

На правах рукописи



УШАКОВ Виталий Анатольевич

**КОМБИНИРОВАННЫЕ МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ПЛАНИРОВАНИЯ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ
ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ**

Специальность – 2.3.1 «Системный анализ, управление и обработка информации,
статистика»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН) в лаборатории информационных технологий в системном анализе и моделировании.

Научный руководитель:

СОКОЛОВ Борис Владимирович,

доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, главный научный сотрудник, руководитель лаборатории информационных технологий в системном анализе и моделировании СПИИРАН – СПб ФИЦ РАН.

Официальные оппоненты:

ИВАЩЕНКО Антон Владимирович,

доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Научно-технического центра ПР 048 Федерального государственного бюджетного учреждения «Ордена Трудового Красного Знамени Российский научно-исследовательский институт радио имени М.И. Кривошеева». Самарский филиал – «СОНИИР».

ФРОЛОВ Константин Владимирович,

кандидат технических наук, доцент Высшей школы бизнес-инжиниринга Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова».

Защита диссертации состоится «23» марта 2023 г. в 16 часа 00 минут на заседании диссертационного совета 24.1.206.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН) по адресу: 199178, Санкт-Петербург, 14-я линия В.О., 39, каб. 401, e-mail: dc@spcras.ru. Факс: (812) 328-44-50, тел: (812) 328-33-11.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в отделе аспирантуры (каб. 402а) Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН) по адресу: 199178, Санкт-Петербург, 14-я линия В.О., 39 и на сайте <http://www.spiiras.nw.ru/dissovet/>

Автореферат разослан «27» января 2023 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.1.206.01

кандидат технических наук



АБРАМОВ

Максим Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. В настоящее время широкое применение на практике получили различные виды и классы подвижных объектов, в качестве которых могут рассматриваться космические аппараты, летательные аппараты, в том числе и беспилотные, наземные робототехнические комплексы, морские (как надводные, так и подводные) робототехнические комплексы. Для выполнения поставленных целевых задач они могут объединяться в группировки, так как информационно-технологические возможности каждого отдельного подвижного объекта весьма ограничены.

В качестве примеров таких группировок в диссертации рассматриваются несколько вариантов объединения подвижных объектов, а именно группировка маломассогабаритных космических аппаратов (МКА) и группировка интеллектуальных транспортно-технических средств (ИТТС). При этом подвижные объекты, входящие в данные группировки, имеют в своем составе аппаратно-программные комплексы, обеспечивающие информационное взаимодействие подвижных объектов друг с другом, в ходе которого указанные объекты получают данные (информацию) о состоянии контролируемых объектов, принимают (ретранслируют), хранят, обрабатывают их на своих вычислительных средствах, входящих в состав аппаратно-программного комплекса, а также передают их конечным потребителям. Анализ показывает, что структура и параметры такой группировки изменяются как из-за движения подвижных объектов, так и из-за необходимости выполнения определенных пространственно-временных, технических и технологических ограничений, а также воздействия ряда внутренних и внешних возмущающих факторов.

Наблюдаемая **структурная динамика группировки подвижных объектов** придает особую актуальность постановки и решения не только задач планирования и управления перемещением подвижных объектов, но и задач управления информационными процессами, включающими в себя процессы сбора, хранения, обработки и передачи информации как о состоянии самой группировки, образованной данными объектами, так и состояния наземных объектов, наблюдение за которыми осуществляет данная группировка. При этом, возрастает важность решения двух взаимосвязанных подклассов задач управления информационными процессами. Это, во-первых, задача синтеза наилучшей технологии организации информационных процессов для рассматриваемой группировки при условии, что известна ее структурная динамика (решены задачи согласованного (кооперативного) движения подвижных объектов). Во-вторых, задача программного управления (планирования) информационными процессами для синтезированной технологии управления указанными процессами.

Степень разработанности темы. На сегодняшний день разработано множество специальных методов, алгоритмов и прикладных методик для решения задач, которые возникали на практике при управлении подвижными объектами. Существенные научные и практические результаты в рамках перечисленных направлений исследований были получены на базе развития теории расписаний и математического программирования, оптимального управления такими отечественными учеными как Ю.П. Зимин, И.Н. Иванилов, А.Я. Лернер, Н.Н. Моисеев, В.С. Танаев, В.С. Шкурба. Зарубежные ученые: Р.Л. Акофф, М. Атанс, Т. Басар, Р. Беллман, А. Брайсон, Дж.Л. Кохон, Д.Д. Силяк, М. Сингх, Г. Олсдер, А. Титли, П. Фалб, также внесли свой вклад в рассматриваемое направление. Несмотря на масштабность выполненных исследований и количество публикаций, в представленных выше работах, к сожалению, недостаточное внимание было уделено вопросам создания методов и алгоритмов, позволяющих корректно формально описывать и исследовать на различных уровнях детализации (например, концептуальном, алгоритмическом, программном уровнях) информационное взаимное влияние элементов и подсистем друг на друга в рамках рассматриваемых объектов управления. При этом предлагаемые в перечисленных работах подходы были направлены на поиск частных решений задач планирования отдельных операций, входящих в состав информационных процессов, происходящих на подвижных объектах (например, операций сбора и передачи данных, операций

обработки данных и т.п.). Таким образом, анализ выполненных научных работ показал частный характер полученных результатов и отсутствие разработок в области создания комбинированных моделей, методов и алгоритмов планирования информационных процессов при взаимодействии подвижных объектов.

Следует подчеркнуть, что в предыдущих научных исследованиях была обоснована необходимость дальнейшего развития основ многокритериального оперативного синтеза не только технологий, но и программного управления. Таким образом, в настоящее время **особую актуальность** сегодня приобретает **научно-техническая задача** разработки комбинированных моделей и алгоритмов планирования информационных процессов при взаимодействии подвижных объектов, которую из-за большой размерности и структурной сложности целесообразно декомпозировать на задачи синтеза технологий (планов) сбора, хранения и обработки данных и программного управления информационными процессами. Данная задача в настоящее время приобретает особую **научную важность и практическую значимость**, так как при ее математическом описании и последующем решении в рамках традиционных подходов, базирующихся на методах, моделях, алгоритмах, используемых в исследовании операций, возникают серьезные трудности формального и вычислительного характера. В диссертационной работе для проведения обоснованной декомпозиции решаемых группировкой подвижных объектов задач по управлению информационными процессами предложено разработать и комбинированно использовать статическую и динамическую модели, описывающие рассматриваемую предметную область, а также соответствующие алгоритмы, позволяющие синтезировать планы функционирования указанных объектов.

Цель диссертационной работы состоит в повышении качества управления информационными процессами при взаимодействии группировки подвижных объектов, на основе разработки и реализации комбинированных моделей и алгоритмов планирования операций приема, передачи, хранения и обработки поступающих данных о состоянии контролируемых объектов.

В диссертации основными показателями качества управления информационными процессами являются показатель общего объема обработанных (потерянных) данных и информации, показатель, характеризующий суммарный штраф за нарушение директивных сроков выполнения заданных операций, входящих в информационный процесс, показатель, характеризующий робастность (нечувствительность) синтезированных планов выполнения информационных процессов при взаимодействии подвижных объектов для интервально заданных возмущающих воздействий.

Для достижения сформулированной цели диссертационной работы необходимо решить следующие **задачи**:

- провести системный анализ современного состояния исследований в области информационного взаимодействия группировки подвижных объектов, разработать методологические и методические основы решения задачи планирования информационных процессов при взаимодействии подвижных объектов, и провести содержательную и формальную постановки задачи планирования информационных процессов при взаимодействии подвижных объектов;
- провести полимодельное описание задачи планирования информационных процессов при взаимодействии подвижных объектов и разработать обобщенные алгоритмы ее решения;
- разработать и исследовать специальное модельно-алгоритмическое обеспечение и соответствующий прототип программы решения задачи планирования информационных процессов при взаимодействии группировки подвижных объектов для различных предметных областей.

