

УДК: 629.7.054.07

НАВИГАЦИОННО-ПОСАДОЧНЫЙ КОМПЛЕКС БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПСЕВДОСПУТНИКОВ

М. С. Гальцова, аспирант МАИ, Москва, Россия;
orcid.org/0000-0003-3448-9812, e-mail: maia98@mail.ru

М. С. Рябинкин, аспирант МАИ, Москва, Россия;
orcid.org/0000-0002-4986-0357, e-mail: max230658@gmail.com

Рассматривается задача навигации беспилотного летательного аппарата на этапе посадки при сложной помеховой ситуации.

Целью работы является разработка структуры и программно-алгоритмического обеспечения навигационно-посадочного комплекса (НПК), использующего сигналы псевдоспутников (ПС) на борту малогабаритного беспилотного летательного аппарата (БПЛА) ближнего действия 2 класса. Посадка осуществляется по глиссадной схеме захода на посадку, при этом рассматриваются несколько конфигураций моделей расположения псевдоспутников в непосредственной близости к взлетно-посадочной полосе (ВПП). Характеристики месторасположения ПС известны заранее с высокой степенью точности. Находятся ошибки оценивания навигационных параметров ЛА в горизонтальном канале бесплатформенной инерциальной навигационной системы без применения ПС и при использовании одного и двух ПС.

Ключевые слова: псевдоспутник (ПС), глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), навигационно-посадочный комплекс (НПК), бесплатформенная инерциальная навигационная система (БИНС), летательный аппарат (ЛА), посадка, геометрический фактор ухудшения точности определения местоположения (PDOP), ошибка оценивания.

DOI: 10.21667/1995-4565-2021-77-36-42

Введение

В настоящее время посадка беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в условиях недоступности или зашумленности сигналов ГНСС становится все более актуальной в связи с развитием беспилотной авиации и отсутствием единых правил организации посадки БПЛА. Одним из вариантов решения данной проблемы является использование локальных навигационных полей, развернутых с использованием радиолокационных, в том числе инструментальных, систем посадки. Однако развертывание таких систем типа ILS/MLS [1], их разработка и обслуживание часто являются сложным и дорогим процессом. Альтернативой такому подходу может служить использование существующей инфраструктуры и оборудования систем ГНСС, а именно: создание наземных дополнений в виде псевдоспутников (ПС) вдоль ВПП. Такой подход позволит использовать уже готовую аппаратуру потребителя ГНСС, доступную и сертифицированную на всех ЛА, снимет необходимость обслуживания дополнительных радиолокационных систем и оборудования инструментальных систем посадки.

Рассматривается решение задачи повышения точности в периоды недоступности, недоверности или повышенной шумовой составляющей сигнала от глобальных навигационных спутниковых систем. Применение псевдоспутников является решением этих проблем, так как вышеуказанный передатчик сигналов имеет заданные с точностью до сотых долей миллиметра координаты местоположения, кроме того отсутствуют задержки, связанные с прохождением сигнала через атмосферу Земли. Разрабатываемая система позволяет реализовывать контроль целостности информации на борту ВС.

Теоретическая часть

Согласно [2] категории заходов на посадку и посадок классифицируются по степени точности в зависимости от метеоусловий. Наиболее требовательной является категория ПС. В связи с особой сложностью выполнения этапа посадки к навигационному комплексу ЛА предъявляются жесткие требования не только к точности навигационного обеспечения, но и к надежности навигационного решения. Потеря сигнала на этапе посадки может привести к потере БПЛА или возникновению нештатных ситуаций, что делает задачу обеспечения надежности и контроля целостности навигационного решения БПЛА актуальной.

