

Літальні апарати: аеродинаміка, силові установки, обладнання, озброєння та застосування

УДК 629.05

С.В. Герасимов, А.М. Гричанюк, О.О. Журавльов

Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

ДОСЛІДЖЕННЯ ВИСОКОТОЧНИХ СИСТЕМ НАВІГАЦІЇ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ЗА НАЗЕМНИМИ ОРІЄНТИРАМИ

У статті сформульовані основні вимоги до високоточної автоматичної навігації пілотованих і безпілотних літальних апаратів. Обґрунтовані основні недоліки використання супутникової інформації при автоматичній навігації літальних апаратів. Наведені основні характеристики систем інформаційного забезпечення навігації літальних апаратів за наземними орієнтирами на основі спеціалізованих географічних інформаційних систем. Запропонована методика кореляційної обробки зображень, яка стійка до флуктуацій яскравості та дозволяє спростити процес формування еталонних зображень місцевості. Обґрунтовано, що у цій методиці за джерела початкової інформації можуть виступати фотознімки земної поверхні та цифрові карти місцевості. Наведені основні результати практичного застосування запропонованої методики та системи навігації літальних апаратів за наземними орієнтирами.

Ключові слова: літальні апарати, автоматична навігація, еталонні зображення, наземні орієнтири.

Вступ

Постановка проблеми. Високоточна автоматична навігація пілотованих і безпілотних літальних апаратів транспортного або спеціального призначення є одним з актуальних напрямів розвитку прикладної науки. До основних вимог, що пред'являються до високоточних систем навігації літальних апаратів (ЛА), слід віднести [1–2]:

- висока точність;
- автоматичний режим роботи;
- стійкість до дії радіоперешкод;
- всепогодність застосування;
- мінімальна вага та вартість.

У даний час для всепогодної навігації як ЛА, так і наземних транспортних засобів, широко застосовуються приймачі сигналів супутникових навігаційних систем. Низька вартість і малі вагогабаритні показники подібної апаратури сприяють її повсюдному використанню для навігації малих безпілотних літальних апаратів (БПЛА). На рис. 1 показані БПЛА, які використовуються у народному господарстві, наприклад, для доставки поштових відправлень [3–5].

Проте апаратура прийому супутникової інформації не відповідає вимогам щодо перешкодозахищеності та точності. Крім того, існують обмеження на придбання подібної бортової навігаційної апаратури, здатної функціонувати при високих (більше 500 м/с) швидкостях руху ЛА і висотах польоту більше 20 км.

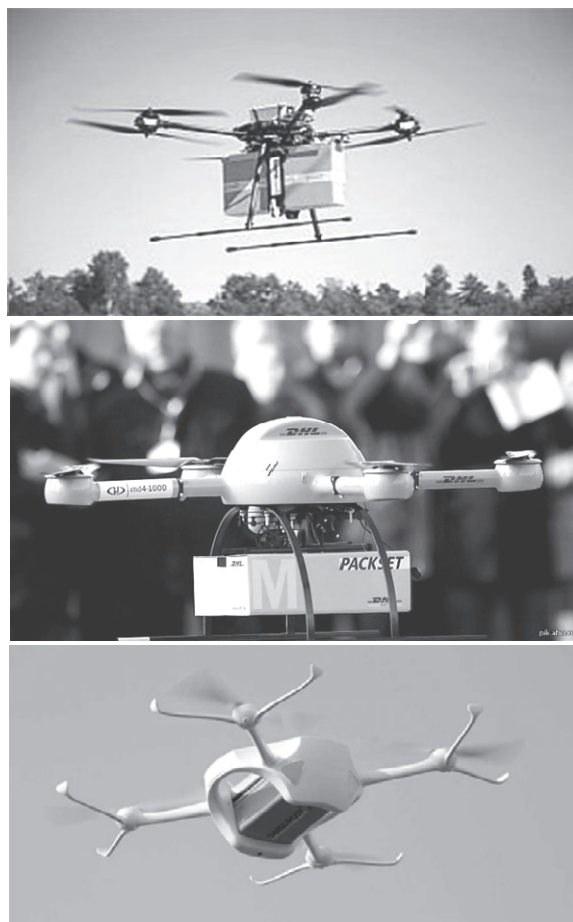


Рис. 1. Безпілотні ЛА для доставки поштових відправлень

Для коректного автоматичного управління швидкісним польотом маневреного ЛА необхідно отримувати з потрібними точністю та тактом (періодом) оновлення інформацію у реальному масштабі часу про значення векторів дійсних прискорень, швидкості, радіус-вектора центру мас, а також вектора кутової швидкості та кутів тангажа, ризику й крену.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ще в 50-х роках ХХ століття було розроблено перші системи навігації ЛА за наземними орієнтирами, що використовують принцип кореляційно-екстремального порівняння зображень наземних орієнтирів, отриманих у процесі польоту ЛА із заздалегідь підготовленими еталонними зображеннями (ЕЗ) цих орієнтирів [6–9].

