

Раздел I. Беспилотные авиационные системы

УДК 681.518.3

В.В. Щербинин, А.В. Связов, Г.А. Кветкин

РЕЗУЛЬТАТЫ ЛЕТНЫХ ИСПЫТАНИЙ МАКЕТА АВТОНОМНОГО НАВИГАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА ДПЛА

Автономный навигационный комплекс (АНК) является одним из основных элементов автоматизированной системы посадки ДПЛА, разрабатываемой в АО «ЦНИИАГ». Комплекс включает в себя уникальную радиодальномерную аппаратуру, которая позволяет осуществлять высокоточную навигацию подвижного объекта в заданном районе действия (например, в окрестности аэродрома) без использования сигналов спутниковых навигационных систем (СНС). Особенностью АНК является обеспечение точности навигационного решения, достаточной для посадки ДПЛА, в условиях ограниченной видимости с использованием датчиков бюджетного класса при помощи оригинальных алгоритмов комплексной обработки информации. Кроме радиодальномерной аппаратуры в состав макета АНК входит инерциальный измерительный блок на микромеханических элементах, миниатюрный барометрический высотомер и лазерный дальномер. По результатам серии летных экспериментов на легкомоторном самолете в различных метеоусловиях сделан вывод о принципиальной возможности решения навигационной задачи при отсутствии сигналов СНС. При проведении эксперимента помимо макета АНК бортовая часть была дополнена приемником СНС для маршрутной навигации вне зоны действия радиодальномерной аппаратуры, средством контроля функционирования АНК, средством визуализации навигационной информации, а также ровером системы внешнетраекторных измерений. Последняя представляла собой пару высокоточных приемников СНС, показания которых подвергались постобработке с учетом фазовых измерений. Данный метод обеспечил высокую точность определения реальной траектории самолета и, соответственно, оценки погрешностей АНК. В процессе летных испытаний экспериментально подтверждена прогнозируемая точность АНК, а именно, снижение погрешности определения бокового отклонения от программной траектории (направленной чаще всего вдоль оси ВПП) по мере приближения к торцу ВПП. На удалении порядка 1000 м СКО составляет 10–15 метров, а на дальности меньших 300 м СКО уже находится на уровне 2–3 метров, что позволяет вывести летательный аппарат на ВПП.

Автономная навигация; автоматизированная система посадки ДПЛА; радиодальномерная аппаратура; летный эксперимент.

V.V. Scherbinin, A.V. Sviyazov, G.A. Kvetkin

FLIGHT TESTS RESULTS OF PROTOTYPE MODEL OF UAV AUTONOMOUS NAVIGATIONAL COMPLEX

Autonomous navigational complex (ANC) is one of the main parts of UAV automated landing system, designed in JSC "TsNIIAG". The complex includes unique radio range-finding equipment, which allows high-precision navigation of moving object in advisory area (for example, in vicinity of airfield) without using GNSS signals. The feature of the ANC is providing accuracy of navigation solution, enough for UAV landing, under conditions of limited visibility with use of low-cost sensors with help of original algorithms of integrated data processing. Except radio range-finding equipment the ANC prototype model consists of inertial measurement unit on MEMS-elements, small barometric altimeter and laser range-finder. Using set of flight test results

on light airplane under different weather conditions conclusion has made about possibility in principle of navigation task solution without GNSS signals. For experiment performance in addition to prototype model of ANC board part has complemented with GNSS receiver for route navigation out of range radio range-finding equipment, ANC checker, visualization tool of navigational information and rover of external tracker system. Latter is represented as pair of high-precision GNSS receivers, which indications were analyzed by post-processing with allowance for phase measurements. This method provides high accuracy of plane real track definition and, properly, estimation of ANC errors. During flight tests experimentally has been proved forecasted ANC accuracy, videlicet, reduction of error of side deviation from programed trajectory (mostly often directed along runway axis) definition according to runway approaching. At a distance about 1000 meters standard deviation equal to 10–15 meters, and at distance under 300 meters standard deviation is at level about 2–3 meters, which provides an opportunity to take out airborne vehicle on runway.

Autonomous navigation; UAV automated landing system; radio range-finding equipment; flight test.

