

## **Описание конкурсной работы в номинации №4 «За создание новой технологии»**

**Наименование работы:** «Технология создания навигационных комплексов с использованием оптико-электронных измерений для перспективных беспилотных летательных аппаратов».

### **Конкурсная работа:**

Одной из существенных проблем, возникающих при эксплуатации беспилотных летательных аппаратов является то, что сигналы спутниковых навигационных систем могут быть недоступны по различным причинам. Это особенно актуально для аппаратов двойного назначения или работающих в городских условиях и внутри помещений.

Конкурсная работа заключается в разработке технологии создания навигационных комплексов для перспективных беспилотных летательных аппаратов, обладающих повышенными требованиями в части точности и целостности навигационного решения.

Предполагается, что разрабатываемая технология позволит упростить процесс создания навигационных комплексов беспилотных летательных аппаратов различных классов и назначений, предполагающих временную или постоянную работу в автономном режиме.

Целью работы является технология создания навигационных комплексов, обеспечивающих требуемые уровни точности и целостности навигационного решения перспективных беспилотных летательных аппаратов за счёт комплексирования инерциальных-спутниковых измерений и показаний системы одновременной навигации и картирования на основе оптико-электронных измерений.

Задачи работы:

1) Формирование метода синтеза алгоритмов комплексной обработки навигационной информации от инерциальных, спутниковых и оптико-электронных измерений.

2) Синтез структуры алгоритмов комплексной обработки навигационной информации и математических моделей погрешностей подсистем навигационного комплекса.

3) Разработка методики и программно-математического обеспечения имитационного моделирования для исследования свойств синтезированных алгоритмов с использованием среды AirSim.

4) Разработка методики и программно-математического обеспечения камеральной обработки реальных данных с целью отработки программно-математического обеспечения навигации и контроля целостности под конкретную целевую вычислительную машину.

Результаты работы, достигнутые в 2020 году:

1) Разработан метод синтеза алгоритмов комплексной обработки навигационной информации от инерциальных, спутниковых и оптико-электронных систем для беспилотных летательных аппаратов различных классов и назначений.

2) Синтезированы алгоритмы комплексной обработки навигационной информации на основе расширенного фильтра Калмана. Предложены математические модели погрешностей измерителей, входящих в навигационный комплекс.

3) Разработаны методики и стендовое программно-математическое обеспечение для проведения имитационного и полунатурного моделирования работы интегрированных навигационных систем, использующих синтезированные алгоритмы. Имитационное моделирование показало принципиальную работоспособность комплекса. Так по результатам моделирования погрешность определения координат не превысила 0.3% от пройденного пути при использовании инерциальной навигационной системы тактического класса точности.

В 2021 году планируется:

1) Реализовать алгоритмы и программное обеспечение контроля целостности измерений.

2) Внедрить программное обеспечение комплексной оптико-инерциальной навигационной системы с учётом ограничений конкретной целевой вычислительной машины. Провести натурные испытания системы в составе беспилотного летательного аппарата.

На сегодняшний день по результатам работы сделано 5 публикаций в научных изданиях, в том числе – 1 публикация в издании, индексируемом в перечне ВАК и 1 публикация в издании, индексируемом в базе Scopus.

**Сведения о соискателе:** (не более 1000 знаков)

МАИ – ведущий технический университет в области авиационных, ракетно-космических и других высокотехнологичных систем. В вузе обучается около 22 000 студентов. Сохраняя многолетние традиции и развивая новейшие тренды в области образования, науки и инноваций, МАИ обеспечивает прочную базу для формирования кадрового потенциала страны – инженеров-лидеров, обладающих технологическими, организационными и бизнес-компетенциями. На базе университета создаются новейшие разработки в области авиа-, ракетно- и двигателестроения, запускаются малые космические аппараты, ведутся передовые исследования в сфере аддитивных технологий, систем управления, IT-решений и других актуальных направлений технологического развития.

Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский университет)

Конкурсная работа  
на конкурс «Авиастроитель года»  
в номинации №4 «За создание новой технологии»

Тема работы: «Технология создания навигационных комплексов с использованием оптико-электронных измерений для перспективных беспилотных летательных аппаратов»

Москва, 2021г.

## Введение

В настоящее время существует большое разнообразие классов беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), нашедших применение при решении различных задач [1]. Основу навигационных комплексов БПЛА составляют, как правило, приемник глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), инерциальная навигационная система (ИНС), системы воздушных сигналов и радиовысотомеры.

Одной из существенных проблем, возникающих при эксплуатации БПЛА, является то, что сигналы ГНСС могут подвергаться помехам естественного (многолучевость, ионосферные, тропосферные и другие задержки [2]) или искусственного (Jamming, Spoofing [3]) происхождения. Широко применяемые на современных воздушных судах аппаратные [4] и автономные алгоритмические методы [5] повышения помехозащищенности приемника ГНСС позволяют осуществлять контроль целостности сигналов ГНСС, но не могут гарантировать наличия корректного навигационного решения в случае существенных искажений сигналов нескольких или всех доступных навигационных спутников. Поэтому, актуальной является задача удержания погрешности определения навигационных параметров в пределах заданного диапазона в условиях искажения или временной потери сигналов ГНСС.