Объектом исследования являются информационные процессы, происходящие при взаимодействии группировки подвижных объектов.

Предметом исследований являются комбинированные модели и алгоритмы, оптимального оперативного планирования информационных процессов при взаимодействии группировки подвижных объектов.

Научная новизна результатов, полученных при решении поставленных задач, состоит в следующем:

1. На основе анализа структурных особенностей задачи планирования информационных процессов при взаимодействии подвижных объектов, которая в диссертации сформулирована как большеразмерная нестационарная многокритериальная задача теории расписаний и описана в терминах теории оптимального программного управления, предложена ее последовательная декомпозиция на задачу агрегированного планирования операций, входящих в информационный процесс без привязки их ко времени, и задачу детального планирования указанных операций с привязкой ко времени. Достоинство данной декомпозиции состоит в том, что при ее реализации с использованием соответствующих моделей и алгоритмов удастся на конструктивном уровне учесть все основные пространственно-временные, технические и технологические ограничения, связанные с функционированием группировки подвижных объектов, при формальном описании которых в рамках исходной постановки задачи возникают трудности.

2. Разработан новый вариант интеграции статических и динамических моделей планирования информационных процессов на основе использования математического аппарата исследования операций и теории оптимального управления. Оригинальность и новизна разработанных моделей состоит в том, что удастся взаимно компенсировать недостатки и ограничения каждой из перечисленных моделей, усилив при этом их достоинства. В предложенной статической модели планирования информационных процессов учитываются такие факторы, как потери данных, а также ограничения, связанные с разрывностью выполняемых операций. В динамической модели проводится детальное описание процессов распределения и обработки данных с привязкой к конкретным моментам времени, что затруднительно описать в статической модели.

3. Предложены комбинированные алгоритмы планирования информационных процессов при взаимодействии подвижных объектов, включающие в себя алгоритм решения большеразмерной задачи линейного программирования с ограничениями, имеющими блочно-диагональную структуру, а также алгоритм решения задачи оптимального программного управления (планирования), основанный на методе последовательных приближений Крылова-Черноуьско, и отличающийся от существующих алгоритмов динамической декомпозицией исходной большеразмерной задачи планирования на задачи программного управления информационными процессами гораздо меньшей размерности, число которых изменяется на каждом из подынтервалов постоянства структуры. При этом взаимодействие между этими декомпозированными задачами (моделями) проводится на основе обобщенной интерактивной многоэтапной итерационной процедуры с параметрами координации в виде краевых условий и сопряженных переменных.

4. Разработан программный прототип решения задач оперативного планирования информационных процессов при взаимодействии подвижных объектов, позволяющий осуществить одновременно синтез как наилучшего плана (технологии) приема, передачи, хранения и обработки данных и информации при взаимодействии подвижных объектов, так и программ оптимального управления информационными процессами в рамках рассматриваемого взаимодействия.

В целом **научная новизна** результатов, полученных в диссертации, состоит в разработке полимодельного описания и комбинированных алгоритмов решения задачи планирования информационных процессов при взаимодействии группировки подвижных объектов, при использовании которых происходит, во-первых, эффективная взаимная компенсация недостатков и ограничений свойственных каждой из предложенных статической и динамической моделей и соответствующих алгоритмов поиска программ управления информационными процессами, по

сравнению с вариантами, если их использовать независимо, и, во-вторых, максимальное использование возможностей данных моделей и алгоритмов при синтезе соответствующих планов. Также осуществлена практическая реализация концепции комплексного (системного) моделирования при решении задач оперативного оптимального планирования информационных процессов при взаимодействии группировок подвижных объектов в различных предметных областях, которая подтвердила положительный интегративный эффект от комбинированного использования разнотипных моделей.

Теоретическая значимость работы заключается в новой системно-кибернетической интерпретации решаемой в диссертации задачи планирования информационных процессов при взаимодействии группировки подвижных объектов, базирующейся на фундаментальных и прикладных результатах, полученных в теории оптимального управления и исследовании операций, и с использованием которой удалось разработать комбинированный математический аппарат для решения сложной большеразмерной, нестационарной, многокритериальной задачи теории расписаний в условиях интервально заданных возмущающих воздействий.

Практическая значимость работы заключается в повышении качества управления операциями приема, ретрансляции, хранения и обработки данных и информации при взаимодействии группировки подвижных объектов на основе автоматизации и оптимизации решения задачи оперативного планирования рассматриваемых информационных процессов. При этом в качестве основных показателей эффективности управления информационными процессами в диссертации выбраны показатели общего объема обработанных и потерянных данных и информации. Практическая реализация концепции комплексного (системного) моделирования осуществлена при решении задач оперативного оптимального планирования информационных процессов при взаимодействии группировок подвижных объектов в различных предметных областях, которая подтвердила положительный интегративный эффект от комбинированного использования разнотипных моделей.

Методология и методы диссертационного исследования базируются на фундаментальных и прикладных научных результатах, полученных к настоящему моменту времени в системном анализе, в теории расписаний, в современной теории оптимального управления сложными динамическими объектами (в том числе, с использованием принципа максимума Л.С. Понтрягина), в исследовании операций (в том числе, методах непрерывного и целочисленного математического программирования), а также в прикладной теории оценивания качества моделей и полимодельных комплексов (разработанной в рамках квалиметрии моделей и полимодельных комплексов).

Положения, выносимые на защиту:

- 1 Последовательная декомпозиция большеразмерной нестационарной многокритериальной задачи оперативного планирования информационных процессов при взаимодействии группировки подвижных объектов, обеспечивающая ее разбиение на задачу агрегированного планирования операций, входящих в информационный процесс без привязки их ко времени и задачу детального планирования указанных операций с привязкой ко времени.
- 2 Полимодельное описание задачи планирования информационных процессов при взаимодействии подвижных объектов, включающее статическую и динамическую модели планирования и позволяющее взаимно компенсировать недостатки и ограничения каждой из перечисленных моделей и усилить их достоинства.
- 3 Алгоритмы решения задачи планирования информационных процессов при взаимодействии подвижных объектов на основе комбинированного использования методов исследования операций и оптимального программного управления при синтезе планов, а также программ управления информационными процессами при взаимодействии подвижных объектов.

Соответствие диссертации научной специальности. Представленные результаты соответствуют специальности 2.3.1 – «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика».

Успешная апробация результатов предложенной диссертации на научных конференциях различного уровня, в том числе международных и российских, публикации в рецензируемых изданиях, согласованность результатов, качественный анализ тематики и корректное использование приведенных моделей и математических методов обусловили высокую **степень достоверности** полученных в исследовании результатов.

Реализация результатов работы. Результаты работы были использованы в СПб ФИЦ РАН в рамках следующих проектов и НИР: государственных заданиях СПИИРАН 0073-2018-0003 и 0073-2019-0004 на проведение НИР по теме: «Методология и технологии интеграции существующих и перспективных государственных и коммерческих информационно-управляющих и телекоммуникационных систем и сетей на различных этапах их жизненного цикла» (2018-2021 годы); грант РФФИ «Аспиранты» в рамках научного проекта № **19-38-90221** «Разработка и исследование методов и алгоритмов оперативного многокритериального оценивания и анализа показателей качества автоматизированной системы управления подвижными объектами на основе построения областей достижимости в пространстве системотехнических параметров» (2019-2022 годы); грант РФФИ в рамках научного проекта № 18-08-01505 «Разработка и исследование методов и алгоритмов проактивного управления восстановлением работоспособности бортовых систем сложных динамических объектов при возникновении нештатных ситуаций» (2020 г.); грант РФФИ в рамках научного проекта № 20-08-01046 «Комбинированные методы и алгоритмы комплексного моделирования, многокритериального оценивания и оптимизации показателей живучести и эффективности функционирования сложных объектов, обладающих структурно-функциональной избыточностью» (2021 г.).

