация, картографирование.*

Yu.S. Barichev, O.P. Goydin, V.P. Noskov, S.A. Sobolnikov

## THE INFORMATION AND NAVIGATION FIELD CONSTRUCTING SYSTEM FOR UGV AND UAV IN AN URBAN ENVIRONMENT

*The recent increasing demand of heterogeneous groups of robots (UAV and UGV) with increased autonomy when conducting special operations in industrial and urban environments is substantiated. The urgent task of forming, based on data from UAVs on-board computer vision systems, an information and navigation field that ensures autonomous targeted safe UAVs and UGVs movement in shielded areas of an urban environment is formulated. The formation of a generalized geometric model of the external environment can be achieved by specifying a set of target positions in terms of the working area, which the UAV must visit in a given sequence and return to the starting point. In the process of visiting achievable target points, a generalized geometric model of the external environment is formed and the current coordinates of the UAV are determined. Methods and algorithms for constructing various models of the external environment and solving navigation tasks are described, which ensure planning and executing of targeted safe movement trajectories in real time according to on-board data, which is the basis of autonomous control, including the heterogeneous robots' groups control. Autonomous control systems for the movement of UAVs and UGVs are based on methods and algorithms for identifying semantic objects (supporting surface planes and vertical walls), which abound in urban environments, and extreme navigation using 3D images (point clouds), obtained from lidar or depth cameras. The results of experiments on the information and navigation fields creation and solving navigation tasks based on on-board computer vision data in a real industrial-urban environment are presented, confirming the effectiveness and practical value of the proposed methods and algorithms. The use of a single information and navigation field, on the one hand, significantly increases the autonomy of a group of robots due to the ability to independently plan actions when performing complex operations, and on the other hand, increases the situational awareness of robot operators by providing information about the working space in a convenient form.*

*UAV, UGV, mobile robot, group control, multi-agent, SLAM.*

**Введение.** Широкое развитие и применение при выполнении различных гражданских и специальных операций, особенно в условиях опасных для человека, получили наземные робототехнические комплексы (РТК) и беспилотные летательные аппараты (БПЛА), оснащенные в настоящее время в основном системами дистанционного управления. Подавляющее число операций с использованием робототехнических средств (ликвидация пожаров, аварий и катастроф, борьба с терроризмом, военные действия и т.д.) проводится в индустриально-городских средах, включая здания (плотная городская застройка, промышленные территории, цеха, атомные станции, вокзалы, торгово-развлекательные центры и т.д.), где РТК и БПЛА с системами дистанционного управления имеют ряд принципиальных недостатков и ограничений, обусловленных избытком в таких средах экранированных зон, значительно ограничивающих устойчивую работу каналов связи и средств спутниковой навигации.

При планировании специальных операций на первое место выходит оперативность получения разведывательной информации. Перспективным здесь является применение БПЛА. По сравнению с наземными РТК, БПЛА обладают более высокими скоростью передвижения и маневренностью, большей дальностью действия и обзора и могут свободно перемещаться в пространстве, благодаря чему появляется возможность преодоления завалов и препятствий типа тупиков и лабиринтов, посещения смежных участков обследуемой зоны через проёмы в потолке или стенах. Современные БПЛА специального и гражданского назначения оснащены в основном системами дистанционного управления, дополненными в некоторых случаях элементами автономности, ограничивающимися автопилотированием по заранее заданной траектории по данным спутниковой и инерциальной навигации в условиях свободной от препятствий зоны полёта. Даже кратковременная потеря связи с дистанционно-управляемыми БПЛА в условиях плотной

городской застройки, а тем более в зданиях, практически гарантированно приводит к его потере. Традиционное автопилотирование здесь также невозможно из-за наличия множества препятствий в зоне полета, неустойчивой работы средств спутниковой навигации и недостаточная точность инерциальных систем навигации. То же самое можно сказать и о наземных РТК. Поэтому, несомненно, задачи повышения автономности РТК и БПЛА, ориентированных на использование в индустриально-городских средах, являются актуальными, особенно при их групповом применении. Центральными задачами здесь являются задачи формирования модели внешней среды и определение координат объектов управления по данным бортовых средств, решение которых в реальном времени позволяет автоматизировать процесс нахождения и отработки целенаправленных безопасных траекторий в средах с препятствиями, что и является основой автономного движения РТК и полета БПЛА в таких средах [1, 2]. Эффективное применение группы гетерогенных роботов (в рассматриваемом случае роботов наземного и воздушного базирования) требует не только повышения уровня их автономности, но и нуждается в едином информационно-навигационном поле для организации совместного выполнения общей задачи. Единое информационно-навигационное поле, содержащее обобщенную модель внешней среды и координаты членов группы, позволяет планировать и обрабатывать согласованные в пространстве и времени траектории движения и полета, что и обеспечивает на практическом уровне реализацию автономного и группового управления.

Наиболее простым и наиболее часто востребованным сценарием группового применения гетерогенных роботов является использование автономного разведывательного БПЛА для формирования информационно-навигационного поля, обеспечивающего автономное планирование и отработку траекторий движения как БПЛА, так и РТК или их группы, способных, в отличие от БПЛА, нести и применять более тяжелое и энергоемкое бортовое оборудование (средства пожаротушения, взятия проб, дезактивации вредных веществ, оружие и т.д.). Кроме того, автономный разведывательный БПЛА может формировать и план зоны интереса или визуально-подобную модель внешней среды [3], которые могут быть использованы для повышения ситуационной осведомленности операторов и планирования действий живой силы, возможно совместно с РТК.

