

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ,
АВТОМАТИКА И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

УДК 004.023, 004.921 + 06

DOI 10.46973/0201-727X_2023_4_54

*С. В. Соколов, А. В. Костюков, Е. Н. Тищенко*ВЫСОКОТОЧНАЯ ОЦЕНКА НАЧАЛЬНОЙ ОРИЕНТАЦИИ БЕСПИЛОТНОГО
ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПО СПУТНИКОВЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ

Аннотация. Рассматривается задача начальной ориентации беспилотного летательного аппарата (БПЛА) по высокоточным спутниковым измерениям. Решение получено в виде явных зависимостей углов ориентации БПЛА относительно географической системы координат от вторичных спутниковых измерений координат навигационных приемников, расположенных на БПЛА, в геоцентрической системе координат. Приведена численная оценка точности предложенного метода, иллюстрирующая эффективность его практического применения. В результате проведения исследований полученные результаты позволяют говорить о возможности использования предложенного в статье способа для определения начальной ориентации беспилотного летательного аппарата с требуемой для современных БПЛА точностью (определяемой габаритами БПЛА и допустимым временем позиционирования) с минимальными затратами.

Ключевые слова: оценка координат, начальная ориентация, спутниковые измерения, навигационные приемники.

Для цитирования: Соколов, С. В. Высокоточная оценка начальной ориентации беспилотного летательного аппарата по спутниковым измерениям / С. В. Соколов, А. В. Костюков, Е. Н. Тищенко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 4. – С. 54–61. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_4_54.

Введение

Важнейшей задачей навигации беспилотного летательного аппарата (БПЛА) является определение параметров его угловой ориентации в режиме подготовки к полету. На текущий момент в подавляющем большинстве систем навигации для этого используются инерциальные измерители – датчики угловой скорости [1]. Но в результате неизбежного со временем накопления ошибок инерциальных измерений определение с требуемой точностью угловой ориентации БПЛА оказывается возможным только на небольших интервалах времени. В то же время использование высокоточных спутниковых навигационных приемников (СНП), в частности, геодезического класса, позволяет обеспечить ошибки позиционирования объектов в субсантиметровом диапазоне, что позволяет вычислять параметры углового движения с точностью угломерных геодезических систем [2–11]. Подобные вычисления используют для определения углов ориентации БПЛА относительно выбранной системы координат (географической или геоцентрической) фазовые измерения спутниковой группировки [12–16].

Основными очевидными недостатками здесь являются необходимость решения проблемы неоднозначности фазовых измерений, связанный с ней значительный объем вычислительных затрат и критичное влияние шумов фазовых измерений на общую точность оценки углов начальной ориентации. Но тем не менее их использование обеспечивает наибольшую на текущий момент точность позиционирования объектов. Далее с помощью спутниковых навигационных измерений определить ориентацию БПЛА можно или по предварительно найденным базовым векторам, или при непосредственных измерениях его углов ориентации [3, 4, 9–11, 17, 18].

Первый метод основан на оценке матрицы преобразования координат и требует существенных вычислительных затрат, труднореализуемых в бортовых вычислителях БПЛА.

Второй метод определения ориентации позволяет отказаться от оценки матрицы преобразования координат и сразу перейти к оценке углов Эйлера, фиксируя текущую ориентацию БПЛА в выбранной системе координат. Но параметризация через углы Эйлера приводит к нелинейной задаче разрешения неоднозначности одномоментных измерений, для решения которой в настоящее время отсутствуют эффективные вычислительные алгоритмы [11]. Среди альтернативных методов

определения угловой ориентации можно отметить метод, состоящий в вычислении разностей фазовых измерений с последующим их комплексированием с инерциальными измерениями и обработкой общего вектора измерений фильтром Калмана [19].

Недостатки здесь очевидны – значительные вычислительные затраты, обусловленные двухэтапной процедурой обработки спутниковых измерений, аппаратурные затраты в силу необходимости использования инерциальных измерителей и низкая точность, обусловленная погрешностями инерциальных чувствительных элементов (для которых, в свою очередь, необходима своя начальная ориентация).

