

В. Б. Тараненко<sup>1</sup>, Р. А. Лимаренко<sup>1</sup>, В. О. Топольніков<sup>1</sup>, В. О. Яценко<sup>2</sup>, Є. В. Мартиш<sup>2</sup>, О. Г. Меланченко<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Міжнародний центр «Інститут прикладної оптики» Національної академії наук України, Київ

<sup>2</sup> Інститут космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України, Київ

<sup>3</sup> Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», Дніпропетровськ

## СТВОРЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ СТИКУВАННЯ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ НА АКТИВНИХ ОПТИЧНИХ МАРКЕРАХ ТА ЇЇ ЛАБОРАТОРНЕ МАКЕТУВАННЯ

*Проведено аналітичний огляд наявних сьогодні та перспективних систем зближення і стикування космічних апаратів. Особливу увагу приділено оптичним навігаційним сенсорним системам для останніх стадій зближення, коли відстань між космічними апаратами не перевищує 100 м. Для збільшення точності визначення кутових координат космічних апаратів запропоновано використовувати активні оптичні маркери і методи розпізнавання оптичних образів. Проаналізовано також можливості збільшення точності визначення відстані між космічними апаратами при використанні методів лазерної локації. Сформульовано вимоги до лабораторних експериментів.*

**Ключові слова:** зближення і стикування, активні маркери, ЛІДАР.

У рамках Цільової комплексної програми Національної академії наук України з наукових космічних досліджень на 2012—2016 рр. у Міжнародному центрі «Інституті прикладної оптики» НАН України спільно зі спеціалістами Інституту космічних досліджень НАН України та ДКА України та ДП «КБ «Південне» ім. М. К. Янгеля виконується робота, присвячена створенню інтелектуальної системи керування процесом стикування космічних апаратів (КА).

Порівняння навігаційних сенсорних систем, які застосовуються для вимірювання в реальному масштабі часу положення КА в процесі їхнього зближення і стикування (особливо в автоматичному режимі), показує, що вони мають власні фундаментальні труднощі. Оцінка положення КА є функцією його геометрії, умов середовища, лінії зору, сенсорних характеристик, можливостей алгоритму обробки та відповідної комп'ютерної платформи. У роботах [1—4] зроблено аналітичний огляд систем зближення і

стикування, таких як «Space Vision System», яка використовується НАСА для стикування з МКС, «Курс» та «Курс-НА» (Росія), «TriDAR Autonomous Rendezvous & Docking System» (Канада) і близьких до них систем керування відносним рухом КА на малих відстанях. Розглянуто також перспективні системи, які перебувають у стадії інженерної розробки.

Огляд сучасних стандартів зближення і стикування виявив особливе положення та значущість останніх фаз цього процесу, коли відстань між КА не перевищує 100 м. Огляд обмежених процесами стикування низькоорбітальних КА, але певні елементи запропонованої системи дозволять провести стикування з поверхнею малих космічних тіл (астероїдів). У запропонованій нами системі суттєвим моментом є наявність компонентів, які вимірюють орієнтацію КА з різною кількістю ступенів вільності в залежності від відстані між КА. Початковою є інформація, яка надходить від джерел на борту КА. За такі джерела ми пропонуємо спеціальні маркери, розміри яких, геометричні параметри взаємного положення та

оптичні параметри (маркери є оптично активними) використовуються як первісні виміри.

