СОДЕРЖАНИЕ

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ....4

ВВЕДЕНИЕ....6

1 Анализ существующего состояния планирования средств управления ОГ КА....10

1.1 Общий анализ текущего состояния планирования средств управления ОГ КА....10

1.1.1 Организация управления существующими большими группировками....16

1.2 Характеристика и особенности управления орбитальной группировкой КА «Глонасс»....18

1.3 Особенности управления орбитальной группировкой КА многофункциональной системы персональной спутниковой связи данных (МСПСС) «Гонец –Д1М»....22

1.4 Характеристика и особенности управления орбитальной группировкой КА ФГУП «Космическая связь»....24

1.5 Построение и методы управления орбитальной группировкой Российского сегмента Международной космической станции....26

2. Разработка методов и алгоритмов распределения средств управления крупномасштабной орбитальной группировки КА....30

2.1 Общая постановка задачи оптимального управления средствами НАКУ 30

2.2 Методы оптимизации структуры управления орбитальными группировками....34

2.3 Анализ функционирования элементов наземного комплекса....34

2.4 Методологический подход к определению оптимальной структуры и состава иерархических систем....37

2.5 Формальное описание алгоритма расчета оптимального задействования средств НКУ крупномасштабной орбитальной группировки....40

2.6 Решение локальной задачи разработки алгоритма оптимального управления НКУ крупномасштабной орбитальной группировкой....40

2.7 Описание процесса поиска оптимального распределения технических средств....42

2.8 Оценка алгоритмической сложности выполнения расчета оптимального задействования средств управления КОГ по полученному алгоритму....43

2.9 Краткое описание алгоритма оптимального распределения средств управления крупномасштабными орбитальными группировками КА.....45
2.10 Требования к разработке программного комплекса расчета оптимального распределения средств управления.....45
3 Разработка программного комплекса расчета оптимального распределения средств управления крупномасштабными орбитальными группировками КА 48
3.1 Функциональное назначение.....48
3.2 Требования к общему программному обеспечению.....48
3.3 Основные характеристики программного комплекса.....49
3.4 Задачи, решаемые программным комплексом.....51
3.5 Возможности программного комплекса.....51
3.6 Области применения.....53
3.7 Требования к аппаратным средствам.....54
3.8 Требования к программным средствам.....54
3.9 Общие характеристики входной и выходной информации.....55
3.10 Описание работы программного комплекса.....56
3.11 Входные данные.....61
3.12 Выходные данные.....63
3.13 Моделирование задействование КИС.....67
3.14 Моделирование №2 задействование КИС.....81
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....96
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....100

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

АПК	- аппаратно-программный комплекс
АСП	- автоматизированная система планирования
БКУ	- бортовой комплекс управления
БА КИС	- бортовая аппаратура командно-измерительной системы
ГКА	- геостационарный космический аппарат
ГСР	- геостационарный спутник ретранслятор
ДЗЗ	- дистанционное зондирование Земли
ЕКТС	- единая командно-телеметрическая система
ЗРВ	- зона радиовидимости
ИЦН	- информация целевого назначения
КА	- космический аппарат
КОГ	- крупномасштабная орбитальная группировка
КИП	- командно-измерительный пункт
КИО	- канал информационного обмена
КИС	- командно-измерительная система
КПИ	- командно-программная информация
КС	- конфликтная ситуация
МАП	- методология автоматизированного планирования
МКС	- международная космическая станция
МКСР	- многофункциональная космическая система ретрансляции
ММ	-математическая модель
МСВО	- минимум суммарных временных отличий
МССПД	- мультисервисная система связи и передачи данных
НАКУ	- наземный автоматизированный комплекс управления
НКА	- низкоорбитальный космический аппарат
НКУ	- наземный комплекс управления
НСиКР	- наземные средства и комплекс ретрансляции
НСЭН	- научного и социально-экономического назначения

НШС - нештатная ситуация

ОГ - орбитальная группировка

ПЗКС - план задействования каналов связи

ПЗС - план задействования средств

ПКК - пилотируемый космический комплекс

ПлО - планирующий орган

ППИ - пункт приема-передачи информации

РБ - разгонный блок

РКТ - ракетно-космическая техника

РН - ракета-носитель

СМО - система массового обслуживания

СС - сеанс связи

СУ - сектор управления

ТС - техническое средство

ТЦУ - технологический цикл управления

УИ - управляющая информация

ЦКЭР - Центр координации, эксплуатации и развития

ЦСАКП - Центр ситуационного анализа, координации и планирования

ЦУРС - Центр управления ретрансляцией и связью

ФКП - Федеральная космическая программа

Введение

В настоящее время развитие и эффективное использование космических систем является одной из важнейших задач Государственной корпорации по космической деятельности ГК «Роскосмос». При этом важную роль в обеспечении развития и применения орбитальных группировок КА по целевому назначению играют средства НАКУ КА НСЭН (наземного автоматизированного комплекса управления КА научного и социально-экономического назначения.

НАКУ КА НСЭН и измерений – как комплекс необходимой наземной инфраструктуры, технических систем и средств, предназначена для формирования НКУ (наземных комплексов управления), обеспечивающих реализацию автоматизированных процессов управления, параметров и контроля состояния полёта изделий РКТ (ракетно-космической техники) НСЭН, находящихся в распоряжение ГК «Роскосмос».

Федеральной космической программой (ФКП) 2016-2025 планируется расширение до необходимого состава КА (до 73) и обеспечение устойчивого и непрерывного управления российскими орбитальными группировками автоматических и пилотируемых космических аппаратов на околоземных орбитах, а также объектами на траекториях полета к Луне и Марсу. Планируется развернуть орбитальную группировку космических аппаратов (ОГ КА), выполняющих функции по целевому назначению в составе до 49 КА к 2020 г. и до 73 КА к 2025 году.

Предусматривается модернизация и развитие технической структуры наземного автоматизированного комплекса управления, создание основных структурных элементов; использование наземного автоматизированного комплекса управления по целевому назначению - обеспечению самостоятельного и независимого управления космическими аппаратами на основе увеличения пропускной способности базового центра управления полетами космических аппаратов (ЦУП АО «ЦНИИмаш») при Государственной корпорации по космической деятельности «Роскосмос».

Расширенный состав орбитальных группировок, в свою очередь предъявит новые требования к оперативности работ, качеству координации и планирования задействования средств НАКУ в режиме, приближенному к реальному времени [3].

Решение этой комплексной проблемы предопределяет необходимость проведения исследований по ряду различных направлений использования наземных комплексов управления. К наиболее важным из них следует отнести разработку рациональных схем задействования средств НКУ орбитальными группировками КА, разработанных на основе математических методов теории управления.

Эти задачи приобретают повышенную актуальность при ограниченном ресурсе средств наземного автоматизированного комплекса управления, а также в связи с планируемым ростом численности управляемых КА.

При этом, на первый план выдвигается проблема разработки эффективных методов, алгоритмов и программных комплексов, позволяющих не только определить схемы рационального распределения средств управления группировкой КА, но и выявить проблемные звенья структуры управления и выработать требования к их устранению.

В настоящее время планирование задействования наземных средств управления КА НСЭН осуществляется Центром ситуационного анализа координации и планирования средств НАКУ КА НСЭН и измерений (ЦСАКП) [30].

В связи с тем, что ЦСАКП в настоящее время обеспечивает планирование [31] управления 9 КА различного типа из ЦУП АО «ЦНИИмаш», то с учетом задач ФКП, актуальным является вопрос о разработке методов и алгоритмов создания программных комплексов расчета оптимального задействования управления больших и крупномасштабных ОГ КА.

Современная теория управления использует для решения задач планирования метод массового обслуживания, метод динамической

интерпретации, метод случайной оптимизации, иерархических систем и другие. Эти методы позволяют рассматривать задачу управления как совокупность локальных операций.

При разработке материалов ВКР основное внимание уделено рассмотрению методов теории управления, выбору и обоснованию методов и алгоритмов, обеспечивающих возможность решения предъявленных заказчиком требований для разработки программного комплекса расчета оптимального распределения средств управления крупномасштабными орбитальными группировками КА [12].

В программном комплексе расчета оптимального распределения средств управления крупномасштабными орбитальными группировками КА заложена возможность планировать сеансы связи для 1000 КА. Это число КА коррелируется с численностью зарубежных ОГ КА.

Проведение дальнейших исследований направлено на разработку рациональных технологий планирования задействования средств управления КОГ с учетом возрастающих требований по управлению ими и совершенствованию технических средств космических систем.

Работа выполнялась в следующей последовательности:

- анализ текущего состояния планирования средств управления ОГ КА;

- научно-техническое обоснование и описание методов, положенных в основу разработки планирования оптимального распределения средств управления КОГ и алгоритмов;

- научно-техническое обоснование и описание программного комплекса расчета оптимального распределения средств управления КОГ.

Структурно ВКР состоит из реферата, содержания, списка обозначений и сокращений, введения, трех разделов, заключения и приложений.

В разделе 1 приведены результаты анализа текущего состояния и проблем управления ОГ КА, сделаны выводы.

В разделе 2 представлены основные результаты разработки методов планирования распределения средств управления крупномасштабной

орбитальной группировкой (КОГ) КА НСЭН. Приведено научно-техническое обоснование оптимального процесса планирования расчета оптимального распределения средств управления крупномасштабными орбитальными группировками КА [17].

В разделе 3 приводится описание логической структуры, алгоритмов, используемых технических средств, программного комплекса и руководство оператору программного комплекса расчета оптимального распределения средств управления крупномасштабными орбитальными группировками КА.

Новизна разработанного метода, алгоритма и программного комплекса заключается в том, что в основу метода положена математическая теория управления иерархических систем [4,6]. Данный метод позволил представить космическую систему как совокупность иерархических уровней и входящих в них локальных уравнений, описывающих выбранный метод и алгоритм управления ОГ КА.

Разработанный программный комплекс позволяет планировать сеансы связи управления КА из одного ЦУП. Программный комплекс может работать с большим числом КА (до 1000 КА, это заложено в алгоритме программного комплекса), а также проводить расчеты в режиме реального времени.

Разработанный программный комплекс может быть использован в системах различного назначения, где требуется оперативное (в режиме реального времени) составление планов и расписаний технологических и производственных операций.

Моделирование процесса расчета задействования средств НАКУ для составления ПЗС для средств из 4-х КИП и большим числом КА дает высокий коэффициент полезного задействования КИП, что может обеспечить обслуживание вновь запускаемых КА без расширения состава НАКУ. Отсутствие потребности в дополнительном приобретении технических средств управления КА указывает на возможность экономического эффекта.

1. Анализ существующего состояния планирования средств управления ОГ КА

При выполнении этого раздела ВКР были рассмотрены следующие вопросы:

- анализ текущего состояния планирования средств управления ОГ КА;
- обоснование способов и перспективных методов планирования оптимального распределения средств управления крупномасштабными ОГ.

1.1 Общий анализ текущего состояния планирования средств управления ОГ КА

Целью планирования применения технических средств (ТС) при обеспечении управления КА является приведение в соответствие числа заявок на проведение сеанса связи с КА и возможность использования рабочего ресурса средств управления при ограничениях по времени, месту, продолжительности и другим параметрам, определяющим взаимное влияние КА и ТС [7]. Поэтому, одной из основных задач, стоящей перед планирующим органом, является задача принятия оптимальных решений по задействованию ТС управления, обеспечивающих бесконфликтное использование имеющегося ресурса наземных и космических средств. Эта задача представляет собой многовариантную задачу распределения ресурса технических средств НАКУ в соответствии с заявками секторов управления КА на проведение сеансов связи.

Решение задачи оптимального планирования в данной работе можно обеспечить только на основе современных методов теории управления и подтвердить моделированием с помощью разработанного программного комплекса [32].

Основным принципом планирования применения ТС НАКУ КА НСЭН, является принцип коллективного использования ТС, заключающийся в том, что одни и те же средства применяются для управления КА НСЭН различного назначения. Этот принцип обуславливает необходимость централизации выполнения работ при планировании применения ТС НАКУ КА НСЭН.