В связи с этим возникает задача снижения вычислительной нагрузки на бортовые вычислители БПЛА и обеспечения высокой точности определения начальной ориентации БПЛА при использовании спутниковых измерений.

Постановка задачи

Метод, обеспечивающий высокую точность определения начальной ориентации БПЛА по спутниковым измерениям, состоит в том, что по показаниям размещенных на жестком основании двух спутниковых навигационных приемников (СНП), один из которых расположен в центре масс БПЛА, а другой – на известном расстоянии от него в направлении оси крена, в режиме высокоточного позиционирования первоначально определяются координаты обоих СНП в геоцентрической системе координат. Далее по значениям геоцентрических координат СНП определяется угол тангажа БПЛА, после чего определяется его угол азимута. После определения данных углов основание БПЛА с размещенными на нем СНП выставляется в направлении оси тангажа и по показаниям второго СНП определяются его новые координаты, по которым определяется угол крена.

Для более детального описания существа метода определения начальной ориентации используем следующие системы координат (СК) (рисунок):

– геоцентрическую СК (ГцСК) $O\xi\eta\zeta$ с началом в центре Земли, ось $O\xi$ которой лежит в плоскости нулевого меридиана, ось $O\eta$ совпадает с осью вращения Земли, а ось $O\zeta$ дополняет систему координат до правой,

– географическую СК (ГСК) $OXYZ$ с началом в центре масс (ЦМ) БПЛА, ось OY которой лежит в плоскости местного меридиана и направлена на Север, ось OZ направлена от центра Земли, а ось OX дополняет систему координат до правой (на рисунке обозначены: φ – широта, λ – долгота ЦМ БПЛА),

– приборную СК (ПСК) $Oxyz$ с началом в ЦМ БПЛА, оси которой при отсутствии углов разворота относительно ГСК совпадают с соответствующими (одноименными) осями ГСК.

В рассматриваемом методе углы начальной ориентации ПСК, связанной с БПЛА, определяются по показаниям размещенных на основании БПЛА двух спутниковых навигационных приемников (СНП), один из которых расположен в ЦМ БПЛА, а другой – на известном расстоянии L от него в направлении оси Ox (оси крена) ПСК.

СНП работают в режиме высокоточного позиционирования (в частности, РТК, например, сетевом или инверсном), обеспечивая, тем самым, сантиметровую (при долговременном позиционировании – миллиметровую) точность определения их координат в ГцСК: (ξ_1, η_1, ζ_1) – координаты первого СНП, (ξ_2, η_2, ζ_2) – координаты второго (см. рисунок). Полученные по высокоточным спутниковым измерениям координаты обоих СНП позволяют определить углы азимута α и наклона относительно плоскости горизонта – тангажа β и крена γ , следующим образом.

Угол тангажа β определяется как угол

$$\beta = \beta_* - \frac{\pi}{2},$$

где β_* – угол, образованный векторами $\{(\xi_1, \eta_1, \zeta_1), (\xi_2, \eta_2, \zeta_2)\}$ и $\{(0, 0, 0), (\xi_1, \eta_1, \zeta_1)\}$ (см. рисунок) и определяемый как

$$\beta_* = \arccos \frac{(\xi_2 - \xi_1)\xi_1 + (\eta_2 - \eta_1)\eta_1 + (\zeta_2 - \zeta_1)\zeta_1}{\sqrt{\xi_1^2 + \eta_1^2 + \zeta_1^2} \sqrt{(\xi_1 - \xi_2)^2 + (\eta_1 - \eta_2)^2 + (\zeta_1 - \zeta_2)^2}}.$$

$$\eta_0 = \frac{R}{\sin \varphi} = \frac{R^2}{\eta_1}.$$

С учетом коллинеарности векторов $\{(0, 0, 0), (\xi_1, \eta_1, \zeta_1)\}$ и $\{(\xi_*, \eta_*, \zeta_*), (\xi_2, \eta_2, \zeta_2)\}$ (модуль которого равен $L \cdot \sin \beta = L \cdot \cos \beta_*$), координаты ξ_*, η_*, ζ_* точки проекции точки (ξ_2, η_2, ζ_2) на плоскость OXY равны

$$\xi_* = \xi_2 - \frac{L \cdot \cos \beta_*}{R} \xi_1, \eta_* = \eta_2 - \frac{L \cdot \cos \beta_*}{R} \eta_1, \zeta_* = \zeta_2 - \frac{L \cdot \cos \beta_*}{R} \zeta_1,$$