Одним из вариантов решения задачи является включение в состав навигационного комплекса БПЛА автономной системы, способной выступать в качестве корректора ИНС. Такой системой может быть оптико-электронная система (ОЭС) - закрепленная на фюзеляже видеокамера (или несколько видеокамер) и средства обработки видеоизображения. Например, обзорно-навигационная ОЭС разработки АО «КТ-Беспилотные системы» (Рис. 1).



Рисунок 1. ОЭС - Обзорно-Навигационная

На сегодняшний день широкое распространение, в том числе для решения задач навигации по видеоизображению, получили нейросети [6-10]. К преимуществам нейросетевого подхода можно отнести устойчивость нейронной сети к изменению освещенности и

искажений изображения, а также при корректном обучении способность к обобщению (т.е. принятию корректного решения в ситуациях, которые в явном виде не присутствовали в обучающей выборке). Однако, нейросетевой подход требует цикла обучения. При этом требуется обучающая выборка с размеченными топографическими слоями, которые формируются человеком. Формирование обучающей выборки, которая включает в себя различные ландшафтные зоны (горную местность, водоемы, населенные пункты) - это трудоемкий процесс. Наиболее простыми для обучения являются речные и дорожные слои, однако в таком случае происходит потеря контрастных точек, которыми могут являться разрушенные дома, небольшие сооружения нестандартной формы, особенности ландшафта (перепад местности) и т.д. Также к особенностям нейросетевого подхода следует отнести необходимость использования спецвычислителей.

Другим подходом может быть использование методов комплексной обработки навигационной информации (КОИ). Например, рассматриваемый метод и синтезированные на его основе алгоритмы КОИ от ИНС и ОЭС на базе дискретного оптимального фильтра Калмана, построенного по жесткосвязанной схеме комплексирования. При этом к КОИ предъявляются следующие требования:

- должна обеспечиваться оценка не только погрешностей навигационных параметров, но и оценка погрешностей определения проекций путевой скорости, углов ориентации, а также параметров модели погрешностей инерциальных датчиков;

- должна поддерживаться возможность работы с использованием заранее полученной модели окружающей среды (карты подстилающей поверхности, трехмерной модели помещений и т.д.), с построением модели среды, а также поддерживаться комбинированный режим;

- синтезируемые на основе метода алгоритмы должны производить расчеты в реальном времени с частотой до 10 Гц, при этом для расчетов не должны требоваться вычислители с аппаратной поддержкой векторных/матричных операций. Это позволит использовать такие алгоритмы на БПЛА с небольшими мощностями бортовых вычислителей (например, на основе промышленных микроконтроллеров), и в том числе, для БПЛА классов mini и micro.

Методы КОИ ИНС и ОЭС в настоящее время развиваются быстрыми темпами. Так, в работе [11] приводится широкий обзор актуальных (с 2007 года) подходов к построению оптико-инерциальных НК роботизированных объектов, показаны перспективы их развития. При этом, алгоритмы одновременной навигации и картирования изначально подразумевают работу в статической среде. Поэтому, одним из основных направлений их дальнейшего развития является решение задачи идентификации и фильтрации измерений,

связанных с динамическими объектами. Так, в работе [12] приводится обзор ряда методов, направленных на распознавание подвижных объектов на видеоизображении и отбрасывание соответствующих измерений. Большинство из этих методов имеет ряд ограничений:

- используемые для реализации подобных методов нейросетевые алгоритмы с трудом поддаются формализации и не всегда подходят для применения на контроллерах общего назначения;

- эти же алгоритмы направлены, как правило, на распознавание ряда конкретных объектов (автомобили, люди и т.п.). Это снижает возможность универсализации алгоритмов и требует наличия стадии «предполетной» подготовки;

- исключение большого числа измерений негативно сказывается на устойчивости алгоритмов, может приводить к ухудшению работы системы или расхождению навигационного решения.

Предполагается, что разрабатываемая технология позволит создать оптико-инерциальный навигационный комплекс БПЛА, лишенный указанных ограничений.

### Алгоритм работы ОЭС в режиме корректора ИНС

Принцип работы автономного режима навигационного комплекса с использованием ОЭС как корректора ИНС представлен на Рис.2, Рис.3.

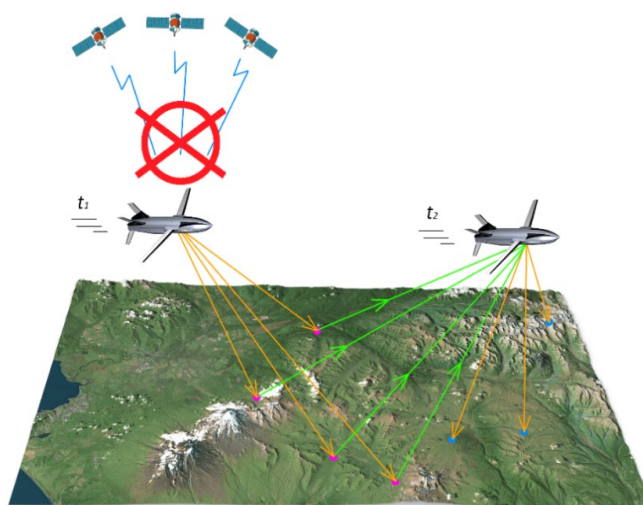


Рисунок 2. ОЭС как корректор ИНС

На видеоизображении земной поверхности, получаемом ОЭС, как правило, содержится множество характерных точек (далее - опорные точки). Выбор и отслеживание этих точек осуществляется специальными алгоритмами – детекторами и дескрипторами. На момент времени  $t_0$  при наличии информации о координатах и углах ориентации связанной с камерой системы координат относительно какой-либо общеземной системы координат (ОСК) возможно вычислить координаты идентифицируемых на изображении с камеры

