

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ



Том 24
2023
№ 12

Рисунки к статье С. С. Граськина, И. Л. Ермолова, С. П. Хрипунова
**«КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ
 ПЛАТФОРМЕННО-МОДУЛЬНОГО
 ПОДХОДА К РАЗРАБОТКЕ
 ПЕРСПЕКТИВНЫХ
 РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ
 КОМПЛЕКСОВ»**



Рис. 1. Схема платформенно-модульного подхода
 Fig. 1. Idea of modular-platform based approach



Рис. 2. Варианты применения базовой платформы «Варан»
 Fig. 2. Application variations of basic platform «Varan»



Рис. 4. Различные полезные нагрузки на базовой платформе Rheinmetall Mission Master (Германия)
 Fig. 4. Various loads on Rheinmetall Mission Master basic platform

Рисунок к статье Е. А. Марчука, А. С. Михайлова, Я. В. Калинина, А. В. Малолетова
**«УПРАВЛЕНИЕ СИЛАМИ НАТЯЖЕНИЯ
 В СИСТЕМЕ ТРОСОВОГО
 ПАРАЛЛЕЛЬНОГО
 РОБОТА»**

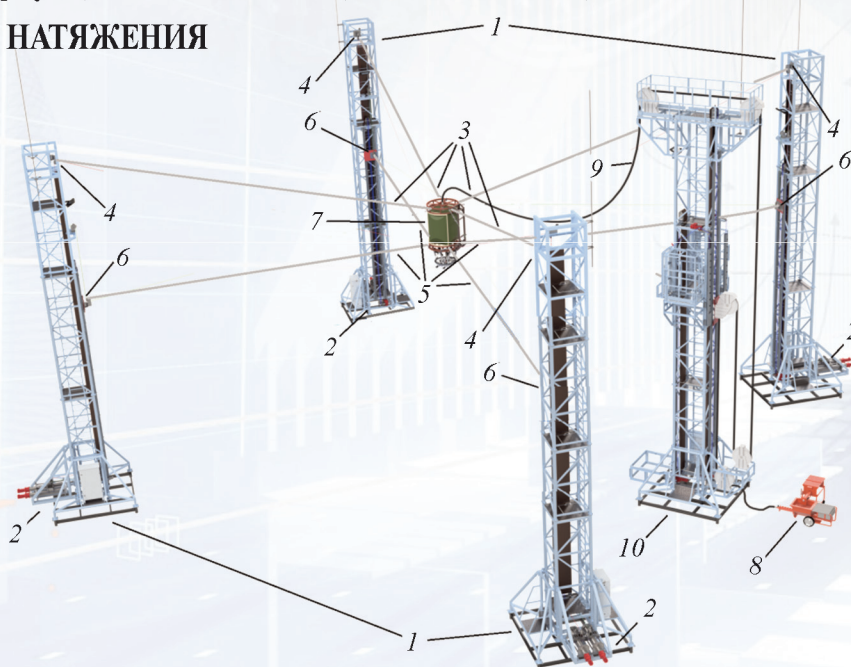


Рис. 1. Схема крупногабаритного тросового параллельного робота для строительства зданий с использованием аддитивных технологий

Fig. 1. The scheme of large-sized cable-driven parallel robot for concrete printing tasks

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

Том 24

2023

№ 12

Издается с 2000 года

ISSN 1684-6427 (Print)

ISSN 2619-1253 (Online)

DOI 10.17587/issn.1684-6427

Главный редактор:
ФИЛИМОНОВ Н. Б., д.т.н.

Заместители главного редактора:
БОЛЬШАКОВ А. А., д.т.н.
ПОДУРАЕВ Ю. В., д.т.н.
ЮЩЕНКО А. С., д.т.н.

Ответственный секретарь:
БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Редакционный совет:
АНШАКОВ Г. П., чл.-корр. РАН
БОЛОТНИК Н. Н., чл.-корр. РАН
ВАСИЛЬЕВ С. Н., акад. РАН
ЖЕЛТОВ С. Ю., акад. РАН
КАЛЯЕВ И. А., акад. РАН
КУЗНЕЦОВ Н. А., акад. РАН
КУРЖАНСКИЙ А. Б., акад. РАН
ПЕШЕХОНОВ В. Г., акад. РАН
РЕЗЧИКОВ А. Ф., чл.-корр. РАН
СЕБРЯКОВ Г. Г., чл.-корр. РАН
СИГОВ А. С., акад. РАН
СОЙФЕР В. А., акад. РАН
СОЛОМЕНЦЕВ Ю. М., чл.-корр. РАН
ФЕДОРОВ И. Б., акад. РАН
ЧЕНЦОВ А. Г., чл.-корр. РАН
ЧЕРНОУСЬКО Ф. Л., акад. РАН
ШЕРБАТЮК А. Ф., чл.-корр. РАН
ЮСУПОВ Р. М., чл.-корр. РАН

Редколлегия:
DORANTES D. J., PhD, Турция
GROUMPOS P. P., PhD, Греция
ISIDORI A., PhD, Италия
KATALINIC B., PhD, Австрия
LIN CH.-Y., PhD, Тайвань
MASON O. J., PhD, Ирландия
ORTEGA R. S., PhD, Франция
SKIBNIEWSKI M. J., PhD, США
STRZELECKI R. M., PhD, Польша
SUBUDHI V. D., PhD, Индия
АЛИЕВ Т. А., д.т.н., Азербайджан
ГАРАЩЕНКО Ф. Г., д.т.н., Украина
БОБЦОВ А. А., д.т.н.
БУКОВ В. Н., д.т.н.
ЕРМОЛОВ И. Л., д.т.н.
ЖУКОВ И. А., д.т.н.
ИЛЬЯСОВ Б. Г., д.т.н.
КОРОСТЕЛЕВ В. Ф., д.т.н.
ЛЕБЕДЕВ Г. Н., д.т.н.
ЛОХИН В. М., д.т.н.
МАГОМЕДОВ М. Х., д.ф.-м.н.
ПУТОВ В. В., д.т.н.
ПШИХОПОВ В. Х., д.т.н.
РАПОПОРТ Э. Я., д.т.н.
СЕРГЕЕВ С. Ф., д.пс.н.
ФИЛАРЕТОВ В. Ф., д.т.н.
ФРАДКОВ А. Л., д.т.н.
ФУРСОВ В. А., д.т.н.

Редакция:
БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Директор издательства:
АНТОНОВ Б. И.

СОДЕРЖАНИЕ

РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Граськин С. С., Ермолов И. Л., Хрипунов С. П. Концептуальные основы платформенно-модульного подхода к разработке перспективных робототехнических комплексов619

Кабанов С. А., Митин Ф. В. Управление курсовым движением беспилотного автомобиля на основе алгоритма оптимального управления627

Тюленев И. Д., Филимонов Н. Б. Алгоритмизация автоматического управления парковкой беспилотного автомобиля634

Марчук Е. А., Михайлов А. С., Калинин Я. В., Малолетов А. В. Управление силами натяжения в системе тросового параллельного робота643

ДИНАМИКА, БАЛЛИСТИКА, УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Yu W. J., Starinova O. L. Study on Displaced Orbits Below the Moon's South Pole Near L2 Point Based on Solar Sail652

Селезнева М. С. Управление критериями селекции алгоритма самоорганизации в задачах коррекции навигационных систем маневренных летательных аппаратов ...660

УКАЗАТЕЛЬ статей, опубликованных в журнале "Мехатроника, автоматизация, управление" в 2023 г.669

Журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук; журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования, а также в МНБД Scopus и RSCI (на платформе Web of Science).

Информация о журнале доступна по сети Internet по адресу:
<http://mech.novtex.ru>, e-mail: mech@novtex.ru

MECHATRONICS, AUTOMATION, CONTROL

Vol. 24

2023

No. 12

MEKHATRONIKA, AVTOMATIZATSIYA, UPRAVLENIE

Published since 2000

ISSN 1684-6427 (Print) ISSN 2619-1253 (Online)

DOI 10.17587/issn.1684-6427

Editor-in-Chief

FILIMONOV N. B.

Deputy Editors-in-Chief:

BOLSHAKOV A. A.

PODURAEV Yu. V.

YUSCHENKO A. S.

Responsible Secretary:

BEZMENOVA M. Yu.

Editorial Board:

ANSHAKOV G. P.

BOLOTNIK N. N.

CHENTSOV A. G.

CHERNOUSKO F. L.

FEDOROV I. B.

KALYAEV I. A.

KURZHANSKI A. B.

KUZNETSOV N. A.

PESHEKHONOV V. G.

REZCHIKOV A. F.

SCHERBATYUK A. F.

SEBRYAKOV G. G.

SIGOV A. S.

SOJFER V. A.

SOLOMENTSEV Yu. M.

VASSILYEV S. N.

YUSUPOV R. M.

ZHELTOV S. Yu.

Editorial Council:

ALIEV T. A., Azerbaijan

DORANTES D. J., PhD, Turkey

GARASCHENKO F. G., Ukraine

GROUMPOS P. P., PhD, Greece

ISIDORI A., PhD, Italy

KATALINIC B., PhD, Austria

LIN CH.-Y., PhD, Taiwan

MASON O. J., PhD, Ireland

ORTEGA R. S., PhD, France

SKIBNIEWSKI M. J., PhD, USA

STRZELECKI R. M., PhD, Poland

SUBUDHI B. D., PhD, India

BOBTSOV A. A.

BUKOV V. N.

ERMOLOV I. L.

FILARETOV V. F.

FRADKOV V. L.

FURSOV V. A.

ILYASOV B. G.

KOROSTELEV V. F.

LEBEDEV G. N.

LOKHIN V.M.

MAGOMEDOV M. Kh.

PUTOV V. V.

PSHIKHOPOV V. Kh.

RAPOPORT E. Ya.

SERGEEV S. F.

ZHUKOV I. A.

Editorial Staff:

BEZMENOVA M. Yu.

Director of the Publishing House:

ANTONOV B. I.

The mission of the Journal is to cover the current state, trends and prospective development of *mechatronics*, that is the priority field in the technosphere as it combines mechanics, electronics, automatics and informatics in order to improve manufacturing processes and to develop new generations of equipment. Covers topical issues of development, creation, implementation and operation of mechatronic systems and technologies in the production sector, power economy and in transport.

CONTENTS

ROBOT, MECHATRONICS AND ROBOTIC SYSTEMS

Graskin S. S., Ermolov I. L., Khripunov S. P. Conceptual Propositions for Creation of Perspective Robotic Systems based on Platform-Modular Approach 619

Kabanov S. A., Mitin F. V. Development of an Optimal Control Algorithm for the Course Movement of an Unmanned Vehicle 627

Tyulenev I. D., Filimonov N. B. A Algorithmization of Automatic Parking Control of Self-Driving Car 634

Marchuk E. A., Mikhailov A. S., Kalinin Ya. V., Maloletov A. V. On the Problem of Tension Forces Distribution in Cable System of Cable-Driven Parallel Robot 643

DYNAMICS, BALLISTICS AND CONTROL OF AIRCRAFT

Yu W. J., Starinova O. L. Study on Displaced Orbits Below the Moon's South Pole Near L2 Point Based on Solar Sail 652

Selezneva M. S. Control of the Selection Criteria of the Self-Organization Algorithm in the Problems of Correcting the Navigation Systems of Maneuverable Aircraft 660

Information about the journal is available online at:
<http://mech.novtex.ru>, e-mail: mech@novtex.ru

С. С. Граськин¹, д-р техн. наук, проф., GraskinSS@edu.mos.ru,
¹МГТУ им. Н. Э. Баумана (НИУ), г. Москва,
И. Л. Ермолов², д-р техн. наук, проф. РАН, вед. науч. сотр., ermolov@ipmnet.ru,
²ИПМех им. А. Ю. Ишлинского РАН, г. Москва,
С. П. Хрипунов³, д-р техн. наук, проф., вед. науч. сотр., hsp61@ipu.ru,
³ИПУ им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва

Концептуальные основы платформенно-модульного подхода к разработке перспективных робототехнических комплексов*

Активное внедрение робототехники в последнее время считается одним из приоритетных направлений дальнейшего наращивания потенциала для увеличения уровня автоматизации деятельности человека. Полученные на сегодняшний момент достижения в области развития технологий робототехники и практическое подтверждение их состоятельности позволяют рассматривать возможность использования робототехнических средств для решения широкого круга прикладных задач, ранее считавшихся прерогативой человека.

Роботизация как процесс внедрения робототехники предполагает создание высокотехнологичных образцов робототехнических комплексов (РТК), обладающих повышенной автономностью и расширенными функциональными возможностями, что позволяет существенно разгрузить человека, отводя ему роль супервизора при применении РТК.

Необходимым условием обеспечения эффективной роботизации широкого спектра рабочих процессов человеческой деятельности является формирование необходимой среды, способствующей интенсивному созданию и внедрению перспективных, обладающих высоким модернизационным потенциалом образцов робототехники — РТК.

Рассматриваемые в статье вопросы связаны с формированием концептуальных положений по созданию перспективных РТК, направленных на сокращение времени вывода на рынок новых изделий робототехники без ущерба их качеству и с повышенным модернизационным потенциалом. Обсуждаются наиболее важные, по мнению авторов, направления развития современной робототехники и пути создания перспективных РТК. Отмечается необходимость согласованного и сбалансированного продвижения передовых и совершенствование существующих и используемых в робототехнике технологий. Основное внимание уделяется созданию опытно-экспериментальных унифицированных базовых платформ РТК путем внедрения платформенно-модульного подхода к созданию перспективных РТК. Рассматриваются уже действующие примеры применения этого подхода в отечественной и зарубежной робототехнике. Удобным методическим аппаратом на пути реализации предложенного подхода видится использование типовой схемы деления (типовой структуры) РТК, разработанной авторами ранее. Обсуждаются преимущества использования платформенно-модульного подхода при создании перспективных РТК и другие его возможные практические приложения.

Ключевые слова: роботы, роботизация, робототехнические комплексы, типовая схема деления, платформенно-модульный подход

Введение

Робототехнические комплексы (РТК) являются одним из активно развивающихся высокоэффективных технических средств, применяемых в различных сферах человеческой деятельности, начиная от космоса и заканчивая глубинами океанов.

Сложившееся представление о будущем поколении РТК позволило определить приоритетные направления их создания. В качестве основных приоритетных направлений создания перспективных РТК видятся следующие:

- наращивание интеллектуальных возможностей и функционально-ресурсного потенциала;
- повышение автономности действий и обеспечение группового применения;
- улучшение точностных и скоростных характеристик;
- расширение диапазона условий применения и радиуса действий;
- повышение помехозащищенности и криптостойкости каналов связи и управления;
- снижение стоимости;
- уменьшение массогабаритных параметров базовых элементов;
- повышение надежности функционирования и удобства обслуживания;

*Часть работы над данным материалом выполнена по теме государственного задания (№ госрегистрации 123021700055-6).

- обеспечение безопасности и экологичности применения;
- сокращение времени создания и внедрения новых образцов;
- достижение простоты человеко-машинного взаимодействия;
- обеспечение совместимости с существующими и встраиваемости в перспективные организационно-технические (человеко-машинные) системы.

Конструктивно в состав современных РТК как высокотехнологичных технических средств входят разнородные различного конструктивного исполнения и функционального назначения компоненты, созданные с использованием передовых достижений в области электроники, механики, мехатроники, информатики, радиотехники, электротехники, а также смежных с перечисленными областями отраслей науки и технологий, таких как нанотехнологии, кибернетика, микроэлектроника, фотоника, новые композитные материалы, бионика и др. [1].

В связи с этим для получения значимых результатов при создании перспективных РТК необходимо обеспечить согласованное и сбалансированное развитие используемых в робототехнике технологий по перечисленным выше направлениям.

К настоящему времени достаточно полно обновлен и определен перечень ключевых технологий робототехники, инвариантных к разнообразию типов и классов РТК и направленных на создание РТК нового поколения [2]. К ним относятся, прежде всего, ключевые технологии, составляющие основу построения (конструирования) таких компонентов РТК, как:

- источники энергии;
- системы управления;
- средства связи и передачи данных;
- системы навигации и наведения;
- датчики технического состояния;
- сенсорные системы;
- интерфейсы "робот—оператор";
- вычислительные средства;
- приводы и манипуляторы;
- целевая нагрузка;
- средства виртуального моделирования и испытаний.

Комплексное развитие перечисленных ключевых технологий обеспечивает совершенствование не только создаваемых РТК, но и других технических средств.

Кроме вышеуказанных, важнейшими и способствующими дальнейшему развитию

РТК являются технологии, связанные со следующими направлениями:

- способы применения РТК;
- средства и формы защиты РТК;
- комплексирование данных сенсорных устройств РТК;
- управление жизненным циклом РТК;
- самодиагностика и самовосстановление, а в перспективе — и самовоспроизведение элементов и РТК в целом.

Принципы разработки перспективных робототехнических комплексов

Для обеспечения благоприятных условий эффективного развития и ускоренных темпов практической реализации выделенных ключевых технологий в качестве основных принципов роботостроения, прежде всего в области создания перспективных РТК, можно выделить следующие:

1. Разработка и создание опытно-экспериментальных унифицированных базовых платформ РТК модульного типа с открытой архитектурой и возможностью масштабирования и реконфигурации под решаемые задачи для ускоренного освоения и внедрения передовых технологий робототехники.

2. Формирование специальных расчетов из числа специалистов-практиков как потенциальных эксплуатантов новой роботизированной техники для осуществления исследовательской эксплуатации опытно-экспериментальных образцов РТК в целях приобретения практических навыков и оперативного устранения выявленных конструктивно-производственных недостатков.

3. Введение особого порядка создания, испытания и применения опытно-экспериментальных образцов РТК, предусматривающего осуществление исследовательской эксплуатации еще на ранних стадиях жизненного цикла изделий (до серийного выпуска), в интересах:

- оперативной апробации новых ключевых технологий и базовых элементов робототехники, созданных в инициативном порядке, на практике (с продуктивным устойчивым взаимодействием будущих потребителей РТК с их разработчиками) и одновременной детальной отработки в ходе этого вопросов комплексной безопасности применения РТК;
- достоверного оценивания уровня проработки перспективных технологий робототех-

ники, а также впервые появившихся различного рода "ноу-хау", касающихся РТК, путем их тестирования на реальных опытно-экспериментальных образцах с автоматизированной фиксацией результатов с помощью средств объективного контроля;

- ускоренного внедрения РТК в практику с учетом опыта исследовательской эксплуатации экспериментальными расчетами и своевременной их доработки в ходе опытной эксплуатации;
- опережающей (до внедрения в практику) отработки и совершенствования новых форм и перспективных способов применения РТК, наработки навыков действий, а также накопления, обобщения и распространения опыта их эксплуатации;
- углубленного практического обучения операторов РТК, переподготовки и повышения их квалификации, а также развития и дальнейшего совершенствования учебно-методической, лабораторно-экспериментальной и испытательной полигонной базы.

4. Активное использование инструмента "регуляторных песочниц" и отдельных экспериментально-правовых режимов применения РТК для отработки проектов базовых нормативных и правовых положений, а также для накопления практического опыта организации управления и необходимых статистических данных эксплуатации.

5. Разработка комплексных методик проведения испытаний инновационных разработок робототехники, обеспечивающих оперативное осуществление проверок доработанных РТК для снижения риска их морального устаревания, включая методики "виртуальных испытаний", в том числе при модернизации уже имеющихся образцов РТК.

Содержание платформенно-модульного подхода к разработке перспективных робототехнических комплексов

Одним из основных принципов роботостроения в области создания перспективных образцов робототехники, как ранее было отмечено (согласно первому принципу), является изготовление опытно-экспериментальных унифицированных базовых платформ РТК модульного типа с открытой архитектурой.

В качестве возможного способа практической реализации данного принципа является

внедрение платформенно-модульного подхода к созданию перспективных РТК.

Платформенно-модульный подход предполагает (рис. 1, см. вторую сторону обложки) изготовление общей (для определенного класса РТК) базовой платформы, так называемого базового шасси (каркаса) будущего финального изделия и типовых функциональных базовых элементов — отдельных частных модулей с возможностью их конструктивного размещения на общей базовой платформе (на базовом шасси) [3].

Вопросы применения платформенно-модульного подхода изучались в машиностроении, станкостроении [6—8], автомобилестроении, а также робототехнике [9—15].

В качестве примера успешного опыта применения платформенного подхода можно привести мобильный робототехнический комплекс МРТК "Варан" (разработка НИИСМ МГТУ им. Н. Э. Баумана и КЭМЗ), который изначально разрабатывался как РТК разминирования, однако впоследствии на базе этой платформы создавались РТК для тушения пожаров (ВНИИПО МЧС), а также РТК для деактивации местности (ВНИИА им. Духова) (рис. 2, см. вторую сторону обложки).

Схожий подход наблюдается в проекте перспективного робототехнического комплекса Rheinmetall Mission Master (Германия), построенного по платформенно-модульному принципу. Этот РТК представляет собой универсальную дистанционно управляемую платформу, позволяющую размещать широкую номенклатуру целевой нагрузки в интересах выполнения различных задач, ограниченную только грузоподъемностью шасси.

Базовая платформа комплекса (рис. 3) выполнена в виде четырехосной колесной машины с установкой внутри корпуса силового агрегата, аппаратуры управления и наблюдения за



Рис. 3. Базовая платформа Rheinmetall Mission Master (Германия)

Fig. 3. Basic platform by Rheinmetall

дорогой. В верхней части корпуса располагается специальная площадка для установки и крепления необходимого целевого оборудования.

Конструкцией базовой платформы предусмотрены три варианта целевой нагрузки (рис. 4, см. вторую сторону обложки): транспортный, разведывательный, ударный (пулеметно-гранатометный или с реактивной системой залпового огня).

Базовые платформы представляют собой технологически законченные "концепты — конструкторы", на основе которых обеспечивается возможность отрабатывать, прежде всего, комплекс программно-алгоритмических средств перспективных РТК, а также с использованием составных элементов в виде унифицированных узлов — модулей создавать различные модификации РТК. При этом предполагается, что наиболее трудоемкой будет не работа по созданию базового шасси, а работа по его оснащению бортовой авионикой, радио- и оптоэлектронным оборудованием, сенсорами и соответствующим программным обеспечением. Такой подход позволяет обеспечить формирование целевого технологического задела необходимого уровня для создания РТК исходя из пожеланий и в соответствии с требованиями заказчиков.

При создании таких систем целесообразно использовать предложенную в работах [1, 4] типовую схему деления (типовой состав) РТК (рис. 5).

Типовой состав РТК включает робототехническое средство (одно или несколько), пункт управления и контроля (ввода и моделирования заданий) и средства обеспечения и обслуживания.

В свою очередь, робототехнические средства, являющиеся основой РТК, состоят из базовой платформы (носителя целевой нагрузки) и собственно целевой нагрузки, которая определяется исходя из функционального назначения (решаемых задач) РТК.

Базовая платформа может включать следующие основные элементы:

- модуль базовый носитель;
- модуль энергообеспечения;
- модуль управляющий;
- модуль информационный;
- модуль связи и коммуникаций;
- модуль служебный.

Целевая нагрузка состоит из следующих элементов:

- модуль исполнительный;
- модуль установочный;
- модуль управляющий;
- модуль информационный;
- модуль вспомогательный.

Элементы типовой схемы деления очевидным образом связаны с ключевыми технологиями робототехники, при этом все ключевые технологии находят свое применение в соответствующих базовых элементах типовой схемы деления РТК.

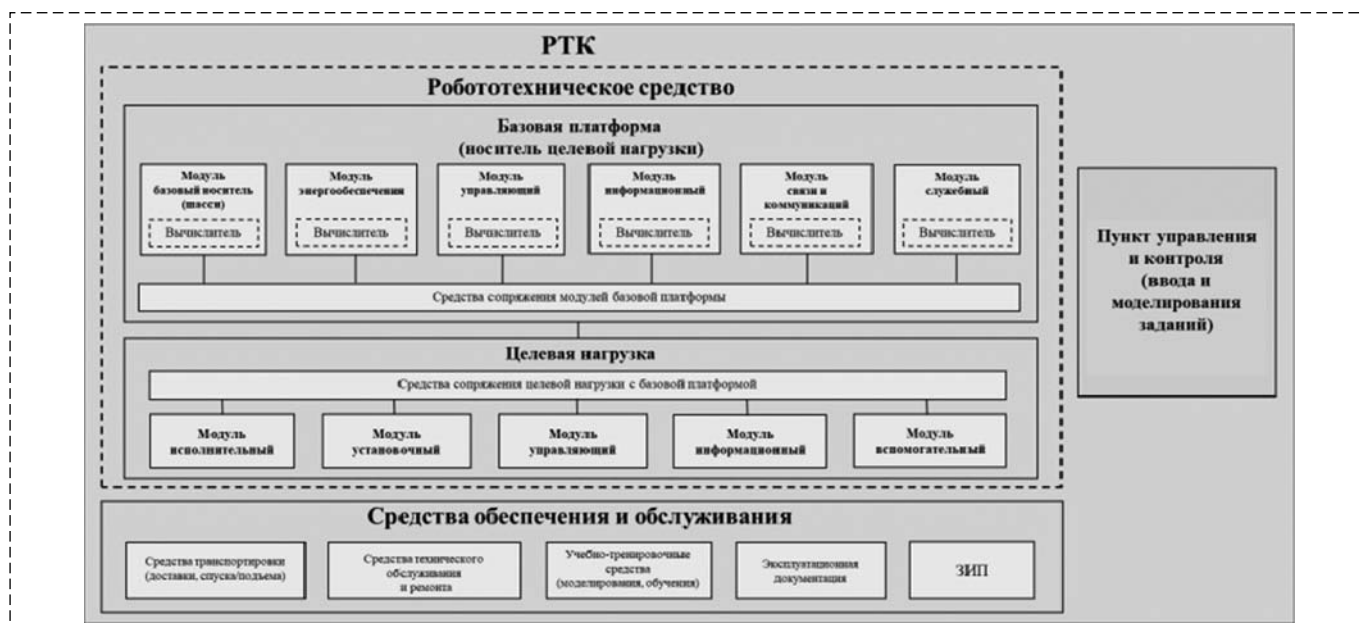


Рис. 5. Типовой состав РТК

Fig. 5. Typical structure of a robotic system

Практические приложения платформенно-базового подхода

Исходя из необходимости системного развития всего перечня ключевых технологий робототехники можно отметить, что основным назначением базовых платформ является обеспечение возможности проведения испытаний совместного функционирования различных базовых элементов и их конфигураций, которые объединяются посредством соответствующего программно-алгоритмического обеспечения.

С помощью таких базовых платформ может быть обеспечена возможность сравнения различных технологических решений, используемых при построении и сопряжении функциональных элементов РТК, отработка унифицированных вариантов модулей и компонентов, экспериментальная оценка характеристик разных вариантов конфигурации прототипа, предполагаемого к созданию РТК.

Основные требования к базовым платформам могут уточняться на основе предложений потенциальных заказчиков, профильных экспертов и эксплуатантов изделий.

Обязательными требованиями к базовым платформам являются: наличие открытой архитектуры, обеспечение достаточного уровня интероперабельности и обоснованные экономические показатели.

Базовые платформы представляют собой инструмент для отработки технологий, основная направленность которых соответствует совершенствованию наиболее наукоемких алгоритмических и программных решений в целях повышения функциональной и энергетической автономности, расширения круга задач, решаемых типовыми элементами, размещаемыми на базовой платформе, и конфигурируемыми для совместного применения, поиска и внедрения рациональных унифицированных решений, а также использования для подготовки операторов РТК.

Базовые платформы могут использоваться также для проведения сравнительных испытаний типовых элементов в целях выявления наиболее "продвинутых" и конкурентноспособных технологических решений.

Таким образом, основными целями создания базовых платформ являются:

- сокращение сроков создания перспективных РТК;
- исследовательские проверки, практическая апробация и экспериментальное тестирова-

ние перспективных технологий робототехники и базовых (типовых) элементов РТК;

- экспериментальная, в том числе полигонная отработка возможных сценариев применения РТК и разработка рекомендаций по их внедрению в практику, а также уточнение требований к перспективным образцам РТК;
- формирование опережающего научно-технологического задела в области робототехники с последующей его передачей широкому кругу разработчиков;
- оценка функциональности и определение перспективных направлений дальнейшего развития технологий робототехники;
- подготовка и накопление обучающих данных, верификация моделей применения и средств виртуализации испытаний;
- проведение конкурсных проверок (соревнований) в целях выявления прорывных научно-технических идей, передовых конструкторских и технологических решений в области робототехники.

Все это будет способствовать повышению уровня технологического задела в области РТК, улучшению качества, сокращению сроков и стоимости создания передовых изделий робототехники.

Перспективы развития платформенно-модульного подхода

Дальнейшим развитием платформенно-модульного подхода является создание типовых функциональных базовых элементов в виде самостоятельных функционально законченных целостных технологических единиц — модулей со своими источниками питания, вычислителями, датчиками информации и другими необходимыми элементами, конструктивно размещаемых в одном корпусе, с возможностью установки на различные базовые платформы, организации межмодульного обмена и динамического перераспределения (по мере необходимости) располагаемых ресурсов (энергетических, информационных, вычислительных и др.).

Например, базовые модули служебный, энергообеспечения и базовый носитель, входящие в состав типового РТК (см. рис. 1), могут предоставлять управляющему модулю дополнительные вычислительные ресурсы на время выполнения наиболее ответственных алгоритмов (в частности, алгоритмов боевого управле-

ния) путем подключения ресурса их вычислителей к нуждающемуся в "поддержке" вычислителю, создавая при этом интегрированную вычислительную многомашинную систему из распределенных вычислителей. Это особенно актуально для автономных РТК, на борту которых необходимо одновременно решать широкий круг задач, таких как, например, автономная навигации, распознавание объектов, ситуационный анализ окружающей среды, организация группового взаимодействия и др.

При этом необходимым и достаточным условием реализации платформенно-модульного принципа построения перспективных образцов робототехники является выполнение следующих основных требований, касающихся образующих РТК модулей:

- конструктивная и функциональная обособленность модулей;
- универсальность аппаратно-программного интерфейса обмена и взаимодействия между модулями;
- распределенность управления модулями;
- сетевая архитектура управляющей модулями системы;
- включенность каждого модуля в сетевую структуру с помощью специального программного обеспечения — драйверов.

Важным инструментом в рамках платформенно-модульного подхода к созданию перспективных РТК является виртуальное моделирование.

Виртуальное моделирование обеспечивает проведение аналитических, полунатурных и натуральных экспериментов, комплексных исследований технологий и базовых элементов РТК, выполнение разработок новых и совершенствование существующих методов и методик научных исследований в области робототехники, позволяет осуществлять отработку, совершенствование, проведение верификации и валидации моделей, алгоритмов и сценариев применения РТК различных типов, видов базирования и назначения и их групп, в том числе во взаимодействии с существующими человеко-машинными организационно-техническими системами.

К числу основных достоинств предлагаемого подхода следует отнести следующие:

- более активное вовлечение конечного потенциального пользователя в процесс создания РТК;
- дополнительное снижение затрат на разработку новых версий РТК;

- ускоренная наладка производства новых моделей РТК;
- расширенная унификация базовых (типовых) элементов РТК [5];
- непрерывная интенсификация внедрения новаций;
- гибкое перекрестное использование базовых модулей;
- непрерывное совершенствование развития базовых платформ.

Вместе с тем, в качестве основных недостатков платформенно-модульного подхода можно указать следующие:

- завышенная стоимость для потребителей, нуждающихся в более простых и дешевых РТК;
- сложность внедрения передовых технологий в стандартные модули серийно выпускаемых РТК;
- обезличенность изделий, собранных из унифицированных модулей.

Заключение

В качестве заключения можно отметить, что практическая реализация рассмотренных концептуальных положений создания перспективных робототехнических комплексов и, прежде всего, предложенного в рамках этих положений платформенно-модульного подхода будет способствовать:

- сокращению сроков и ресурсных затрат на разработку, создание, исследование, испытание, модернизацию перспективных и существующих робототехнических комплексов, оперативную отработку сценариев их применения и своевременное внедрение передовых инновационных технологий робототехники;
- целенаправленному развитию и скорейшему внедрению ключевых технологий робототехники в практику;
- созданию высокотехнологичных и высококачественных отечественных РТК, не уступающих мировым аналогам;
- снижению стоимости образцов РТК, упрощению массового производства и эксплуатации;
- сокращению сроков внедрения в практику предварительно отлаженных и экспериментально апробированных образцов перспективных РТК;
- форсированному освоению, приобретению практических навыков и опыта эксплуатации и применения перспективных РТК.

Кроме того, платформенно-модульный подход консолидирует работу производителя, заказчика и потребителя: производитель определяет, достаточны ли его производственно-технологические мощности для выпуска перспективного РТК, заказчик сравнивает перспективный РТК с аналогичными образцами, а также оценивает его рыночные возможности, потребитель устанавливает, какие преимущества он получит, внедряя новые изделия вместо имеющихся. При этом предоставляется возможность оперативного получения ответов на следующие вопросы относительно перспективного РТК: "Что он может сейчас?", "Какой у него модернизационный потенциал (как он будет развиваться дальше)?", "На что он будет способен в будущем?", "К какому итогу это приведет?". Получение ответов на перечисленные вопросы поможет сформировать:

1. Передовую рабочую стратегию совершенствования РТК.
2. Реалистичное представление о сроках создания перспективного РТК.
3. Новые прогрессивные идеи для дальнейшего развития РТК.
4. Лучший способ представления перспективного РТК.
5. Продвинутую команду разработчиков перспективного РТК.

Предложенный подход может быть использован также при создании качественно новых организационно-технических систем (ОТС), обладающих возможностью гибкого масштабирования инфраструктуры исходя из возникающих потребностей.

Использование в составе ОТС специализированных и, вместе с тем, унифицированных узлов-модулей позволит перераспределять их роли между собой и гибко перестраивать инфраструктуру под изменяющиеся условия.

На практике это будет выглядеть следующим образом. Предположим, что в ходе функционирования ОТС в одном из ее контуров обнаруживается нехватка мощностей, тогда этот контур масштабируется за счет добавления (путем подключения) к нему других модулей из соседних контуров. По мере удовлетворения потребностей недостающими мощностями подключенные к нуждающемуся контуру модули переходят в штатный режим работы в своих контурах. Гибкость взаимодействия модулей будет способствовать повышению устойчивости функционирования ОТС

в условиях различного рода внешних и внутренних возмущений, их адаптивности к возникновению различного рода непредвиденных факторов, а также содействовать их непрерывному совершенствованию по мере накопления практического опыта работы.