а вектор-проекция $\{(\xi_1, \eta_1, \zeta_1), (\xi_*, \eta_*, \zeta_*)\} = \{\xi_P, \eta_P, \zeta_P\}$ (модуль которого равен $L \cos \beta = L \sin \beta_*$), соответственно, определяется как

$$\xi_P = \xi_2 - \xi_1 \left(1 + \frac{L \cdot \cos \beta_*}{R}\right), \eta_P = \eta_2 - \eta_1 \left(1 + \frac{L \cdot \cos \beta_*}{R}\right), \zeta_P = \zeta_2 - \zeta_1 \left(1 + \frac{L \cdot \cos \beta_*}{R}\right).$$

В соответствии с приведенными выше определениями угла азимута α и вектора-проекции $\{\xi_P, \eta_P, \zeta_P\}$, угол азимута α равен:

$$\begin{aligned} \alpha &= \arccos \frac{\xi_P(-\xi_1) + \eta_P\left(\frac{R^2}{\eta_1} - \eta_1\right) + \zeta_P(-\zeta_1)}{\sqrt{(\xi_P^2 + \eta_P^2 + \zeta_P^2)(\xi_1^2 + (\eta_1 - \frac{R^2}{\eta_1})^2 + \zeta_1^2)}} = \arccos \left(- \frac{\xi_P \xi_1 + \eta_P(\eta_1 - \frac{R^2}{\eta_1}) + \zeta_P \zeta_1}{RL \sin \beta_* \sqrt{\frac{R^2}{\eta_1^2} - 1}} \right) = \\ &= \arccos \left(- \frac{\xi_1 \xi_2 - \xi_1^2 \left(1 + \frac{L \cdot \cos \beta_*}{R}\right) + \eta_2 \eta_1 - \eta_1^2 \left(1 + \frac{L \cdot \cos \beta_*}{R}\right) - \frac{R^2 \eta_2}{\eta_1} + R^2 \left(1 + \frac{L \cdot \cos \beta_*}{R}\right) + \zeta_1 \zeta_2 - \zeta_1^2 \left(1 + \frac{L \cdot \cos \beta_*}{R}\right)}{RL \sin \beta_* \sqrt{\frac{R^2}{\eta_1^2} - 1}} \right) = \\ &= \arccos \frac{\frac{R^2 \eta_2}{\eta_1} - \xi_1 \xi_2 - \eta_2 \eta_1 - \zeta_1 \zeta_2}{RL \sin \beta_* \sqrt{\frac{R^2}{\eta_1^2} - 1}}. \end{aligned}$$

После определения углов азимута α и тангажа β основание БПЛА, на котором размещены СНП, выставляется в направлении оси Oy (оси тангажа БПЛА) ПСК. Далее по показаниям второго СНП определяются его новые координаты (ξ_3, η_3, ζ_3) , после чего определяется угол крена γ :

$$\gamma = \gamma_* - \frac{\pi}{2},$$

где γ_* – угол, образованный векторами $\{(\xi_1, \eta_1, \zeta_1), (\xi_3, \eta_3, \zeta_3)\}$ и $\{(0, 0, 0), (\xi_1, \eta_1, \zeta_1)\}$ (см. рисунок) и определяемый как

$$\gamma_* = \arccos \frac{(\xi_3 - \xi_1)\xi_1 + (\eta_3 - \eta_1)\eta_1 + (\zeta_3 - \zeta_1)\zeta_1}{\sqrt{\xi_1^2 + \eta_1^2 + \zeta_1^2} \sqrt{(\xi_1 - \xi_3)^2 + (\eta_1 - \eta_3)^2 + (\zeta_1 - \zeta_3)^2}}.$$

Если ЦМ БПЛА расположен непосредственно на сфере Земли, то с учетом приведенных выше соотношений определение угла γ_* упрощается:

$$\gamma_* = \arccos \frac{\xi_3 \xi_1 + \eta_3 \eta_1 + \zeta_3 \zeta_1 - R^2}{R \cdot L}.$$

