

Зяц Татьяна Васильевна, студент
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения
T. V. Zayats, Student,
St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

Коврегин Валерий Николаевич,
кандидат технических наук, доцент,
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения
V. N. Kovregin,
PhD, Associate professor,
St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

**СИНТЕЗ МОДЕЛЕЙ ОШИБОК ОРИЕНТАЦИИ
В БЕСПЛАТФОРМЕННОЙ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ
МИКРОНАВИГАЦИИ АВИАЦИОННОГО РАДАРА ПРИ
ПОГРЕШНОСТЯХ ЕЕ УСТАНОВКИ НА НОСИТЕЛЕ
SYNTHESIS OF ATTITUDE ERROR MODELS IN A STRAPDOWN
INERTIAL MICRONAVIGATION SYSTEM OF AN AVIATION RADAR
WITH ERRORS IN ITS INSTALLATION O A CARRIER**

Аннотация: Рассматривается технология моделирования и результаты исследования ошибок углов курса, крена и тангажа летательного аппарата, определяемых по данным бесплатформенной инерциальной системы микронавигации радара при существенных угловых погрешностях при установке инерциальных датчиков на носителе. Представлены модели, программные средства, результаты моделирования. Определены области практического применения и направления развития основных результатов работы на этапах создания и модельного сопровождения бесплатформенных (микро)навигационных систем различного назначения.

Abstract: The paper presents the modeling technology and the results of the study of errors in the heading, roll and pitch angles of the aircraft, determined from the data of the strapdown inertial micronavigation system of the airborne radar with significant angular errors in the installation of inertial sensors on the carrier. Models, software tools, modeling results are presented. The areas of practical application and directions of development of the main results of this work in the creation and model maintenance of strapdown (micro) navigation systems for various purposes are determined.

Ключевые слова: бесплатформенная инерциальная система, угловые ошибки установки и юстировки инерциальных датчиков, модели ошибок ориентации носителя

Keywords: strapdown inertial system, angular errors in the installation of inertial sensors on an object, models of carrier orientation errors

В навигационных комплексах летательных аппаратов (ЛА) и в других бортовых приложениях [1-3] широко применяются бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС). В таких системах блок инерциальных датчиков (БИД) жестко фиксирован на ЛА, т. е. координаты его центра и углы ψ^* , ϑ^* , γ^* (см. рис.1а) ориентации измерительного трехгранника (ИТ) $Ox_{ит}y_{ит}z_{ит}$ в связанной системе координат ЛА (ССК) [4] $OXYZ$ считаются постоянными и известными на уровне точности установки/юстировки БИД на конкретном носителе. Эти углы, а также углы рысканья $\psi_{ит}$, тангажа $\vartheta_{ит}$ и крена $\gamma_{ит}$ [4], определяемые БИНС



для ее ИТ в сопровождающем трехграннике *OENH* навигационной (геодезической) системы координат [5] (СТ), далее совместно используются для определения углов рысканья ψ , тангажа ϑ , крена γ ЛА [4], т.е. углов ориентации ССК в СТ (см. рис.2б).