В настоящее время планирование задействования наземных средств управления КА НСЭН в ЦУП АО «ЦНИИмаш» осуществляется Центром ситуационного анализа координации и планирования средств НАКУ КА НСЭН и измерений (ЦСАКП) [28].

ЦСАКП обеспечивает управление 8 аппаратами различных типов («Ресурс-П», «Электро-Л», «Луч-5», «Канопус-В») и космическими аппаратами ОГ РС МКС.

Принятый в эксплуатацию аппаратно-программный комплекс ЦСАКП в настоящее время обеспечивает планирование задействование средств НАКУ по заявкам секторов управления КА, осуществляющих управление из ЦУП АО «ЦНИИмаш», и по отдельным заявкам для КА, проходящих летно-конструкторские испытания (КА «Кондор», АО ВПК «НПО Машиностроение»), поступающим от секторов Главного конструктора (СГК).

В материалах, которые отражены в статьях [11,14] и материалах конференций [12,13] представлены решения по данной тематике, в которых рассмотрены методические подходы при создании систем управления крупномасштабными орбитальными группировками.

При написании работы исследовались вопросы разработки методов и алгоритмов, базирующихся на теории оптимизации иерархических систем управления [4]. Предварительные исследования этого вопроса показали целесообразность применения этого метода. Это позволило выработать условия оптимальности для решения задачи по обслуживанию потока запросов и на их основе разработать программный комплекс моделирования расчета оптимального задействования средств НАКУ для управления крупногабаритной орбитальной группировкой.

Методы и алгоритмы, используемые в ЦСАКП, обеспечивают планирование применения ТС НАКУ КА НСЭН, которое в настоящее время подразделяется на долгосрочное, оперативное и текущее (Временное положение по взаимодействию ЦСАКП с абонентами при оперативном

планировании применения средств НАКУ КА НСЭН и изменений).

Долгосрочное планирование.

Долгосрочное планирование осуществляется на этапах годового, квартального и месячного планирования и включает разработку долгосрочных «Планов задействования средств НАКУ КА НСЭН и измерений» и «Планов задействования каналов связи» для обеспечения управления орбитальной группировкой КА ГК «Роскосмос».

Оперативное планирование.

Целью оперативного планирования применения ТС НКУ КА НСЭН является бесконфликтное и рациональное (оптимальное) их распределение по составу, режимам, месту и времени работы для обеспечения непрерывного, надёжного и устойчивого управления КА на различных этапах их жизненного цикла и функционирования ОГ КА НСЭН [32].

Основной задачей оперативного планирования является максимальное удовлетворение заявок секторов управления КА на проведение сеансов связи (СС) при задействовании средств НКУ и достижение, при возможности, оптимальности или рациональности использования ТС НАКУ.

Текущее планирование

Текущее планирование заключается в коррекции утверждённого ПЗС и/или ПЗКС, дозаказе средств НАКУ КА НСЭН и измерений и выдаче новых Распоряжений на задействование ТС НАКУ КА НСЭН и измерений. Коррекцией является любое изменение, вносимое в утверждённые ПЗС и ПЗКС и доведенные до исполнителей Распоряжения.

Результаты планирования реализуются в разрабатываемых планах и последующих управляющих воздействиях в виде Распоряжений на задействование средств.

Основными документами, разрабатываемыми при оперативном планировании, являются: План задействования средств (ПЗС) НАКУ КА НСЭН и План задействования каналов связи (ПЗКС) (в частности - каналов МССПД, как составной части НАКУ КА НСЭН) на сутки, определяющие

порядок и последовательность применения средств. Распоряжения на задействование средств НАКУ КА НСЭН и на задействование МССПД разрабатываются на основании ПЗС НАКУ КА НСЭН и ПЗКС нормативных суток до проведения СС КА.

Оперативное планирование применения ТС НАКУ КА НСЭН выполняется на односуточном или двухсуточном интервале на 3-5 суток вперёд группой планирования ЦСАКП.

Рассмотрим более подробно методы и алгоритмы процесса планирования применения ТС НАКУ КА НСЭН (в том числе и каналов связи МССПД) который состоит из следующих этапов:

1) разработка постановки задачи оперативного планирования;

2) сбор исходных данных, необходимых для разработки планов;

3) анализ качества собранных исходных данных;

4) разработка предложений в план (вариантов планов);

5) оценка разработанных предложений в план (вариантов планов);

6) формирование плана на основе разработанных предложений либо выбор одного из оптимальных планов в качестве рабочего;

7) согласование и утверждение рабочих планов;

8) разработка распоряжений для реализации планов;

9) доведение распоряжений до исполнителей;

10) контроль исполнения распоряжений.

Сектор управления осуществляют заказ средств в группе планирования ЦСАКП. Заказ оформляется в виде заявки на задействование средств в соответствии с установленной формой. На основании заявок секторов управления КА, данных мониторинга состояния ТС НАКУ и объектов ОГ КА группой планирования ЦСАКП разрабатываются предложения в ПЗС либо варианты планов исходя из сценариев распределения СС по ЗРВ.

Разработанные предложения в план (варианты планов) оцениваются на соответствие выбранному критерию (критериям) эффективности по значению целевой функции плана. Если оценка положительная, то выбираются

соответствующие предложения (вариант плана) и осуществляется переход к следующему этапу планирования, иначе – переход к другому сценарию планирования.

На основании использованного алгоритма планирования из разработанных вариантов плана (предложений в план) выбирается наиболее оптимальный вариант плана и представляется на утверждение.

В процессе планирования могут возникать конфликтные ситуации (КС).

С точки зрения задействования средств под конфликтной ситуацией понимают ситуацию, когда штатных средств НКУ недостаточно для удовлетворения заявки (пунктов заявки) на организацию проведения СС.

Причинами КС могут быть:

- выход из строя технических средств НКУ КА НСЭН;

- увеличение нагрузки на средства НКУ КА НСЭН сверх нормы (перерасход ресурса);

- возникновение конфликта из-за необходимости задействования одних и тех же средств НКУ в одно и тоже время для разных КА или (и) РБ.

КС разрешаются одним из следующих способов:

- расчет нового варианта плана (перепланирование) задействования средств НКУ, в том числе изменение конфликтного пункта заявки для его удовлетворения иным способом (например, запись полученной с КА информации на пункте приёма и передача её в СУ НКА в другое время, перенос СС на другой КИП (КИС) и др.);

- задействование резервных ресурсов НАКУ КА НСЭН;

- задействование (при возможности) средств сторонних организаций, в том числе НАКУ Минобороны России.

Задачи оптимального планирования приобретают повышенную актуальность при увеличении количества КА, снижении ресурсов средств наземного автоматизированного комплекса управления (НАКУ), а также в связи с различными условиями полета и орбитальным построением

группировок КА [17].

Принципиальным отличием управления крупномасштабными орбитальными группировками от управления единичными КА является то, что решение целевых задач существенно зависит не только от непосредственного принятия управленческих решений, но и от выбора структуры и состава системы управления КА (наземные средства управления, аппаратно-программные средства КА и НКУ, интерфейсы информационного взаимодействия, бортовая аппаратура и т. п.). При этом функционирование каждого из указанных элементов описывается разнотипными специфическими моделями, что существенно затрудняет формализацию процесса управления традиционными классическими методами оптимизации. Как показал анализ существующей литературы, отсутствует общий методологический подход к исследованию проблем оптимизации космической инфраструктуры управления КА [10].

По мере расширения состава и целевых функций КА повышаются требования к организации процесса эксплуатации группировок КА из ЦУП, как центрального звена наземного комплекса управления. В первую очередь это связано с ожидаемым увеличением объема выполнения управленческих операций, таких как:

- оперативное отражение нештатных ситуаций непосредственно в сеансах связи с КА;

- подготовка и реализация экстренных маневров КА, в том числе для уклонения от потенциально опасных объектов космического мусора;

- осуществление внеплановых коррекций программ полета КА по заявкам потребителей целевой информации.

При техническом оснащении КА абонентской аппаратурой ретрансляции (ААР), для формирования планов задействования наземных и спутниковых средств НКУ будет использоваться многофункциональная космическая система ретрансляции (МКСР). Планирование задействования средств ретрансляции проводится «Центром управления ретрансляцией и

связью» (ЦУРС) [16].

Анализ технологий планирования ЦСАКП и ЦУРС показывает, что при обеспечении общих требований к оперативному планированию задействования средств наземного комплекса управления (НКУ) или МКСР «Луч», решение вопроса комплексного задействования каналов информационного обмена (КИО) в настоящий период времени может решаться только в рамках стратегии раздельного планирования (в отличие от стратегии комплексного планирования задействования КИО при наличии единого планирующего органа (ПлО). Данная стратегия предусматривает разработку отдельных вариантов планов с последующим обменом информации между ПлО о свободных ресурсах и о требуемых ресурсах для удовлетворения требований сектора управления (СУ) низкоорбитального космического аппарата или о характеристиках СС, проведение которых не может быть обеспечено соответствующим контуром управления. К этим задачам, в первую очередь, следует отнести:

- рациональное задействование средств управления для обеспечения эффективного процесса управления группировками КА, в том числе внесение корректив в распределение указанных средств в связи с возможным возникновением нештатных ситуаций;

- оперативное перераспределение функций между отдельными КА для повышения качества и скорости получения целевой информации;

- проведение коррекций поддержания орбитальных параметров относительного расположения однородных КА, составляющих правильно построенную баллистически спутниковую систему КА.

1.1.1 Организация управления существующими большими группировками.

В России сейчас можно выделить несколько орбитальных группировок, которые вполне претендуют на роль больших ОГ КА. К их числу можно отнести орбитальную группировку «Глонасс», орбитальную группировку

«Гонец», орбитальную группировку спутников ФГУП «Космическая связь» и ряд других ведомственных более мелких орбитальных группировок.

В состав орбитальной группировки ГК «Роскосмос» входит и космическая система Российского сегмента Международной космической станции с пилотируемыми и грузовыми космическими аппаратами серии «Союз МС» и «Прогресс-МС», управление которыми ведется из ЦУП АО «ЦНИИмаш».

Можно определить, как развивающиеся орбитальные группировки космических аппаратов научного и социально-экономического назначения (КА НСЭН), управление которыми осуществляется из секторов управления, расположенных в ЦУП АО «ЦНИИмаш».

Целесообразно рассмотреть на их примере как организовано управление этими орбитальными группировками и определить основные тенденции, направления, методы и алгоритмы их дальнейшего развития и совершенствования с учетом создания средств оптимального управления крупномасштабными орбитальными группировками (КОГ).

