

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ВОЛКОГОН ВІКТОРІЯ ОЛЕКСІЇВНА



УДК 004.42:519.85:351.814.33 (043.3)

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МАТЕМАТИЧНОГО
ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО СИНЕРГЕТИЧНОГО
УПРАВЛІННЯ ПОВІТРЯНИМИ РУХОМИМИ ОБ'ЄКТАМИ**

01.05.03 – «Математичне та програмне забезпечення
обчислювальних машин і систем»

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі інженерії програмного забезпечення Національного авіаційного університету.

Науковий керівник доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Чепіженко Валерій Іванович,
Міжрегіональна академія управління персоналом,
професор кафедри комп'ютерних інформаційних систем та технологій.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Глазунов Микола Михайлович,
Інститут кібернетики ім. В. М. Глушкова НАН України,
провідний науковий співробітник відділу методів недиференційованої оптимізації;

доктор технічних наук, професор
Баранов Георгій Леонідович,
Національний транспортний університет,
професор кафедри інформаційних систем і технологій.

Захист відбудеться « 13 » травня 2021 р. о 15:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.062.19 Національного авіаційного університету (03058, м. Київ, просп. Любомира Гузара 1, ауд. 6.205).

З дисертацією можна ознайомитись у Науково-технічній бібліотеці Національного авіаційного університету за адресою: Україна, 03680, м. Київ, просп. Любомира Гузара 1.

Автореферат розісланий « 13 » квітня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
доктор технічних наук, доцент



Р. С. Одарченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми обумовлена рядом процесів, що спостерігаються сьогодні в аеронавігаційному середовищі.

Повітряний рух зростає в геометричній прогресії, приблизно 5–6 відсотків на рік. Зростання трафіку призведе до збільшення затримок. В основі безпеки повітряного руху лежать методи й алгоритми виявлення та розв'язання конфліктних ситуацій.

Для уникнення такої ситуації необхідно удосконалити існуючі системи керування повітряним рухом на маршруті та покращити алгоритми їх функціонування.

Євроконтролем сформульовано стратегію розвитку організації повітряного руху на найближчі десятиліття. Важливу роль приділяють розробленню нових принципів керування повітряним рухом та організації повітряного простору, що покликані забезпечити високу пропускну здатність мережі маршрутів та можливість виконувати польоти за найбільш ефективними траєкторіями за гарантованого рівня безпеки, якого вимагають нові регламентуючі вимоги Євроконтролю з безпеки польотів (ESARR – Eurocontrol Safety Regulatory Requirement).

Існуючі концепції спрямовані на підвищення безпечного виконання польотів, надання повітряним суднам можливості виконувати польоти в межах спеціально виділеного повітряного простору за довільними маршрутами, але не задовольняють сучасним вимогам безпеки повітряного руху, оскільки відсутня повна автономність руху повітряних кораблів та не забезпечується надійне розв'язання конфліктних ситуацій в повітряному просторі.

Проведений аналіз доступних джерел інформації показує, що існуючі концепції, пов'язані з автономністю польоту, такі як: Free Flight, A³, TCAS, S&A, ADS-B та ASAS є недосконалими. Це обумовлено тим, що системи такого рівня – це багатоаспектні комплексні системи з ієрархічною схемою організації, які містять технічні, організаційні, інформаційні, керуючі, соціотехнічні й ергатичні компоненти. Дані концепції здатні вирішувати тільки часткові проблеми безпеки повітряного руху. Результати останніх досліджень виявили певні існуючі недоліки та обмеження даних концепцій при реалізації автономного польоту.

Тому виникає гостра проблема вдосконалення алгоритмічного забезпечення життєдіяльності майбутньої аеронавігаційної системи на безпечній і ефективній основі.

Саме тому нами запропоновано вдосконалити математичне та програмне забезпечення автоматизованої системи управління повітряним рухом, яке забезпечить автономність кожного повітряного судна (ПС) шляхом синтезу і видачі пілоту ефективних безконфліктних траєкторій руху повітряного корабля в умовах наявності множинних конфліктів з іншими ПС.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційне дослідження відповідає основним науковим напрямкам та найважливіші проблеми фундаментальних досліджень у галузі природничих,

технічних, суспільних і гуманітарних наук Національної академії наук України на 2019–2023 роки, які затверджені постановою Президії національної академії наук України від 30.01.2019 р. № 30:

– напряму 1.2.3.3. «Удосконалення методів формалізації системних задач, приведення їх до форми вирішення в реальних умовах, що характеризуються наявністю великої кількості суперечливих цілей, різних видів невизначеностей і ризиків»;

– напряму 1.2.5.4. «Розроблення методів керування динамічними процесами в умовах невизначеності, розв’язання ігрових задач динаміки, керування групами рухомих об’єктів».

Робота виконана у рамках:

– науково-дослідної роботи № 47/09.01.02 «Програмно-апаратний комплекс моніторингу кібернетичного простору» (шифр «InfoLUX»);

– науково-дослідної роботи «Експертна система ситуаційного синтезу програми технічного обслуговування регіональних транспортних літаків типу АН-32 на базі оптимізаційних нейронних мереж» (шифр «CALS-авіоніка»).

Мета дослідження – удосконалити математичне та програмне забезпечення автоматизованої системи управління рухом повітряних суден в частині запобігання конфліктів в умовах автономного польоту.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Провести аналіз існуючих методів забезпечення автономного руху літаків в умовах конфліктів;

2. Удосконалити метод синтезу віртуальних вимірювачів штучних гравітаційних полів шляхом урахування стохастичних процесів та отримання моделі цих вимірювачів.

3. Розробити метод вейвлет-фільтрації даних з урахуванням аналітичних зв’язків між детермінованими основами руху об’єктів.

4. Провести верифікацію удосконаленого методу шляхом комп’ютерного моделювання.

Об’єкт дослідження – автоматизація математичної обробки даних руху повітряних суден у системі траєкторного управління рухомими об’єктами в умовах автономного польоту.

Предмет дослідження – математичні методи обробки даних автоматизованої системи прийняття рішень і розв’язання конфліктів літаків в повітряному просторі в умовах автономного польоту.

Методи дослідження. У дисертаційній роботі використані методи математичного та системного аналізу, теорії імовірності та математичної статистики, теорії управління динамічними системами, вейвлет-обробка сигналів, фільтрація аналітично зв’язаних часових послідовностей та методи комп’ютерного моделювання.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у наступному:

– отримав подальший розвиток метод синтезу віртуальних вимірювачів штучних гравітаційних полів шляхом урахування стохастичних процесів та отримання моделі цих вимірювачів;

– вперше запропоновано вирішувати задачу синергетичного управління рухом з урахуванням стохастичності оцінюваних параметрів;

– вперше запропоновано метод вейвлет-фільтрації даних з урахуванням аналітичних зв'язків між їх детермінованими основами. Це дозволяє підвищити точність розрахунків математичного та програмного забезпечення автоматизованого синергетичного управління повітряними рухомими об'єктами в середньому на 50 %.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що робота має важливе практичне значення в сенсі підвищення ефективності математичного та програмного забезпечення автоматизованої системи управління повітряним рухом та розв'язання задачі забезпечення безпеки польотів.

Саме вдосконалення математичних методів, алгоритмів розрахунків та програм процесорної обробки сигналів і даних дозволяє вирішити задачу забезпечення необхідного рівня безпеки польотів у системі управління повітряним рухом в умовах автономного польоту.

Результати роботи впроваджені:

– у навчальний процес Національного авіаційного університету. Розроблене математичне та програмне забезпечення використано при проведенні практичних та лабораторних робіт з математичного аналізу програмного забезпечення та проектування інтелектуальних систем;

– у діяльність науково-виробничого центру безпілотної авіації «Віраж». Проведено тестування створеного програмного забезпечення на пробних польотах безпілотної літального апарату.