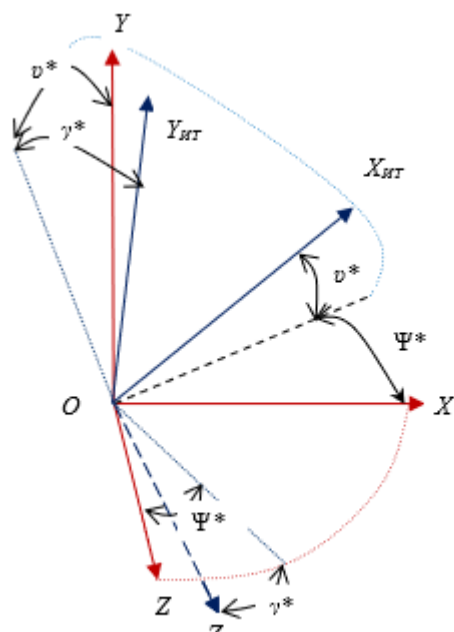


Рисунок 1а – Углы ориентации ИТ в ССК

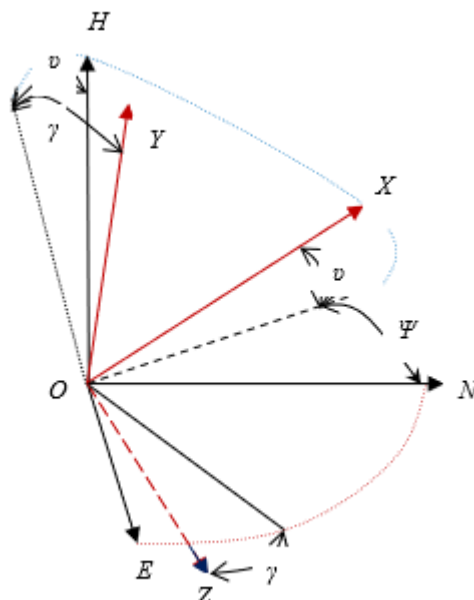


Рисунок 1б – Углы ориентации ССК в СТ

Известно, что при преобразовании проекций вектора из ССК в СТ, например, может быть использована универсальная матрица направляющих косинусов (МНК) $\mathbf{B} = \|b_{ij}\|$ (i – номер строки, j – номер столбца), элементы которой выражаются через искомые углы ψ , v и γ :

$$b_{11} = \cos \psi \cos v; b_{12} = \sin \psi \sin \gamma - \cos \psi \sin v \cos \gamma; b_{13} = \sin \psi \cos \gamma + \cos \psi \sin v \sin \gamma;$$

$$b_{21} = \sin v; b_{22} = \cos v \cos \gamma; b_{23} = -\cos v \sin \gamma;$$

$$b_{31} = -\sin \psi \cos v; b_{32} = \cos \psi \sin \gamma + \sin \psi \sin v \cos \gamma; b_{33} = \cos \psi \cos \gamma - \sin \psi \sin v \sin \gamma,$$

причем при обратном преобразовании (из СТ в ССК) используется МНК \mathbf{B}^T , где T – символ транспонирования матрицы. С другой стороны, $\mathbf{B}^T = \mathbf{B}^* \mathbf{B}_{ИТ}^T$, где $\mathbf{B}_{ИТ}$ и \mathbf{B}^* – МНК для пересчета из ИТ в СТ и из ССК в ИТ, определяемые через углы аналогично МНК \mathbf{B} при соответствующей замене аргументов: $(\psi, v, \gamma) := (\psi_{ИТ}, v_{ИТ}, \gamma_{ИТ})$ для $\mathbf{B}_{ИТ}$ и $(\psi, v, \gamma) := (\psi^*, \vartheta^*, \gamma^*)$ для \mathbf{B}^* . Таким образом, по измеренным БИНС углам ориентации могут быть определены элементы МНК $\mathbf{B}_{ИТ}^T$ (пересчет из СТ в ИТ), по заданным углам ориентации ИТ в ССК определяются МНК \mathbf{B}^* (пересчет из ИТ в ССК), а произведение этих матриц позволяет определить МНК \mathbf{B}^T (из СТ в ССК) и \mathbf{B} (из ССК в СТ). Искомые углы взаимной ориентации ССК и СТ НСК могут, например, выражаться через элементы МНК \mathbf{B} следующим образом:

- **угол рысканья объекта:** $\psi = \arctg(-b_{31}/b_{11}); (1)$

- **тангаж объекта:** $v = \arcsin(b_{21}); (2)$

- **крен объекта:** $\gamma = \arctg(-b_{23}/b_{22}). (3)$

При на различных этапах разработки/сопровождения измерительно-вычислительных комплексов на базе БИНС возникает задача количественной оценки совместного влияния погрешностей $\delta\psi^*$, $\delta\vartheta^*$, $\delta\gamma^*$ углов ψ^* , v^* , γ^* (заданных после установки/юстировки БДИ), и ошибок $\delta\psi_{ИТ}$, $\delta v_{ИТ}$, $\delta\gamma_{ИТ}$ измерений углов $\psi_{ИТ}$, $v_{ИТ}$, $\gamma_{ИТ}$ на итоговые погрешности $\delta\psi$, $\delta\vartheta$, $\delta\gamma$ при определении углов ψ , v , γ ориентации ЛА. Для решения этой задачи необходима разработка математических моделей, адекватно отражающих изменение ошибок ориентации ЛА $\delta\psi$, $\delta\vartheta$,



$\delta\gamma$, их статистических характеристик в зависимости от вариаций измеряемых и/или задаваемых углов ориентации ИТ (в СТ и ССК, соответственно) и статистических характеристик их погрешностей.

Цель работы – синтез аналитических моделей такого типа, их программная реализация, анализ результатов модельных экспериментов, применительно к точностным характеристикам конкретных исследуемых образцов БИНС, методам и средствам их юстировки на носителе. Основной *объект исследования* – специализированные распределенные бесплатформенные инерциальные системы микронавигации/ориентации для фазового центра/диаграммы направленности антенны бортового авиационного радиолокатора (далее – СБИС). Архитектура, варианты исполнения и реализации таких СБИС, например, представлены в работах [1-3,6]. *Предмет исследования* – методы и средства математического моделирования ошибок определения параметров ориентации ЛА в навигационной системе координат по данным СБИС с учетом технологических угловых погрешностей при установке/юстировке ее БДИ на ЛА.