В условиях динамичного развития роботизированных комплексов различного назначения не теряет актуальности задача управления такими комплексами в условиях внешних ограничений с высокими требованиями по точности. В частности, к такому классу задач можно отнести выполнение захода на посадку и посадки ДПЛА на малооборудованные аэродромы и необорудованные посадочные площадки. Для ДПЛА малого класса возможно применение парашюта [1–6], но для среднего и крупного классов необходимо обеспечивать посадку по самолетному способу. Реализация такой посадки требует либо высококвалифицированного оператора, наблюдающего ДПЛА, либо средства высокоточной навигации и системы автоматического управления. В настоящее время в качестве средства высокоточной навигации используются:

- ◆ приемник СНС [7–10];
- ◆ видеокамера [11–13];
- ◆ радиолокационные системы [14–15].

Однако приемник СНС не всегда обеспечивает субметровую точность определения координат в режиме реального времени и не является помехозащищенным устройством. Использование видеоинформации о подстилающей поверхности и взлетно-посадочной полосе реализует свойство автономности и помехозащищенности, но существенно зависит от погодных условий и времени суток. Радиолокационные системы помимо высокой стоимости оборудования характеризуются значительными массо-габаритными характеристиками и энергопотреблением.

В АО «ЦНИИАГ» разрабатывается автоматизированная система посадки (АСП) ДПЛА и самолетов малой авиации, которая отвечает требованиям всепогодности, всесуточности, мобильности, простоты эксплуатации и, главное, функционирует независимо от СНС. Основными подсистемами АСП являются (рис. 1) автономный навигационный комплекс (АНК) [16] и система траекторного управления (СТУ).

Согласно структурной схеме с помощью АНК определяются параметры движения ДПЛА (координаты в посадочной системе координат, углы ориентации), затем измеренная траектория сравнивается с программной, и полученная разница поступает в СТУ. На основе математической модели ДПЛА, требуемых параметров переходных процессов, модели внешней среды формируются требуемые сигналы на органы управления (элероны, флапероны, рули направления и высоты, тяга). ДПЛА обрабатывает задаваемые сигналы управления, и АНК фиксирует обновленные параметры движения.



Рис. 1. Структурная схема автоматизированной системы посадки

Данная работа посвящена результатам летных испытаний макета АНК на летающей лаборатории (легкомоторном самолете). Составными элементами макета (рис. 2) являются:

- ◆ радиодальномерная аппаратура (РДА), включающая бортовой запросчик и четыре наземных ответчика (наземные радиомаяки - НРМ);
- ◆ инерциальный измерительный блок на микромеханических элементах;
- ◆ лазерный дальномер для определения высоты ДПЛА перед касанием;
- ◆ миниатюрный баровысотомер;
- ◆ бортовой вычислитель.



Рис. 2. Схема макета автономного навигационного комплекса

С целью экспериментальной отработки оборудования и программно-алгоритмического обеспечения была проведена серия полетов на легкомоторном самолете Cessna-172 (рис. 3) в 2013–2014 гг. на одном из подмосковных аэродромов.

Состав экспериментального оборудования:

- ◆ Бортовая часть:
 - Макет АНК;
 - Резервный приемник СНС для маршрутной навигации;
 - Система питания (аккумулятор 12В, инвертор (12В->220В));
 - Средство контроля работы АНК (ноутбук);
 - Средство отображения навигационной информации (нетбук);
 - Ровер системы внешне траекторных измерений (ВТИ);
 - Видеорегистратор;
- ◆ Наземная часть:
 - Радиомаяки (НРМ), расположенные в окрестности ВПП;
 - Базовая станция системы ВТИ.



Рис. 3. Летящая лаборатория на базе самолета Cessna-172

На рис. 4 показаны места установки лазерного дальномера и антенны РДА под фюзеляжем ЛА, а на рис. 5 представлены макетный и перспективный НРМ.



Рис. 4. Установка антенны РДА и дальномера на самолете



Рис. 5. Установка НРМ в окрестности ВПП: а – макет; б – перспективный блок

Система ВТИ представляет собой пару высокоточных приемников СНС, работающих в относительном режиме с постобработкой фазовых измерений [17, 18]. Ровер устанавливался на борту ЛА, а базовая станция располагалась неподвижно в течение всего испытательного дня на одном месте. Таким образом, обеспечивалась сантиметровая точность работы системы ВТИ при разрешении фазовой неопределенности в измерениях.

Важным этапом в подготовке эксперимента является расстановка и топогеодезическая привязка НРМ в окрестности ВПП. С одной стороны требуется обеспечить оптимальное, с точки зрения минимизации геометрического фактора, расположение НРМ относительно программной траектории ЛА [19, 20], а с другой стороны использование действующей ВПП накладывает существенные ограничения на местоположение НРМ. В результате четыре НРМ были расставлены по вершинам параллелограмма со сторонами примерно 120 и 250 м. Однако, несмотря на неоптимальное расположение НРМ удалось обеспечить высокую точность решения навигационной задачи.