Починаючи з 70-х років ХХ століття й до теперішнього часу серійно випускаються зразки ракетного озброєння, що мають в своєму складі кореляційно-екстремальні навігаційні системи. Приклади

подібних виробів показані на рис. 2. Усі ці системи оснащені кореляційно-екстремальними навігаційними системами, що здійснюють повністю автономне наведення на ціль. Участь людини – оператора для наведення на ціль не обов’язкова, вся необхідна для автономного наведення інформація міститься в еталонному зображенні, записаному в пам’ять бортового корелятору ще до старту ракети [10–14].

Для даних зразків озброєння, які оснащені кореляційно-екстремальними навігаційними системами, характерні наступні недоліки:

- висока вартість навігаційної апаратури;
- значні вагогабаритні характеристики;
- великі витрати часу (високі трудовитрати) на підготовку необхідного набору ЕЗ (польотного завантаження);
- високі вимоги до кваліфікації обслуговуючого персоналу;
- висока вартість робіт з підготовки еталонної інформації.

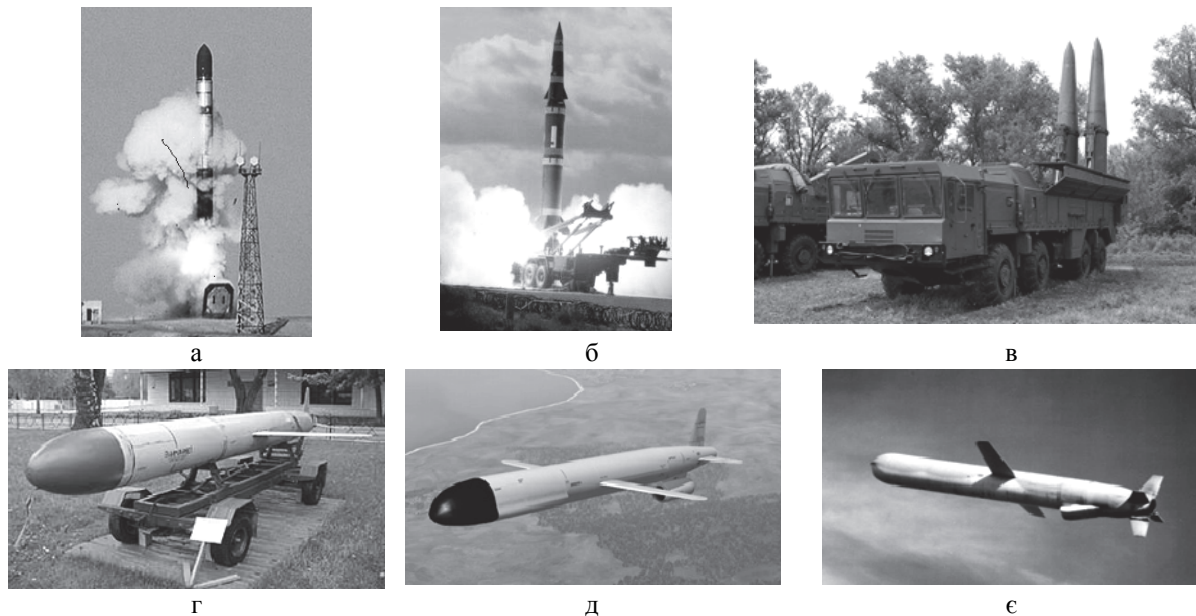


Рис. 2. Ракетне озброєння, яке оснащене кореляційно-екстремальними навігаційними системами:
 а – керований бойовий блок 15Ф678 міжконтинентальної балістичної ракети 15А14;
 б – балістична ракета середньої дальності «Pershing-2»; в – оперативно-тактична ракета «Искандер»;
 г – крилата ракета Х-55; д – крилата ракета Х-65; е – крилата ракета ВGM-109 «Tomahawk»

Обов’язковою умовою успішної роботи подібної системи високоточної навігації є наявність системи інформаційного забезпечення, здатної в стислі терміни сформулювати ЕЗ високої якості, що дозволяє здійснювати надійну ідентифікацію наземних орієнтирів в умовах природних і штучних перешкод. Як правило, подібні системи інформаційного забезпечення включають спеціалізовані географічні інформаційні системи (ГІС), доступ до яких може здійснюватися з видалених терміналів з метою оперативного внесення необхідних змін для обліку географічної інформаційної обстановки, що динамічно змінюється.