Список литературы

1. Ермолов И. Л., Хрипунов С. П., Благодарящев И. В., Хрипунов С. С. Типовая структурно-функциональная схема робототехнических комплексов военного назначения // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2017. № 6.
2. Денисов И. И., Кононов А. Ф. Механический боец. Многие роботы уже сегодня воюют лучше людей. URL: <http://econ-journal.ru/mehchanicheskij-boec-mnogie-roboty-uzhe-s/> (дата обращения: 27.12.2017).
3. Цариченко С. С. АНПА GAVIA — подводный исследователь // Гидротехника. 2011. № 2(22). С. 112—114.
4. Ермолов И. Л., Хрипунов С. П. Формирование обобщенной структурной схемы робототехнических комплексов // Робототехника и техническая кибернетика. 2017. № 1(14).
5. Ермолов И. Л., Кононов А. Ф., Хрипунов С. П. Направления унификации робототехнических комплексов военного, специального и двойного назначения // Сб. тезисов Международной научно-технической конференции "Экстремальная робототехника — 2017". СПб: Издательско-полиграфический комплекс "Гангут", 2017.
6. Прокопьев В. Ю. Платформенные решения и модульный принцип проектирования электронных устройств как метод стандартизации и унификации разработок // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 5. С. 901—911.
7. Базров Б. М. Модульная технология в машиностроении. М.: Машиностроение, 2001. 368 с.
8. Аверьянов О. И. Модульный принцип построения станков с ЧПУ. М.: Машиностроение, 1987. 232 с.
9. Андреев В. П., Плетнев П. Ф. Разработка технологии межмодульного общения в гетерогенном модульном мобильном роботе. // Труды международной научно-технической конференции "Экстремальная робототехника", 24—25 ноября 2016 года, Санкт-Петербург. С. 245—255.
10. Андреев В. П., Ким В. Л. Разработка функциональных узлов гетерогенного модульного мобильного робота // Тр. междунар. науч.-техн. конф. "Экстремальная робототехника". 24—25 ноября 2016 года, Санкт-Петербург. С. 359—369.
11. Андреев В. П., Подураев Ю. В. Функционально-модульный принцип построения гетерогенных мобильных роботов. // Тр. междунар. науч.-техн. конф. "Экстремальная робототехника". 24—25 ноября 2016 года, Санкт-Петербург. С. 39—50.
12. Манько С. В., Лохин В. М., Крайнов Н. В., Малько А. Н. Алгоритмы интеллектуального управления реконфигурируемыми роботами в компоновке колеса и многоагентными системами на их основе // Мехатроника, автоматизация, управление. 2022. Т. 23, № 8. С. 420—429.
13. Манько С. В., Шестаков Е. И. Автоматический синтез сценариев походки реконфигурируемых мехатронно-модульных роботов в модификации шагающей платформы // Российский технологический журнал. 2018. Т. 6, № 4.
14. Jing G., Tosun T., Yim M., Kress-Gazit H. An end-to-end system for accomplishing tasks with modular robots // Proceedings of Conference Robotics: Science and Systems. 2016.
15. Kojcev R., Etxezarreta N., Hernandez A., Mayoral V. Evaluation of deep reinforcement learning methods for modular robots. arXiv preprint arXiv:1802.02395, 2018.

Conceptual Propositions for Creation of Perspective Robotic Systems based on Platform-Modular Approach

S. S. Graskin, GraskinSS@edu.mos.ru,
MSTU Bauman, Moscow, 105005, Russian Federation,
I. L. Ermolov, ermolov@ipmnet.ru,
IPMech RAS, Moscow, 119526, Russian Federation,
S. P. Khripunov, hsp61@ipu.ru,
IPU, Moscow, 117997, Russian Federation

Corresponding author: **Ermolov Ivan L.**, Dr. of Tech. Sc., Professor,
IPMech RAS, Moscow, 119526, Russian Federation, e-mail: ermolov@ipmnet.ru

Accepted on June 01, 2023

Abstract

Intensive introduction of robotic systems is a modern priority for further automation of human activities. Recent theoretical and practical developments in robotics have made it possible to introduce robots in areas of practical activities previously dominated by humans. Modern trend in robotics is in creating state of the art robotic systems with increased autonomy and expanded functionality. This will allow to relieve human, leaving him supervision functions. An emerging task in robotics is also to create an environment, assisting to create and introduce new perspective robotic systems, also bearing modernization capability. This can be done through improving of modern approaches of creating robotic systems. We foresee necessity to change some of robots' life-cycle stages, which would allow to rapidly introduce new effective robots into production. The article in its beginning studies some most emerging directions in robotics and new ideas for more effective robotic systems design. During this one should find a balance between introducing drastically new technologies in new robot and perfecting already existing technologies. Authors propose to use so-called modular-platform based approach for creating new robots. Within it they imply typical structure of a robot, suggesting to use basic platform as a basement for building new robots with varying usefull load. In such case same platform can be used for building inspection robots, unmanned transport systems, unmanned retransmitter etc. The paper presents some already built examples of the approach. Final part of the paper discusses advantages given by application of this approach.

Keywords: robotic systems, robots, modular approach

Acknowledgements: Part of this work was done according to the Russian Ministry of Science and Higher Education within the framework of the Russian State Assignment contract No 123021700055-6.

For citation:

Graskin S. S., Ermolov I. L., Khripunov S. P. Conceptual Propositions for Creation of Perspective Robotic Systems based on Platform-Modular Approach, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2023, vol. 24, no. 12, pp. 619–626.

DOI: 10.17587/mau.24.619-626

References

1. **Ermolov I. L., Khripunov S. P.** et al. Typical Structure of a Robotic System, *Information, measuring and control systems*, 2017, no. 6 (in Russian) (in Russian).
2. **Denisov I. I., Kononov A. F.** Mechanical warrior, available at: <http://econ-journal.ru/mehchanicheskij-boec-mnogie-robo-ty-uzhe-s/> (date of access 27.12.2017) (in Russian).
3. **Tsarichenko S. G.** SUV GAVIA — underwater researcher, *Gydrotechnica*, 2011, no. 2 (22), pp. 112–114 (in Russian).
4. **Ermolov I. L., Khripunov S. P.** Creating Generalized Typical Structure of a Robotic System, *Robototechnica i technicheskaya cybernetica*, 2017, no. 1 (14) (in Russian).
5. **Ermolov I. L., Khripunov S. P., Kononov A. F.** Unification in Robotics, *Proc. Of "Extreme Robotics — 2017" International Conference*, St. Petersburg, 2017 (in Russian).
6. **Prokopiev V. Y.** Platform-based solutions and modular approach in design of electronic devices, *Scientific Courier of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 5, pp. 901–911 (in Russian).
7. **Bazrov B. M.** Modular approach in machine-building, Moscow, Mashinostroenie, 2001, 368 p. (in Russian).
8. **Averianov O. I.** Modular approach in CNC machine-tools, Moscow, Mashinostroenie, 1987, 232 p. (in Russian).
9. **Andreev V. P., Pletenev P. F.** Intermodular communication technology in heterogeneous modular mobile robot, *Proc. of "Extreme Robotics 2016" International Conf.*, St. Petersburg, 2016 (in Russian).
10. **Andreev V. P., Kim V. L.** Designing basic units of heterogeneous modular mobile robot, *Proc. of "Extreme Robotics 2016" International Conf.*, St. Petersburg, 2016 (in Russian).
10. **Andreev V. P., Poduraev J. V.** Function-based modular approach for building heterogeneous modular mobile robot, *Proc. of "Extreme Robotics 2016" International Conf.*, St. Petersburg, 2016 (in Russian).
12. **Manko S. V., Lokhin V. M., Kraynov N. V., Malko A. N.** Algorithms for Intelligent Control of Reconfigurable Robots in a Wheel Configuration and Multi-Agent Systems Based on them, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 23, no. 8, pp. 420–429 (in Russian).
13. **Manko S. V., Shestakov E. I.** Futomatic synthesis of gait scenarios for reconfigurable mechatronic modular robots in the modification of the walking platform, *Russian Technological Journal*, 2018, vol. 6, no. 4 (in Russian).
14. **Jing G., Tosun T., Yim M., Kress-Gazit H.** An end-to-end system for accomplishing tasks with modular robots, *Proceedings of Conference Robotics: Science and Systems*, 2016.
15. **Kojcev R., Etxezarreta N., Hernandez A., Mayoral V.** Evaluation of deep reinforcement learning methods for modular robots. arXiv preprint arXiv:1802.02395, 2018.

С. А. Кабанов, д-р техн. наук, проф., kaba-sa@mail.ru,

Ф. В. Митин, канд. техн. наук, доц., fedor28@list.ru,

Балтийский государственный технический университет "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург

Управление курсовым движением беспилотного автомобиля на основе алгоритма оптимального управления*

Представлен алгоритм оптимального управления наземным беспилотным транспортным средством. Основной целью является получение решения задачи управления, позволяющего переводить беспилотный автомобиль (БПА) из начального положения в заданное конечное за определенное время. С учетом развития микропроцессорной техники и значительной экономической выгоды использования беспилотных транспортных средств данная задача является актуальной. Множество исследований в области управления БПА касается вопроса их применения в городских условиях и на пересеченной местности. В данной работе представлено решение задачи оптимального управления БПА с использованием принципа максимума. Решена задача оптимального управления в детерминированной постановке с интегро-терминальным критерием. Решение двухточечной краевой задачи, возникающей из принципа максимума, осуществлено с помощью метода Ньютона. Получены диапазоны начальных значений сопряженных переменных, обеспечивающих сходимость вычислений. Для выбранной математической модели курсового движения автомобиля получены решения поставленной задачи. Приведены результаты численного моделирования, показывающие возможность использования предложенного алгоритма для осуществления управления БПА при различных начальных и конечных условиях. Алгоритм успешно применен при наличии штрафной зоны. Алгоритм может быть использован при применении концепции "гибких траекторий" в задачах управления подвижными объектами.

Ключевые слова: математическая модель, беспилотный автомобиль, управление, оптимизация, метод Ньютона

Введение

Развитие теории управления, спутниковых систем навигации, вычислительной техники и улучшение характеристик датчиковой аппаратуры позволяют использовать автономные системы управления для различных подвижных объектов [1]. На данный момент широко применяются и постоянно модернизируются беспилотные летательные аппараты при решении широкого круга задач от картографирования местности до выполнения доставки груза. Большое число работ посвящено беспилотным надводным и подводным аппаратам. В настоящее время идет активное внедрение беспилотных наземных транспортных средств [2–4].

Задачи, решаемые при использовании беспилотных автомобилей (БПА), зависят от области их применения. Можно выделить два основных направления: ограниченное применение и применение на дорогах общего пользования. В первом случае движение автомобиля

осуществляется в специальной определенной заранее зоне, например, при промышленном применении (погрузчики, самосвалы и т. д.), сельскохозяйственном применении и др. Второй случай требует более надежной и производительной системы, так как подразумевается выполнение пассажиро- и грузоперевозок в условиях неопределенностей, что требует быстроты и правильности принятия решений [5, 6].

Для обеспечения поставленных задач требуется наличие множества высокоточных датчиков, таких как лидары, видеокамеры и системы навигации. Дополнительно необходимо осуществлять высокочисленные вычисления на борту транспортного средства в режиме реального времени [7–10].

Для решения задачи управления интересно рассмотреть алгоритмы оптимального управления, которые позволят самостоятельно прокладывать маршрут до заданной точки при наличии подвижных препятствий, возмущений и шумов измерений [11–13].

Практический интерес представляет исследование возможностей построения оптимальных программных траекторий автомобиля на пересеченной местности. При наличии карты местности с выделением рельефа можно разработать алгоритм управления по принципу максимума с введением в целевой функционал соответствующих функций штрафа.

*Работа выполнена в организации ФГБОУ ВО БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (доп. соглашение от 09.06.2020 № 075-03-2020-045/2 на выполнение базовой части государственного задания "Разработка фундаментальных основ создания и управления группировками высокоскоростных беспилотных аппаратов космического и воздушного базирования и группами робототехнических комплексов наземного базирования").

Управление скоростью БПА осуществляется за счет изменения момента на колесах от силовой установки и тормозной системы. Поперечное управление осуществляется за счет рулевого механизма [14]. Поэтому для успешного выполнения маневра необходимо в вектор управления включать как минимум две составляющие.

Уравнения динамики курсового движения БПА

Рассматривается задача оптимального управления траекторией движения автомобиля в горизонтальной плоскости. В работе [15] на основе уравнения Лагранжа II рода получена система дифференциальных уравнений, описывающая динамику курсового движения автомобиля. В работах [13, 16] для исследований курсового движения эти уравнения сведены к системе обыкновенных дифференциальных уравнений пятого порядка. В уравнениях приняты допущения, обозначенные в работе [17]. В частности, отсутствуют деформация рамы на кручение и изгиб и влияние реакций дороги на колебания масс автомобиля. Колебания масс автомобиля малы, контакт шин с дорогой точечный, дополнительные моменты от подвижных частей автомобиля незначительны и ими можно пренебречь.

Математическая модель динамики курсового движения БПА в переменных состояния описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t),$$

где $\mathbf{x} = (V_z \ \omega_y \ z \ \psi \ x \ \theta \ V_x)^T$ — вектор состояния; $\mathbf{u} = (u_\theta \ u_V)^T$ — вектор управления; t — время; V_z — боковая составляющая скорости; x и z — продольная и боковая дальности; ω_y — проекция абсолютной угловой скорости на вертикальную ось (угловая скорость рыскания); ψ — угол поворота по курсу (рыскания); θ — угол поворота передних колес; V_x — продольная составляющая скорости; u_θ — управление углом поворота колес; u_V — управление скоростью. В поэлементном виде система представляется следующим образом:

$$\begin{aligned} \dot{V}_z = & -\frac{2(k_{y1} + k_{y2})}{mV} V_z + \\ & + \left(\frac{2(k_{y2}b - k_{y1}a)}{mV} - V \right) \omega_y + \frac{2k_{y1}}{m} \theta; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_y = & \frac{2(k_{y2}b - k_{y1}a)}{I_y V} V_z - \\ & - \left(\frac{2(k_{y1}a^2 + k_{y2}b^2)}{I_y V} \right) \omega_y + \frac{2ak_{y1}}{I_y} \theta; \\ \dot{z} = & V_z + V_x \psi; \\ \dot{\psi} = & \omega_y - V_x k_r; \\ \dot{x} = & V_x; \\ \dot{\theta} = & u_\theta; \\ \dot{V}_x = & u_V, \end{aligned}$$

где

$$k_r = \sqrt{\frac{(x'^2 + z'^2)(x''^2 + z''^2) - (x'x'' + z'z'')}{(x'^2 + z'^2)^3}};$$

$$\text{sign } k_r = \text{sign } z''; \quad x' = \frac{x_1 - x_0}{\Delta t}; \quad x'' = \frac{x_2 - 2x_1 + x_0}{\Delta t^2};$$

$$z' = \frac{z_1 - z_0}{\Delta t}; \quad z'' = \frac{z_2 - 2z_1 + z_0}{\Delta t^2}; \quad V = \sqrt{V_z^2 + V_x^2};$$

m — масса автомобиля; a и b — расстояния от центра тяжести до переднего и заднего мостов; k_{y1} и k_{y2} — коэффициенты сопротивления уводу шин передней и задней осей; k_r — кривизна средней линии траектории. Приняв автомобиль за прямоугольный параллелепипед, момент инерции можно определить как $I_y = 1/12m(a^2 + b^2)$.

Постановка задачи управления курсовым движением БПА

Задача управления состоит в приведении БПА (1) из начального состояния

$$\mathbf{x}(t_0): \quad V_{z0} = \omega_{y0} = \psi_0 = x_0 = \theta_0 = 0, \quad z_0 = 5 \text{ м}, \\ V_{x0} = 16,7 \text{ м/с}$$

в конечное

$$\mathbf{x}(t_f): \quad V_{zf} = \omega_{yf} = \psi_f = \theta_f = z_f = 0, \quad x_f = 250 \text{ м}, \\ V_{xf} = 16,7 \text{ м/с}$$

за выбранный интервал времени $t_f - t_0 = 15$ с, где t_0 и t_f — начальное и конечное время моделирования соответственно, при высокоточном выполнении терминальных условий и минимизации затрат на управления на всем интервале оптимизации.

В качестве целевого функционала выбран критерий [11]

$$I = V_f(x, t_f) + 0,5 \int_{t_0}^{t_f} u^T k^{-2} u dt,$$

где $V_f = 0,5\rho_1[x(t_f) - x_f]^2 + 0,5\rho_2[z(t_f) - z_f]^2$; $\rho_1, \rho_2, k = \text{diag}(k_\theta, k_V)$ — заданные коэффициенты.

Вычисление оптимального управления по принципу максимума сводится к решению двухточечной краевой задачи, которая может быть решена методом Ньютона [12, 13]. При этом вычислительная трудоемкость во многом определяется не столько необходимостью численного интегрирования системы канонических уравнений, сколько удачным выбором начальных значений сопряженных переменных.

Гамильтониан задачи имеет вид

$$H = p_V \dot{V}_z + p_\omega \dot{\omega}_y + p_z \dot{z} + p_\psi \dot{\psi} + p_x \dot{x} + p_\theta \dot{\theta} + p_{V_x} \dot{V}_x + 0,5 u^T k^{-2} u,$$

где сопряженные переменные удовлетворяют уравнениям

$$\begin{aligned} \dot{p}_V &= p_V \left[\omega_y \left(\frac{V_z}{V} + \frac{2(k_{y2}b - k_{y1}a)V_z}{mV^3} \right) + \frac{2(k_{y1} + k_{y2})}{mV} - \frac{2(k_{y1} + k_{y2})V_z^2}{mV^3} \right] + \\ &+ p_z - p_\omega \left[\frac{2(k_{y2}b - k_{y1}a)}{I_y V} - \frac{2(k_{y2}b - k_{y1}a)V_z^2}{I_y V^3} + \frac{2(k_{y1}a^2 + k_{y2}b^2)V_z \omega_y}{I_y V^3} \right]; \\ \dot{p}_\omega &= p_V \left[V - \frac{2(k_{y2}b - k_{y1}a)}{mV} \right] - p_\psi + p_\omega \left[\frac{2(k_{y1}a^2 + k_{y2}b^2)}{I_y V} \right]; \\ \dot{p}_z &= 0; \\ \dot{p}_\psi &= -p_z V_x; \\ \dot{p}_x &= 0; \\ \dot{p}_\theta &= -p_V \frac{2k_{y1}}{m} - p_\omega \frac{2ak_{y1}}{I_y}; \\ \dot{p}_{V_x} &= p_V \left[\omega_y \left(\frac{V_x}{V} + \frac{2(k_{y2}b - k_{y1}a)V_x}{mV^3} \right) - \frac{2(k_{y1} + k_{y2})V_z V_x}{mV^3} \right] + p_x + p_\psi k_r - p_z \psi + \\ &+ p_\omega \left[\frac{2(k_{y2}b - k_{y1}a)V_z V_x}{I_y V^3} - \frac{2(k_{y1}a^2 + k_{y2}b^2)\omega_y V_x}{I_y V^3} \right]. \end{aligned}$$

Управления формируются согласно уравнениям

$$u_\theta = -k_\theta^2 p_\theta; \quad u_V = -k_V^2 p_{V_x}.$$

Краевая задача решалась методом Ньютона с использованием вектора невязок

$$\mathbf{z}_H(t, t_f) = [x(t_f) - x_f \quad z(t_f) - z_f \quad \psi(t_f) - \psi_f]^T.$$

Правый конец траектории принят фиксированным.

Результаты апробации предложенного алгоритма управления БПА

В качестве автомобиля был выбран УАЗ-3159. Коэффициенты увода колес рассчитывали в соответствии с графиком [18, с. 37]. Ниже приведены значения параметров УАЗ-3159 для моделирования движения:

Масса автомобиля m , кг	2000
Расстояние от центра масс до передней оси a , м	0,92
Расстояние от центра масс до задней оси b , м	1,84
Коэффициент сопротивления уводу шин $k_{y1} = k_{y2}$	3500

Интегрирование проводили методом Эйлера с шагом $\Delta t = 0,1$ с в среде моделирования MATLAB при $k_\theta = 0,008, k_V = 0,003$. Исходя из решения, полученного в работе [17] при решении задачи оптимизации управления автомобилем по критерию А. А. Красовского [11], были приняты начальные условия для компонент вектора сопряженных переменных

$$\mathbf{p}(t_0): p_V(t_0) = 1,47, p_\omega(t_0) = 9,3, p_z(t_0) = 0,051, p_\psi(t_0) = 24,9, p_x(t_0) = 0,1, p_\theta(t_0) = 92, p_{V_x}(t_0) = 52,15$$

при приращениях для сопряженных переменных

$$\Delta p|_V = \Delta p|_\omega = \Delta p|_z = \Delta p|_\psi = \Delta p|_x = \Delta p|_\theta = \Delta p|_{V_x} = 0,1$$

в процедуре численного определения частных производных от вектора невязок. Итерационная процедура выполнялась с точностью

$$\|\mathbf{z}_H(t, t_f)\| \leq \varepsilon, \quad (\varepsilon = 0,1).$$

При выбранных начальных значениях сопряженных переменных за две итерации были получены оптимальные начальные значения

$$p_V(t_0) = 1,37, p_\omega(t_0) = 9,2, p_z(t_0) = -0,049, p_\psi(t_0) = 24,8, p_x(t_0) = 0, p_\theta(t_0) = 91,9, p_{V_x}(t_0) = 52,05,$$

при которых удалось добиться решения поставленной задачи.

На рис. 1 представлена траектория движения БПА $z(x)$ при совершении заданного маневра. На рис. 2 и рис. 3 представлены соответствующие управления $u_\theta(t)$ и $u_V(t)$. Ввиду того, что отсутствует управление конечным временем моделирования, алгоритм пытается за счет управления скоростью выполнить терминальные условия за определенное время $t_f = 15$ с.

В случае незначительного изменения начальных и конечных условий вектора переменных состояния x происходит увеличение числа итераций метода Ньютона. Например, при $\omega_{y0} = 0,1$ требуется семь итераций для решения поставленной задачи. При существенном отличии начальных и конечных условий вектора x следует приводить коррекцию начальных значений вектора сопряженных переменных $p(t_0)$ и приращений Δp .

В некоторых случаях достигается высокая точность по одной или нескольким компонентам вектора состояния, например выполняются условия по координатам. В этих случаях необходимо выбирать разные значения допустимых ошибок и запустить еще несколько итераций метода Ньютона.

Для поставленной задачи был проведен анализ диапазонов возможного выбора начальных условий сопряженных переменных, при которых удалось добиться решения:

$$\begin{aligned} p_V(t_0) &= [0,9, 1,6], p_\omega(t_0) = [6,5, 14,4], \\ p_z(t_0) &= [0,03, 0,06], p_\psi(t_0) = [23,3, 27,1], \\ p_x(t_0) &= [-800, 20], p_\theta(t_0) = [81, 97], \\ p_{V_x}(t_0) &= [-74, 4200] \end{aligned}$$

При изменении точности ϵ на норму вектора невязки и начальных приращений сопряженных переменных данные значения существенно изменяются. Данные области сходимости являются не единственными. Так, например, удастся добиться сходимости при выборе начальных значений $p_\omega(t_0) = [-9,6, -7,6]$.

Выбранные значения $p(t_0)$ и Δp применимы для поиска решения семейства задач при переводе системы из начального состояния $x(t_0) = [0 \ 0 \ z_0 \ 0 \ x_0 \ 16,7]^T$ в конечное $x(t_f) = [0 \ 0 \ z_0 \ -5 \ 0 \ (x_0+250) \ 0 \ 16,7]^T$. На рис. 4 представлено семейство таких кривых.

Все траектории получены за две итерации. Различия приведенных S-образных кривых заключается в изменении начальной и конечной координат x при остальных значениях, определенных ранее.

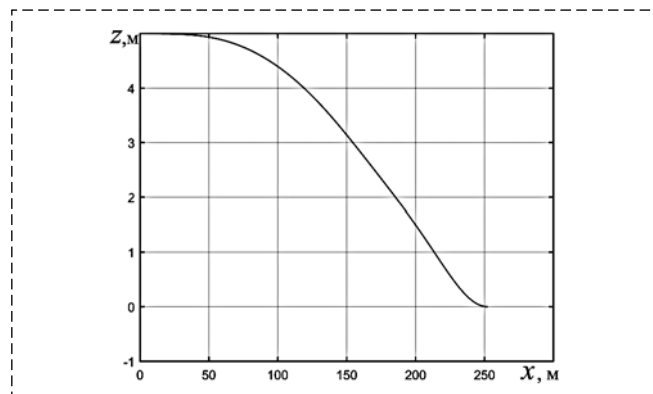


Рис. 1. Траектория движения БПА
Fig. 1. Trajectory of Unmanned Ground Vehicles

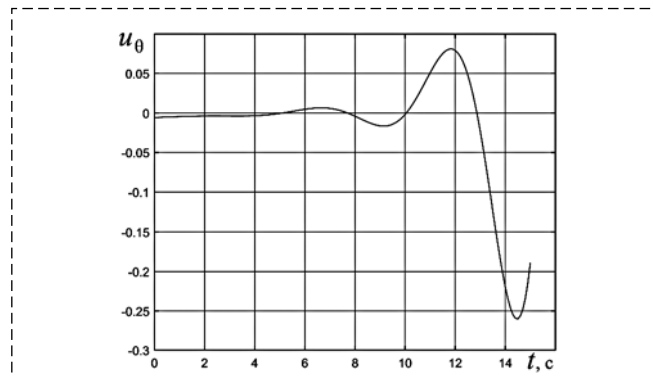


Рис. 2. Управление $u_\theta(t)$
Fig. 2. Control $u_\theta(t)$

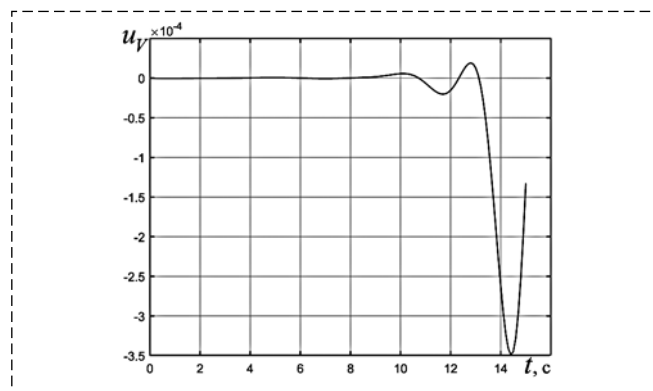


Рис. 3. Управление $u_V(t)$
Fig. 3. Control $u_V(t)$

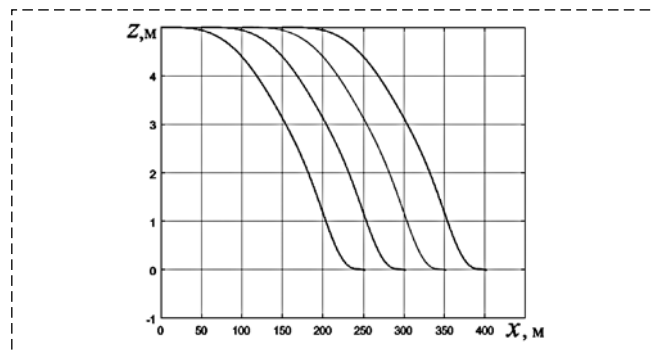


Рис. 4. Семейство траекторий движения БПА
Fig. 4. Family of trajectories of Unmanned Ground Vehicles

Рассмотрим применение алгоритма при переводе автомобиля из начального положения $x = 0$ м, $z = 5$ м в заданное положение $x = 250$ м, $z = 0$ м при наличии штрафной зоны из работы [17] с центром в точке с координатами $x = 150$ м, $z = 3$ м, длиной малой полуоси эллипса $R_z = 0,5$ м, длиной большой полуоси эллипса $R_x = 20$ м (кривая 3, рис. 5). При $p_\omega(t_0) = -9,2$ и остальных коэффициентах, определенных ранее, удалось добиться решения поставленной задачи (кривая 2, рис. 5). Дополнительно показана траектория при отсутствии штрафной зоны (кривая 1, рис. 5).

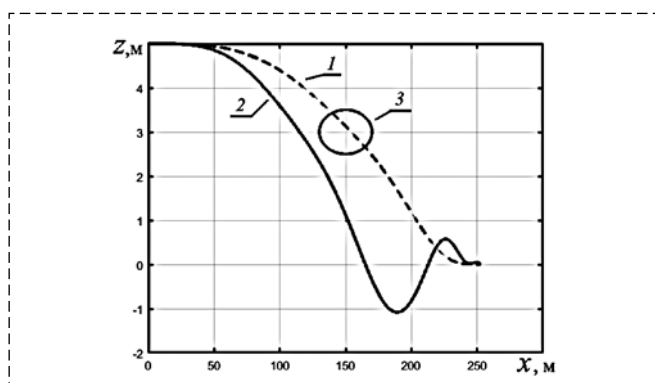


Рис. 5. Объезд штрафной зоны
Fig. 5. Bypassing the penalty area

При выбранных $p(t_0)$, Δp и $k_\theta = 0,008$ наблюдается резкое изменение угла поворота передних колес θ , вследствие чего наблюдается подход к граничным условиям с перерегулированием. Для исключения перерегулирования требуются дополнительные исследования (например, корректировка значений Δp и/или k_θ).

На сходимость рассмотренного метода Ньютона значительно влияет выбор конечного времени регулирования. Время t_f необходимо выбирать исходя из приблизительной оценки затраченного на прохождение всего пути времени при заданной скорости. Алгоритм позволяет управлять скоростью движения автомобиля V_x : чем больше коэффициент управления k_p , тем больше возможности корректировать V_x , но при этом области начальных значений сопряженных переменных снижаются.

Введение в вектор управления \mathbf{u} конечного времени t_f позволяет корректировать интервал оптимизации, однако наличие дополнительной сопряженной переменной значительно усложняет поиск начальных значений сопряженных переменных и их приращений.

Исследования показали, что примененный алгоритм является инструментом для построения программных траекторий автомобиля и может применяться при решении задач, реализующих концепцию "гибких траекторий" [19] подвижных объектов [20].

Заключение

Исследовано применение алгоритма оптимального управления БПА в горизонтальной плоскости при выполнении терминальных условий и минимизации затрат на управление, т. е. воздействий на рулевое колесо и изменений продольной скорости. Краевая задача, возникающая из принципа максимума, решена методом Ньютона.

Решение поставленной задачи опирается на результаты, полученные ранее в работе [17]. Выбор начальных значений вектора сопряженных переменных $\mathbf{p}(t_0)$ и приращений Δp в методе Ньютона вызывает определенные затруднения в отличие от алгоритма с прогнозирующей моделью, применение которого позволяет решать поставленную задачу в реальном времени.

Незначительное изменение начальных и/или конечных значений вектора состояний приводит к новому подбору начальных значений вектора сопряженных переменных. Поскольку было подтверждено несколько областей сходимости, то возникает задача поиска локального и глобального минимумов для получения оптимальных значений.

Ввиду узких областей сходимости применение метода Ньютона в режиме реального времени затруднено. Для рассматриваемого объекта управления (БПА) данная проблема является критической, поэтому рассмотренный алгоритм может быть применен в качестве расчета опорной траектории при получении программы управления.

В дальнейшем планируется рассмотреть применение предложенного алгоритма при наличии внешних возмущений и шумов измерений, а также сравнить его с другими известными алгоритмами оптимального управления.

Список литературы

1. Юсупов Д. Т. Аналитический обзор подходов к управлению продольной и поперечной динамикой беспилотного автомобиля // Труды НАМИ. 2023. № 1. С. 82—90.

2. Юзаева А. Г., Кукарцев В. В. Беспилотные автомобили: опасности и перспективы развития // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2016. Т. 2. С. 120—122.
3. Краснопева Н. А., Стычев С. Н., Мальцев С. А. Анализ существующих систем безопасности управления беспилотным автомобилем // В сб.: Проблемы и перспективы реализации междисциплинарных исследований. Сб. статей Всеросс. науч.-практ. конф. 2019. С. 11—12.
4. Chu W., Wuniri Q., Du X., Huang T., Li K. Cloud Control System Architectures, Technologies and Applications on Intelligent and Connected Vehicles: a Review // Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition). 2021. Vol. 34, N. 1. P. 1—23.
5. Кобылинский А. Ю. Опасности и перспективы развития беспилотного автомобильного транспорта // Наука, техника и образование. 2022. Т. 86, № 3. С. 40—44.
6. Gopinath K., Narayanamurthy G. Meta-analysis of autonomous vehicles adoption — Moderating role of automation level, ownership and culture // International Journal of Information Management. 2022. Vol. 66. P. 1—13.
7. Павловский В. Е., Огольцов В. Н., Спиридонова И. А., Павловский Е. В. Управление беспилотным автомобилем в проекте "АВТОНИВА" // Робототехника и техническая кибернетика. 2015. Т. 9, № 4. С. 41—46.
8. Зубов И. Г. Обработка и анализ видеоданных в системе управления беспилотного автомобиля // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2021. № 4. С. 96—99.
9. Спиридон А. А., Волосников А. С. Обработка сигналов датчиков в системе управления беспилотным автомобилем // Наука ЮУрГУ: Секции технических наук. Матер. 73-й научн. конф. 2021. С. 465—472.
10. Chuan Z. B., Ming L. G., Wang P. S., Li Y., Peng L. H. Research on Key Technology of Auto-driving Based on Machine Vision // ACM International Conference Proceeding Series. 2021. P. 429—433.
11. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А. А. Красовского. М.: Наука, 1987. 712 с.
12. Малышев В. В. Методы оптимизации в задачах системного анализа и управления. Учеб. пособ. М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2010. 440 с.
13. Кабанов С. А. Оптимизация динамики систем при действии возмущений. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 200 с.
14. Лось А. В. Современное состояние подходов к синтезу наземных беспилотных транспортных средств и основные проблемы концепции "беспилотный автомобиль". Текст: непосредственный // Молодой ученый. 2022. Т. 417, № 22. С. 91—94.
15. Динамика системы дорога-шина-автомобиль-водитель / Под ред. А. А. Хачатурова. М.: Машиностроение, 1976. 535 с.
16. Кабанов Д. С., Крашенинников Б. А. Управление траекторией автомобиля с использованием алгоритма последовательной оптимизации // Изв. ВУЗов. Приборостроение. 2008. Т.51, № 10. С. 21—24.
17. Кабанов С. А., Кабанов Д. С., Митин Ф. В. Оптимизация курсового движения беспилотного автомобиля при наличии препятствий и возмущений // Мехатроника, автоматизация, управление. 2023. Т. 24, № 2. С. 93—100.
18. Литвинов А. С. Управляемость и устойчивость автомобиля. М.: Машиностроение, 1971. 417 с.
19. Теряев Е. Д., Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б., Петрин К. В. Концепция "гибких кинематических траекторий" в задачах терминального управления подвижными объектами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 12. С. 7—15.
20. Кабанов С. А., Кабанов Д. С., Митин Ф. В. Расчет аэрогидродинамических характеристик и траекторий подвижных объектов. Учеб. пособ. СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2019. 159 с.