опорных точек в используемой ОСК. Далее, на основе измерений ИНС может быть построен прогноз о положении опорных точек на видеокадре для следующего момента времени  $t_1$ . В разнице между фактическим и прогнозируемым положением точки в момент времени  $t_1$  содержатся ошибки ИНС, которые накопились за время  $t_1 - t_0$ . Оценки этих ошибок могут быть использованы для коррекции показаний ИНС.

В основе алгоритма работы ОЭС лежит уравнение, используемое в фотограмметрии, которое позволяет вычислять координаты опорных точек в требуемой системе координат по координатам на видеокадре [13]:

$$\bar{P} = \bar{S} + N \cdot A \cdot \bar{P}', \quad (1)$$

где  $\bar{P}$  – вектор координат опорной точки;  $\bar{S}$  – вектор координат камеры;  $N$  – масштабный коэффициент;  $A$  – матрица поворота;  $\bar{P}'$  – координаты опорной точки на плоскости видеоизображения.

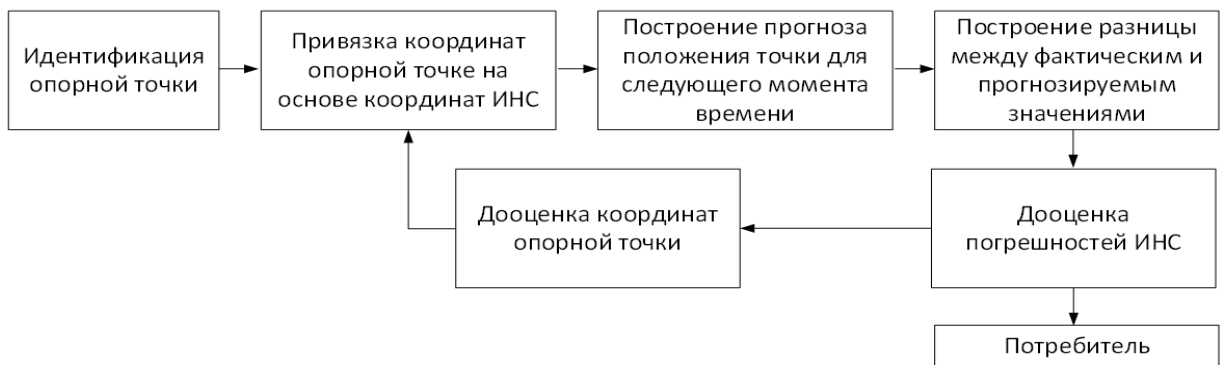


Рисунок 3. Принцип работы ОЭС в качестве корректора ИНС

Уравнения (1) позволяет вычислять положение опорной точки в ОСК. Для построения прогноза положения опорной точки на видеокадре используется уравнение, обратное уравнению (1).

Матрица поворота  $A$  позволяет перейти из связанной с камерой системы координат в ОСК так, как показано на Рис.4, и является произведением нескольких матриц поворота.

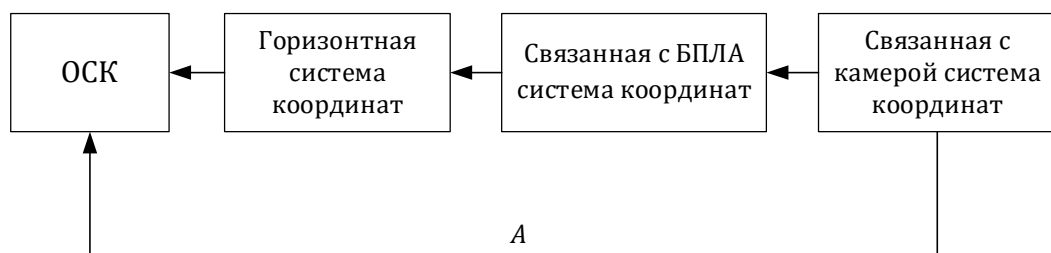


Рисунок 4. Схема построения матрицы поворота

## Комплексная обработка навигационной информации

На Рис. 5 приводится структура горизонтальных каналов алгоритмов КОИ ИНС, приемника ГНСС (когда сигналы ГНСС доступны) и ОЭС, построенная на основе оптимального фильтра Калмана. Алгоритм КОИ построен по жестко связанной схеме комплексования, где в качестве корректирующей информации используются измерения корректоров, а не навигационное решение от них.