Общий состав орбитальной группировки Государственной корпорации по космической деятельности «Роскосмос» имеет вид, представленный на рисунке 1.1

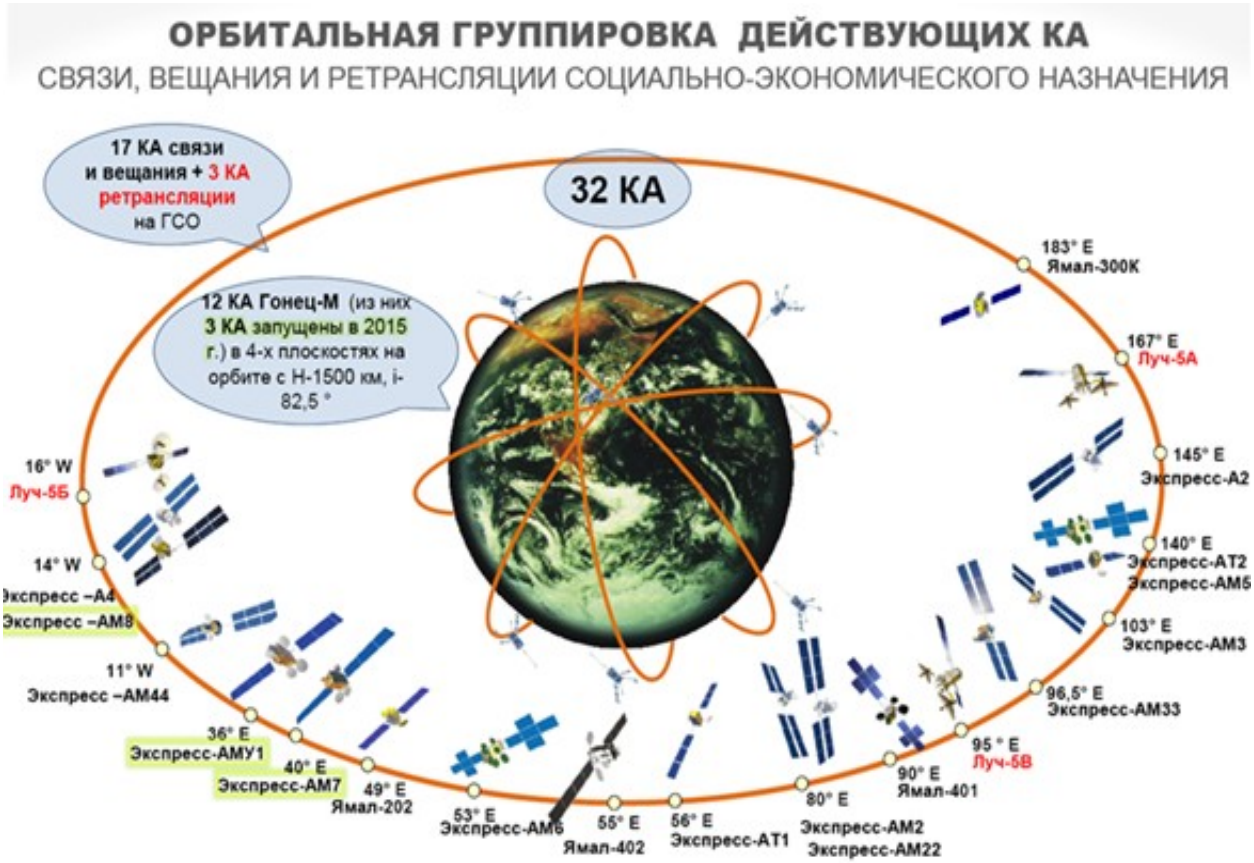


Рисунок 1.1 - Состав ОГ ГК «Роскосмос»

1.2 Характеристика и особенности управления орбитальной группировкой КА «Глонасс»

Всего в составе ОГ «Глонасс» 27 КА на 2020 год:

- используются по целевому назначению 24 КА
- на этапе ввода в систему -
- временно выведены на техобслуживание -
- на исследовании Главного конструктора -
- орбитальный резерв 2 КА
- на этапе летных испытаний 1 КА.

На рисунке 1.2 представлена орбитальная группировка «Глонасс».

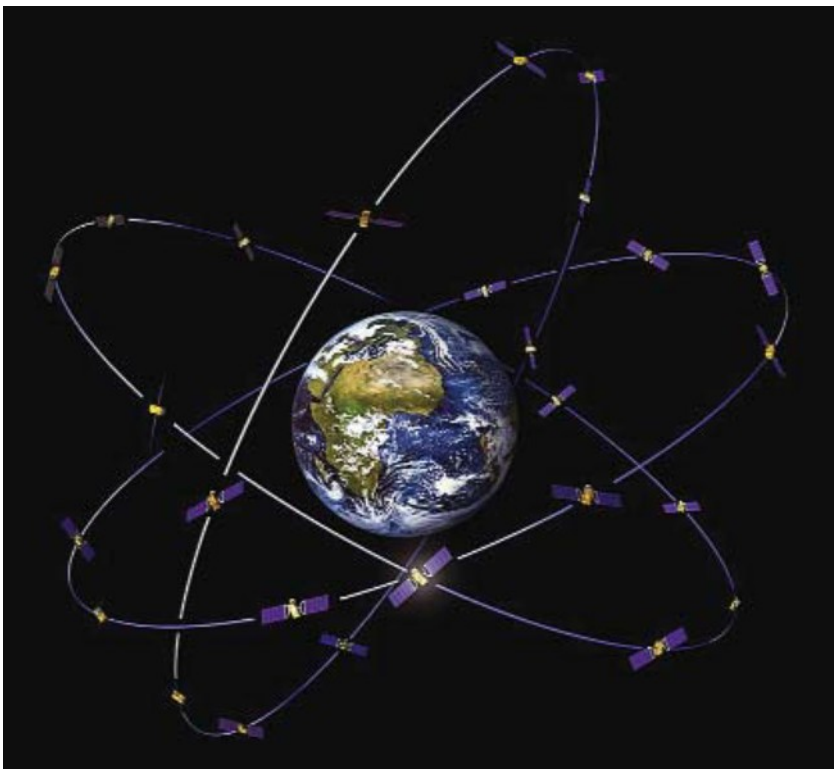


Рисунок 1.2 - Орбитальная группировка «Глонасс»

Управление орбитальной группировкой «Глонасс» осуществляет наземный комплекс управления (НКУ), входящий в НАКУ МО и не связанный с ГК «Роскосмос». Она включает в себя Центр управления системой (ЦУС), г. Голицыно-2, Московская область, и сеть станций слежения и управления, рассредоточенных по всей территории России (см. рис. 1.3).

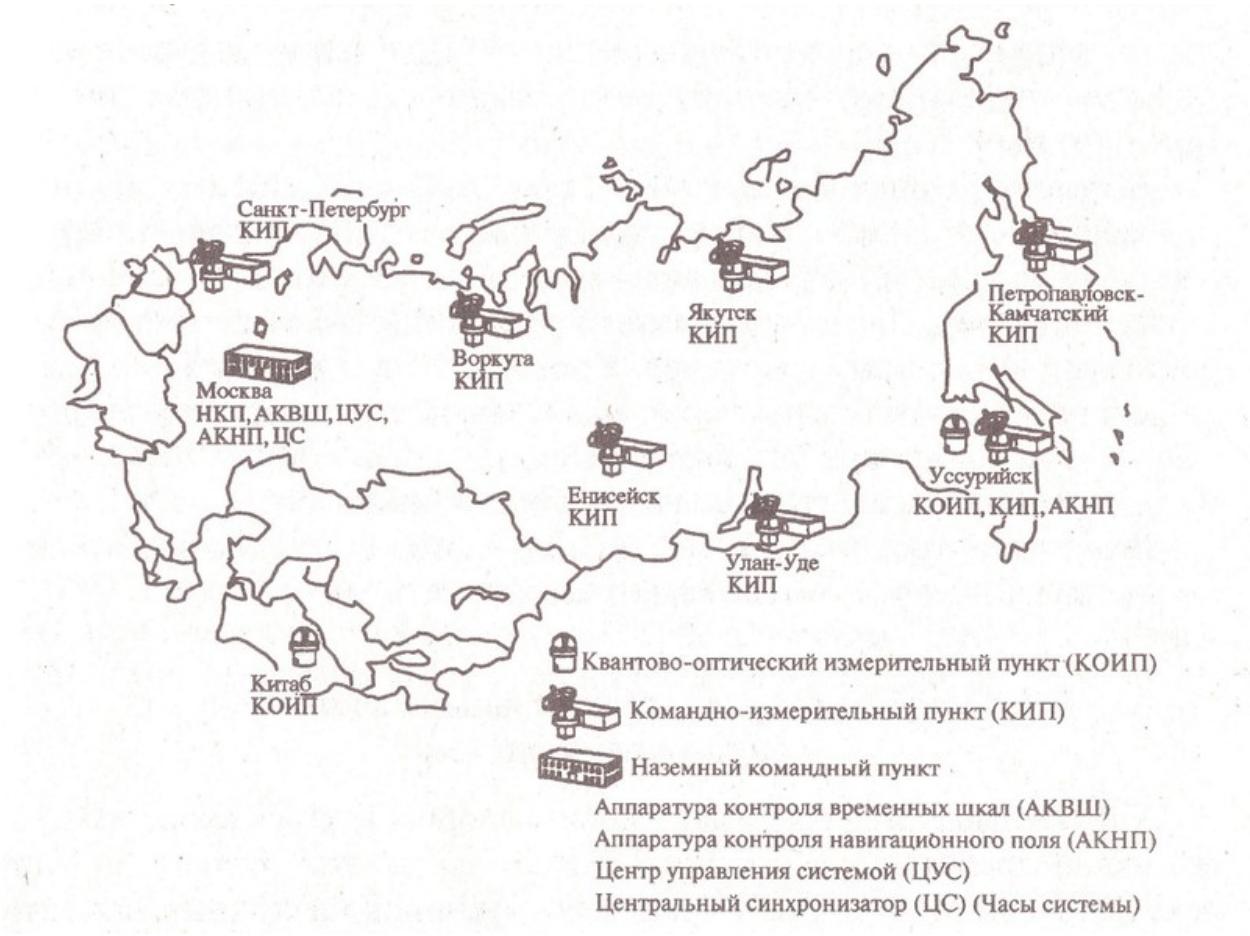


Рисунок 1.3 - Сеть станций слежения и управления, рассредоточенных по всей территории России

НКУ ОГ «Глонасс» осуществляет сбор, накопление и обработку траекторной и телеметрической информации со всех спутников группировки, выдачу на каждый спутник команд управления и навигационной информации из центра управления системой «Глонасс» [14].

В состав НКУ входит Центр управления системой «Глонасс» (ЦУС, см. рис. 1.4), наземный командный пункт (НКП), центральный синхронизатор (ЦС), аппаратура контроля временных шкал (АКВШ) и аппаратура контроля навигационного поля (АКНП), сеть наземных командно-измерительных пунктов (КИП) и квантово-оптический измерительный пункт (КОИП).

НКУ предназначен для обеспечения навигационного КА служебной информацией, необходимой при проведении навигационных сеансов, а также для контроля и управления этими КА.



Рисунок 1.4 – ЦУС «Глонасс»

НКУ решает следующие основные задачи:

1. Управление орбитальной группировкой НКА, контроль бортовых систем, закладка на борт управляющих команд и специальной информации, поддержание заданной конфигурации группировки НКА, планирование, проведение регламентных работ, принятие необходимых мер в нештатных ситуациях и др.

2. Эфемеридно-временное обеспечение - определение параметров орбит НКА, расхождений «часов» каждого навигационного космического аппарата (НКА) относительно системной шкалы времени, передача на борт НКА информации об их точном положении и расхождении бортовых «часов» с системной шкалой времени для последующей передачи в навигационном сигнале указанной информации потребителям, контроль характеристик навигационного поля и др.

1.3 Особенности управления орбитальной группировкой КА многофункциональной системы персональной спутниковой связи данных (МСПСС) «Гонец –Д1М».

В настоящее время в МСПСС «Гонец-Д1М» [27] развёрнуты и функционируют:

- космический комплекс в составе:
  - 9 действующих (всего 12) КА «Гонец-М» на низкой круговой орбите с наклонением 82,5° и высотой 1500 км, разнесённые в 4-х плоскостях (по 3 КА в плоскости);
  - центр управления полетом (г. Железногорск, АО «ИСС»); баллистический центр (г. Железногорск, АО «ИСС»);
  - центральная станция (г. Железногорск, АО «ИСС»);
- связной комплекс в составе:
  - центр управления связным комплексом (г. Москва, АО «НИИ ТП»),
  - центральная станция (г. Москва, АО «НИИ ТП»);
  - региональная станция (г. Москва, АО «НИИ ТП»);
  - региональная станция (г. Железногорск, АО «ИСС»);
  - региональная станция (г. Южно-Сахалинск, СКБ САМИ ДВО РАН);
  - центр управления системой (г. Москва, АО «НИИ ТП»);
  - комплекс предоставления услуг связи (КПУС);
  - наземные средства потребителей.

Центр управления системой решает основные задачи управления орбитальной группировкой спутников:

- планирование и координацию работ по развертыванию орбитальной группировки;
- прием и анализ телеметрической информации;
- формирование и передачу командно-программной информации для управления спутниками;

- проведение траекторных измерений и определение параметров орбиты спутников.

На рисунке 1.5 представлен ЦУП «Гонец-Д1М».



Центр управления полетами

Рисунок 1.5 - ЦУП «Гонец-Д1М»

Управление системой связи включает:

- распределение ресурсов системы (пропускной способности) между различными потребителями;
- координацию и планирование работы региональных станций, в том числе передачу им необходимой технологической информации;
- проверку работоспособности элементов системы связи и выдачу разрешения на ввод их в эксплуатацию.