Существенный вклад в погрешность навигационно-временного определения вносит расположение спутников относительно потребителя. Данный факт характеризуется показателями геометрического фактора ухудшения точности GDOP – Geometrical delusion of precision. На практике в авиации типовое значение характеристики снижения точности DOP составляет 2 – 3, однако при условии сложной помеховой обстановки или частичной недоступности сигналов от всех ГНСС, данное значение может выходить за диапазон в 20 единиц, при этом точность определения навигационных параметров ЛА ухудшится пропорционально. Использование ПС в качестве дополнения спутниковых систем уменьшит геометрический фактор, и в связи с этим повысится точность позиционирования.

Для получения трехмерного навигационного решения необходимо обеспечивать постоянную видимость как минимум 4 спутников. В связи с тем, что шкала времени КНС GPS (UTC) не совпадает со шкалой КНС ГЛОНАСС (UTC SU), при работе со смешанным созвездием требуются измерения от 5 НКА. При возникновении отказа НКА и/или частичного подавлении сигнала возникает необходимость ввести в систему посадки 2 ПС для реализации алгоритма целостности.

Основой навигационного комплекса многих ЛА является БИНС, при этом корректором в проектируемом НПК является ПС и СНС ГЛОНАСС. Наземное дополнение в виде ПС служит для передачи дифференциальных поправок. Построение ПНК производилось по слабосвязанной схеме комплексирования, что позволяет вырабатывать независимые решения, при этом производится коррекция данных от БИНС, благодаря формированию оценки вектора состояния.

Вектор состояния можно записать в виде:

$$\bar{X}^T = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, \alpha, \beta, \gamma, \Delta\Omega_X, \Delta\Omega_Y, \Delta\Omega_Z, \Delta n_X, \Delta n_Y, \Delta n_Z\} \quad (1)$$

где x_1, x_2, x_3 – ошибки определения координат и высоты БИНС, x_4, x_5, x_6 – производные компонент x_1, x_2, x_3 , – угловые погрешности ориентации измерительного трехгранника; $\Delta n_X, \Delta n_Y, \Delta n_Z, \Delta\Omega_X, \Delta\Omega_Y, \Delta\Omega_Z$ – постоянная составляющая инструментальной ошибки акселерометров и гироскопов [3].

Реализация дискретного оптимального фильтра Калмана (ОФК) осуществляется с помощью следующей системы уравнений:

$$\begin{aligned} \hat{x}_k &= \Phi_{k/k-1} \hat{x}_{k-1} + K_k (\bar{z}_k - H \Phi_{k/k-1} \hat{x}_{k-1}); \\ K_k &= S_k H^T (H S_k H^T + R_1)^{-1}; \\ S_k &= \Phi_{k/k-1} P_{k-1} \Phi_{k/k-1}^T + \Gamma Q_1 \Gamma^T; \\ P_k &= (E - K_k H) S_k (E - K_k H)^T + K_k R_1 K_k^T, \end{aligned} \quad (2)$$

где E – единичная матрица; H – матрица измерений; P_k, P_{k-1} – матрицы ковариации текущего и предыдущего шага; $\bar{z}_k$ – вектор измерения текущего шага; $\Phi_{k/k-1}$ – переходная матрица динамики системы текущего шага относительно предыдущего; K_k – коэффициент усиления, S_k – симметричная ковариационная матрица экстраполированных ошибок; Q_1 – матрица интенсивности шумов измерений; R_1 – матрица интенсивности шумов системы.

Запись в виде (2) обеспечивает симметричность матрицы ковариации P_k .

Структура разрабатываемого программного комплекса приведена на рисунке 1.