Исследования по решению задачи построения информационно-навигационного поля для группы роботов в настоящее время активно ведутся во всем мире, однако основная масса исследований посвящена совместному решению SLAM задачи, что требует постоянного обмена данными между роботами группы и/или сервером [4–6]. Обеспечение устойчивой связи осложнено в условиях индустриально-городской застройки. В настоящей статье предлагается автономное (независимое от других агентов) формирование информационно-навигационного поля с помощью БПЛА с последующей передачей его наземным роботам. Также отличительной особенностью настоящей статьи является использование для навигации БПЛА и РТК выделенных плоских горизонтальных и/или вертикальных объектов (дорог, стен, полов, потолков), что существенно повышает точность локализации.

Навигационная система БПЛА в урбанизированной среде. Создание бортовой системы управления БПЛА при жестких масса-габаритных и энергетических ограничениях, обеспечивающей автономный безопасный целенаправленный полет в данных средах, требует решения ряда сложных научно-технических задач. Центральными задачами здесь являются задачи формирования объемной модели внешней среды и определение всех 6-и координат объекта управления по данным бортовых средств [2].

Для формирования трехмерной модели внешней среды БПЛА в качестве системы технического зрения (СТЗ) можно использовать 3D-лазерный сенсор с телесным углом обзора (лидар), позволяющий формировать 3D-изображения (объемные

облака точек) внешней среды. Тогда, используя инерциальные датчики крена и тангажа, полную навигационную задачу определения всех шести координат объекта управления в индустриально-городских средах можно решить так, как предлагается в [2]: по показаниям инерциальных датчиков, определить координату высоты ( $H$ ), как вертикальное измерение из облака точек (перпендикуляр к горизонтальной опорной поверхности), а остальные координаты (две линейные  $X$ ,  $Y$  и курс  $\varphi$ ), как сумму приращений этих координат, вычисленных с помощью алгоритма экстремальной навигации по горизонтальным 2D-изображениям [1, 7], выделяемым из последовательности 3D-изображений, формируемых в процессе полета, с учетом текущего крена и тангажа. Однако, при таком подходе достичь приемлемую точность решения навигационной задачи возможно только при точных показаниях инерциальных датчиков, для получения которых требуется обеспечить плавность полета и периодическую коррекцию их показаний. В реальных же условиях полета БПЛА мультироторного типа плавность полета и коррекцию показаний инерциальных датчиков далеко не всегда возможно обеспечить. Кроме того, определение высоты через непосредственные измерения лидара с учетом даже точных углов крена и тангажа также не всегда возможно, так как на горизонтальных опорных поверхностях (дорогах, площадях, полах, ...) реальной индустриально-городской среды и помещений могут находиться, как возвышающиеся предметы (строения, машины, мебель, ...), так и углубления.

Для преодоления отмеченных недостатков и повышения точности и достоверности решения полной навигационной задачи в данных условиях перспективным является использование для определения высоты полета, крена и тангажа выделяемых в 3D-изображениях плоских горизонтальных и/или вертикальных объектов (дорог, стен, полов, потолков) [8, 9], которыми изобилуют индустриально-городские среды и помещения. В частности, если из облака точек в системе координат  $xuz$ , связанной с сенсором (рис. 1), выделена горизонтальная плоскость  $P_1$  (например, пол или дорога) в нормальной форме  $x\cos(\alpha_1)+y\cos(\beta_1)+z\cos(\gamma_1)=\rho_1$ , то по свободному члену (перпендикуляру к плоскости  $P_1$ ) определяется высота полета  $H = \rho_1$ .

Крен  $\Theta$  и тангаж  $\gamma$  могут быть вычислены из вертикального единичного вектора  $e_1 = \langle \cos(\alpha_1), \cos(\beta_1), \cos(\gamma_1) \rangle$ , перпендикулярного к горизонтальной плоскости  $P_1$  (рис. 1).

Кроме того, если из облака точек выделены две вертикальные плоскости  $P_2$  и  $P_3$  не параллельные друг другу (например, стены) в нормальной форме  $x\cos(\alpha_2)+y\cos(\beta_2)+z\cos(\gamma_2)=\rho_2$  и  $x\cos(\alpha_3)+y\cos(\beta_3)+z\cos(\gamma_3)=\rho_3$  (рис. 1), то векторное произведение двух горизонтальных единичных векторов  $e_2 = \langle \cos(\alpha_2), \cos(\beta_2), \cos(\gamma_2) \rangle$  и  $e_3 = \langle \cos(\alpha_3), \cos(\beta_3), \cos(\gamma_3) \rangle$ , перпендикулярных к вертикальным плоскостям  $P_2$  и  $P_3$ , дает вертикальный вектор:

$$e_{23} = \overrightarrow{e_2 \times e_3},$$

что также позволяет вычислить крен и тангаж.

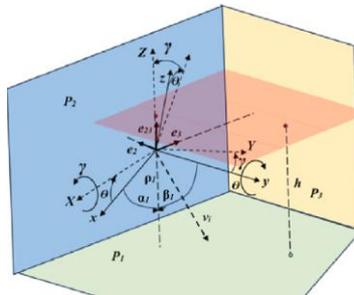


Рис. 1. Положение сенсора (объекта управления) и плоских объектов среды

Необходимо отметить, что плоские объекты выделяются в облаках точек даже при значительном количестве помех – затеняющих их предметов (например, для горизонтальной опорной поверхности – возвышающихся предметов и углублений), что повышает точность, достоверность и надежность определения координат  $H$ ,  $\Theta$  и  $\gamma$  по сравнению с подходом, предложенным в [2].

После определения углов крена и тангажа исходное облако точек ( $w = \{v_i = \langle x_i, y_i, z_i \rangle\}, i=1, 2, \dots, n$ ) может быть преобразовано из подвижной системы координат  $xuz$ , жестко связанной с СТЗ (объектом управления), также в подвижную систему координат  $XYZ$ , но приведенную к местной вертикали в соответствии с принятой на рис. 1 последовательностью поворотов:

$$V_i = A_x(\gamma) \times A_y(\Theta) \times v_i, (i=1, 2, \dots, n), \quad (1)$$

где  $A_y(\Theta)$  и  $A_x(\gamma)$  – матрицы поворота на углы крена  $\Theta$  и тангажа  $\gamma$  вокруг соответствующих осей;

$v_i$  – вектор  $i$ -й точки в системе координат сенсора  $xuz$ ;

$V_i$  – вектор  $i$ -й точки, приведенный в систему координат с местной вертикалью  $XYZ$ ;

$n$  – количество точек в облаке.

