

# ДОСЖАН НҮРСҰЛТАН САҒЫНАЙҰЛЫ

## РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ СПУТНИКОВ В ГРУППИРОВКЕ

### АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание степени  
доктора философии (PhD) по специальности  
«6D074600 – Космическая техника и технологии»

**Общее описание работы.** Диссертационная работа посвящена исследованию задачи поддержания тетраэдральной конфигурации группировки спутников, представляющих собой оптические элементы телескопа с синтезированной апертурой для непрерывного мониторинга поверхности Земли. В диссертационной работе исследуются алгоритмы управления конфигурацией группировки спутников с учетом различных возмущающих сил.

**Актуальность работы.** В настоящее время в задачах исследования космического пространства все большее количество исследователей предпочитает рассматривать вместо одиночных спутников группировки космических аппаратов. Это обусловлено тем, что в группировках, как правило, задействованы малые аппараты, на разработку которых уходит меньше времени и средств. Кроме того, с помощью группировок можно решать целый класс новых задач, невозможных для решения одним спутником. К примеру, одновременное измерение каких-либо показателей в различных пространственных точках, что важно при изучении магнитных или гравитационных полей, ионосферы, атмосферы и т.д. Интересны возможности группировок спутников для задач астрономических наблюдений, стереографической съемки поверхности Земли, дистанционного зондирования Земли в режиме реального времени. Вместе с новыми возможностями для исследователей возникают и новые задачи. Одной из ключевых задач при выполнении миссии группировкой является построение системы управления для сохранения или перестройки конфигурации спутников. В зависимости от миссии подбираются различные конфигурации, и в каждом случае алгоритм управления разрабатывается под поставленные задачи.

Поэтому разработка алгоритмов управления интерферометров образованных группировкой спутников при учете различных возмущающих факторов типа неоднородности поля притяжения Земли, возмущения притяжения третьих небесных тел или возмущения возникающие за счет излучения Солнца является актуальной научно-технической задачей, имеющей большое прикладное значение.

Разработанные алгоритмы управления, описанные в данной диссертационной работе, обеспечивают сохранение тетраэдральной конфигурации группировки спутников с высокой точностью.

**Цель работы.** Построение математической модели движения группировки спутников малого кластера на геостационарной орбите с учетом возмущений, а также разработка алгоритмов управления движением группировки для сохранения ее конфигурации.

**Задачи работы.**

- построение математической модели движения группировки с учетом возмущений возникающих из-за несферичности Земли, а также лунно-солнечных возмущений;
- разработка алгоритмов управления движением группировки на геостационарной орбите на основе линейных и нелинейных методов:
  - 1) на основе корневого метода (RLM) и линейно-квадратичного регулятора (LQR);
  - 2) на основе метода размещения полюсов в LMI областях, LQR и линейного  $H_2$  управления;
  - 3) основанных на робастных алгоритмах управления такие как  $H_2$  и  $H_\infty$ .

**Методы исследования.** Фундаментальные законы теоретической и небесной механики; апробированные аналитические и численные методы теории линейных дифференциальных и алгебраических матричных уравнений; применение известных апробированных методов теории управления, теории колебаний и устойчивости движения, теории высшей алгебры; численные методы высокой точности предназначенные для решения линейных и нелинейных дифференциальных уравнений.

**Научная новизна проблемы.** Для дистанционного зондирования Земли в режиме реального времени предлагается использовать группировку спутников определенной конфигурации на геостационарной орбите. Конфигурация представляет собой систему четырех спутников, где ведущий спутник и три ведомых спутников образуют тетраэдр. При этом главный спутник движется по орбите, называемой опорной орбитой. С течением времени опорная орбита под воздействием внешних возмущений эволюционирует, которые влияют на взаимное расположение спутников, что влечет за собой неустойчивость конфигурации и невозможность выполнения поставленной миссии.

В этой связи научная новизна проблемы заключается в необходимости разработки системы управления группировки тетраэдральной конфигурации в случаях невозмущенной и возмущенной опорных орбит ведущего спутника с учетом фигуры Земли, возмущений от гравитационных полей Луны и Солнца и неопределенностей.