Особистий внесок здобувача. Основні положення і результати дисертаційної роботи, які виносяться на захист, отримані автором самостійно. Роботи [9, 12, 14, 16] виконані без співавторів. Деякі роботи виконані у співавторстві з науковим керівником та іншими науковцями. Зокрема, здобувачу належать: аналіз існуючих концепцій розвитку системи управління повітряним рухом [1]; особливостей формалізації віртуальних вимірювачів з різними принципами функціонування (математичний маятник та вимірювач градієнту силового поля) [2]; аналіз проблеми виникнення авіаційних подій трьох категорій (CFIT, LOC, і RWY) [3]; створення методології забезпечення і підтримки гарантованого рівня безпеки майбутніх польотів [4]; розроблення принципової схеми роботи метода інфрачервоної ехо-імпульсної дефектоскопії для контролю елементів конструкцій планера літака [5]; розроблено метод побудови сплайнів [6, 7, 8]; розроблено інформаційно-аналітичний діагностичний комплекс для оцінювання дій оператора [10]; аналіз методів розв'язання конфліктів повітряних суден [11]; розроблення методики визначення стійкості ергатичної системи «Диспетчер-Пілот-Повітряний корабель» [13]; порівняльний аналіз ефективності синергетичних регуляторів [15]; зібрання статистичних, математично оброблених даних факторів ризику [17]; аналіз судових авіаційних експертиз в Україні [18]; аналіз сфери застосування штучного інтелекту в управлінні рухом літаків [19].

Апробація результатів дисертації. Результати досліджень доповідалися і обговорювалися на міжнародних науково-технічних конгресах, конференціях, семінарах, серед яких:

- літня школа молодих учених та студентів «Сучасні проблеми авіакосмічних технологій та систем» (Житомир, ЖВІ ім. С. П. Корольова, 2013);
- 15 міжнародна науково-практична конференція «Ринок послуг комплексних транспортних систем та прикладні проблеми логістики» (Київ, 2013);
- Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених і студентів «Проблеми навігації і управління рухом» (Київ, 2013);
- XI Міжнародна науково-технічна конференція «АВІА-2013» (Київ, НАУ, 2013);
- XIV міжнародна науково-практична конференція молодих учених і студентів «Політ. Сучасні проблеми науки» (Київ, НАУ, 2014);
- Науково-методична конференція «Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM» (Київ, НАУ, 2014);
- Всеукраїнська науково-технічна конференція «Проблеми навігації і управління рухом» (Київ, НАУ, 2015);
- XV міжнародна науково-практична конференція молодих учених і студентів «Політ. Сучасні проблеми науки» (Київ, НАУ, 2015);
- XII міжнародна науково-технічна конференція «АВІА–2015» (Київ, НАУ, 2015);
- Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих учених і студентів (Київ, НАУ, 2019);

Публікації. Основні результати дисертації опубліковано в 19-ти друкованих наукових працях: 4-х наукових статтях у фахових виданнях, 4-х статтях у виданнях, що індексуються у міжнародних наукометричних базах, а також 11 тезах наукових конференцій.

Структура роботи. Робота складається зі списку скорочень, вступу, трьох розділів, висновку, списку літератури і додатків. Загальний обсяг – 134 с., включаючи 43 рисунка, 2 таблиць, список використаних джерел 134 одиниць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, визначені мета, задачі та методологічна основа досліджень. Визначено наукову новизну та практичне значення роботи. Показано, яким чином здійснювалась апробація та впровадження результатів.

У **першому розділі** проведено аналіз теоретичних методів, які забезпечують реалізацію концепції автономного польоту

Проведено аналіз методів повітряного руху, розглянута і проаналізована ефективність вибору того, або іншого рішення, розглянуті фактори, від яких залежить безпека повітряного руху.

Результати проведеного аналізу методів розв'язання конфліктів повітряних суден в аеронавігаційному середовищі свідчать про необхідність проведення наукових досліджень спрямованих на удосконалення та розробку

нових методів розв'язання конфліктних ситуацій, які повинні без працювати в умовах висунутих концепціями "Free Flight", "Freeroute", A³ та іншими.

За результатом аналізу існуючих концепцій розвитку системи управління повітряним рухом можливо зробити такі висновки:

1) Концепції покликані одночасно підвищувати безпеку виконання польотів згідно потреб авіакомпаній та спрямовані на надання можливості літакам виконувати польоти в межах спеціально виділеного повітряного простору за довільними маршрутами.

2) Необхідно вдосконалити математичне та програмне забезпечення автоматизованої системи управління повітряним рухом, яке забезпечить автономність кожного повітряного судна шляхом синтезу і видачі пілоту ефективних безконфліктних траєкторій руху повітряного корабля в умовах наявності множинних конфліктів з іншими ПС.

Розглянуто основні концепції синергетичного управління автономним рухом повітряних кораблів в умовах конфлікту: Free Flight, A³, TCAS, S&A, ADS-B та ASAS. При збільшенні автономності повітряного судна частину функцій з організації та управління повітряним рухом і забезпечення безпечної траєкторії руху повітряних суден переходить до бортових систем літака. У перспективі, при реалізації вказаних концепцій, бортові системи будуть відігравати основну роль у плануванні польоту і забезпеченні безпечної траєкторії. Це потребує розробки нових методів та концепцій, які дозволять здійснювати політ з більшою ефективністю, безпекою та економічністю при збільшенні кількості повітряних кораблів в обмеженому повітряному просторі.

Під автономним польотом надалі будемо розуміти політ, при якому функції та задачі вирішення конфліктів повітряних суден та їх забезпечення безпеки їхнього польоту покладено на автоматизовану систему управління рухом, бортову апаратуру та пілотів.

Однією з сучасних відповідей на такий виклик є значна активізація досліджень в області принципів, моделей і механізмів самоорганізації, а також програмних інструментів для розробки систем, що самоорганізуються.

Тому було впроваджено використання природно-наукових системних підходів як основи для структурної і функціональної організації самого конфліктного середовища, так і для регламентації поведінки в ній динамічних об'єктів.

Самоорганізаційний підхід використовується у вирішенні конфліктних завдань при управлінні повітряним рухом в аеронавігаційній системі. Самоорганізація здійснюється за рахунок індивідуальних дій кожного об'єкта задля досягнення поставленої мети при заданому рівні безпеки, а не через планування, накладене на елементи ззовні. Це є головним завданням програмного забезпечення системи управління рухом.

У **другому розділі** отримано подальший розвиток методу синтезу віртуальних вимірювачів штучних гравітаційних полів з урахуванням стохастичної складової для розв'язання конфліктів зіткнення повітряних кораблів, який дозволяє гарантовано синтезувати та прогнозувати

безконфліктні траєкторії вільного польоту повітряних кораблів за умов мінімізації енергетичних витрат на їхню реалізацію.

Було встановлено, що шляхи вирішення проблеми забезпечення безпечного руху динамічних об'єктів в аеронавігаційній системі (АНС) необхідно шукати у фізичних законах природи. Розглядаючи концепцію «Free Flight», по суті, декларуємо середовище, у якому динамічні об'єкти здійснюють «броунівський рух». З метою забезпечення безпеки руху природно виникає необхідність його упорядкування (управління на структурному, динамічному та функціональному рівнях). Розроблені на сьогоднішній день методи теорії керування не дозволяють повною мірою вирішити дану проблему для систем великої розмірності. Отже, вирішення даної проблеми необхідно шукати в закономірних властивостях і здатностях живої природи до інтеграції та самоорганізації (синергетики).