Полученные результаты были использованы при проведении исследовательских работ СПб ФИЦ РАН, в учебном процессе в ГУАП, а также в АО «НИО ЦИТ «ПЕТРОКОМЕТА» в ОКР «Русь» при создании единого виртуального электронного паспорта космической ракеты-носителя.

Апробация результатов. Основные результаты данной диссертационной работы были представлены и получили положительную оценку (апробированы) на нескольких международных и всероссийских конференциях, среди которых: 8th и 9th Computer Science Online Conference (CSOC) (Онлайн, Злин, Чехия, 2019, 2020 гг.); XIII Всероссийское совещание по проблемам управления (ВСПУ-2019) (ИПУ РАН, Москва, 2019 г.); The European Modeling and Simulation Symposium 2020 (EMSS-2020) (Онлайн, Греция 2020 г.); научный семинар «Модели и методы исследования информационных систем на транспорте» (Онлайн, ПГУПС, г. Санкт-Петербург, 2020 г.); XLV Академические чтения по космонавтике «КОРОЛЁВСКИЕ ЧТЕНИЯ» (Онлайн, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 2021 г.); XII молодежная школа-семинар «Управление и обработка информации в технических системах» (Онлайн, Южный федеральный университет, п. Нижний Архыз – п. Домбай, Карачаево-Черкесская Республика, 2021 г.); XXV международная научная и учебно-практическая конференция «Системный анализ в проектировании и управлении» (SAEC-2021) (СПбПУ, Санкт-Петербург, 2021 г.); международный форум «Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве» (ГУАП, Санкт-Петербург, 2021 г.); IV международный семинар по информационным, вычислительным и управляющим системам для распределенных сред (ИДСТУ СО РАН, Иркутск, 2022 г.).

Личный вклад соискателя в опубликованных работах отражают содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту. Публикация полученных результатов проводилась совместно с научным руководителем Б.В. Соколовым и членами лаборатории информационных технологий в системном анализе и моделировании

СПб ФИЦ РАН, причем вклад соискателя был существенным. Представленные к защите результаты получены лично автором. В [5] соискателем было предложено использовать статическую модель планирования информационных процессов совместно с агентной моделью для решения задач синтеза оптимального информационно-вычислительного процесса в гетерогенной информационно-вычислительной сети. В [2**Ошибка! Источник ссылки не найден.**] соискателем были предложены методологические основы создания и использования интегрированных систем поддержки принятия решений. В [1] соискатель принимал участие в составлении формальной постановки задачи и разработке неформальной декомпозиции задачи планирования модернизации автоматизированных систем управления производственными объектами.

Публикации. Результаты диссертационной работы опубликованы в **17** печатных работах и в форме электронного издания, среди них **пять** работ в рецензируемых журналах из «Перечень ВАК» и **пять** работ индексируются в SCOPUS/WoS. В состав публикаций в рецензируемых журналах из «Перечень ВАК» вошли: публикация в журнале «Морские интеллектуальные технологии» (2022 г.), публикация в журнале «Авиакосмическое приборостроение» (2022 г.) и три публикации в разных номерах журнала «Известия высших учебных заведений. Приборостроение» (2019, 2020, 2021 гг.).

Структура и объем работы. Основной текст диссертации изложен на 181 листах, включая 5 таблиц, 42 рисунка, и содержит введение, четыре главы, заключение, список сокращений, список иллюстративного материала, список таблиц, 4 приложения и список литературы (184 наименований).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дана общая характеристика работы, обоснована ее актуальность, проанализирована степень разработанности темы, сформулированы цели, задачи, методы и методология исследования, научная новизна результатов, представлены положения, выносимые на защиту, сведения о реализации и апробации работы, сформулированы теоретическая и практическая значимость результатов, полученных в диссертации, приведены основные результаты работы.

В **первой главе** проведен системный анализ задачи планирования информационных процессов (ИнП) при взаимодействии подвижных объектов (ПдО). Описана концептуальная модель информационного взаимодействия (ИнВ) ПдО. Представлены содержательная и формальная постановки задачи планирования ИнП при взаимодействии ПдО и ее декомпозиция. Разработаны методические и методологические основы решения задачи планирования ИнП. Проведен анализ возможных путей решения сформулированной задачи, обоснованы и выбраны направления ее исследования и решения.

В настоящее время при проектировании, внедрении, эксплуатации и развитии автоматизированных систем управления (АСУ) различными классами ПдО одной из актуальных проблем была и остается проблема автоматизации принятия решений, в том числе, и проблема автоматизации процессов планирования.

В диссертации основное внимание уделено процессам ИнВ ПдО. Проведенный анализ показал, что при применении существующих подходов к решению частных задач планирования работ в АСУ ПдО зачастую не выполняются основные требования системного подхода, что конкретно проявлялось в значительной несогласованности процессов функционирования элементов и подсистем, входящих в состав АСУ ПдО, возникновении «пиковых» информационных нагрузок в комплексах средств автоматизации, отсутствии ориентации задач планирования на повышение эффективности применения бортовых и наземных комплексов управления ПдО.

Кроме того, при указанном подходе к решению задач планирования не учитывались современные тенденции и перспективы развития АСУ группировки (Гр) ПдО, связанные с их интеграцией и возможными вариантами **управления структурной динамикой** данных систем.

Следует подчеркнуть, что задачи управления структурной динамикой относятся к классу задач структурно-функционального синтеза технологий и программ управления сложными объектами.

В рамках диссертации рассмотрены две предметные области (ПрО), где наблюдается существенная структурная динамика Гр ПдО. Первая ПрО связана с управлением ИнП при взаимодействии маломассоразмерных космических аппаратов (МКА). Одна из основных причин структурной динамики Гр МКА вызвана их орбитальным движением, в ходе которого изменяются условия и ограничения, определяющие возможность ИнВ МКА друг с другом и наземными объектами. Второй прикладной задачей, решенной в диссертации, является задача планирования ИнП при функционировании Гр наземных интеллектуальных транспортно-технологических средств (ИТТС) в цифровом пространстве аэропорта. В данной прикладной области структурная динамика информационных взаимодействий ИТТС вызвана запретами на их радиоизлучения, которые ограничиваются при взлете и посадке самолетов в аэропорту, а также ограничениями, накладываемыми технологией функционирования технических служб современного аэропорта.

Анализ логико-динамических моделей, используемых для формального описания такого рода задач, показывает, что использование методов теории оптимального управления (ТОУ) встречает ряд трудностей, прежде всего, алгоритмического характера, связанных с особенностями учета разрывности правых частей уравнений, разрывности процессов выполнения операций, входящих в состав ИнП, а также с особенностями учета логических ограничений, которые сводятся в конечном итоге к появлению соответствующих фазовых и смешанных ограничений. Возможным путем построения эффективных алгоритмов поиска программ управления ИнП, в этом случае является **декомпозиция исходной задачи планирования ИнП** при взаимодействии ПдО, которая в диссертации сформулирована как **большеразмерная нестационарная многокритериальная задача теории расписаний** и описана в терминах теории оптимального программного управления. В диссертации предложено исходную задачу планирования декомпозировать на статическую и динамическую задачи планирования ИнП. В результате решения статической задачи планирования (см. рисунок 1 Задача I) формируется (синтезируется) агрегированный план выполнения операций, входящих в ИнП без привязки их ко времени, а в динамической задаче (см. рисунок 1 Задача II) - детальный план выполнения указанных операций с привязкой ко времени. Как и при всякой декомпозиции для корректного восстановления разорванных связей требуется решение задачи координации, в результате чего синтезируются параметры координации, обеспечивающие итерационную согласованность решений, полученных в рамках каждой из перечисленных задач.