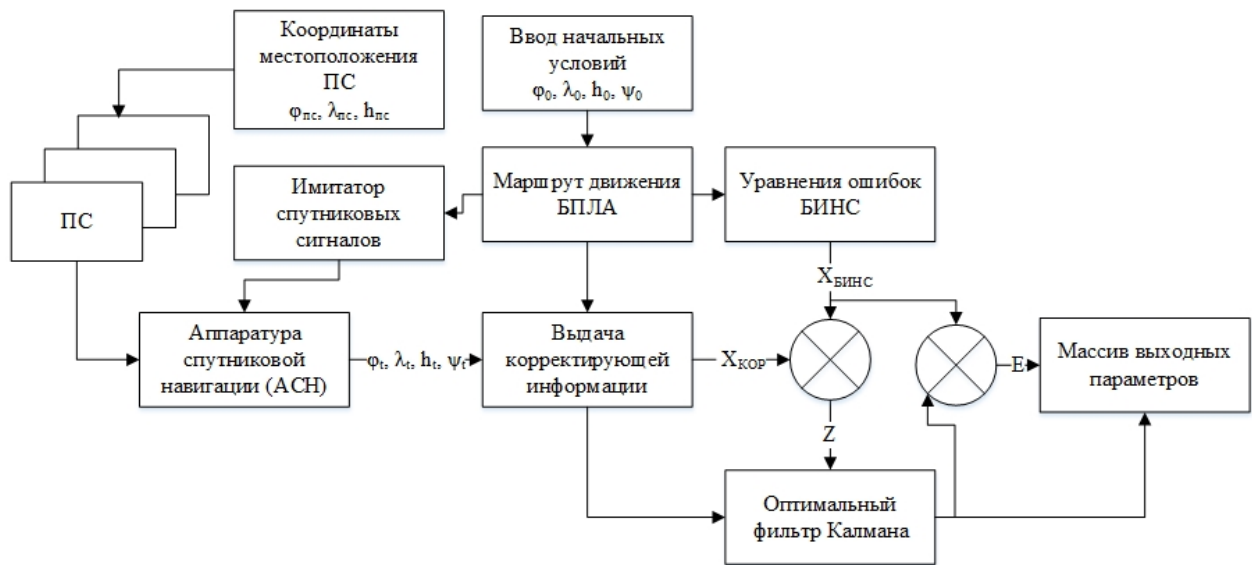


Рисунок 1 – Структура программного комплекса имитационного и полунатурного моделирования

Figure 1 – The structure of software package for simulation and semi-natural modeling

При построении структуры программного комплекса необходимо отметить особенности, а именно – наличие псевдоспутников с заранее известными координатами местоположения. Блок «Аппаратура спутниковой навигации (АСН)» в данном случае представляет собой приемник сигналов от имитатора спутниковых сигналов и псевдоспутников, который выдает навигационное решение. В блоке «Маршрут движения БПЛА» с учетом выбранных начальных условий формируются значения параметров ориентации и навигации, проекции кажущегося ускорения и абсолютной угловой скорости вращения, время, дата. Реализуется схема захода на посадку БПЛА по глиссаде. Имитатор спутниковых сигналов позволяет передать сигналы ГНСС с учетом особенностей траектории посадки БПЛА.

Экспериментальные исследования

Имитационное моделирование проводилось по трем различным сценариям в MATLAB 9.7.0:

- моделирование посадки без применения ПС,
- моделирование посадки с применением одного ПС,
- моделирование посадки с применением двух ПС.

Также было рассмотрено влияние месторасположения ПС на геометрический фактор точности.

Схема расположения одного и двух ПС относительно ВПП приведена на рисунках 2 3 соответственно [4].