Найбільш ефективним методом аналізу складної системи управління повітряним рухом, яке дозволяє враховувати всі чинники, що впливають на систему при різних умовах, є математичне моделювання.

З метою аналізу було проведено моделювання віртуальних вимірювачів з різними принципами функціонування. Для цього побудовано імітаційну модель. У нашому випадку це: математичний маятник, його добротність і градієнт.

Запропоновано підхід у якому для вимірювання градієнта штучного силового поля пропонується використовувати віртуальні вимірювачі (ВВ). Вони представляють собою віртуальну динамічну систему схожу на модель фізичних маятників, що подаються у вигляді двох віртуальних точок, з'єднаних жорсткою віссю довжиною $r_{мп}$. Одна точка наділена масою m_1 , а інша точка безінерційна і виступає в якості точки підвісу ВВ. Координати точки підвісу ВВ у віртуальному просторі відповідають координатам центру маси динамічного об'єкта в реальному просторі. Підвіс маятника імітує рух літака у повітряному просторі у напрямку матеріальної точки - цілі призначення. Якщо траєкторії двох таких маятників перетинаються, то маятники починають відштовхуватися – це імітація маневру повітряного судна для запобігання зіткненню. Тобто маятники, по суті, показують безконфліктний курс динамічного об'єкту.

Таким чином, ця модель дає змогу прогнозувати траєкторію руху повітряного судна при переміщенні в просторі у кожний момент часу.

Два основних підходи, які існують для вимірювання градієнта або штучного силового поля – це градієнтний метод та математичний маятник. Проведемо аналіз параметрів цих методів для розв'язання задачі вирішення конфліктів.

Розглянемо математичний маятник в силовому полі (рис. 1).

Швидкість загасання коливань пов'язана з добротністю коливальної системи. Добротність характеризує якість коливальної системи тому, чим більша добротність коливальної системи, тим менші втрати енергії в системі за одне коливання. Добротність коливальної системи Q пов'язана з логарифмічним декрементом загасання d .

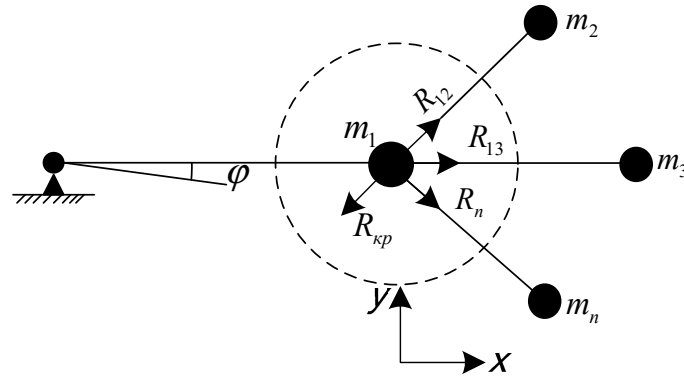


Рисунок 1. Математичний маятник в штучному силовому полі

Рівняння затухаючого маятника має вигляд: (рух уздовж осі x):

$$\frac{d^2 x_1}{dt^2} + 2\gamma \frac{dx_1}{dt} + \omega_0^2 x_1 = 0, \quad (1)$$

де γ – постійна затухання; ω_0 – власна частота осцилятора.

Основним параметром демпфірування є добротність осцилятора:

$$Q = \frac{\omega_0}{2\gamma}. \quad (2)$$

Для критичного демпфірування повинна виконуватися умова

$$Q = 0,5 \Rightarrow \omega_0 = \gamma. \quad (3)$$

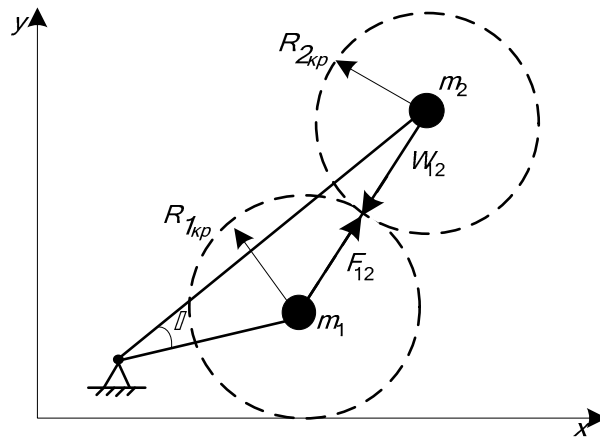


Рисунок 2. Взаємодія маятника з одним гравітуючим тілом: F – сила тяжіння, яка обумовлює цільовий рух об'єкта; W – сила відштовхування, яка обумовлює процес (схему) вирішення конфліктів з іншими об'єктами; m_1 – маса маятника; m_2 – маса цілі (регулюється динамічно залежно від (x_i, y_i) інших об'єктів); R_{1kp} – критичний радіус маятника, μ – коефіцієнт демпфірування

$$m_1 \frac{d^2 x_1}{dt_2} = F_{12} - W_{12} + \mu \frac{dx_1}{dt_1} \quad (4)$$

де μ – коефіцієнт демпфірування.

Сили з якими тіла m_1 та m_2 взаємодіють між собою розраховуються за допомогою наступних формул:

$$F_{12}^x = \frac{Gm_1m_2}{R_{12}^\alpha} \cdot \left| \frac{x_1 - x_2}{R_{12}} \right|; \quad (5)$$

$$W_{12}^x = \frac{Gm_1m_2}{R_{12}^\beta} - \frac{x_1 - x_2}{R_{12}} \cdot R_{\varepsilon\delta}^{(\beta-\alpha)},$$

де α і β – натуральні числа, $\alpha > \beta$.

Підставивши формули (5) у рівняння (4) та скоротивши його, було отримано наступне рівняння:

$$\frac{d^2x_1}{dt^2} - \mu \frac{dx_1}{dt} - Gm_2 \left[\frac{|x_1 - x_2|}{R_{12}^{\alpha+1}} - \frac{|x_1 - x_2| R_{\varepsilon\delta}^{(\beta-\alpha)}}{R_{12}^{\beta+1}} \right] = 0.$$

З отриманого рівняння (6) можна знайти власну частоту осцилятора:

$$\omega_0^2 x_1 = -Gm_2 \left[\frac{|x_1 - x_2|}{R_{12}^{\alpha+1}} - \frac{|x_1 - x_2| R_{\varepsilon\delta}^{(\beta-\alpha)}}{R_{12}^{\beta+1}} \right]. \quad (6)$$

$$\omega_0 = \sqrt{-\frac{Gm_2}{x_1} \left[\frac{|x_1 - x_2|}{R_{12}^{\alpha+1}} - \frac{|x_1 - x_2| R_{\varepsilon\delta}^{(\beta-\alpha)}}{R_{12}^{\beta+1}} \right]} = \sqrt{-\frac{Gm_2 |x_1 - x_2|}{x_1} \cdot \frac{R_{12}^{(\beta+1)} - R_{12}^{(\alpha+1)} \cdot R_{\varepsilon\delta}^{(\beta-\alpha)}}{R_{12}^{(\alpha+1)} \cdot R_{12}^{(\beta+1)}}}$$

Важливим параметром, який характеризує штучне силове поле, є градієнт цього поля. Градієнт показує, наскільки швидко змінюється скалярна величина в тому чи іншому місці цього поля.

Градієнт вводиться як векторна характеристика скалярного поля – тобто області, кожній точці якої відповідає значення певного скаляра. Градієнт – це вектор, що своїм напрямком вказує на напрямок швидкого зростання деякої величини ϕ , значення якої змінюється від однієї точки простору до іншої (скалярного поля), а за величиною (модулем) дорівнює швидкості росту цієї величини в цьому напрямку. Іншими словами можна сказати, що градієнт – це швидкість зміни фізичної величини, але зміни не в часі, а в просторовому напрямку.