Также в основу такой декомпозиции следует положить учет специфики функционирования Гр ПдО (а точнее, ее структурную динамику), заключающуюся в том, что несмотря на перемещение ПдО топологическая структура их информационных взаимодействий сохраняется постоянной в течение определенных интервалов времени (временных интервалов постоянства рассматриваемой структуры). В течение таких интервалов телекоммуникационная связь между ПдО не прерывается.

В диссертации показано, что для решения данных задач должны быть разработаны соответствующие модели, методы и алгоритмы, базирующиеся на методологиях и технологиях, разрабатываемых в ТОУ и математическом программировании.

Во **второй главе** приведена уточненная постановка поставленной задачи, представлено полимодельное описание задачи планирования ИнП при взаимодействии Гр ПдО. В состав **полимодельного описания** входят **статическая модель (СМ) планирования информационного взаимодействия ПдО** и **динамическая модель (ДМ) планирования ИнП при взаимодействии ПдО**. Кроме того, в данной главе описаны и проанализированы особенности межмодельного согласования при планировании ИнП.

Использование традиционных моделей и методов для оценки, анализа и оптимизации показателей качества управления указанными ИнП, сталкивается с серьезными трудностями, обусловленными большой размерностью пространства многоструктурных структурных состояний Гр ПдО, многоцелевым, многокритериальным, нестационарным, нелинейным характером ее функционирования, сложностью учета факторов неопределенности воздействия внешней среды. В связи со сказанным особую актуальность приобретает задача разработки нового специального модельно-алгоритмического обеспечения (СМАО) решения задач планирования (программного управления) ИнП при взаимодействии Гр ПдО, которое также может использоваться для оценки, анализа и оптимизации показателей качества управления указанными ИнП.

Показано, что в СМ для каждого временного интервала постоянства структуры информационных взаимодействий следует зафиксировать характеристики соответствующей топологической структуры, а также другие параметры данной динамической сети. При этом можно показать, что ограничения на порядок выполнения операций, входящих в ИнП, их разрывность и нелинейность косвенно (неявно) учитываются в данной статической модели. Учет их в ДМ приводит к существенным алгоритмическим и вычислительным трудностям. В противоположность этому в ДМ планирования можно конструктивно описать ограничения, связанные с нестационарным характером использования складываемых и нескладываемых ресурсов, ограничения и показатели качества, связанные с временными факторами. Возможное разделение и учет ограничений в предлагаемых СМ и ДМ представлено на рисунке 1.

Компенсацию разорванных связей в ходе последовательной декомпозиции предлагается восстанавливать в ходе решения многоэтапной координационно-итерационной процедуры синтеза программ управления ИнП, поочередно используя для этого СМ и ДМ для формирования агрегированных и детальных планов выполнения ИнП Гр ПдО и оценки их робастности. Интеллектуализация управления ИнП реализуется при формировании первых приближений (диспетчерского управления) в методе последовательных приближений Крылова-Черноусько

Для описания СМ были введены следующие множества и ограничения. Пусть A – ПдО, где $A_i, A_j \in \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$, причем i, j – индексы ПдО, а n их количество; ρ – тип данных (поток), для которого параметр P – количество типов данных (потоков). Пусть структура и характеристики ПдО изменяются в дискретные моменты времени $(0, t_1, t_2, \dots, T)$, разбивающие весь интервал времени $t \in (0, T]$ (интервал планирования) на подынтервалы (участки), соответствующие постоянству структуры Гр ПдО. Сопоставим произвольному подынтервалу $\left[t_{ol}, t_{fl} \right] = T_l^{(o, l)}$ номер l (его индекс), при этом $l = 1, \dots, L$, где L – количество участков, причем t_{ol} – начальный момент времени подынтервала постоянства структуры, t_{fl} – конечный момент времени участка постоянства структуры. Необходимо подчеркнуть, что в реальных условиях при взаимодействии ПдО происходит обмен разнородными данными, имеющими различную степень важности и срочности, поэтому в модели введена переменная P - граничное значение переменной ρ , которая задает количество типов данных (потоков). Для большей наглядности в диссертации



Рисунок 1 – Предлагаемая декомпозиция задачи планирования информационных процессов при взаимодействии Гр ПдО

ограничимся 2 типами данных: обработанные данные – информация будет обозначаться как $\rho = 2$, необработанные данные будут обозначаться как $\rho = 1$.

С учетом вышеизложенного предлагаемая СМ планирования ИнП при взаимодействии ПдО примет следующий вид:

$$\alpha_1 I_1 - \alpha_2 I_2 = I_0 \rightarrow \max, \quad \vec{x} \in \Delta, \quad (1)$$

$$\text{где } I_1 = \sum_{\rho=1}^P \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^L g_{j\rho l}, \quad I_2 = \sum_{\rho=1}^P \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^L z_{j\rho l},$$

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 1, \quad \alpha_1, \alpha_2 \geq 0,$$

$$\Delta = \left\{ \begin{array}{l} \vec{x} \mid \sum_{\rho \in P} x_{j\rho l}^{(ex)} = \left(\sum_{i \in M_{jl}^{(+)}} x_{ij\rho l} - \sum_{i \in M_{jl}^{(-)}} x_{ij\rho l} \right) + (y_{j\rho l} - y_{j\rho(l-1)}) + g_{j\rho l} + z_{j\rho l}; \\ 0 \leq \sum_{\rho \in P} x_{ij\rho l} \leq \psi_{ijl}; \quad 0 \leq \sum_{\rho \in P} (y_{j\rho l} + g_{j\rho l}) \leq V_j; \\ 0 \leq \sum_{\rho \in P} g_{j\rho l} \leq \varphi_{jl}; \quad 0 \leq z_{j\rho l}; \quad g_{j(\rho+1)l} = s_{\rho} g_{j\rho l}; \\ i, j = 1, 2, \dots, n; \quad \rho = 1, 2, \dots, P; \quad l = 1, 2, \dots, L \end{array} \right\}, \quad (2)$$

где \vec{x} – это вектор оптимизированных параметров, определяющий план выполнения операций, входящих в ИнП и включающий в качестве компонентов переменные (параметры), характеризующий объемы переданных, принятых, сохраненных, обработанных, потерянных данных (информации).

Поясним значения характеристик ПдО: V_j – максимально возможный объем запоминающего устройства (ЗУ) в A_j ПдО; φ_{jl} – максимальная интенсивность обработки данных в A_j ПдО; ψ_{ijl} – максимальная интенсивность передачи данных между A_i и A_j ПдО.

Для проведения дальнейшей формализации добавим следующие переменные: $x_{jl}^{(ex)}$ – количество данных, поступивших из внешней среды в A_j ПдО на l -м подынтервале времени; $x_{ij\rho l}$ – количество данных, переданных из A_i ПдО в A_j ρ -го типа на l -м участке времени; $y_{j\rho l}$, $g_{j\rho l}$, $z_{j\rho l}$ – «переменные, характеризующие каждая соответственно: объем данных ρ -го типа на l -м подынтервале, который может быть записан (согласно плану работы Гр ПдО) в ЗУ A_j ПдО, либо обработан (согласно характеристикам аппаратуры) в A_j ПдО, либо потерян в A_j ПдО (из-за ограниченной пропускной способности каналов связи). Кроме того, пусть M_{jl}^- – множество номеров ПдО, из которых в A_j ПдО на l -м участке времени передаются данные, а M_{jl}^+ – множество номеров ПдО, в которые передаются данные из A_j ПдО на l -м подынтервале времени; s_{ρ} – коэффициент, характеризующий степень обработки данных, в ходе которой они становятся информацией. Также отметим, что I_1 – показатель полноты обработки данных в Гр ПдО, I_2 – показатель потери данных в Гр ПдО, I_0 – обобщенный показатель качества планирования ИнП, а α_1 , α_2 – коэффициенты важности показателей (задаются ЛПР).