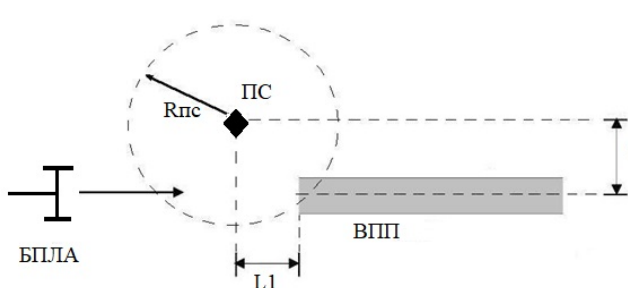


Рисунок 2 – Схема расположения одного ПС
Figure 2- Layout of one PS

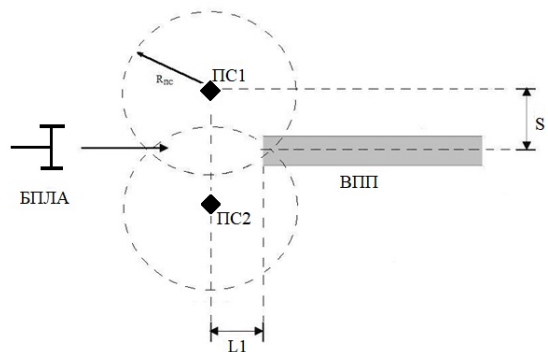


Рисунок 3 – Схема расположения двух ПС
Figure 3- Layout of two PS

Варьируемыми параметрами выступают: расстояние от ПС до оси ВПП (S) и расстояние от ПС до торца ВПП (L1), указанные в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики местоположения ПС

Table 1 – Characteristics of aircraft location

Кол-во ПС	S	L1	φ, λ, h	
1	50	4000	[56,0162; 37,0643; 0]	
	200	5000	[56,0176; 37,0804; 0]	
	500	5000	[56,0203; 37,0804; 0]	
	1000	5000	[56,0248; 37,0804; 0]	
2	50	4000	[56,0162; 37,0643; 0]	[56,0153; 37,0643; 0]
	200	5000	[56,0176; 37,0804; 0]	[56,0140; 37,0804; 0]
	1000	5000	[56,0248; 37,0804; 0]	[56,0068; 37,0804; 0]

Мощность излучения сигнала ПС бралась условно так, чтобы зона действия ПС гарантированно покрывала точку приземления на ВПП БПЛА.

При моделировании посадки ЛА использовались следующие начальные характеристики:

- начальная скорость $V_0 = 130$ [км/ч];
- скорость при посадке $V_k = 80$ [км/ч];
- начальная высота $H_0 = 153$ [м];
- высота ВПП $H = 0$ [м];
- угол наклона глиссады $\Theta = 5^\circ$;
- начальные координаты БПЛА $\varphi_0 = 56^\circ$ $\lambda_0 = 37^\circ$;
- постоянный дрейф гироскопов 700 [°/ч];
- случайная составляющая дрейфа 30 [°/ч];
- постоянная ошибка акселерометра $10^{-3}g$;
- случайная ошибка акселерометра $10^{-2}g$;
- начальная ошибка определения углов ориентации 5° ;
- начальная ошибка в определении координат 10 [м];
- начальная ошибка в определении проекций путевой скорости 1 [м/с];
- время моделирования $T = 2$ [мин];

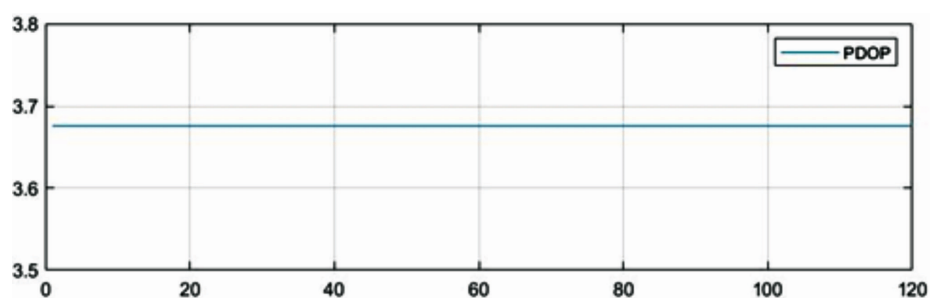
– дисперсия ошибок определения координат навигационным спутником в зените $\sigma = 5$ [м].

Так как моделирование посадки занимает малый промежуток времени, в качестве допущения будем считать, что созвездие не изменялось, а погрешность определения координат ПС ничтожно мала.