На рисунке 1.6. представлена схема управления системой связи.



Рисунок 1.6 - Схема управления системой связи

1.4 Характеристика и особенности управления орбитальной группировкой КА ФГУП «Космическая связь»

ОГ КА ФГУП «Космическая связь» [25,26] - одна из крупных орбитальных группировок, состоящая из 13 КА серии «Экспресс» (см. рис. 1.7), в том числе:

- 1 КА «Экспресс-А4»;
- 9 КА серии «Экспресс-АМ» («Экспресс-АМ22», «Экспресс-АМ2», «Экспресс-АМ3», «Экспресс-АМ33», «Экспресс-АМ44», «Экспресс-АМ5», «Экспресс-АМ6», «Экспресс-АМ7», «Экспресс-АМ8»);
- 2 КА серии Экспресс-АТ ("Экспресс-АТ1 и Экспресс-АТ2»);
- 1 КА «Экспресс-АМУ1».



Рисунок 1.7 - 13 КА серии «Экспресс»

Наземная инфраструктура ФГУП «Космическая связь» имеет в своем составе:

- Центра Космической Связи (ЦКС) «Дубна»;
- ЦКС «Медвежьи озера»;
- ЦКС «Железногорск», организован в мае 2004 года;

- ЦКС «Сколково», образован в октябре 2003 года;
- ЦКС «Хабаровск», работает с 2004 года;
- Технический Центр «Шаболовка»;
- ЦКС (ССС) «Владимир».

Рассмотрев реализацию эксплуатации выше отмеченных орбитальных группировок, можно сделать вывод о том, что в рамках своих ОГ все используют типовые КА, которые обладают своей спецификой бортовых средств и, соответственно, имеют свою наземную инфраструктуру, включающую наземные станции и специальные каналы связи.

Как отмечалось выше, НКУ имеют специфическое оборудование, они не входят в состав средств НАКУ КА НСЭН и измерений. НКУ создаются с расчетом на полный ресурс эксплуатации ОГ КА, где вопросы оптимального задействования средств управления заложены при создании самой космической системы.

1.5 Построение и методы управления орбитальной группировкой Российского сегмента Международной космической станции.

Обеспечение управления Российским сегментом Международной космической станции организовано с задействованием наземных средств Министерства обороны и НАКУ КА НСЭН и измерений [1,2].

На рисунке 1.8 представлен зал управления РС МКС.



Рисунок 1.8 – Зал управления РС МКС

Для управления Российским сегментом МКС задействование наземных средств осуществляется через «Группу реализации» МО или через ЦСАКП и ЦУРС, если планируются средства НАКУ КА НСЭН и измерений [8].

В настоящее время для обмена информацией между ЦУП РС МКС и РС МКС используется кроме наземного контура еще и спутниковый контур МКСР «Луч».

Применительно к этой орбитальной группировке сложно в ближайшее время прогнозировать ее значительное расширение и переход в категорию больших орбитальных группировок (ФКП 2016 - 2025).

Технологический цикл управления для геостационарных СР предусматривает порядок взаимодействия СУ с КА при каждом изменении программы ретрансляции, однако эти КА работают с выделенными КИС, что не создает проблем с их управлением при обеспечении выполнения работ по целевому назначению [25].

Все эти положения полностью относятся и к МСПСС «Гонец». Основное отличие заключается в том, что данная орбитальная группировка обеспечивает подвижную спутниковую связь, которая реализуется бортовыми алгоритмами КА. Выше было сказано, какие основные функции выполняют средства НКУ для управления ОГ «Гонец» [29].

Здесь также, основная функция управления заключается в обеспечении режима работы бортовых средств КА по целевому назначению.

При анализе организации управления ОГ ФГУП «Космическая связь», все вышесказанное в полной мере относится и к этой ОГ, но, безусловно, с учетом особенностей выполнения целевых функций ОГ ФГУП «Космическая связь». Однако специализированный НКУ используется аналогично, как и средства ранее рассмотренных ОГ.

1.6 Построение и методы управления орбитальной группировкой КА НСЭН из ЦУП АО «ЦНИИмаш».

Самым крупным центром управления космическими полетами является ЦУП АО «ЦНИИмаш». Здесь много лет осуществляется управление пилотируемыми и автоматическими КА различного назначения.

Орбитальная группировка пилотируемых и автоматических КА НСЭН создана и будет развиваться в рамках работ, определенных ФКП 2016 - 2025.

В настоящее время на предприятие ведется управление орбитальной группировкой КА в следующем составе:

1. Космические аппараты в составе Международной космической станции (МКС):

- служебный модуль «Звезда»;
- стыковочный отсек «Пирс»;
- малый исследовательский модуль «Поиск»;
- малый исследовательский модуль «Рассвет»;
- транспортные и пилотируемые корабли серии «Прогресс-МС» и «Союз - МС»;

2. Космические аппараты научного и социально-экономического, назначения:

- спутники дистанционного зондирования Земли (Ресурс П, Канопус-В).
- научные спутники гидрометеорологического и океанографического назначения Электро-Л).
- спутники ретрансляции Многофункциональной космической системы ретрансляции «Луч» (Луч-5А/Б/В).
- малые космические аппараты для фундаментальных космических исследований. (КА серии «Бион», «Фотон»).

Для управления этими космическими аппаратами сектора управления задействуют КИС балтийского командно-измерительного пункта (БКИП), западного командно-измерительного пункта (ЗКИП), центрального командно-измерительного пункта (ЦКИП) и восточного командно-измерительного пункта (ВКИП).

В настоящее время практически без конфликтов происходит согласование задействования наземных средств, однако увеличение числа ОГ и количества КА, в том числе согласно ФКП 2016-2025, входящих в состав ОГ ЦУП АО «ЦНИИмаш» ставит вопрос о рассмотрении планирования средств НКУ с учетом выработанных математических теорий управления, для задействования БКИП, ЗКИП, ЦКИП, ВКИП оптимальным образом и обмена информацией между КА, РС МКС и ЦУП АО «ЦНИИмаш» [18].

Целесообразно в качестве единого ЦУП управления большой орбитальной группировкой, использовать ЦУП АО «ЦНИИмаш».

ЦУП оснащен аппаратно-программными средствами, обеспечивающими управление различными типами КА. Наземные средства используются из состава НАКУ КА НСЭН и измерений. Результатом ВКР должны быть разработанные метод и алгоритмы, которые позволят обеспечить оптимальное использование ресурсов, имеющихся в составе НАКУ.

Решение задачи оптимального планирования использования средств НАКУ позволит повысить степень загрузки КИП, увеличив коэффициент их использования, а это позволит обеспечить выполнение большего количества сеансов связи без дополнительного привлечения новых средств НКУ.

2. Разработка методов и алгоритмов распределения средств управления крупномасштабной орбитальной группировки КА

2.1 Общая постановка задачи оптимального управления средствами НАКУ

Рассмотренные материалы в разделе 1, показали, что, не смотря на созданную в ЦУП АО «ЦНИИмаш» структуру планирования задействования наземных средств ЦСАКП, вопрос оптимального использования НКУ для управления крупномасштабной орбитальной группировки КА не реализован. Методы и решения, которые рассматривались ранее, не ориентированы на обслуживание большого числа КА.

Рассмотренные варианты управления большими орбитальными группировками не решают проблемы создания программного комплекса для реализации задачи по управлению крупномасштабной ОГ КА.

В работах [34, 37] показана актуальность и необходимость решения этой проблемы для нашей страны. Рассмотрены некоторые вопросы проектирования рациональных схем распределения средств управления при эксплуатации крупномасштабных орбитальных группировок КА [23], а также стохастический метод формализации процесса оптимального распределения наземных средств управления группировками КА [35].

На основе проведенного анализа и исследований рассматриваемой были разработаны необходимые методы и алгоритмы. Похожие решения нашли отражение в работах по теории методов управления, где представлены различные направления для решения подобных задач.

Одно из таких направлений, базирующихся на основе теории управления - это теория оптимизации иерархических систем, которое и было взято за основу разработки метода и алгоритма для программного комплекса оптимального управления крупномасштабными орбитальными группировками КА [15].

Этот подход позволил выработать условия оптимальности решения задачи обслуживания потока запросов и на его основе разработать

программный комплекс моделирования расчета оптимального задействования средств НАКУ для управления крупногабаритной орбитальной группировкой [37].

Для формирования общей постановки задачи оптимального управления средствами НАКУ КОГ КА, введем следующие понятия:

1. Решение задач управления полетами КА можно рассматривать как функцию взаимодействующих сложных открытых систем, направленную на упорядочение, сохранение и повышение их целостности, т. е. на достижение устойчивых состояний в условиях влияния возмущающих факторов и с учетом поставленных целей.

2. Перспективные системы управления полетами будут состоять из различного числа управляющих звеньев, причем количество и взаимосвязь этих звеньев будет динамически изменяться в процессе реализации программы полета в зависимости от текущих целей и задач для перспективной космической инфраструктуры.

3. Структура, в рамках которой происходит взаимодействие таких управляющих звеньев, вполне может быть подвержена изменениям от жесткой иерархической организации к усилению горизонтальных связей и обратно.

4. При взаимодействии управляющих звеньев одновременно будут протекать и процессы дифференциации и интеграции. Дифференциация заключается в появлении новых участников процесса управления полетом, новых управляющих звеньев, при этом возможна ситуация деления одного звена на несколько управляющих звеньев. Интеграция — это объединение всех участников управления полетами в единой системе.

5. Сложность структуры управления полетами космических комплексов будет возрастать как результат постоянного протекания процессов интеграции и дифференциации новых участников процесса управления полетом, новых управляющих звеньев.

6. Информационный обмен между управляющими звеньями будет возрастать, в связи с этим будут предъявляться определенные требования как

к средствам обмена информацией, например, наземной сетевой инфраструктуре и интерфейсам, так и к методам и процедурам организации взаимодействия.

7. «Центр тяжести» продолжит смещаться от иерархической структуры, обеспечивающей прямое подчинение одних структурных элементов другим, к организации единого информационного пространства, при котором достигается максимально возможный уровень эффективности функционирования как отдельных управляющих звеньев, так и системы управления полетом в целом.

Эффективная организация распределенного управления предполагает решение комплекса задач согласованного функционирования элементов космической инфраструктуры. Одной из основных задач, входящих в этот комплекс, являются образование единого коммуникативного пространства, поддерживающего взаимодействие большого количества разнородных элементов системы управления полетом, обеспечение эффективной координации разных групп управления полетом внутри этого пространства.

Эффект достижения согласованной работы элементов распределенного управления полетом может быть усилен при всестороннем использовании практического опыта управления космическими аппаратами [24].

Для планирования задействования этих наземных средств и формирования планов задействования средств (ПЗС) НКУ, Центр ситуационного анализа, координации и планирования собирает поступающие из секторов управления КА заявки, обобщает, анализирует их и готовит планы сеансов связи (ПСС), на основании которых и обеспечивается работа с КА отдельно и в составе орбитальных группировок. В настоящее время практически удается согласовывать задействование наземных средств без конфликтов, однако увеличение числа ОГ и количества КА, входящих в их состав, вызывает серьезную озабоченность на фоне слабого увеличения состава наземной инфраструктуры (числа КИС). Дополнительная нагрузка получается на БКИП, ЗКИП, ЦКИП, ВКИП ввиду того, что эти средства

начинают задействовать для управления группировкой КА из состава РС МКС.

Есть еще одна отличительная особенность этих ОГ КА от ОГ КА НСЭН, которые управляются из ЦУП АО «ЦНИИмаш». Она заключается в том, что интенсивность информационного обмена между КА НСЭН и их СУ, во много раз выше, чем у КА рассмотренных выше «больших» ОГ. Это обусловлено спецификой и целевыми задачами, которые возложены на эти КА. В нашем случае обмен между КА НСЭН и СУ обусловлен более динамичной сменой указаний для работы целевой аппаратуры, (ретрансляция МКСР, ДЗЗ, метеоданные и др.).