Development of an Optimal Control Algorithm for the Course Movement of an Unmanned Vehicle

S. A. Kabanov, kaba-sa@mail.ru, F. V. Mitin, fedor28@list.ru,

BSTU "VOENMEH" named after D. F. Ustinov, Saint-Petersburg, 190005, Russian Federation

Corresponding author: Kabanov S. A., Ph.D., Dr. Sci., Professor, Baltic state technical university "VOENMEH" named after D. F. Ustinov, 190005, Saint-Petersburg, Russian Federation, e-mail: kaba-sa@mail.ru

Accepted on September 15, 2023

Abstract

The article presents an algorithm for controlling a ground unmanned vehicle. The main task is to obtain a solution to control problems that allows you to transfer an unmanned vehicle from the initial position to a given final position at a certain time. Currently, autonomous vehicles are being actively introduced in all areas. Including in Russia, you can find unmanned trucks on the federal highway. Given the development of microprocessor technology and the significant economic benefits of using unmanned vehicles, this task is relevant. A lot of research in the field of control of unmanned vehicles concerns the issue of their use in urban environments and on rough terrain. In this paper, we present a solution to the problem of optimal control of an unmanned vehicle using the maximum principle. The problem of optimal control is solved in a deterministic setting with an integro-terminal criterion. The solution of the two-point boundary value problem arising from the maximum principle was carried out using Newton's method. The ranges of initial values of conjugate variables are obtained, which ensure the convergence of calculations. For the chosen mathematical model of the course movement of the car, solutions to the problem were obtained. The results of numerical simulation are presented, showing the possibility of using the proposed algorithm to control an unmanned vehicle under various initial and final conditions. The developed algorithm has been successfully applied in the presence of a penalty zone. The algorithm can be used when applying the concept of "flexible trajectories" in the tasks of controlling moving objects.

Keywords: mathematical model, unmanned vehicle, control, Newton's method

Acknowledgements: The work was carried out in BSTU "VOENMEH" with financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (government contract agreement № 075-03-2020-045/2 of 09.06.2020).

For citation:

Kabanov S. A., Mitin F. V. Development of an Optimal Control Algorithm for the Course Movement of an Unmanned Vehicle, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2023, vol. 24, no. 12, pp. 627–633 (in Russian).

DOI: 10.17587/mau.24.627-633

References

1. **Yusupov D. T.** Analytical review of approaches to control over longitudinal and lateral dynamics of an autonomous vehicle, *Trudy NAMI*, 2023, vol. 1, pp. 82–90 (in Russian).
2. **Yzaeva A. G., Kukarcev V. V.** Unmanned vehicles: danger and prospects, *Aktual'nye problemy aviacii i kosmonavтики*, 2016, vol. 2, pp. 120–122 (in Russian).
3. **Krasnopevceva N. A., Stychev S. N., Malcev S. A.** Analysis of existing security systems for driving an unmanned vehicle, *V sbornike: Problemy i perspektivy realizacii mezhdisciplinarnyh issledovanij. Sbornik statej Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii*, 2019, pp. 11–12 (in Russian).
4. **Chu W., Wuniri Q., Du X., Huang T., Li K.** Cloud Control System Architectures, *Technologies and Applications on Intelligent and Connected Vehicles: a Review, Chinese Journal of Mechanical Engineering* (English Edition), 2021, vol. 34, no. 1, pp. 1–23.
5. **Kobylnskij A. Y.** Dangers and prospects for the development of unmanned vehicle transport, *Nauka, tekhnika i obrazovanie*, 2022, vol. 86, no. 3, pp. 40–44. (in Russian).
6. **Gopinath K., Narayanamurthy G.** Meta-analysis of autonomous vehicles adoption — Moderating role of automation level, ownership and culture, *International Journal of Information Management*, 2022, vol. 66, pp. 1–13.
7. **Pavlovskij V. E., Ogol'cov V. N., Spiridonova I. A.** Driving an unmanned vehicle in the AVTONIVA project, *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika*, 2015, vol. 9, no. 4, pp. 41–46 (in Russian).
8. **Zubov I. G.** Processing and analysis of video data in the control system of an unmanned vehicle, *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika teledeniya*, 2021, no 4, pp. 96–99 (in Russian).
9. **Spiridon A. A., Volosnikov A. S.** Processing of sensor signals in the control system of an unmanned vehicle, *V sbornike: Nauka YUURGU: Sekcii tekhnicheskikh nauk. materialy 73-j nauchnoj konferencii. Ministerstvo nauki i vysshego obrazovaniya Ros-sijskoj Federacii Yuzhno-Ural'skij gosudarstvennyj universitet*, 2021, pp. 465–472 (in Russian).
10. **Chuan Z. B., Ming L. G., Wang P. S., Li Y., Peng L. H.** Research on Key Technology of Auto-driving Based on Machine Vision, *ACM International Conference Proceeding Series*, 2021, pp. 429–433.
11. **Krasovskii A. A.** ed. Handbook on the theory of automatic control, Moscow, Nauka, 1987, 712 p. (In Russian).
12. **Malushev V. V.** Optimization methods in problems of system analysis and control, Tutorial, Moscow, MAI Print, 2010, pp. 368 (in Russian).
13. **Kabanov S. A.** Optimization of system dynamics under the action of disturbances, Moscow, FISMATLIT, 2008, pp. 200 (in Russian).
14. **Los A. V.** The current state of approaches to the synthesis of ground unmanned vehicles and the main problems of "unmanned vehicle" detection, *Text: Young scientist*, 2022, vol. 417, no. 22, pp. 91–94 (in Russian).
15. **Hachaturov A. A.** ed. **Dynamics** of the road-tire-car-driver system, Moscow, Mashinostroenie, 1976, pp. 535 (in Russian).
16. **Kabanov D. S., Krashennnikov B. A.** Vehicle trajectory control using a sequential optimization algorithm, *Izv. VUZov. Priborostroenie*, 2008, vol. 51, no. 10, pp. 21–24 (in Russian).
17. **Kabanov S. A., Kabanov D. S., Mitin F. V.** Optimization of the course movement of an unmanned vehicle in the presence of obstacles and disturbances, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2023, vol. 24, no. 2, pp. 93–100 (in Russian).
18. **Litvinov A. S.** Vehicle handling and stability, Moscow, Mashinostroenie, 1971, 417 p. (In Russian).
19. **Teryaev E. D., Filimonov A. B., Filimonov N. B., Petrin K. V.** The concept of "flexible kinematic trajectories" in the problems of terminal control of moving objects, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2011, no. 12, pp. 7–15 (in Russian)
20. **Kabanov S. A., Kabanov D. S., Mitin F. V.** Calculation of aerohydrodynamic characteristics and trajectories of moving objects, Tutorial, St.Petersburg, Balt. state tech. un-t, 2019, pp. 159 p. (in Russian).

И. Д. Тюленев¹, бакалавр, tiulenev.id19@physics.msu.ru,

Н. Б. Филимонов^{1,2}, д-р техн. наук, проф., nbfilimonov@mail.ru,

¹ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,

² Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва

Алгоритмизация автоматического управления парковкой беспилотного автомобиля

Рассматривается задача управления автоматической парковкой беспилотного автомобиля (БПА) как один из аспектов разработки БПА, полная автономность которого достигается автоматизацией управления для всех его режимов движения и маневров, включая парковку. Даны постановка и формализация задачи управления парковкой автомобиля с учетом механических и пространственных ограничений, обеспечивающих безопасность парковочного маневра. Рассмотрены как классический, так и современный методы управления автоматической парковкой автомобиля.

Классический метод управления парковкой БПА основан на использовании широко распространенных моделей движения Дубинса и Ридса—Шеппа, обеспечивающих оптимальную по быстрдействию парковку автомобиля. Предлагаются алгоритмы управления парковкой автомобиля, реализующие классический метод управления. При этом для построения пути между двумя точками использован алгоритм быстрорастущего случайного дерева RRT, важным достоинством которого является его независимость от геометрического представления и размерности моделируемого окружения автомобиля.

Современный метод управления парковкой БПА основан на использовании интеллектуальных технологий и, в частности, машинного обучения. Предлагается алгоритм управления парковкой автомобиля, реализующий современный метод управления на основе машинного обучения с подкреплением. При этом использован наиболее эффективный алгоритм обучения — алгоритм Q-обучения.

Синтезированные алгоритмы управления парковкой автомобиля реализованы на языке Python с использованием популярных математических библиотек Matplotlib и NumPy. Проведена компьютерная верификация синтезированных алгоритмов, которая подтвердила эффективность предложенных алгоритмических решений автоматического управления парковкой БПА.

Ключевые слова: беспилотный автомобиль, автоматическое управление парковкой, алгоритмы классической парковки, модели движения Дубинса и Ридса—Шеппа, алгоритм современной парковки, машинное обучение с подкреплением, компьютерный синтез и верификация алгоритма

Введение

В настоящее время все большую популярность приобретают разработки беспилотного автомобиля (БПА, англ. Self-Driving Car, SDC), оборудованного автопилотом — автоматической системой, обеспечивающей управление движением автомобиля без участия водителя [1]. При этом полная автономность БПА достигается автоматизацией управления для всех его режимов движения и маневров, включая, пожалуй, самый распространенный маневр — парковку, которая должна быть безопасной, точной и быстрой [2]. Проблема автоматизации парковки приобретает особую актуальность, поскольку позволяет не только облегчить процесс безопасной парковки, но и увеличить плотность припаркованных автомобилей на 62...87 % [3].

Можно выделить два основных направления современного развития БПА. Первое направление, которого придерживаются большинство автомобильных компаний (Tesla, BMW, Audi, Mercedes), предполагает постепенное достижение все более высоких уровней автоматизации

вождения автомобиля, начиная от вспомогательных пассивных систем и заканчивая полностью автономным автомобилем. Общество автомобильных инженеров "SAE international" выдвинуло концепцию шести уровней автономности БПА. Аналитики Navigant Research предсказывают, что 75 % проданных автомобилей в 2035 г. будет иметь какую-то автономную способность. Второе направление, выдвинутое компанией Google, предполагает разработку на основе технологии Street View полностью автоматических БПА без возможности контроля движения человеком. В конечном счете оба подхода предполагают достижение полного уровня автоматизации, при котором человек для управления автомобилем не потребуется [4].

Первые системы автоматической парковки на автотранспорте были созданы еще в середине 2000-х гг. и, несмотря на их стремительное развитие, до сих пор весьма популярны классические методы автоматического управления парковкой, основанные на принципах геометрического построения опорных траекторий движения подвижных объектов (автомобилей, мобильных роботов,

судов, дронов и др.) на плоскости, которые соответствуют минимальному по времени перемещению объекта из начальной в заданную конечную конфигурацию на основе модели движения машины Дубинса и ее модификаций [5, п. 13.5; 6—14]. Однако в последнее время все большую популярность приобретают не классические "необучаемые", а современные "обучаемые" методы управления парковкой БПА, основанные на использовании методов и технологий искусственного интеллекта: генетических алгоритмов, нечеткой логики, нейронных сетей, нечетких типовых контроллеров, технологий интернета вещей и др. (см, например, работы [15—23]).

В настоящей статье, развивающей результаты авторов [24, 25], рассматриваются вопросы компьютерного синтеза и исследования алгоритмов оптимального по быстродействию управления парковкой БПА на основе как классического метода управления с использованием моделей движения Дубинса и Ридса—Шеппа, так и современного метода управления с использованием машинного обучения с подкреплением, обеспечивающего автоматическую "умную" парковку автомобиля.

Особенности и постановка задачи управления парковкой БПА

Уравнения динамики парковки БПА. Введем следующие обозначения: $W = (x, y)$ — координата центра передней колесной базы автомобиля в системе координат XOY ; θ — угол между осью OX и прямой, проходящей через центры задней и передней колесных баз автомобиля; φ — угол поворота передних колес; v — скорость автомобиля (рис. 1).

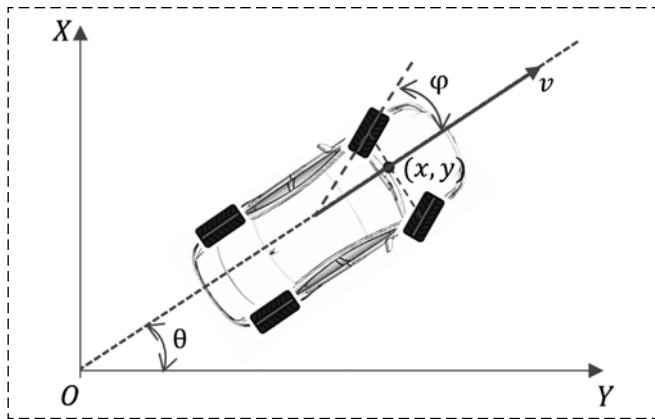


Рис. 1. Модель динамики автомобиля
Fig. 1. Calculation scheme of the movement of car

Полагаем, что в процессе парковки автомобиль движется медленно без высоких оборотов двигателя с отсутствием проскальзывания колес. Тогда математическая модель динамики парковки БПА может быть представлена следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos(\theta + \varphi); \\ \dot{y} = v \sin(\theta + \varphi); \\ \dot{\theta} = v \frac{\operatorname{tg} \varphi}{l}. \end{cases} \quad (1)$$

Состояние автомобиля описывается трехмерным вектором вида

$$\mathbf{s} = (x, y, \theta)^T, \quad (2)$$

а его управление обеспечивается двумерным вектором управления вида

$$\mathbf{u} = (v, \varphi)^T. \quad (3)$$

Механические ограничения парковки БПА.

Гладкость траектории парковки автомобиля, т. е. ограничение ее скорости

$$\dot{k}(t) = \frac{\omega(t) \cos \varphi(t)}{l},$$

обеспечивается заданными ограничениями на угол поворота колес, а также на линейную и угловую скорости автомобиля:

$$\varphi(t) \leq \varphi_{\max}, \quad v(t) \leq v_{\max}, \quad \omega(t) \leq \omega_{\max}. \quad (4)$$

Пространственные ограничения парковки БПА.

Безопасная парковка автомобиля обеспечивается пространственными ограничениями, позволяющими избежать его столкновения с окружающими объектами в зоне парковки. Для избегания такого столкновения введем в рассмотрение окружности "безопасности", покрывающие автомобиль и препятствия в зоне парковки (рис. 2). При этом полагаем, что автомобиль по-

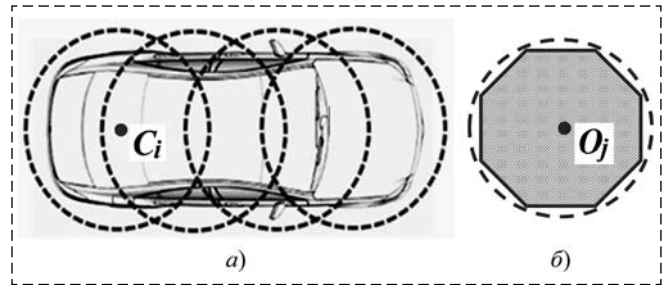


Рис. 2. Окружности "безопасности" i -го автомобиля (а) и j -го препятствия (б)

Fig. 2. "Safety" circles i car (а) and j obstacle (б)

крывают N окружностей "безопасности" радиуса R_{C_i} , с центрами C_i , ($i = 1 : N$), а препятствия покрывают M окружностей "безопасности" радиуса R_{O_j} , с центрами O_j , ($j = 1 : M$). Очевидно, что избежать столкновения автомобиля с препятствиями позволяет выполнение следующих условий:

$$|C_i O_j| > R_{C_i} + R_{O_j}, \quad i = 1 : N, \quad j = 1 : M. \quad (5)$$

Граничные условия парковки БПА. Полагаем, что в момент начала парковки $t = t_0$ автомобиль находится в произвольном состоянии:

$$\mathbf{s}(t_0) = (x(t_0) = x_0, \quad y(t_0) = y_0, \quad \theta(t_0) = \theta_0)^T; \quad (6)$$

$$v(t_0) = 0, \quad \varphi(t_0) = \varphi_0, \quad \dot{\varphi}(t_0) = \dot{\varphi}_0, \quad (7)$$

а в момент ее окончания $t = t_f$ автомобиль находится в целевом состоянии:

$$\mathbf{s}(t_f) = (x(t_f) = x_f, \quad y(t_f) = y_f, \quad \theta(t_f) = \theta_f)^T; \quad (8)$$

$$v(t_f) = 0, \quad \varphi(t_f) = 0. \quad (9)$$

Постановка задачи управления парковкой БПА. Для автомобиля с заданной моделью динамики (1) требуется синтезировать алгоритм управления, обеспечивающий его автоматическую безопасную парковку, т. е. перевод из произвольного начального (6), (7) в целевое конечное (8), (9) состояние за минимальное время:

$$t_f - t_0 \rightarrow \min$$

с учетом механических (4) и пространственных (5) ограничений.

Поставленная задача управления парковкой БПА в современной теории автоматического управления относится к классу задач предельного быстродействия [5].

Алгоритмизация управления парковкой БПА на основе моделей движения Дубинса и Ридса—Шеппа

Среди методов управления предельными по быстродействию маневрами автомобиля, включая парковку в ограниченном пространстве со статическими препятствиями в условиях ограниченной управляемости по угловым скоростям, весьма популярными являются методы,

основанные на моделях движения Дубинса и Ридса—Шеппа (см., напр., работы [26, 27]).

Модель движения Дубинса (L. E. Dubins) имеет следующий вид [26]:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = v(t) \cos \theta(t); \\ \dot{y}(t) = v(t) \sin \theta(t); \quad v(t) = 1; \\ \dot{\theta}(t) = \omega(t) \leq \frac{1}{R}, \end{cases} \quad (10)$$

и, согласно принципу максимума Понтрягина, соответствует предельному по быстродействию переводу системы (10) кусочно-постоянным управлением из одного состояния в другое. При этом существует не более двух промежуточных точек переключения управления, являющихся точками сопряжения дуг окружностей.

Согласно Дубинсу оптимальными являются следующие шесть комбинаций управления: *RSR*, *LSL*, *RSL*, *LSR*, *RLR* и *LRL*. Здесь приняты следующие обозначения: *R* — повернуть направо по наименьшему радиусу; *L* — повернуть налево по наименьшему радиусу; *S* — двигаться прямо. Пример моделирования траектории движения БПА при парковке по траектории Дубинса представлен на рис. 3, а.

Модель движения Ридса—Шеппа (J. A. Reeds & L. A. Shepp) является модификацией модели Дубинса, допускающей движение автомобиля как вперед, так и назад [27]. Данная модель движения более полно отвечает парковке автомобиля. Пример моделирования траектории движения БПА при парковке вдоль траектории Ридса—Шеппа представлен на рис. 3, б.

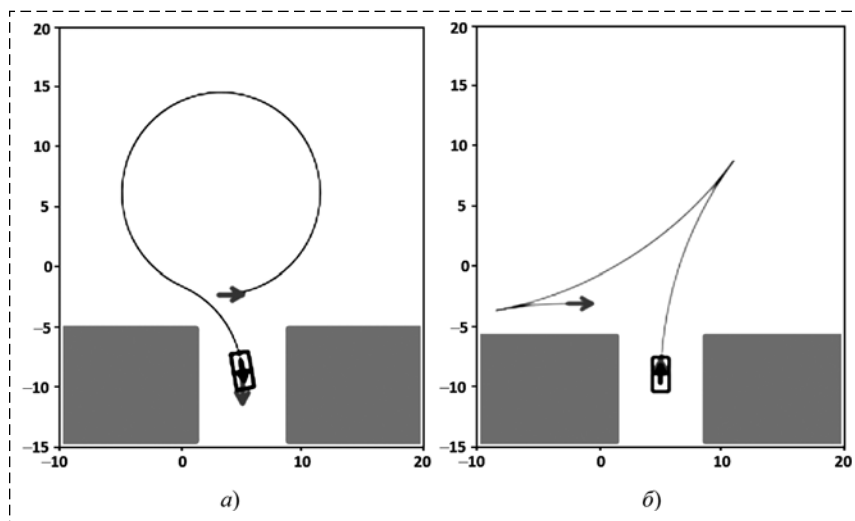


Рис. 3. Сравнительный анализ методов управления парковкой автомобиля на основе моделей движения Дубинса (а) и Ридса—Шеппа (б)

Fig. 3. The comparative analysis of control method by car parking on the basis of Dubins (a) and Reeds-Shepp (b) motion models

Результаты компьютерной апробации алгоритмов моделирования парковки БПА (рис. 3) показывают, что использование модели движения Ридса—Шеппа позволяет выполнять парковку с меньшим свободным пространством, чем при использовании модели движения Дубинса.

Основными преимуществами использования моделей движения Дубинса и Ридса—Шеппа является их предельное быстродействие, простота расчета опорных траекторий, возможность выбора других (не оптимальных) траекторий при наличии препятствий, а также применимость для любых подвижных объектов с ограниченным радиусом поворота.

Следует отметить, что траектории модели движения Дубинса из-за его однонаправленности (движение только вперед) не обладают симметричностью. В связи с этим большой интерес в прикладных задачах управления маневрами подвижных объектов, включая парковку БПА, представляет модель движения Ридса—Шеппа, являющаяся двунаправленной (допускающей движение назад) и обладающая симметрией.

Модель Ридса—Шеппа можно использовать в качестве базовой при построении оптимальных опорных траекторий движения автомобиля с многими точками переключения и с последовательным обходом препятствий. В настоящее время наибольшей популярностью пользуются сэмпинговые (sampling) методы планирования движения [28], среди которых наиболее эффективными являются алгоритмы быстрорастущих случайных деревьев поиска (Rapidly-exploring Random Tree, RRT) [29]. Важным достоинством данных алгоритмов является их независимость от геометрического представления и размерности моделируемого окружения, а также возможность представления исходного пространства поиска со сколь угодно большой точностью с равномерным распределением точек по всему пространству.

Модель движения Ридса—Шеппа вполне применима при построении быстрорастущего случайного дерева путей RRT. Действительно, согласно методу RRT дерево поиска, корнем которого V_s является начальное состояние автомобиля, разрастается путем добавления новых вершин, выбранных случайно из свободной области поиска. При этом новая вершина добавляется в дерево только при условии, что перевод автомобиля в это состояние удовлетворяет введенным пространственным и механическим ограничениям. Для автомобиля, имеющего

ограничение на радиус кривизны траектории, траектории движения Ридса—Шеппа могут быть выбраны в качестве кратчайших путей между ближайшей точкой дерева и случайной точкой. Алгоритм заканчивается при совпадении с заданной точностью последней добавленной в дерево вершины и вершины целевого состояния V_f . Псевдокод алгоритма построения траекторий движения БПА при парковке с использованием модели движения Ридса—Шеппа и быстрорастущего случайного дерева имеет следующий вид:

1. Дано: $V_s, V_f, eps, threshold$

2. До тех пор пока Расстояние $(V_{new}, V_f) > r$ выполнять

3. $T \leftarrow V_{new}$

4. Сгенерировать V_{rand}

5. Найти $V_{near} \in T: \min |V_{near}, V_{rand}|$

6. Если Расстояние $(V_{new}, V_{jobs}) > threshold$

тогда

7. Построить $E(V_{new}, V_{jobs}) \in T$ (путь Ридса—Шеппа)

8. Иначе

9. Сгенерировать V_{rand}

10. Конец условия

11. Конец цикла

12. Возвратить $T(V, E)$

Основными преимуществами алгоритмов на основе быстрорастущего дерева являются их простота (простота реализации и наличие только простых вычислений), быстрая сходимость и расширение на неисследованные области свободного пространства, а также асимптотическая гарантия нахождения реше-

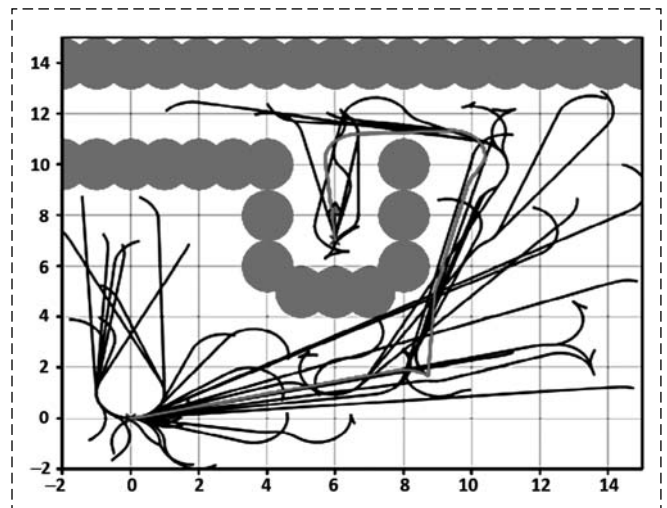


Рис. 4. Компьютерная апробация алгоритма управления парковкой автомобиля на основе метода RRT с моделью движения Ридса—Шеппа

Fig. 4. Computer approbation of control algorithm by car parking based on RRT method with Reeds—Shepp motion model

ния. Построенное дерево позволяет построить опорные траектории парковки автомобиля при маневрировании в ограниченном пространстве с препятствиями. При движении автомобиля вдоль построенной опорной траектории парковки обеспечивается его перевод из произвольного начального в целевое конечное состояние при заданных механических и пространственных ограничениях.

Компьютерная апробация данного алгоритма, реализованного на языке Python с использованием математических библиотек NumPy и Matplotlib, представлена на рис. 4 (препятствия обозначены серым цветом).

Алгоритмизация управления парковкой БПА методом машинного обучения с подкреплением

Обучение с подкреплением (англ. Reinforcement Learning, RL) — перспективное направление разработки эффективных, универсальных и надежных алгоритмов управления сложными подвижными объектами на основе машинного обучения, обеспечивающее улучшение навыков и адаптацию их поведения к условиям функционирования в неопределенной рабочей среде [30, 31].

В работе [32] рассмотрено применение машинного обучения без учителя на основе нейронных сетей для разработки двойного контроллера, обеспечивающего поперечное и продольное маневрирование автомобиля для автоматической парковки в ограниченном пространстве. Алгоритм парковки, основанный на рекуррентных нейронных сетях и подходах машинного обучения, предложен в работе [33]. Большой интерес представляют методы машинного обучения с подкреплением, применение которых позволяет максимально приблизить маневрирование БПА к общепринятому профессиональному управлению парковкой, осуществляемому водителем [34, 35].

В концепции машинного обучения с подкреплением БПА рассматривается как интеллектуальный агент, взаимодействующий с окружающей средой. Цель агента — максимизировать некоторый критерий, именуемый "наградой" и получаемый в процессе обучения в качестве вознаграждения за обучение в виде сигнала обратной связи от среды за выполнение быстрой, точной и безопасной парковки БПА. Используемый в работе метод машинного обучения максимально приближен к общепринятому про-

фессиональному управлению парковкой, осуществляемой водителем. Стратегия действия агента формируется автоматически на основе получаемых сведений о результатах действий.

Один из эффективных алгоритмов обучения с подкреплением является алгоритм Q -обучения, предложенный в 1989 г. Воткинсом (С. J. C. H. Watkins). Данный алгоритм использует жадную стратегию для выбора действий агента и позволяет определить оптимальный выбор действий для любого состояния [36].

Состояние агента на шаге t описывается вектором состояния

$$\mathbf{s}_t = (x(t), y(t), \theta(t))^T.$$

Совершая действие \mathbf{a}_t , БПА переходит из состояния \mathbf{s}_t в состояние \mathbf{s}_{t+1} :

$$\mathbf{a}_t(v, \varphi) : \mathbf{s}_t \rightarrow \mathbf{s}_{t+1}.$$

Введем в рассмотрение функцию полезности — матрицу, которая хранит оценку качества, связанную с каждой парой "состояние—действие".

Действие \mathbf{a}_t выбирается согласно "ε-жадному" принципу:

$$\mathbf{a}_t = \begin{cases} \text{random}, & 0 \leq n \leq \varepsilon, \\ \arg \max_{\mathbf{a}} Q(\mathbf{s}, \mathbf{a}), & \varepsilon \leq n \leq 1. \end{cases} \quad (11)$$

Набор действий $[\mathbf{a}_{t_0} \dots \mathbf{a}_{t_f}]$ задает движение вектора \mathbf{s}_t , проекция которого на плоскость XOY является траекторией движения БПА $k(t)$.

Введем в рассмотрение функцию $R(\mathbf{a}_t)$, являющуюся наградой, возвращаемой окружающей средой в качестве оценки последнего действия \mathbf{a}_t :

$$R(\mathbf{a}_t) = \begin{cases} 1000, & \mathbf{s}_{t+1} = \mathbf{s}_{\text{final}}, \\ -20, & \mathbf{s}_{t+1} \neq \mathbf{s}_{\text{final}}, \\ -300, & C_i \cap O_j. \end{cases}$$

Здесь в системе первое выражение определяет большую награду за достижение конечного положения БПА на парковочном месте, второе выражение определяет штраф за каждый маневр, не приводящий к цели, а третье выражение определяет большой штраф за столкновение с препятствием.

Схема машинного обучения с подкреплением представлена на рис. 5.

Матрица вознаграждения Q заполняется итеративно, максимизируя ожидаемое вознаграждение на следующем шаге от текущего состояния \mathbf{s}_t согласно уравнению Беллмана:

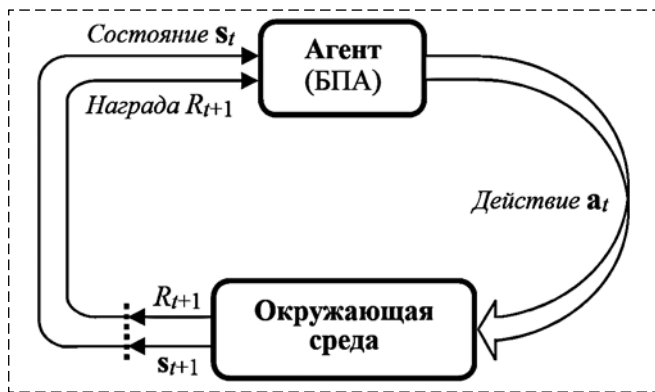


Рис. 5. Схема машинного обучения с подкреплением
 Fig. 5. Machine learning scheme with reinforcement

$$Q(s, a) = (1 - \alpha)Q(s, a) + \alpha(R(a_t) + \gamma \max_{a_{t+1}} Q(s_{t+1}, a_{t+1})), \quad (12)$$

где α — скорость обучения; γ — фактор доверия к будущим вознаграждениям. Заметим, что при больших значениях α алгоритм может слишком быстро завершиться, достигнув локального минимума, а при малых значениях γ алгоритм становится "жадным".

Очевидно, что заполнение матрицы Q не гарантирует выполнение принципа оптимальности Беллмана. Действительно, выбор агентом действия a_t , согласно соотношению (12), позволяет за счет совершения с некоторой частотой случайных действий эффективней исследовать среду обучения в целях нахождения новых оптимальных траекторий парковки автомобиля.

Обозначим I — число эпизодов парковки в процессе обучения и ограничим число действий t , совершаемых агентом: $0 < t \leq 30$. Введем в рассмотрение параметр η , задающий оценку качества выполненного обучения, равный отношению числа успешно выполненных маневров I_{success} к общему числу маневров I_{all} : $\eta = \frac{I_{\text{success}}}{I_{\text{all}}}$.

В табл. 1 определены параметры машинного обучения и представлены определенные в ходе исследования их оптимальные значения. Результаты оценки качества выполнения парковки обученной моделью при различных значениях параметров α и γ представлены в табл. 2.

Таблица 1
 Table 1

Параметр	Название	Допустимый интервал	Значение
α	Learning rate	[0, 1]	0,3
γ	Discount factor		0,75
ε	Exploration factor		0,5

Для оценки качества алгоритма была исследована его сходимость с помощью функции δ_k , характеризующей изменение числовых значений элементов матрицы Q с увеличением числа итераций обучения k :

$$\delta_k = \begin{cases} C = \text{const}, & k = 0; \\ (1 - \xi)\delta_{k-1} + \xi|Q_k(s, a) - Q_{k-1}(s, a)|, & k > 0. \end{cases}$$

Исследование сходимости алгоритма выполнено на тестовом примере при следующих значениях коэффициентов C и ξ : $C = 28$; $\xi = 0,9$. Соответствующий график зависимости δ_k от k представлен на рис. 6, из которого следует, что с ростом числа итераций обучения k последующие значения функции δ_k практически перестают изменяться по сравнению с предыдущими δ_{k-1} , а значит, процесс обучения можно прекратить и считать, что агент (БПА) обучился задаче автоматической парковки.