Отже, розробка та апробація у реальних умовах спеціалізованої ГІС є актуальною науковою задачею. Така ГІС цілком може стати основою відповідної системи інформаційного забезпечення кореляційно-екстремальних систем навігації ЛА.

Виклад основного матеріалу

У даний час досягнутий значний прогрес в електронній і обчислювальній техніці, відбулося її значне здешевлення при збільшених обчислювальних потужностях, набули широкого поширення інформаційні технології, накопичена значна кількість гео-

дезичної інформації (космічні знімки і цифрові карти місцевості), що знаходиться зокрема у відкритому доступі. Всі ці обставини дозволяють спрогнозувати значне розширення застосування кореляційно-екстремальних систем навігації (КЕСН) для автономної навігації ЛА різних типів, зокрема щодо дешевих малогабаритних БПЛА цивільного та військового призначення.

Успіх у вирішенні перерахованих завдань відкриває широкі можливості в області підвищення надійності управління ЛА, у широкому використан-

ні безпілотної авіації в народному господарстві і, у результаті, обіцяє переверт у засобах, формах і способах ведення озброєної боротьби. Остання сфера застосування окрім перспектив зростання експортного потенціалу країни ще й переводить держави, що володіють подібними технологіями, у розряд передових країн, здатних вигравати битви, шляхом ведення безконтактної збройної боротьби, використовуючи роботизовану зброю.

Принцип роботи кореляційно-екстремальної системи наведення пояснюється на рис. 3.

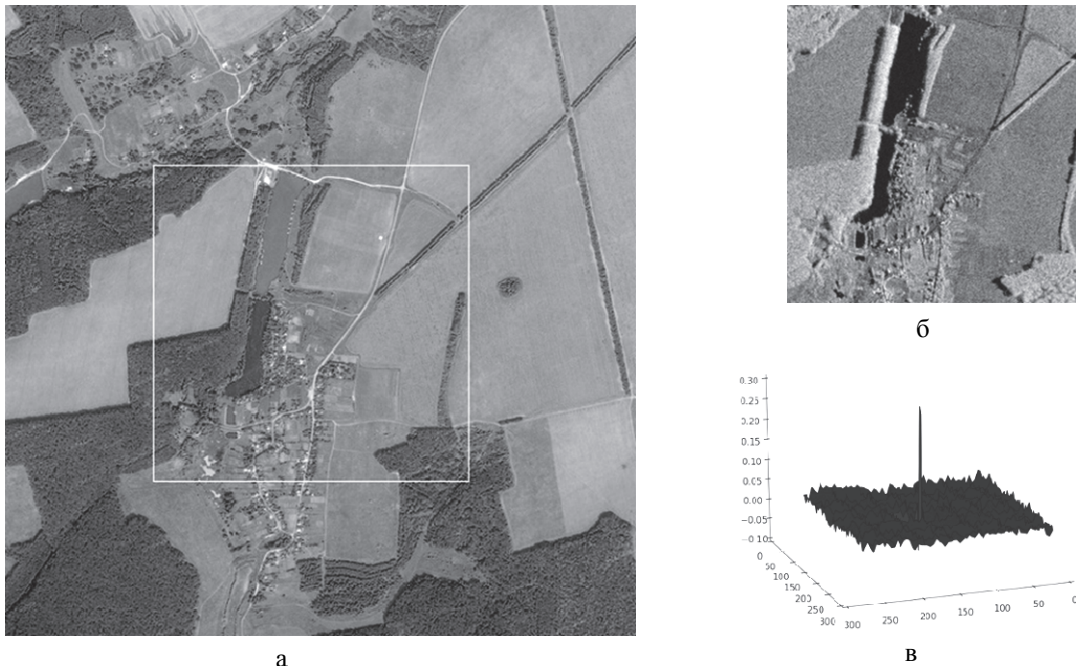


Рис. 3. Принцип роботи кореляційно-екстремальної системи навігації літального апарата