При формировании плана работы Гр ПдО поиск наилучшей альтернативы осуществляется исходя из оптимизации I_0 , представленного выражением вида (1). Из анализа СМ следует, что предложенная формализация задачи планирования ИнП при взаимодействии ПдО позволила ее свести к многокритериальной задаче линейного программирования (ЛП) большой размерности, с блочной структурой матрицы ограничений и двухсторонними ограничениями на оптимизируемые переменные. Дальнейшая детализация полученного плана работы Гр ПдО осуществляется с использованием детерминированной ДМ планирования (программного управления) ИнП при взаимодействии ПдО. Для этого объем данных, запланированных в СМ для передачи между ПдО на каждом участке времени $x_{ij\rho l}$, а также объем данных, который запланирован в СМ для обработки в каждом ПдО на каждом подынтервале времени $g_{j\rho l}$ передаются в виде краевых условий в разработанную ДМ. Приведем обобщенное описание данной модели, подробная запись которой осуществлена в диссертации, представленной на сайте диссертационного совета. Поясним значения параметров основной системы дифференциальных уравнений, с помощью которой осуществлена системно-кибернетическая интерпретация процессов планирования ИнП при их взаимодействии: $x_l^{(o,1)}$ – длительность нахождения Гр ПдО на l -м участке постоянства структуры; $x_{ij\rho l}^{(n,1)}$ – количество данных типа ρ , переданных из A_i ПдО в A_j на l -м подынтервале; $x_{j\rho l}^{(n,2)}$ – количество данных типа ρ , обработанных в A_j ПдО на l -м участке; $x_{ij\rho l}^{(n,3)}$ – вспомогательная переменная, которая равна длительности интервала времени приема/передачи данных типа ρ от A_i ПдО к A_j на l -м подынтервале; $x_{j\rho l}^{(n,4)}$ – вспомогательная переменная, которая равна продолжительности обработки данных типа ρ в A_j ПдО на l -м участке; $u_l^{(o,1)}(t)$ – булева переменная, значение которой соответствует смене или сохранению текущего подынтервала постоянства структуры; $u_{ij\rho l}^{(n,1)}(t)$ – интенсивность (скорость) приема/передачи данных типа ρ от A_i ПдО к A_j на l -м участке; $u_{j\rho l}^{(n,2)}(t)$ – интенсивность (скорость) обработки данных типа ρ в A_j ПдО на l -м подынтервале; $\omega_{ij\rho l}^{(n,1)}(t)$ – управляющее воздействие, принимающее значение 1, если планируется операция приема/передачи данных, 0 – в противоположном случае; $\omega_{j\rho l}^{(n,2)}(t)$ – управляющее воздействие принимающее значение 1, если планируется операция обработки данных, 0 – в противоположном случае; $c_{ij\rho l}^{(n,1)}$ и $c_{j\rho l}^{(n,2)}$ – заданные константы, выбранные таким образом, чтобы они соответствовали параметрам ψ_{ijl} и φ_{jl} из СМ, $d_{ijl}^{(1)}$ и $d_{jl}^{(2)}$ – пропускные способности каналов приема/передачи и обработки данных ПдО соответственно, функции $\xi_{ij}^{(b,1)}$, $\xi_j^{(b,2)}$ задают возможные варианты возмущающих воздействий (целенаправленных, индифферентных,

неизвестных, либо их комбинаций) на соответствующие компоненты Гр ПдО со стороны внешней среды.

$$M^{(1)} = \left\{ \begin{array}{l} u_{ij\rho l}^{(n,1)}(t) | \dot{x}_{ij\rho l}^{(n,1)}(t) = u_{ij\rho l}^{(n,1)}(t), \quad \dot{x}_{ij\rho l}^{(n,3)}(t) = \omega_{ij\rho l}^{(n,1)}(t); \\ 0 \leq u_{ij\rho l}^{(n,1)}(t) \leq c_{ij\rho l}^{(n,1)} \omega_{ij\rho l}^{(n,1)}(t); \quad \omega_{ij\rho l}^{(n,1)}(t) \in \{0,1\}; \\ \sum_{i=1}^n \omega_{ij\rho l}^{(n,1)}(t) + \omega_{j\rho l}^{(n,2)}(t) \leq 1; \quad \sum_{\rho=1}^P u_{ij\rho l}^{(n,1)}(t) \leq d_{ijl}^{(1)}; \\ j \neq i \\ i, j = 1, 2, \dots, n; \rho = 1, 2, \dots, P; l = 1, 2, \dots, L \end{array} \right. \quad (3)$$

$$M^{(2)} = \left\{ \begin{array}{l} u_{j\rho l}^{(n,2)}(t) | \dot{x}_{j\rho l}^{(n,2)}(t) = u_{j\rho l}^{(n,2)}(t), \quad \dot{x}_{j\rho l}^{(n,4)}(t) = \omega_{j\rho l}^{(n,2)}(t); \\ 0 \leq u_{j\rho l}^{(n,2)}(t) \leq c_{j\rho l}^{(n,2)} \omega_{j\rho l}^{(n,2)}(t); \quad \omega_{j\rho l}^{(n,2)}(t) \in \{0,1\}; \\ \sum_{i=1}^n \omega_{ij\rho l}^{(n,1)}(t) + \omega_{j\rho l}^{(n,2)}(t) \leq 1; \quad \sum_{\rho=1}^P u_{j\rho l}^{(n,2)}(t) \leq d_{jl}^{(2)}; \\ j \neq i \\ j = 1, 2, \dots, n; \rho = 1, 2, \dots, P; l = 1, 2, \dots, L \end{array} \right. \quad (4)$$

Заданы следующие показатели эффективности управления ИнП при взаимодействии Гр ПдО для оценивания качества программы управления ИнП. С помощью показателя (5) можно количественно оценить суммарный штраф за нарушение директивных сроков выполнения заданных операций, входящих в информационный процесс, показатель качества планирования вида (6) позволяет оценить общий объем обработанных (потерянных) данных и информации:

$$J_2 = \sum_{l=1}^L \sum_{\rho=1}^P \sum_{j=1}^n \int_{t_{0l}}^{t_{fl}} \gamma_{j\rho l}(t) \omega_{j\rho l}^{(n,2)}(t) dt; \quad (5)$$

$$J_4 = \frac{1}{2} \left[\begin{array}{l} \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(x_{ijl} - \sum_{\rho=1}^P x_{ij\rho l}^{(n,1)}(t_{fl}) \right)^2 + \\ + \sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^n \left(g_{jl} - \sum_{\rho=1}^P x_{j\rho l}^{(n,2)}(t_{fl}) \right)^2 \end{array} \right]; \quad (6)$$

Задача поиска оптимальной программы управления ИнП (плана ИнП) при взаимодействии Гр ПдО может быть сформулирована как следующая задача оптимального программного управления обобщенной динамической системы. Необходимо найти такую программу управления ИнП, которая позволит перевести рассматриваемую обобщенную динамическую систему (3) – (4) из заданного начального состояния в заданное конечное состояние с учетом технических и технологических ограничений и наилучшим образом с точки зрения показателей качества планирования. Если таких программ управления окажется несколько, необходимо из них выбрать наиболее предпочтительную с точки зрения обобщенного показателя качества программного управления ($J_{об}$), который задается целевой функцией следующего вида:

$$J_{об} = \sum_{m=1}^2 \lambda_m J_m, \quad \text{где} \quad \sum_{m=1}^2 \lambda_m = 1, \quad J_m = \frac{J_m}{J_m^*}. \quad (7)$$

В (7) m – индекс показателя качества; J_m – нормированное значение показателя качества J_m ; J_m^* – наилучшее (максимальное) значение показателя качества J_m ; λ_m – коэффициент важности показателя качества программного управления.