По результатам проведенных исследований задействования средств НКУ для управления различными ОГ КА, можно сделать вывод о том, что целесообразно за аналог для разработки модели и алгоритмов управления крупномасштабной орбитальной группировки взять наземную и спутниковую структуру орбитальной группировки КА НСЭН, как с наиболее полно представленной номенклатурой выпускаемых в ГК «Роскосмос» КА и использующих средства НАКУ КА НСЭН и измерений. Соответственно единым ЦУП управления целесообразно определить ЦУП АО «ЦНИИмаш» [21,22].

Процесс планирования является сложной системой, имеющей свое назначение, функции, потоки, структуру, желаемый результат. При этом процесс планирования должен быть сам спланирован. Любой план имеет три общие компоненты:

1) начальное состояние;

2) цель (или конечное состояние);

3) средства (ресурсы), обеспечивающие связь этих состояний.

К настоящему времени сформировалось три подхода планирования [15, 21]:

1) сатисфакционное (инкрементальное) — учитываются реакции сложных организационно-технических системам (СОТС) на внешние

воздействия;

2) формальное — делает акцент на предсказании развития обстановки (в терминах математических моделей);

3) системное планирование — вариант, при котором стремятся способствовать взаимодействию СОТС с внешней средой.

При системном планировании проблемы не решаются, а скорее, разрешаются и постоянно переопределяются, поэтому в данном случае процесс планирования трактуется не как дискретная деятельность, а как непрерывно развивающийся адаптивный процесс. В работе [9] данный вид планирования назван адаптационным. При этом адаптация планов проводится на основе апостериорной, текущей и априорной информации (адаптация к прошлому, настоящему и будущему соответственно).

2.2 Методы оптимизации структуры управления орбитальными группировками

Рассмотрим общий подход по разработке метода оптимизации расчета средств управления крупномасштабными группировками КА. Следует отметить, что известны различные подходы к исследованию аналогичных проблем [20, 36] для сложных систем управления, основанные на методах теории массового обслуживания и теории множеств. Вместе с тем представляется целесообразным применение методологического подхода, который базируется на теории оптимизации иерархических систем управления [3–6].

Общая теория иерархических многоуровневых систем представлена, в работе [15].

В основу метода положены принципы формирования иерархических систем с последующей оптимизацией процессов взаимодействия элементов с различным уровнем сложных систем [7, 8].

Многоуровневая иерархия возникает как компромисс между необходимостью быстрой обработки огромных объемов информации для

адаптации к меняющейся обстановке, и ограниченности возможностей отдельных систем и является моделью структуры многих реальных систем.

2.3 Анализ функционирования элементов наземного комплекса

Для разработки эффективных методов поиска оптимальных иерархий необходимо сделать предположение о виде функции отдельных систем – ограничивать рассмотрение некоторым их классом. Эти предположения могут следовать из той или иной содержательной постановки или вводиться из соображений математического удобства. Для настоящего исследования характерно вводить ограничения на функции систем иерархии из общих соображений, не упуская, однако, из виду необходимости описания с помощью таких функций реальных задач [3,6].

Процесс управления группировками КА позволяет выявить следующие основные иерархические уровни (см. рис. 2.1):

1) уровень координации в процессе принятия управленческих решений (верхний уровень) — реализует координацию всех действий по управлению для наиболее эффективного выполнения целевых функций КА;

2) уровень самоорганизации — реализует выбор алгоритмов, используемых на нижних уровнях иерархии, для обеспечения решения главных задач управления;

3) уровень адаптации — осуществляет конкретизацию множеств неопределенностей для подсистем верхних уровней путем анализа текущей ситуации и выработки требований к алгоритмам решения задач подсистемами нижнего уровня;

4) уровень выбора — осуществляет решения частных задач в соответствии с исходными данными и алгоритмическими предписаниями от подсистем высшего уровня. Их взаимодействие отражено на рис. 2.1.

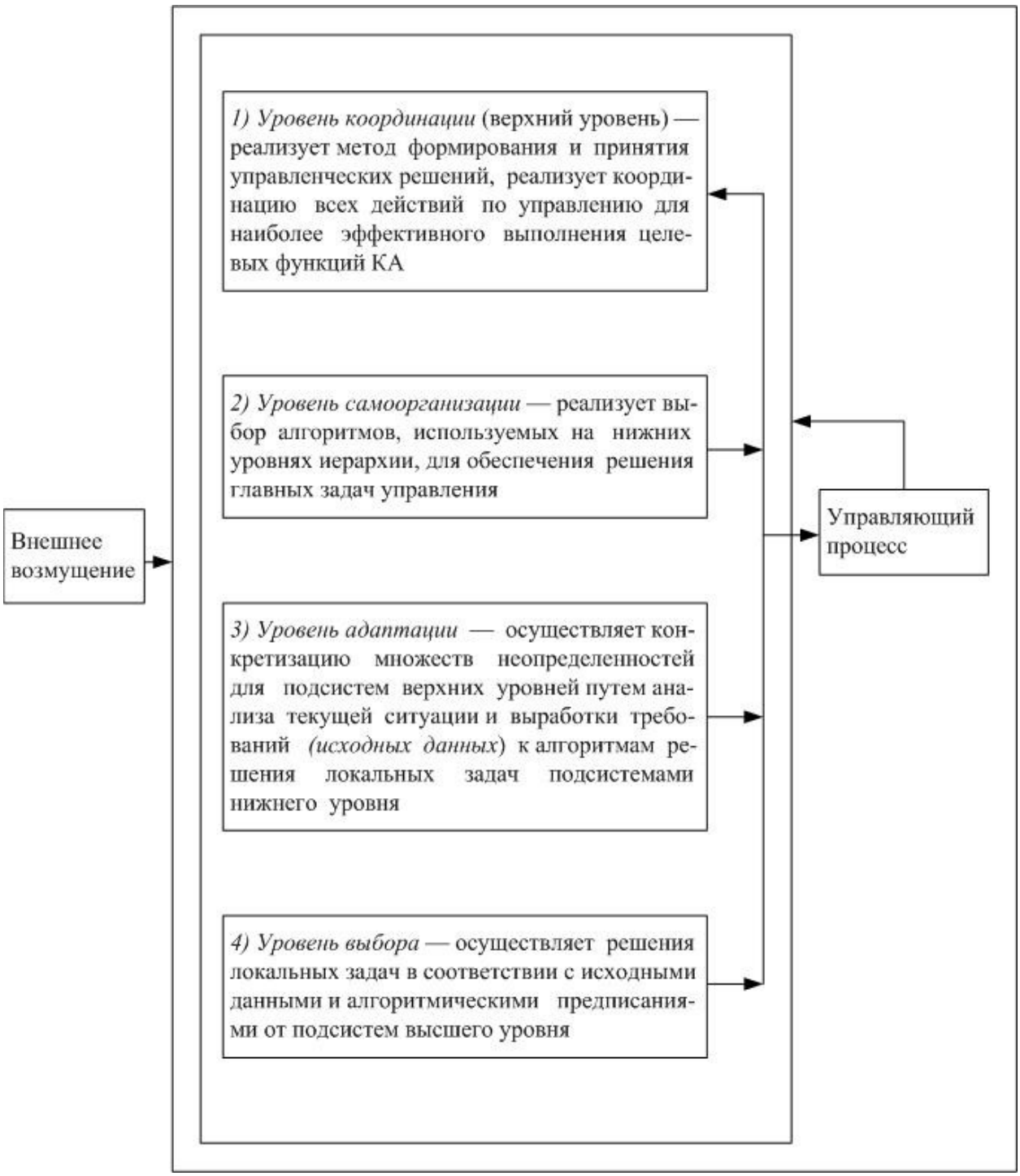


Рисунок 2.1 - Взаимодействие иерархических уровней

Большие системы могут быть иерархически управляемы, для чего сначала надо провести декомпозицию на подсистемы, затем согласовать полученные подзадачи, преобразовывая сложную систему в многоуровневую. Этого преобразования можно достичь различными путями. Однако, все эти пути, по сути, есть комбинация всего двух отдельных подходов: согласование

модели и согласование цели.

Когда количество элементов нижнего уровня мало, эта задача может решаться полным перебором всех возможных иерархий (понятно, что в общем случае произвольной функции планирования это единственный способ решения) [39]. Однако обычно допустимых иерархий настолько много, что даже задать функцию планирования перечислением ее значений для всех иерархий из множества невозможно. Тогда эта функция определяется аналитическим выражением или алгоритмом, которые зависят от структурных параметров иерархии – количества исходных значений и т.п.

Для разработки эффективных методов поиска оптимальных иерархий необходимо делать предположения о виде разрабатываемой функции – ограничивать рассмотрение некоторым их классом. Эти предположения могут следовать из той или иной содержательной постановки или вводиться из соображений математического удобства. Для настоящего исследования характерно как раз вводить ограничения на разрабатываемые функции иерархии из общих соображений, не упуская, однако, из виду необходимости описания с помощью таких функций реальных задач.

Ниже формулируется понятие секционных функций, которые позволяют моделировать и решать широкий класс задач поиска оптимальных иерархий.

2.4 Методологический подход к определению оптимальной структуры и состава иерархических систем

Сформулируем методологический подход к определению оптимальной структуры и состава иерархических систем.

Введем обозначения:

C_1 — подсистема верхнего уровня;

$C_{2i}\ (i=1,2,\ldots,I)$, $C_{3j}\ (j=1,2,\ldots,J)$, $C_{4k}\ (k=1,2,\ldots,K)$ – совокупности подсистем второго, третьего и четвертого иерархических уровней соответственно;

P – управляющий процесс;

m – множество управляющих воздействий;

m_2, m_3, m_4 – подмножества множества управляющих воздействий;

ω – множество внешних возмущений;

r – множество информационных воздействий, выдаваемых подсистемами второго, третьего и четвертого уровней;

r_2, r_3, r_4 – подмножества множества информационных воздействий;

s – множество координирующих воздействий;

y – множество выходных воздействий;

k – множество информационных воздействий, выдаваемых подсистемой верхнего уровня;

u – множество связей между элементами системы.

Представим на рисунке 2.2 модель функционирования системы управления в терминах теории множеств.



Рисунок 2.2. Функционирование системы управления в терминах теории множеств

Управляющий процесс задается отображением:

$$P : m \times \omega \rightarrow y .$$

Модель координатора представляется в виде:

$$C_1 : k \rightarrow s .$$

Модель функционирования s-ой подсистемы (s = 2, 3, 4) реализуется в виде отображения:

$$C_s : s \times r_s \rightarrow m_s .$$

Соответственно информационные обратные связи всех уровней иерархии реализуются отображениями:

$$f_1 : S \times R \times M \rightarrow K; \; f_s : m_s \times \omega \times y \rightarrow r .$$

Глобальная задача оптимизации отражает основную цель управления и формируется в следующей постановке: требуется определить такое множество управляющих воздействий *m*, при которых глобальная целевая функция

$$g(m) = G\left[m, P(m)\right]$$

достигает своего максимума, что соответствует оптимальному процессу функционирования системы управления. Применительно к рассматриваемой задаче оптимизации методов управления орбитальными группировками в качестве целевых функций могут быть использованы: время выполнения операций СС, минимум числа задействованного персонала управления КИС, минимум эксплуатационных затрат и др.

При рассмотрении локальных оптимизационных задач, определяющих функционирование системы, предполагаем, что управляющий процесс представлен в виде композиции подпроцессов

$$P_s (\text{S=1,2,3,4}) ,$$

взаимодействующих между собой. Причем взаимодействие каждого подпроцесса P_s с другими, реализуется через множество связей между элементами системы U_s.

Для локальной оптимизационной задачи, решаемой *s*-м управляющим подпроцессом нижнего уровня, локальная оптимизационная функция качества решения данной задачи имеет вид:

$$g_s(m_s, u_s) = G\left[m_s, P_s(u_s, m_s)\right]$$

Таким образом, предлагаемый **метод** позволяет решать основную

оптимизационную задачу с помощью рассмотрения совокупности локальных задач, формирования множества управляющих воздействий, подаваемых на всех иерархических уровнях системы при заданном ее структурном построении, и получать альтернативные варианты иерархических систем для построения их оптимальных моделей.