На рис. 3, а показано еталонне зображення місцевості. На рисунку прямокутником виділена ділянка, що потрапила у зону огляду інформаційного датчика поля кореляційно-екстремальної системи. Зовнішній вигляд поточного зображення місцевості для даного просторового положення ЛА показаний на рис. 3, б. Після формування поточного зображення бортовий корелятор здійснює обчислення коефіцієнта взаємної кореляції цього зображення та фрагментів ЕЗ для всіх можливих варіантів розташування цього зображення у межах ЕЗ. Результатом обчислень є двовимірна кореляційна функція, показана на рис. 3, в. За положенням глобального максимуму кореляційної функції обчислюється величина зсувів поточного зображення відносно ЕЗ за бічним відхиленням і дальністю. Розраховані значення у вигляді навігаційних поправок вводяться в основну інерціальну систему управління для розрахунку необхідного маневру для компенсації навігаційних помилок.

При всьому різноманітті проблем, що встають на шляху створення працездатної КЕСН, одну з них можна віднести до найбільш важливих, яка істотно

впливає на правильність визначення координат ЛА. Вона полягає у тому, що навіть при найдосконаліших методиках формування ЕЗ, що враховують велику кількість факторів, яскравості одних й тих же об'єктів на поточних зображеннях ЕЗ, як правило, не збігаються. Подібне явище прийнято називати «флуктуацією яскравості» і воно є специфічним видом перешкод для КЕСН систем. Наявність флуктуацій яскравості спотворює кореляційну функцію, може привести до виникнення помилкового максимуму, тобто до помилкової прив'язки зображень.

Для усунення цієї проблеми запропонована методика кореляційної обробки зображень, яка стійка до флуктуацій яскравості та дозволяє спростити процес формування ЕЗ. При цьому за джерела початкової інформації можуть виступати фотознімки земної поверхні та цифрові карти місцевості.

Для перевірки працездатності запропонованої методики було проведено моделювання роботи кореляційно-екстремальної системи наведення. При цьому за поточні зображення використовувалося зображення радіолокації високої роздільної здатнос-

ті, отримане експериментальним шляхом за допомогою радіолокатора з синтезованою апертурою Ку-діапазона. Зовнішній вигляд зображення радіолокації приведений на рис. 4.

За поточну інформацію використовувались комірні фотознімки, які отримані з сервера компанії Google® (рис. 5), з сервера Bing компанії Microsoft® (рис. 6). Крім того, використовувалось растрове представлення цифрової карти місцевості, яке виконане в псевдокольорах, отримане з сервера компанії Visicom® (рис. 7).

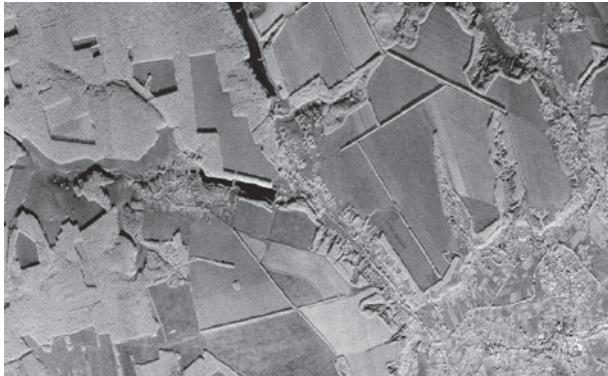


Рис. 4. Радіолокаційне зображення високої роздільної здатності, яке сформоване радіолокатором з синтезованою апертурою Ку-діапазона (листопад 2015 р., роздільна здатність земної поверхні 2 м, розміри 4000x6700 м)



Рис. 5. Космічний знімок (серпень 2013 р., сервер Google)

Усі зображення отримані у різний час і різними технічними засобами, яскравість об'єктів і земних покривів на усіх зображеннях відрізняється й є тільки одна загальна для всіх зображень стійка інформативна ознака – це конфігурація меж об'єктів, меж розділу різних видів земних покривів і типів рослинності.

Після проведення процедур спеціальної обробки і фільтрації зображення, що мають розмір елементу роздільної здатності 4×4 м, використовувалися для моделювання роботи навігаційної системи.

Усі зображення отримані у різний час і різними технічними засобами, яскравість об'єктів і земних

покривів на усіх зображеннях відрізняється й є тільки одна загальна для всіх зображень стійка інформативна ознака – це конфігурація меж об'єктів, меж розділу різних видів земних покривів і типів рослинності.