В третьей главе описаны разработанные (модифицированные) диссертантом комбинированные **алгоритмы планирования ИнП** при взаимодействии ПдО, включающие в себя алгоритмы синтеза плана (технологии) сбора и обработки данных, получаемых Гр ПдО с использованием СМ, а также программ управления ИнП на основе ДМ, алгоритмы оценивания робастности планов и программного управления ИнВ Гр ПдО и, наконец, обобщенная многоэтапная процедура расчета плана ИнВ Гр ПдО, объединяющая все ранее разработанные частные модели и алгоритмы.

Синтезируемые технологии и программы управления ИнП должны в каждый момент времени удовлетворять ограничениям, накладываемым на компоненты вектора состояния ИнП при взаимодействии Гр ПдО; функциональным ограничениям на различные типы ресурсов ПдО; ограничениям на мгновенные значения управляющих воздействий, а также оптимизировать выбранные целевые функции (показатели качества управления ИнП). В основу разработанных комбинированных алгоритмов планирования ИнП при взаимодействии Гр ПдО положена многоэтапная координационно-итерационная процедура синтеза агрегированного и детального планов выполнения ИнО, построенных на основе комбинированного использования статических и ДМ, описывающих данную ПрО.

Также можно отметить, что результатом решения рассматриваемых задач планирования помимо плана выполнения ИнП (на СМ) и программы управления ИнП (на ДМ) при взаимодействии Гр ПдО являются рассчитанные значения показателей качества процесса планирования ИнП при указанном взаимодействии ПдО.

Разработана обобщенная многоэтапная координационно-итерационная процедура расчета плана ИнВ Гр ПдО. Параметрами координации в данной процедуре являются краевые условия и сопряженные переменные. Рассмотрим, как можно использовать разработанные **алгоритмы решения задач планирования ИнП** при взаимодействии Гр ПдО в рамках предложенной многоэтапной координационно-итерационной процедуры синтеза агрегированного и детального планов выполнения ИнО:

- Шаг 1. Расчет плана выполнения операция, входящих в ИнП при взаимодействии ПдО с использованием СМ.
- Шаг 2. Подготовка исходных данных (заданный в СМ объем данных, переданных между ПдО на каждом участке времени и объем данных, который был запланирован в СМ для обработки в каждом ПдО на каждом подынтервале времени) для передачи их из СМ в ДМ.
- Шаг 3. По запросу пользователя в СМ выполняется сохранение исходных данных, а также исходных данных для ДМ (количество ПдО и участков постоянства структуры) во временный файл *.mat.
- Шаг 4. Оценка робастности плана выполнения операций, входящих в ИнП Гр ПдО на СМ.
- Шаг 5. По запросу пользователя в ДМ выполняется выгрузка сохраненных данных из временного файла *.mat. В ДМ исходные данные из СМ используются в виде краевых условий, которые учитываются при решении задачи планирования ИнП при взаимодействии ПдО. В противоположном случае у пользователя есть возможность ввести эти данные вручную.
- Шаг 6. Удаление временного файла *.mat.
- Шаг 7. Итерационный поиск программного управления ИнП при взаимодействии Гр ПдО с использованием ДМ. Если итерационный процесс сошелся, то осуществляется переход на шаг 9.
- Шаг 8. В случае, когда не удалось за конечное число итераций получить программу управления ИнП Гр ПдО с применением ДМ осуществляется формирование сообщения об отсутствии сходимости, а также из имеющихся детальных планов выбирается наиболее предпочтительный. Далее осуществляется формирование координирующих

параметров и возврат в СМ или ДМ для корректировки исходных данных с участием ЛПР.

Шаг 9. Оценка робастности полученного программного управления ИнВ Гр ПДО.

Шаг 10. Формирование окончательного варианта агрегированного и детального планов выполнения ИнП.

В **четвертой главе** описаны результаты разработки и исследования прототипа программного модуля, предназначенного для подтверждения корректности и адекватности предложенного СМАО решения задач оперативного планирования ИнП при взаимодействии ПДО. Приведены примеры решения задач оперативного планирования ИнП при взаимодействии Гр МКА, а также ИТТС в цифровом пространстве аэропорта.

Для подтверждения программной реализуемости и корректности рассматриваемых в данной работе комбинированных алгоритмов и моделей для решения задачи оперативного оптимального планирования ИнП при взаимодействии Гр ПДО был создан прототип программы, реализующий созданное СМАО. Разработка данного прототипа осуществлена с использованием инструментальных средств Mathworks Matlab, данные средства в наилучшей степени подходят для, работы с формулами вычислительной математикой и матрицами. Языком программирования был выбран Matlab language, средой разработки визуализации (интерфейса пользователя) предложено использовать Matlab App Designer.

В диссертации с использованием разработанного СМАО решены две прикладные задачи. Первая связана с мониторингом состояния наземных объектов с использованием МКА дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Для демонстрации преимуществ и возможностей предложенного в диссертации полимодельного описания процессов приема, передачи, обработки, хранения и потери данных и информации, а также соответствующей обобщенной процедуры оптимального оперативного планирования ИнП при взаимодействии МКА и ее программной реализации было проведено несколько вычислительных экспериментов. На рисунке 2 в графическом виде изображена часть исходных данных (более подробное описание содержится в тексте диссертации, представленной на сайте диссертационного совета). Внутри каждой вершины представленного на рисунке 3 графа, задающего фиксированный сценарий структурной динамики Гр КА, размещен номер МКА, а рядом с вершиной графа задаются величины максимальной интенсивности (скорости) обработки поступающих данных (эти величины указаны в треугольниках, и измеряются в Мб/с) и максимального объема ЗУ (их величина указана внутри квадратов, и измеряется в Мб). На рисунке 2 дугам поставлена в соответствие максимальная интенсивность (скорость) передачи по космическим каналам связи, которая принимается равной 10 Мб/с, при этом пунктирная дуга соответствует процессам передачи информации (обработанных данных), сплошная процессам передачи данных (или по-другому, необработанной информации).

На рисунке 3 представлены результаты расчетов плана выполнения ИнП с использованием СМ для исходных данных, представленных на рисунке 2, где дугам соответствующего графа поставлена в соответствие запланированная интенсивность (скорость) передачи данных (сплошная) / информации (пунктирная). В треугольниках размещена запланированная интенсивность (скорость) обработки поступающих данных в МКА, в квадратах запланированный объем сохраненных данных (числитель) и информации (знаменатель) в ЗУ МКА на том же рисунке.

Как видно из рисунка 3, согласно полученному плану выполнения ИнП Гр МКА конечным потребителем получено **245 Мб** или **50,5 %** обработанных данных, в ЗУ МКА сохранено 35 Мб данных и 135 Мб информации. Потери информации в Гр МКА составили 40 Мб или **8,2 %**, а данных – 30 Мб или **6,2 %**, что связано с ограничениями на пропускные способности каналов космической связи в рассматриваемой ИВС, и объемы ЗУ МКА в рассматриваемом примере. Стоит отметить, что с помощью ДМ выполняется уточнение плана, полученного с применением СМ, в ходе которого осуществляется привязка запланированных на СМ операций, входящих в

$\psi_{ijl} = 10$ Мб/с для МКА с номерами $j = 1...7$), для второго варианта моделирования все МКА специализируются на передаче данных ($\varphi_{jl} = 10$ Мб/с; $\psi_{ijl} = 20$ Мб/с для МКА с номерами $j = 1...7$), при третьем варианте моделирования будем рассматривать смешанный случай ($\varphi_{jl} = 10$ Мб/с и $\psi_{ijl} = 3$ Мб/с для МКА с номерами $j = 1, 5, 7$; $\varphi_{jl} = 3$ Мб/с и $\psi_{ijl} = 10$ Мб/с для МКА с номерами $j = 2, 3, 4, 6$). Остальные исходные данные сохраняются такими же, что и были представлены на рисунке 1.