2.5 Формальное описание алгоритма расчета оптимального задействования средств НКУ крупномасштабной орбитальной группировки

Опираясь на предлагаемый метод, разработаем алгоритм расчета оптимального задействования средств НКУ крупномасштабной орбитальной группировки.

Алгоритм расчёта оптимального планирования сеансов связи между средствами НКУ и крупномасштабной орбитальной группировкой.

Особенностью решения данной задачи является отсутствие общих закономерностей взаимодействия наземных пунктов с КА в интервалы одинаковой продолжительности, разнесенные по времени. Это объясняется тем, что в общем случае КА имеют различные периоды обращения, наклонения и восходящие узлы орбиты. Поэтому, распределение средств управления для одного заданного временного интервала, например, для одних суток полета, будет существенно отличаться от аналогичного распределения для других суток.

В рамках решения поставленной задачи требуется разработать алгоритм, выполнение которого обеспечит оптимальное задействование наземных комплексов управления для запрашиваемого количества сеансов связи с КОГ КА.

2.6 Решение локальной задачи разработки алгоритма оптимального управления НКУ крупномасштабной орбитальной группировкой

Рассмотрим локальную задачу, в которой требуется разработать алгоритм оптимального управления НКУ крупномасштабной орбитальной

группировкой, состоящей из N космических аппаратов (КА) с исходными орбитальными параметрами, использующих задействование M наземных измерительных пунктов (НИП).

Для конкретизации решаемой задачи, в качестве временного интервала распределения средств управления выбирались одни сутки полета.

Для решения указанной задачи составляются циклограммы зон радиовидимости каждого из M наземных измерительных пунктов для всех N космических аппаратов, входящих в орбитальную группировку [33, 40].

Эти циклограммы можно представить в виде множества возможных сеансов связи (СС). Если при подаче заявок на СС указываются желаемые интервалы времени, то из этого множества убираем СС, не лежащие полностью в одном из интервалов. Ведем следующие обозначения:

$S = \{(i, n_i, m_i, t_{нi}, t_{кi}, c_i, s_i)\}$, где

i – номер возможного сеанса связи (СС);

n_i – номер КА;

m_i – номер НИП;

$t_{нi}$, $t_{кi}$ – время начала и конца СС,

c_i – число конфликтов с другими СС на данном временном интервале (элементы с номерами i и j конфликтуют, если $m_i=m_j$ и $(t_{нi},\ t_{кi}) \cap (t_{нj}, t_{кj}) \neq \varnothing$),

$$s_i = \begin{cases} 1, \text{ если СС входит в план} \\ 0, \text{ если СС не входит в план} \end{cases}$$

До начала вычислений все $s_i=0$;

Упорядочим элементы S так, что $c_1 \le c_2 \le \ldots \le ci \le \ldots$

Причем, если $c_i=c_j$, $mo\ i \le j <=> k_{ni} \ge k_{nj}$, где k_n – запрошенное число сеансов связи с космическим аппаратом с номером n. То есть упорядочиваем возможные сеансы связи сначала по количеству конфликтов, затем по числу запрошенных сеансов связи у соответствующих космических аппаратов.

При построении плана необходимо оптимизировать целевую функцию $f = \sum_i s_i \ \rightarrow max$, где оптимизация выполняется при следующих условиях:

1) $\forall n \sum_{i:n_i=n} s_i \le k_n$ (число утвержденных сеансов связи не превышает число запрошенных);

2) $\forall i,j \; т.ч. \; s_i=s_j=1 \; и \; m_i=m_j, верно \; (t_{нi},t_{кi}) \cap (t_{нj},t_{кj}) = \varnothing$ (условие отсутствия конфликтов);

3) $\forall i,j \; т.ч. \; s_i=s_j=1 \; и \; n_i=n_j, \; верно \; (t_{нi},t_{кi}) \cap (t_{нj},t_{кj}) = \varnothing$

(в один момент времени КА может проводить только один СС).

2.7 Описание процесса поиска оптимального распределения технических средств

Оптимизация целевой функции с помощью теории множеств [39] происходит в три этапа:

1. Первый этап

Для каждого потенциального сеанса связи i такого, что $c_i = 0$ и $\sum_{j:n_j=n_i} s_j < k_{n_i}$ включаем данный сеанс связи в план, т.е. полагаем $s_i = 1$.

2. Второй этап

Перебираем все КА в порядке убывания числа запрошенных СС, для каждого из них перебираем НИП в порядке наименьшей нагрузки по текущему плану сеансов связи, и для данных КА и НИП перебираем потенциальные сеансы связи в порядке номеров i.

Если для данного i

$$\begin{cases} s_i = 0 \\ \sum_{j:n_j=n_i} s_j < k_{n_i} \\ \forall j \; т.ч. \; s_j=1 \; и \; m_i=m_j, \; верно \; (t_{нi},t_{кi}) \cap (t_{нj},t_{кj}) = \varnothing \\ \forall j \; т.ч. \; s_j=1 \; и \; n_i=n_j, \; верно \; (t_{нi},t_{кi}) \cap (t_{нj},t_{кj}) = \varnothing \end{cases}$$

то включаем этот СС в план, т.е. полагаем s_i=1.

Если по результатам первых двух этапов удовлетворены не все заявки, т.е.

$\exists n \; т.ч. \sum_{j:n_j=n} s_j < k_n$, то осуществляем третий этап.

3. Третий этап

Перебираем все КА, для которых $\sum_{j:n_j=n} s_j < k_n$, то есть те космические аппараты, для которых утверждено меньше сеансов связи, чем было запрошено. Для каждого такого КА перебираем все НИП. Для текущих КА с номером n и НИП с номером m перебираем в порядке номеров элементы S с $n_i=n$, $m_i=m$, $s_i=0$. Далее перебираем все j такие, что $s_j=1$, $(t_{нi},t_{кi})\cap(t_{нj},t_{кj})\neq\varnothing$, т.е. перебираем утвержденные СС, конфликтующие с сеансом связи i. Для данного номера j перебираем все номера q такие, что $n_j=n_q$, и верно

$$\begin{cases} s_q=0 \\ \forall\, p \;\; т.ч.\;\; s_p=1 \;\; и \;\; m_p=m_q, \;\; верно \;\; (t_{нp},t_{кp})\cap(t_{нq},t_{кq})=\varnothing \\ \forall\, p \;\; т.ч.\;\; s_p=1 \;\; и \;\; n_p=n_q, \;\; верно \;\; (t_{нp},t_{кp})\cap(t_{нq},t_{кq})=\varnothing \end{cases}$$

Если такое q находится, то полагаем $s_q=1$, $s_j=0$, т.е. переносим сеанс связи j на место q. Если i-й сеанс связи освободился от конфликтов с утвержденными сеансами связи, то полагаем $s_i=1$, т.е. включаем его в итоговый план. Иначе продолжаем перебор по j.

Если $\sum_{j:n_j=n} s_j < k_n$, то переходим к следующему потенциальному СС i этого КА n с НИП m, или следующему НИП, если для данного m все потенциальные СС уже рассмотрены.

Если $\sum_{j:n_j=n} s_j = k_n$ или перебор для данного КА закончен, переходим к следующему КА с нереализованными заявками.

2.8 Оценка алгоритмической сложности выполнения расчета оптимального задействования средств управления КОГ по полученному алгоритму

Пусть для каждого КА и каждого НИП число потенциальных СС между ними меньше или равно K. Тогда всего во множестве S не больше NMK элементов, где

N – число космических аппаратов;

M – число наземных пунктов;

K – максимальное число потенциальных сеансов связи между КА и

отдельным наземным пунктом.

В реальных задачах k_n невелико и в случае штатной работы составляет 2-3 сеанса в сутки. Таким образом, в итоговый план входят $O(N)$ сеансов связи.

Тогда на подсчет всех c_i простым перебором уйдет не больше $(NMK-1)+(NMK-2)+\ldots+1=\frac{NMK(NMK-1)}{2}=O(N^2M^2K^2)$ операций. Сортировка займет также $O(N^2M^2K^2)$ операций.

На первом этапе будет выполнено не больше NMK операций.

На втором этапе перебирается не больше *NMK* элементов S, для каждого из них проверка условий занимает не больше $O(N)$ операций (т.к. проверяются конфликты только с утвержденными сеансами связи). Итого на втором этапе выполняется $O(N^2MK)$ операций.

В сумме за первые два этапа – $O(N^2M^2K^2)$ операций.

На третьем этапе в худшем случае для каждого из $O(NMK)$ перебираются $O(N)$ конфликтующих с ним утвержденных СС, для каждого перебираются $O(MK)$ вариантов замены, каждый из которых проверяется за $O(N)$ операции.

В сумме на третьем этапе $O(N^3M^2K^2)$ операции.

В итоге, на весь алгоритм будут затрачены не больше $O(N^3M^2K^2)$ операций сравнения и присваивания. В реальных задачах M и K известные неизменные величины. Таким образом, алгоритмическая сложность составляет $O(N^3)$ операций.

Расчеты зон радиовидимости (Δt=16с) и плана сеансов связи на программном комплексе (см. Раздел 3) для 54 космических аппаратов и 4 наземных пунктов занимают менее двух минут.

2.9 Краткое описание алгоритма оптимального распределения средств управления крупномасштабными орбитальными группировками КА

Неформально, алгоритм оптимального распределения средств управления крупномасштабными орбитальными группировками КА и формирование плана сеансов связи можно описать следующим образом.

На первом этапе по разработанным циклограммам для каждого m - го наземного пункта управления определяются те временные диапазоны, на которых могут проводиться сеансы связи только с одним из N КА. После этого принимается предварительное решение о выделении данного m - го наземного пункта для управления этим космическим аппаратом в соответствующем временном диапазоне.

На втором этапе после корректировки циклограмм по результатам первого этапа определяются временные диапазоны, где могут быть осуществлены сеансы связи с минимальным количеством КА. Одному из этих КА выделяются соответствующие наземные измерительные пункты. Приоритет отдается космическим аппаратам с большим числом заявляемых сеансов связи с наземными комплексами управления.

На третьем этапе при наличии не удовлетворенных заявок предпринимается попытка передвинуть утвержденные сеансы связи.

Предложенные методологические подходы и модели позволяют принципиально решать задачи, играющие важную роль в формировании перспективной космической инфраструктуры.

На основе рассмотренной модели разработаны алгоритм и программный комплекс оптимального расчета задействования средств управления крупномасштабными орбитальными группировками.

2.10 Требования к разработке программного комплекса расчета оптимального распределения средств управления

Основные требования к разработке и оформлению материалов программного комплекса расчета оптимального распределения средств управления крупномасштабными орбитальными группировками КА определены в п. 4.12 ТЗ на НИР «Баллистика».

По результатам проведенных исследований по задействованию наземных средств управления ОГ и на основании предложенного метода и алгоритма, разработанного при проведении данной НИР, сформированы

требования и исходные данные для разработки программного комплекса:

- программный комплекс должен разрабатываться на современных языках программирования высокого уровня (C#, C++, PHP, Java и т.п.) с привлечением, при необходимости, языков SQL, PL/SQL, LINQ, XML, XAML;
- в программном комплексе должен быть разработан графический интерфейс для ввода начальных данных, вывода результатов моделирования и вывода сообщений для оператора;
- в программном комплексе должна присутствовать 3D визуализация таких процессов, как движение КА по орбитам Земли, вращение Земли, также наглядное визуальное отображение факта входа КА в ЗРВ КИС;
- эксплуатационные характеристики испытываемого программного комплекса должны соответствовать требованиям ТЗ;
- разработанный программный комплекс должен быть полностью работоспособен, технологичен и удобен в эксплуатации;
- программный комплекс расчета оптимального распределения средств управления крупномасштабными орбитальными группировками КА, должен решать следующие функциональные задачи:
    a) моделировать движение переменного числа КА (группировки КА) по орбитам Земли в течение 24 часов на основе начальных данных, введенных оператором;
    b) определять зоны радиовидимости (ЗРВ) каждого КА с переменным числом командно-измерительных систем (КИС), размещенных на территории РФ;
    c) планировать СС на основе полученных ЗРВ и начальных данных, введенных оператором;
    d) отображать всю доступную информацию средствами 3D визуализации;
    e) сохранение списков ЗРВ и СС в текстовых файлах.