Після проведення процедур спеціальної обробки і фільтрації зображення, що мають розмір елементу роздільної здатності 4×4 м, використовувалися для моделювання роботи навігаційної системи.



Рис. 6. Космічний знімок (листопад 2014 р., сервер Bing)



Рис. 7. Цифрова карта місцевості (maps.visicom.ua)

Результати моделювання показані у табл. 1.

Середнє значення абсолютної похибки визначення координат склали менше 3 метрів, а для центру ЕЗ похибка нульова. Пояснюється це відсутністю геометричних спотворень у центрі еталону та їх зростанням на краях.

На підставі отриманих результатів моделювання зроблений висновок про високу стійкість запропонованих алгоритмів кореляційно-екстремальної обробки до флуктуації яскравості зображень.

Розроблений макет бортового корелятора на базі малобюджетного мікрокомп'ютера загального призначення з чотирьох ядерним процесором сімейства ARM v.7 (0,9 або 1,0 ГГц).

Результати оцінки часу фільтрації та кореляційної обробки зображень за допомогою макету корелятора та стандартних персональних комп'ютерів

під управлінням операційних систем Windows і Linux на базі процесорів AMD і Intel показані у табл. 2 (оцінювалася продуктивність двох етапного алгоритму фазової кореляції).

Таблиця 1

Значення величини похибки прив'язки (у метрах), отримані в результаті моделювання роботи кореляційно-екстремальної системи навігації ЛА

Величина зсуву поточного зображення, [м]	– 680	– 340	0	340	680
– 680	8,9	4	4	0	4
– 340	8,9	0	0	4	4
0	8,9	0	0	0	4
340	4	4	0	0	5,7
680	5,7	4	0	0	0

Таблиця 2

Результати оцінки часу фільтрації та кореляційної обробки зображень за допомогою макету корелятора та стандартних персональних комп'ютерів

Конфігурація корелятора	ARM v.7 *		Athlon 64 X2		Intel P4 *		Intel E5700	
	0,9 ГГц / 1 ГГц		4800+ 2,5 ГГц		3 ГГц		3 ГГц	
Розміри еталону **	1024× 1024	512× 512	1024× 1024	512× 512	1024× 1024	512× 512	1024× 1024	512× 512
Фільтрація та відокремлення контуру	0,6/0,51	0,14/0,11	0,15287	0,04174	0,22932	0,06064	0,0958	0,02137
Кореляція 1 етап	0,27/0,23	0,06/0,05	0,06351	0,01377	0,10293	0,01909	0,04572	0,00901
Кореляція 2 етап	1,08/0,92	0,25/0,21	0,02589	0,06785	0,42391	0,10133	0,18917	0,04172
Кореляція 1 + 2 етапи	1,35/1,15	0,31/0,26	0,32243	0,08162	0,52683	0,12042	0,23491	0,05074
Сумарний час обробки	1,95/1,66	0,45/0,37	0,4753	0,12336	0,75615	0,18106	0,33074	0,07211

* – під керуванням операційної системи Linux;

** – розміри поточного зображення у два рази менше розміру еталону.

Висновки

Отже, запропонована методика кореляційної обробки зображень з попередньою фільтрацією та виділенням контурів стійка до флуктуацій яскравості зображень. Продуктивність сучасних мікрокомп'ютерів загального призначення достатня для їх застосування у бортових кореляторах літальних апаратів. Таким чином, запропонована методика, яка реалізована на базі мікрокомп'ютерів загального призначення може бути використана для високоточного наведення літальних апаратів, у тому числі БПЛА, як спеціального призначення (у військовій справі), так і для цивільного використання.

Список літератури

1. Власик С.Н. Математическая модель бесплатформенной инерциальной навигационной системы и аппаратуры потребителя спутниковой навигационной системы аэробаллистического аппарата / С.Н. Власик, С.В. Герасимов, А.А. Журавльов // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2013. – Вип. 2 (11). – С. 166-169.
2. Журавлев А.А. Метод расчета прогнозируемой траектории аэробаллистического аппарата / А.А. Журавлев, С.В. Новиченко, С.В. Герасимов // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2014. – Вип. 2 (15). – С. 97-100.
3. Сысыев Ю.Н. Современные военные конфликты, их особенности / Ю.Н. Сысыев // Оборонный заказ. – 2014. – № 12. – С. 4-16.