В облаке точек, приведенных к местной вертикали ( $W = \{V_i = \langle X_i, Y_i, Z_i \rangle\}, i=1, 2, \dots, n$ ), при известной высоте полета  $H = \rho_1$  можно выделить подмножество точек, принадлежащих горизонтальному сечению  $G(h)$  на заданной высоте  $h$  над опорной горизонтальной поверхностью – плоскостью  $P_1$ :

$$V_i \in G(h), \text{ если } Z_i = (h - \rho_1) \pm \delta. \quad (2)$$

где  $\delta$  – интервал разброса измерений лидара, определяемый такими его характеристиками, как точность и подробность формируемых 3D-изображений.

Полная навигационная задача при перемещении БПЛА из положения  $O_1$  в положение  $O_2$  (рис. 2) при формировании в этих положениях облаков точек  $w_1 = \{v_{1i}\}$  и  $w_2 = \{v_{2i}\}$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) в соответствии с вышеизложенным будет решаться следующим образом:

1) В облаках точек  $w_1$  и  $w_2$  выделяются уравнения  $x \cos(\alpha_{11}) + y \cos(\beta_{11}) + z \cos(\gamma_{11}) = \rho_{11}$  и  $x \cos(\alpha_{21}) + y \cos(\beta_{21}) + z \cos(\gamma_{21}) = \rho_{21}$  опорной горизонтальной плоскости  $P_1$ , что позволяет определить высоты полета ( $H_1 = \rho_{11}$  и  $H_2 = \rho_{21}$ ) и вычислить крен и тангаж ( $\Theta_1, \gamma_1$  и  $\Theta_2, \gamma_2$ ) в 1-м и во 2-м положениях по углам  $\alpha_{11}, \beta_{11}$  и  $\alpha_{21}, \beta_{21}$  соответственно;

2) В соответствии с (1) облака точек  $w_1$  и  $w_2$  преобразуются в облака точек  $W_1$  и  $W_2$  в системе координат с местной вертикалью, что позволяет в соответствии с выражением (2) выделить из них горизонтальные сечения (горизонтальные 2D-изображения внешней среды)  $G_1(h)$  и  $G_2(h)$ , расположенные на одной высоте  $h$  над опорной горизонтальной поверхностью (показаны на рис. 2 соответственно жирной непрерывной линией и жирным пунктиром);

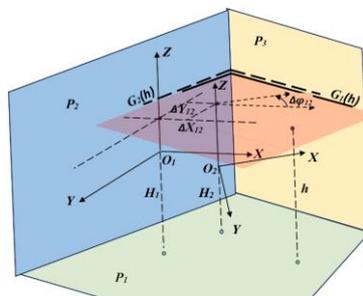


Рис. 2. Решение полной навигационной задачи БПЛА

3) С помощью алгоритма экстремальной навигации по горизонтальным 2D-изображениям внешней среды  $G_1(h)$  и  $G_2(h)$  вычисляются приращения  $\Delta X_{12}$ ,  $\Delta Y_{12}$  и  $\Delta\varphi_{12}$  недостающих координат.

Теперь, зная  $\Delta X_{12}$ ,  $\Delta Y_{12}$  и  $\Delta\varphi_{12}$ , при условии того, что в 1-м положении в абсолютной (неподвижной) системе координат, связанной с внешней средой, известны  $X_1$ ,  $Y_1$  и  $\varphi_1$ , можно вычислить недостающие координаты во 2-м положении:

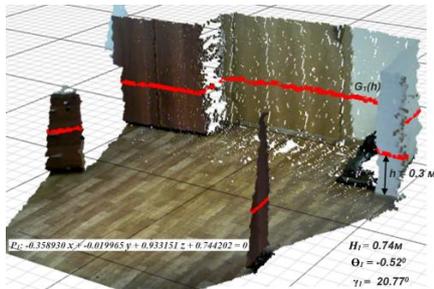
$$\begin{pmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ \varphi_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ \varphi_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cos(\varphi_1) & -\sin(\varphi_1) \\ \sin(\varphi_1) & \cos(\varphi_1) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \Delta X_{12} \\ \Delta Y_{12} \end{pmatrix};$$

В общем случае на  $i$ -м шаге решения навигационной задачи:

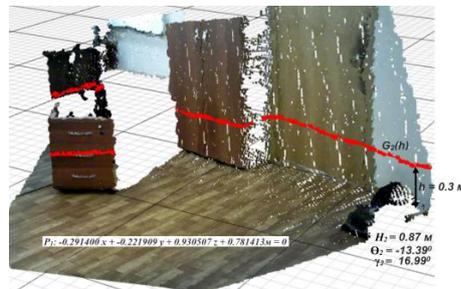
$$\begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ \varphi_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ \varphi_0 \end{pmatrix} + \sum_{k=1}^i \begin{pmatrix} \cos(\varphi_{(k-1)}) & -\sin(\varphi_{(k-1)}) \\ \sin(\varphi_{(k-1)}) & \cos(\varphi_{(k-1)}) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \Delta X_{(k-1)k} \\ \Delta Y_{(k-1)k} \end{pmatrix}; \quad (3)$$

Зная координаты БПЛА в точке формирования облака точек (3), последнее может быть преобразовано в неподвижную систему координат, что позволяет формировать в процессе полета обобщенную геометрическую модель внешней среды в неподвижной системе координат, решая тем самым, так называемую, SLAM-задачу.