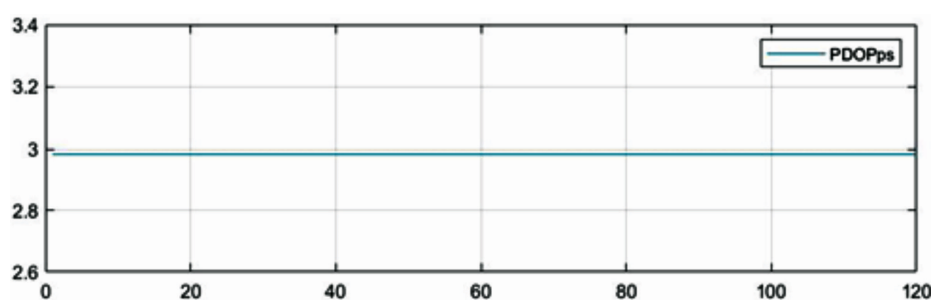
Геометрический фактор точности определения местоположения потребителя ГНСС в пространстве (PDOP) включает в себя значения геометрических факторов определения местоположения потребителей в горизонтальной (HDOP) и вертикальной (VDOP) плоскостях, в связи с этим на рисунке 4 приведены графики изменения значения PDOP. Полученные значения HDOP и VDOP приведены в таблице 2.

При моделировании без применения ПС геометрический фактор ухудшения определения местоположения (PDOP) в условных единицах составляет 3,67, что является хорошим показателем (см. рисунок 4, а). Применение одного и двух ПС на расстоянии $S = 50$ м $L1 = 4000$ м улучшило значение геометрического фактора PDOP на 19 % и 32 % соответственно относительно значений, полученных только от СНС (рисунок 4, а).

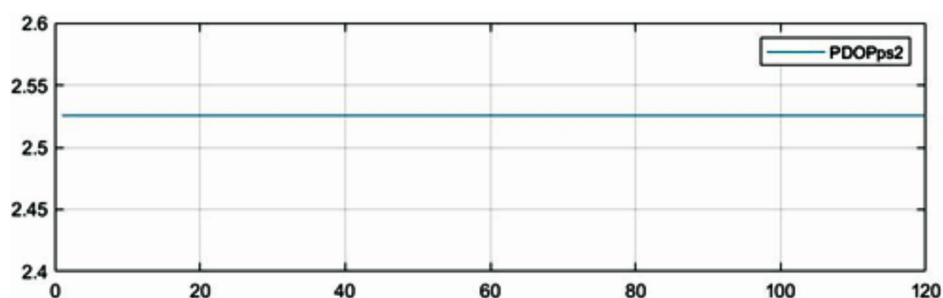
Улучшение значений PDOP при применении одного и двух ПС влечет за собой уменьшение значений среднеквадратичного отклонения определения координат в вертикальной и горизонтальной плоскостях на 20 % и 32 % относительно значений СКО, полученных без использования ПС (см. рисунок 5).



а (а)



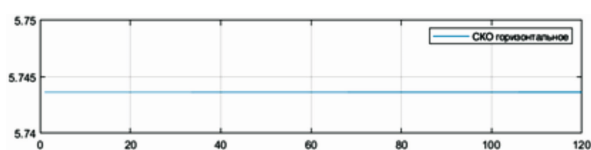
б (б)



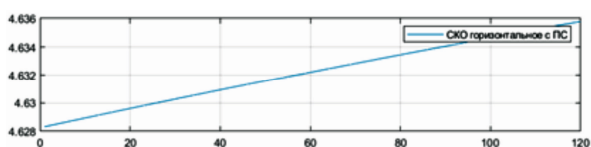
в (в)

Рисунок 4 – Геометрический фактор ухудшения определения местоположения (PDOP) без ПС – (а) и при применении одного ПС (б) и двух ПС (в) $S = 50$ м, $L1 = 4000$ м