Для вимірювання градієнта штучного силового поля пропонується використовувати віртуальні вимірювачі, які являють собою віртуальну динамічну систему, яка схожа на математичний маятник. Для розрахунку градієнта штучного гравітаційного поля використовувались формули:

$$F_\Sigma = (F_F^+ + F_F^-);$$

$$\frac{\Delta F_{\Sigma x}}{\Delta \phi} = Grad_x; \quad \frac{\Delta F_{\Sigma y}}{\Delta \phi} = Grad_y;$$

$$Grad_\Sigma = \sqrt{\Delta F_{\Sigma x}^2 + \Delta F_{\Sigma y}^2};$$

при $R_{12} \succ R_{\varepsilon\delta_goal} + R_{\varepsilon\delta_pend}$

Стале положення осі віртуальних вимірювачів у кожен момент часу визначає кут напрямку градієнта штучного гравітаційного поля.

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} = f\left(\frac{d\varphi}{dt}, \varphi, p\right) = \text{grad}U_{\Sigma};$$

де p – параметри віртуального вимірювача.

Лінії градієнта штучного гравітаційного поля можна розуміти як силові лінії, які характеризують розподіл енергії. Іншими словами, якщо задано штучне силове поле і в кожен момент часу відомі позиції точки підвісу, то лінії градієнта визначають безконфліктні траєкторії руху, які будуть реалізовані динамічними об'єктами в поліконфлікті.

При дослідженні ефективності підходів до формалізації динамічних моделей віртуальних вимірювачів штучних силових полів використовувалися такі критерії ефективності як:

- 1) час обчислення;
- 2) точність позиціонування;
- 3) кількість операцій для обчислення.

Використовуючи математичний маятник без добротності, з добротністю та вимірювач градієнту силового поля було проведено три експерименти, під час яких змінювались значення відстань до цілі від маси маятника R_{i0} , радіуса маятника R_i та маса цілі m_0 при умовах $m_0=1$, $\varphi_0 = 20^\circ$:

$$F, W = f(R_i, R_{i0}, m_0).$$

В першому дослідженні змінювалося значення відстань до цілі від маси маятника R_{i0} при умовах $R_i = \text{const}$, $m_0 = \text{const}$:

$$R_{i0} = [R_{i0 \text{ min}} \dots R_{i0 \text{ max}}],$$

де $R_{i0 \text{ min}} \geq 2R_{\text{ед}}$ при $R_{\text{ед}} = R_{\text{ед_є\text{ц}i}}$;

$$R_{i0 \text{ min}} \geq (R_{\text{ед}} + R_{\text{ед_є\text{ц}i}}) \text{ при } R_{\text{ед}} \neq R_{\text{ед_є\text{ц}i}}.$$

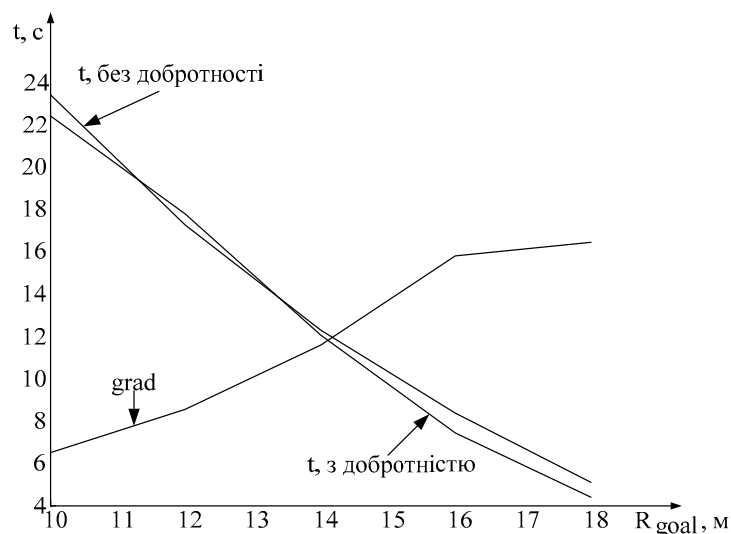


Рисунок 3. Графіки залежності часу обчислення та градієнту силового поля від радіуса цілі

У другому дослідженні змінювалось значення радіуса маятника $R_m = \text{var}$, за умов що $R_{\text{ц}} = \text{const}$, $m_{\text{ц}} = \text{const}$.

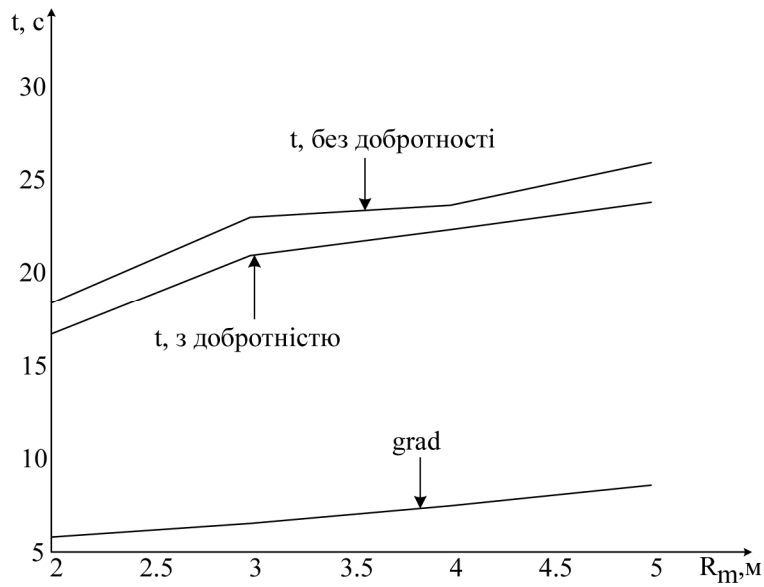


Рисунок 4. Графіки залежності часу обчислення та градієнту силового поля від радіуса маятника

У третьому дослідженні змінювалось значення маси цілі $m_{\text{ц}} = \text{var}$ за умови що $R_{\text{ц}}, R_m = \text{const}$.

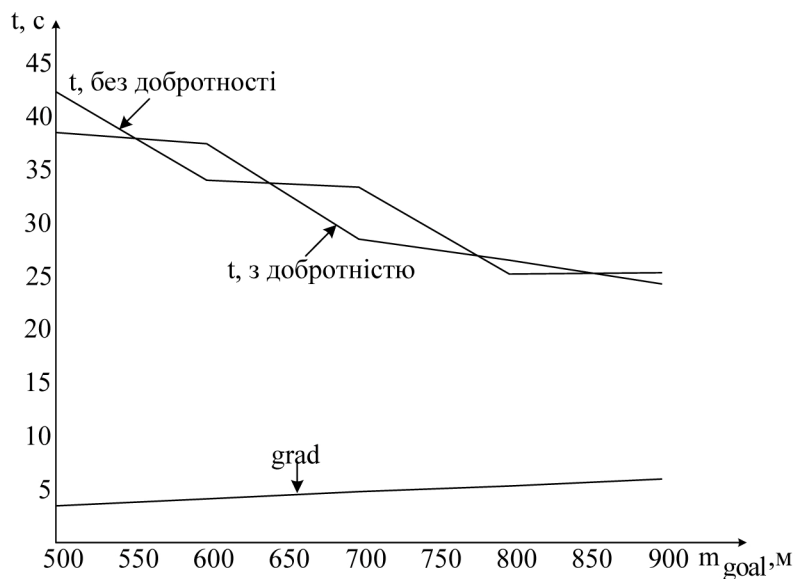


Рисунок 5. Графіки залежності часу обчислення та градієнту силового поля від значення маси цілі

Проведене комп'ютерне дослідження динамічних властивостей віртуальних вимірювачів з різними принципами функціонування (математичний маятник та вимірювач градієнту силового поля) показує, що:

– використання математичного маятника з добротністю є більш ефективним ніж без добротності.