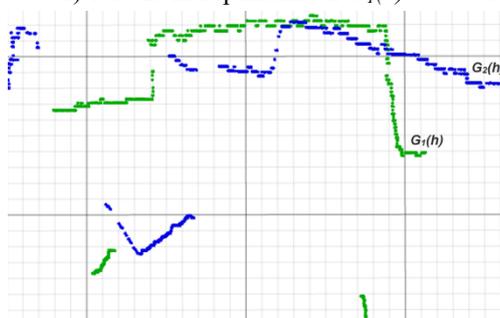
Результат обработки прикладным программным обеспечением двух 3D-изображений внешней среды, снятых камерой глубины Asus Xtion Pro из двух разных положений, при выделении горизонтальной опорной поверхности ( $P_1$ ), по уравнению которой определяются высоты полета ( $H_1$  и  $H_2$ ), а также углы крена и тангажа ( $\Theta_1, \gamma_1$  и  $\Theta_2, \gamma_2$ ), и двух горизонтальных 2D-изображений  $G_1(h)$  и  $G_2(h)$ , приведены на рис. 3, а, б, в, соответственно. Результат совмещения  $G_1(h)$  и  $G_2(h)$  с вычислением приращений координат  $\Delta X_{12}$ ,  $\Delta Y_{12}$ ,  $\Delta\varphi_{12}$  и совмещения двух 3D-изображений внешней среды в системе координат, приведенной к местной вертикали и связанной с первым положением, приведены на рис. 3, г, д.



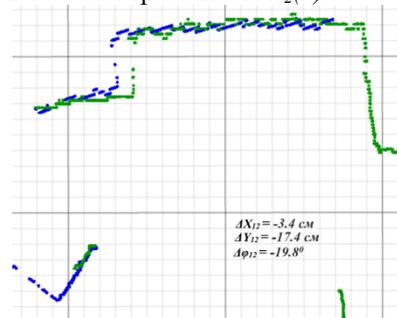
а) 1-е 3D-изображение и  $G_1(h)$



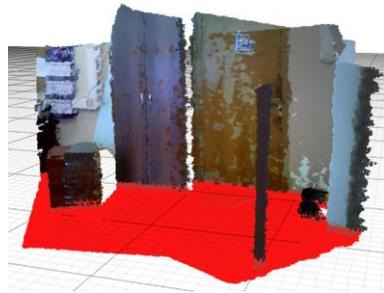
б) 2-е 3D-изображение и  $G_2(h)$



в)  $G_1(h)$  и  $G_2(h)$  в системе координат сенсора



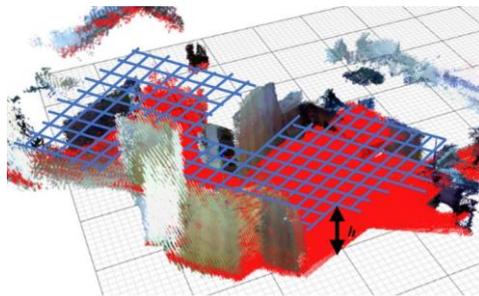
г) совмещение  $G_1(h)$  и  $G_2(h)$



д) совмещение 2-х 3D-изображений

Рис. 3. Результат работы прикладного программного обеспечения

Решение SLAM-задачи позволяет автоматизировать процессы формирования обобщенной геометрической модели внешней среды, а также планирования и отработки целенаправленных, безопасных траекторий полета БПЛА. Формирование обобщенной геометрической модели можно обеспечить путем задания множества целевых положений в плане рабочей зоны, которые должен посетить БПЛА в заданной последовательности (например, в последовательности с постепенным удалением от точки старта) и вернуться в точку старта. В процессе посещения достижимых целевых точек (или их локальной области) формируется обобщенная геометрическая модель внешней среды (рис. 4) и определяются текущие координаты БПЛА описанным выше способом.

Рис. 4. Обобщенная геометрическая модель внешней среды и плоский однородный граф в пространстве полета на высоте  $h$ 

Обобщенная геометрическая модель внешней среды, дополненная в качестве опорных 2D-изображений [1, 7] горизонтальными сечениями  $G_k(h)$  с координатами  $(H_k, \Theta_k, \gamma_k, X_k, Y_k, \varphi_k)$  их формирования в каждом  $k$ -м цикле определения координат  $(k=0, 1, \dots, K)$ , представляет собой информационно-навигационное поле. Обобщенная геометрическая модель внешней среды позволяет определить область пространства, занятую препятствиями, и область пространства, свободную для полета. Представив последнюю в виде дискретной модели – однородных плоского (рис. 4) или трехмерного графа, можно, используя волновой алгоритм [10] спланировать траекторию между вершинами, соответствующими текущему (определяется по текущим координатам объекта управления) и целевому (задается в начале полета) положениям, как это предложено в [11–13] для планирования траекторий в двухмерных, трехмерных и многомерных пространствах положений. Знание текущих координат БПЛА, уточняемых по опорным изображениям, позволяет корректно отработать спланированную траекторию в сформированной модели внешней среды. Уточнение текущих

координат в данном случае происходит следующим образом. При достижении БПЛА локальной области опорного 2D-изображения  $G_k(h)$ , текущие координаты определяются не по предыдущему 2D-изображению, а по опорному. При представлении дискретной модели в виде плоского однородного графа, моделирующего пространство на какой-то одной высоте  $h$ , планирование и обработка траекторий полета будет происходить на этой одной высоте (рис. 4). Представление же дискретной модели в виде однородного трехмерного графа, объединяющего совокупность плоских однородных графов, моделирующих пространство полета на разных высотах, позволяет планировать и обрабатывать траектории полета на разных высотах (возможность при планировании траектории перемещений по высоте обеспечивается наличием вертикальных ребер между вершинами соседних плоских графов). Если плоские однородные графы представить в виде ортогонально-концентрических графов, то планируемые траектории совпадут с кратчайшими [11, 13].