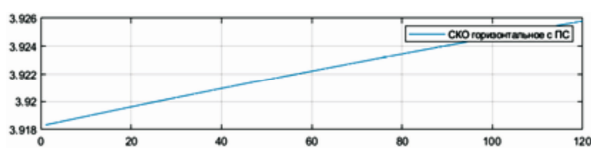
Figure 4 – Geometric deterioration factor of position determination (PDOP) without PS – (a) and when using one PS (b) and two PS (c) $S = 50$ м, $L1 = 4000$ м



а (а)



б (б)



в (в)

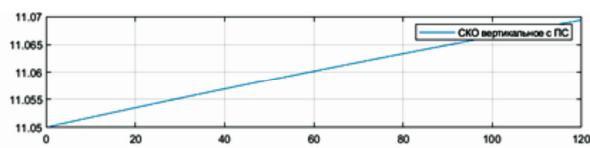
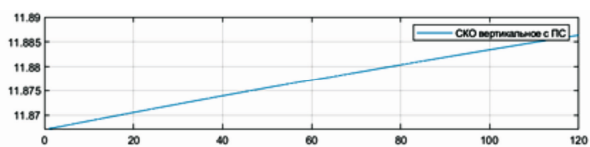
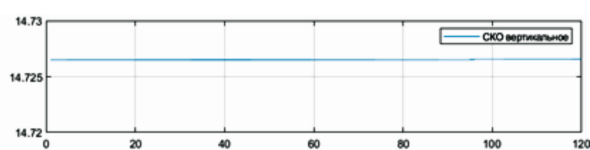


Рисунок 5 – СКО без ПС – (а) и при применении одного ПС – (б) и двух ПС – (в) $S = 50$ м, $L1 = 4000$ м

Figure 5 – RMS without PS – (a) and when applying one PS – (b) and two PS – (c) $S = 50$ м, $L1 = 4000$ м

Таблица 2 – Результаты расчетов
Table 2 – Calculation results

Коррек- ция от:	S, м.	L1, м.	PDOP	HDOP	VDOP	СКО Гориз., м.	СКО Вертик., м.	Ошибка оценивания в гориз. канале, м.
СНС	-	-	3,67	1,33	3,42	5,74	14,72	1,004
1 ПС	50	4000	2,98	1,08	2,77	4,63	11,88	-
	200	5000	2,86	1,03	2,66	4,52	11,61	0,9798
	1000	5000	2,84	1,03	2,64	4,5	11,54	-
2 ПС	50	4000	2,52	0,91	2,35	3,92	10,06	-
	200	5000	2,38	0,86	2,22	3,78	9,69	-
	1000	5000	2,2	0,8	2,05	3,61	9,27	0,8573

Заключение

В статье рассмотрено влияние наличия дополнительного корректора – псевдоспутников на среднеквадратичное отклонение определения координат ЛА при посадке. Результаты моделирования показали положительное влияние применения ПС вблизи ВПП при осуществлении посадки БПЛА. Как показало моделирование, среднее квадратичное отклонение уменьшается при применении одного ПС в среднем на 20 %, а применение двух ПС уменьшает данное отклонение на 30 % относительно измерений, полученных при посадке с коррекцией только от навигационных спутников. Проведенное моделирование при вариации таких параметров, как: расстояние от ПС до оси ВПП (S) и расстояние от ПС до торца ВПП (L1), показало, что наилучшее расположение одного ПС будет на расстоянии 200 м до оси ВПП, а при использовании двух ПС – расположенных на расстоянии S = 1000 м и L1 = 5000 м. Наилучшее оценивание происходит при использовании сигналов от двух ПС: СКО ошибок оценивания в горизонтальном канале стабильно на всем этапе моделирования посадки БПЛА, при этом наименьшее значение достигается при использовании двух ПС 0,86 м.