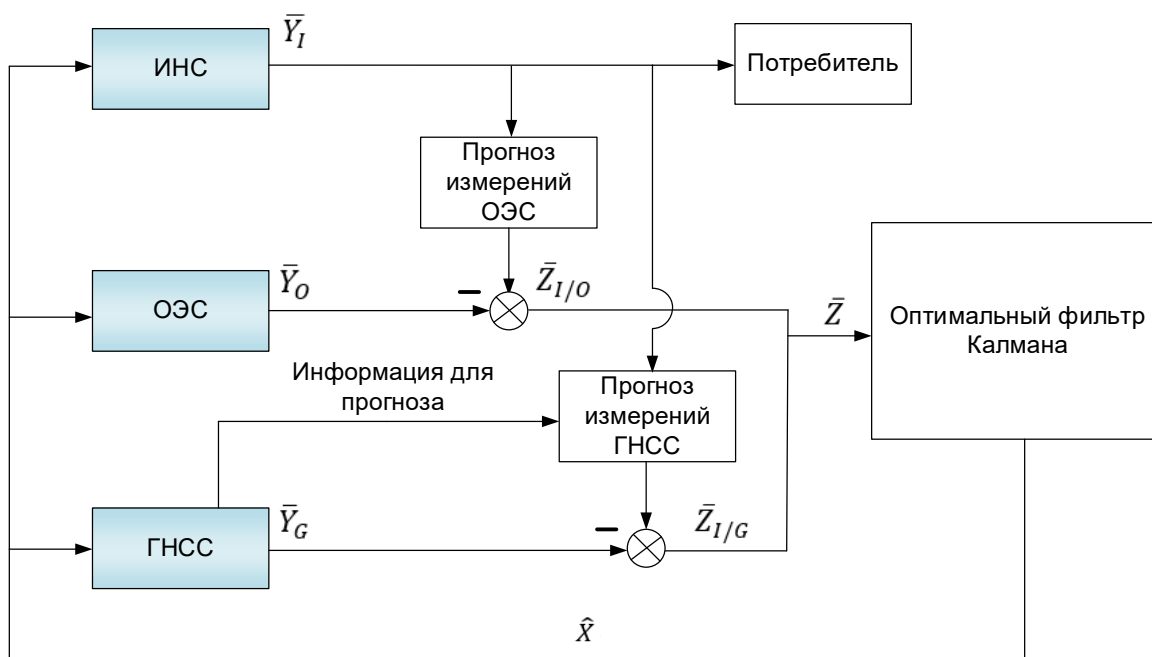


Рисунок 5. Структурная схема КОИ

На рисунке 3  $\bar{Y}_I = \{\lambda^I, \varphi^I, V_e^I, V_n^I, \gamma^I, \psi^I, \vartheta^I\}$  – вектор выходных параметров ИНС;  $\lambda^I, \varphi^I$  – долгота и широта самолета по показаниям ИНС;  $V_e^I, V_n^I$  – проекции путевой скорости самолета на восточную и северную соответственно по показаниям ИНС;  $\gamma^I, \psi^I, \vartheta^I$  – углы крена, рысканья и тангажа БПЛА соответственно по показаниям ИНС.

$\bar{Y}_G = \{\rho_1^G, \rho_2^G, \dots, \rho_m^G, \dot{\rho}_1^G, \dot{\rho}_2^G, \dots, \dot{\rho}_m^G\}$  – вектор выходных параметров ГНСС;  $\rho_1^G, \rho_2^G, \dots, \rho_m^G$  – псевдодальности для рабочего созвездия;  $\dot{\rho}_1^G, \dot{\rho}_2^G, \dots, \dot{\rho}_m^G$  – псевдоскорости для рабочего созвездия;  $m$  – количество спутников рабочего созвездия.

$\bar{Y}_O = \{P_{1x'}^O, P_{1y'}^O, P_{2x'}^O, P_{2y'}^O, \dots, P_{nx'}^O, P_{ny'}^O\}$  – вектор выходных параметров ОЭС;  $P_{1x'}^O, P_{1y'}^O, P_{2x'}^O, P_{2y'}^O, \dots, P_{nx'}^O, P_{ny'}^O$  – координаты опорных точек в связанной с камерой системы координат (пересчет из системы координат видеокadra в связанную с камеру систему координат осуществляется поворотом осей координат и пересчетом из пикселей в метры через масштабный коэффициент);  $n$  – количество используемых опорных точек.



$\bar{Z} = \left\{ \begin{array}{l} \bar{Z}_{I/G}, \\ 2m \times 1 \end{array} \quad \begin{array}{l} \bar{Z}_{I/O}, \\ 3n \times 1 \end{array} \right\}$  – вектор измерений системы.

$\bar{Z}_{I/G} = \left[ \begin{array}{cccc} \{\rho_1^I - \rho_1^G & \rho_2^I - \rho_2^G & \dots & \rho_m^I - \rho_m^G\} \\ \{\dot{\rho}_1^I - \dot{\rho}_1^G & \dot{\rho}_2^I - \dot{\rho}_2^G & \dots & \dot{\rho}_m^I - \dot{\rho}_m^G\} \end{array} \right]; \rho_1^I \quad \rho_2^I \quad \dots \quad \rho_m^I$  – прогнозируемые значения псевдодальностей;  $\dot{\rho}_1^I \quad \dot{\rho}_2^I \quad \dots \quad \dot{\rho}_m^I$  – прогнозируемые значения псевдоскоростей.