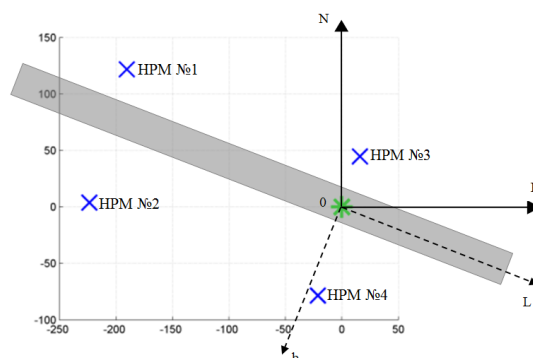


Рис. 6. Расстановка НРМ в окрестности ВПП

На рис. 6. условно изображены ВПП (серый цвет), оси географической СК (сплошными линиями), оси посадочной СК (штриховые линии).

В течение 2013-2014 гг. проведены серии полетов, из которых можно выделить шесть наиболее наглядных результатов. В таблицу 1 сведены основные значения: погрешность определения бокового отклонения ЛА относительно оси ВПП (σ_b) и погрешность определения дальности до программной точки касания (σ_L).

Таблица 1

Дальность до точки касания	СКО, м	Номер эксперимента					
		1	2	3	4	5	6
от 1000 до 300 м	σ_b	3.7	11.6	11.0	10.2	13.5	12.3
	σ_L	8.5	8.2	8.8	7.9	8.5	8.1
меньше 300 м	σ_b	1.8	3.7	4.9	1.1	2.3	1.5
	σ_L	7.3	3.1	6.6	6.6	6.3	4.9

Из представленных данных можно сделать вывод, что на больших удалениях от ВПП погрешность определения бокового отклонения находится на уровне 10–13 метров, что может быть отработано бортовой САУ. При подлете к ВПП погрешность значительно снижается и составляет от 1,5 до 4,9 м в худшем случае.

Однако по экспертным оценкам и такое отклонение может быть скорректировано бортовой САУ. На рис. 7 представлены экспериментальные данные, и построено среднее отклонение в зависимости от удаления от ВПП.

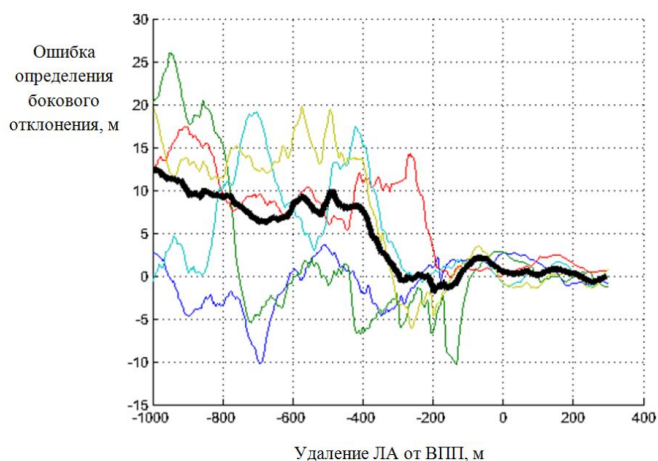


Рис. 7. Зависимость ошибки определения бокового отклонения от удаления ЛА от ВПП

Графические данные наглядно свидетельствуют о том, что по мере приближения к ВПП погрешность определения координат существенно снижается и уже непосредственно перед касанием и на пробеге по полосе не превышает 1–2 м. Такой характер изменения погрешности определяется уменьшением геометрического фактора по мере приближения ЛА к группировке НРМ, расположенных в окрестности ВПП.

Согласно табл. 1 ошибка определения дальности снижается с 8–9 м на больших удалениях до 5–7 при подлете к ВПП. Такой эффект также объясняется изменением геометрического фактора, но остаточное значение ошибки связано с тем, что путевая скорость ЛА при заходе на посадку составляет порядка 30–35 м/с, и задержка в обработке информации на уровне 0,1 с приводит к вкладу в ошибку определения дальности 3–4 м. Однако с точки зрения пилотирования ЛА такой уровень ошибки можно считать допустимым ввиду протяженности ВПП.