В табл. 3 приведена зависимость доли успешных маневров от числа итераций обуче-

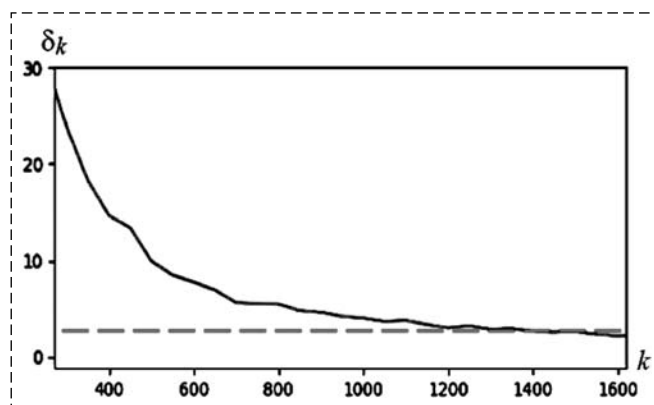


Рис. 6. Сходимость алгоритма

Fig. 6. Convergence of the algorithm

Таблица 2
 Table 2

α	0	0,15	0,30	0,45	0,60	0,75	0,90	1,00
η , %	—	92	99	95	91	87	82	77
γ	0	0,25	0,5	0,75	1,00	—	—	—
η , %	—	92	95	99	97	—	—	—

Таблица 3
 Table 3

$I \cdot 10^6$	η , %	t
0,4	5	5
0,85	29	11
1,2	82	12
1,6	97	9
2,0	99	9
2,4	100	9

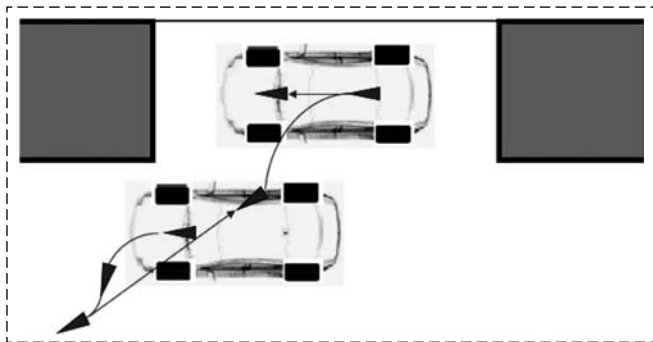


Рис. 7. Парковка автомобиля методом машинного обучения с подкреплением

Fig. 7. Parking by car learning method with reinforcement

ния, а также представлено среднее время выполнение маневра, которое необходимо затратить БПА для выполнения парковки из произвольного начального положения.

Пример компьютерной верификации синтезированного управления автоматической параллельной парковкой БПА методом машинного обучения с подкреплением представлен на рис. 7.

Заключение

Рассмотрена задача управления автоматической парковкой БПА с учетом ограничений, обеспечивающих безопасность парковочного маневра. Предложены алгоритмы управления, реализующие как классический, так и современный методы управления автоматической парковкой автомобиля.

Классический метод управления парковкой БПА основан на использовании широко распространенных моделей движения Дубинса и Ридса—Шеппа, обеспечивающих оптимальную по быстрдействию парковку автомобиля. Предлагаются алгоритмы управления парковкой автомобиля, реализующие классический метод управления парковкой.

Современный метод управления парковкой БПА основан на использовании интеллектуальных технологий. Предлагается алгоритм управления парковкой автомобиля, реализующий современный метод управления парковкой на основе машинного обучения с подкреплением.

Синтезированные алгоритмы управления парковкой автомобиля реализованы на языке Python с использованием популярных математических библиотек Matplotlib и NumPy. Проведена компьютерная верификация синтезированных алгоритмов на модели динамики БПА, которая подтвердила эффективность предложенных алгоритмических решений.

Список литературы

1. Кобылинский А. Ю. Опасности и перспективы развития беспилотного автомобильного транспорта // Наука, техника и образование. 2022. Т. 83, № 3. С. 40—44.
2. Жидков Е. С., Шиповалов Д. А. Развитие направления беспилотного транспорта. Система автоматической парковки автомобиля // ИНТЕРНАУКА. 2019. № 47-1 (129). С. 6—8.
3. Nourinejad M., Bahrami S., Roorda M. J. Designing Parking Facilities for Autonomous Vehicles // Transportation Research Part B Methodological. 2018. Vol. 109, No. 39. P. 110—127.
4. Singh S., Saini B. S. Autonomous Cars: Recent Developments, Challenges, and Possible Solutions // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1022, Iss. 1. P. 012028.
5. Аграчев А. А., Сачков Ю. Л. Геометрическая теория управления. М.: Физматлит, 2005. 392 с.
6. Вагизов М. Р., Хабаров С. П. Построение программных траекторий движения на базе решения задачи "Машина Дубинса" // Информатика и космос. 2021. № 3. С. 116—125.
7. Маштаков А. П. Задача быстрдействия на группе движений плоскости с управлением в полукруге // Математический сборник. 2022. Т. 213, № 4. С. 100—122.
8. Жданов А. А., Климов Д. М., Королев В. В., Утемов А. Е. Моделирование процесса параллельной парковки автомобиля // Известия РАН. Теория и системы управления. 2008. № 6. С. 74—86.
9. Li B., Shao Z. A Unified Motion Planning Method for Parking an Autonomous Vehicle in the Presence of Irregularly Placed Obstacles // Knowledge-Based Systems. 2015. Vol. 86. P. 11—20.
10. Gyme-Bravo F., Cuesta F., Ollero A., Viguria A. Continuous Curvature Pathgeneration Based on B-Spline Curves for Parking Manoeuvres // Robot. Auton. Syst. 2008. Vol. 56, N. 4. P. 360—372.
11. Vorobieva H., Minoiu-Enache N., Glaser S., Mammarr S. Geometric Continuous Curvature Path Planning for Automatic Parallel Parking // Proceedings of 10th IEEE Internat. Conf. on Networking, Sensing and Control (ICNSC 2013). 2013. P. 418—423.
12. Muller B., Deutscher J., Grodde S. Continuous Curvature Trajectory Design and Feedforward Control for Parking a Car // IEEE Trans. Control Syst. Technol. 2007. Vol. 15, N. 3. P. 541—553.
13. Siedentop C., Heinze R., Kasper D., Breuel G., Stachniss C. Path-Planning for Autonomous Parking with Dubins Curves // Conference: Proc. of the Workshop Fahrerassistenz systeme. 2015. P. 1—8.
14. Ардентов А. А., Губанов И. С. Моделирование парковки автомобиля с прицепом вдоль путей Маркова-Дубинса и Ридса-Шеппа // Программные системы: теория и приложения. 2019. Т. 10, № 4 (43). С. 97—110.
15. Kong S.-G., Kosko B. Comparison of Fuzzy, Neural Truck Backer Upper Control Systems // Proc. 1990-IJCNN International Joint Conference on Neural Networks. San Diego, CA, USA. 1990. Vol. 3. P. 349—358.
16. Li T., Chang S. Autonomous Fuzzy Parking Control of a Car-Like Mobile Robot // IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Part A: Syst. Hum. 2003. Vol. 33 (4). P. 451—465.
17. Zhao Y., Jr. E. C. Robust Automatic Parallel Parking in Tight Spaces via Fuzzy Logic // Robot. Auton. Syst. 2005. Vol. 51 (2). P. 111—127.
18. Мукешимана К. Нечеткая модель управления парковкой беспилотного автомобиля // Междунар. науч. конф. по проблемам управления в технических системах. 2017. Т. 1. С. 432—436.
19. Ballinas E., Montiel O., Castillo O., Rubio Y., Aguilar L. T. Automatic Parallel Parking Algorithm for a Car-like Robot using Fuzzy PD + I Control // Engineering Letters. 2018. Vol. 26, N. 4. P. 447—454.
20. Wang Z., Shao Q., Wang C., Zhang Q. Automatic Parking Trajectory Planning Based on Recurrent Neural Network // 2018 IEEE 9th International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS). Beijing, China. 2018. P. 1—4.
21. Parashar S., Kumar G. Smart Parking System Using Genetic Optimization: A Review // 2019 International Conference on Intelligent Sustainable Systems (ICISS). Palladam India. 2019. P. 599—603.

22. **Евдокимова Т. С., Синодкин А. А., Федосова Л. О., Тюрников М. И.** Алгоритм построения глобальной траектории движения и планирования маршрута автоматической парковки беспилотного транспортного средства // Вестник МГТУ "СТАНКИН". 2020. № 4 (55). С. 61—67.
23. **Комаров И. И., Лобач Д. А., Мутханна А. С. А.** Интеллектуальная система управления парковкой для беспилотных автомобилей на основе технологий интернета вещей // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2022): XI Междунар. научно-техн. и научно-метод. конф. Т. 1. СПб. 2022. С. 592—596.
24. **Тюленев И. Д., Филимонов Н. Б.** Управление автоматической парковкой беспилотного автомобиля на основе моделей движения Дубинса и Ридса-Шеппа // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2023. № 35. С. 52—59.
25. **Тюленев И. Д., Филимонов Н. Б.** Управление автоматической парковкой беспилотного автомобиля на основе метода машинного обучения с подкреплением // Высокопроизводительные вычислительные системы и технологии. 2023. Т. 7, № 1. С. 159—165.
26. **Dubins L. E.** On Curves of Minimal Length with a Constraint on Average Curvature, and with Prescribed Initial and Terminal Positions and Tangents // American Journal of Mathematics. 1957. Vol. 79, Iss. 3. P. 497—516.
27. **Reeds J. A., Shepp L. A.** Optimal Paths for a Car that Goes Both Forwards and Backwards // Pacific Journal of Mathematics. 1990. Vol. 145, N. 2. P. 367—393.
28. **Казаков К. А., Семенов В. А.** Обзор современных методов планирования движения // Труды ИСП РАН. 2016. Т. 28, Вып. 4. С. 241—294.
29. **LaValle S. M., Kuffner J. J.** Rapidly-Exploring Random Trees: Progress and Prospects // 2000 Workshop on the Algorithmic Foundations of Robotics. 2000. P. 293—308.
30. **Ма Ц., Малинина Т. А., Борисик М. М., Осипович В. С.** Алгоритмы машинного обучения робота автомобиля // Fourth Internat. Conf. and Expo BIG DATA ADVANCED ANALYTICS. 2018. С. 416—418.
31. **Дудаков А. С., Турсунов Т. Р., Филимонов Н. Б.** Метод глубокого обучения с подкреплением в задачах маршрутизации движения мобильных роботов в среде с препятствиями // Мехатроника, автоматика и робототехника. 2023. № 11. С. 7—13.
32. **Moon J., Bae I., Kim S.** Automatic Parking Controller with a Twin Artificial Neural Network Architecture // Hindawi Mathematical Problems in Engineering. 2019. Vol. 2019. 18 p.
33. **Wang Z., Shao Q., Wang C., Zhang Q.** Automatic Parking Trajectory Planning Based on Recurrent Neural Network // IEEE 9th International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS), 2018. P. 1—4.
34. **Zhang P., Xiong L., Yu Z., Fang P., Yan S., Yao J., Zhou Y.** Reinforcement Learning-Based End-to-End Parking for Automatic Parking System // Sensors. 2019. Vol. 19(18). P. 3996.
35. **Kiran B. R.** Deep Reinforcement Learning for Autonomous Driving: A Survey. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2021. P. 1—18.
36. **Jang B., Kim M., Harerimana G.** et al. Q-Learning Algorithms: A Comprehensive Classification and Applications // IEEE Access. 2019. P. 133653—133667.

Algorithmization of Automatic Parking Control of Self-Driving Car

I. D. Tyulenev¹, tiulenev.id19@physics.msu.ru, N. B. Filimonov^{1,2}, nbfilimonov@mail.ru,

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russian Federation,

²Trapeznikov Institute of Control Problems, RAS, Moscow, 117997, Russian Federation

Corresponding author: **Filimonov Nikolay B.**, Professor, Dr. Sci. Tech.,
Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russian Federation, e-mail: nbfilimonov@mail.ru

Accepted on September 10, 2023

Abstract

Currently, the development of a self-driving car (SDC) is becoming increasingly popular, the full autonomy of which is achieved by automatic control of all its driving modes and maneuvers, including parking — the most common maneuver. The problem of parking automation is of particular relevance, as far as it allows not only to facilitate the process of safe parking, but also to increase the density of parked cars. The paper considers the control problem of automatic parking of SDC. The statement and formalization of the control problem of car parking taking into account the mechanical and spatial constraints ensuring the safety of the parking maneuver are given. Both classical and modern control methods of automatic car parking are considered. The classical control method of SDC parking is based on the utilization of widely used Dubins and Reeds-Shepp traffic models ensuring fast acting optimal car parking. At the same time, the algorithm of a fast-growing random tree RRT was used to construct a path between two points. Due to randomization, an important advantage of this algorithm is its independence from the geometric representation and dimension of the modeled environment of the car. The modern control methods of SDC parking are based on the use of intelligent methods and technologies. In present paper in contrast to the classical, "untrained" methods, the control method of parking based on machine learning is used. The problem of synthesis of control algorithm of SDC parking based on the machine learning method with reinforcement is posed and solved. A car parking algorithm implemented in Python using mathematical libraries Matplotlib and NumPy is synthesized. Computer verification of the synthesized algorithm was carried out and optimal values of machine learning parameters were determined.

Keywords: self-driving car, automatic parking control, classical packing algorithms, Dubins and Reeds-Shepp motion models, modern parking algorithm, machine learning with reinforcement, computer synthesis and algorithms verification

For citation:

Tyulenev I. D., Filimonov N. B. A Algorithmization of Automatic Parking Control of Self-Driving Car, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2023, vol. 24, no. 12, pp. 634—642.

DOI: 10.17587/mau.24.634-642

References

1. **Kobylynsky A. Yu.** Dangers and prospects of development of unmanned motor transport, *Science, technology and education*, 2022, vol. 83, no. 3, pp. 40–44 (in Russian).
2. **Zhidkov Ye. S., Shipovalov D. A.** Development of the Direction of Unmanned Transport. Automatic Car Parking System, *INTERNAUKA*, 2019, no. 47-1 (129), pp. 6–8 (in Russian).
3. **Nourinejad M., Bahrami S., Roorda M. J.** Designing Parking Facilities for Autonomous Vehicles, *Transportation Research Part B Methodological*, 2018, vol. 109, no. 39, pp. 110–127.
4. **Singh S., Saini B. S.** Autonomous Cars: Recent Developments, Challenges, and Possible Solutions, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2021, vol. 1022, iss. 1, pp. 012028.
5. **Agrachev A. A., Sachkov Yu. L.** Geometric theory of control, Moscow, Fizmatlit, 2005, 392 p. (in Russian)
6. **Vagizov M. R., Khabarov S. P.** The construction of motion program trajectories based on the solution of the Dubins problem, *Informatsiyaikosmos*, 2021, no. 3, pp. 116–125 (in Russian).
7. **Mashtakov A. P.** The problem of speed on a group of plane movements with control in a semicircle, *Mathematical collection*, 2022, vol. 213, no. 4, pp. 100–122 (in Russian).
8. **Zhdanov A. A., Klimov D. M., Korolev V. V., Utemov A. E.** Modeling of the process of parallel parking of a car, *News of the Russian Academy of Sciences. Theory and control systems*, 2008, no. 6, pp. 74–86 (in Russian).
9. **Li B., Shao Z.** A Unified Motion Planning Method for Parking an Autonomous Vehicle in the Presence of Irregularly Placed Obstacles, *Knowledge-Based Systems*, 2015, vol. 86, pp. 11–20.
10. **Gymez-Bravo F., Cuesta F., Ollero A., Viguria A.** Continuous Curvature Pathgeneration Based on B-Spline Curves for Parking Manoeuvres, *Robotics Autonomous Systems*, 2008, vol. 56, no. 4, pp. 360–372.
11. **Vorobieva H., Minoiu-Enache N., Glaser S., Mammars S.** Geometric Continuous Curvature Path Planning for Automatic Parallel Parking, *Proc. of 10th IEEE Internat. Conf. on Networking, Sensing and Control (ICNSC 2013)*, 2013, pp. 418–423.
12. **Muller B., Deutscher J., Grodde S.** Continuous Curvature Trajectory Design and Feedforward Control for Parking a Car, *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, 2007, vol. 15, no. 3, pp. 541–553.
13. **Siedentop C., Heinze R., Kasper D., Breuel G., Stachniss C.** Path-Planning for Autonomous Parking with Dubins Curves // Conference: Proc. of the Workshop Fahrerassistenz systeme. 2015. P. 1–8.
14. **Ardentov A. A., Gubanov I. S.** Modeling of parking a car with a trailer along the Markov-Dubins and Reeds-Shepp paths, *Software Systems: Theory and Applications*, 2019, vol. 10, no. 4 (43), pp. 97–110.
15. **Kong S.-G., Kosko B.** Comparison of Fuzzy, Neural Truck Backer Upper Control Systems, *Proc. 1990-IJCNN International Joint Conference on Neural Networks*. San Diego, CA, USA, 1990, vol. 3, pp. 349–358.
16. **Li T., Chang S.** Autonomous Fuzzy Parking Control of a Car-Like Mobile Robot, *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Part A: Syst. Hum.*, 2003, vol. 33 (4), pp. 451–465.
17. **Zhao Y., Jr. E. C.** Robust Automatic Parallel Parking in Tight Spaces via Fuzzy Logic, *Robot. Auton. Syst.*, 2005, vol. 51 (2), pp. 111–127.
18. **Mukeshimana C.** Fuzzy Model of Parking Control for an Unmanned Vehicle, *Internat. Scientific Conf. on Control Problems in Technical Systems*, 2017, vol. 1, pp. 432–436 (in Russian).
19. **Ballinas E., Montiel O., Castillo O., Rubio Y., Aguilar L. T.** Automatic Parallel Parking Algorithm for a Car-like Robot using Fuzzy PD + I Control, *Engineering Letters*, 2018, vol. 26, no. 4, pp. 447–454.
20. **Wang Z., Shao Q., Wang C., Zhang Q.** Automatic Parking Trajectory Planning Based on Recurrent Neural Network, *2018 IEEE 9th International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS)*, Beijing, China, 2018, pp. 1–4.
21. **Parashar S., Kumar G.** Smart Parking System Using Genetic Optimization: A Review, *2019 International Conference on Intelligent Sustainable Systems (ICISS)*, Palladam India, 2019, pp. 599–603.
22. **Evdokimova T. S., Sinodkin A. A., Fedosova L. O., Tyrikov M. I.** Algorithm for Constructing a Global Trajectory of Traffic and Planning of the Automatic Parking Route of the Self-Driving Car, *Vestnik MSTU "STANKIN"*, 2020, no. 4 (55), pp. 61–67 (in Russian).
23. **Komarov I., Lobach D., Muthanna A. S. A.** Intelligent Parking Control System for Unmanned Vehicles Based on Internet of Things Technologies, *Actual problems of infotelecommunications in science and education (APINO 2022): XI Internat. scientific and technical and the scientific method. conf.*, vol. 1, St. Petersburg, 2022, pp. 592–596 (in Russian).
24. **Tyulenev I. D., Filimonov N. B.** Automatic control for parking self-driving car based on Dubins and Reeds-Shepp models, *Journal of Advanced Research in Technical Science*, 2023, no. 35, pp. 52–59 (in Russian).
25. **Tyulenev I. D., Filimonov N. B.** Automatic Parking Control of an Unmanned Car Based on Reinforcement Machine Learning, *High-Performance Computing Systems and Technologies*, 2023, vol. 7, no. 1, pp. 159–165 (in Russian).
26. **Dubins L. E.** On Curves of Minimal Length with a Constraint on Average Curvature, and with Prescribed Initial and Terminal Positions and Tangents, *American Journal of Mathematics*, 1957, vol. 79, iss. 3, pp. 497–516.
27. **Reeds J. A., Shepp L. A.** Optimal Paths for a Car that Goes Both Forwards and Backwards, *Pacific Journal of Mathematics*, 1990, vol. 145, no. 2, pp. 367–393.
28. **Kazakov K. A., Semenov V. A.** An Overview of Modern Methods for Motion Planning, *Proc. ISP RAS*, 2016, vol. 28, iss. 4, pp. 241–294 (in Russian).
29. **LaValle S. M., Kuffner J. J.** Rapidly-Exploring Random Trees: Progress and Prospects, *2000 Workshop on the Algorithmic Foundations of Robotics*, 2000, pp. 293–308.
30. **Ma Ts., Malinina T. A., Borisik M. M., Osipovich V. S.** Machine learning algorithms car operation, *Fourth Internat. Conf. and Expo BIG DATA ADVANCED ANALYTICS*, 2018, pp. 416–418 (in Russian).
31. **Dudakov A. S., Tursunov T. R., Filimonov N. B.** The Method of Deep Reinforcement Learning in Motion Planning Problem of Mobile Robots in an Environment with Obstacles, *Mechatronics, Automation and Robotics*, 2023, no. 11, pp. 7–13 (in Russian).
32. **Moon J., Bae I., Kim S.** Automatic Parking Controller with a Twin Artificial Neural Network Architecture, *Hindawi Mathematical Problems in Engineering*, 2019, vol. 2019, 18 p.
33. **Wang Z., Shao Q., Wang C., Zhang Q.** Automatic Parking Trajectory Planning Based on Recurrent Neural Network, *IEEE 9th International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS)*, 2018, pp. 1–4.
34. **Zhang P., Xiong L., Yu Z., Fang P., Yan S., Yao J., Zhou Y.** Reinforcement Learning-Based End-to-End Parking for Automatic Parking System, *Sensors*, 2019, vol. 19(18), pp. 3996.
35. **Kiran B. R.** Deep Reinforcement Learning for Autonomous Driving: A Survey, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021, pp. 1–18.
36. **Jang B., Kim M., Harerimana G.** et al. Q-Learning Algorithms: A Comprehensive Classification and Applications, *IEEE Access*, 2019, pp. 133653–133667.

Е. А. Марчук¹, аспирант, e.marchuk@innopolis.ru,

А. С. Михайлов¹, инженер-электроник, a.mikhailov@innopolis.ru,

Я. В. Калинин¹, канд. техн. наук, науч. сотр., claymor.vlg@gmail.com,

А. В. Малолетов^{1,2}, д-р физ.-мат. наук, науч. руководитель, a.maloletov@innopolis.ru,

¹ Центр технологий компонентов робототехники и мехатроники, Университет Иннополис, г. Иннополис,

² Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград

Управление силами натяжения в системе тросового параллельного робота*

Предлагается метод управления силами натяжения в статически неопределимых тросовых системах на основе неотрицательного метода наименьших квадратов с контролем сингулярных или близких к сингулярным решений и полным перебором всех возможных конфигураций тросов. Для тросовых параллельных роботов задача управления силами натяжения тросов является критически важной, поскольку при отсутствии контроля силы натяжения в тросах распределяются неравномерно, что ведет к снижению робастности системы, повышенным энергозатратам и повышенному износу. В особых случаях конфигурации системы тросов силы натяжения становятся велики настолько, что это приводит к обрывам тросов. Вместе с тем, коррекция распределения сил натяжения тросов не должна приводить к существенным отклонениям от заданного положения мобильной платформы или, если формулировать задачу в терминах сил, к нарушению уравнений кинестатики. Таким образом, задача управления силами натяжения в системе тросового параллельного робота представляет собой задачу оптимизации сил натяжения тросов по критериям минимизации нормы их вектора в конфигурационном пространстве и минимизации нормы невязки вектора сил и моментов в операционном пространстве робота. Разработанный алгоритм основывается на решении неопределенных систем линейных алгебраических уравнений с нахождением минимальных норм наименьших квадратов и последующим обнулением отрицательных компонентов вектора решения. В работе рассмотрены примеры решения поставленной задачи для группы нижних тросов строительного 3D-принтера на базе тросового робота и для двенадцатитросовой системы.

Ключевые слова: параллельный робот, тросовый робот, трос, односторонняя связь, решение неотрицательных наименьших квадратов, управление силами, силы натяжения

Введение

Тросовые роботы представляют собой механизмы с параллельной кинематикой и односторонними связями. На рис. 1 (см. вторую сторону обложки) показана схема строительного 3D-принтера на основе тросового робота. Структура аппарата включает в себя четыре опоры 1, в данном случае реализованные в виде башен, на которых размещаются лебедки 2 и блоковая система тросов. Тросы можно разделить на группу верхних тросов 3, блоки 4 которых неподвижно закреплены в верхних точках опор, и группу нижних тросов 5, блоки которых установлены на подвижных каретках 6, перемещающихся вверх и вниз по опоре. На тросах подвешена мобильная платформа 7 робота, в данном случае оборудованная экструдером. Для подачи строительного раствора к экструдеру служит насос 8 и шланг 9, размещенный на специальной опоре 10, в данном случае реализованной в виде отдельной башни.

Согласованно управляя приводами лебедок, можно обеспечить требуемое движение платформы. При этом верхние тросы берут на себя роль "несущих", воспринимая вес платформы и обеспечивая ее перемещение в рабочем пространстве робота, а нижние тросы играют роль "управляющих", обеспечивая управление ориентацией платформы. Особенностью рассматриваемой тросовой системы является наличие подвижных кареток, которые предназначены для перемещения блоков нижних тросов таким образом, чтобы нижние тросы во время печати перемещались вверх вместе с мобильной платформой. В противном случае нижние тросы будут мешать процессу печати, пересекая уже напечатанные части здания или сооружения. Вместе с тем, горизонтальное расположение нижних тросов ставит особые задачи управления ими, позволяя контролировать как ориентацию, так и усилия в них.

Применение тросового робота в качестве строительного принтера означает необходимость его размещения в условиях строительной площадки, при этом могут значительно отличаться требуемые размеры и форма рабочей зоны робо-

*Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант 22-29-01618).

та, образованная четырьмя его опорами. Поэтому в отличие от лабораторных моделей тросовых роботов, где обычно используются жесткие рамные конструкции, в рассматриваемом случае опоры реализованы в виде отдельно стоящих башен. Это создает дополнительные сложности в управлении тросами, поскольку деформации башен приводят к значительным смещениям точек схода тросов и отклонениям мобильной платформы робота от заданного положения. При составлении математической модели системы автоматического управления тросовой системой возникает проблема адекватного отображения конструктивной и геометрической нелинейности тросов в модели. Наиболее распространенные в настоящее время математические модели тросовых параллельных роботов основываются на предположении об исключении условия геометрической нелинейности тросов, т. е. предполагается, что тросы провисают незначительно [1, 2]. В то же время условие конструктивной нелинейности тросов может задаваться следующими способами: а) через систему неравенств [3, 4]; б) через функции активации [5, 6]. Ранее авторами разработана модель динамики тросового робота, учитывающая все вышеперечисленные особенности [7, 8].

Целью настоящей работы является разработка алгоритма управления тросовой системой крупногабаритного тросового параллельного робота, направленного на оптимизацию сил натяжения тросов по критерию минимизации нормы вектора сил в конфигурационном пространстве, с потенциальной возможностью использования в задачах управления в реальном времени.

Постановка задачи

Поскольку число тросов в системе, как правило, превышает число степеней свободы платформы, то такая система является статически неопределимой, что позволяет управлять силами натяжения тросов в соответствии с тем или иным критерием. Распределение нагрузки на систему тросов осуществляется путем подтягивания или ослабления соответствующих тросов.

Ставится задача управления нагрузками на систему тросов с удовлетворением критериев минимизации нормы вектора сил в конфигурационном пространстве и минимизации нормы невязки сил и моментов в операционном про-

странстве. Координатами конфигурационного пространства для тросовой системы являются длины тросов, соответственно силы натяжения тросов в конфигурационном пространстве задаются естественным образом. Операционное пространство задается декартовой прямоугольной правоориентированной системой координат, связанной с рабочей зоной робота.

Кинестатическое равновесие системы описывается системой уравнений

$$\begin{aligned} \mathbf{F} + \mathbf{G} + \mathbf{P} + \mathbf{\Phi} &= 0; \\ \mathbf{M}^{\mathbf{F}} + \mathbf{M}^{\mathbf{\Phi}} + \mathbf{M}^{\mathbf{P}} &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где \mathbf{F} — результирующий вектор сил натяжения тросов; \mathbf{G} — сила тяжести платформы; \mathbf{P} — результирующий вектор других внешних сил, действующих на платформу; $\mathbf{\Phi}$, $\mathbf{M}^{\mathbf{\Phi}}$ — результирующие векторы сил и моментов инерции платформы; $\mathbf{M}^{\mathbf{F}}$, $\mathbf{M}^{\mathbf{P}}$ — моменты, создаваемые силами натяжения тросов и внешних сил относительно центра масс платформы. Под внешними силами \mathbf{P} , действующими на платформу, понимаются силы, вызванные ветровой нагрузкой, подающим шлангом и другими факторами.

Связь между компонентами f_i вектора сил натяжения тросов в конфигурационном пространстве робота и векторами \mathbf{F} и $\mathbf{M}^{\mathbf{F}}$ в операционном пространстве, входящими в уравнения (1), описывается выражением

$$\mathbf{J}\mathbf{f} = \begin{bmatrix} \mathbf{F} \\ \mathbf{M}^{\mathbf{F}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

или в развернутом виде для пространственного случая:

$$\begin{bmatrix} j_{11} & \cdots & j_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ j_{61} & \cdots & j_{6n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где \mathbf{J} — геометрическая матрица Якоби; \mathbf{f} — вектор сил натяжения тросов в конфигурационном пространстве; n — число тросов.

В первом приближении система является линейной относительно компонентов вектора сил натяжения тросов, и каждый столбец матрицы Якоби определяет влияние определенного троса. Фактически управление силами натяжения приводит к небольшому изменению длин тро-

сов, что, в свою очередь, отражается на компонентах матрицы Якоби. Как правило, этим влиянием можно пренебречь. Однако существуют сингулярные конфигурации тросовой системы, в которых тросы не могут обеспечить равновесие платформы с заданной ориентацией. В рамках рассматриваемой модели такие конфигурации дают решения, в которых силы натяжения одного или нескольких тросов многократно возрастают, при этом невязка суммы сил в операционном пространстве не уменьшается.

При числе тросов, равном шести, система линейных уравнений (3) является определенной. Однако на практике такие системы не используются, поскольку шесть тросов не гарантируют силовое замыкание системы. Другими словами, решения системы (3) почти для любой заданной ориентации платформы будут содержать одно или несколько отрицательных значений, что соответствует недопустимой для тросов работе на сжатие. Поэтому целесообразна разработка методов, обеспечивающих решение уравнений (3) для числа тросов семь и более.

Независимо от того, является ли система линейных алгебраических уравнений определенной, неопределенной или переопределенной, она может быть решена с использованием метода поиска минимальной нормы наименьших квадратов. Обязательным условием является неоднородность системы уравнений, т. е. ненулевая правая часть. В противном случае решение будет тривиальным.

Условие односторонних связей накладывает ограничение на неотрицательные значения компонент вектора решения. В таком случае рекомендуется использовать метод неотрицательных наименьших квадратов.

Инструменты решения задач в неотрицательных наименьших квадратах являются стандартными для большинства популярных математических программных пакетов. Их алгоритмы основываются на поиске векторов сопряженного пространства, удовлетворяющих заданным критериям [9]. Несомненным преимуществом стандартных инструментов популярных математических программных пакетов является быстрое действие и возможность быстрого, хоть и не самого точного, нахождения решения для матриц относительно большой размерности. Однако для некоторых задач решение, полученное с использованием стандартных инструментов, демонстрирует недостаточную вычислительную устойчивость. Кроме того, качество решения по

критерию минимизации нормы вектора для неопределенных систем не является оптимальным при использовании стандартных инструментов.

Метод неотрицательных наименьших квадратов с исключением выбросов

В настоящей работе предлагается искать решение задачи распределения сил натяжения тросов с использованием алгоритма полного перебора решений, полученных с использованием метода наименьших квадратов применительно к матрицам всех возможных комбинаций нагруженных тросов, отсеивая решения, близкие к сингулярным конфигурациям, и обнуляя отрицательные значения. Алгоритм решения состоит из следующих действий:

1. Поиск всех возможных комбинаций нагруженных тросов без повторов. Каждая комбинация представляется как строка длиной n , заполненная нулями и единицами. Нагруженные тросы обозначаются единицами, остальным ячейкам соответствуют нулевые значения. При этом используется алгоритм составления комбинаций, предложенный в работе [10].

2. Матрица коэффициентов для каждого случая формируется путем обнуления столбцов исходной матрицы, соответствующих нулевым элементам строк комбинаций.

3. Для каждого случая решается система линейных алгебраических уравнений (3) с нахождением минимальной нормы наименьших квадратов. Отрицательные компоненты вектора решения обнуляются.

4. Проводится проверка норм векторов решений полного перебора на аномально большие значения — выбросы. Выбросы могут соответствовать решениям для случаев особой (сингулярной) конфигурации тросовой системы или конфигурации, близкой к сингулярности. Решения, соответствующие выбросам, исключаются.

5. Для каждого случая решения находится норма невязки по уравнениям (1). Найденные значения норм невязки округляются с заданной точностью. Выполняется поиск наименьших значений среди полученных норм невязки.

6. Среди выбранных норм невязки с наименьшими значениями проводится отбор по критерию наименьшего значения евклидовой нормы соответствующего вектора решения. В случае неединственного вектора решения следует выбирать последний вектор из найденных, соот-

ветствующий наибольшему значению числа ненулевых столбцов матрицы коэффициентов, что обеспечивает распределение нагрузки на максимально возможное число несущих элементов конструкции.

Недостатком предложенного метода является вычислительная сложность, поскольку метод характеризуется экспоненциальной скоростью роста функции зависимости числа комбинаций от числа тросов. Однако он гарантированно обеспечивает нахождение решения с минимально возможным отклонением при условии его существования.

Зависимость числа комбинаций от числа тросов в системе оценивается следующим образом. Первому десятку тросов соответствует не более 10^3 комбинаций, каждый последующий десяток тросов повышает число комбинаций на три порядка:

$$N(x) \approx 10^{0,3x},$$

что соответствует сложности алгоритма $O(n^x)$ и согласуется с теорией сложности вычислений для задач полного перебора [11].

Преимуществом данного метода также является возможность проверки решений полного перебора на наличие выбросов, соответствующих решениям для случаев особой конфигурации тросовой системы. Проверка решений для особых конфигураций тросовой системы выполняется через оценку выбросов имеющегося набора решений с использованием распределения решений по квартилям. Коэффициент межквартильного размаха следует выбирать с достаточно большим значением [12].

Далее приведены примеры применения описанного алгоритма с указанием времени выполнения расчетов. Программа выполнялась на персональном компьютере на базе процессора AMD Ryzen 7 5700x. Следует отметить, что авторы не ставили перед собой задачу разработать реализацию алгоритма с максимальным быстродействием. Разработанная программа предназначена для проверки потенциальной работоспособности предложенного метода, поэтому приведенные значения в первую очередь интересны для сравнения между собой. Однако даже такая реализация дает быстродействие, достаточное для применения в системе управления относительно медленных крупногабаритных тросовых роботов с небольшим числом тросов. Оптимизация программного кода, ве-

роятно, позволит многократно повысить скорость выполнения алгоритма, что сделает возможным его применение для управления более требовательными к быстродействию системами или системами с большим числом тросов.