Для снижения необходимых объемов памяти и вычислений и, следовательно, снижения требований к бортовому вычислителю, в качестве модели внешней среды можно использовать граф видимости [14], на котором методами динамического программирования (например, с помощью алгоритма Дейкстры [15]) находятся целенаправленные кратчайшие безопасные траектории полета БПЛА. Граф видимости строится следующим образом:

- ♦ в горизонтальной плоскости полета на одной высоте для всех выпуклых краев препятствий на некотором расстоянии, определяемом габаритами БПЛА, вводится вершина графа  $q_i$  ( $i=1,2,\dots$ ) кроме того вводятся две вершины  $q_0$  и  $q_n$ , соответствующие начальному и целевому положению РТК;

- ♦ между любой парой вершин  $q_i$  и  $q_j$  (включая вершины  $q_0$  и  $q_n$ ) вводится ребро с весом  $l_{ij}$ , равным расстоянию в плане между вершинами  $q_i$  и  $q_j$ , если между этими вершинами существует прямолинейный путь, не пересекающий препятствия.

Пример графа видимости для реальной внешней среды и найденной на нем траектории полета приведен на рис. 5.

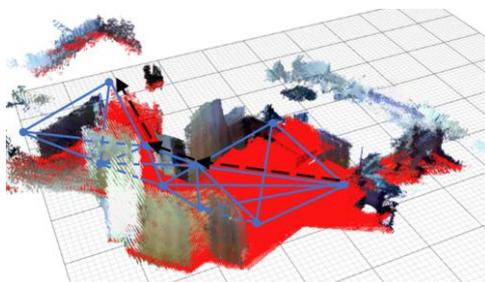


Рис. 5. Граф видимости и спланированная траектория полета

Использование нескольких графов видимости, соответствующих разным высотам полета, позволяет организовать полет на различных высотах.

Граф видимости описывается матрицей связности, которая не требует больших объемов памяти бортового вычислителя.

**Навигация наземного РТК по данным БПЛА.** Наземный РТК, также как и БПЛА в качестве СТЗ должен иметь лидар с телесным углом обзора, позволяющим формировать облака точек, пересекающиеся с облаками точек, формируемых БПЛА.

Как уже отмечалось выше, обобщенная геометрическая модель внешней среды в разведанной БПЛА рабочей зоне, может быть достаточно просто сформирована по результатам циклов навигации БПЛА в точках съема облаков точек, как объединение этих облаков в соответствии с их координатами съема (рис. 6).

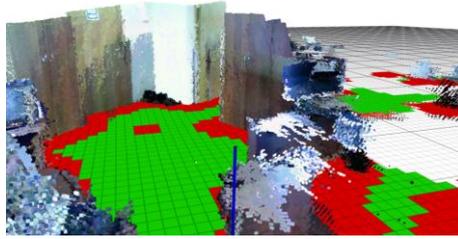


Рис. 6. Обобщенная геометрическая модель внешней среды с выделенной горизонтальной опорной поверхностью

Для построения модели внешней среды, в которой можно планировать траектории движения РТК, необходимо выделить из обобщенной геометрической модели, построенной БПЛА, опорную горизонтальную поверхность. В каждом  $k$ -м цикле навигации БПЛА ( $k=0, 1, \dots, K$ ) формируется приведенное к местной вертикали облако точек  $W_k = \{V_{ki} = \langle X_{ki}, Y_{ki}, Z_{ki} \rangle\}$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ), выделяются горизонтальная плоскость ( $P_l$ ) опорной поверхности  $x \cos(\alpha_{kl}) + y \cos(\beta_{kl}) + z \cos(\gamma_{kl}) = \rho_{kl}$ , горизонтальное сечение  $G_k(h)$  на высоте  $h$  от опорной поверхности и определяются координаты  $\langle H_k, X_k, Y_k, \Theta_k, \gamma_k, \Phi_k \rangle$  БПЛА.

Выделим из  $W_k$  подмножество точек  $W_{0k}$ , принадлежащих опорной поверхности  $P_l$ :

$$V_{ki} \in W_{0k}, \text{ если } Z_{ki} = -H_k \pm \delta,$$

где  $\delta$  – интервал разброса измерений лидара, определяемый такими его характеристиками, как точность и подробность формируемых 3D-изображений.

Тогда множество всех точек, принадлежащих горизонтальной плоскости опорной поверхности  $P_l$ , из всех облаков точек, сформированных в процессе полета БПЛА, будет равно  $W_0 = \bigcup_{k=0}^K W_{0k}$ . (показаны на рис. 6 красным и зеленым цветами).

Опорная горизонтальная поверхность может быть разбита на дискретные участки и представлена однородным плоским гафом. Вершины данного графа, соответствующие дискретные участки которых не содержат точки из  $W_0$ , будут принадлежать зонам препятствий и неизвестности, а вершины, соответствующие участки которых содержат точки из  $W_0$  и находятся на расстоянии от препятствий и зон неизвестности на расстоянии не менее половины корпуса РТК (препятствия и зоны неизвестности расширяются на половину корпуса РТК), образуют зону, разрешенную для движения (выделены на рис. 6 зеленым цветом). Построенная таким образом дискретная семантическая модель плоскости перемещений (каждому дискретному участку плоскости перемещения присвоен семантический признак “проходим”, “непроходим”) может быть использована для планирования целенаправленных безопасных траекторий РТК, например с использованием волнового алгоритма [10,11], при заданном целевом и известном текущем положении. Текущее положение наземного РТК, перемещающегося по горизонтальной опорной поверхности, однозначно определяются двумя линейными координатами  $(X_r, Y_r)$  и одной угловой – курсом  $(\varphi_r)$ , которые также могут определены с помощью алгоритма экстремальной навигации по горизонтальным 2D-изображениям внешней среды, выделяемым из облака точек, формируемых лидаром в процессе движения РТК. Для того, чтобы корректно определять текущие координаты РТК (в соответствии с сформированной по данным СТЗ БПЛА моделью) необходимо использовать горизонтальные сечения  $G_k(h)$  с известными координатами  $\langle X_k, Y_k, \Phi_k \rangle$  их формирования БПЛА как опорные [1, 7]. Тогда при достижении РТК локальной области опорного 2D-изображения  $G_k(h)$ , текущие координаты РТК определяются не по предыдущему 2D-изображению, сформированному по данным СТЗ РТК, а