После установки БИНС на конкретном ЛА эти поправки известны на уровне технологической точности монтажа БИД, как правило, недостаточной для выполнения требований к точности определения курса ψ , тангажа ϑ и крена γ ЛА даже при высокой точности БИНС по углам ориентации ее ИТ в сопровождающем трехграннике навигационной (геодезической) системы координат (СТ). Для уточнения угловых поправок для БИНС на каждом ЛА выполняют процедуры инструментальной или аналитической угловой юстировки [2,3 и др.] с различным уровнем их потенциальной точности. При разработке БИНС и комплексных систем с БИНС возникает практическая необходимость в количественных оценках совместного влияния погрешностей юстировки и ошибок угловых измерений БИНС на результирующую точность определения параметров ориентации носителя в СТ. Для получения таких оценок, прежде всего, требуется разработка адекватных математических моделей, отражающих процесс формирования и ошибки углов ориентации ССК в СТ, получаемых на основе измерений по углам ИТ в СТ, искаженных помехами, при неточно заданных углах ИТ в ССК. Синтез таких моделей, их программная реализация и статистическое моделирование ошибок определения углов курса (рысканья) ψ , тангажа ϑ и крена γ носителя – при варьируемой точности измерений и/или юстировочных поправок БИНС – *цель данной работы*. Основной *объект исследования* – специализированная бесплатформенная инерциальная система микронавигации/ориентации фазового центра/диаграммы направленности антенны бортового авиационного радара (далее – СБИС). Типовая архитектура, варианты исполнения и реализации таких СБИС в радарх с синтезируемой апертурой, например, представлена в работах [4-6].

Для уточнения установочных углов БИД на ЛА выполняют процедуры инструментальной или аналитической юстировки БИД [4,5 и др.] с различным уровнем потенциальной точности.

Объект исследования – специализированная бесплатформенная инерциальная система (СБИС) с вынесенным БДИ среднего класса точности в составе распределенной системы микронавигации/ориентации авиационного радара (СМН) [1-3]. Для достижения в СБИС необходимой точности ориентации ССК в СТ: с одной стороны, предъявляются высокие требования по точности юстировки БИД; с другой стороны, при «углубленной» компоновке БИД на ЛА – вблизи фазового центра в антенном блоке РЛС – практически затруднено применение способов высокоточной инструментальной юстировки, требующих установки на корпусе БИД специализированных прецизионных измерителей. Для юстировки БИНС на ЛА уже традиционно применяются аналитические методы, предполагающие: фиксацию ЛА при заданных эталонных углах ориентации ССК в СТ; N сеансов начальной выставки БИНС



гирокомпасированием (НВ) в режиме наилучшей точности; вычисление и статистическое оценивание искомых углов ориентации ИТ в ССК – по выборке из N результатов НВ и их отклонений от эталонных значений. Для БИНС высокого класса точности погрешности аналитической юстировки, как правило, не превышают нескольких десятков угловых секунд при $N = (10 \dots 20)$ и общей продолжительности юстировочных работ не менее $(6 \dots 10)$ часов.

Применительно к объекту исследования, вследствие сравнительно низкой точности БИД и, следовательно, точности НВ, для получения сопоставимой с БИНС точности юстировки в СБИС требуется большее число M сеансов НВ. Такая точность юстировки при неравноточных результатах НВ в БИНС и СБИС характеризуется, например, равными среднеквадратическими отклонениями (СКО) для ошибок оценивания $\sigma_{НВ/Н\ БИНС} = \sigma_{НВ/М\ СБИС}$ по результатам N и M сеансов НВ в БИНС и СБИС, соответственно. Тогда, например, при постоянстве СКО ошибок НВ $\sigma_{НВ\ БИНС\ J} = const (J = 1, \dots, N)$, $\sigma_{НВ\ СБИС\ I} = const (I = 1, \dots, M)$, $\sigma_{НВ\ СБИС\ I} = K \sigma_{НВ\ БИНС\ J} (K > 1)$ и оценках в виде среднего значения, требуемое для юстировки БДИ число НВ в СБИС составляет $M = cel \{ (\sigma_{НВ\ СБИС} / \sigma_{НВ\ БИНС})^2 N \} = cel \{ K^2 N \}$, где $cel \{ \cdot \}$ – целая часть числа после его округления в сторону увеличения. Например, если точность СБИС только вдвое уступает точности БИНС ($K=2$), то при $N=20$ для достижения соизмеримой точности юстировки СБИС необходимо уже $M = 4N = 80$ сеансов НВ.