В текущей тестовой реализации алгоритма время вычислений для нахождения векторов решения с числом компонентов не более 6 и числом комбинаций $N < 10^3$ не превышает 100 мс. Это может быть приемлемым, например, для тросовой системы строительного 3D-принтера. Скорость движения мобильной платформы такого аппарата равна 0,15 м/с, что при габаритных размерах $20 \times 20 \times 15$ м соответствует достаточно медленному изменению конфигурации робота.

Для числа компонентов вектора более 10 и числа комбинаций $N > 10^3$ время расчета с использованием тестовой реализации алгоритма превышает 1 с. Для числа компонентов вектора, равного 20, число комбинаций возрастает до $N > 10^6$, время расчетов возрастает до 1 мин и более. В таких вариантах метод может быть актуальным для расчетов статических конструкций или для предварительного планирования движения робота.

Реализация метода для восьмитросового параллельного робота

В рассматриваемом тросовом роботе режимы работы верхних и нижних тросов существенно отличаются. Так, верхние тросы преимущественно обеспечивают противодействие силе тяжести платформы и обеспечивают перемещение платформы в пределах рабочего пространства робота. Нижние тросы противодействуют преимущественно внешним силам, направленным в горизонтальном направлении, и обеспечивают управление ориентацией платформы. Конечно, такое разделение является достаточно условным, тросы взаимодействуют между собой и, таким образом, каждый из них воспринимает часть общей нагрузки. Тем не менее, ранее проведенные исследования [7, 13] показывают обоснованность раздельного управления группами верхних и нижних тросов.

Схема основных компонентов системы автоматического управления группами верхних и нижних тросов крупногабаритного тросового параллельного робота приводится на рис. 2.

На рис. 2 использованы следующие обозначения: TV — запрограммированный закон движения рабочего инструмента робота (trajectory and

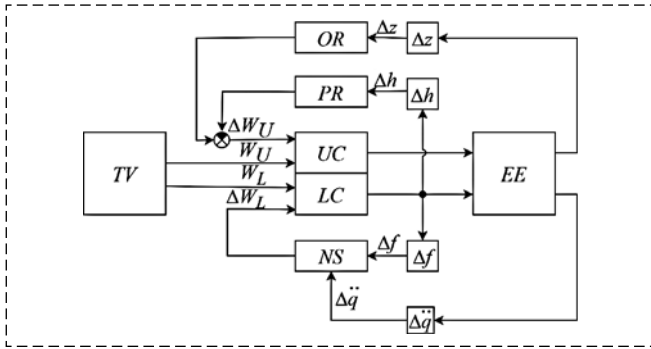


Рис. 2. Схема системы автоматического управления группами верхних и нижних тросов крупногабаритного тросового параллельного робота

Fig. 2. The scheme of control system of large-sized cable-driven parallel robot

velocity law); *EE* — рабочий инструмент робота (end-effector); *UC* — группа несущих верхних тросов (upper cables); *LC* — группа регулировочных нижних тросов (lower cables); *PR* — регулятор ошибок позиционирования рабочего инструмента робота (position regulator); *OR* — регулятор ошибок ориентации рабочего инструмента робота (orientation regulator); *NS* — регулятор сил натяжения тросов (null-space and counteraction regulator).

Для реализации предложенной концепции автоматического управления робот должен быть оснащен следующими типами датчиков:

- датчики сил натяжения нижних тросов;
- датчики угла наклона нижних тросов;
- инерциальный измерительный блок (гироскоп и акселерометр).

Силовые датчики непосредственно измеряют нагрузки на блоки нижних тросов. Электронные уровни измеряют углы наклона тросов нижней группы в точках их крепления к мобильной платформе. Гироскоп и акселерометр измеряют ориентацию и ускорение мобильной платформы.

В настоящем исследовании задача управления группой верхних тросов считается решенной в соответствии с работами [7, 13], и рассматривается задача управления силами натяжения группы нижних тросов крупногабаритного тросового параллельного робота.

Рассматривая отдельно группу нижних тросов, уравнение (2) можно записать в виде

$$\begin{bmatrix} j_{11} & j_{12} & j_{13} & j_{14} \\ j_{21} & j_{22} & j_{23} & j_{24} \\ j_{31} & j_{32} & j_{33} & j_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ M_z \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Перераспределение сил натяжений в группе нижних тросов осуществляется посредством минимизации невязки векторов расчетных значений и фактических измеренных значений сил натяжения. Расчетные значения вектора сил натяжения в конфигурационном пространстве находятся с использованием предложенного метода, в котором осуществляется полный перебор решений в неотрицательных наименьших квадратах и при этом исключаются выбросы, соответствующие особым конфигурациям тросовой системы.

Решение задачи оптимального распределения для группы нижних четырех тросов для заданных положения и ориентации мобильной платформы заключается в выполнении следующей последовательности действий.

1. Генерируется таблица всех возможных комбинаций нагруженных тросов без повторений.

2. Выполняется формирование матриц коэффициентов для каждого случая. В качестве примера здесь и далее рассматривается комбинация, в которой натянуты третий и четвертый тросы, а остальные не нагружены. Матрица коэффициентов для этого случая имеет вид:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ j_{11} & j_{12} & j_{13} & j_{14} \\ j_{21} & j_{22} & j_{23} & j_{24} \\ j_{31} & j_{32} & j_{33} & j_{34} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} 0 & 0 & j_{13} & j_{14} \\ 0 & 0 & j_{23} & j_{24} \\ 0 & 0 & j_{33} & j_{34} \end{bmatrix}.$$

3. Вычисляется решение системы линейных алгебраических уравнений с нахождением минимальной нормы наименьших квадратов для каждого случая. Так, для рассматриваемой комбинации

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & j_{13} & j_{14} \\ 0 & 0 & j_{23} & j_{24} \\ 0 & 0 & j_{33} & j_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ M_\varphi \end{bmatrix}.$$

Очевидно, что решением будет вектор, первые две компоненты которого — нулевые. При этом компоненты f_3 и f_4 могут получиться как положительными, так и отрицательными. Пусть, для определенности, четвертая компонента найденного вектора решения имеет отрицательное значение. Это означает, что фактически этот трос не работает, и полученное решение должно быть изменено:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ +f_3 \\ -f_4 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ f_3 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

4. Вычисляются нормы векторов полученных решений. Выполняется их проверка на выбросы. Решения, соответствующие выбросам, исключаются.

5. Находится норма невязки для каждого случая. Найденные значения норм невязки округляются с заданной точностью. Проводится поиск наименьших значений среди полученных норм невязки. Для рассматриваемого примера:

$$\Delta_{10} = \left\| \begin{bmatrix} j_{11} & j_{12} & j_{13} & j_{14} \\ j_{21} & j_{22} & j_{23} & j_{24} \\ j_{31} & j_{32} & j_{33} & j_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ f_3 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ M_\phi \end{bmatrix} \right\|_2.$$

6. Среди выбранных норм невязки с наименьшими значениями выполняется отбор по критерию наименьшего значения евклидовой нормы соответствующего вектора решения.

Результат обеспечивает минимизацию нормы вектора сил натяжения в конфигурационном пространстве, что приводит к уменьшению нагрузок на отдельные тросы, а также к более равномерному распределению сил натяжения в группе нижних тросов.

Апробация метода для группы нижних тросов

Численный эксперимент проводится с использованием ранее разработанной динамической модели крупногабаритного тросового параллельного робота, описанной авторами в работах [7, 8]. Целью численного эксперимента является проверка разработанного алгоритма управления силами натяжения тросов.

Схема эксперимента заключается в следующем.

1. Задается некоторый желаемый закон движения мобильной платформы.

2. В каждой точке траектории вычисляется оптимальное распределение сил натяжения в тросах.

3. На первом этапе моделируется динамика движения тросового робота. Управление, реализованное согласно модели [7], обеспечивает движение по желаемому закону движения с заданной точностью без контроля сил натяжения нижних тросов.

4. На втором этапе моделируется динамика движения тросового робота с управлением силами натяжения нижних тросов согласно предложенному алгоритму. При этом точность следования желаемому закону движения платформы не ухудшается.

5. Результаты двух этапов моделирования сравниваются между собой и с оптимальным распределением сил в тросах.

Типовые результаты моделирования представлены на рис. 3–5 (см. третью сторону обложки). Расчетные силы натяжения тросов (рис. 3, см. третью сторону обложки) фактически представлены кусочными функциями, каждый сегмент которых представляет собой оптимальное решение в наименьших квадратах в соответствии с заданными критериями — условиями минимальных норм и неотрицательных значений, а переход с одного сегмента на другой соответствует изменению направления движения мобильной платформы согласно заданному закону движения.

Расчетные значения сил натяжения тросов изменяются плавно, без резких переходов, что важно с учетом чувствительности тросовых систем к любым резким воздействиям, откликом на которые являются нежелательные колебательные процессы.

Фактические силы натяжения тросов, полученные на первом этапе моделирования (см. рис. 4, см. третью сторону обложки), далеки от рассчитанных оптимальных значений. Силы натяжения тросов изменяются резко, в результате чего возникают колебательные процессы. Низкочастотные колебания происходят с большой амплитудой: на графике хорошо заметно, что после пиковых значений сил следует падение, а затем еще один пик с меньшей амплитудой, после которого система переходит в установившееся движение. Высокочастотные колебания накладываются на низкочастотные и хорошо заметны на вершинах вторых пиков, после чего они быстро затухают.

Следует отметить, что пиковые значения сил натяжения тросов превышают расчетные оптимальные значения почти в два раза.

Фактические силы натяжения тросов после корректировки с использованием предложенного алгоритма автоматического управления, показанные на рис. 5 (см. третью сторону обложки), близки к рассчитанным оптимальным значениям.

Силы натяжения тросов изменяются в целом плавно, заметны переходы с незначительными

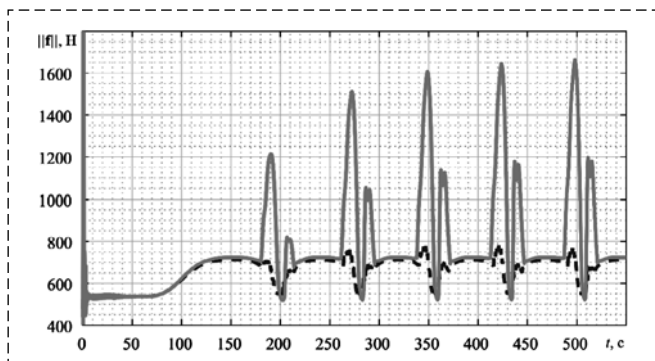


Рис. 6. Норма вектора сил натяжения нижней группы тросов, до коррекции (сплошная линия) и после коррекции (штриховая линия)

Fig. 6. Norm of vector of tension forces in the group of lower cables, before correction (solid line) and after correction (dashed line)

отклонениями, сопровождаемые быстро затухающими колебательными процессами с относительно небольшой амплитудой колебаний в процессе движения мобильной платформы.

Влияние отмеченных переходных процессов на устойчивость движения мобильной платформы и отклонения от заданного положения по результатам компьютерного моделирования можно полагать пренебрежимо малым.

На рис. 6 показано сравнение норм векторов сил в конфигурационном пространстве робота для случаев без управления распределением сил натяжения тросов и с управлением распределением сил натяжения тросов.

Для наихудших конфигураций норма вектора сил после корректировки уменьшается вдвое, что можно считать очень хорошим результатом. Иными словами, это означает, что нагрузка на тросы нижней группы значительно уменьшается.

Для рассматриваемого практического примера управления силами натяжения нижней группы тросов с представлением модели в виде матрицы размером 3×4 время расчета с использованием тестовой реализации предложенного алгоритма не превышает 50 мс, что допускает решение задач автоматического управления крупногабаритным тросовым параллельным роботом в реальном времени.

Апробация метода для системы 12 тросов

Предложенный метод может быть эффективным и в задачах большей размерности. На практике число тросов параллельных тросовых роботов, как правило, не более восьми. Однако статические системы, например, радиальные висячие конструкции [14], а также структуры тенсегрити [15], могут включать до нескольких десятков элементов с конструктивной нелинейностью — тросов. Расчет оптимального распределения нагрузок с учетом реакций односторонних связей и исключения особых конфигураций через проверку выбросов также может быть осуществлен с использованием предложенного метода. Целью этой части исследования является проверка работы предложенного метода и сравнение его со стандартным инструментом решения неотрицательной линейной задачи методом наименьших квадратов `lsqnonneg` [16], используемым в библиотеках популярных математических программных пакетов.

В таблице приведены четыре примера решений неопределенных систем линейных алгебраических уравнений для матриц случайных конфигураций тросовой системы с 12 тросами.

Каждая конфигурация тросовой системы решалась с помощью предложенного метода и с использованием стандартного инструмента библиотеки популярного математического программного пакета `lsqnonneg`.

Можно заметить, что в рабочих конфигурациях тросовой системы (примеры 1—3) стандартный метод дает решение, в котором только шесть тросов нагружены, в то время как остальные шесть тросов остаются прослабленными. Разработанный же метод обеспечивает распределение нагрузки на большее число тросов. В результате распределение нагрузки становится более равномерным, уменьшаются нагрузки на отдельные тросы, а норма вектора решения получается на 15...40 % меньше, чем при использовании стандартного метода. Норма не-

Примеры численного эксперимента, $n = 12$

Examples of the numerical simulation, $n = 12$

Параметры эксперимента	1-й пример		2-й пример		3-й пример		4-й пример	
	Предл.	Станд.	Предл.	Станд.	Предл.	Станд.	Предл.	Станд.
Число нагруженных тросов	10	6	9	6	7	6	5	5
Норма вектора решения $\ x\ _2$	0,85	1,24	1,97	2,35	3,69	6,00	1,63	39,37
Относительная норма невязки	$<10^{-4}$	$<10^{-6}$	$<10^{-4}$	$<10^{-6}$	$<10^{-4}$	$<10^{-6}$	0,58	0,39

вязки при этом получается несколько хуже, но все равно остается пренебрежимо малой.

Пример 4 демонстрирует особый случай — близкую к сингулярной конфигурацию тросовой системы, когда значения компонент вектора решения, полученного с использованием как стандартного инструмента, так и разработанного метода, являются выбросами в отношении набора всех решений полного перебора. В таких случаях не удается найти решение, обеспечивающее равновесие системы. В расчетах это проявляется тем фактом, что нагружаются менее шести тросов, нагрузка распределяется неравномерно, а невязка остается большой.

Следует заметить, что во многих случаях решения, полученные с использованием стандартного инструмента и предлагаемого метода, для статических задач совпадают. Приведенные четыре примера даны в качестве иллюстрации, демонстрирующей преимущества предложенного метода.

Среднее время расчета на ЭВМ для произвольно выбранных матриц случайных значений размером 6×12 с использованием тестовой реализации предложенного алгоритма не превышает 2,5 с.

Заключение

Разработанный метод управления силами натяжения предназначен для статически неопределимых тросовых систем и позволяет найти оптимальное решение по критериям минимизации нормы вектора сил в конфигурационном пространстве и минимизации нормы невязки вектора сил и моментов в операционном пространстве робота. Метод основывается на неотрицательном методе наименьших квадратов и обеспечивает перебор всех возможных комбинаций тросов, что позволяет выбрать наилучшее решение по обоим критериям, за исключением случаев сингулярной или близкой к сингулярной конфигурации робота. Удовлетворение первого критерия означает, что силы натяжения тросов распределяются, насколько это возможно, равномерно между тросами, что обеспечивает снижение нагрузок на приводы. Удовлетворение второго критерия означает, что кинетостатическое равновесие системы не изменяется, следовательно, и точность позиционирования и ориентации мобильной платформы тросового робота не ухудшается по сравнению с управлением без учета сил натяжения тросов.

Результаты численного моделирования показали заметное преимущество в точности предложенного метода в сравнении со стандартным инструментом библиотек популярных математических программных пакетов `lsqnonneg` при решении неопределенных систем уравнений.

В работе рассмотрены примеры решения поставленной задачи для группы нижних тросов строительного 3D-принтера на базе тросового робота и для двенадцатитросовой системы. Показано, что для рассмотренных практических примеров быстроедействие метода достаточно для использования предложенного метода в системе автоматического управления тросового параллельного робота.

Список литературы

1. Pott A. Cable-Driven Parallel Robots. Springer International Publishing, 2018.
2. Zi B., Qian S. Design, Analysis and Control of Cable-Suspended Parallel Robots and Its Applications. Springer Singapore, 2017.
3. Pott A., Mütterich H., Kraus W., Schmidt V., Miermeister P., Verl A. IPAnema: A family of Cable-Driven Parallel Robots for Industrial Applications // Cable-Driven Parallel Robots. Mechanisms and Machine Science. 2013. Vol. 12. P. 19–34. https://doi.org/10.1007/978-3-642-31988-4_8.
4. Tempel P., Herve P., Tempier O., Gouttefarde M, Pott A. Estimating inertial parameters of suspended cable-driven parallel robots — Use case on CoGiRo // 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2017. P. 6093–6098. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2017.7989723>.
5. Kalinin Ya.V., Marchuk E. A. Specificity of Including of Structural Nonlinearity in Model of Dynamics of Cable-Driven Robot // Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie. 2021. Vol. 22, N. 10. P. 547–552. <https://doi.org/10.17587/mau.22.547-552>.
6. Marchuk E., Kalinin Ya., Maloletov A. Mathematical Modeling of Eight-Cable-Driven Parallel Robot // 2021 International Conference "Nonlinearity, Information and Robotics" (NIR). 2021. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/NIR52917.2021.9665802>.
7. Marchuk E. A., Kalinin Ya. V., Sidorova A. V., Maloletov A. V. On the Problem of Position and Orientation Errors of a Large-Sized Cable-Driven Parallel Robot // Russian Journal of Nonlinear Dynamics. 2022. Vol. 18, N. 5. P. 755–770. <https://doi.org/10.20537/nd221209>.
8. Marchuk E., Kalinin Ya., Maloletov A. On Smooth Planar Curvilinear Motion of Cable-Driven Parallel Robot End-effector // IFAC-PapersOnLine. 2022. Vol. 55, N. 10. P. 2475–2480. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.10.080>.
9. Lawson, C. L., Hanson R. J. Solving Least-Squares Problems. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1974.
10. Generate a matrix of combinations (permutation) without repetition (array exceeds maximum array size preference). URL: <https://stackoverflow.com/questions/69707949/generate-a-matrix-of-combinations-permutation-without-repetition-array-exceed>, 2021 (дата обращения: 15 августа 2023 г.).
11. Bhargava A. Grokking Algorithms: An Illustrated Guide for Programmers and Other Curious People. Manning, 2016.
12. Orloff J., Bloom J. Introduction To Probability And Statistics. URL: <https://ocw.mit.edu/courses/18-05-introduction-to-probability-and-statistics-spring-2014/>, 2014 (дата обращения: 07 августа 2023 г.).

13. **Marchuk E., Kalinin Ya., Maloletov A.** Error Compensation in Position and Orientation of Mobile Platform of Cable-Driven Robots via Tensile Forces Measurement // *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. 2022. Vol. 23, N. 10. P. 515–522. <https://doi.org/10.17587/mau.23.515-522>.

14. **Seidel M.** Tensile Surface Structures. Ernst, Sohn, 2009.

15. **Lalvani H.** Origins Of Tensegrity: Views Of Emmerich, Fuller And Snelson // *International Journal of Space Structures*. 1996. Vol. 11, Iss. 1–2. <https://doi.org/10.1177/026635119601-204>.

16. **Solve** nonnegative linear least-squares problem. URL: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/lsqlnonneg.html>, 2006 (дата обращения: 09 августа 2023 г.).

On the Problem of Tension Forces Distribution in Cable System of Cable-Driven Parallel Robot

E. A. Marchuk¹, e.marchuk@innopolis.ru, **A. S. Mikhailov**¹, a.mikhailov@innopolis.ru,
Ya. V. Kalinin¹, claymor.vlg@gmail.com, **A. V. Maloletov**^{1,2}, a.maloletov@innopolis.ru,

¹Innopolis University, Innopolis, 420500, Russian Federation,

²Volgograd State Technical University, Volgograd, 400005, Russian Federation

Corresponding author: **Marchuk E. A.**, PhD student,
Innopolis University, Innopolis, 420500, Russian Federation, e-mail: e.marchuk@innopolis.ru

Accepted on September 05, 2023

Abstract

The paper proposes a method for controlling tension forces in statically indeterminable cable-driven systems based on the non-negative least squares method with control of singular or near-singular solutions and a complete search of all possible cable configurations. For cable-driven parallel robots the problem of controlling the cable tension forces is critical, because in the absence of control the cable tension forces are distributed unevenly, which leads to reduced robustness of the system, increased energy consumption and increased deterioration. And in special cases of cable system configuration the tension forces become so great that they lead to cable breaks. At the same time, correction of cable tension force distribution should not lead to significant deviations from the specified position of the mobile platform or, formulating the problem in terms of forces, to violation of kinetostatic equations. Thus, the problem of controlling the tension forces in the cable parallel robot system is solved as a problem of optimizing the tension forces of the cables according to the criteria of minimizing the norm of their vector in the configuration space and minimizing the norm of incoherence of the vector of forces and moments in the operational space of the robot. The developed algorithm is based on the solution of underdetermined systems of linear algebraic equations with finding the minimum least squares norms and subsequent zeroing of negative components of the solution vector. The paper considers examples of the solution of the set problem for the lower cable group of a construction 3D printer based on a cable-driven robot and for a 12-cable system.

Keywords: parallel robot, cable-driven robot, cable, least squares solution, force control, tension forces

Acknowledgements: The work was financially supported by RNF (grant 22-29-01618).

For citation:

Marchuk E. A., Mikhailov A. S., Kalinin Ya. V., Maloletov A. V. On the Problem of Tension Forces Distribution in Cable System of Cable-Driven Parallel Robot, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2023, vol. 24, no. 12, pp. 643–651 (in Russian).

DOI: 10.17587/mau.24.643-651

References

1. **Pott A.** Cable-Driven Parallel Robots. Springer International Publishing, 2018.

2. **Zi B., Qian S.** Design, Analysis and Control of Cable-Suspended Parallel Robots and Its Applications. Springer Singapore, 2017.

3. **Pott A., Mütterich H., Kraus W., Schmidt V., Miermeister P., Verl A.** IPANema: A family of Cable-Driven Parallel Robots for Industrial Applications, *Cable-Driven Parallel Robots. Mechanisms and Machine Science*, 2013, vol. 12, pp. 19–34, https://doi.org/10.1007/978-3-642-31988-4_8.

4. **Tempel P., Herve P., Tempier O., Gouttefarde M, Pott A.** Estimating inertial parameters of suspended cable-driven parallel robots — Use case on CoGiRo, *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2017, pp. 6093–6098, <https://doi.org/10.1109/ICRA.2017.7989723>.

5. **Kalinin Ya. V., Marchuk E. A.** Specificity of Including of Structural Nonlinearity in Model of Dynamics of Cable-Driven Robot, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 10, pp. 547–552. <https://doi.org/10.17587/mau.22.547-552>.

6. **Marchuk E. A., Kalinin Ya. V., Maloletov A.** Mathematical Modeling of Eight-Cable-Driven Parallel Robot, *2021 International Conference "Nonlinearity, Information and Robotics" (NIR)*, 2021, pp. 1–5, <https://doi.org/10.1109/NIR52917.2021.9665802>.

7. **Marchuk E. A., Kalinin Ya. V., Sidorova A. V., Maloletov A. V.** On the Problem of Position and Orientation Errors of a Large-Sized Cable-Driven Parallel Robot, *Russian Journal of Nonlinear Dynamics*, 2022, vol. 18, no. 5, pp. 755–770, <https://doi.org/10.20537/nd221209>.

8. **Marchuk E., Kalinin Ya., Maloletov A.** On Smooth Planar Curvilinear Motion of Cable-Driven Parallel Robot End-effector, *IFAC-PapersOnLine*, 2022, vol. 55, no. 10, pp. 2475–2480, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.10.080>.

9. **Lawson, C. L., Hanson R. J.** Solving Least-Squares Problems. Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall, 1974.

10. **Bhargava A.** Grokking Algorithms: An Illustrated Guide for Programmers and Other Curious People, Manning, 2016.

11. **Generate** a matrix of combinations (permutation) without repetition (array exceeds maximum array size preference), available at: <https://stackoverflow.com/questions/69707949/generate-a-matrix-of-combinations-permutation-without-repetition-array-exceed>, 2021 (date of access: 15.08.23).

12. **Orloff J., Bloom J.** Introduction To Probability And Statistics, available at: <https://ocw.mit.edu/courses/18-05-introduction-to-probability-and-statistics-spring-2014/>, 2014 (date of access: 07.08.23).

13. **Marchuk E., Kalinin Ya., Maloletov A.** Error Compensation in Position and Orientation of Mobile Platform of Cable-Driven Robots via Tensile Forces Measurement, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 23, no. 10, pp. 515–522, <https://doi.org/10.17587/mau.23.515-522>.

14. **Seidel M.** Tensile Surface Structures, Ernst, Sohn, 2009.

15. **Lalvani H.** Origins Of Tensegrity: Views Of Emmerich, Fuller And Snelson, *International Journal of Space Structures*, 1996. vol. 11, iss. 1–2, <https://doi.org/10.1177/026635119601-204>.

16. **Solve** nonnegative linear least-squares problem, available at: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/lsqlnonneg.html>, 2006 (date of access: 09.08.23).

W. Yu, Postgraduate Student, e-mail: yussau@foxmail.com,
O. L. Starinova, PhD. Tech. Sc, Professor, e-mail: solleo@mail.ru,
Samara National Research University, Samara, 443086, Russian Federation

Accepted on August 29, 2023

Study on Displaced Orbits Below the Moon's South Pole Near L2 Point Based on Solar Sail

Abstract

This work explores displaced orbits of solar sails below the Moon's south pole, near the L2 libration point in the Earth-Moon system. Light pressure provides acceleration for displaced orbits. These orbits enable continuous communication and observation of the Moon's south polar region, where a lunar base is planned. Linearized dynamic equations yield analytical solutions of displaced orbits, which are either quasi-periodic or periodic. Quasi-periodic orbits have varying altitudes of hundreds of kilometers and a period of about a year, while periodic orbits have fixed altitudes and the same period. A sliding mode controller maintains the orbits using sail attitude angles and reflectivity as control variables. With a reflective area to mass ratio of $18 \text{ m}^2/\text{kg}$, the displaced heights of quasi-periodic and periodic orbits near L2 are 2010.38 km and 2210.06 km, respectively. Numerical simulations confirm the controller's effectiveness for both orbit types.

Keywords: displaced orbits, solar sails, Earth-Moon system, sliding mode controller, attitude angles, reflectivity, orbit maintenance

For citation:

Yu W. J., Starinova O. L. Study on Displaced Orbits Below the Moon's South Pole Near L2 Point Based on Solar Sail, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2023, vol. 24, no. 12, pp. 652—659.

DOI: 10.17587/mau.24.652-659

УДК 629.785

DOI: 10.17587/mau.24.652-659

В. Юй, аспирант, yussau@foxmail.com,
О. Л. Старинова, д-р техн. наук, проф. solleo@mail.ru,
Самарский национальный исследовательский университет, г. Самара

Исследование цилиндрических орбит ниже южного полюса Луны вблизи точки L2 на основе солнечного паруса

Исследуются цилиндрические орбиты солнечных парусов ниже южного полюса Луны в окрестности точки либрации L2 системы Земля—Луна. Давление солнечного излучения обеспечивает ускорение для цилиндрических орбит. Такие орбиты позволяют поддерживать непрерывную связь и наблюдение за южной полярной областью Луны, где планируется создание лунной базы. Линеаризованные уравнения динамики дают аналитические решения цилиндрических орбит, которые могут быть квазипериодическими или периодическими. Квазипериодические орбиты имеют переменную высоту в диапазоне сотен километров и период около года, а периодические орбиты имеют постоянную высоту и тот же период. Управление в скользящем режиме поддерживает орбиты с использованием углов ориентации паруса и его отражательной способности в качестве управляющих параметров. При парусности солнечного паруса $18 \text{ м}^2/\text{кг}$ высоты цилиндрических квазипериодической и периодической орбит под точкой либрации L2 составляют 2010,38 км и 2210,06 км соответственно. Численное моделирование подтверждает эффективность управления в скользящем режиме для обоих типов орбит.

Ключевые слова: цилиндрические орбиты, солнечные паруса, система Земля—Луна, управление в скользящем режиме, углы ориентации, отражательная способность, поддержание орбит

Introduction

One of the main objectives of future space research is to explore and utilize the Moon, especially its far side and polar regions. The far side of the Moon offers an electromagnetic quiet environment for deep space exploration due to lunar occultation [1]. The polar regions, where water resources have been detected in the lunar soil and ice [2], are potential sites for future lunar bases. Communication relays between the far side and the polar regions of the Moon and the Earth require orbits around the L2 libration point in the Earth-Moon system (EML2). The Queqiao relay satellite, launched by the China National Space Administration in 2018, is the first spacecraft to achieve long-term flight near EML2 [3]. Periodic orbits around L2 have been extensively investigated [4–11]. These orbits cross the plane of the Moon’s orbit periodically. However, some missions may benefit from displaced orbits that maintain its altitude above the plane of the Moon’s orbit [12]. Solar radiation pressure can be used to create such displaced orbits without fuel consumption. H. Baoyin and C. R. McInnes explored periodic orbits around an artificial equilibrium point and displaced orbits above the ecliptic plane of solar sails [12, 14]. However, displaced orbits in the Earth-Moon system are more challenging to generate. This is because the plane of the Moon’s orbit is slightly tilted to the ecliptic plane and the direction of sunlight varies periodically with respect to the Earth-Moon system. J. Simo and C. R. McInnes examined the displaced orbits over EML2 of spacecrafts with both solar sails and low thrust engines [15, 16]. They demonstrated the feasibility of such orbits and determined the required spacecraft parameters. However, the combination of solar sails and low thrust engines adds to the complexity of spacecrafts and involves fuel consumption. S. Gong et al. studied the possibility of generating and maintaining displaced orbits above the plane of the Moon’s orbit of spacecrafts with only solar sails [17]. However, the linearized motion model they used to generate the displaced orbit has a significant error, which makes it harder to maintain the orbits.

This work studies displaced orbits with only solar sails. The acceleration magnitude and direction are controlled by devices with adjustable sail reflectivity, symmetrically placed on part of the surface. The article has three sections: 1. linearizing the motion equations in the Earth-Moon system with Legendre polynomials; 2. deriving analytical equations for periodic and quasi-periodic displaced orbits; 3. developing an optimal control method for orbit maintenance and simulating orbit correction with initial motion state deviation [18, 19].

Linearization of the equations of motion

Two coordinate systems are used to describe the motion of celestial bodies (the Earth and the Moon) and spacecraft. The first one is an inertial coordinate system $OXYZ$: the origin O is located at the center of mass of the Earth; the axis OZ is perpendicular to the plane of the ecliptic and coincides with the direction of the angular velocity of the Earth’s orbit; the axis OX is directed towards the ascending node of the lunar orbit crossing the ecliptic plane; the axes OX , OY and OZ form a right-handed coordinate system (Fig. 1). The second one is a rotating coordinate system $oxyz$: the origin o is located at the center of mass of the Earth-Moon system; the axis oz is perpendicular to the plane of the lunar orbit and coincides with the direction of the angular velocity of the lunar orbit; the axis ox is directed towards the center of mass of the Moon; the axes ox , oy and oz form a right-handed coordinate system.

Here \mathbf{r}_S is the direction vector of sunlight, φ is the position angle of \mathbf{r}_S , θ is the position angle of the Moon.

Assume that the Moon rotates around the Earth uniformly along a circular orbit, then the motion of the spacecraft in the coordinate system $oxyz$ can be described as a circular restricted three-body problem (CRTBP):

$$\begin{aligned} \ddot{\mathbf{r}} + 2\boldsymbol{\omega}_M \times \dot{\mathbf{r}} + \nabla U(\mathbf{r}) &= \mathbf{a}; \\ U(\mathbf{r}) &= -\frac{1}{2}|\boldsymbol{\omega}_M \times \mathbf{r}|^2 - \frac{1-\mu}{r_1} - \frac{\mu}{r_2}, \end{aligned} \quad (1)$$

where \mathbf{r} represents the position vector of the spacecraft; $\boldsymbol{\omega}_M$ represents the angular velocity of the Moon around the Earth; \mathbf{a} represents the thrust acceleration; $U(\mathbf{r})$ represents the pseudo-potential function; $\mu = m_M/(m_M + m_E)$, where m_M is the mass of the Moon and m_E is the mass of the Earth; r_1 and r_2 are the distances of the spacecraft from the center of the Earth and the Moon, respectively. All quantities in

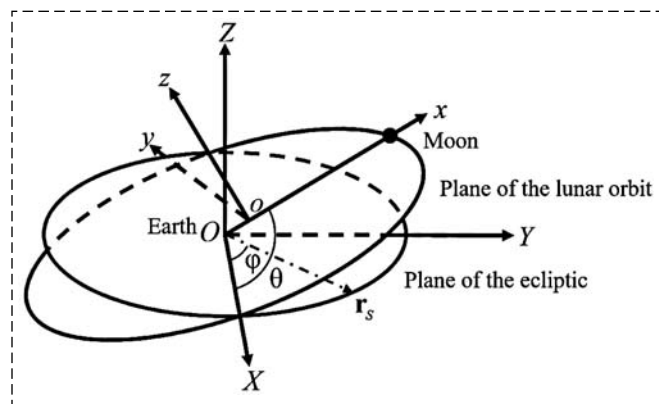


Fig. 1. Relative position of different coordinate systems

equation (1) are presented in a dimensionless form. The dimensional parameters of time, mass, and length are defined as $[T] = [l_{EM}^3 / G(m_M + m_E)]^{1/2}$, $[M] = m_M + m_E$ and $[L] = l_{EM}$ respectively. Herein, G denotes the gravitational constant, while l_{EM} denotes the distance between the Earth and the Moon.