по опорному, сформированному СТЗ БПЛА. В этом случае планирование траекторий и их отработка будут выполняться корректно с учетом ошибок сформированной по данным СТЗ БПЛА моделью, что обеспечит безопасное движение РТК. Таким образом, информационно-навигационное поле РТК, сформированное по данным СТЗ БПЛА, представляет собой дискретную семантическую модель плоскости перемещений и множество опорных горизонтальных 2D-изображений с координатами их формирования ( $G_k(h), \langle X_k, Y_k, \varphi_k \rangle, k=0, 1, \dots, K$ ).

Для планирования и отработки траекторий РТК вместо дискретной семантической модели плоскости перемещений может быть использован также граф видимости. На рис. 7 показана траектория РТК, найденная на графе видимости (на рисунке показаны только вершины графа видимости), построенном по видеоданным БПЛА в реальной среде.

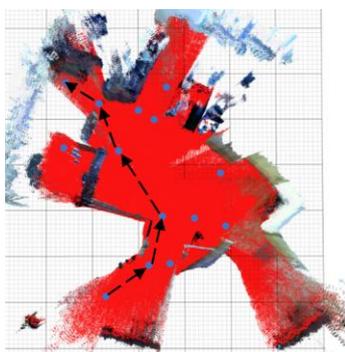


Рис. 7. Горизонтальная опорная поверхность и траектория РТК на графе видимости  $b$

Использование графа видимости вместо дискретной семантической модели позволяет существенно сократить объем информации, передаваемой с БПЛА на РТК.

**Заключение.** Формирование информационно-навигационного поля (построение обобщенной модели внешней среды, дополненной опорными изображениями с координатами их получения) позволяет планировать и обрабатывать целенаправленные безопасные траектории полета БПЛА и движения наземных РТК с посещением заданного набора целевых точек и возвращением в точку старта. При этом формирование такого поля в индустриально-городской застройке на первоначальном этапе целесообразно выполнять с использованием разведывательных БПЛА мультироторного типа, которые должны входить в состав гетерогенной группы роботов, выполняющих специальную задачу. Использование единого информационно-навигационного поля, с одной стороны, существенно повышает автономность группы роботов за счет возможности самостоятельного планирования действий при выполнении сложных технологических операций, а с другой стороны, повышает ситуационную осведомленность операторов роботов, предоставляя в удобной форме информацию о месте проведения работ.

Такой сценарий использования автономных БПЛА и РТК позволяет решить широкий класс задач в экранированных зонах:

- ◆ разведки [16];
- ◆ транспортировки грузов и взятия образцов [17, 18];
- ◆ обеспечение радиосвязи [19];
- ◆ применение навесного оборудования (средств пожаротушения, обеззараживания, оружия) на заданных участках рабочей зоны [20];

◆ формирование визуально-подобной модели внешней среды для предварительного планирования и проигрывания различных сценариев будущих работ и операций с использованием живой силы и робототехнических средств, формирования маршрутного задания РТК и/или БПЛА с выполнением заданных действий в заданных точках маршрута и др.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Лакота Н.А., Носков В.П., Рубцов И.В., Лундгрэн Я.-О., Моор Ф.* Опыт использования элементов искусственного интеллекта в системе управления цехового транспортного робота // *Мехатроника*. – 2000. – № 4. – С. 44-47.
2. *Загоруйко С.Н., Казьмин В.Н., Носков В.П.* Навигация БПЛА и 3D-реконструкция внешней среды по данным бортовой СТЗ // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2014. – № 8. – С. 62-68.
3. *Носков В.П., Рубцов И.В., Романов А.Ю.* Формирование объединенной модели внешней среды на основе информации видеокамеры и дальномера // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2007. – № 8. – С. 2-5.
4. *Yang J., Wen C.-K., Yang X., Xu J., Du T., and Jin S.* Multi-domain cooperative SLAM: The enabler for integrated sensing and communications // *IEEE Wireless Commun.* – Feb. 2023. – Vol. 30, No. 1. – P. 40-49.
5. *Saha A., Dhara B.C., Umer S., AlZubi A.A., Alanazi J.M., Yurii K.* CORB2I-SLAM: An Adaptive Collaborative Visual-Inertial SLAM for Multiple Robots // *Electronics*. – 2022. – 11, 2814.
6. *Sun Y. and Huang F. and Wen W. and Hsu L.-T. and Liu X.* Multi-Robot Cooperative Lidar Slam for Efficient Mapping in Urban Scenes // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. – 2023. – Vol. XLVIII-1/W1-2023. – P. 473-478.
7. *Носков В.П., Носков А.В.* Навигация мобильных роботов по дальнометрическим изображениям // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2005. – № 12. – С. 16-21.
8. *Казьмин В.Н., Носков В.П.* Выделение геометрических и семантических объектов в дальнометрических изображениях для навигации роботов и реконструкции внешней среды // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2015. – № 10 (171). – С. 71-83.
9. *Носков В.П., Киселев И.О.* Выделение плоских объектов в линейно структурированных 3D-изображениях // *Робототехника и техническая кибернетика*. – 2018. – № 2 (19). – С. 31-38.
10. *Lee C.Y.* An Algorithm for Path Connections and Its Applications // *IRE Trans.* – 1961. – v EC-10, No. 3.
11. *Каляев А.В., Носков В.П., Чернухин Ю.В.* Алгоритм управляющей структуры транспортного робота // *Известия АН СССР. Техническая кибернетика*. – 1980. – № 4. – С. 64-72.
12. *Каляев А.В., Носков В.П., Чернухин Ю.В.* Однородная управляющая структура адаптивного робота-манипулятора // *Известия АН СССР. Техническая кибернетика*. – 1981. – № 6. – С. 121-126.
13. *Каляев А.В., Чернухин Ю.В., Носков В.П., Каляев И.А.* Однородные управляющие структуры адаптивных роботов. – М.: Наука, 1990. – 147 с.
14. *Tomás Lozano-Pérez, Michael A. Wesley.* An algorithm for planning collision-free paths among polyhedral obstacles // *Communications of the ACM*. – 1979. – Vol. 22, Issue 10. – P. 560-570.
15. *Dijkstra E.W.* A Note on two Problems in Connexion with Graphs // *Numerische Mathematik*. – 1959. – Vol. 1, Issue 1. – P. 269-271.
16. *Градецкий В.Г., Ермолов И.Л., Князьков М.М., Лалин Б.С., Семенов Е.А., Собольников С.А., Суханов А.Н.* Система группового транспортного управления мобильными наземными роботами на различных грунтах // *Робототехника и техническая кибернетика*. – 2020. – 8, 1. – С. 61-71.
17. *Градецкий В.Г., Ермолов И.Л., Князьков М.М., Семенов Е.А., Собольников С.А., Суханов А.Н.* О научных задачах выполнения транспортных операций группой мобильных роботов // *Робототехника и техническая кибернетика*. – 2016. – 3. – С. 57-62.
18. *Gradetsky Valery, Ermolov Ivan, Knyazkov Maxim, Semenov Eugeny, Sobolnikov Sergey and Sukhanov Artem.* Implementation of a Joint Transport Task by a Group of Robots. Smart Electromechanical Systems // *Studies in Systems, Decision and Control*. – Springer. – P. 203-214.
19. *Градецкий В.Г., Ермолов И.Л., Князьков М.М., Собольников С.А.* Построение подвижных коммуникационных сетей на базе наземных автономных мобильных роботов // *Мехатроника. Автоматизация. Управление*. – 2011. – № 11. – С. 27-32.