4. Безпілотні летальні апарати України [Електронний ресурс]. – Режим доступу – <http://militaryreview.su/174-bespilotnye-samolety-vvs-ukrainy.html>.

5. Шамко С.В. Основні особливості застосування Повітряних Сил в сучасних умовах ведення збройної боротьби / С.В. Шамко, О.М. Жарик, В.В. Коваль // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2017. – № 2. – С. 15-18.

6. Журавльов О.О. Method for determining coefficient power error of front resistance missile by means station outwardly trajectory measurements / О.О. Журавльов, О.В. Коломійцев, С.В. Герасимов // Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. – 2017. – № 3. – С. 72-76.

7. Шишацький А.В. Методика управління режимами роботи програмованих засобів радіозв'язку / А.В. Шишацький, О.Г. Жук, Р.М. Животовський // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2016. – № 2. – С. 135-137.

8. STANAG 4609/AEDP-8. NATO Digital Motion Imagery Format. – Режим доступу: www.nato.int/structur/AC/224/standard/4609/4609.htm.

9. STANAG 7023/AEDP-9 NATO Primary Image Format. – Режим доступу: www.nato.int/structur/AC/224/standard/7023/7023.htm.

10. Алешин М.Г. Обоснование основных характеристик антенной системы и параметров управления мощностью передатчика ретранслятора связи на беспилотном летательном аппарате / М.Г. Алешин, С.В. Дьяконов, А.Ю. Сивов // Журнал Радиозлектроники. – 2011. – № 12. – С. 11-21.

11. Юхновський С.А. Часткова методика оцінки відповідності системи зв'язку потребам визначеної системи управління протиповітряною обороною / С.А. Юхновський, О.П. Кулик, І.Л. Костенко // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2017. – № 2. – С. 124-126.

12. Слюсар В. Радиолінії зв'язи с БПЛА. Примеры реализации / В. Слюсар // Електроніка. – 2010. – № 5. – С. 56-60.

13. STANAG 4607/AEDP-7. NATO Ground Moving Target Indicator Format. (GMTIF). – Режим доступу: www.nato.int/structur/AC/224/standard/4607/4607.htm.

14. Оксіюк О.Г. Метод забезпечення безпеки відеоінформаційного ресурсу на основі багаторівневої селективної обробки в телекомунікаційних систе-

мах / О.Г. Оксіюк, Д.С. Гаврилов, П.М. Гуржій, Б.О. Демідов // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2017. – № 1. – С. 46-48.

Надійшла до редколегії 25.08.2017

Рецензент: д-р техн. наук проф. О.І. Тимочко, Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харьков.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОТОЧНЫХ СИСТЕМ НАВИГАЦИИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПО НАЗЕМНЫМ ОРИЕНТИРАМ

С.В. Герасимов, А.М. Гричанюк, А.А. Журавлев

В статье сформулированы основные требования к высокоточной автоматической навигации пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов. Обоснованы основные недостатки использования спутниковой информации при автоматической навигации летательных аппаратов. Приведены основные характеристики систем информационного обеспечения навигации летательных аппаратов по наземным ориентирам на основе специализированных географических информационных систем. Предложена методика корреляционной обработки изображений, которая устойчива к флуктуациям яркости и позволяет упростить процесс формирования эталонных изображений местности. Обосновано, что в этой методике за источники исходной информации могут выступать фотоснимки земной поверхности и цифровые карты местности. Приведены основные результаты практического применения предложенной методики и системы навигации летательных аппаратов по наземным ориентирам.

Ключевые слова: летательные аппараты, автоматическая навигация, эталонные изображения, наземные ориентиры.

RESEARCH OF HIGH-SPEED NAVIGATION SYSTEMS FLYING APPARATUS ON GROUND ORIENTEDERS

S. Herasimov, A. Grichanyuk, A. Zhuravlev

The article outlines the basic requirements for high-precision automatic navigation of manned and unmanned aerial vehicles. The main shortcomings of the use of satellite information for automatic navigation of aircraft are substantiated. The basic characteristics of information support systems for navigation of aircraft by landmarks based on specialized geographic information systems are presented. A method of correlation image processing is proposed, which is resistant to brightness fluctuations and allows to simplify the process of formation of reference images of the terrain. It is substantiated that in this technique, photographs of the earth's surface and digital terrain maps can serve as sources of initial information. The main results of practical application of the proposed technique and the navigation system of aircraft on landmarks are given.

Keywords: aircraft, automatic navigation, reference images, landmarks.