The Lagrange points L1 ~ L5 represent a group of equilibrium points in the CRTBP, the coordinates of which can be obtained by solving the equation $\nabla U(\mathbf{r}) = 0$. The coordinate of Lagrange point L2 is denoted as $\mathbf{r}_{L2} = [x_{L2} \ 0 \ 0]^T$. Let us denote the small displacement of the spacecraft relative to the L2 point as $\delta\mathbf{r} = [\xi \ \eta \ \zeta]^T$. Then

$$\frac{1}{r_1} = \frac{1}{\sqrt{(\xi + x_{L2} + \mu)^2 + \eta^2 + \zeta^2}};$$

$$\frac{1}{r_2} = \frac{1}{\sqrt{(\xi + x_{L2} - 1 + \mu)^2 + \eta^2 + \zeta^2}}.$$

By replacing $1/r_1$ and $1/r_2$ with Legendre series up to the 2nd order, the pseudo-potential function $U(\mathbf{r})$ is transformed into the following form:

$$U(\mathbf{r}) \approx \frac{1}{2}(\xi^2 + \eta^2) + (1 + \mu) \times$$

$$\times \left[\frac{2\xi^2 - \eta^2 - \zeta^2}{2(x_{L2} + \mu)^3} - \frac{\xi}{(x_{L2} + \mu)^2} + \frac{1}{x_{L2} + \mu} \right] +$$

$$+ \mu \left[\frac{2\xi^2 - \eta^2 - \zeta^2}{2(x_{L2} - 1 + \mu)^3} - \frac{\xi}{(x_{L2} - 1 + \mu)^2} + \frac{1}{x_{L2} - 1 + \mu} \right]. \quad (2)$$

Using this function to linearize the equations of motion, we obtain:

$$\begin{cases} \ddot{\xi} - 2\dot{\eta} + U_{xx}\xi = a_x; \\ \ddot{\eta} + 2\dot{\xi} + U_{yy}\eta = a_y; \\ \ddot{\zeta} + U_{zz}\zeta = a_z. \end{cases} \quad (3)$$

Here,

$$\begin{cases} U_{xx} = -2 \left[\frac{1 - \mu}{(x_{L2} + \mu)^3} + \frac{\mu}{(x_{L2} - 1 + \mu)^3} \right] - 1; \\ U_{yy} = \frac{1 - \mu}{(x_{L2} + \mu)^3} + \frac{\mu}{(x_{L2} - 1 + \mu)^3} - 1; \\ U_{zz} = \frac{1 - \mu}{(x_{L2} + \mu)^3} + \frac{\mu}{(x_{L2} - 1 + \mu)^3}. \end{cases}$$

Analytical determination of displaced orbits

To achieve control over reflectivity, devices similar to those on the JAXA's IKAROS solar sail are placed on one side of the surface of the solar sails. These devices are made of liquid crystal panels.

For simplicity, assume that the panels can switch between two states: state 1 — full absorption and state 2 — full reflection of solar photons. Denote the ratio of the area in state 1 to the total area of solar sail surface as u ($0 \leq u \leq 1$), then the acceleration from solar light pressure is determined by the following equation [18]:

$$\mathbf{a}_S = u \frac{\kappa}{2} (\mathbf{r}_S \mathbf{n}) \mathbf{r}_S + (1 - u) \kappa (\mathbf{r}_S \mathbf{n})^2 \mathbf{n}, \quad (4)$$

where \mathbf{n} is the direction vector of the sail's normal and κ is the characteristic acceleration of the solar sail spacecraft.

$$\kappa = 2\varepsilon/c \frac{S}{m}, \quad (5)$$

where $\varepsilon = 1353 \text{ W/m}^2$ is the solar radiation coefficient; c is the speed of light in vacuum; and S/m is the ratio of the sail area to the spacecraft mass.

Assuming that the Earth moves uniformly in a circular orbit around the Sun, the direction vector of sunlight \mathbf{r}_S correspondingly rotates relative to the Earth at an angular velocity ω_E . Therefore, in the inertial system $OXYZ$, \mathbf{r}_S can be expressed as $\mathbf{r}_{in} = [\cos\varphi \ \sin\varphi \ 0]^T$, where $\varphi(t) = \varphi_0 + \omega_E t$ is the direction angle of sunlight.

The mutual position of the inertial coordinate system $OXYZ$ and the rotating coordinate system $oxyz$ is determined by three quantities: the angle of inclination of the lunar orbit plane to the ecliptic plane i , the angle of the lunar position relative to the ascending node θ , and the displacement of the center of mass of the Earth-Moon system relative to the center of mass of the Earth. In determination of the direction vector of sunlight in the rotating coordinate system $oxyz$, the transformation matrix \mathbf{A} contains only angular quantities θ and i :

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos i & \sin i \\ 0 & -\sin i & \cos i \end{bmatrix}. \quad (6)$$

It should be noted that $i \approx 5,145^\circ$ is a small value. Replacing $\cos i$ with 1 will not introduce much error. Thus, the following approximation can be made

$$\mathbf{r}_{rt} = \mathbf{A} \mathbf{r}_{in} \approx \begin{bmatrix} \cos(\theta - \varphi) \\ -\sin(\theta - \varphi) \\ -\sin i \sin \varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \lambda \\ -\sin \lambda \\ -\sin i \sin \varphi \end{bmatrix}, \quad (7)$$

where $\lambda(t) = \lambda_0 + \omega_S t$, ω_S is the angular velocity of the Sun around the inertial coordinate system $OXYZ$. Assuming that the Moon moves around the Earth at an angular velocity ω_M , then $\theta(t) = \theta_0 + \omega_M t$.

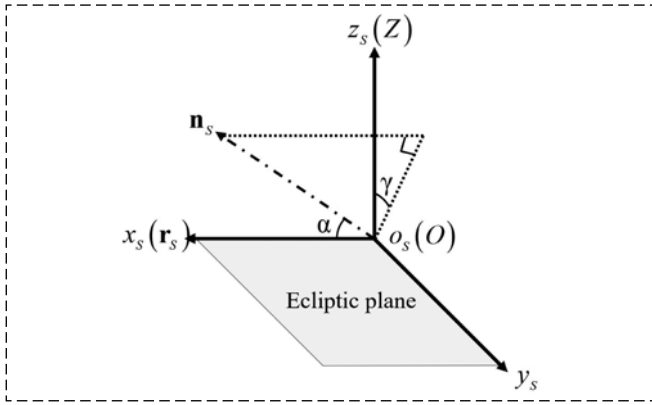


Fig. 2. Coordinate system $o_s x_s y_s z_s$ and the solar sail's normal direction

The direction of the sail's normal is usually determined relative to the direction of sunlight \mathbf{r}_S . Therefore we introduce a right-hand coordinate system $o_s x_s y_s z_s$, where the axis $o_s x_s$ coincides with \mathbf{r}_S , and the axis $o_s z_s$ coincides with the axis OZ (Fig. 2).

In $o_s x_s y_s z_s$, the direction vector of the sail's normal is equal to $\mathbf{n}_S = [\cos \alpha \quad \sin \alpha \sin \gamma \quad \sin \alpha \cos \gamma]^T$, where α is the angle between the direction of the sail's normal \mathbf{n}_S and the direction of sunlight \mathbf{r}_S . For one-sided reflective sails, $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$. γ is the angle of rotation of \mathbf{n}_S from the plane $x_s o_s y_s$ around the axis $o_s x_s$, $0^\circ \leq \gamma \leq 360^\circ$.

The transformation matrix from coordinate system $o_s x_s y_s z_s$ to $OXYZ$ is of the form:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Replacing $\cos i$ with 1, the direction vector of the sail's normal in the rotating coordinate system is equal to

$$\mathbf{n}_{r1} = AB\mathbf{n}_S \approx \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \lambda + \sin \alpha \sin \lambda \sin \gamma + \sin \theta \sin i \sin \alpha \cos \gamma \\ -\cos \alpha \sin \lambda + \sin \alpha \cos \lambda \sin \gamma + \cos \theta \sin i \sin \alpha \cos \gamma \\ -\sin i (\cos \alpha \sin \varphi + \sin \alpha \cos \varphi \sin \gamma) + \sin \alpha \cos \gamma \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Substituting equations (7) and (8) into equation (4), we obtain the 3 components of the acceleration from light pressure in the rotating system:

$$\begin{cases} a_x = \frac{\kappa}{2} u \cos \alpha \cos \lambda + \kappa(1-u) \cos^2 \alpha \\ (\cos \alpha \cos \lambda + \sin \alpha \sin \lambda \sin \gamma + \sin \theta \sin i \sin \alpha \cos \gamma) \\ a_y = -\frac{\kappa}{2} u \cos \alpha \sin \lambda + \kappa(1-u) \cos^2 \alpha \\ (-\cos \alpha \sin \lambda + \sin \alpha \cos \lambda \sin \gamma + \cos \theta \sin i \sin \alpha \cos \gamma) \\ a_z = -\frac{\kappa}{2} u \cos \alpha \sin i \sin \varphi + \kappa(1-u) \cos^2 \alpha \\ [-\sin i (\cos \alpha \sin \varphi + \sin \alpha \cos \varphi \sin \gamma) + \sin \alpha \cos \gamma] \end{cases} \quad (9)$$

Let's assume that the angles α and γ remain constant. In this case, equations in (9) contain only first-order terms of trigonometric functions of variables λ , θ , and φ . Moreover, a_x contains only $\cos \lambda$, $\sin \lambda$ and $\sin \theta$; a_y contains only $\cos \lambda$, $\sin \lambda$ and $\cos \theta$; a_z contains only $\sin \varphi$, $\cos \varphi$ and constant terms. Therefore, it is not difficult to obtain a partial solution for the orbits in the form:

$$\begin{cases} \xi(t) = \xi_0 \cos \lambda + \xi_1 \sin \lambda + \xi_2 \sin \theta \\ \eta(t) = \eta_0 \sin \lambda + \eta_1 \cos \lambda + \eta_2 \cos \theta \\ \zeta(t) = \zeta_0 + \zeta_1 \sin \varphi + \zeta_2 \cos \varphi \end{cases} \quad (10)$$

By substituting equations (9) and (10) into the equation (3), the following equations can be obtained:

$$\begin{cases} -\xi_0 \omega_S^2 - 2\eta_0 \omega_S + U_{xx} \xi_0 = \frac{\kappa}{2} u \cos \alpha + \kappa(1-u) \cos^3 \alpha \\ -\xi_1 \omega_S^2 + 2\eta_1 \omega_S + U_{xx} \xi_1 = \kappa(1-u) \cos^2 \alpha \sin \alpha \sin \gamma \\ -\xi_2 \omega_M^2 + 2\eta_2 \omega_M + U_{xx} \xi_2 = \kappa(1-u) \cos^2 \alpha \sin \alpha \cos \gamma \sin i \\ -\eta_0 \omega_S^2 - 2\xi_0 \omega_S + U_{yy} \eta_0 = -\frac{\kappa}{2} u \cos \alpha - \kappa(1-u) \cos^3 \alpha \\ -\eta_1 \omega_S^2 + 2\xi_1 \omega_S + U_{yy} \eta_1 = \kappa(1-u) \cos^2 \alpha \sin \alpha \sin \gamma \\ -\eta_2 \omega_M^2 + 2\xi_2 \omega_M + U_{yy} \eta_2 = \kappa(1-u) \cos^2 \alpha \sin \alpha \cos \gamma \sin i \\ U_{zz} \zeta_0 = \kappa(1-u) \cos^2 \alpha \sin \alpha \cos \gamma \\ -\zeta_1 \omega_E^2 + U_{zz} \zeta_1 = -\left[\frac{\kappa}{2} u \cos \alpha + \kappa(1-u) \cos^3 \alpha \right] \sin i \\ -\zeta_2 \omega_E^2 + U_{zz} \zeta_2 = -\kappa(1-u) \cos^2 \alpha \sin \alpha \sin \gamma \sin i \end{cases} \quad (11)$$

For displaced orbits, we aim to obtain orbits that provide the maximum displaced height from the plane of the lunar orbit. From equations in (11), we can get that since ζ_1 and ζ_2 are proportional to $\sin i$, their magnitude is much less than that of ζ_0 . Therefore, the displaced height is primarily determined by ζ_0 . For displaced orbits under the Moon's south pole, the maximum displaced height corresponds to the angle values:

$$\gamma_0 = 180^\circ, \alpha_0 = \arcsin 1/\sqrt{3}.$$

By substituting γ_0 and α_0 into equations (11), we can obtain

$$\begin{aligned} \xi_1 = \eta_1 = \zeta_2 = 0; \\ \xi_0 = \frac{(\omega_S^2 + 2\omega_S - U_{yy}) \left[\frac{\kappa}{2} u \cos \alpha_0 + \kappa(1-u) \cos^3 \alpha_0 \right]}{-U_{xx} U_{yy} + (U_{xx} + U_{yy} + 4)\omega_S^2 - \omega_S^4}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\xi_2 &= -\frac{(\omega_M^2 + 2\omega_M - U_{yy})\kappa(1-u)\cos^2\alpha_0\sin\alpha_0\sin i}{-U_{xx}U_{yy} + (U_{xx} + U_{yy} + 4)\omega_M^2 - \omega_M^4}; \\ \eta_0 &= -\frac{(\omega_S^2 + 2\omega_S - U_{xx})\left[\frac{\kappa}{2}u\cos\alpha_0 + \kappa(1-u)\cos^3\alpha_0\right]}{-U_{xx}U_{yy} + (U_{xx} + U_{yy} + 4)\omega_S^2 - \omega_S^4}; \\ \eta_2 &= -\frac{(\omega_M^2 + 2\omega_M - U_{xx})\kappa(1-u)\cos^2\alpha_0\sin\alpha_0\sin i}{-U_{xx}U_{yy} + (U_{xx} + U_{yy} + 4)\omega_M^2 - \omega_M^4}; \\ \zeta_0 &= -\frac{\kappa(1-u)\cos^2\alpha_0\sin\alpha_0}{U_{zz}}; \\ \zeta_1 &= -\frac{[\kappa u + 2\kappa(1-u)\cos^2\alpha_0]\cos\alpha_0\sin i}{2(\omega_E^2 - U_{zz})}. \quad (12)\end{aligned}$$

Thus, the analytical solution for displaced orbits near L2 point is of the form:

$$\begin{cases} \xi(t) = \xi_0 \cos \lambda + \xi_2 \sin \theta; \\ \eta(t) = \eta_0 \sin \lambda + \eta_2 \cos \theta; \\ \zeta(t) = \zeta_0 + \zeta_1 \sin \varphi. \end{cases} \quad (13)$$

Since $\sin i \ll 1$, $\xi_0 \gg \xi_2$, $\eta_0 \gg \eta_2$ and $\zeta_0 \gg \zeta_2$, the motion on such orbits represents a combination of two oscillatory motions with significantly different amplitudes. Such orbits are called quasi-periodic. If we replace $\sin i$ with 0, quasi-periodic orbits turn into elliptical periodic orbits with the analytical solution:

$$\begin{cases} \xi(t) = \xi_0 \cos \lambda \\ \eta(t) = \eta_0 \sin \lambda \\ \zeta(t) = \zeta_0 \end{cases} \quad (14)$$

By substituting the values of U_{zz} into equation of ζ_0 in (12), and replacing κ with expression (5), we obtain the relationship between the displaced height and the ratio of the sail area to the mass of the spacecraft:

$$\zeta_0 = -153,477(1-\mu)\frac{S}{m}.$$

Orbits with a displaced height exceeding the lunar radius are of particular interest. A spacecraft on such an orbit will never be occluded by the Moon along the spacecraft-Earth line. According to subsequent research, a value of u ranging from 0.15 to 0.25 is adequate for orbit maintenance. Assuming an average value of $u = 0.2$, it can be deduced that the condition for the displaced height to exceed the lunar radius is $S/m = 14.15$. Given that the designing solar sail Sunjammer [21] achieved a ratio of $S/m > 45$, and solar sails already launched into

space, such as LightSail-2 [22], achieved a ratio of $S/m > 6$, it can be inferred that displaced orbits below the Moon's south pole is technically achievable.

Given that the solutions of quasi-periodic and periodic orbits are derived based on the linearization of the motion equations and the approximate replacement for the inclination of the Lunar orbit i , there exist certain errors in determining the orbits. The acceleration required to maintain the orbits is denoted as $\mathbf{a}_r = \ddot{\mathbf{r}}_0 + 2\omega_M\dot{\mathbf{r}}_0 + \nabla U(\mathbf{r}_0)$, where \mathbf{r}_0 represents the position vector in quasi-periodic or periodic orbits. Assuming that the values of u , α , and γ are fixed, we denote the acceleration received by the solar sail as $\mathbf{a}_0 = \mathbf{a}_S|_{u=u_0, \alpha=\alpha_0, \gamma=\gamma_0}$. And orbital and spacecraft's parameters are shown in Table 1.

Table 1

Parameters of orbits and the spacecraft

Type of orbits	α_0	γ_0	$S/m, \text{m}^2/\text{kg}$	u_0
Quasi-periodic	$\arcsin 1/\sqrt{3}$	180°	18	0.15
Periodic	$\arcsin 1/\sqrt{3}$	180°	18	0.25

Upon calculation, the acceleration errors $\mathbf{a}_0 - \mathbf{a}_r$ for spacecraft flying in quasi-periodic and periodic orbits with parameters in Table 1 are observed. The components of $\mathbf{a}_0 - \mathbf{a}_r$ in the ox direction change approximately periodically within the range of $0.002 \sim 0.032$ for quasi-periodic orbits and $-0.001 \sim 0.036$ for periodic orbits. The components of $\mathbf{a}_0 - \mathbf{a}_r$ in the oy and oz directions change approximately periodically within ranges much less than that in the ox direction. This is attributed to a noticeable deviation between the linearized (2) and the real pseudo-potential function of $U(\mathbf{r})$ in the ox direction. Errors can be mitigated by imposing a bias ξ_b in the orbital equations (13) and (14). Then $\xi(t) = \xi_b + \xi_0 \cos \lambda + \xi_2 \sin \theta$ or $\xi(t) = \xi_b + \xi_0 \cos \lambda$. The value ξ_b is determined by the following condition:

$$\int_{t_0}^{t_0+12T_S} (\mathbf{a}_0 - \mathbf{a}_r)_x dt = 0.$$

Here $(\mathbf{a}_0 - \mathbf{a}_r)_x$ represents the component of $\mathbf{a}_0 - \mathbf{a}_r$ in the ox direction, and $T_S = 2\pi/\omega_S$.

The obtained values of ξ_b are shown in Table 2.

Table 2

Values of orbits' biases in the ox direction

Type of orbits	ξ_b	Displaced height, km
Quasi-periodic	$-8.86 \cdot 10^{-4}$	2010.38
Periodic	$-8.86 \cdot 10^{-4}$	2210.06

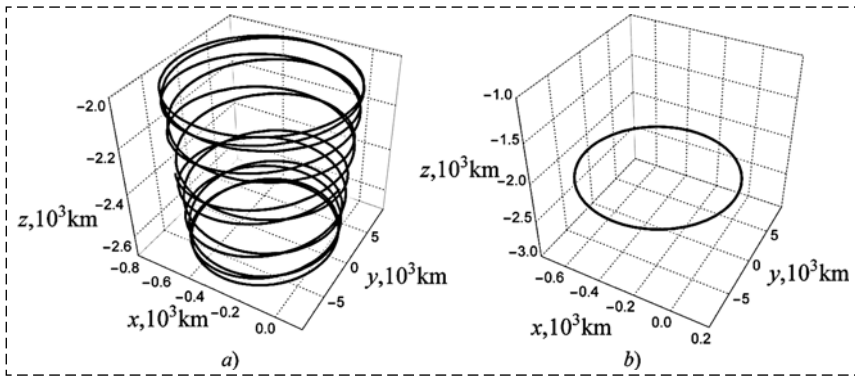


Fig. 3. Graphs of orbits with biases in the ox direction (a) quasi-periodic orbit and (b) periodic orbit

Fig. 3 depicts graphs of quasi-periodic and periodic orbits. The altitude of the quasi-periodic orbits is observed to fluctuate within a range of hundreds of kilometers, forming a shape of an elliptical truncated cone with a broad top and a narrow base. In contrast, the altitude of the periodic orbit remains constant, maintaining an elliptical shape throughout.

Based on the calculations, the acceleration errors for spacecraft in both quasi-periodic and periodic orbits with biases are observed. The components of $\mathbf{a}_0 - \mathbf{a}_r$ in the ox direction fluctuate within the range of $-0.015 \sim 0.015$ and $-0.019 \sim 0.019$, respectively. The components of $\mathbf{a}_0 - \mathbf{a}_r$ in the oy and oz directions remain approximately the same as the cases without biases.

The results indicate that with the addition of biases, the maximum errors decrease by nearly 50 %. This reduction implies a lesser requirement for control variables and control acceleration.

Orbit maintenance

The concept of sliding mode control is defined as follows: when the trajectory of the controlled object intersects with the sliding surface, the control force is applied to guide the trajectory back to the desired one. The sliding surface is defined as follows:

$$\mathbf{S} = \mathbf{r} - \mathbf{r}_0 + \Gamma(\dot{\mathbf{r}} - \dot{\mathbf{r}}_0).$$

Here Γ represents the weight matrix of the velocity deviation relative to the position deviation. A Lyapunov function is defined in the following form:

$$V = \frac{1}{2} \mathbf{S}^T \mathbf{S}.$$

A control law is selected in the following form:

$$\mathbf{a}_c = 2\boldsymbol{\omega}_M \times \dot{\mathbf{r}} + \nabla U(\mathbf{r}) + \ddot{\mathbf{r}}_0 - \Gamma^{-1}(\boldsymbol{\sigma} \mathbf{S} + \dot{\mathbf{r}} - \dot{\mathbf{r}}_0). \quad (15)$$

Here $\boldsymbol{\sigma}$ represents the convergence rate matrix. Applying the control law to the system, the derivative of the Lyapunov function turns to be

$$\begin{aligned} \dot{V} = \mathbf{S}^T \dot{\mathbf{S}} = \mathbf{S}^T [\dot{\mathbf{r}} - \dot{\mathbf{r}}_0 + \\ + \Gamma(\mathbf{a}_c - 2\boldsymbol{\omega}_M \times \dot{\mathbf{r}} - \\ - \nabla U(\mathbf{r}) - \ddot{\mathbf{r}}_0)] = -\mathbf{S}^T \boldsymbol{\sigma} \mathbf{S} < 0. \end{aligned}$$

Thus, the Lyapunov function V is positive, and the derivative of it \dot{V} is negative. It indicates that the system is asymptotically stable.

For the implementation of the control law, the sail orientation angles α and γ , along with the reflectivity parameter u , should be chosen as control variables so that the system is fully controllable. Denote the control acceleration in the coordinate system $o_S x_S y_S z_S$ as $\mathbf{a}_{cS} = [a_x \ a_y \ a_z]^T$. It is determined as

$$\mathbf{a}_{cS} = (\mathbf{A}\mathbf{B})^{-1} \mathbf{a}_c.$$

Equation (4) facilitates the determination of the acceleration from sunlight pressure in the coordinate system $o_S x_S y_S z_S$ as follows:

$$\mathbf{a}_{cS} = \begin{bmatrix} \frac{\kappa}{2} u \cos \alpha + \kappa(1-u) \cos^3 \alpha \\ \kappa(1-u) \sin \alpha \cos^2 \alpha \sin \gamma \\ \kappa(1-u) \sin \alpha \cos^2 \alpha \cos \gamma \end{bmatrix}.$$

A set of equations for the determination of the 3 control parameters can be derived as follows:

$$\begin{aligned} (2 \cos^2 \alpha - 1) \sqrt{a_y^2 + a_z^2} + \kappa \cos^2 \alpha \sin \alpha - \\ - 2a_x \cos \alpha \sin \alpha = 0; \\ \gamma = \arctan(a_y/a_z); \\ u = 1 - \frac{\sqrt{a_y^2 + a_z^2}}{\kappa \cos^2 \alpha \sin \alpha}. \end{aligned}$$

As per equation (15), the values of $\boldsymbol{\sigma}$ and Γ dictate the allowable deviations in position and velocity. Selecting values for $\boldsymbol{\sigma}$ and Γ that ensure rapid convergence results in an increase in the required value of control acceleration \mathbf{a}_c . On contrary, selecting values that ensure slow convergence results in an increase in the maximum deviation of position and velocity, which may also lead to an increase in the required \mathbf{a}_c . Furthermore, constraining of the range of α , γ , and u also results in a limited value of control acceleration \mathbf{a}_c . Consequently, the values of $\boldsymbol{\sigma}$ and Γ must be

chosen collectively to achieve a relatively rapid convergence with the constraining of the range of α , γ , and u .

The angular acceleration of the spacecrafts is defined as a_ω , which is constrained by the moment from the control forces. Given that the rotation axes of angles α and γ are perpendicular to each other, a_ω can be calculated using the following formula:

$$a_\omega = \sqrt{\left(\frac{d^2\alpha}{dt^2}\right)^2 + \left(\frac{d^2\gamma}{dt^2}\right)^2}.$$

Given that u is altered by controlling the liquid crystal panels, its rate of change is nearly not constrained.

Assume that, at the initial moment, the state vector is defined as follows:

$$[\xi(0) + \Delta L \quad \eta(0) + \Delta L \quad \zeta(0) + \Delta L \quad \dot{\xi}(0) + \Delta v \quad \dot{\eta}(0) + \Delta v \quad \dot{\zeta}(0) + \Delta v]^T$$

The parameters of initial deviations and convergence rate matrices for both quasi-periodic and periodic orbits are presented in Table 3.

Numerical simulations of the spacecraft's motion were conducted using the Mathematica software package. The results are illustrated in the subsequent figures. Fig. 4 presents changes of the control variables α , γ , and u . It is evident that after the short correction stages at the initial moment, these control variables exhibit periodic fluctuations relative to their initial values. Fig. 5 presents changes of deviations ΔL and Δv from the reference orbits. Given that the weights of deviations in the ox , oy , and oz directions are equal in the control law (i.e., the convergence rate matrices σ and Γ are constant), the deviations in all three directions remain equal at any given time. Fig. 6 presents changes of angular acceleration a_ω .

Numerical simulations lead to several key conclusions.

First, the required ranges of change in α and γ for maintaining quasi-periodic and periodic orbits are not

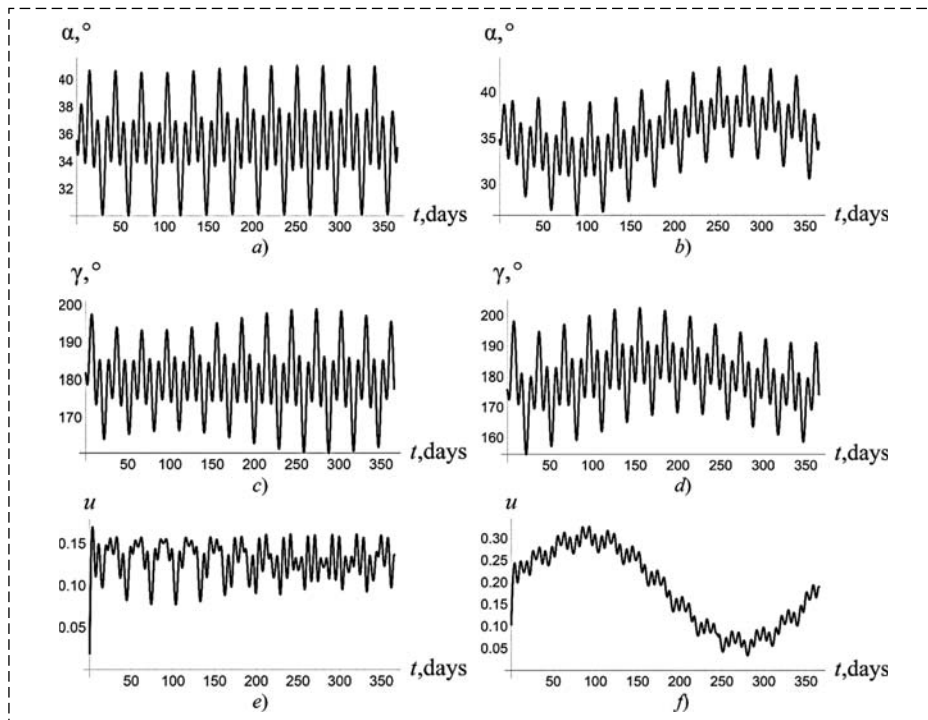


Fig. 4. One year's histories of control variables in the presence of initial orbital deviations: (a) and (b) histories of angle for the quasi-periodic and periodic orbits, respectively; (c) and (d) histories of angle, respectively; (e) and (f) histories of ratio, respectively

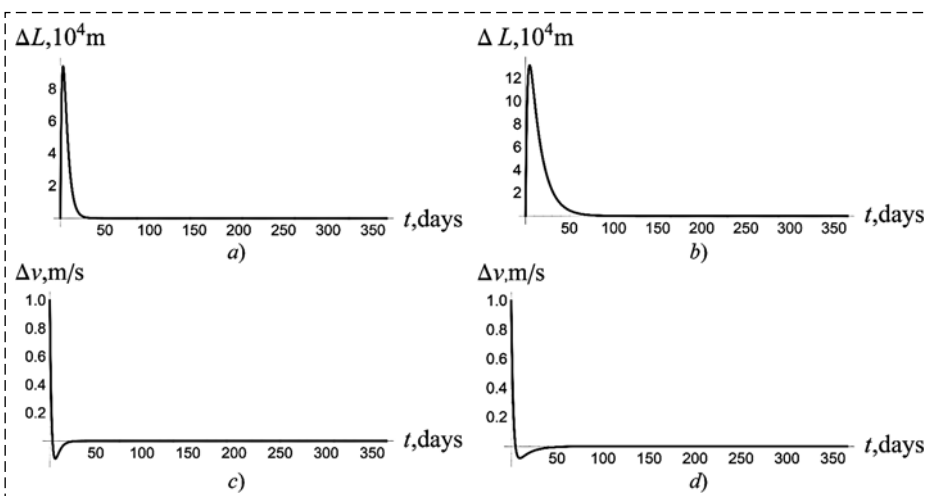


Fig. 5. One year's histories of deviations from reference orbits: (a) and (b) histories of deviations ΔL for the quasi-periodic and periodic orbits, respectively; (c) and (d) histories of deviations

Table 3

Parameters of initial deviations and convergence rate matrices

Type of orbits	ΔL , m	Δv , m/s	σ	Γ
Quasi-periodic	100	1	$2\mathbf{I}_{3 \times 3}$	$\mathbf{I}_{3 \times 3}$
Periodic	100	1	$2\mathbf{I}_{3 \times 3}$	$3\mathbf{I}_{3 \times 3}$

significantly different, which means the stabilizing properties of periodic orbits can be better exploited without complicating the process of orientation adjustment.

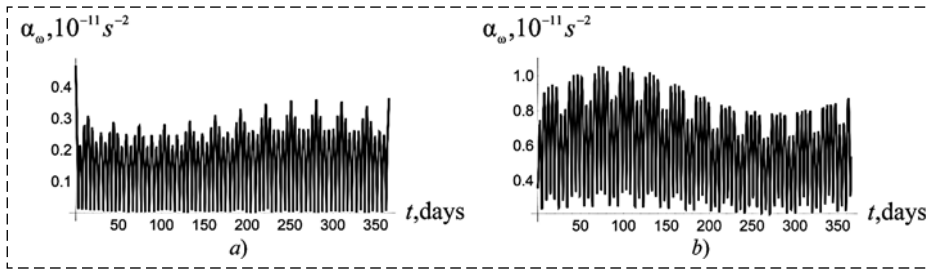


Fig. 6. One year's histories of angular accelerations a_ω for (a) the quasi-periodic and (b) periodic orbits

Second, the required range of change in u in a periodic orbit is considerably larger than that in a quasi-periodic orbit. In the quasi-periodic orbit, u varies from 0.08 to 0.16, while in the periodic orbit, it ranges from 0.04 to 0.34. This implies that the quantity of reflectivity control devices utilized in the solar sail in a periodic orbit is approximately 3 to 4 times that of a solar sail in a quasi-periodic orbit. This increase would not only augment the complexity of the spacecraft but also escalate the structural weight of the control devices.

Third, the process of convergence to a periodic orbit is slower than to a quasi-periodic orbit, and during the process, the maximum relative position deviation is much larger than that of the velocity deviation. This implies that motion on a quasi-periodic orbit exhibits superior convergence properties compared to motion on a periodic orbit.

Fourth, the maximum angular acceleration a_ω does not exceed 10^{-11} s^{-2} . Given that the light pressure is over 10^{-5} N , and the length of force arm of the light pressure is over 10^0 m , for a large spacecraft, whose moment of inertia does not exceed $10^6 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, the angular acceleration created by light pressure is sufficient to rotate the spacecraft.

Conclusion

This paper focuses on the exploration of quasi-periodic and periodic displaced orbits in the vicinity of EML2. Utilizing linearized equations of motion, approximate analytical equations for these orbits are formulated. These orbits have potential applications as relay spacecraft orbits, which could facilitate uninterrupted communication in the Moon's polar regions. They could also serve as observational spacecraft for studying the Moon's polar regions, which are not easily visible from the Earth's surface. The study concludes that by solely manipulating the reflectivity of the solar sail, effective maintenance of such an orbit can be achieved.