3. Разработка программного комплекса расчета оптимального распределения средств управления крупномасштабными орбитальными группировками КА

Предложенные методологические подходы и модели принципиально позволяют решить задачи, играющие важную роль в формировании перспективной космической инфраструктуры. Вместе с тем, для окончательного выбора и обоснования оптимальных решений представляется необходимым проведение имитационного моделирования возможных ситуаций при управлении орбитальных группировок КА для широкого набора начальных условий и исходных данных. Эти подходы могут найти широкое применение в различных областях научно – исследовательской и практической деятельности.

3.1 Функциональное назначение

Программный комплекс расчета оптимального распределения средств управления крупномасштабными орбитальными группировками КА может быть использован для научных исследований в области построения спутниковых группировок и задействования наземных средств управления и передачи информации. Также, результаты, полученные в ходе моделирования, могут быть использованы в качестве первичного расчета для реальных систем.

3.2 Требования к общему программному обеспечению

Программный комплекс расчета оптимального распределения средств управления крупномасштабными орбитальными группировками КА, в соответствии с требованиями ТЗ, должен функционировать под управлением ОС Microsoft Windows XP SP 2 и более новых версий.

Примечание – Разработано две версии программного комплекса для работы на 32-х (x86) и 64-х разрядных ОС.

Дополнительное ПО:

- Microsoft.NET Framework версии 3.0 и выше;
- DirectX версии 9.0 и выше;
- SQLite Manager (для редактирования файла базы данных).

Примечания:

1) Microsoft.NET Framework и DirectX являются бесплатно распространяемым ПО;
2) Программа SQLite Manager распространяется в виде платной и бесплатной версии, обладающей ограниченным функционалом (достаточным для редактирования файла базы данных в составе программного комплекса).

3.3 Основные характеристики программного комплекса

Основные характеристики программного комплекса расчета оптимального распределения средств управления крупномасштабными орбитальными группировками КА:

1) Программный комплекс разработан в среде Unity 5.0.0f4, код программы написан на языке программирования C#. Также, в коде программы запросы к базе данных SQLite составлены с использованием языка SQL. Разработано две версии программного комплекса для работы на 32-х (x86) и 64-х разрядных версиях ОС Windows.
2) В программном комплексе разработан графический интерфейс, посредством которого пользователю (оператору) сообщаются инструкции к действию, осуществляется ввод данных, отображаются результаты моделирования в удобочитаемом виде;
3) Процесс моделирования ускорен относительно реального масштаба в 50 раз. Шаг пересчета по времени может принимать величины 4, 8 и 16 секунд. С учетом вышесказанного, скорость процесса моделирования может быть увеличена в 200, 400 и 800 раз относительно реального масштаба времени;

4) Такие визуальные процессы, как движение КА по орбитам Земли, поворот Земли, нахождение КА в ЗРВ КИС наглядно отображаются в окне программы с помощью 3D графики (см. рис. 3.1.).

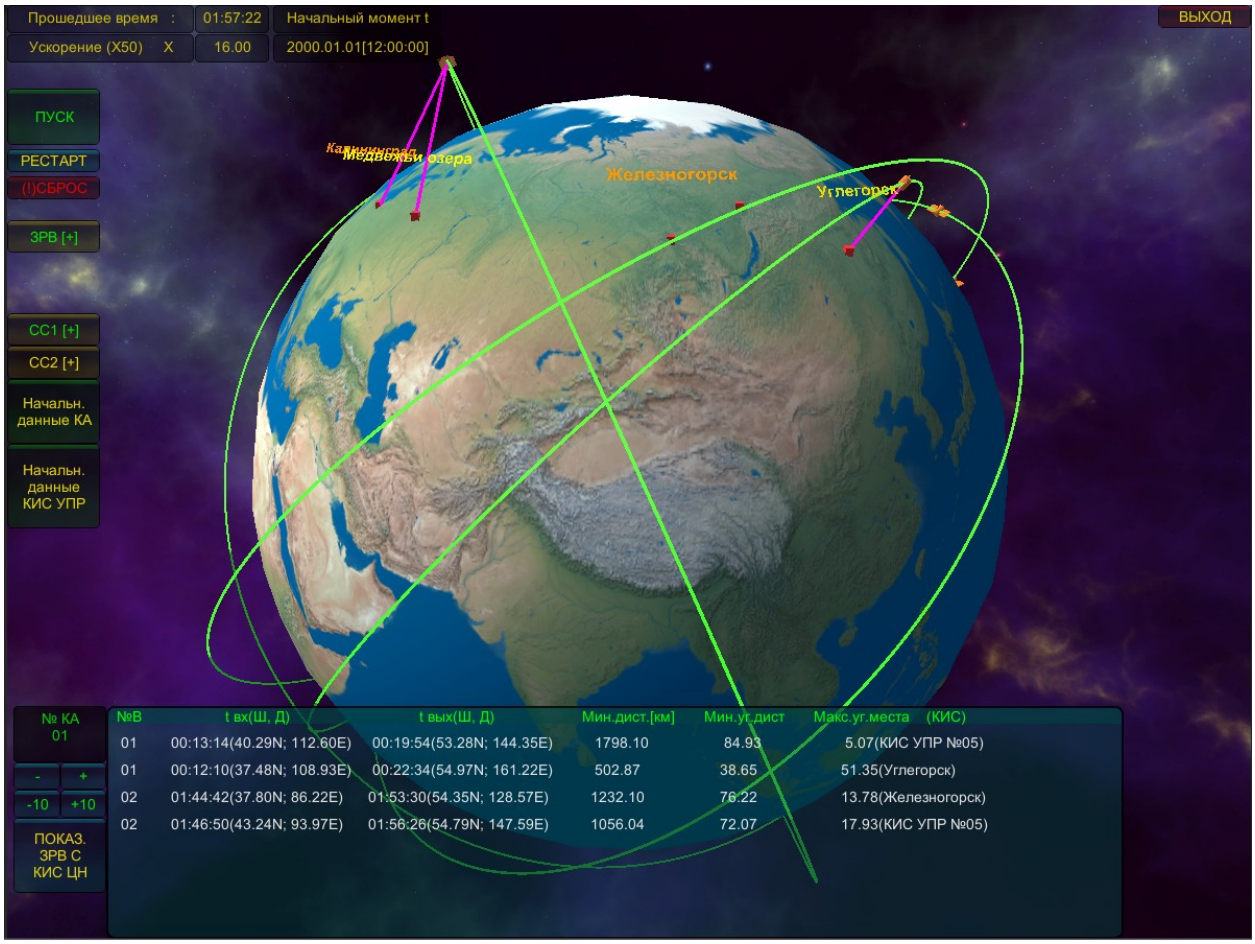


Рисунок 3.1 - Вид программы в процессе моделирования

Зелёными линиями обозначены орбиты КА. Розовые линии соединяют КА и КИС управления в течение ЗРВ.

3.4 Задачи, решаемые программным комплексом

Программный комплекс расчета оптимального распределения средств управления крупномасштабными орбитальными группировками КА, согласно ТЗ, должен обеспечивать решение задач:

a) моделирование движения переменного числа КА (группировки КА) по орбитам Земли в течение 24 часов на основе начальных данных, введенных пользователем;
b) определение зон радиовидимости (ЗРВ) каждого КА с переменным числом командно-измерительных систем (КИС), размещенных на поверхности Земли;
c) планирование СС на основе полученных ЗРВ и начальных данных, введенных пользователем;
d) отображение всей доступной пользователю информации посредством графического интерфейса;
e) Сохранение списков ЗРВ и СС в текстовых файлах.

3.5 Возможности программного комплекса

Программный комплекс расчета оптимального распределения средств управления крупномасштабными орбитальными группировками КА обладает следующими возможностями:

1) моделирование движения в течение 24 часов до 1000 КА одновременно (при задании количества КА следует учитывать мощность ПЭВМ);
2) размещение на поверхности Земли до 500 КИС приема целевой информации (при задании количества КИС следует учитывать мощность ПЭВМ);
3) размещение на поверхности Земли до 500 КИС управления, не считая 4 КИС размещенных по умолчанию (при задании количества КИС следует учитывать мощность ПЭВМ);

4) В программном комплексе разработан графический интерфейс, посредством которого пользователю (оператору) сообщаются инструкции к действию и отображаются результаты моделирования в удобочитаемом виде;

5) Списки ЗРВ и СС записываются в текстовые файлы по результатам каждого сеанса моделирования;
6) Процесс моделирования ускорен относительно реального масштаба в 50 раз. Шаг пересчета по времени может принимать величины 4, 8 и 16 секунд. С учетом вышесказанного, скорость процесса моделирования может быть увеличена в 200, 400 и 800 раз относительно реального масштаба времени;
7) Такие визуальные процессы, как движение КА по орбитам Земли, поворот Земли, нахождение КА в ЗРВ КИС наглядно отображаются в окне программы с помощью 3D графики (см. рис. 3.2.).

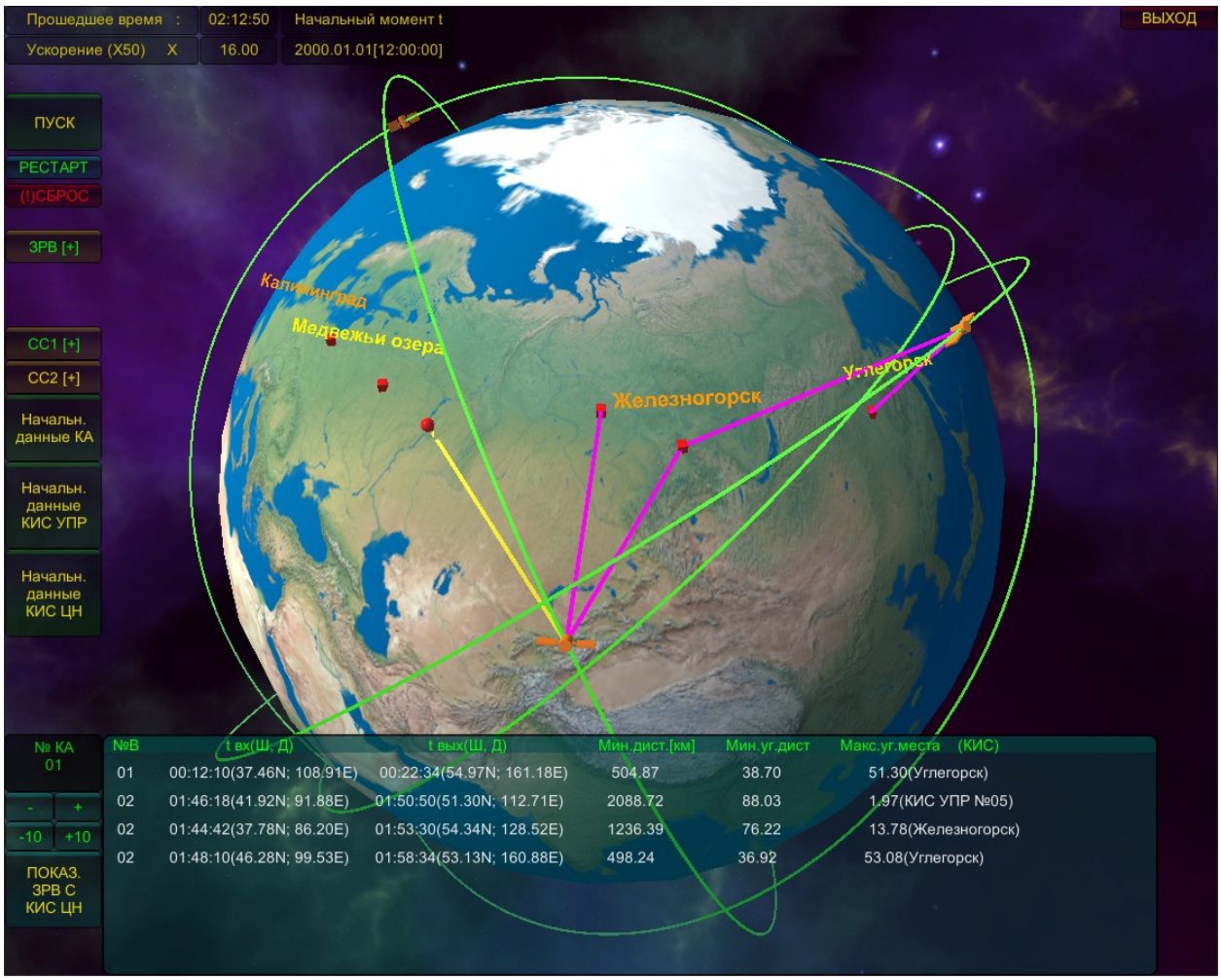


Рисунок 3.2 - Элементы 3D графики в программе

3.6 Области применения

Программный комплекс расчета оптимального распределения средств управления крупномасштабными орбитальными группировками КА может быть использован для научных исследований в области построения спутниковых группировок и задействования наземных средств управления и передачи информации. Также результаты, полученные в ходе моделирования, могут быть использованы в качестве первичного расчета для реальных систем.