При типовом времени НВ (≈ 10 мин) в процессе юстировочных работ только время накопления данных по НВ в СБИС (13 час 20 мин) в сравнении с БИНС увеличивается на 10 час.

Тогда при сравнительно худшей точности НВ в СБИС, например, при $K=2$ требуется $M = 4N$. Обычно N – это не менее 20 реализаций НВ при времени одной выставки около 10 минут, т. е. в совокупности 3 часа 20 минут. Для СБИС при прочих равных условиях только на реализацию сеансов НВ требуется уже 13 часов 20 минут, что во многих практических случаях является неприемлемым.

В качестве модельного эксперимента по исследованию ошибок ориентации ЛА при неточной угловой юстировке ИИТ разработана программная реализация и описание «калькулятора» ошибок ориентации ЛА при ошибках измерения углов и погрешностях угловой юстировки:

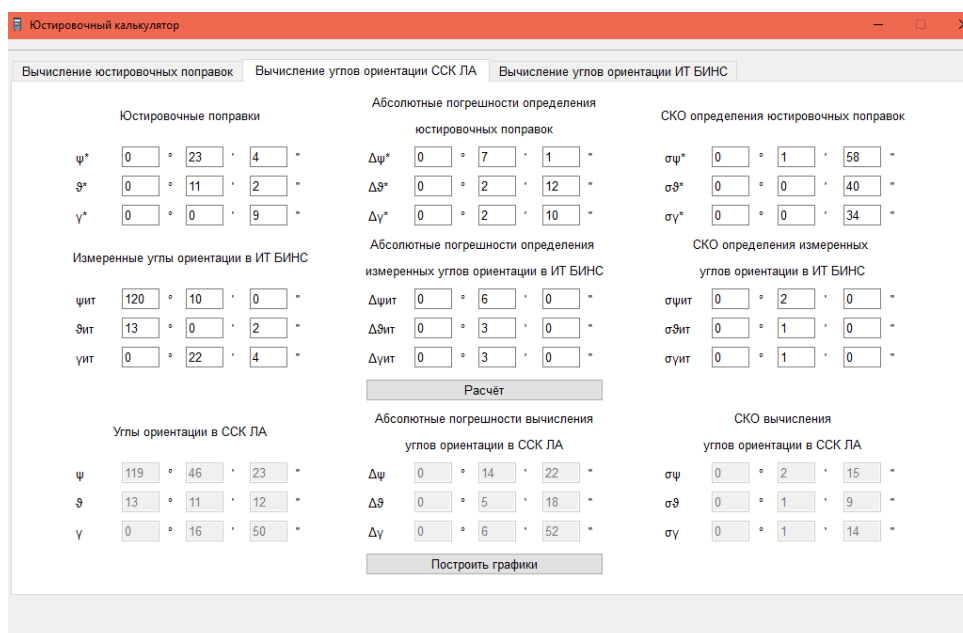


Рисунок 2 – Внешний вид программы



На рисунке 3 представлена модель системы координат для БЧЭ на ЛА, где $ONHE$ – сопровождающий трехгранник навигационной системы координат, $OXYZ$ (зеленый) – измерительный трехгранник БЧЭ, $OXYZ$ (красный) – нормальная система координат.

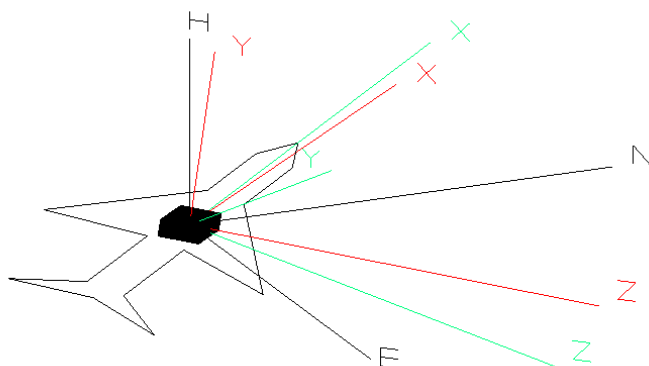


Рисунок 3 – Модель системы координат для БЧЭ на ЛА

Целью данного моделирования является качественно-количественный анализ влияния ошибок определения курса, тангажа и крена на эффективность применения БИНС на ЛА, оценка влияния точности юстировки ИИМ на объекте на результирующую точность ориентации ЛА в СТ.