**Научные положения, выносимые на защиту.**

- математическая модель движения группировки спутников на геостационарной орбите, учитывающий возмущения высоких орбит; алгоритмы управления конфигурацией группировки в случае невозмущенной опорной орбиты на основе корневого метода (RLM) и линейно-квадратичного регулятора (LQR).
- алгоритмы управления конфигурацией группировки спутников с учетом основных возмущающих сил, в случае невозмущенной опорной орбиты

на основе применения метода размещения полюсов в LMI областях, линейно-квадратичного регулятора (LQR) и линейного  $H_2$  управления.

– алгоритм управления обеспечивающая сохранение конфигурации группировки в случае возмущенной опорной орбиты и неопределенностей разного рода, основанных на робастных алгоритмах управления такие как  $H_2$  и  $H_\infty$ .

#### **Описание основных результатов исследования.**

– Разработана математическая модель движения группировки спутников в случае невозмущенной опорной орбиты. Проведено исследование неуправляемого движения спутников в группировке. В результате была показана необходимость применения определенных алгоритмов управления для сохранения конфигурации группировки. Построены алгоритмы управления конфигурацией группировки в случае невозмущенной опорной орбиты на основе корневого метода (RLM) и линейно-квадратичного регулятора (LQR);

– Разработана математическая модель движения группировки спутников в случае невозмущенной опорной орбиты с учетом основных возмущающих сил, обусловленных гравитационным влиянием Земли, Луны и Солнца. В ходе исследования неуправляемого движения определена необходимость введения управления на ранних этапах полета. Построены алгоритмы управления конфигурацией группировки спутников с учетом основных возмущающих сил на основе применения метода размещения полюсов в LMI областях, линейно-квадратичного регулятора (LQR) и линейного  $H_2$  управления;

– Разработана математическая модель движения группировки спутников относительно возмущенной опорной орбиты на основе модификации модели Лоудена-Седвика-Швайгарда. Построены уравнения возмущенного движения группировки спутников в случае возмущенной опорной орбиты при учете возмущений за счет неоднородности поля притяжения Земли, возмущений за счет сил притяжения Луны и Солнца, а также за счет давления Солнечных лучей. Проведено численное решение линеаризованных нелинейных уравнений движения группировки спутников относительно возмущенной орбиты. Также, разработан алгоритм управления обеспечивающий достаточный уровень устойчивости группировки в случае возмущенной опорной орбиты и неопределенностей разного рода, основанных на робастных алгоритмах управления такие как  $H_2$  и  $H_\infty$ .

**Научная новизна полученных результатов.** В данной работе было получено решение математической модели относительного движения группировки спутников апробированными аналитическими и численными методами теории дифференциальных уравнений, позволяющую исследовать динамику взаимосвязанных движений космических аппаратов при наличии возмущений характерные для высоких и геостационарных орбит. Математическая модель строилась относительно невозмущенных орбит, соответствующие моделям Хилла-Клохесси-Уилтшера и Лоудена. Учитывались возмущения типа неоднородного поля притяжения Земли, согласно модели

Сэдвика-Швайгарда, притяжения Луны и Солнца, и давления Солнечных лучей. Система управления и подбор управляющих коэффициентов были построены на основе таких методов как линейно-квадратичный регулятор, метод размещения корней, линейное  $H_2$  управление, робастные алгоритмы управления такие как  $H_2$  и  $H_\infty$ . В рамках работ были опубликованы 3 статьи в зарубежных научных журналах, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science и 5 статей в научных изданиях, рекомендованных Комитетом по обеспечению качества в сфере науки и высшего образования РК для опубликования основных результатов научной деятельности.

**Практическая значимость работы.** Практическая значимость характеризуется возможностью применения разработанных алгоритмов управления конфигурацией группировки спутников которые в последующем могут быть использованы для непрерывного дистанционного зондирования Земли с геостационарной орбиты.

Математические модели, алгоритмы и результаты, представленные в данной диссертационной работе, являются частью научных проектов по проектированию системы управления движением группировки спутников для дистанционного зондирования Земли и могут быть применены в космической индустрии.

**Связь работы с государственными научными программами.** Данная диссертационная работа выполнялась в рамках следующих проектов:

- AP05132939 «Проектирование системы управления движением группировки спутников для дистанционного зондирования Земли» грантовое финансирование научных исследований КН МОН РК, 2018 – 2020гг., № ГР 0118РК00524;
- AP09260469 «Разработка системы управления для сохранения конфигурации группировки космических аппаратов с учетом неопределенностей» грантовое финансирование научных исследований КН МОН РК, 2021 – 2023 гг., № ГР 0121РК00371.