References

1. Jones A., Silber K. Down to earth: the Apollo moon missions that never were, available at: <https://www.scientificamerican.com/article/canceled-apollo-missions>.
2. Li S., Lucey P. G., Milliken R. E., Hayne P. O., Fisher E., Williams J. P., Hurley D. M., Elphic R. C. Direct evidence of surface exposed water ice in the lunar polar regions, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, vol. 115, no. 36, pp. 8907–8912.
3. Jones A. Chang'e-4 relay satellite enters halo orbit around Earth-Moon L2, microsatellite in lunar orbit, available at: <https://spacenews.com/change-4-relay-satellite-enters-halo-orbit-around-earth-moon-l2-microsatellite-in-lunar-orbit>.
4. Goodrich E. F. Numerical determination of short period Trojan orbits in the restricted three body problem, *The Astronomical Journal*, 1966, no. 71, pp. 88.
5. Bray T. A., Gouclas C. L. Doubly symmetric orbits about the collinear Lagrangian points, *The Astronomical Journal*, 1967, no. 72, pp. 202.
6. Farquhar R. W., Kamel A. A. Quasi-periodic orbits about the translunar libration point, *Celestial Mechanics*, 1967, vol. 7, no. 4, pp. 458–473.
7. Zagouras C. G., Kazantzis P. G. Three-dimensional periodic oscillations generating from plane periodic ones around the collinear Lagrangian points, *Astrophysics and Space Science*, 1979, no. 61, pp. 389–409.
8. Breakwell J. V., Brown J. V. The 'halo' family of 3-dimensional periodic orbits in the Earth-Moon restricted 3-body problem, *Celestial Mechanics*, 1979, vol. 20, no. 4, pp. 389–404.
9. Connor H. K. Three-dimensional periodic 'halo' orbits, *Celestial Mechanics*, 1984, vol. 32, no. 1, pp. 53–71.
10. Zagouras C. G. Three-dimensional periodic orbits about the triangular equilibrium points of the restricted problem of three bodies, *Celestial Mechanics*, 1985, vol. 37, no. 1, pp. 27–46.
11. Grebow D. Generating periodic orbits in the circular restricted three-body problem with applications to lunar south pole coverage: specialty "Science in Aeronautics and Astronautics": dissertation for the degree of master's degree in technical sciences, Purdue University, West Lafayette, 2006, 165 p.
12. Polyakhova E. N., Starkov V. N., Stepenko N. A. Flights of a spacecraft with a solar sail outside the plane of the ecliptic, *Conference Proceedings of Stability and Control Processes*, 2015, pp. 91–92 (in Russian).
13. Baoyin H., McInnes C. R. Solar sail halo orbits at the Sun-Earth artificial L 1 point, *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 2006, no. 94, pp. 155–171.
14. Baoyin H., McInnes C. R. Solar sail orbits at artificial Sun-Earth libration points, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2005, vol. 28, no. 6, pp. 1328–1331.
15. Simo J., McInnes C. R. Solar sail orbits at the Earth-Moon libration points, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2009, vol. 14, no. 12, pp. 4191–4196.
16. Simo J. A Comparative Study of Displaced Non-Keplerian Orbits with Impulsive and Continuous Thrust, *Advances in the Astronautical Sciences*, 2017, no. 17, pp. 463.
17. Gong S., Li J., Simo J. Orbital motions of a solar sail around the 1 2 earth-moon libration point, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2014, vol. 37, no. 4, pp. 1349–1356.
18. Du Chongrui, Starinova O. L. Optimal Control of Transfer to Vertical Orbits from Lyapunov Orbits Using Low-Thrust Engine, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2022, vol. 23, no. 3, pp. 158–167 (in Russian).
19. Chumachenko E. N., Nazirov R. R., Dunham D. W., Fedorenko A. N. Control of spacecraft using solar radiation, *Cosmic Research*, 2014, vol. 52, no. 3, pp. 257–257 (in Russian).
20. Sazonov V. V., Sazonov V. V. Calculation of resultant vector and principal moment of light pressure forces acting upon the spacecraft with a solar sail, 2011, *Cosmic Research*, no. 49, pp. 56–64.
21. NASA. Solar Sail Demonstrator, available at: https://www.nasa.gov/mission_pages/tadm/solarsail/solarsail_overview.html#ZEWAVHbPIPY.
22. NASA. LightSail, a Planetary Society solar sail spacecraft, available at: <https://www.planetary.org/sci-tech/lightsail>.

М. С. Селезнева, канд. тех. наук, доц., m.s.selezneva@mail.ru,
МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва

Управление критериями селекции алгоритма самоорганизации в задачах коррекции навигационных систем маневренных летательных аппаратов*

Исследована задача построения моделей с желаемыми свойствами, которые применяются в алгоритмическом обеспечении прицельно-навигационного комплекса летательного аппарата. От качества используемых математических моделей во многом зависит точность коррекции прицельно-навигационного комплекса, поэтому предлагается строить модели непосредственно в процессе полета с помощью какого-либо эволюционного алгоритма, например с помощью алгоритма самоорганизации. В ансамбль критериев селекции алгоритма самоорганизации включены различные критерии, определяющие свойства отбираемых моделей. В зависимости от области применения моделей посредством алгоритма самоорганизации с изменяемым ансамблем критериев селекции им придаются желаемые свойства. Ансамбль селекции состоит из общих и специальных критериев, а также управляемой комбинации качественных критериев, избирательно улучшающих характеристики моделей. При изменении режима полета влияние того или иного специального критерия на исследуемый процесс меняется. Изменение ансамбля критериев селекции алгоритма самоорганизации происходит автоматически в процессе полета. В качестве улучшаемых качественных характеристик использованы степени наблюдаемости, управляемости и параметрической идентифицируемости. С течением времени степени наблюдаемости, управляемости и параметрической идентифицируемости могут меняться. Компоненты, которые были хорошо наблюдаемы, со временем могут перейти в разряд слабонаблюдаемых. Слабонаблюдаемые компоненты вектора состояния, хотя и являются формально наблюдаемыми, на практике не подвергаются обработке посредством алгоритмов оценивания, так как их оценку возможно улучшить лишь на достаточно больших интервалах функционирования системы. Аналогичная ситуация складывается и с моделями при исследовании качества их управляемости, а также с параметрами моделей при их идентификации. Представлен алгоритм управления качественными критериями селекции и схема алгоритма формирования моделей при коррекции перспективного прицельно-навигационного комплекса летательного аппарата. Проведено математическое моделирование для различных режимов полета летательного аппарата, таких как прямолинейный полет, разнорысотный полет. Результаты проведенного моделирования показали работоспособность и эффективность предложенных алгоритмических решений.

Ключевые слова: летательный аппарат, прицельно-навигационный комплекс, самоорганизация моделей, алгоритм управления, ансамбль критериев, качественные характеристики

Введение

При разработке перспективных прицельно-навигационных комплексов (ПНК) маневренных летательных аппаратов (ЛА) для повышения точностных характеристик используются методы алгоритмической коррекции отдельных навигационных систем и ПНК в целом [1, 2]. В алгоритмическом обеспечении ПНК используются математические модели корректируемых процессов [1, 3]. От качества моделей в большой степени зависит точность проводимой коррекции ПНК. Для придания моделям улучшенных свойств использована концепция динамического системного синтеза [4, 5]. Эта концепция позволяет сформировать модели с улучшенными свойствами [4, 6, 7]. Однако выбор характеристик моделей, подлежащих улучшению, в работе [4] осуществляется без

учета целевого применения моделей в алгоритмическом обеспечении ПНК. Например, применение моделей с улучшенными характеристиками наблюдаемости и управляемости при использовании в алгоритме оценивания в схеме коррекции навигационной системы в выходном сигнале [8] нецелесообразно. В алгоритме оценивания используются модели с повышенными степенями наблюдаемости переносных состояния [9, 10], а увеличение степени управляемости приводит к увеличению вычислительных затрат, времени построения модели и снижению точности по сравнению с моделями, имеющими только повышенную степень наблюдаемости. Целевое использование моделей в алгоритмическом обеспечении ПНК обеспечивается релейным алгоритмом управления критериями в ансамбле селекции алгоритма самоорганизации.

В условиях интенсивного маневрирования ЛА параметры ПНК изменяются. Коррекция ПНК осуществляется в процессе полета с ис-

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10028, <https://rscf.ru/project/23-79-10028/>

пользованием алгоритмического обеспечения с изменяемой конфигурацией. Изменение комплекса алгоритмов коррекции происходит автоматически в процессе полета ЛА, поэтому набор критериев в ансамбле селекции алгоритма самоорганизации также должен меняться автоматически в процессе функционирования. Таким образом, создание алгоритма управления критериями в ансамбле селекции алгоритма самоорганизации при построении моделей с желаемыми свойствами представляет собой актуальную задачу при синтезе перспективных ПНК ЛА.

Алгоритмические схемы коррекции навигационных систем

При функционировании навигационных систем ПНК обычно используется компенсация их погрешностей с помощью алгоритмов оценивания (рис. 1), с использованием регулятора (рис. 2), алгоритма прогноза (рис. 3), алгоритма идентификации (рис. 4).

Структурная схема инерциальной навигационной системы (ИНС), корректируемой от внешней измерительной системы с алгоритмом оценивания, представлена на рис. 1.

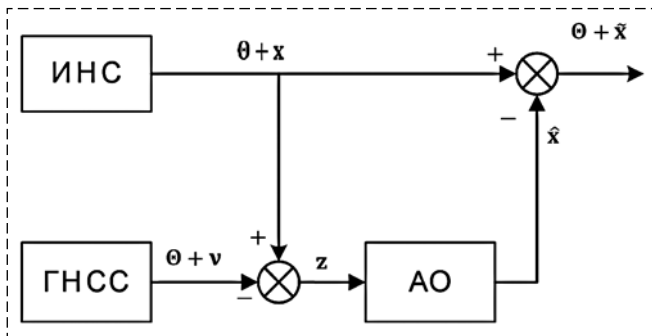


Рис. 1. Структурная схема коррекции ИНС с алгоритмом оценивания
Fig. 1. Block diagram of INS correction with an estimation algorithm

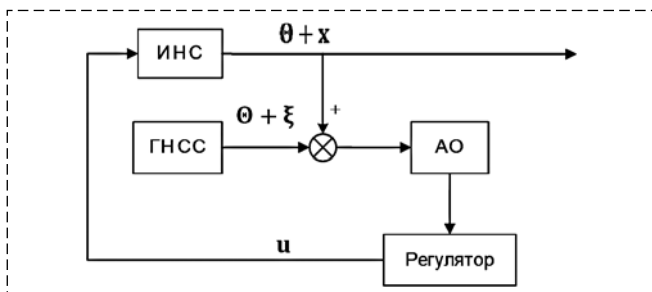


Рис. 2. Структурная схема коррекции ИНС с регулятором
Fig. 2. Structural diagram of INS correction with a regulator

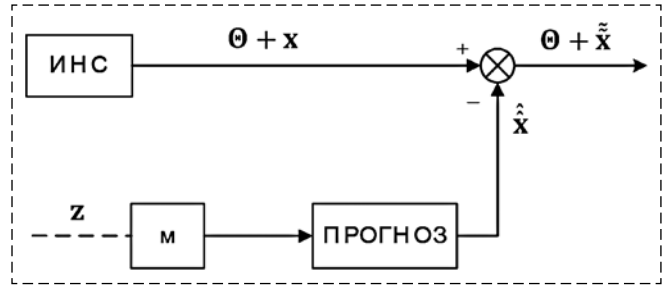


Рис. 3. Структурная схема коррекции ИНС с алгоритмом прогноза
Fig. 3. Structural diagram of INS correction with a prognosis algorithm

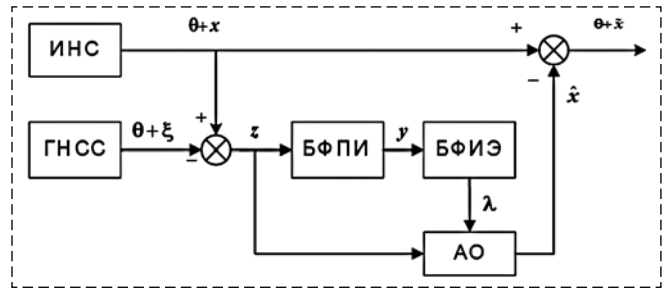


Рис. 4. Структурная схема коррекции ИНС с алгоритмом идентификации
Fig. 4. Structural diagram of INS correction with an identification algorithm

На рис. 1–4: ГНСС — глобальная навигационная спутниковая система; АО — алгоритм оценивания; Θ — истинная навигационная информация; x — вектор погрешностей ИНС; v — вектор погрешностей ГНСС; z — вектор измерений; \hat{x} — оценка вектора погрешностей ИНС; \tilde{x} — ошибки оценивания погрешностей ИНС; М — алгоритм построения моделей; БФПИ — блок формирования приведенных измерений; БФИЭ — блок формирования идентифицируемых элементов.

Во всех схемах коррекции использован алгоритм самоорганизации. Применение априорных моделей в схемах коррекции навигационных систем высокоманевренного ЛА приводит к снижению точности коррекции. Характер погрешностей навигационных систем ПНК существенно меняется при совершении маневров ЛА.

Редуцированный алгоритм управления критериями ансамбля селекции алгоритма самоорганизации

Рассмотрим три качественных критерия: критерий степени управляемости, степени наблюдаемости и степени параметрической идентифицируемости.

При исследовании степени наблюдаемости переменных состояния нестационарного объекта уравнение объекта описывается в следующем дискретном виде [1, 11]:

$$\mathbf{x}_k = \Phi_{k,k-1}\mathbf{x}_{k-1} + \Gamma_{k-1}\mathbf{w}_{k-1}, \quad (1)$$

где \mathbf{x}_k — вектор состояния; \mathbf{w}_{k-1} — вектор входного возмущения; $\Phi_{k,k-1}$ — матрица объекта; Γ_{k-1} — матрица входа.

Уравнение измерений имеет вид

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{H}_k\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k, \quad (2)$$

где \mathbf{z}_k — вектор измерений; \mathbf{v}_k — вектор ошибок измерения; \mathbf{H}_k — матрица измерений.

Разобьем каждый шаг измерений на n (порядок системы) подтактов $[t_k, t_{k+n-1}]$ и выразим эти измерения через вектор состояния в начальном подтакте t_k измерений этого шага:

$$\begin{aligned} \mathbf{z}_k &= \mathbf{H}_k\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k; \\ \mathbf{z}_{k+1} &= \mathbf{H}_{k+1}\Phi_{k+1,k}\mathbf{x}_k + \mathbf{H}_{k+1}\Gamma_k\mathbf{w}_k + \mathbf{v}_{k+1}; \\ &\dots \dots \dots \\ \mathbf{z}_{k+n-1} &= \mathbf{H}_{k+n-1}\Phi_{k+n-1,k+n-2} \dots \Phi_{k+1,k}\mathbf{x}_k + \\ &+ \mathbf{H}_{k+n-1}\Phi_{k+n-1,k+n-2} \dots \Phi_{k+2,k+1}\Gamma_k\mathbf{w}_k + \\ &+ \dots + \mathbf{H}_{k+n-1}\Gamma_{k+n-2}\mathbf{w}_{k+n-2} + \mathbf{v}_{k+n-1}. \end{aligned}$$

Перепишем выражение (2) в матричной форме:

$$\mathbf{z}_k^* = \mathbf{O}_{Lk}\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k^*,$$

где

$$\mathbf{z}_k^* = \begin{bmatrix} \mathbf{z}_k \\ \mathbf{z}_{k+1} \\ \dots \\ \mathbf{z}_{k+n-1} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{O}_{Lk} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_k \\ \mathbf{H}_{k+1}\Phi_{k+1,k} \\ \dots \\ \mathbf{H}_{k+n-1}\Phi_{k+n-1,k+n-2} \dots \Phi_{k+1,k} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{v}_k^* = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_k^+ \\ \mathbf{v}_{k+1}^+ \\ \dots \\ \mathbf{v}_{k+n-1}^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_k \\ \mathbf{H}_{k+1}\Gamma_k\mathbf{w}_k + \mathbf{v}_{k+1} \\ \dots \dots \dots \\ \mathbf{H}_{k+n-1}\Phi_{k+n-1,k+n-2} \dots \Phi_{k+2,k+1}\Gamma_k\mathbf{w}_k + \dots + \mathbf{H}_{k+n-1}\Gamma_{k+n-2}\mathbf{w}_{k+n-2} + \mathbf{v}_{k+n-1} \end{bmatrix}.$$

Матрица \mathbf{O}_{Lk} является матрицей наблюдаемости. Нестационарная система (1) и (2) наблюдаема в интервале $[t_k, t_{k+n-1}]$, если ранг матрицы \mathbf{O}_{Lk} равен порядку системы n , т. е. $\text{rank}[\mathbf{O}_{Lk}] = n$.

Выразим из уравнения объекта вектор состояния в начальном подтакте измерения:

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{O}_{Lk}^\dagger \mathbf{z}_k^* - \mathbf{O}_{Lk}^\dagger \mathbf{v}_k^*, \quad (3)$$

где $\mathbf{O}_{Lk}^\dagger = [\mathbf{O}_{Lk}^\top \mathbf{O}_{Lk}]^{-1} \mathbf{O}_{Lk}^\top$ — псевдообратная матрица \mathbf{O}_{Lk} .

В соответствии с уравнением (3) введем обозначение

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{O}_{Lk}^\dagger \mathbf{z}_k^*. \quad (4)$$

Предполагаем, что можно вычислить степени наблюдаемости компонент вектора состояния системы, учитывая только одно измерение. Значит, сначала при одном измерении вычисляем степени наблюдаемости переменных системы, потом при других.

Например, в случае, когда $\mathbf{H}_k = [1 \ 0 \ \dots \ 0]$, запишем уравнения (4) в скалярном виде:

$$y_k^i = \alpha_{1,k}^i z_k + \alpha_{2,k}^i z_{k+1} + \dots + \alpha_{n,k}^i z_{k+n-1}, \quad (5)$$

где y_k^i — i -й элемент вектора \mathbf{y}_k ; $\alpha_{j,k}^i$ ($j = 1, \dots, n$) — i -я строка матрицы \mathbf{O}_{Lk}^\dagger .

Для остальных компонент вектора состояния уравнения измерений формулируются в соответствии с уравнением (5).

Для произвольной компоненты вектора состояния запишем вектор приведенного измерительного шума $\zeta_k^* = \mathbf{O}_{Lk}^\dagger \mathbf{v}_k^*$ в соответствии с уравнением (5) в скалярном виде:

$$\zeta_k^{*i} = \alpha_{1,k}^i v_k^+ + \alpha_{2,k}^i v_{k+1}^+ + \dots + \alpha_{n,k}^i v_{k+n-1}^+,$$

где ζ_k^{*i} — i -й элемент вектора ζ_k^* .

Дисперсия приведенного к i -й компоненте измерительного шума ζ_k^{*i} может определяться коэффициентами $\alpha_{j,k}^i$ ($j = 1, \dots, n$), т. е.

$$R_{Lk}^{*i} = [(\alpha_{1,k}^i)^2 + (\alpha_{2,k}^i)^2 + \dots + (\alpha_{n,k}^i)^2] R_k^0,$$

где R_k^0 — дисперсия исходного измерительного шума v_k .

Учитывая, что мера — категория, выражающая диалектическое единство качественных и количественных характеристик объекта, судить о мере наблюдаемости можно по двум характеристикам: точности оценивания и времени сходимости.

Критерий, по которому определяется степень наблюдаемости, имеет вид [1, 12]

$$Do_{Lk}^i = \frac{E[(x_k^i)^2]R_k^0}{E[(y_k^i)^2]R_{Lk}^{*i}},$$

где $E[(x_k^i)^2]$ — дисперсия произвольной i -й компоненты вектора состояния; $E[(y_k^i)^2]$ — дисперсия непосредственно измеряемого вектора состояния.

Окончательно, получим модифицированный критерий степени наблюдаемости для нестационарных систем вида

$$Do_{Lk}^i = \frac{E[(x_k^i)^2]}{E[(y_k^i)^2] \sum_{j=1}^n (\alpha_{j,k}^i)^2}.$$

При исследовании степени идентифицируемости вектор состояния \mathbf{x}_{k+n} можно выразить через его значение в начальный момент времени \mathbf{x}_k следующим образом:

$$\mathbf{x}_{k+n} = \Phi_{k+n-1} \cdots \Phi_k \mathbf{x}_k + \Phi_{k+n-1} \cdots \Phi_{k+1} \Gamma_k \mathbf{w}_k + \cdots + \Gamma_{k+n-1} \mathbf{w}_{k+n-1}.$$

Подставив выражение для \mathbf{x}_{k+n} в уравнение измерений \mathbf{z}_{k+n} , получим

$$\mathbf{z}_{k+n} = \mathbf{H}_{k+n} \Phi_{k+n-1} \cdots \Phi_k \mathbf{x}_k + \mathbf{H}_{k+n} \Phi_{k+n-1} \cdots \Phi_{k+1} \Gamma_k \mathbf{w}_k + \cdots + \mathbf{H}_{k+n} \Gamma_{k+n-1} \mathbf{w}_{k+n-1} + \mathbf{v}_{k+n}.$$

Подставив в это уравнение выражение \mathbf{x}_k , получим

$$\mathbf{z}_{k+n} = \mathbf{H}_{k+n} \Phi_{k+n-1} \cdots \Phi_k \mathbf{O}_k^{\dagger} \mathbf{z}_k^* - \mathbf{H}_{k+n} \Phi_{k+n-1} \cdots \Phi_k \mathbf{O}_k^{\dagger} \mathbf{v}_k^* + \cdots + \mathbf{H}_{k+n} \Gamma_{k+n-1} \mathbf{w}_{k+n-1} + \mathbf{v}_{k+n},$$

где

$$\mathbf{z}_k^* = \begin{bmatrix} \mathbf{z}_k \\ \mathbf{z}_{k+1} \\ \dots \\ \mathbf{z}_{k+n-1} \end{bmatrix};$$

$\mathbf{O}_{Lk}^{\dagger}$ — псевдообратная матрица к матрице

$$\mathbf{O}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_k \\ \mathbf{H}_{k+1} \Phi_k \\ \dots \\ \mathbf{H}_{k+n-1} \Phi_{k+n-2} \cdots \Phi_k \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{v}_k^* = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_k \\ \mathbf{H}_{k+1} \Gamma_k \mathbf{w}_k + \mathbf{v}_{k+1} \\ \dots \\ \mathbf{H}_{k+n-1} \Gamma_{k+n-2} \mathbf{w}_{k+n-2} + \mathbf{v}_{k+n-1} \end{bmatrix}$$

Введем обозначения

$$[\lambda_{1,k} \ \lambda_{2,k} \ \dots \ \lambda_{n,k}] = \mathbf{H}_{k+n} \Phi_{k+n-1} \cdots \Phi_k \mathbf{O}_k^{\dagger};$$

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_k^0 &= \gamma_{1,k} \mathbf{w}_k + \gamma_{2,k} \mathbf{w}_{k+1} + \cdots + \gamma_{n,k} \mathbf{w}_{k+n-1} - \\ &- \lambda_{1,k} \mathbf{v}_k - \lambda_{2,k} \mathbf{v}_{k+1} - \cdots - \lambda_{n,k} \mathbf{v}_{k+n-1} + \mathbf{v}_{k+n} = \\ &= \mathbf{H}_{k+n} \Phi_{k+n-1} \cdots \Phi_k \mathbf{O}_k^{\dagger} \mathbf{v}_k^* + \cdots + \\ &+ \mathbf{H}_{k+n} \Gamma_{k+n-1} \mathbf{w}_{k+n-1} + \mathbf{v}_{k+n}. \end{aligned}$$

Тогда постановка задачи сводится к определению неизвестных нестационарных элементов вектора-столбца $[\lambda_{1,k} \ \lambda_{2,k} \ \dots \ \lambda_{n,k}]^T$ по вновь сформированным измерениям, т. е.

$$\lambda_{1,k} = f_{1,k}(z_k, \dots, z_{k+2n-1}) + v_k^{00};$$

$$\lambda_{2,k} = f_{2,k}(z_k, \dots, z_{k+2n-1}) + v_{k+1}^{00};$$

$$\dots \quad \dots \quad \dots$$

$$\lambda_{n,k} = f_{n,k}(z_k, \dots, z_{k+2n-1}) + v_{k+n-1}^{00},$$

где

$$\begin{bmatrix} f_{1,k}(z_k, \dots, z_{k+2n-1}) \\ f_{2,k}(z_k, \dots, z_{k+2n-1}) \\ \dots \\ f_{n,k}(z_k, \dots, z_{k+2n-1}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_k & z_{k+1} & \dots & z_{k+n-1} \\ z_{k+1} & z_{k+2} & \dots & z_{k+n} \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ z_{k+n-1} & z_{k+n} & \dots & z_{k+2n-2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} z_{k+n} \\ z_{k+n+1} \\ \dots \\ z_{k+2n-1} \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} v_k^{00} \\ v_{k+1}^{00} \\ \dots \\ v_{k+n-1}^{00} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_k & z_{k+1} & \dots & z_{k+n-1} \\ z_{k+1} & z_{k+2} & \dots & z_{k+n} \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ z_{k+n-1} & z_{k+n} & \dots & z_{k+2n-2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} v_k^0 \\ v_{k+1}^0 \\ \dots \\ v_{k+n-1}^0 \end{bmatrix}.$$

Поэтому критерий степени идентифицируемости параметров модель динамических нестационарных систем имеет вид [13, 14]

$$Di_k^i = \frac{E[(\lambda_{i,k})^2]R_k^0}{E[(z_{i,k})^2]\hat{R}_k^i},$$

где $E[(\lambda_{i,k})^2]$ — дисперсия произвольной i -й компоненты вектора параметров λ ; $E[(z_{i,k})^2]$ — дисперсия непосредственно измеряемого вектора состояния; R_k^0 — дисперсия исходного измерительного шума; $\hat{R}_k^i = \hat{r}_k^i$ — дисперсия приведенного измерительного шума, полученная с помощью адаптивной модификации фильтра Калмана.

Рассмотрим критерий степени управляемости, который предполагает исследование системы канонического вида:

$$\dot{x}_c^k(t) = \mathbf{A}^k x_c^k(t) + \mathbf{H}^k u_c^k(t), \quad (6)$$

где $\mathbf{A}^k = -\mathbf{V}^{-1}\mathbf{A}^T\mathbf{V}$; $\mathbf{H}^k = -\mathbf{V}^{-1}\mathbf{H}^T$; $\mathbf{V} = [\mathbf{v}_1 \dots \mathbf{v}_n]$; \mathbf{V} — матрица канонического преобразования; \mathbf{v}_i — собственные векторы исследуемой системы.

Система является полностью управляемой, если матрица \mathbf{H} канонической системы (6) не содержит строк, все элементы которых равны нулю.

Степень управляемости характеризуют модули элементов строк матрицы \mathbf{H}^k , которая названа канонической матрицей управляемости. Представленный критерий позволяет проводить сравнительный анализ управляемости и определять, в какой степени управляемы компоненты вектора состояния относительно друг друга. Большой степенью управляемости обладают компоненты вектора состояния, у которых модули элементов строк канонической матрицы управляемости больше модулей соответствующих элементов других строк этой матрицы.

Известные критерии степени управляемости позволяют выделить управляемые в лучшей степени компоненты вектора состояния, но не дают численной оценки управляемости. Определим каноническую матрицу управляемости и исследуем суммы элементов каждой ее

строки. Обозначим h_i — суммы модулей элементов каждой строки этой матрицы, которые позволяют судить о степени управляемости компонент вектора состояния модели ЛА.

Максимальную степень управляемости обладает компонента вектора состояния с наибольшей суммой модулей элементов соответствующей строки канонической матрицы управления h_{\max} . Степени управляемости других компонент вектора состояния определяются путем сравнения сумм модулей элементов строк канонической матрицы, соответствующих исследуемым компонентам вектора состояния с максимальным значением суммы модулей элементов канонической матрицы. Сравнение степеней управляемости можно проводить, воспользовавшись критерием следующего вида [1, 15]:

$$\gamma = \frac{h_i}{h_{\max}},$$

где h_i — модуль суммы элементов, которые находятся в i -й строке матрицы H^k ; h_{\max} — максимальное значение h_i . Предложенный критерий степени управляемости позволяет определить степень управляемости γ каждой конкретной компонент вектора состояния в численном виде.

В зависимости от целевого применения модели в рамках какой-либо схемы коррекции используется специфический набор критериев в алгоритме самоорганизации [16, 17]. Формирование ансамбля критериев в полете осуществляется с помощью релейного алгоритма управления, который имеет вид, представленный на рис. 5.

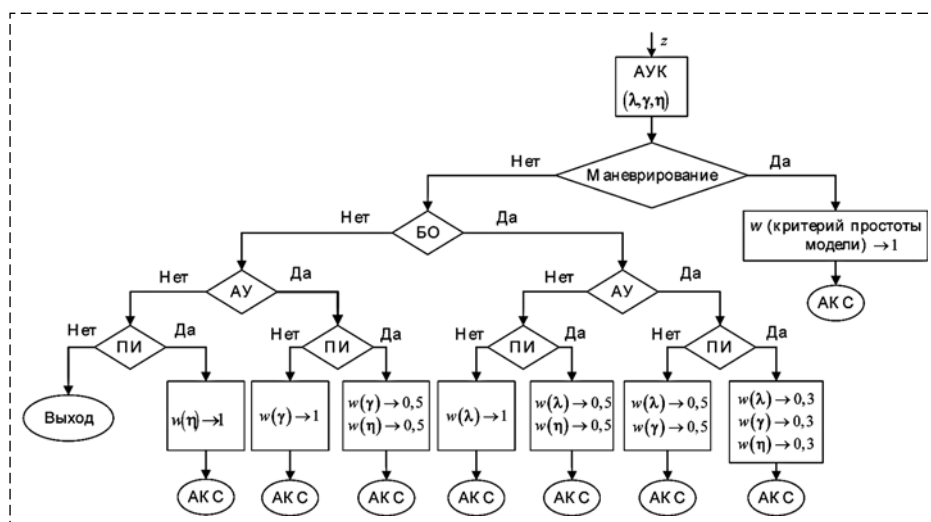


Рис. 5. Алгоритм формирования качественных критериев в полете, где w — вес критерия
Fig. 5. Algorithm for the formation of quality criteria in flight

Качественные критерии позволяют при формировании моделей отбирать переменные состояния, имеющие повышенные характеристики. Например, при формировании моделей погрешностей ИНС из вектора состояния исключаются слабонаблюдаемые компоненты. Азимутальный дрейф является слабонаблюдаемым и может быть эффективно оценен только на интервале времени 1,5...2 ч. Слабонаблюдаемые компоненты вектора состояния, хотя и являются формально наблюдаемыми, на практике не подвергаются обработке посредством алгоритмов оценивания, так как их оценку возможно осуществить лишь на достаточно больших интервалах функционирования системы. Аналогичная ситуация складывается и с моделями при исследовании качества их управляемости, а также с параметрами моделей при их идентификации.

Результаты математического моделирования

Проведено математическое моделирование работы алгоритма самоорганизации с управлением критериями селекции (рис. 6—9).

При изменении высоты полета ЛА ускорение свободного падения будет меняться. Характер изменения ускорения свободного падения при снижении ЛА представлен на рис. 8.

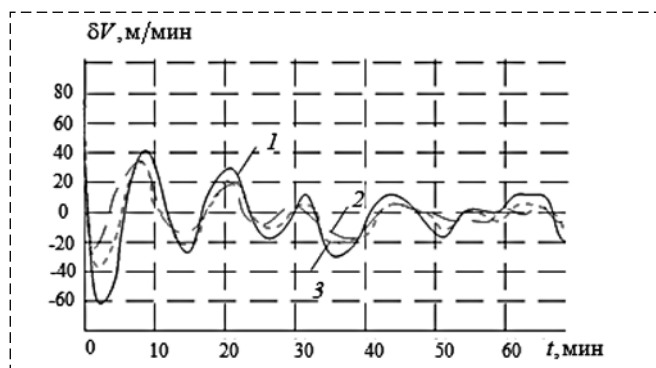


Рис. 6. Модель ошибок ИНС с компенсацией погрешностей с помощью алгоритма управления и ее оценка с помощью алгоритма самоорганизации:

1 — модель ошибок ИНС; 2 — оценка модели ошибок ИНС с помощью алгоритма самоорганизации; 3 — оценка модели ошибок ИНС с помощью алгоритма самоорганизации (в ансамбль критериев селекции в качестве специального критерия включен критерий степени управляемости).

Fig. 6. INS error model with error compensation using a control algorithm and its estimation using a self-organization algorithm:

1 — INS error model; 2 — assessment of the INS error model using a self-organization algorithm; 3 — assessment of the INS error model using a self-organization algorithm (the criterion for the degree of controllability is included as a special criterion in the ensemble of selection criteria)

Для качественной оценки ошибок ИНС при разновысотном полете необходимо осуществлять прогноз изменения величины g . Поэтому необходимо построить модель с повышенной степенью идентифицируемости. Для более точной оценки ошибок ИНС при разновысотном полете в алгоритм самоорганизации в качестве специального критерия добавлен критерий степени параметрической идентифицируемости.

При изменении режима полета специальный критерий в ансамбле критериев селекции ал-

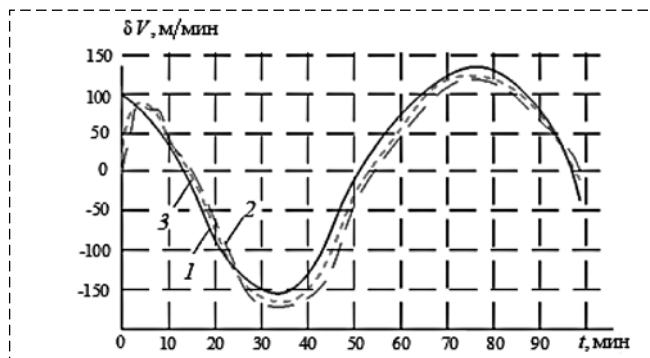


Рис. 7. Модель ошибок ИНС с компенсацией погрешностей с помощью алгоритма оценивания и ее оценка с помощью алгоритма самоорганизации:

1 — модель ошибок ИНС; 2 — оценка модели ошибок ИНС с помощью алгоритма самоорганизации; 3 — оценка модели ошибок ИНС с помощью алгоритма самоорганизации (в ансамбль критериев селекции в качестве специального критерия включен критерий степени наблюдаемости)

Fig. 7. INS error model with error compensation using an estimation algorithm and its estimation using a self-organization algorithm:

1 — INS error model; 2 — assessment of the INS error model using a self-organization algorithm; 3 — assessment of the INS error model using a self-organization algorithm (the criterion of the degree of observability is included as a special criterion in the ensemble of selection criteria)

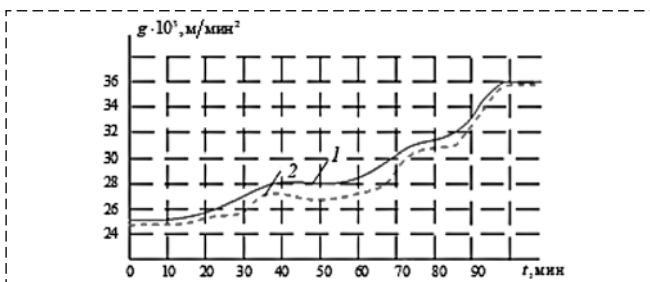


Рис. 8. Изменение ускорения свободного падения в зависимости от высоты полета ЛА:

1 — модель изменения ускорения свободного падения в зависимости от высоты полета ЛА; 2 — идентификация ускорения свободного падения

Fig. 8. Change in free fall acceleration depending on the flight altitude of the aircraft:

1 — model of changes in gravity acceleration depending on the flight altitude of the aircraft; 2 — identification of free fall acceleration.