$\bar{Z}_{I/O} = [P_{1x'}^I - P_{1x'}^O \quad P_{1y'}^I - P_{1y'}^O \quad \dots \quad P_{nx'}^I - P_{nx'}^O \quad P_{ny'}^I - P_{ny'}^O];$

$P_{1x'}^O \quad P_{1y'}^O \quad P_{2x'}^O \quad P_{2y'}^O \quad \dots \quad P_{nx'}^O \quad P_{ny'}^O$  – прогнозируемые координаты опорных точек на плоскости видеокadra.

$\hat{X}$  – вектор оценок погрешностей системы. Строится на основании принятой модели погрешностей измерителей.

Отсутствующие на Рис.5 параметры вертикального канала (высота, вертикальная скорость) поступают от внешних источников.

### Математические модели погрешностей измерителей

Так как в качестве оценщика погрешностей измерителей предлагается использовать алгоритм линейного фильтра Калмана, уравнение динамики системы и уравнение измерений имеют вид:

$$\begin{aligned} \dot{\bar{X}} &= F \cdot \bar{X} + B \cdot \bar{U} + G \cdot \bar{W}, \\ \bar{Z} &= H \cdot \bar{X} + \bar{V}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\bar{X}$  – вектор состояния системы;  $F$  – матрица динамики системы;  $B$  – матрица управления;  $\bar{U}$  – вектор управляющих сигналов;  $G$  – матрица шумов системы;  $\bar{W}$  – вектор шумов системы;  $\bar{Z}$  – вектор измерений;  $H$  – матрица связи вектора состояния и вектора измерений;  $\bar{V}$  – вектор шумов измерений.

Применяемая модель погрешностей двухканальной ИНС приводится в [8]. В этом случае, вектор состояния модели погрешностей ИНС имеет вид:

$$\bar{X}_I^T = \left\{ \begin{array}{l} x_1, x_2, x_3, x_4, \alpha, \beta, \gamma, \Delta\Omega_x, \Delta\Omega_y, \Delta\Omega_z, \Delta K_{\Omega_x}, \Delta K_{\Omega_y}, \Delta K_{\Omega_z}, \Delta n_x, \Delta n_y, \Delta n_z, \\ \Delta K_{n_x}, \Delta K_{n_y}, \Delta K_{n_z} \end{array} \right\} \quad (3)$$

где  $x_1, x_2$  – ошибки в определении координат по долготе и широте, соответственно, выраженные в метрах;  $x_3, x_4$  – ошибки в определении проекций вектора путевой скорости в направлении на восток и на север, соответственно;  $\Delta\Omega_x, \Delta\Omega_y, \Delta\Omega_z$  – проекции постоянных составляющих погрешностей датчиков угловых скоростей (ДУС) на оси связанной с БПЛА

системы координат;  $\Delta K_{\Omega X}, \Delta K_{\Omega Y}, \Delta K_{\Omega Z}$  – ошибки масштабных коэффициентов ДУС;  $\Delta n_x, \Delta n_y, \Delta n_z$  – постоянные составляющие ошибок акселерометров в проекции на оси связанной с БПЛА системы координат;  $\Delta K_{n_x}, \Delta K_{n_y}, \Delta K_{n_z}$  – ошибки масштабных коэффициентов акселерометров;  $\alpha, \beta, \gamma$  – ошибки ориентации вычисленного ИНС трехгранника относительно базового, эти ошибки связаны с ошибками ИНС в определении углов крена, рысканья и тангажа следующим образом:

$$\begin{bmatrix} \delta\psi \\ \delta v \\ \delta\gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \psi \tan v & \cos \psi \tan v & -1 \\ \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi / \cos v & \cos \psi / \cos v & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix}$$

где  $\psi, v, \gamma$  – идеальные значения текущих углов рысканья, тангажа и крена;  $\delta\psi, \delta v, \delta\gamma$  – погрешности определения соответствующих углов.

Вектор состояния, включающий в себя погрешности ГНСС и входящий в вектор состояния системы имеет вид:

$$\bar{X}_G^T = [\delta\rho_{\Delta\tau}^C, \delta\dot{\rho}_{\Delta\tau}^C], \quad (4)$$

где  $\delta\rho_{\Delta\tau}^C$  – ошибки дальности, вызванные уходом начальной фазы задающего генератора;

$\delta\dot{\rho}_{\Delta\tau}^C$  – ошибки определения радиальной скорости, вызванной отличием от номинальной частоты генератора приёмника.

Существуют различные способы представления инструментальных ошибок ОЭС, применяемые в зависимости от типов задач и, как следствие, отличающиеся физической природой происхождения погрешностей. Обобщая, можно выделить низкочастотную и высокочастотную составляющие инструментальных ошибок оптической системы. Однако, при формировании вектора измерений  $\bar{Z}_{I/O}$  низкочастотными составляющими можно пренебречь, т.к. они имеются и в прогнозируемых координатах опорных точек на видеоизображении, и в привязанных координатах точек в ОСК. Высокочастотную составляющую погрешности ОЭС можно представить в виде несмещенного белого шума с известной интенсивностью.