– загальним недоліком методів є великі часові та обчислювальні витрати на визначення градієнта поблизу особливих точок (мінімумів і розривів функцій).

В дисертаційній роботі вирішено питання про налаштування параметрів системи (маятника). При імітаційному моделюванні ми знаємо положення кожного динамічного об'єкту в просторі. Це – детермінована система. Але в реальному житті неможливо точно визначити місце знаходження повітряного судна через похибки вимірювань параметрів. Тому для застосування даного методу у реальній ситуації було вирішено цю задачу з урахуванням стохастичності оцінюваних параметрів.

В роботі проведено аналіз поведінки зв'язаних осциляторів з математичних позицій. За основу взято лінійний осцилятор з лінійним зв'язком.

Лінійний осцилятор можна описати рівнянням виду

$$\ddot{x}_1 + \omega_1^2 x_1 = 0,$$

де x_1 – змінна, що залежить від часу, ω_1 – власна частота. Такий осцилятор може бути лінійно пов'язаний з іншим осцилятором тобто в рівняння лінійних осциляторів можуть входити адитивні члени, лінійні відповідно до x_1 і x_2 :

$$\begin{aligned}\ddot{x}_1 + \omega_1^2 x_1 &= \alpha x_2 \\ \ddot{x}_2 + \omega_2^2 x_2 &= \beta x_1,\end{aligned}$$

де α , β – вагові коефіцієнти рівняння руху відповідно першого та другого маятника.

Таким чином, ця модель дає змогу прогнозувати безконфліктну траєкторію руху повітряного судна при переміщенні в просторі у кожний момент часу.

Третій розділ присвячено вейвлет-фільтрації параметрів математичних маятників з урахуванням аналітичних зв'язків між їхніми детермінованими основами.

Для фільтрації параметрів математичних маятників класичним та запропонованим (з урахуванням аналітичних зв'язків між їхніми детермінованими основами) методами ми використовуємо багатомасштабний аналіз із біортогональним сплайновим вейвлетом восьмого порядку в якості базисної функції.

Використання вейвлетів на сьогоднішній день набуває широкого поширення для фільтрації та попередньої обробки даних при обробці й синтезі різних сигналів, стисканні й обробці зображень, вирішенні задач аналізу стану, прогнозування, розпізнавання образів.

Вейвлети традиційно застосовують в задачах, пов'язаних з обробкою інформації, таких як придушення різного роду шумів та завад, стиснення даних, виявлення короткочасних і глобальних закономірностей.

Проводимо вейвлет-фільтрацію амплітуд стохастичних маятників з урахуванням аналітичних зв'язків між їхніми детермінованими основами з метою підвищення точності оцінки даних.

Функціонал для розрахунку коефіцієнтів вейвлет-фільтрів для стохастичних маятників з урахуванням лінійного зв'язку між ними має вид:

$$\begin{aligned}
\Phi = & \sum_{k=1}^N \left[a_{1, \frac{R}{2}} \times y_{1, k-\frac{R}{2}} + a_{1, \frac{R}{2}+1} \times y_{1, k-\frac{R}{2}+1} + \dots + a_{1,0} \times y_{1,k} + a_{1,1} \times y_{1,k+1} + \dots + a_{1, \frac{R}{2}} \times y_{1, k+\frac{R}{2}} - y_{1,k} \right]^2 + \\
& + \sum_{k=1}^N \left[a_{2, \frac{R}{2}} \times y_{2, k-\frac{R}{2}} + a_{2, \frac{R}{2}+1} \times y_{2, k-\frac{R}{2}+1} + \dots + a_{2,0} \times y_{2,k} + a_{2,1} \times y_{2,k+1} + \dots + a_{2, \frac{R}{2}} \times y_{2, k+\frac{R}{2}} - y_{2,k} \right]^2 + \\
& + \lambda \sum_{k=1}^N \left(a_{1, \frac{R}{2}} \times y_{1, k-\frac{R}{2}} + a_{1, \frac{R}{2}+1} \times y_{1, k-\frac{R}{2}+1} + \dots + a_{1,0} \times y_{1,k} + a_{1,1} \times y_{1,k+1} + \dots + a_{1, \frac{R}{2}} \times y_{1, k+\frac{R}{2}} \right)^2 + \\
& + \omega_1^2 \left(a_{1, \frac{R}{2}} \times y_{1, k-\frac{R}{2}} + a_{1, \frac{R}{2}+1} \times y_{1, k-\frac{R}{2}+1} + \dots + a_{1,0} \times y_{1,k} + a_{1,1} \times y_{1,k+1} + \dots + a_{1, \frac{R}{2}} \times y_{1, k+\frac{R}{2}} \right) - \\
& - \alpha \left(a_{2, \frac{R}{2}} \times y_{2, k-\frac{R}{2}} + a_{2, \frac{R}{2}+1} \times y_{2, k-\frac{R}{2}+1} + \dots + a_{2,0} \times y_{2,k} + a_{2,1} \times y_{2,k+1} + \dots + a_{2, \frac{R}{2}} \times y_{2, k+\frac{R}{2}} \right) \Big]^2 = \min
\end{aligned}$$

де a_{1i} , a_{2i} , – коефіцієнт низькочастотного вейвлет-фільтра (Low); λ – ваговий коефіцієнт, що характеризує жорсткість аналітичного зв'язку; y – вхідні відліки сигналу; ω_1^2 – частота коливань першого маятника; α – ваговий коефіцієнт рівняння руху першого маятника.

На рис. 6. представлено результати фільтрації даних аналітично зв'язаних маятників класичним та запропонованим методами. Показано два маятники: їх детерміновані основи, суміш корисного сигналу з шумом, які відфільтровані двома способами.