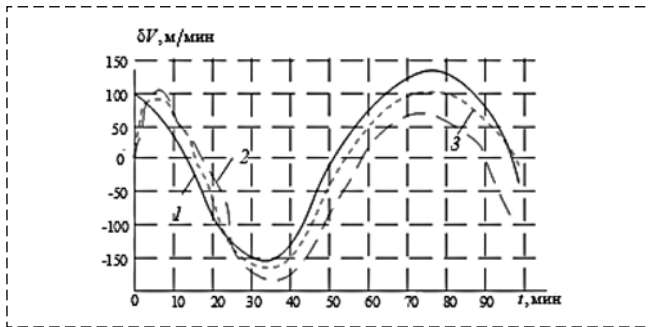


Рис. 9. Модель ошибок ИНС с компенсацией погрешностей с помощью алгоритма идентификации и ее оценка при помощи алгоритма самоорганизации:

1 — модель ошибок ИНС; 2 — оценка модели ошибок ИНС с помощью алгоритма самоорганизации; 3 — оценка модели ошибок ИНС с помощью алгоритма самоорганизации (в ансамбль критериев селекции в качестве специального критерия включен критерий степени идентифицируемости)

Fig. 9. INS error model with error compensation using an identification algorithm and its estimation using a self-organization algorithm:

1 — INS error model; 2 — assessment of the INS error model using a self-organization algorithm; 3 — assessment of the INS error model using a self-organization algorithm (the criterion of the degree of identifiability is included as a special criterion in the ensemble of selection criteria)

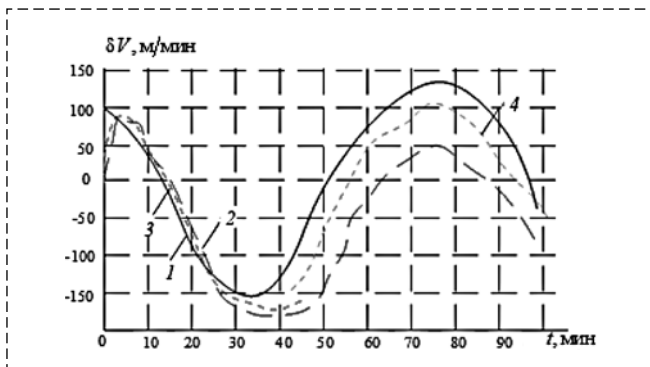


Рис. 10. Модель ошибок ИНС с компенсацией погрешностей с помощью алгоритма самоорганизации с управлением критериями селекции:

1 — модель ошибок ИНС; 2 — оценка модели ошибок ИНС с помощью алгоритма самоорганизации; 3 — оценка модели ошибок ИНС с помощью алгоритма самоорганизации (в ансамбль критериев селекции в качестве специального критерия включен критерий степени наблюдаемости); 4 — оценка модели ошибок ИНС с помощью алгоритма самоорганизации (в ансамбль критериев селекции в качестве специального критерия включен критерий степени идентифицируемости).

Fig. 10. INS error model with error compensation using a self-organization algorithm selection criterion control:

1 — INS error model; 2 — assessment of the INS error model using a self-organization algorithm; 3 — assessment of the INS error model using a self-organization algorithm (the criterion of the degree of observability is included as a special criterion in the ensemble of selection criteria); 4 — assessment of the INS error model using a self-organization algorithm (the criterion of the degree of identifiability is included as a special criterion in the ensemble of selection criteria)

горитма самоорганизации может меняться. На рис. 10 представлено математическое моделирование ошибок ИНС при прямолинейном полете с последующим изменением высоты полета. При прямолинейном движении оценка ошибок ИНС проводится с помощью алгоритма самоорганизации, в ансамбль критериев которого в качестве специального критерия включен критерий степени наблюдаемости. При изменении высоты полета оценка ошибок ИНС с таким ансамблем критериев селекции становится менее эффективной, поэтому происходит переключение на другой ансамбль критериев селекции, где в качестве специального критерия вместо критерия степени наблюдаемости добавлен критерий степени идентифицируемости.

Заключение

Рассмотрена задача создания алгоритмического обеспечения, использующего модели с улучшенными качественными характеристиками для перспективного ПНК маневренного ЛА. Схемы алгоритмической коррекции ПНК меняются в процессе полета, и используемым моделям целесообразно придавать свойства, соответствующие целевому их использованию в конкретном алгоритме. Разработан релейный алгоритм управления критериями селекции алгоритма самоорганизации, обеспечивающий использование только тех качественных критериев, которые соответствуют алгоритмам коррекции в схемах компенсации погрешностей навигационных систем ПНК. В рамках концепции динамического системного анализа предложен способ формирования моделей с избирательно улучшаемыми свойствами.

Повышение точности алгоритмов коррекции ПНК с помощью использования апостериорных самоорганизующихся моделей с улучшенными качественными характеристиками позволяет повысить точность определения параметров ЛА в условиях интенсивного маневрирования.

Список литературы

1. Неусьпин К. А. Современные системы и методы наведения, навигации и управления летательными аппаратами. М.: Изд-во МГОУ, 2009. 500 с.
2. Шэнь К., Пролетарский А. В., Неусьпин К. А. Исследование алгоритмов коррекции навигационных систем летательных аппаратов // Вестник Московского государственного технического университета им. НЭ Баумана. Серия "Приборостроение". 2016. № 2 (107). С. 28—39.

3. Пролетарский А. В., Неусыпин К. А. Способы коррекции навигационных систем и комплексов летательных аппаратов // Инженерный журнал: наука и инновации. 2012. № 3 (3). С. 44.

4. Селезнева М. С. и др. Динамический системный синтез алгоритмического обеспечения навигационного комплекса летательного аппарата // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2017. № 2. С. 36–42.

5. Селезнева М. С., Неусыпин К. А., Пролетарский А. В. Разработка акцептора действия измерительного комплекса с использованием концепции динамического системного синтеза // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72, № 2. С. 73–77.

6. Чжан Л. и др. Способы улучшения характеристик нелинейных моделей динамических систем // Будущее машиностроения России. 2020. С. 197–201.

7. Неусыпин К. А., Селезнева М. С., Кай Ш. Исследование качественных характеристик наблюдаемости переменных состояния линейных нестационарных моделей инерциальных навигационных систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. Т. 19, № 5. С. 346–354.

8. Кай Ш., Селезнева М. С., Неусыпин К. А. Разработка алгоритма коррекции инерциальной навигационной системы в автономном режиме // Измерительная техника. 2017. № 10. С. 16–20.

9. Shen K. et al. Novel variable structure measurement system with intelligent components for flight vehicles // Metrology and measurement systems. 2017. P. 347–356.

10. Shen K. et al. Quantifying observability and analysis in integrated navigation // Navigation: Journal of The Institute of Navigation. 2018. Т. 65. № 2. С. 169–181.

11. Джанджгава Г. И. и др. Навигационный комплекс с повышенными характеристиками наблюдаемости и управляемости // Авиакосмическое приборостроение. 2016. № 6. С. 18–24.

12. Кай Ш., Неусыпин К. А. Критерий степени наблюдаемости переменных состояния нестационарных систем // Автоматизация. Современные технологии. 2016. № 6. С. 10–16.

13. Neusypin K. A. et al. Algorithm for building models of INS/GNSS integrated navigation system using the degree of identifiability // 2018 25th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS). IEEE, 2018. P. 1–5.

14. Neusypin K., Selezneva M., Proletarsky A. Nonlinear information processing algorithm for navigation complex with increased degree of parametric identifiability // Recent Research in Control Engineering and Decision Making. Springer International Publishing, 2019. P. 37–49.

15. Неусыпин К. А., Фам С. Ф. Численный критерий степени управляемости переменных состояния // Автоматизация и современные технологии. 2007. № 7. С. 24–26.

16. Ивахненко А. Г. Долгосрочное прогнозирование и управление сложными системами. Киев: Техніка, 1975, 312 с.

17. Шашурин В. Д., Селезнева М. С., Неусыпин К. А. Технология формирования акцептора действия навигационного комплекса с использованием динамического системного синтеза // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72, № 3. С. 121–126.

Control of the Selection Criteria of the Self-Organization Algorithm in the Problems of Correcting the Navigation Systems of Maneuverable Aircraft

M. S. Selezneva, m.s.selezneva@mail.ru,
BMSTU, Moscow, 105005, Russian Federation

*Corresponding author: Selezneva M. S., Ph.D., Associate Professor,
BMSTU, Moscow, 105005, Russian Federation, e-mail: m.s.selezneva@mail.ru*

Accepted on September 01, 2023

Abstract

The problem of constructing models with the desired properties, which are used in the algorithmic support of the sighting and navigation complex of the aircraft, has been studied. The quality of the used mathematical models largely determines the accuracy of the correction of the sighting and navigation system, therefore it is proposed to build models directly during the flight using some evolutionary algorithm. For example, using a self-organization algorithm. The ensemble of selection criteria for the self-organization algorithm includes various criteria that determine the properties of the selected models. Depending on the field of application of the models, they are given the desired properties by means of a self-organization algorithm with a variable ensemble of selection criteria. The selection ensemble consists of general, special criteria, as well as a controlled combination of qualitative criteria that selectively improve the performance of models. When the flight mode changes, the influence of one or another special criterion on the process under study changes. The change in the ensemble of selection criteria for the self-organization algorithm occurs automatically during the flight. Degrees of observability, controllability and parametric identifiability are used as improved qualitative characteristics. Over time, the degree of observability, controllability, and parametric identifiability may change. Components that were well observable over time can become poorly observable. The weakly observable components of the state vector, although they are formally observable, in practice are not processed by estimation algorithms, since their evaluation is possible only on sufficiently large intervals of the system operation. A similar situation develops with models in the study of the quality of their controllability, as well as with the parameters of models during their identification. An algorithm for controlling the quality selection criteria and a diagram of the algorithm for generating models during the correction of a promising sighting and navigation complex of an aircraft are presented. Mathematical modeling has been carried out for various flight modes of the aircraft, such as straight flight, flight at different altitudes. The results of the simulation showed the efficiency and effectiveness of the proposed algorithmic solutions.

Keywords: *aircraft, sighting and navigation system, self-organization of models, control algorithm, ensemble of criteria, qualitative characteristics*

Acknowledgements: The study was supported by the grant of the Russian Science Foundation No. 23-79-10028, <https://rscf.ru/project/23-79-10028/>

For citation:

Selezneva M. S. Control of the Selection Criteria of the Self-Organization Algorithm in the Problems of Correcting the Navigation Systems of Maneuverable Aircraft, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2023, vol. 24, no. 12, pp. 660–668.

DOI: 10.17587/mau.24.660-668

References

1. **Neusypin K. A.** Modern systems and methods of guidance, navigation and control of aircraft, Moscow, MGOU Publishing House, 2009, 500 p. (in Russian).
2. **Shen K., Proletarsky A. V., Neusypin K. A.** Study of correction algorithms for aircraft navigation systems, *Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. Series "Instrument making"*, 2016, no. 2 (107), pp. 28–39 (in Russian).
3. **Proletarsky A. V., Neusypin K. A.** Methods for correcting navigation systems and complexes of aircraft, *Engineering Journal: Science and Innovations*, 2012, no. 3(3), pp. 44 (in Russian).
4. **Selezneva M. S., Kai S., Proletarsky A. V., Neusypin K. A.** Dynamic system synthesis of algorithmic support for the navigation complex of an aircraft, *Instruments and systems. Management, control, diagnostics*, 2017, no. 2, pp. 36–42 (in Russian).
5. **Selezneva M. S., Neusypin K. A., Proletarsky A. V.** Development of the action acceptor of the measuring complex using the concept of dynamic system synthesis, *Automation. Modern technologies*, 2018, vol. 72, no. 2, pp. 73–77 (in Russian).
6. **Zhang L., Proletarsky A. V., Neusypin K. A., Selezneva M. S.** Ways to improve the characteristics of nonlinear models of dynamic systems, *Future of mechanical engineering in Russia*, 2020, pp. 197–201 (in Russian).
7. **Neusypin K. A., Kai S., Selezneva M. S.** On Qualitative Characteristics of the State Variable Observability in Linear Time-Varying Models of Inertial Navigation Systems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 5, pp. 346–354.
8. **Shen K., Selezneva M. S., Neusypin K. A.** Development of an algorithm for correction of an inertial navigation system in Off-Line mode, *Measurement Techniques*, 2018, vol. 60, pp. 991–997.
9. **Shen K., Selezneva M. S., Neusypin K. A., Proletarsky A. V.** Novel variable structure measurement system with intelligent components for flight vehicles, *Metrology and measurement systems*, 2017, pp. 347–356.
10. **Shen K., Xia Y., Wang M., Neusypin K. A., Proletarsky A. V.** Quantifying observability and analysis in integrated navigation, *Navigation: Journal of The Institute of Navigation*, 2018, vol. 65, no. 2, pp. 169–181.
11. **Dzhandzhgava G. I., Babichenko A. V., Neusypin K. A., Proletarsky A. V., Selezneva M. S.** Navigation complex with enhanced observability and controllability, *Aerospace instrumentation*, 2016, no. 6, pp. 18–24 (in Russian).
12. **Kai Sh., Neusypin K. A.** Criterion of the degree of observability of state variables of non-stationary systems, *Automation. Modern technologies*, 2016, no. 6, pp. 10–16 (in Russian).
13. **Neusypin K. A., Selezneva M. S., Kai S., Proletarsky A. V.** Algorithm for building models of INS/GNSS integrated navigation system using the degree of identifiability, *2018 25th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS)*, IEEE, 2018, pp. 1–5.
14. **Neusypin K., Selezneva M., Proletarsky A.** Nonlinear information processing algorithm for navigation complex with increased degree of parametric identifiability, *Recent Research in Control Engineering and Decision Making*, Springer International Publishing, 2019, pp. 37–49.
15. **Neusypin K. A., Fam S. F.** Numerical criterion for the degree of controllability of state variables, *Automation and modern technologies*, 2007, no. 7, pp. 24–26 (in Russian).
16. **Ivakhnenko A. G.** Long-term forecasting and management of complex systems, Kiev, Technique, 1975, 312 p (in Russian).
17. **Shashurin V. D., Selezneva M. S., Neusypin K. A.** Technology for forming the action acceptor of the navigation complex using dynamic system synthesis, *Avtomatizatsiya. Modern technologies*, 2018, vol. 72, no. 3, pp. 121–126 (in Russian).

**УКАЗАТЕЛЬ статей,
опубликованных в журнале
"Мехатроника, автоматизация,
управление" в 2023 г.**

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ
И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ**

- Omorov T. T., Zakiriaev K. E., Takyrbashev B. K., Imanakunova Zh. S.** Automated Control of Unauthorized Power Take-Offs in a Distributed Electrical Network. № 1
- Александров А. Ю., Рузин С. Б.** Нелинейные алгоритмы управления группой мобильных агентов на отрезке. № 3
- Бобцов А. А., Воробьев В. С., Николаев Н. А., Пыркин А. А., Ортега Р.** Синтез адаптивного наблюдателя переменных состояния для линейного стационарного объекта при наличии шумов измерений. № 7
- Гайворонский С. А., Езангина Т. А., Соболев А. В.** Синтез систем управления максимальной робастной степени устойчивости на основе вершинных критических корневых диаграмм. № 10
- Гайдук А. Р.** Синтез дискретных и гибридных нелинейных систем управления. № 10
- Жиравок А. Н., Зуев А. В., Шумский А. Е., Бобко Е. Ю.** Построение интервальных наблюдателей для дискретных нелинейных динамических систем. № 6
- Жиравок А. Н., Зуев А. В., Бобко Е. Ю.** Метод построения виртуальных датчиков для замены отказавших физических датчиков. № 10
- Иванов В. П.** Новый подход к синтезу оптимального терминального управления нелинейными динамическими системами. № 1
- Карпов В. Э., Воробьев В. В., Ровбо М. А.** О некоторых аспектах применения автоматных моделей в групповом управлении. № 4
- Краснощеченко В. И.** Синтез динамических регуляторов по выходу с использованием функций модальной кластеризации в D-областях. № 5
- Куликов В. В., Куцый Н. Н., Осипова Е. А.** Параметрическая оптимизация ПИД регулятора с ограничением на основе метода сопряженных градиентов Полака—Поляка—Рибьера. № 5
- Липкович М. М., Сагатдинов А. Р.** Применение алгоритма "Полоска" для онлайн-декодирования ЭЭГ-паттернов. № 6

- Ловчаков В. И.** Выбор весовых коэффициентов квадратичного функционала качества в задаче АКОР Летова—Калмана. № 3
- Обухов А. Д., Назарова А. О.** Метод управления на основе технологий компьютерного зрения и машинного обучения для адаптивных систем. № 1
- Плотников С. А.** Десинхронизация и колебательность в возбудимых сетях ФитцХью—Нагумо. № 6
- Рыбалко А. В., Фрадков А. Л.** Идентификация двух моделей нейронов ФитцХью—Нагумо на основе метода скоростного градиента и фильтрации. № 7
- Тырва В. О., Саушев А. В.** Целеуказание совместного управления в системе "человек—машина": моделирование и структуризация. № 2
- Феофилов С. В., Козырь А. В., Хапкин Д. Л.** Структурно-параметрический синтез нейросетевых регуляторов для объектов управления с ограничителями. № 11
- Шагниев О. Б., Фрадков А. Л.** Оценка влияния дискретизации на работу алгоритма скоростного градиента при управлении синхронизацией. № 2

**РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА
И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ**

- Dembitsky N. L.** Built-in Analog Automatic Controls for Small Robots. № 9
- Kuprin M. S., Osipov I. A., Klyuchikov A. V., Samokhin N. E.** Simulation Modeling of Mobile Robotic Complexes Tool Analysis According to Physical Laws (a Review). № 3
- Nguyen C. X., Tran S. V., Phan H. N.** Control Law Synthesis for Flexible Joint Manipulator Based on Synergetic Control Theory. № 8
- Voronkov A. D., Diane S. A. K.** Grasping of Unknown Objects with an Autonomous Manipulator: State of the Art, Problems and Prospects. № 10
- Антипов А. С., Краснова С. А.** Методы демпфирования колебаний груза и робастного управления ходовой тележкой мостового крана с учетом динамики электропривода. № 8
- Ахмад А., Ющенко А. С.** Метод управления подводным роботом с волнообразным движителем с использованием активного подавления помех и нечеткой логики. № 9
- Бобков В. А., Морозов М. А., Кудряшов А. П., Инзарцев А. В.** Инспекция корпуса судна с использованием автономного подводного робота, оснащенного стереофотокамерой. № 4

- Брискин Е. С., Смирная Л. Д., Артемьев К. С.** Об управлении тяговыми характеристиками и сопротивлением движению мобильных роботов с шагающими движителями. № 2
- Вольф Д. А., Мещеряков Р. В., Исхакова А. О.** Интерактивный четвероногий робот класса фелидов с блоком нейронной обработки. № 10
- Гайдук А. Р., Лукин Д. С.** Синтез нелинейных систем управления автороботами. № 2
- Граськин С. С., Ермолов И. Л., Хрипунов С. П.** Концептуальные основы платформенно-модульного подхода к разработке перспективных робототехнических комплексов. № 12
- Ермолов И. Л., Лапин Б. С.** Распределенное планирование движения для группы совместно переносящих груз роботов с учетом свойств опорных поверхностей. № 6
- Кабанов С. А., Кабанов Д. С., Митин Ф. В.** Оптимизация курсового движения беспилотного автомобиля при наличии препятствий и возмущений. № 2
- Кабанов С. А., Митин Ф. В.** Управление курсовым движением беспилотного автомобиля на основе алгоритма оптимального управления. № 12
- Карпов В. Э., Ровбо М. А., Сорокоумов П. С.** Сигнальная коммуникация для управления поведением коллаборативного робота. № 5
- Килин А. А., Караваев Ю. Л., Шестаков В. А.** Движение без проскальзывания и отрыва от поверхности четырехколесного высокоманевренного мобильного робота. № 8
- Костюков В. А., Медведев М. Ю., Пшихопов В. Х.** Планирование движения наземных роботов в среде с препятствиями: алгоритмы построения траекторий в группе при заданном шаблоне. № 1
- Крестовников К. Д.** Алгоритмы управления двунаправленной беспроводной системой передачи энергии при перераспределении энергоресурсов в группе наземных роботов. № 9
- Марчук Е. А., Михайлов А. С., Калинин Я. В., Малолетов А. В.** Управление силами натяжения в системе тросового параллельного робота. № 12
- Мелехин В. Б., Хачумов М. В.** Принцип организации мотивационного поведения и автоматического целеполагания автономных интеллектуальных мобильных систем. № 2
- Мелехин В. Б., Хачумов М. В.** Когнитивные инструменты абстрактного мышления автономных интеллектуальных мобильных систем. № 6
- Селюцкий Ю. Д.** О регулировании колебаний ветроэнергетической системы, использующей эффект галоирования. № 1
- Тюленев И. Д., Филимонов Н. Б.** Алгоритмизация автоматического управления парковкой беспилотного автомобиля. № 12
- Фуртат И. Б., Жуков Ю. А., Слободзян Н. С.** Обзор моделей и методов управления шаговыми двигателями. № 7

ДИНАМИКА, БАЛЛИСТИКА, УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

- Abdrashitov A. R.** Survey of Relative Navigation Methods for Multi-Agent Unmanned Aerial Vehicle Systems. № 7
- Korsun O. N., Sekou Goro, Moung Htang Om.** A Comparison between Kalman Filtering Approaches in Aircraft Flight Signal Estimation. № 11
- Neusypin K. A., Proletarsky A. V., Selezneva M. S.** Algorithms for Complexing an Inertial Navigation System with Angular Acceleration Sensors. № 2
- Yu W. J., Starinova O. L.** Study on Displaced Orbits Below the Moon's South Pole Near L2 Point Based on Solar Sail. № 12
- Агаев Н. Б., Оруджов Г. Г., Калбиев Н. Н.** Планирование оптимальной опорной траектории полета летательного аппарата с использованием карты рельефа местности. № 9
- Бусурин В. И., Кудрявцев П. С., Симонов М. Л.** Система управления двигательной установкой самолета при взлете с пониженной тягой. № 5
- Елисов Н. А., Крамлих А. В., Ломака И. А.** Синтез номинальных траекторий переориентаций малоразмерного космического аппарата при отказе одного канала управления. № 11
- Зубов Н. Е., Рябченко В. Н.** Оптимальная стабилизация бокового движения летательного аппарата декомпозиционным методом модального синтеза. № 8
- Козлова Н. Ю., Фомичев А. В.** Алгоритмизация наведения и управления движением космическим манипуляционным роботом в задачах сервисного обслуживания некооперируемого космического аппарата. № 4
- Кожевников Ю. В., Шибанов Г. П.** Оптимальное осреднение высотно-скоростных характеристик летательных аппаратов при их летных испытаниях. № 9
- Кориков А. М., Тран В. Т.** Кинематическая модель стабилизации и управления ориентацией подвесной аппаратуры беспилотного летательного аппарата. № 7
- Малютин Д. М., Распопов В. Я., Иванов Ю. В.** Способ увеличения точности гироскопа со

сферическим шарикоподшипниковым подвесом. № 8

Николаев А. В., Старовойтов Е. И., Федосов Д. В., Колесников А. В., Филин М. А. Навигация беспилотного транспорта на основе электромагнитной индукции. № 11

Соколов С. В., Погорелов В. А., Охотников А. Л., Куриненко М. В. Метод комплексирования данных электронных карт и спутниковых измерений для высокоточного позиционирования подвижных объектов. № 10

Пушков С. Г., Ловицкий Л. Л., Горшкова О. Ю., Малахова И. В. Методы параметрической идентификации систематических погрешностей бортовых измерений аэродинамических углов в летных испытаниях самолета. № 11

Селезнева М. С. Управление критериями селекции алгоритма самоорганизации в задачах коррекции навигационных систем маневренных летательных аппаратов. № 12

Страшнов Е. В., Михайлюк М. В. Моделирование управления космическим аппаратом при посадке на Луну в комплексах виртуального окружения. № 3

Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б., Нгуен Т. К., Фам К. Ф. Планирование маршрутов полета БПЛА в задачах группового патрулирования протяженных территорий. № 7

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Aliiev T. A., Guluev G. A., Rzayev A. H., Rzayeva N. E., Pashayev F. H., Gadimov R. M. Correlational Extremal System for Controlling the Beginning of Faults in Oil Field Equipment by Analyzing their Wattmeter and Dynamometer Charts. № 5

Palchevsky E. V., Antonov V. V., Kromina L. E., Roldionova L. E., Fakhrullina A. R. Intelligent Fore-

casting of Electricity Consumption in Managing Energy Enterprises in Order to Carry out Energy-Saving Measures. № 6

Yordanova S. T., Slavov M. N., Stoitseva-Delicheva D. R. Design and Genetic Algorithms Based Optimisation of Industrial Adaptive PID FLC System of Liquid Level. № 4

Антонов В. В., Кромина Л. А., Родионова Л. Е., Фахруллина Л. А., Баймурзина Л. И., Пальчевский Е. В., Родионов Е. А. Концепция формирования интеллектуальных управляющих систем энергоснабжения городских сетей. № 4

Ковалёв С. П. Разработка платформы управления распределенными энергетическими ресурсами на базе цифрового двойника. № 3

Кушников В. А., Богомолов А. С., Иващенко В. А., Селютин А. Д., Резчиков А. Ф., Кушникова Е. В., Марков А. И. Задача идентификации производственных ситуаций в системах управления производственными процессами авиаремонтного предприятия. № 9

Рябчиков М. Ю., Рябчикова Е. С., Новак В. С. Гибридная модель для упреждающего управления температурой металла при горячем оцинковании стальной полосы. № 8

Соловьев Д. С. Разработка и анализ интеллектуальной системы управления гальваническим процессом на базе ассоциативной памяти в условиях предсказуемой неопределенности. № 11

Шемякин А. Н., Рачков М. Ю., Соловьев Н. Г., Якимов М. Ю., Котов М. А. Определение динамических характеристик системы управления мощностью излучения технологических CO₂-лазеров с накачкой несамостоятельным тлеющим разрядом. № 4

Яковлев Р. Н. Метод точечного орошения и вне-ошения удобрений с использованием группы автономных роботизированных агентов. № 3

Издательство "НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

107076, Москва, Матросская Тишина, 23с2

Телефон редакции журнала: **+7(499) 270 16 52**

Технический редактор *Е. В. Конова*. Корректор *М. Ю. Безменова*.

Сдано в набор 02.10.2023. Подписано в печать 29.11.2023. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Заказ МН1223. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Комитете Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-11648 от 21.01.02

Учредитель: Издательство "Новые технологии"

Оригинал-макет ООО "Авансед солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансед солюшнз". 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru



XIV Всероссийское совещание по проблемам управления

**(Россия, Москва, Институт проблем управления
имени В. А. Трапезникова РАН, 17–20 июня 2024 г.)**

XIV Всероссийское совещание по проблемам управления (VSPU-2024, Совещание), посвященное 85-летию Института проблем управления имени В. А. Трапезникова РАН (ИПУ РАН), проводится 17–20 июня 2024 года в ИПУ РАН (г. Москва, Россия).

VSPU-2024 организуется ИПУ РАН при поддержке Российской академии наук, Министерства науки и высшего образования России, Отделения энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН, Российского национального комитета по автоматическому управлению, Академии навигации и управления движением, Научного совета РАН по теории и процессам управления, Научного совета РАН по робототехнике и мехатронике, Научного совета РАН по машиностроению.

В 2024 году VSPU-2024 включает в себя проводимую ежегодно Мультиконференцию по проблемам управления МКПУ-2024 (за исключением конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н. Н. Острякова).

Сроки проведения Совещания

Совещание проводится с 17 по 20 июня 2024 года.

- 17 июня — открытие; пленарное заседание; заседание, посвященное 85-летию ИПУ РАН;
- 18–19 июня — пленарные и секционные заседания, круглые столы;
- 20 июня — пленарные и секционные заседания, закрытие.

Направления работы Совещания:

- I. Теория систем управления.
- II. Управление подвижными объектами и навигация.
- III. Интеллектуальные системы в управлении.
- IV. Управление в промышленности и логистике.
- V. Управление системами междисциплинарной природы.
- VI. Средства измерения, вычислений и контроля в управлении.
- VII. Системный анализ и принятие решений в задачах управления.

Подробная информация о Совещании находится на сайте <http://vspu2024.ipu.ru>

Контактная информация

Иван Николаевич Барабанов, ученый секретарь Программного комитета VSPU-2024.
e-mail: vspu2024.ipu.ru

Рисунок к статье Е. А. Марчука, А. С. Михайлова, Я. В. Калинина, А. В. Малолетова
«УПРАВЛЕНИЕ СИЛАМИ НАТЯЖЕНИЯ
В СИСТЕМЕ ТРОСОВОГО ПАРАЛЛЕЛЬНОГО РОБОТА»

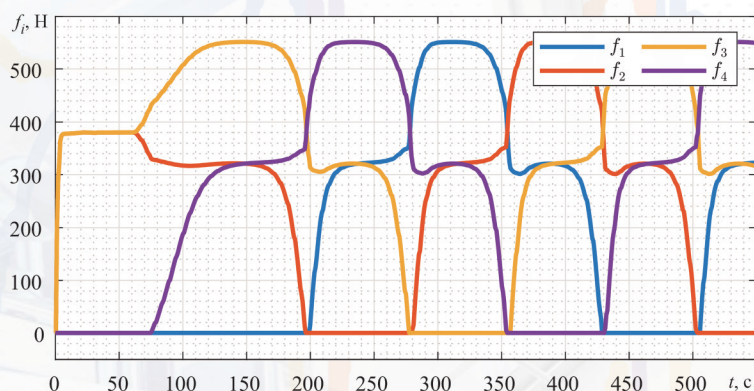


Рис. 3. Расчетные значения оптимального распределения сил натяжения в группе нижних тросов
Fig. 3. Calculated values for optimal distribution of tension forces in the group of lower cables

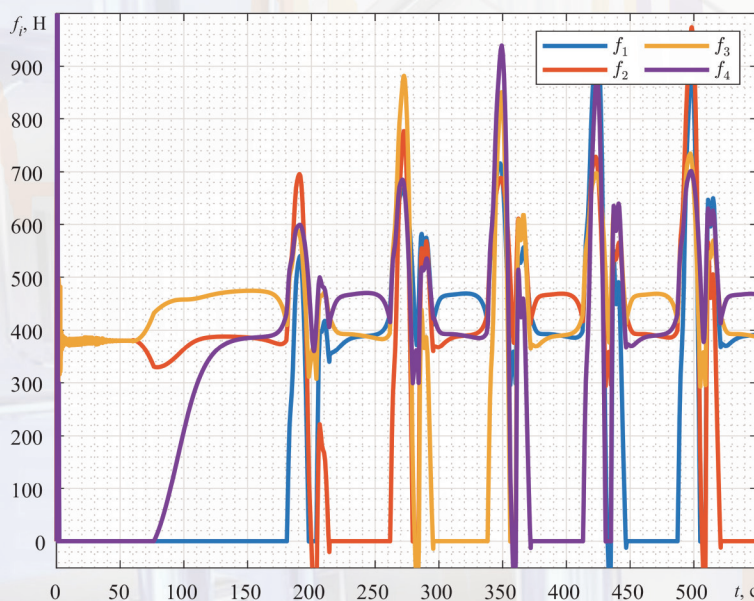


Рис. 4. Силы натяжения в группе нижних тросов без управления усилиями
Fig. 4. Tension forces in the group of lower cables without force control

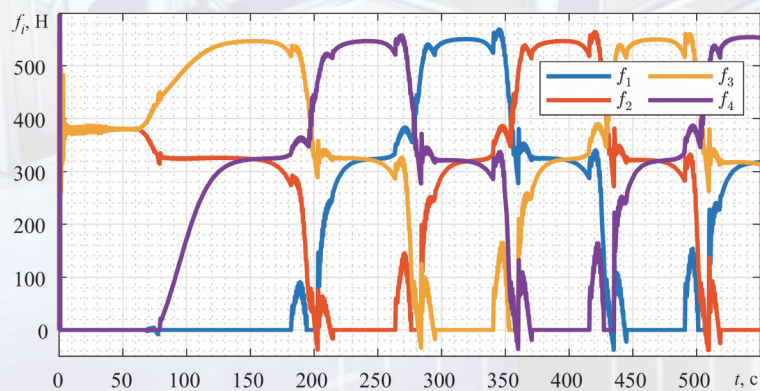


Рис. 5. Силы натяжения в группе нижних тросов с управлением усилиями
Fig. 5. Tension forces in the group of lower cables with force control

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» выпускает научно-технические журналы



Теоретический и прикладной научно-технический журнал

ПРОГРАММНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ

В журнале освещаются состояние и тенденции развития основных направлений индустрии программного обеспечения, связанных с проектированием, конструированием, архитектурой, обеспечением качества и сопровождением жизненного цикла программного обеспечения, а также рассматриваются достижения в области создания и эксплуатации прикладных программно-информационных систем во всех областях человеческой деятельности.

Подписной индекс по Объединенному каталогу «Пресса России» – 22765



Ежемесячный теоретический и прикладной
научно-технический журнал

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

В журнале освещаются современное состояние, тенденции и перспективы развития основных направлений в области разработки, производства и применения информационных технологий.

Подписной индекс по Объединенному каталогу «Пресса России» – 72656



Ежемесячный научно-практический и учебно-методический журнал

БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

В журнале освещаются достижения и перспективы в области исследований, обеспечения и совершенствования защиты человека от всех видов опасностей производственной и природной среды, их контроля, мониторинга, предотвращения, ликвидации последствий аварий и катастроф, образования в сфере безопасности жизнедеятельности.

Подписной индекс по Объединенному каталогу «Пресса России» – 79963



Междисциплинарный теоретический
и прикладной научно-технический журнал

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

В журнале освещаются современное состояние, тенденции и перспективы развития нано- и микросистемной техники, рассматриваются вопросы разработки и внедрения нано- и микросистем в различные области науки, технологии и производства.

Подписной индекс по Объединенному каталогу «Пресса России» – 79493

Все журналы
распространяются
только по подписке.

Оформить подписку можно
через подписные агентства
либо непосредственно
в редакции журналов.

Адрес редакции журналов для авторов и подписчиков:
107076, Москва, Матросская Тишина 23 с2, оф. 45.
Издательство "НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ".
Тел.: 8 (499) 270-16-52. E-mail: antonov@novtex.ru