С учетом перечисленных допущений была получена математическая модель погрешностей ОЭС, построенная на основе уравнения (1), включающая в себя параметры математической модели погрешностей ИНС:

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} \delta P_{x'l}^I \\ \delta P_{y'l}^I \end{bmatrix} &= \frac{1}{N} A^T \begin{bmatrix} \delta R_{1l}^O - \delta R_1^I \\ \delta R_{2l}^O - \delta R_2^I \\ \delta R_{2l}^O - \delta R_3^I \end{bmatrix} + \frac{1}{N} M^T \begin{bmatrix} 0 & \alpha & -\beta \\ -\alpha & 0 & \gamma \\ \beta & -\gamma & 0 \end{bmatrix}^T C^T C_1 \begin{bmatrix} \delta R_{1l}^O - \delta R_1^I \\ \delta R_{2l}^O - \delta R_2^I \\ \delta R_{2l}^O - \delta R_3^I \end{bmatrix} \\
&+ \frac{1}{N} M^T \begin{bmatrix} 0 & \alpha_1 & -\beta_1 \\ -\alpha_1 & 0 & \gamma_1 \\ \beta_1 & -\gamma_1 & 0 \end{bmatrix}^T C^T C_1 \begin{bmatrix} \delta R_{1l}^O - \delta R_1^I \\ \delta R_{2l}^O - \delta R_2^I \\ \delta R_{2l}^O - \delta R_3^I \end{bmatrix} \\
&+ (-1) \frac{1}{N^2} A^T \begin{bmatrix} \delta R_{1l}^O - \delta R_1^I \\ \delta R_{2l}^O - \delta R_2^I \\ \delta R_{2l}^O - \delta R_3^I \end{bmatrix} \delta N,
\end{aligned}$$

где  $\delta P_{x'l}^I, \delta P_{y'l}^I$  – погрешность прогноза положения опорной точки в связанной с камерой системе координат;  $\delta R_{1l}^O, \delta R_{2l}^O, \delta R_{3l}^O$  – погрешность привязки координаты опорной точки в ОСК при инициализации, вызванная априорной ошибкой ИНС;  $\delta R_1^I, \delta R_2^I, \delta R_3^I$  – погрешность ИНС в определении координат в ОСК;  $\delta N$  – ошибка масштабного коэффициента;  $l$  – номер опорной точки;  $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$  – погрешности ориентации вычисленного трехгранника относительно базового, связанные с ошибками  $x_1, x_2$ ;  $M$  – матрица поворота из связанной с камерой системы координат в связанную с БПЛА систему координат;  $C$  – матрица поворота из связанной с БПЛА системы координат в горизонтную;  $C_1$  – матрица поворота из горизонтной системы координат в ОСК (матрицы  $M, C, C_1$  используются при построении матрицы  $A$ );  $\delta N$  – ошибка масштабного коэффициента.

Вектор состояния, включающий в себя погрешности ОЭС, имеет вид:

$$\bar{X}_0^T = [\delta R_{11}^O, \delta R_{21}^O, \delta R_{31}^O, \dots, \delta R_{1n}^O, \delta R_{2n}^O, \delta R_{3n}^O], \quad (5)$$

где  $n$  – количество используемых опорных точек.

Таким образом, вектор состояния системы (1) с учетом (3), (4), (5) примет вид:

$$\bar{X}^T = \left\{ \begin{array}{l} x_1, x_2, x_3, x_4, \alpha, \beta, \gamma, \Delta\Omega_X, \Delta\Omega_Y, \Delta\Omega_Z, \Delta K_{\Omega_X}, \Delta K_{\Omega_Y}, \Delta K_{\Omega_Z}, \Delta n_X, \Delta n_Y, \Delta n_Z, \\ \Delta K_{n_X}, \Delta K_{n_Y}, \Delta K_{n_Z} \\ \delta\rho_{\Delta\tau}^C, \delta\dot{\rho}_{\Delta\tau}^C, \\ \delta R_{11}^O, \delta R_{21}^O, \delta R_{31}^O, \dots, \delta R_{1n}^O, \delta R_{2n}^O, \delta R_{3n}^O \end{array} \right\} \quad (6)$$

## Результаты моделирования работы интегрированных навигационных систем, использующих синтезированные алгоритмы.

Имитационное моделирование синтезированных на основе метода алгоритмов проводилось с учетом характеристик навигационных комплексов различных объектов (летабельные аппараты разных классов). С целью повышения достоверности результатов, имитационные исследования проводились, в том числе, с применением среды AirSim [14] (Рис. 6).



Рисунок 6. Пример моделирования в AirSim

AirSim использует бесплатный игровой движок Unreal Engine 4, что позволяет с высокой детализацией моделировать изображение подстилающей поверхности и дает возможность исследовать влияние различных погодных условий на работу оптической системы, что недоступно в программах, использующих лишь спутниковые снимки. Помимо этого, наличие открытого исходного кода позволяет выполнять настройку параметров камеры и математической модели динамики БПЛА.

В ходе моделирования в AirSim сравнивались различные алгоритмы детекторов и дескрипторов, применяемые для поиска и отслеживания ОТ на кадрах видеоизображения. Например, на Рис.7 приведены результаты работы детекторов ORB (слева) и SIFT (справа) на трех последовательных кадрах.