**Индивидуальный вклад докторанта в подготовку статей.**

- N.Kaliyeva, Z.Rakisheva, N.Doszhan\*, A.Sukhenko, G.-G.A.Ibrayev, Sh.Nakasuka, and Y.Shabdan. Relative Dynamics and Control of Satellite Formation Flying Representing the Synthetic Aperture Telescope on Geostationary Orbit // Engineered Science. DOI: 10.30919/es1131 (Published Online). 2024, (Scopus, SJR 1.386, Q1, Перцентиль 98). Автор диссертации участвовал в постановке задачи, разработке алгоритма, проведении расчетов и оформлении статьи. Является автором для корреспонденции.
- Z.Rakisheva, A. Sukhenko, N. Doszhan, G.-G.A. Ibrayev, N. Kaliyeva, Sh. Nakasuka, and Y. Shabdan. Evaluation of Applicability of Some Algorithms for Controlling the Motion of Satellites in a Formation // Engineered Science. №27(1025), 2024, DOI:10.30919/es1025 (Scopus, SJR 1.386, Q1, Перцентиль 98). Автор диссертации участвовал в постановке задачи, разработке алгоритма, проведении расчетов и оформлении статьи.
- Z.B. Rakisheva, Sh. Nakasuka, N.S. Doszhan, G.E. Ibrayev. Stabilization of the movement of a small spacecraft in a geostationary orbit. News of the National

Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences. № 6 (438), 2019, p. 112-120, DOI: 10.32014/2019.2518-170X.162 (WoS: Q4, Scopus, SJR: 0.265, Процентиль 40-й, Q3). Автор диссертации участвовал в постановке задачи, разработке алгоритма, проведении расчетов и оформлении статьи. Является автором для корреспонденции.

– N.Doszhan, G.-G.A.Ibrayev, R.Pilpani. Ultra-High Accurate Attitude Determination and Control of Microsatellite Formation Flight // *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*, Vol. 6, No. 4, 2018. - P.47-51. DOI: 10.17694/bajese.475540. Автор диссертации участвовал в постановке задачи, разработке математического аппарата, проведении расчетов и оформлении статьи. Является первым автором;

– З.Б.Ракишева, Н.С.Досжан, А.Мухамедгали, Ж.Т.Лязат. Расчет параметров электромагнитного исполнительного органа и разработка программы управления. *Вестник Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева (Научный журнал)*. №1(75), 2017. 79-83 с. Автор диссертации участвовал в постановке задачи, разработке модели, проведении расчетов и оформлении статьи;

– Ракишева З.Б., Мухамедгали А., Досжан Н.С., Лязат Ж.Т. Разработка имитатора магнитного поля Земли. *Вестник ПГУ*. №1,2017. 262-266 с. Автор диссертации участвовал в постановке задачи, разработке модели, проведении расчетов и оформлении статьи;

– О.К. Туенбаев, Ж.Лязат, Н.Досжан, А. Мухамедгали, Н.Узбеков, Б.Ханиев. Детальное проектирование наземного комплекса управления наноспутника. *Вестник Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева (Научный журнал)*. №4(78), 2017. 98-106 с. Автор диссертации участвовал в постановке задачи, проведении расчетов и оформлении статьи;

– Zhilisbayeva K., Doszhan N., Saspayeva A. Changing the magnetic field intensity during the motion of spacecraft. *International Journal of Mathematics and Physics*. Vol(7) №1, 2016. 56-64 pp. Автор диссертации участвовал в постановке задачи, разработке математической модели, проведении расчетов и оформлении статьи;

– Досжан Н.С., А. Мухамедгали, Е. Шабдан. Обзор испытаний в термовакуумной камере малого космического аппарата. *Вестник КазНТУ*. №5(111),2015. 523-529 с. Автор диссертации участвовал в постановке задачи, разработке математического аппарата, проведении расчетов и оформлении статьи. Является первым автором

Кроме этого автором диссертации были опубликованы 3 тезиса международных научных конференциях и симпозиумах. А также была опубликована 1 монография в рамках диссертационной работы.