20. *Ermolov I.L., Knyazkov M.M., Sobolnikov S.A., Sukhanov A.N., Usov V.M.* Position Control of Ugv Group for Covid (Virus Sars-Cov-2covid) Localization and Primary Treatment Within Indoor Environment // *Studies in Systems, Decision and Control.* – 2021. – Vol. 352. – P. 113-125.

## REFERENCES

1. *Lakota N.A., Noskov V.P., Rubtsov I.V., Lundgren Ya.-O., Moor F.* Opyt ispol'zovaniya elementov iskusstvennogo intellekta v sisteme upravleniya tsekhovogo transportnogo robota [The experience of using artificial intelligence elements in the control system of a shop transport robot], *Mekhatronika* [Mechatronics], 2000, No. 4, pp. 44-47.
2. *Zagoruyko S.N., Kaz'min V.N., Noskov V.P.* Navigatsiya BPLA i 3D-rekonstruktsiya vneshney sredy po dannym bortovoy STZ [UAV navigation and 3D reconstruction of the external environment based on on-board VS data], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, automation, control], 2014, No. 8, pp. 62-68.
3. *Noskov V.P., Rubtsov I.V., Romanov A.Yu.* Formirovanie ob"edinennoy modeli vneshney sredy na osnove informatsii videokamery i dal'nomera [Formation of a combined model of the external environment based on information from a video camera and a rangefinder], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, automation, control], 2007, No. 8, pp. 2-5.
4. *Yang J., Wen C.-K., Yang X., Xu J., Du T., and Jin S.* Multi-domain cooperative SLAM: The enabler for integrated sensing and communications, *IEEE Wireless Commun.*, Feb. 2023, Vol. 30, No. 1, pp. 40-49.
5. *Saha A., Dhara B.C., Umer S., AlZubi A.A., Alanazi J.M., Yurii K.* CORB2I-SLAM: An Adaptive Collaborative Visual-Inertial SLAM for Multiple Robots, *Electronics*, 2022, 11, 2814.
6. *Sun Y. and Huang F. and Wen W. and Hsu L.-T. and Liu X.* Multi-Robot Cooperative Lidar Slam for Efficient Mapping in Urban Scenes, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2023, Vol. XLVIII-1/W1-2023, pp. 473-478.
7. *Noskov V.P., Noskov A.V.* Navigatsiya mobil'nykh robotov po dal'nometricheskim izobrazheniyam [Navigation of mobile robots by rangefinder images], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, automation, control], 2005, No. 12, pp. 16-21.
8. *Kaz'min V.N., Noskov V.P.* Vyделение geometricheskikh i semanticheskikh ob"ektov v dal'nometricheskikh izobrazheniyakh dlya navigatsii robotov i rekonstruktsii vneshney sredy [Selection of geometric and semantic objects in rangefinder images for robot navigation and reconstruction of the external environment], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 10 (171), pp. 71-83.
9. *Noskov V.P., Kiselev I.O.* Vyделение ploskikh ob"ektov v lineynno strukturirovannykh 3D-izobrazheniyakh [Extracting planar objects in linearly structured 3D images], *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and technical cybernetics], 2018, No. 2 (19), pp. 31-38.
10. *Lee C.Y.* An Algorithm for Path Connections and Its Applications, *IRE Trans.*, 1961, v EC-10, No. 3.
11. *Kalyaev A.V., Noskov V.P., Chernukhin Yu.V.* Algoritm upravlyayushchey struktury transportnogo robota [The transport robot control structure algorithm], *Izvestiya AN SSSR. Tekhnicheskaya kibernetika* [Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Technical cybernetics], 1980, No. 4, pp. 64-72.
12. *Kalyaev A.V., Noskov V.P., Chernukhin Yu.V.* Odnorodnaya upravlyayushchaya struktura adaptivnogo robota-manipulyatora [Homogeneous control structure of an adaptive robot manipulator], *Izvestiya AN SSSR. Tekhnicheskaya kibernetika* [Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Technical cybernetics], 1981, No. 6, pp. 121-126.
13. *Kalyaev A.V., Chernukhin Yu.V., Noskov V.P., Kalyaev I.A.* Odnorodnye upravlyayushchie struktury adaptivnykh robotov [Homogeneous control structures of adaptive robots]. Moscow: Nauka, 1990, 147 p.
14. *Tomás Lozano-Pérez, Michael A. Wesley.* An algorithm for planning collision-free paths among polyhedral obstacles, *Communications of the ACM*, 1979, Vol. 22, Issue 10, pp. 560-570.
15. *Dijkstra E.W.* A Note on two Problems in Connexion with Graphs, *Numerische Mathematik*, 1959, Vol. 1, Issue 1, pp. 269-271.
16. *Gradetskiy V.G., Ermolov I.L., Knyaz'kov M.M., Lapin B.S., Semenov E.A., Sobol'nikov S.A., Sukhanov A.N.* Sistema gruppovogo transportnogo upravleniya mobil'nymi nazemnymi robotami na razlichnykh gruntakh [Transport group control system of unmanned ground vehicles for various soils], *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and Engineering Cybernetics], 2020, 8, 1, pp. 61-71.