Анализ рисунка 4 позволяет сделать вывод о том, что получение конечным потребителем максимального количества информации (обработанных данных) при минимальных потерях происходит, если использовать специализированные МКА в смешанном составе (тип 3). Из чего можно сделать вывод о важности выбора оптимального соотношения многофункциональных и специализированных МКА для выполнения целевых задач. Также в ходе машинных экспериментов выявлено, что наибольшее влияние на конечные результаты планирования ИнП при взаимодействии Гр МКА ДЗЗ

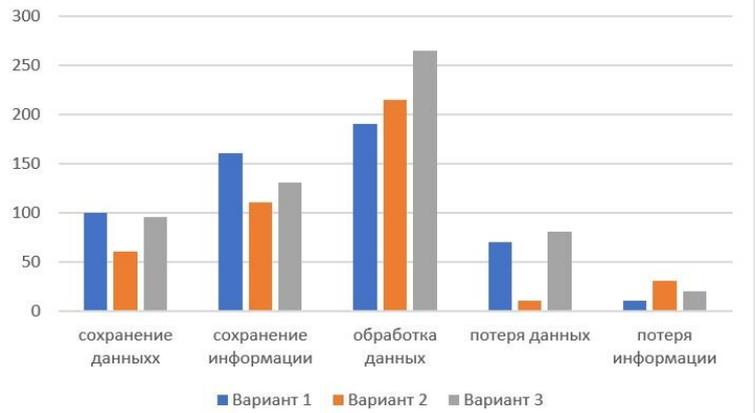


Рисунок 4 – Влияние использования специализированных МКА на объем информации, полученный конечным потребителем

оказывает выбор в разработанном СМАО коэффициентов, характеризующий степень обработки информации, коэффициентов, характеризующих важность показателей качества планирования, количество подынтервалов постоянства топологической структуры каналов космической связи, а также собственно характеристики АПК каждого МКА ДЗЗ, входящего в Гр МКА.

Результаты других экспериментов и второго примера, связанного с функционированием группировки интеллектуальных транспортно-технических систем, подробно описаны в тексте диссертации, которая размещена на сайте диссертационного совета 24.1.206.01.

Для оценки качества управления ИнП на основе разработанного СМАО кроме расчета с применением программного прототипа выполнен расчет на основе эвристического подхода, в ходе которого осуществлялся поиск не оптимального, а допустимого плана выполнения информационного обмена как в рассматриваемой Гр МКА ДЗЗ, так и в Гр ИТТС. Сравнение результатов эвристического и оптимального планирования приведено в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение результатов, полученных с помощью эвристического планирования ИнП и оптимального оперативного планирования с использованием СМАО для Гр ИТТС и Гр МКА

Основные планируемые операции, входящие в состав ИнП	Гр ИТТС		Гр МКА	
	Результаты, полученные с использованием эвристического метода планирования ИнП	Результаты, полученные с использованием программного прототипа СМАО	Результаты, полученные с использованием эвристического метода планирования ИнП	Результаты, полученные с использованием программного прототипа СМАО
Обработанные	6,2 Гб	6,7 Гб	215 Мб	245 Мб

данные				
Потерянные данные	7 Гб	6,2 Гб	50 Мб	40 Мб
Потерянная информация	0 Мб	0 Мб	30 Мб	30 Мб
Сохраненные данные	42,7 Гб	42,95 Гб	35 Мб	35.0 Мб
Сохраненная информация	63,95 Гб	64 Гб	50 Мб	30.0 Мб

Как видно, из таблицы 1 благодаря применению СМАО удалось уменьшить как объем потерянных данных, так и увеличить объем обработанных данных (информации), полученных КнП как в космической ПрО, так и в цифровом пространстве аэропорта. Резюмируя, результаты вычислительного эксперимента можно сказать, что применение СМАО позволило передать КнП больший объем обработанных данных по сравнению с эвристическим подходом и, как следствие, повысить качество управления ИнП. В целом разработанные планы и программы управления ИнП Гр ПдО на практике **целесообразно использовать в качестве эталонных решений**, относительно которых можно уже обоснованно вводить различные эвристики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлено **решение важной научно-технической задачи** разработки комбинированных моделей и алгоритмов планирования ИнП при взаимодействии ПдО. Рассматриваемая задача относится к классу большемерных нестационарных билинейных многокритериальных задач неклассического вариационного исчисления (оптимального управления) и требует для своего решения особого подхода для учета и преодоления перечисленных ранее трудностей модельно-алгоритмического и вычислительного характера. Решенная в диссертации задача имеет важное значение для предметных областей, связанных с критическими технологиями и инфраструктурами. В данных предметных областях задачи планирования ИнП при взаимодействии ПдО в условиях изменений состояний рассматриваемых объектов, вызванных возмущающими воздействиями внешней среды, приобретают **особую актуальность и значимость**. Приведем основные **итоги диссертационного исследования**.

1 **Предложен** оригинальный способ последовательной декомпозиции большемерной нестационарной задачи оперативного планирования информационных процессов при взаимодействии группировок подвижных объектов. Новизна предложенной декомпозиции заключается в том, что в ходе ее реализации выполняется разбиение сложной пространственно-распределенной задачи выбора плана информационного взаимодействия группировок подвижных объектов на две подзадачи, описывающие пространственную и временную составляющие исходной задачи. Пространственную составляющую исходной задачи предложено описывать с помощью статической модели планирования, в рамках которой для заданных участков постоянства пространственной структуры (сетевой топологии) группировки подвижных объектов происходит распределение информационных операций по ресурсам подвижных объектов без привязки их ко времени. Временную составляющую исходной задачи предложено описывать с помощью динамической модели, в рамках которой запланированные на статической модели операции, входящие в состав информационных процессов, привязываются к конкретным ресурсам и времени.

2 **Разработано и реализовано** на программном уровне полимодельное (статико-динамическое) описание процесса оптимального управления информационными процессами, которое в общем случае включает в себя процессы приема, передачи, хранения, обработки и потери данных при взаимодействии группировок подвижных объектов. В состав полимодельного описания вошли взаимосвязанные статическая и динамическая модели. Они дополняют и усиливают описательные возможности друг друга. Так в статической модели планирования информационных процессов при взаимодействии группировок подвижных объектов достаточно

просто учитываются такие аспекты информационного взаимодействия, как процессы потери данных, а также ограничения на пропускные способности каналов, которые в динамической модели требуют введения сложных фазовых и смешанных ограничений. В динамической модели в отличие от статической модели проводится детальное описание процессов распределения и обработки данных с привязкой к конкретным моментам времени, что затруднительно описать в статической модели. Более того, с помощью динамической модели можно рассчитать и оптимизировать такие интегральные показатели качества программного управления информационными процессами как показатели равномерности и неравномерности использования ресурсов подвижных объектов как на всем интервале программного управления, так и в каждый текущий момент времени. Расчет данных показателей в статической модели приводит к увеличению ее размерности и необходимости введения нелинейных ограничений.