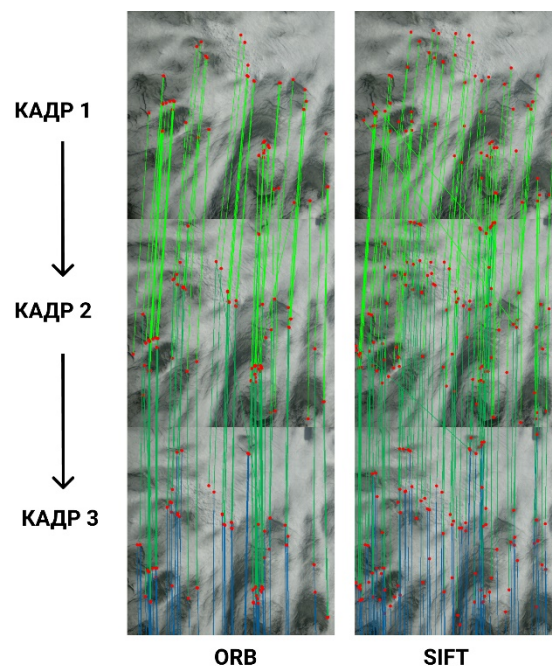


Рисунок 7. Результат работы детекторов

Результаты имитационного моделирования алгоритмов комплексных навигационных систем, включающих в себя ИНС различных классов точности, при одинаковых условиях начальной выставки и полета и без учета погрешностей алгоритмов детекторов приведены на Рис. 8.

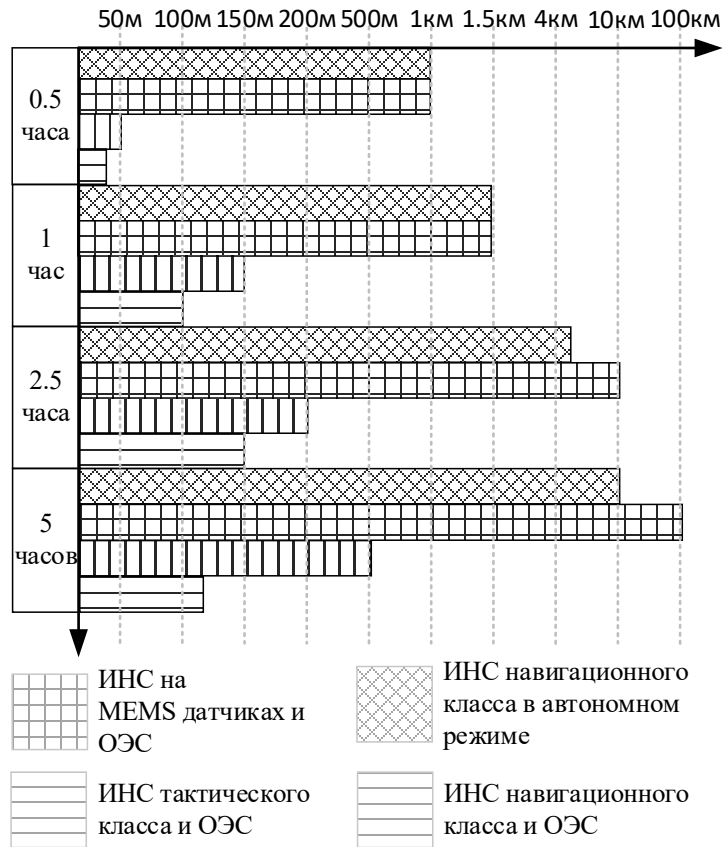


Рисунок 8. Результаты имитационного моделирования для ИНС различного класса

В таблице 1 приводится сравнение результатов моделирования в процентах от пройденного пути.

ТАБЛИЦА 1 ПОГРЕШНОСТИ КОМПЛЕКСА В ПРОЦЕНТАХ ОТ ПРОЙДЕННОГО ПУТИ

Тип ИНС	Погрешность, % от пройденного пути
Навигационного класса	0.02
Тактического класса	0.1
На MEMS датчиках	20

## Заключение

В 2020 году были получены следующие результаты:

1) Разработан метод синтеза алгоритмов комплексной обработки навигационной информации от инерциальных, спутниковых и оптико-электронных систем для беспилотных летательных аппаратов различных классов и назначений;

2) Синтезированы алгоритмы комплексной обработки навигационной информации на основе расширенного фильтра Калмана. Предложены математические модели погрешностей измерителей, входящих в навигационный комплекс;

3) Разработаны методики и стендовое программно-математическое обеспечение для проведения имитационного и полунатурного моделирования работы интегрированных навигационных систем, использующих синтезированные алгоритмы. Имитационное моделирование показало принципиальную работоспособность комплекса. Так по результатам моделирования погрешность определения координат не превысила 0.3% от пройденного пути при использовании инерциальной навигационной системы тактического класса точности.

В 2021 году планируется:

1) Реализовать алгоритмы и программное обеспечение контроля целостности измерений;

2) Внедрить программное обеспечение комплексной оптико-инерциальной навигационной системы, провести ее натурные испытания в составе беспилотного летательного аппарата.