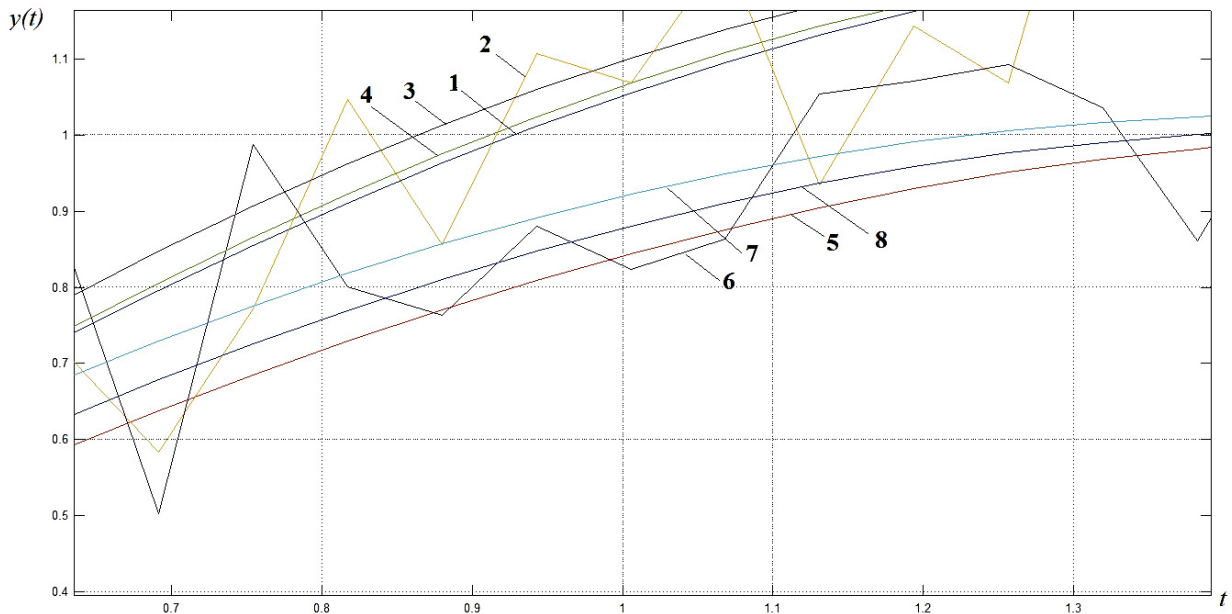


Рисунок 6. Фрагмент графіку фільтрації аналітично зв'язаних маятників: **1** – детермінована основа коливання першого маятника; **2** – суміш корисного сигналу перешкоди, яка спостерігається на вході автоматизованої системи обробки даних; **3** – результат фільтрації класичним методом; **4** – результат фільтрації запропонованим методом. **5** – детермінована основа коливання другого маятника; **6** – суміш корисного сигналу перешкоди, яка спостерігається на вході автоматизованої системи обробки даних; **7** – результат фільтрації класичним методом; **8** – результат фільтрації запропонованим методом

Було проведено статистичне моделювання та було побудовано порівняльну таблицю фільтрації класичним та запропонованим методом (табл. 1). Аналіз показав, що перевага у точності нового методу в рази вища від класичного методу. Показники точності вимірювання польотних даних не погіршують, а навпаки покращуються.

Таблиця 1

Статистичне моделювання для порівняння фільтрації стохастичних маятників

Середньоквадратичне відхилення суміші корисного сигналу від детермінованої основи коливання першого маятника	Середньоквадратичне відхилення відфільтрованої суміші від детермінованої основи коливання першого маятника (класичний метод)	Середньоквадратичне відхилення відфільтрованої суміші від детермінованої основи коливання першого маятника (запропонований метод)	Перевага в точності фільтрації першого маятника	Середньоквадратичне відхилення суміші корисного сигналу від детермінованої основи коливання другого маятника	Середньоквадратичне відхилення відфільтрованої суміші від детермінованої основи коливання другого маятника (класичний метод)	Середньоквадратичне відхилення відфільтрованої суміші від детермінованої основи коливання другого маятника (запропонований метод)	Перевага в точності фільтрації другого маятника
1	2	3	4	5	6	7	8
0,1	0,024	0,019	+26 %	0,1	0,024	0,016	+50 %
0,15	0,036	0,028	+28 %	0,15	0,036	0,023	+56 %
0,2	0,047	0,037	+27 %	0,2	0,047	0,030	+56 %
0,25	0,059	0,046	+28 %	0,25	0,059	0,037	+59 %

Як свідчать дані, наведені в таблиці 1, перевага в точності фільтрації першого маятника створеним методом складає 26–28 відсотків у порівнянні з класичним методом фільтрації. При цьому, точність фільтрації другого маятника розробленим методом на 50–59 відсотків вище від точності класичного методу фільтрації.

Графічне відображення результатів моделювання при середньоквадратичному відхиленні (СКВ) шуму обох маятників показує, що запропоноване математичне та програмне забезпечення дозволяє суттєво виграти у зменшенні СКВ сигналу, що фільтрується. На першому графічному вікні відображено

результати оцінки точності фільтрації даних першого маятника, на другому графічному вікні – другого маятника.

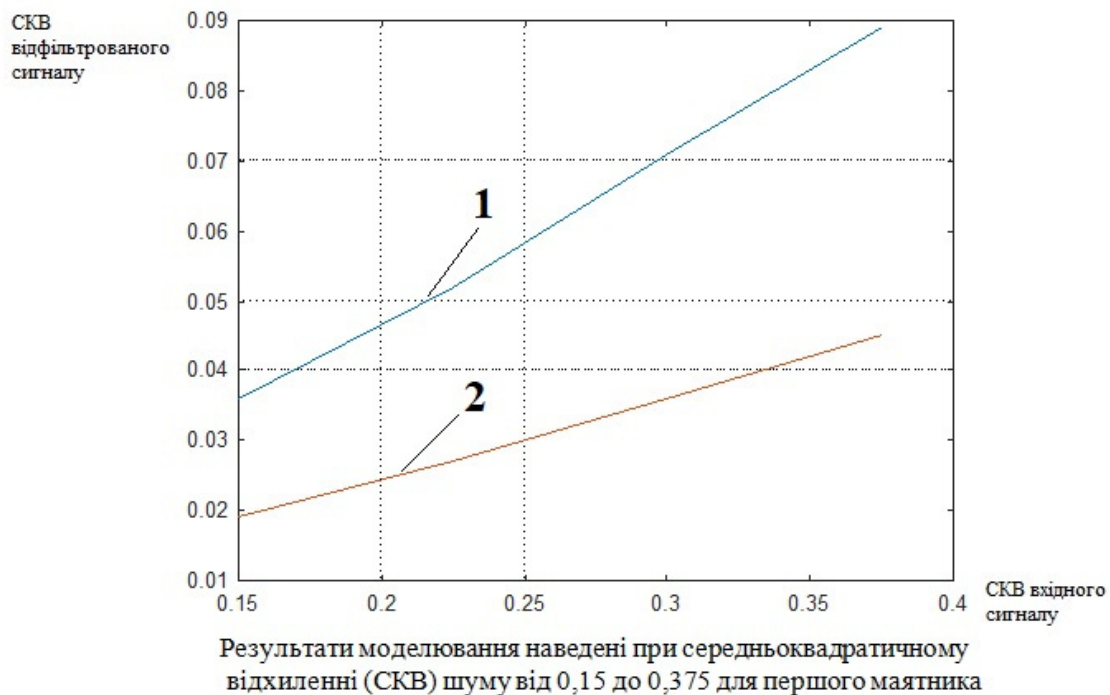
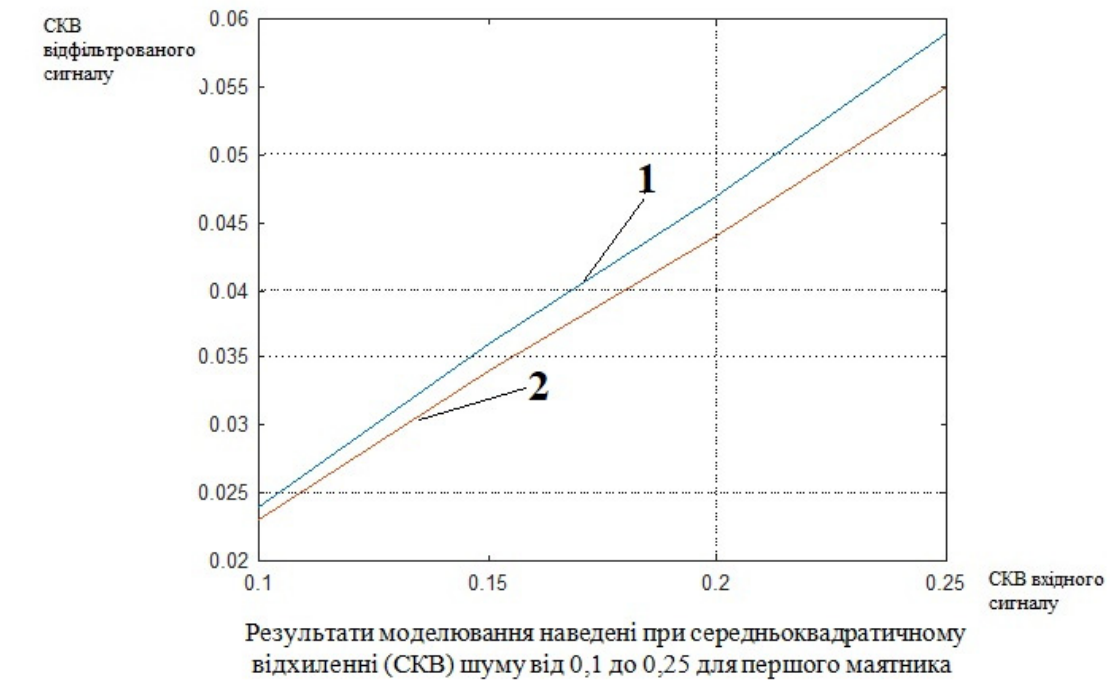