Результатами моделирования являются графики зависимостей влияния одних параметров установки БИНС на другие согласно предварительному сценарию:

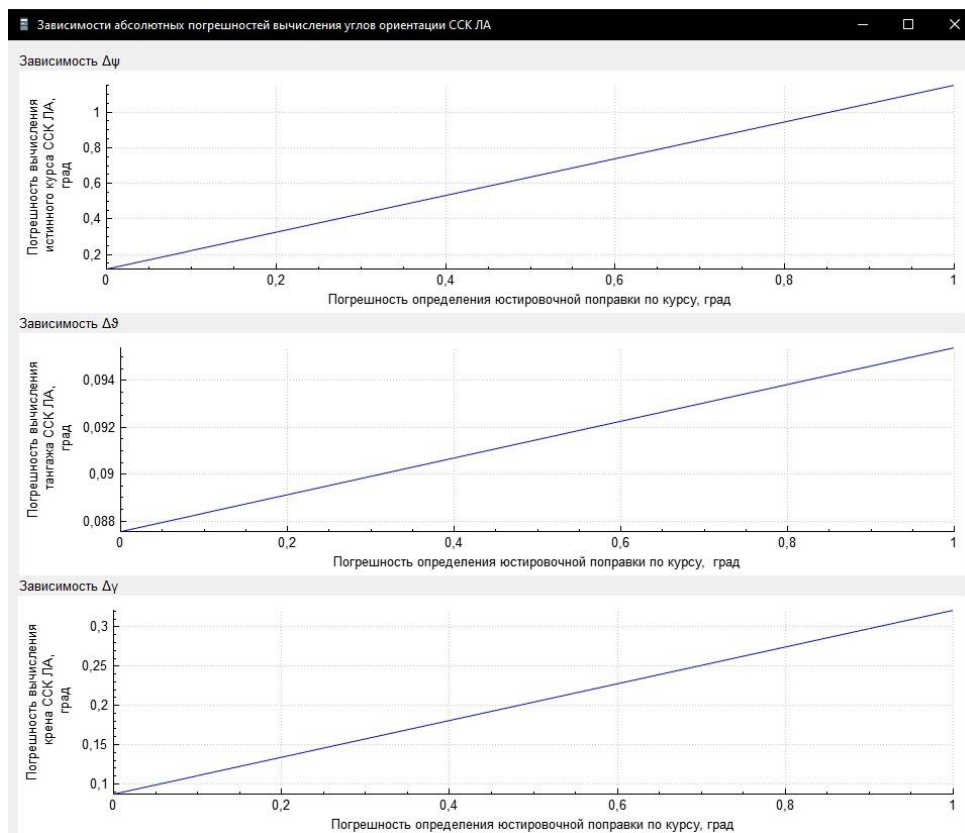


Рисунок 8 – График зависимости $\Delta\psi$, $\Delta\theta$ и $\Delta\gamma$ от $\Delta\psi^*$



Список литературы:

1. Справочник по радиолокации. Под ред. М Скольника, Нью-Йорк, 1970: Пер. с англ. (в четырех томах) / Под общей ред. К, н. Трофимова; том 3. Радиолокационные устройства и системы. /Под ред. А. С. Винницкого. – М.: Сов. радио, 1978. – 528 с.
2. Дудник П. И. Авиационные радиолокационные комплексы и системы/ Кондратенков Г. С., Татарский Б. Г., Ильчук А. Р., Герасимов А. А. // М.: Изд. ВВИА им. проф. Н. Е.
3. Коврегин В.Н., Ковреги́на Г.М. Методы интегрированной дальнометрии в задачах радиолокационного захвата и сопровождения воздушных целей. // Вопросы радиоэлектроники, серия: Радиолокационная техника, вып.1. 2008., С.61-68.
4. Kovregin V, Kovregina G. Adaptive-robust methods for detecting, capturing and tracking hovering, low- and high-speed objects in integrated radar-inertial systems with quasi-continuous radiation. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9470845> (дата обращения: 17.10.2021)
5. Применение цифровой обработки сигналов: Пер. с англ./ Под ред. Э. Опенгейма, пер. под ред. А.М. Рязанцева. – М.: Мир, 1980. – 550 с.
6. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Прикладные задачи теории вероятностей. – 1983. – 416 с.
7. Коврегин В. Н., Ковреги́на Г. М. Способ обнаружения, измерения дальности и скорости низколетящей малоскоростной цели в импульсно-доплеровских радиолокационных станциях при высокой частоте повторения и инвертируемой линейной частотной модуляции. RU 2 697 509 C2, заяв. 25.05.2017, опубл. 15.08.2019.