Таким образом, представленный метод состоит в том, что на первом этапе по показаниям размещенных на жестком основании БПЛА двух СНП, один из которых расположен в ЦМ БПЛА, а другой – на известном расстоянии L от него в направлении оси крена, в режиме высокоточного позиционирования (например, RTK) определяются их координаты в ГцСК: $(\xi_1, \eta_1, \zeta_1), (\xi_2, \eta_2, \zeta_2)$. На втором этапе определяется угол тангажа БПЛА как разность угла, образованного в ГцСК векторами, лежащими между точками расположения СНП, между началом ГцСК и ЦМ БПЛА, и прямого угла. На третьем этапе определяется угол азимута как угол, образованный в ГцСК проекцией вектора, лежащего между точками расположения СНП, на плоскость горизонта и вектора, лежащего в плоскости горизонта между ЦМ БПЛА и точкой, имеющей географические координаты (широту и долготу) Северного полюса. На четвертом этапе основание БПЛА с размещенными на нем СНП выставляется в направлении оси тангажа БПЛА, после чего по показаниям второго СНП определяются его новые координаты и угол крена как разность угла, образованного в ГцСК векторами, лежащими между точками нового расположения СНП и между началом ГцСК и ЦМ БПЛА, и прямого угла.

Численная оценка точности определения начальной ориентации

Оценка максимальных погрешностей определения углов азимута, тангажа и крена производилась путем вычисления полного дифференциала функций $\cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma$ (исходных для получения искомого угла) от геоцентрических координат (ξ, η, ζ) с последующей заменой дифференциалов $d\xi, d\eta, d\zeta$ на конечные приращения $\Delta\xi, \Delta\eta, \Delta\zeta$, равные максимальным ошибкам определения координат ξ, η, ζ . Проведенные вычисления при погрешностях $\Delta\xi = \Delta\eta = \Delta\zeta = 10^{-2}$ м, обеспечиваемых СНП в режиме RTK, показали, что при разнесении СНП на $L = 1$ м ошибки определения данных функций не превышают $4 \cdot 10^{-2}$, а при $L = 10$ м, соответственно, $4 \cdot 10^{-3}$, причем для всего диапазона углов. При долговременном позиционировании, когда погрешности определения координат равны уже $\Delta\xi = \Delta\eta = \Delta\zeta = 10^{-3}$ м, ошибки вычисления данных функций уменьшаются на порядок и не превышают $4 \cdot 10^{-3}$ при $L = 1$ м и $4 \cdot 10^{-4}$, соответственно, при $L = 10$ м.

Вывод

Полученные оценки позволяют сделать вывод о возможности использования предложенного способа для определения начальной ориентации с требуемой для современных БПЛА точностью (определяемой габаритами БПЛА и допустимым временем позиционирования) с минимальными на сегодняшний день вычислительными и аппаратными затратами. Работа выполнена в соответствии с госзаданием «Новые принципы, методы и алгоритмы глубокой интеграции инерциально-спутниковых и оптических навигационных систем для высокоточного позиционирования, и пространственной ориентации беспилотных авиационных средств».

Список литературы

- 1 **Соколов, С. В.** Стохастическая оценка, управление и идентификация в высокоточных навигационных системах / С. В. Соколов, В. А. Погорелов; Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи. – Москва : ООО Издательская фирма «Физико-математическая литература», 2016. – 264 с. – ISBN 978-5-9221-1672-5.
- 2 **Перов, А. И.** Глонавс. Принципы построения и функционирования / А. И. Перов, В. Н. Харисов. – 4-е изд. перераб. и доп. – Москва : Радиотехника, 2010. – 800 с. – ISBN 5-93108-076-77.
- 3 **Анучин, О. Н.** Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов / О. Н. Анучин, Г. И. Емельянцева ; под общ. ред. В. Г. Пешехонова ; Гос.