*Перечень публикаций по результатам работы:*

1. Рябинкин, М. С. Комплексная оптико-инерциальная навигационная система для беспилотного летательного аппарата большой продолжительности полёта / М. С. Рябинкин, А. В. Савкин // Гагаринские чтения - 2020 : Сборник тезисов докладов, Москва, 27 декабря 2019 года – 17 2020 года. – Москва: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2020. – С. 262-263.

2. Савкин, А. В. Навигационный комплекс с использованием оптико-электронных измерений для перспективных беспилотных летательных аппаратов / А. В. Савкин, М. С. Рябинкин // Навигация и управление движением : Материалы XXII конференции молодых ученых с международным участием, Санкт-Петербург, 17–20 марта 2020 года. – Санкт-Петербург: "Концерн "Центральный научно-исследовательский институт "Электроприбор", 2020. – С. 187-188.

3. Алгоритмическое обеспечение навигационного комплекса с использованием оптико-электронных измерений для перспективных беспилотных летательных аппаратов / А. В. Савкин, Д. А. Антонов, Л. А. Колганов [и др.] // 19-я Международная конференция «Авиация и космонавтика» : Тезисы 19-ой Международной конференции, Москва, 23–27 ноября 2020 года. – Москва, : Издательство "Перо", 2020. – С. 305-306.

4. Метод автономной навигации на базе инерциальных и оптико-электронных измерений для беспилотных летательных аппаратов различных классов / Н. Н. Долженков, Д. А. Антонов, А. В. Савкин, Д. М. Дрягин // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. – 2020. – № 12. – С. 26-35.

5. A Savkin, D Antonov, L Kolganov, M Ryabinkin and E Chekhov. UAV navigation using opto-electronic and inertial means in GNSS-denied environment. Journal of Physics: Conference Series, Volume 1925, 19th International Conference "Aviation and Cosmonautics" (AviaSpace-2020), 23-27 November 2020, Moscow, Russian Federation.

#### **Источники**

1. Корченко А.Г., Ильяш О.С. Обобщенная классификация летательных аппаратов. Сборник научных трудов Харьковского университета воздушных сил, выпуск 4(33), 2012.

2. Емельянцева Г.И., Степанов А.П. под. ред. акад. РАН В.Г. Пешехонова. Интегрированные инерциально-спутниковые системы ориентации и навигации. – СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2016.

3. Дао Х. К., Ступин Д. Д., Шевченко Р. А. Принципы обнаружения преднамеренных помех, воздействующую на аппаратуру потребителей спутниковых радионавигационных систем. Журнал радиоэлектроники, ISSN 1684-1719, N5, 2019 DOI 10.30898/1684-1719.2019.5.14.

4. Groves P. D., Jiang Z., Rudi M, Strode P. “A Portfolio Approach to NLOS and Multipath Mitigation in Dense Urban Areas”, Proc. ION GNSS, pages 3231-3247, September 16 - 20, 2013 Nashville Convention Center, Nashville, Tennessee, USA.

5. Charbonnieras C., Israel J., Ries L. A New GNSS Integrity Monitoring Based on Channels Joint Characterization, 2016 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), pages 422-430, April 11 - 14, 2016 Hyatt Regency Hotel, Savannah, GA, USA.

6. Федюлин А.М., Горбацевич В.С., Осадчук А.В. Концептуальный подход к созданию наземной инфраструктуры машинного обучения систем технического зрения для беспилотной авиации. Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2020. №11. С. 32-38.

7. Ткаченко А.П., Федулин А.М., Бикмаев Р.Р., Садеков Р.Н. Алгоритм автономной коррекции навигационной системы БПЛА на основе распознавания дорожной и речной сети. *Гирроскопия и навигация*. 2020. Т. 28 №3 (110). С.32-42.
8. Долженков Н.Н., Федулин А.М., Дрягин Д.М. Пути повышения автономности крупноразмерных беспилотных авиационных систем двойного назначения. *Полет. Общероссийский научно-технический журнал*. 2020. №9. С. 3-11.
9. Федулин А.М., Дрягин Д.М. Основные подходы к повышению автономности крупноразмерных беспилотных авиационных систем двойного назначения. *Наноиндустрия*. 2020. Т. 13. № S4 (99). С 575-576.
10. Федулин А.М., Садеков Р.Н. Алгоритм навигации беспилотных летательных аппаратов с учетом местоположения средств противовоздушной обороны. *Известия Института инженерной физики*. 2020. №3 (57). С. 79-84.
11. Chen Chang, Hua Zhu, Menggang Li, Shaoze You. A Review of Visual-Inertial Simultaneous Localization and Mapping from Filtering-Based and Optimization-Based Perspectives. August 2018. *Robotics* 7(3):45.
12. Bai, Xiwei, Zhang, Bo, Wen, Weisong, Hsu, Li-Ta, Li, Huiyun, "Perception-aided Visual-Inertial Integrated Positioning in Dynamic Urban Areas," 2020 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), Portland, Oregon, April 2020, pp. 1563-1571.
13. Краснопевцев Б.В. *Фотограмметрия*. – М.: УПП «Репрография» МИИГАиК, 2008.
14. S. Shah, D. Dey, C. Lovett, A. Kapoor. *Airsim: High-fidelity visual and physical simulation for autonomous vehicles*. In *field and service robotics*; Springer: Cham, Switzerland, 2018; pp. 621–635.