Один из полетов проводился в марте, что позволило наглядно продемонстрировать всепогодность АНК. На левом фото (рис. 8) показан вид из кабины самолета при первом заходе на посадку, а на правом фото показан второй заход на посадку, выполненный через 10 минут, но уже при сильном снегопаде. Применение АНК вместе с профессионализмом пилота позволило осуществить посадку и в первом и во втором случаях.

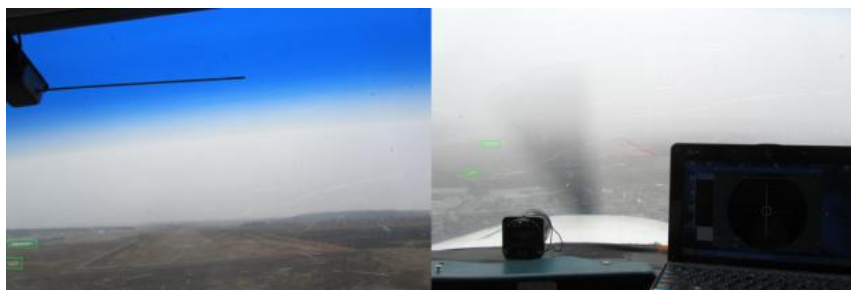


Рис. 8. Заход на посадку с помощью АНК в условиях ограниченной видимости

В 2014 г. в АО «ЦНИИАГ» созданием макета успешно завершена НИР по созданию технологии всепогодной круглосуточной навигации для автоматизированной системы посадки самолетов и ДПЛА на мало- и необорудованные аэродромы. С 2015 года планируется открыть ОКР, итогом которого должен стать экспериментальный образец ДПЛА, оснащенный автоматической системой посадки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. http://www.bespilotnik.com/at_work/landing_system/ (дата обращения 18.02.2015).
2. <http://zala.aero/zala-421-16e-2/> (дата обращения 18.02.2015).
3. <http://zala.aero/zala-421-08/> (дата обращения 18.02.2015).
4. <http://aerocon.ru/inspector/inspector-2020/> (дата обращения 18.02.2015).
5. <http://unmanned.ru/uav/supercam-240.htm> (дата обращения 18.02.2015).
6. <http://www.uav-siberia.com/delta-m> (дата обращения 18.02.2015).
7. <http://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=8028> (дата обращения 18.02.2015).
8. <http://pang.uniparthenope.it/sites/default/files/An%20EGNOS%20Based%20Navigation%20System%20for%20Highly%20Reliable%20Aircraft%20Automatic%20Landing.pdf> (дата обращения 18.02.2015).
9. <http://texnomaniya.ru/aviation-news/belorussija-bpla-s-avtomaticheskim-vzletom-i-posadkojj.html> (дата обращения 18.02.2015).
10. <http://profbpla.ru/#hart> (дата обращения 18.02.2015).
11. <http://www.imagotrackers.com/atol.shtml> (дата обращения 18.02.2015).
12. <http://tams-www.informatik.uni-hamburg.de/people/kong/publications/130322.IROS2013.pdf> (дата обращения 18.02.2015).
13. http://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2012/PAPERS/131.PDF (дата обращения 18.02.2015).
14. <http://www.sncorp.com/pdfs/BusinessAreas/TALS%20Product%20Sheet.pdf> (дата обращения 18.02.2015).
15. <http://www.radiotec.ru/catalog.php?cat=jr5&art=12892> (дата обращения 18.02.2015).
16. Щербинин В.В., Связов А.В., Смирнов С.В., Кветкин Г.А. Автономный навигационный комплекс для роботизированных наземных и летательных аппаратов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 3 (152). – С. 234-243.
17. <http://www.techelements.ru/eletovs-538-1.html> (дата обращения 18.02.2015).
18. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС / Под ред. Харисова В.Н., Перова А.И., Болдина В.А. – М.: ИПРЖР, 1998. – 400 с.
19. Кветкин Г.А., Связов А.В., Смирнов С.В., Щербинин В.В., Андриенко В.Б., Крючков Л.А. Разработка технологии автоматизации посадки летательных аппаратов // Вопросы оборонной техники. Сер. 9. – 2012. – Вып. 1 (253). – С. 36-42.
20. Кветкин Г.А., Связов А.В., Смирнов С.В., Щербинин В.В. Исследование точностных характеристик автоматизированной системы посадки беспилотных/дистанционно пилотируемых летательных аппаратов // Вопросы оборонной техники. Сер. 9. – 2012. – Вып. 1 (253). – С. 43-49.