References

- 1 **Sokolov, S. V.** Stochastic estimation, control and identification in high-precision navigation systems / S. V. Sokolov, V. A. Pogorelov // Rostov-on-Don Scientific Research Institute of Radio Communications. – Moscow : LLC Publishing company «Physico-mathematical literature», 2016. – 264 p. – ISBN 978-5-9221-1672-5.
- 2 **Perov, A. I.** Glonass. Principles of construction and functioning / A. I. Perov, V. N. Kharisov. – Ed. 4th, reprint. and add. – Moscow : Radio Engineering, 2010. – 800 p. – ISBN 5-93108-076-77.
- 3 **Anuchin, O. N.** Integrated orientation and navigation systems for marine mobile objects / O. N. Anuchin, G. I. Emeliantsev ; under the gen-

науч. центр Рос. Федерации – Центр. науч.-исслед. ин-т «Электроприбор». – 2-е изд. перераб. и доп.. – Санкт-Петербург : ГНЦ РФ – ЦНИИ «Электроприбор», 2003. – 389 с. – ISBN 5-900780-47-3.

4 **Тихонов, В. И.** Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем : учебное пособие для студентов вузов радиотехн. специальностей / В. И. Тихонов, В. Н. Харисов. – 2-е изд., испр. – Москва : Радио и связь, 2004. – ISBN 5-256-01701-2.

5 **Погорелов, В. А.** Решение задачи тесной интеграции спутниковой и инерциальной платформенной навигационных систем / В. А. Погорелов, С. В. Соколов // Космические исследования. – 2015. – Т. 53, № 6. – С. 497. – DOI 10.7868/S0023420615060059.

6 **Kleusberg, A.** Mathematics of Attitude Determination with GPS / A. Kleusberg // GPS WORLD. – 1995. – No. 9. – P. 72–78. – ISSN 1048-5104.

7 **Graas, F.** GPS Interferometric Attitude and Heading Determination : Initial Flight Test Results / F. Graas, Van, M. S. Braasch // Navigation : Journal of the Institute of Navigation : 1991–1992. – No. 38 (4). – P. 279–316.

8 **Nadler, A.** An Efficient Algorithm for Attitude Determination Using GPS. ION GPS-98 / A. Nadler, I. Y. Bar-Itzhack. – 1998. – P. 1783–1789.

9 Octopus : Multi antennae GPS/GLONASS RTK System. ION GPS-2000 / L. Rapoport, I. Barabanov, A. Khvalkov [et al.]. – P. 797–804.

10 **Euler, H.-J.** Attitude determination : Exploiting all Information for Optimal Ambiguity Resolution. ION GPS-95 / H.-J. Euler, C. Hill. – P. 1751–1757.

11 О повышении точности GPS-компыаса для мало-размерных объектов / Г. И. Емельянцева, А. П. Степанов, В. А. Блажнов [и др.] // Гироскопия и навигация. – 2015. – № 1 (88). – С. 18–28. – DOI 10.17285/0869-7035.2015.23.1.018-029.

12 **Шахин, Э. М.** Математический анализ фазовых погрешностей в схеме слежения приемника GPS при помехах разного рода / Э. М. Шахин // Гироскопия и навигация. – 2018. – Т. 26, № 3 (102). – С. 40–53. – DOI 10.17285/0869-7035.2018.26.3.040-053.

13 **Митрахович, И. О.** Система определения углов ориентации объектов в пространстве на основе метода RTK / И. О. Митрахович // Между-

науч. центр Рос. Федерации // State Scientific Center of the Russian Federation. Federation – Center. scientific-research. in-t «Electrical appliance». – 2nd Ed., reprint. and add. – Saint. Petersburg : SSC RF – Central Research Institute «Electropribor», 2003. – 389 p. – ISBN 5-900780-47-3.

4 **Tikhonov, V. I.** Statistical analysis and synthesis of radio engineering devices and systems : manual for students of radio engineering universities specialties / V. I. Tikhonov, V. N. Kharisov. – 2nd ed., ispr. – Moscow : Radio and Communications, 2004. – ISBN 5-256-01701-2.

5 **Pogorelov, V. A.** Solving the problem of close integration of satellite and inertial platform navigation systems / V. A. Pogorelov, S. V. Sokolov // Space research. – 2015. – Vol. 53, No. 6. – P. 497. – DOI 10.7868/S0023420615060059.