3 Разработаны комбинированные модели и алгоритмы оптимального оперативного планирования информационных процессов, предназначенные для повышения оперативности и снижения ресурсопотребления при информационном взаимодействии подвижных объектов за счет оптимизации программ управления ими в интересах обеспечения своевременного и обоснованного принятия решений о состоянии как подвижных объектов, так и целевых объектов, которые они обслуживают. Кроме того, **предложено** оригинальное формальное описание и решение задачи планирования (программного управления) информационных процессов, происходящих при взаимодействии (функционировании) группировок подвижных объектов. Оригинальность подхода состоит в системно-управленческой интерпретации исследуемых процессов, позволившей на конструктивном уровне объединить математический аппарат математического программирования (исследования операций) и теории оптимального управления при синтезе планов и программ управления информационными процессами.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы. В дальнейшем следует произвести дополнительные исследования в рамках следующих основных направлений:

- разработка специального модельно-алгоритмического обеспечения решения задач коррекции программного управления операциями, ресурсами и потоками при взаимодействии Гр ПДО;
- разработка специального модельно-алгоритмического обеспечения решения задач комплексной автоматизации и интеллектуализации процессов планирования мониторинга состояния сложных технических систем;
- разработка методов и алгоритмов ортогонального проектирования многомерных симплексов, описывающих множество допустимых значений целевых показателей, оценивающих качество планов информационного взаимодействия ПДО и построенных на основе ДМ и используемых для многокритериального выбора наиболее предпочтительных технологий и программ управления Гр ПДО, принадлежащих соответствующей области компромиссов В. Парето.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в журналах из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:

1. Захаров, В.В. Динамический подход к планированию модернизации автоматизированных систем управления производственными объектами / В.В. Захаров, **В.А. Ушаков** // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2019. Т. 62. № 6. – С. 585–588. DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-6-585-588.
2. Крылов, А.В. Методологические и методические основы создания и использования интегрированных систем поддержки принятия решений / А.В. Крылов, М.Ю. Охтилев, В.А. Соболевский, Б.В. Соколов, **В.А. Ушаков** // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2020. Т. 63. № 11. – С. 963–974. DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-11-963-974.
3. **Ушаков, В.А.** Модельно-алгоритмическое обеспечение оперативного оценивания и анализа показателей качества управления информационными процессами // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2021. Т. 64. № 8. – С. 688–692. DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-8-688-692.

4. **Ушаков, В.А.** Модели и алгоритмы управления информационными процессами при взаимодействии подвижных объектов / В.А. Ушаков // Морские интеллектуальные технологии. – 2022. № 3 часть 1. – С. 235–247. DOI: 10.37220/MIT.2022.57.3.031.
5. Мурашов, Д.А. Постановка и анализ путей решения задачи синтеза программ управления и параметров информационно-вычислительной сети на основе полимодельного описания / Д.А. Мурашов, **В.А. Ушаков** // Авиакосмическое приборостроение. – 2022. № 8. – С. 23–32. DOI: 10.25791/aviakosmos.8.2022.1293.
Статьи, опубликованные в изданиях, индексируемых WoS/Scopus:
6. Sokolov, B. Model-algorithmic Support for Abilities Calculating of Control System Based on Projection Operators / B. Sokolov, **V. Ushakov** // Advances in Intelligent Systems and Computing. –2019. Vol. 986. – P. 342–348. DOI: 10.1007/978-3-030-19813-8_35.
7. **Ushakov, V.** Approximation a Reachability Area in the State Space for a Discrete Task / **V. Ushakov** // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2020. Vol. 1226. – P. 617–624. DOI: 10.1007/978-3-030-51974-2_57.
8. Kofnov, O. The synthesis of the control function in optimal tasks as a N-dimensional area using parallel projection on 2D plane / O. Kofnov, B. Sokolov, **V. Ushakov** // Proceedings of the 32nd European Modeling & Simulation Symposium (EMSS 2020). – 2020. – Pp. 262–269. DOI: 10.46354/i3m.2020.emss.037.
9. Sokolov, B. Formation Reachability Area as a Data Vector Using a Dynamic Model for Controlling Information Processes in the Automated Control System for Moving Objects / B. Sokolov, **V. Ushakov** // CEUR Workshop Proceedings. – 2020. Vol. 2803. – Pp. 67–75. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2803/paper10.pdf>.
Научные работы, опубликованные в других изданиях:
1. Соколов, Б.В. Модели и алгоритмы оперативного планирования информационных процессов в динамической сети, образованной подвижными объектами / Б.В. Соколов, **В.А. Ушаков** // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2022. № 683. – С. 29–36.
2. **Ушаков В.А.** Области достижимости и проектирующие операторы в задачах оптимального управления / В.А. Ушаков // XIII Всероссийское совещание по проблемам управления (ВСПУ–2019) : Труды (Москва, 17–20 июня 2019 г.). / Под общ. ред. Д.А. Новикова. – М.: ИПУ РАН – 2019. – С. 1037–1042. DOI: 10.25728/vspu.2019.1037.
3. **Ушаков, В.А.** Алгоритм планирования информационных процессов в автоматизированной системе управления подвижными объектами / В.А. Ушаков // Перспективные системы и задачи управления : Материалы XVI Всероссийской научно-практической конференции и XII молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах». – Таганрог : ИП Марук М.Р., – 2021. – С. 327–330.
4. Соколов, Б.В. Динамическая модель и алгоритм управления приема, передачи и обработки информации в автоматизированной системе управления подвижными объектами / Б.В. Соколов, **В.А. Ушаков** // Технологические тренды и наукоемкая экономика: бизнес, отрасли, регионы : монография. – СПб.: Астерион, – 2021. – С. 92–109.
5. **Ушаков, В.А.** Разработка статической модели управления структурной динамикой автоматизированной системы управления подвижными объектами / В.А. Ушаков // XLV Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства : сборник тезисов в 4 т. (Москва, 30 марта – 2 апреля 2021 г.). – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, – 2021. Т. 3. – С. 55–57.
6. **Ушаков, В.А.** Оценка робастности динамической модели управления информационными процессами в автоматизированной системе управления подвижными объектами / В.А. Ушаков // Научная сессия ТУСУР–2021: сборник избранных статей (Томск, 19–21 мая 2021 г.): в 3 частях.–Томск: В-Спектр, – 2021. Ч. 2. – С. 176–179.
7. **Ушаков, В.А.** Полимодельное описание и алгоритмы оперативного программного управления информационными процессами на динамических сетях / В.А. Ушаков, Б.В. Соколов, А.А. Тюгашев // Системный анализ в проектировании и управлении: сборник научных трудов XXV Международной научной и учебно-практической конференции (Санкт-Петербург, 13–14 октября 2021 г.). – СПб.: Политех-пресс, – 2021. Ч. 3. – С. 75–81. DOI: 10.18720/SPBPU/2/id21-357.
8. **Ушаков, В.А.** Построение областей достижимости в пространстве возмущений для оценивания робастности планов информационного взаимодействия группировки подвижных объектов / В.А. Ушаков // Материалы IV Международного семинара по информационным, вычислительным и управляющим системам для распределенных сред (Иркутск, 4–8 июля 2022 г.). – Иркутск: Изд-во ИДСТУ СО РАН, – 2022. – С. 127–129.

Автореферат диссертации

УШАКОВ

Виталий Анатольевич

КОМБИНИРОВАННЫЕ МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ПЛАНИРОВАНИЯ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ПОДВИЖНЫХ
ОБЪЕКТОВ

Текст автореферата размещен на сайтах:

Высшей аттестационной комиссии при Министерстве науки и высшего
образования Российской Федерации

<https://vak.minobrnauki.gov.ru/>

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
«Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр
Российской академии наук»

<http://www.spiiras.nw.ru/dissovet/>

Подписано в печать "29" ноября 2022 г.
Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл.печ.л. 1,0. Тираж 100 экз.
Заказ № ____