Рисунок 7. Результати моделювання в графічному виді, де: **1** – СКВ відфільтрованого сигналу від детермінованої основи коливання маятника, отримана класичним методом фільтрації; **2** – СКВ відфільтрованого сигналу від детермінованої основи коливання маятника, отримана запропонованим методом фільтрації

Завдяки запропонованому математичному та програмному забезпеченню з'явилася можливість зменшити захисну просторову зону (рис. 8) і цим самим скоротити мінімально допустимий інтервал між ПС та підвищити безпеку польоту.

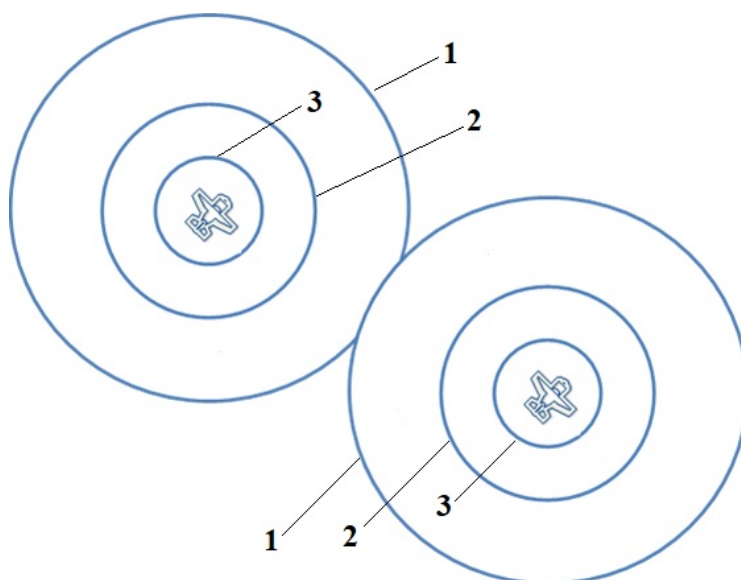


Рисунок 8. Захисна просторова зона (PAZ – Protected Airspace Zone): **1** – для стохастичної постановки задачі; **2** – після класичної фільтрації; **3** – після запропонованої фільтрації

Очікуване збільшення щільності повітряного руху, зміна динаміки відносного руху літаків і зменшення норм ешелонування збільшує ймовірність небезпечного зближення літаків. У цих умовах значно зростає роль систем виявлення і запобігання потенційно конфліктних ситуацій.

Можна зробити висновок, що вейвлет-перетворення з урахуванням аналітичних зв'язків надає більш точну та інформативну картину результатів моделювання та експерименту, оскільки дозволяє більш якісно очистити вхідні дані руху літака від шумів і випадкових спотворень.

ВИСНОВКИ

Основні результати дисертаційного дослідження викладені у висновках, які зводяться до наступних положень.

В дисертаційній роботі вирішена наукова задача, яка полягає в підвищенні ефективності математичного та програмного забезпечення автоматизованих систем синергетичного управління повітряними рухомими об'єктами. З цією метою:

- проведено аналіз особливостей формалізації віртуальних вимірювачів з різними принципами функціонування (математичний маятник та вимірювач градієнту силового поля), що дозволяє враховувати всі чинники, що впливають на систему управління повітряним рухом в різних умовах;

- отримав подальший розвиток метод синтезу віртуальних вимірювачів штучних гравітаційних полів шляхом урахування стохастичних процесів та побудова моделі цих вимірювачів;

- розроблено програмний застосунок в середовищі MatLab, що дозволяє провести розрахунки для побудови імітаційної моделі повітряного судна у просторі в зоні конфлікту та спрощує математичне моделювання для оцінки

параметрів і виявлення похибок розробленого методу, а також порівняння його з класичними методами;

– запропоновано вирішувати задачу синергетичного управління рухом повітряних суден з урахуванням стохастичності оцінюваних параметрів;

– створено програмне забезпечення для автоматизованої системи керування повітряним рухом, що підвищить точність оцінки параметрів та дозволить проектувати безконфліктні траєкторії.

Для розв'язання задачі у новій постановці вперше використано вейвлет-фільтрацію даних з урахуванням аналітичних зв'язків між детермінованими основами руху об'єктів, що дозволяє підвищити точність оцінки характеристик руху об'єктів в повітряному просторі. Це дає можливість скоротити мінімальний допустимий інтервал між повітряними суднами і оптимізувати структуру повітряного простору з метою покращення пропускної здатності та забезпечення безпеки польотів.

Удосконалений метод надає змогу підвищити точність і надійність систем.

Комплексне вирішення даної задачі не тільки принципово важливе, але у теоретичному плані належить до класу завдань підвищеної складності.

Результати дисертації впроваджено у навчальний процес Національного авіаційного університету та у науково-виробничий центр безпілотної авіації «Віраж».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Фахові видання

1. Волкогон В. О. «Роль сучасних концепцій трансформації CNS/ATM систем у забезпеченні автономних польотів повітряних кораблів» / В. О. Волкогон, В. І. Чепіженко / Актуальні проблеми автоматизації та інформаційних технологій»: зб. наук. праць. – Дніпропетровськ.: Ліра, 2015. – Т. 19. – С. 112–120.

2. Volkogon V. Approaches to Formalization of Motion Dynamics of Artificial Force Field Meters / V. Volkogon, V. Chepizhenko / Proceedings of the National Aviation University. – 2016. – № 2. – P. 17–21.

3. Волкогон В. О. Управляющие решения для снижения рисков возникновения авиационных происшествий до приемлемого уровня / В. О. Волкогон, О. М. Алексеев / Вісник Інженерної академії України. – 2016. – № 4. – С. 8–12.

4. Volkogon V. Karapetian Analysis of world standards of risk management in the context of implementation of aviation activity / V. O. Volkogon, O. M. Alexeiev, R. S. Pechevystyi / Proceedings of the National Aviation University. – 2019. – № 2(79). – P. 28–33.

5. Volkogon V. O. Development of airframe design elements control technique under operational conditions / V. O. Volkogon, O. L. Pusyryov, O. M. Alekseev, V. V. Ushakov / Electronics and Control Systems. – 2016. – № 4(50). – P. 46–50.

6. Volkohon V. Method for Improving the Efficiency of Online communication Systems Based on Adaptive Multiscale Transformation / V. Volkohon, O. Kolganova;

L. Tereshchenko; A. Sitko; V. Kravchenko; S. Kornienko; Z. V. Vasylieva-Shalamova, M. Shutko, V. Shutko / Published in: 2020 10th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT) – Conference Proceedings – P. 824–829.

7. Kolganova O. Method of Adaptive Multi-scale Transformation for Image Data Compression / O. Kolganova, L. Tereshchenko, A. Sitko, V. Kravchenko, V. Volkogon, Zh. V. Vasylieva-Shalamova, V. Shutko / Advances in Intelligent Systems and Computing V. Selected Papers from the International Conference on Computer Science and Information Technologies, CSIT 2020, September 23–26, 2020, Zbarazh, Ukraine. – P. 743–757.