6 **Kleusberg, A.** Mathematics of Attitude Determination with GPS / A. Kleusberg // GPS WORLD. – 1995. – No. 9. – P. 72–78. – ISSN 1048-5104.

7 **Graas, F.** GPS Interferometric Attitude and Heading Determination: Initial Flight Test Results / F. Graas, Van, M. S. Braasch // Navigation : Journal of the Institute of Navigation : 1991–1992. – No. 38 (4). – P. 279–316.

8 **Nadler, A.** An Efficient Algorithm for Attitude Determination Using GPS. ION GPS-98 / A. Nadler, I. Y. Bar-Itzhack. – 1998. – P. 1783–1789.

9 Octopus : Multi antennae GPS/GLONASS RTK System. ION GPS-2000 / L. Rapoport, I. Barabanov, A. Khvalkov [et al.]. – P. 797–804.

10 **Euler, H.-J.** Attitude determination : Exploiting all Information for Optimal Ambiguity Resolution. ION GPS-95 / H.-J. Euler, C. Hill. – P. 1751–1757.

11 On improving the accuracy of a GPS compass for small-sized objects / G. I. Emeliantsev, A. P. Stepanov, V. A. Blazhnov [et al.] // Gyroscopy and navigation. – 2015. – No. 1 (88). – P. 18–28. – DOI 10.17285/0869-7035.2015.23.1.018-029.

12 **Shakhin, E. M.** Mathematical analysis of phase errors in the GPS receiver tracking scheme with interference of various kinds / E. M. Shakhin // Gyroscopy and navigation. – 2018. – Vol. 26, No. 3 (102). – P. 40–53. – DOI 10.17285/0869-7035.2018.26.3.040-053.

13 **Mitrakhovich, I. O.** System for determining the angles of orientation of objects in space based on the RTK method / I. O. Mitrakhovich // International Congress on Informatics : Information

дународный конгресс по информатике: информационные системы и технологии : материалы международного научного конгресса, Минск, 24–27 октября 2016 года / С. В. Абламейко (гл. редактор). – Минск : Белорусский государственный университет, 2016. – С. 46–51. – EDN XWMSEF.

14 **Тяпкин, В. Н.** Методы определения навигационных параметров подвижных средств с использованием спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС / В. Н. Тяпкин, Е. Н. Гарин. – Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2012. – 259 с. – ISBN 978-5-7638-2639-5.

15 **Емельянец, Г. И.** О начальной выставке и оценке погрешностей измерительного модуля БИНС с использованием спутниковых фазовых измерений / Г. И. Емельянец, А. П. Степанов, Б. А. Блажнов // Гироскопия и навигация. – 2019. – Т. 27, № 1 (104). – С. 47–60. – DOI 10.17285/0869-7035.2019.27.1.047-060.

16 Interface Control Document: NAVSTAR GPS Space Segment / Navigation User Interfaces (ICD-GPS-200). Rockwell Int. Corp., 1987.3427.

17 **Лукаевич, В. И.** Алгоритм оценки параметров вращения распределенной антенны по спутниковым измерениям / В. И. Лукаевич, В. А. Погорелов, С. В. Соколов // Радиотехника. – 2015. – № 6. – С. 122–131. – ISSN 0033-8486.

18 Error estimation and selection of inertial navigation system parameters for uncoupled integration with multi-antenna systems / D. Kaleev, A. Pereverzev, Y. Savchenko, A. Silantiev // Proceedings of the 2016 IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, EIConRusNW 2016, Saint Petersburg, 02–03 февраля 2016 года. – Saint Petersburg, 2016. – P. 414–417. – DOI 10.1109/EIConRusNW.2016.7448209.

19 **Шахин, Э. М.** Математический анализ фазовых погрешностей в схеме слежения приемника GPS при помехах разного рода / Э. М. Шахин // Гироскопия и навигация. – 2018. – Т. 26, № 3 (102). – С. 40–53. – DOI 10.17285/0869-7035.2018.26.3.040-053.

systems and Technologies: materials of the International Scientific Congress, Minsk, October 24–27, 2016 / S. V. Ablameyko (editor-in-chief). – Minsk : Belarusian State University, 2016. – P. 46–51. – EDN XWMSEF.