Активні оптичні системи з маркерами (АОСМ) порівняно з пасивними точніші та мають можливість охоплення більшої робочої зони. Крім того, джерела світла можуть бути імпульсними, що дає можливість захоплення значної кількості маркерів, які перебувають ближче один до одного. Саме в них можливе одночасне використання спектральної та поляризаційної сепарації зображень маркерів для їхньої подальшої обробки. Серед сучасних джерел вимогам щодо координатних вимірів та до бортової апаратури найкращий набір параметрів мають твердотільні лазери з довжиною хвилі понад 1.4 мкм. Для них можлива робота як в автоматичному режимі, так і в змішаному, за участю оператора. Обраний діапазон довжин хвиль відповідає вимогам безпеки до зору людини. Фази стикування потребують середньої потужності, і пропонувані джерела задовольняють цим вимогам. До безсумнівних переваг такої системи належать: висока ймовірність правильного знаходження та розпізнавання КА (як мішені), малі масо-габаритні характеристики та робота в реальному часі. Запропонована система джерел забезпечує також стійкість до змінності яскравості та геометрії об'єктів спостереження і місця їхнього розташування. Використання АОСМ для керування відносним рухом КА дозволяє вирішити цю проблему при висоті польоту КА більш ніж 2000 км, де використання супутникових радіонавігаційних систем (GPS, Galileo та ін.) для визначення параметрів руху є малоефективним.

Аналіз перспективних розробок дає можливість визначити необхідність створення резервних систем для останніх фаз зближення і стикування, таких як незалежна лазерна локаційна система інфрачервоного діапазону спектру. Така система базується на принципах лазерної дальнометрії та інтерферометрії і є необхідною не тільки для високоточних вимірювань відносної дальності і орієнтації КА в реальному часі, але і для прискорення математичної обробки при формуванні команд на керувальні засоби (гальмівні та маневрові двигуни).

Проаналізовано можливості використання методів розпізнавання оптичних образів у сис-

темі стикування космічних апаратів, наведено порівняння сучасних методів класифікації та розпізнавання. Розглянуто такі методи: а) послідовне розпізнавання оптичних зображень КА та маркерів на основі динамічного програмування; б) метод розпізнавання з використанням функцій прийняття рішень; в) розпізнавання оптичних зображень з використанням статистичних методів; г) розпізнавання оптичних зображень на основі найбільш інформативних ознак та динамічного підходу.

Проведена робота дає можливість сформулювати такі вимоги для лабораторних експериментів.

1. Створення лабораторних зразків активних маркерів в обраному інфрачервоному діапазоні, форма яких полегшує їхню ідентифікацію та визначення кутових координат.

2. За заданою формою маркера (у зображенні) необхідно сформувати багаторівневий структурно-топологічний опис образу, який буде достатнім для вирішення задач пошуку, знаходження та розпізнавання знаку (маркера) в широкому діапазоні дальності. В цих умовах обмеженого кутового розрізнення оптичної системи та дискретного характеру представлення зображень, в однозначному представленні образу маркера суттєву допомогу може надати його активний характер з використанням набору робочих частот в інфрачервоному діапазоні та спеціально підібрана форма.

3. Розробка алгоритмів розрізнення та розпізнавання, які здатні надійно працювати в умовах помітної значної перебудови топологічної структури зображення, що виникає внаслідок масштабування зображення при зміні відстані. Додаткові фактори, які утруднюють реалізацію таких алгоритмів, такі: ракурс спостереження маркера може змінюватись у широких межах, а також те, що умови освітлення і фон теж можуть змінюватись. Дія цих факторів буде значно зменшуватись при використанні активних маркерів у вузькому спектральному діапазоні.

4. Розробка алгоритмів вимірювання просторових та кутових координат КА за візирним зображенням відомих стикувальних маркерів.

Ці підходи спрямовані на вирішення задач автоматичного керування відносним рухом КА

у процесі зближення і стикування. Перспективність такого напрямку обумовлена підвищенням надійності і точності вимірювань вектора параметрів відносного руху КА.

Подальші розробки повинні включати: дизайн тривимірної структури маркерів для їхнього надійного виявлення в широкому діапазоні відстаней і кутів огляду; кодування інформації з маркерів для однозначної ідентифікації КА, їхнього положення та орієнтації; резервний канал для правильної роботи навіть при частковій втраті даних; маркери, які виявляються в кожному кадрі без відстеження міжкадрового проміжку, що дозволяє миттєве відновлення від оклюзії або втрати зображення; додатковий вибір матеріалу мішені і розташування зображень для виявлення їх в широкому діапазоні освітленостей; можливість використання декількох маркерів в одній робочій області для підвищення точності визначення положення; розробку підсистеми розпізнавання образів.