17. *Gradetskiy V.G., Ermolov I.L., Knyaz'kov M.M., Semenov E.A., Sobol'nikov S.A., Sukhanov A.N.* O nauchnykh zadachakh vypolneniya transportnykh operatsiy gruppy mobil'nykh robotov [Scientific tasks of implementing transportation tasks by groups of UGVs], *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and Technical Cybernetics], 2016, 3, pp. 57-62.
18. *Gradetskiy Valery, Ermolov Ivan, Knyazkov Maxim, Semenov Eugeny, Sobolnikov Sergey and Sukhanov Artem.* Implementation of a Joint Transport Task by a Group of Robots. Smart Electromechanical Systems, *Studies in Systems, Decision and Control*. Springer, pp. 203-214.
19. *Gradetskiy V.G., Ermolov I.L., Knyaz'kov M.M., Sobol'nikov S.A.* Postroenie podvizhnykh kommunikatsionnykh setey na baze nazemnykh avtonomnykh mobil'nykh robotov [Design of moving communication network on the base of ground autonomous mobile robots], *Mekhatronika. Avtomatizatsiya. Upravlenie* [Mechatronics. Automation. Control], 2011, No. 11, pp. 27-32.
20. *Ermolov I.L., Knyazkov M.M., Sobolnikov S.A., Sukhanov A.N., Usov V.M.* Position Control of Ugv Group for Covid (Virus Sars-Cov-2covid) Localization and Primary Treatment Within Indoor Environment, *Studies in Systems, Decision and Control*, 2021, Vol. 352, pp. 113-125.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. И.Л. Ермолов.

**Баричев Юрий Сергеевич** – ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова»; e-mail: ybarichev@yandex.ru; г. Москва, Россия; тел.: +79191396529; техник научно-исследовательской лаборатории.

**Гойдин Олег Петрович** – e-mail: crer@vniia.ru; руководитель центра робототехники и аварийного реагирования.

**Собольников Сергей Александрович** – e-mail: sasobolnikov@vniia.ru; тел.: +79263879088; к.т.н.; начальник научно-исследовательской лаборатории.

**Носков Владимир Петрович** – НИИ Специального машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана; e-mail: noskov\_mstu@mail.ru; г. Москва, Россия; тел.: +79166766057. к.т.н.; зав. сектором.

**Barichev Yury Sergeevich** – FSUE "VNIIA"; e-mail: ybarichev@yandex.ru; Moscow, Russia; phone: +79191396529; technician of the research laboratory.

**Goydin Oleg Petrovich** – e-mail: crer@vniia.ru; head of the Center for robotics and emergency response.

**Sobolnikov Sergey Aleksandrovich** – e-mail: sasobolnikov@vniia.ru; phone: +79263879088; cand. of eng. sc.; head of the research laboratory.

**Noskov Vladimir Petrovich** – Bauman Moscow State Technical University; e-mail: noskov\_mstu@mail.ru; Moscow, Russia; phone: +79166766057; cand. of eng. sc.; sector head.

УДК 004.932.2

DOI 10.18522/2311-3103-2024-1-225-233

**П.А. Гессен, А.И. Лизин, В.А. Павлова, В.Д. Саенко, В.А. Тупиков**

### **ГИБРИДНЫЙ АЛГОРИТМ АВТОМАТИЧЕСКОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ ДЛЯ ВСТРАИВАЕМЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЕЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ НАВИГАЦИИ И НАВЕДЕНИЯ**

*Было произведено исследование в области систем технического зрения, а также подходов к решению задач обнаружения и сопровождения объектов интереса без априорного знания об их типе с учетом целевой платформы в виде встраиваемого вычислителя оптико-электронной системы. На основании полученных данных был произведен анализ сферы и предложен новый гибридный алгоритм сопровождения для встраиваемых систем. Он основан на сочетании нескольких типов алгоритмов сопровождения, с одним из них в качестве приоритетного, обеспечивающего основную работу, и нескольких вспомогательных для стабилизации и расширения функционала приоритетного. Они связаны внешним циклом обработки, который на основе консенсусного решения внутренних алгоритмов самостоятельно, принимает решение о положении целевого объекта в кадре и хранит в себе вспомогательную информацию для обеспечения корректной работы всего алгоритма, а также отвечающего за принятие решения о повторном обнаружении цели. Предложены две возможные реализации данного подхода,*