14 **Тяпкин, В. Н.** Methods for determining the navigation parameters of mobile vehicles using the GLONASS satellite radio navigation system / V. N. Tyapkin, E. N. Garin. – Krasnoyarsk : Siberian Federal University, 2012. – 259 p. – ISBN 978-5-7638-2639-5.

15 **Emeliantsev, G. I.** On the initial exhibition and evaluation of errors of the BINC measuring module using satellite phase measurements / G. I. Emeliantsev, A. P. Stepanov, B. A. Blazhnov // Gyroscopy and navigation. – 2019. – Vol. 27, No. 1 (104). – P. 47–60. – DOI 10.17285/0869-7035.2019.27.1.047-060.

16 Interface Control Document: NAVSTAR GPS Space Segment / Navigation User Interfaces (ICD-GPS-200). Rockwell Int. Corp., 1987.3427.

17 **Lukasevich, V. I.** Algorithm for estimating the rotation parameters of a distributed antenna by satellite measurements / V. I. Lukasevich, V. A. Pogorelov, S. V. Sokolov // Radio Engineering. – 2015. – No. 6. – P. 122–131. – ISSN 0033-8486.

18 Error estimation and selection of inertial navigation system parameters for uncoupled integration with multi-antenna systems / D. Kaleev, A. Pereverzev, Y. Savchenko, A. Silantiev // Proceedings of the 2016 IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, EIConRusNW 2016, Saint Petersburg, 02–03 февраля 2016 года. – Saint Petersburg, 2016. – P. 414–417. – DOI 10.1109/EIConRusNW.2016.7448209.

19 **Shakhin, E. M.** Mathematical analysis of phase errors in the GPS receiver tracking scheme with interference of various kinds / E. M. Shakhin // Gyroscopy and navigation. – 2018. – Vol. 26, No. 3 (102). – P. 40–53. – DOI 10.17285/0869-7035.2018.26.3.040-053.

S. V. Sokolov, A. V. Kostyukov, E. N. Tishchenko

HIGH-PRECISION ASSESSMENT OF THE INITIAL ORIENTATION OF DRONE AIRCRAFT BY SATELLITE MEASUREMENTS

Abstract. The paper deals with the problem of the initial orientation of the drone aircraft by high-precision satellite measurements. The solution is obtained in the form of explicit dependencies of the orientation angles of the UAV relative to the geographical coordinate system from secondary satellite measurements of the coordinates of navigation receivers located on the drone aircraft in the geocentric coordinate system. It is given a numerical estimate of the proposed method 'precision illustrating the effectiveness of its practical application.

Keywords: coordinate estimation, initial orientation, satellite measurements, navigation receivers.

For citation: Sokolov, S. V. High-precision assessment of the initial orientation of drone aircraft by satellite measurements / S. V. Sokolov, A. V. Kostyukov, E. N. Tishchenko // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 4. – P. 54–61. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_4_54.

Сведения об авторах

Соколов Сергей Викторович

Ростовский государственный экономический университет (РГЭУ),
доктор технических наук, профессор, заведующий научно-производственной лабораторией,
e-mail: s.v.s.888@yandex.ru

Костюков Александр Владимирович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Теоретические основы электротехники»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: kav@rgups.ru

Тищенко Евгений Николаевич

Ростовский государственный экономический университет (РГЭУ),
факультет «Компьютерных технологий и информационной безопасности»,
доктор экономических наук, профессор, декан,
e-mail: celt@inbox.ru

Information about the authors

Sokolov Sergey Viktorovich

Rostov State University of Economics (RSUE),
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Head of the Scientific-Production Laboratory,
e-mail: s.v.s.888@yandex.ru

Kostyukov Alexander Vladimirovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Theoretical Foundations of Electrical Engineering»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: kav@rgups.ru

Tishchenko Evgeny Nikolaevich

Rostov State University of Economics (RSUE),
Faculty «Computer Technologies and Information Security»,
Doctor of Economics Sciences,
Professor, Dean,
e-mail: celt@inbox.ru