Планується продовження робіт зі створення лабораторних зразків твердотільних мікролазерів з діодною накачкою та напівпровідникових лазерів з селективним зворотним зв'язком. Такі лазери є мініатюрними джерелами як неперервного, так і імпульсного когерентного випромінювання інфрачервоного діапазону, які відповідають вимогам до систем космічної лазерної локації, у тому числі для вирішення задач керування процесом зближення і стикування КА на активних оптичних маркерах.

1. Меланченко А. Г. Скоординированное управление поступательным движением КА в кластере линейной архитектуры // Пробл. управления и информатики. — 2014. — № 5. — С. 80—97.
2. Klesh A. T., Cutler J. W., Atkins Ella M. Cyber-physical challenges for space systems IEEE/ACM // Third International Conference on Cyber-Physical Systems. — 2012. — P. 45—53. — DOI 10.1109/ICCPS.2012.13.
3. Martysh E. V., Yatsenko V. O. Spacecrafts automatic docking system with active infrared markers // Bull. Taras Shevchenko Nat.Univ. Ser. Radio Physics and Electronics. — 2013. — N 2 (20). — P. 29—32.
4. Yatsenko V. Modeling and optimization of laser docking system for space satellites // Int. conf. on optimization, control and applications in the information age. — Greece, 2014. — P. 18.

Стаття надійшла до редакції 15.12.14

*V. B. Taranenko<sup>1</sup>, P. A. Lymarenko<sup>1</sup>, V. A. Topolnikov<sup>1</sup>, V. A. Yatsenko<sup>2</sup>, E. V. Martysh<sup>2</sup>, A. G. Melanchenko<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Международный центр «Институт прикладной оптики» Национальной академии наук Украины, Киев

<sup>2</sup>Институт космических исследований Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины, Киев

<sup>3</sup>Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля», Днепропетровск

#### СОЗДАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ СТЫКОВКИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА АКТИВНЫХ ОПТИЧЕСКИХ МАРКЕРАХ И ЕЕ ЛАБОРАТОРНОЕ МАКЕТИРОВАНИЕ

Представлен аналитический обзор существующих и перспективных систем сближения и стыковки космических аппаратов. Особое внимание уделено оптическим навигационным сенсорным системам для последних стадий сближения, когда расстояние между космическими аппаратами не превышает 100 м. Для увеличения точности определения угловых координат КА предложено использовать активные оптические маркеры и методы оптического распознавания образов. Проанализированы также возможности увеличения точности определения расстояния между КА при использовании методов лазерной локации. Сформулированы требования к лабораторным экспериментам.

**Ключевые слова:** сближение и стыковка, активные маркеры, ЛИДАР.

*V. B. Taranenko<sup>1</sup>, R. A. Lymarenko<sup>1</sup>, V. A. Topolnikov<sup>1</sup>, V. A. Yatsenko<sup>2</sup>, E. V. Martysh<sup>2</sup>, O. G. Melanchenko<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>International Center “Institute of Applied Optics” of the National Academy of Science of Ukraine, Kyiv

<sup>2</sup>Space Research Institute of the National Academy of Science of Ukraine and the National Space Agency of Ukraine, Kyiv

<sup>3</sup>Yuzhnoye State Design Office, Dnipropetrovsk

#### INTELLECTUAL CONTROL SYSTEM FOR SPACECRAFT RENDEZVOUS AND DOCKING BASED ON ACTIVE OPTICAL MARKERS AND ITS LABORATORY PROTOTYPING

The existing and emerging systems for the rendezvous and docking of spacecrafts are reviewed. Particular attention is paid to the optical navigation sensor systems at the last stages of the rendezvous process, where the distance between spacecrafts does not exceed 100 meters. The usage of active optical markers and optical pattern recognition methods are proposed in order to increase the measurement accuracy for the spacecraft angular coordinates. The possibility of increasing the measurement accuracy for the distance between spacecrafts by means of the laser ranging techniques is also analyzed. The requirements to the laboratory experiments are specified.

**Key words:** rendezvous and docking, active markers, LIDAR.