REFERENCES

1. Available at: http://www.bespilotnik.com/at_work/landing_system/ (Accessed 18 February 2015).
2. Available at: <http://zala.aero/zala-421-16e-2/> (Accessed 18 February 2015).
3. Available at: <http://zala.aero/zala-421-08/> (Accessed 18 February 2015).
4. Available at: <http://aerocon.ru/inspector/inspector-2020/> (Accessed 18 February 2015).
5. Available at: <http://unmanned.ru/uav/supercam-240.htm> (Accessed 18 February 2015).
6. Available at: <http://www.uav-siberia.com/delta-m> (Accessed 18 February 2015).
7. Available at: <http://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=8028> (Accessed 18 February 2015).
8. Available at: <http://pang.uniparthenope.it/sites/default/files/An%20EGNOS%20Based%20Navigation%20System%20for%20Highly%20Reliable%20Aircraft%20Automatic%20Landing.pdf> (Accessed 18 February 2015).

9. Available at: <http://texnomaniya.ru/aviation-news/belorussija-bpla-s-avtomaticheskimi-vzletom-i-posadkoj.html> (Accessed 18 February 2015).
10. Available at: <http://profbpla.ru/#hart> (Accessed 18 February 2015).
11. Available at: <http://www.imagotrackers.com/atol.shtml> (Accessed 18 February 2015).
12. Available at: <http://tams-www.informatik.uni-hamburg.de/people/kong/publications/130322.IROS2013.pdf> (Accessed 18 February 2015).
13. Available at: http://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2012/PAPERS/131.PDF (Accessed 18 February 2015).
14. Available at: <http://www.sncorp.com/pdfs/BusinessAreas/TALS%20Product%20Sheet.pdf> (Accessed 18 February 2015).
15. Available at: <http://www.radiotec.ru/catalog.php?cat=jr5&art=12892> (Accessed 18 February 2015).
16. *Kvetkin V.V., Sviyazov A.V., Smirnov S.V., Kvetkin G.A.* Avtonomnyy navigatsionnyy kompleks dlya robotizirovannykh nazemnykh i letatel'nykh apparatov [Autonomous navigation complex for ground and flying robotic vehicles], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences]*, 2014, No. 3 (152), pp. 234-243.
17. Available at: <http://www.techelements.ru/eletovs-538-1.html> (Accessed 18 February 2015).
18. Global'naya sputnikovaya radionavigatsionnaya sistema GLONASS [Global satellite navigation system GLONASS], Pod red. Kharisova V.N., Perova A.I., Boldina V.A. Moscow: IPRZhR, 1998, 400 p.
19. *Kvetkin G.A., Sviyazov A.V., Smirnov S.V., Shcherbinin V.V., Andrienko V.B., Kryuchkov L.A.* Razrabotka tekhnologii avtomatizatsii posadki letatel'nykh apparatov [Development of automation technology aircraft landing system], *Voprosy oboronnoy tekhniki [Questions of defense technology]*, Series 9, 2012, Issue 1 (253), pp. 36-42.
20. *Kvetkin G.A., Sviyazov A.V., Smirnov S.V., Shcherbinin V.V.* Issledovanie tochnostnykh kharakteristik avtomatizirovannoy sistemy posadki bespilotnykh/distsionno pilo-tiruemykh letatel'nykh apparatov [Study of the accuracy characteristics of the automated system for landing an unmanned/remotely piloted aircraft], *Voprosy oboronnoy tekhniki [Questions of defense technology]*, Series 9, 2012, Issue 1 (253), pp. 43-49.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор П.П. Кравченко.

Щербинин Виктор Викторович – АО «Центральный научно-исследовательский институт автоматики и гидравлики»; e-mail: cniiag@cniiag.ru; 127018, г. Москва, ул. Советской Армии, 5; тел.: 84956006317; начальник научно-технического направления; д.т.н.; с.н.с.

Свиазов Андрей Владимирович – тел.: 84997631119; начальник отдела; к.т.н.

Кветкин Георгий Алексеевич – начальник лаборатории; к.т.н.

Scherbinin Victor Victorovich – Joint Stock Company «Central Scientific & Research Institute of Automatics and Hydraulics»; e-mail: cniiag@cniiag.ru; 5, Sovetskaya Army street, Moscow, 127018, Russia; phone: +74956006317; head of scientific & technical department; dr. of eng. sc.; senior researcher.

Sviyazov Andrey Vladimirovich – phone: +74997631119; head of section; cand. of eng. sc.

Kvetkin Georgy Alekseevich – head of laboratory; cand. of eng. sc.