8. V. Volkohon. Mathematical spline processing method for filtering and compressing data / V. Volkohon, O. Kolganova; L. Tereshchenko; V. Kravchenko, V. Shutko, M. Shutko / 2nd International Workshop on Cyber Hygiene & Conflict Management in Global Information Networks, November 30, 2020, Kyiv, Ukraine. – P. 204–214.

Публікації, що додатково відображають результати дисертаційного дослідження

9. Волкогон В. О. Програмне забезпечення для позиціонування у приміщенні Сучасні проблеми науки / В. О. Волкогон / X міжнародна науково-практична конференція студентів та молодих учених, квітень, 2012 : тези доп. – К., 2012. – С. 14.

10. Волкогон В. О. Підходи до діагностики емоційного стану людини-оператора «Сучасні проблеми авіакосмічних технологій та систем» / В. О. Волкогон, Т. Ф. Шмельова / Літня школа молодих учених та студентів, 17–21 червня 2013 р. : тези доп. – К., 2013. – С. 28.

11. Волкогон В. О. Аналіз методів розв’язання конфліктів повітряних суден в аеронавігаційному просторі «Ринок послуг комплексних транспортних систем та прикладні проблеми логістики» / В. О. Волкогон, В. І. Чепіженко / 15 міжнародна науково-практична конференція, жовтень 2013 р.: тези доп. – К., 2013. – С. 215–217.

12. Волкогон В. О. Анализ научных исследований по развитию системы управления воздушным движением в Европе «Проблеми навігації і управління рухом» / В. О. Волкогон / всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених і студентів, 18–20 листопада 2013 р.: тези доп. – К., 2013. – С. 26.

13. Волкогон В. О. Методика діагностики поточного емоційного стану пілота в позаштатних ситуаціях «АВІА-2013» : XI міжнародна науково-техн. конференція, 21-23 травня / В. О. Волкогон, Т. Ф. Шмельова / Тези доп. – К., 2013. – Т. 2. – С. 8.53–8.56.

14. Волкогон В. О. Градієнтна модель віртуального вимірювача штучного силового поля «Політ. Сучасні проблеми науки»: XIV міжнародна науково-практична конференція молодих учених і студентів, 2–3 квітня 2014 р.: тези доп. – К., 2014. – С. 22.

15. Волкогон В. О. Сравнительный анализ эффективности синергетических регуляторов для предотвращения столкновений воздушных судов «Проблеми

розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM»: науково-технічна конференція, 17–19 листопада, тези доп. / В. О. Волкогон, В. І. Чепіженко. – К., 2014. – С. 77.

16. Волкогон В. О., Порівняння функціональних параметрів вимірних штучних силових полів «Проблеми навігації і управління рухом»: всеукр. науково-техн. конференція, 23–25 листопада 2015 р.: тези доп. – К., 2015. – С. 9.

17. Волкогон В. О. Підтримання рівня безпеки польотів на прийнятному рівні «Політ. Сучасні проблеми науки»: XV міжнародна науково-практична конференція молодих учених і студентів, 8–9 квітня 2015 р.: тези доп. / В. О. Волкогон, О. М. Алексеєв. – К., 2015. – С. 60.

18. Волкогон В. О. Необходимость создания центра судебных авиационных экспертиз в Украине «АВИА-2015»: XII міжнародна науково-технічна конференція, 28–29 квітня 2015 р.: тези доп. / В. О. Волкогон, О. М. Алексеєв. – К., 2015. – С. 7.54–7.57.

19. Волкогон В. О. Штучний інтелект в управлінні рухом літака Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих учених і студентів 20–21 листопада 2019 р.: тези доп. / В. О. Волкогон, Б. В. Селентій. – К., 2019. – С. 11.

АНОТАЦІЯ

Волкогон В. О. Підвищення ефективності математичного забезпечення автоматизованого синергетичного управління повітряними рухомими об'єктами. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.03 – «Математичне та програмне забезпечення обчислювальних машин і систем» – Національний авіаційний університет, Київ, 2021.

Розроблено математичне та програмне забезпечення для підвищення ефективності автоматизованої системи управління повітряним рухом та розв'язання задачі забезпечення безпеки польотів. Це дозволяє з єдиних системних позицій синтезувати безконфліктне траєкторне управління повітряними суднами засобами автоматизованої системи обробки інформації.

Сформульовано задачу оцінки параметрів руху повітряних суден у стохастичній постановці.

Для розв'язання задачі у новій постановці вперше використано вейвлет-фільтрацію даних з урахуванням аналітичних зв'язків між детермінованими основами руху об'єктів, що дозволяє підвищити точність оцінки характеристик руху об'єктів в повітряному просторі. Це дає можливість скоротити мінімальний допустимий інтервал між повітряними суднами і оптимізувати структуру повітряного простору з метою покращення пропускної здатності та забезпечення безпеки польотів.

Збільшується точність і надійність систем.

Ключові слова: програмне забезпечення, автоматизована система обробки польотних даних, вейвлет-фільтрація, математичний маятник, аналітичний зв'язок.

АННОТАЦИЯ

Волкогон В. А. Повышение эффективности математического обеспечения автоматизированного синергетического управления воздушными подвижными объектами. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.05.03 – «Математическое и программное обеспечение вычислительных машин и систем». – Национальный авиационный университет, Киев, 2021.

Разработаны математическое и программное обеспечение для повышения эффективности автоматизированной системы управления воздушным движением и решения задачи обеспечения безопасности полетов. Это позволяет с единых системных позиций синтезировать бесконфликтное траекторное управление воздушными судами средствами автоматизированной системы обработки информации.

Сформулирована задача оценки параметров движения воздушных судов в стохастической постановке.

Для решения задачи в новой постановке впервые использовано вейвлет-фильтрацию данных с учетом аналитических связей между детерминированными основами движения объектов, что позволяет повысить точность оценки характеристик движения объектов в воздушном пространстве. Это дает возможность сократить минимальный допустимый интервал между воздушными судами и оптимизировать структуру воздушного пространства с целью улучшения пропускной способности и обеспечения безопасности полетов.

Увеличивается точность и надежность систем.

Ключевые слова: программное обеспечение, автоматизированная система обработки полетных данных, вейвлет-фильтрация, математический маятник, аналитическая связь.

SUMMARY

Volkogon V. Improving the efficiency of mathematical support for automated synergetic control of aircrafts. – manuscript copyright.

Mathematical support efficiency improving for automated synergetic control of aircraft vehicles.

Thesis for the degree of candidate of technical sciences in specialty 01.05.03 – "Mathematical and software support of computing machines and systems". – National Aviation University, Kiev, 2021.

Mathematical and software support has been developed in order to improve the automated air traffic control system efficiency and solve the problem of flight operating safety.

This allows from the only system positions to synthesize aircraft conflict-free trajectory control by means of the automated information processing system.

The task of estimating aircraft movement parameters in a stochastic setting is formulated.

To solve the problem in a new formulation, the data wavelet filtering was used for the first time, taking into account the analytical relationships between the deterministic foundations of the objects movement, that enables to increase the accuracy of assessing the objects movement characteristics in the airspace.

This enables to reduce the minimum acceptable interval between aircraft and optimize the airspace structure in order to improve throughput and ensure flight safety.

The accuracy and reliability of the systems increases.

Key words: software, automated flight data processing system, wavelet filtering, mathematical pendulum, analytical connection.

Підп. до друку 12.04.2021. Формат 60x84/16. Папір офс.
Офс. друк. Ум. друк. арк. 1,16. Обл.-вид. арк. 1,25.
Тираж 100 пр. Замовлення № 68-1.

Видавець і виготівник
Національний авіаційний університет
03680. Київ – 58, проспект Любомира Гузара, 1

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 977 від 05.07.2002