Библиографический список

1. **Карпов Е. А.** Сравнительные характеристики систем, обеспечивающих посадку / Е. А. Карпов, В. В. Сусоев, И. И. Горбачева // Актуальные проблемы авиации и космонавтики: сб. материалов V Международной научно-практической конференции, посвященной Дню космонавтики. В 3-х т., Красноярск, 08-12 апреля 2019 года / под общей ред. Ю. Ю. Логинова. Красноярск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева», 2019. С. 915-917.
2. Руководство по всепогодным полетам. Изд. третье, 2013. Режим доступа: http://aerohelp.ru/sys-files/374_197.pdf.
3. **Кузнецов И. М., Пронькин А. Н., Веремеенко К. К.** Малогабаритные интегрированные навигационные модули: алгоритмы и особенности структуры // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2010. Т. 104. № 3. С. 245-250.
4. **Пронькин А. Н.** Интегрированная навигационная система БПЛА: структура и исследование характеристик / А. Н. Пронькин, И. М. Кузнецов, К. К. Веремеенко // Труды МАИ. 2010. № 41. 14 с.

UDC: 629.7.054.07

UNMANNED AIRCRAFT NAVIGATION AND LANDING COMPLEX USING PSEUDO-SATELLITE SIGNALS

M. S. Galtsova, post-graduate student of the Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia;
orcid.org/0000-0003-3448-9812, e-mail: maia98@mail.ru

M. S. Ryabinkin, post-graduate student of the Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia;
orcid.org/0000-0002-4986-0357, e-mail: max230658@gmail.com

The problem of navigation of an unmanned aerial vehicle at the landing stage in a complex jamming situation is considered.

The aim of the work is to develop the structure as well as software and algorithmic support of navigation and landing complex (NPK), using signals from pseudo-satellites (PS) on board a small-sized unmanned aerial vehicle (UAV). Landing is carried out according to a glide-garden approach, while several configurations of models for the location of pseudo-satellites in close proximity to runway are considered. The characteristics of SS location are known in advance with a high degree of accuracy. Estimation errors of aircraft navigation parameters in a horizontal channel of Strapdown inertial navigation system in the conditions when no PS and when one or two PS being used are found.

Key words: pseudosatellite (PS), global navigation satellite systems (GNSS), navigation and landing complex (NPK), strapdown inertial navigation system (SINS), aircraft (LA), landing, geometric factor of deterioration of positioning accuracy (PDOP), estimation error.

DOI: 10.21667/1995-4565-2021-77-36-42

References

1. **Karpov E. A.** Sravnitel'nye harakteristiki sistem, obespechivayushchih posadku / E. A. Karpov, V. V. Susoev, I. I. Gorbacheva. *Aktual'nye problemy aviacii i kosmonavтики: sb. materialov V Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchennoj Dnyu kosmonavtyki*. V 3-h t., Krasnoyarsk, 08-12 aprelya 2019 goda / pod obshchej red. Yu. Yu. Loginova. Krasnoyarsk: Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Sibirskij gosudarstvennyj universitet nauki i tekhnologii imeni akademika M. F. Reshetneva». 2019, pp. 915-917. (in Russian).
2. *Rukovodstvo po vsepogodnym poletam*. Izd. tret'e, 2013. Rezhim dostupa: http://aerohelp.ru/sys-files/374_197.pdf. (in Russian).
3. **Kuznecov I. M., Pron'kin A. N., Veremeenko K. K.** Malogabaritnye integrirovannye navigacionnye moduli: algoritmy i osobennosti struktury. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2010, vol. 104, no. 3, pp. 245-250. (in Russian).
4. **Pron'kin A. N.** Integrirovannaya navigacionnaya sistema BPLA: struktura i issledovanie harakteristik / A. N. Pron'kin, I. M. Kuznecov, K. K. Veremeenko. *Trudy MAI*. 2010, no. 41, 14 p. (in Russian).