Условия, необходимые для работы программного комплекса расчета оптимального распределения средств управления крупномасштабными орбитальными группировками КА включают следующие минимальные требования:

3.7 Требования к аппаратным средствам

Программный комплекс расчета оптимального распределения средств управления крупномасштабными орбитальными группировками КА должен работать на ПЭВМ, имеющей характеристики не хуже:

- процессор Intel Pentium IV 2.6 ГГц;
- ОЗУ 1 Гб;
- HDD 120 Гб (свободное место не менее 500 Мб);
- графическая карта: с поддержкой DirectX 9 (модель шейдера 3.0).
- DVD-RW;
- USB 2.0;

Примечание – Программный комплекс может работать даже с устаревшей видеокартой. Однако возможно некорректное отображение или отсутствие некоторых графических элементов.

Дополнительное оборудование:

- монитор TFT 19”;
- клавиатура;
- манипулятор «мышь».

3.8 Требования к программным средствам

Программный комплекс расчета оптимального распределения средств управления крупномасштабными орбитальными группировками КА должен функционировать под управлением ОС Microsoft Windows XP SP 2 и более новых версий.

Примечание – Разработано две версии программного комплекса для работы на 32-х и 64-х разрядных ОС.

Дополнительное ПО:

- Microsoft.NET Framework версии 3.0 и выше;
- DirectX версии 9.0 и выше;
- SQLite Manager (для редактирования файла базы данных).

Примечания

3) Microsoft.NET Framework и DirectX являются бесплатно распространяемым ПО;
4) Программа SQLite Manager представлена в виде платной и бесплатной версии, обладающей ограниченным функционалом (достаточным для редактирования файла базы данных в составе программного комплекса).

3.9 Общие характеристики входной и выходной информации

Входной информацией программного комплекса расчета оптимального распределения средств управления крупномасштабными орбитальными группировками КА являются начальные данные необходимые для процесса моделирования. К начальным данным относятся:

- дата и время начального момента времени;
- количество КИС приема целевой информации и КИС управления;
- координаты каждого КИС приема целевой информации и КИС управления;
- количество КА;
- параметры орбит и положение на них каждого КА в начальный момент времени;
- количество СС целевого назначения и СС управления;
- интервалы времени, в рамках которых должен быть проведен каждый СС.

Вся перечисленная информация вводится в соответствующих формах графического интерфейса программы.

Выходной информацией программного комплекса расчета оптимального распределения средств управления крупномасштабными орбитальными группировками КА является информация, полученная по результатам моделирования. К выходной информации относится:

- списки ЗРВ для каждого КА;
- списки СС для каждого КИС;
- список СС целевого назначения, провести которые не имелось возможности;
- список СС управления, провести которые не имелось возможности;
- графики ЗРВ для «Балтийского», «Западного», «Центрального» и «Восточного» КИС с 60 КА;
- траектория подспутниковой точки любого КА на фоне прямоугольной развертки Земли.

Вся перечисленная информация отображается в соответствующих окнах графического интерфейса программы. Также списки ЗРВ и СС записываются в текстовые файлы.

3.10 Описание работы программного комплекса

Программный комплекс расчета оптимального распределения средств управления крупномасштабными орбитальными группировками КА является завершенной, применяемой самостоятельно программой с графическим интерфейсом.

На входе программы подаются – начальный момент времени, конфигурация орбитальной группировки КА и наземных средств управления (КИС). На выходе пользователь получает план СС в соответствии предъявленными требованиями к времени их проведения и другую вспомогательную информацию. Работу программы можно условно разбить на 3 этапа:

- ввод начальных данных;

- моделирование движения КА по орбитам Земли на основе начальных данных и определение ЗРВ;
- планирование СС, на основе полученных ЗРВ и начальных данных, введенных пользователем;

На рисунке 3.3 проиллюстрирован общий алгоритм работы программы.



Рисунок 3.3 - Общий алгоритм работы программы

Процесс моделирования состоит из трех подпроцессов, выполняемых одновременно в едином масштабе времени:

- расчет движения КА;
- расчет поворота Земли;
- определение ЗРВ КА с КИС, размещенными на поверхности Земли.

На основе начальных данных, ведется пересчет координат КА и поворота Земли с шагом по времени, заданным оператором.

Параллельно отслеживается факт входа КА в ЗРВ КИС. Вычисляется угол между векторами $\overrightarrow{(КИС;\ Центр\ Земли)}$ и $\overrightarrow{(КИС;\ КА)}$ (угол α см. рис. 3.4) и из него вычитается 90 градусов. Полученный угол является углом места КА относительно данного КИС (угол β см. рис. 3.4).

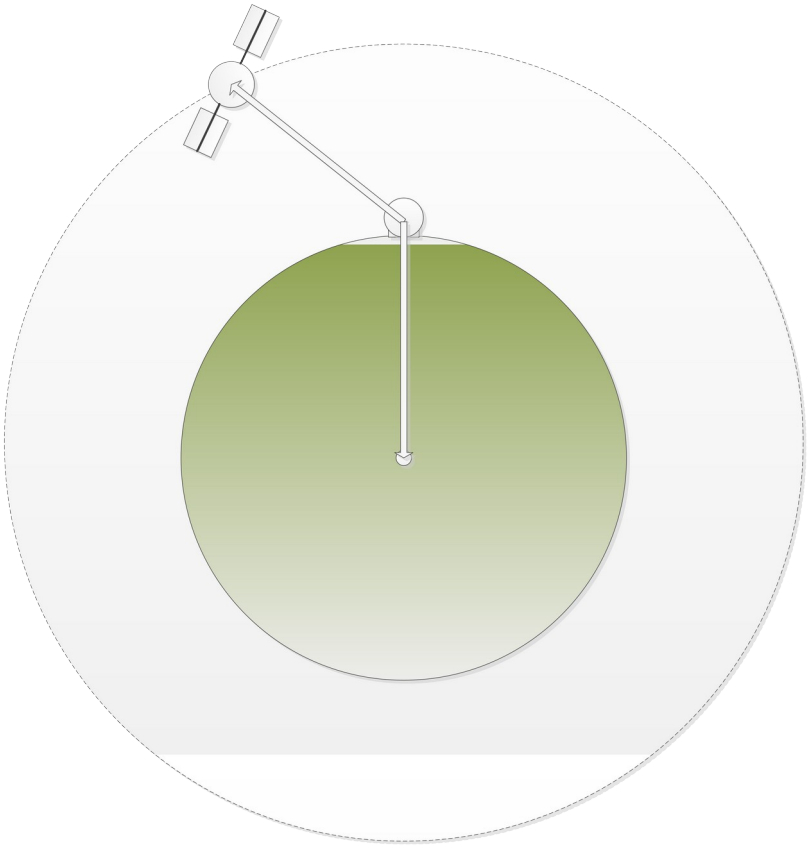


Рисунок 3.4 - КА, находящийся в ЗРВ КИС

В момент, когда отрицательное значение угла места становится положительным – ЗРВ начинается. Наоборот, в момент, когда положительное значение угла места становится отрицательным – ЗРВ заканчивается.

По завершению процесса моделирования, полученные ЗРВ распределяются под СС, при этом подвергаются следующим проверкам:

- максимальный угол места в течение ЗРВ должен иметь значение не меньше 5 градусов;
- продолжительность ЗРВ должна быть не меньше 4 минут;
- время ЗРВ должно полностью попадать в рамки интервала времени для проведения СС, заданного пользователем;

При подтверждении времени СС на КИС блокируется время выбранной ЗРВ и дополнительные 15 минут для подготовки к следующему СС.

3.11 Входные данные

В разделе 2, входными данными для программного комплекса расчета оптимального распределения средств управления крупномасштабными орбитальными группировками КА являются начальные данные необходимые для процесса моделирования:

- дата и время начального момента времени. На рисунке 3.5. представлено окно ввода даты и времени.

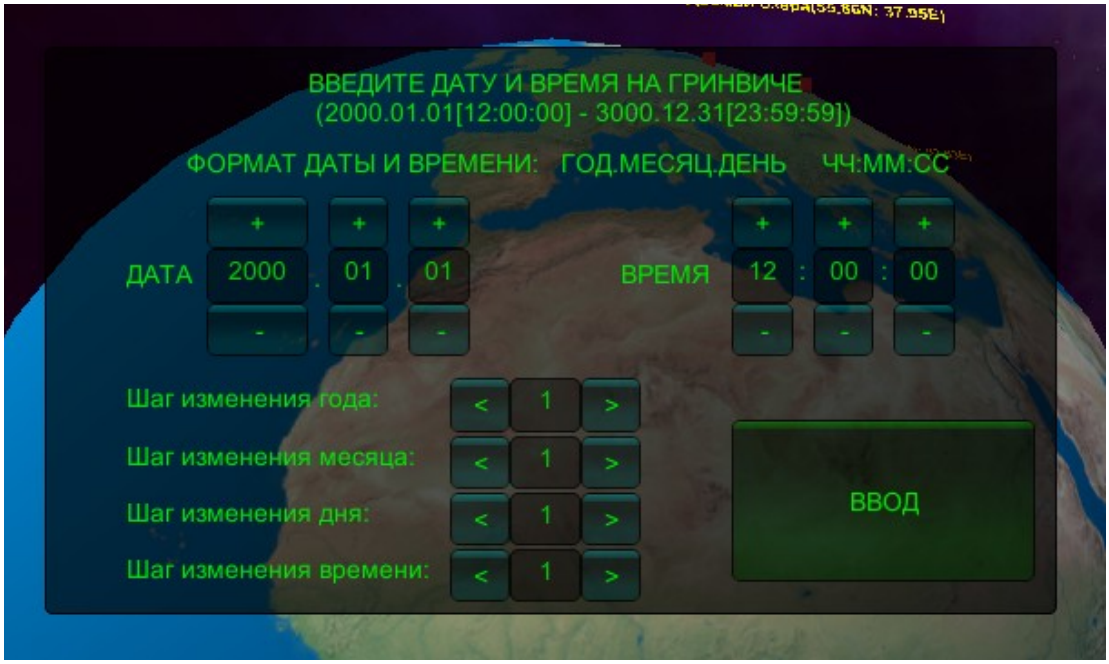


Рисунок 3.5 - Окно ввода даты и времени

Формат даты: [*год*].[*месяц*].[*день*].

Формат времени: [*час*]:[*минута*]:[*секунда*];

- количество КИС приема целевой информации (от 0 до 500) и количество КИС управления (от 0 до 500), не считая 4 КИС управления, введенных по умолчанию;
- координаты (широт и долгота) каждого КИС. Указываются в градусах;
- количество КА, движение которых будет моделироваться (от 1 до 1000);
- параметры орбит и положение на них каждого КА в начальный момент времени:

- *a*, большая полуось орбиты [*км*]. Принимает значения больше 6471;
- *e*, эксцентриситет орбиты – безразмерная величина, принимающая значения из диапазона [0; 1);
- *i*, наклонение орбиты [*град*]. Принимает значения из диапазона [0; 180];
- *Ω*, долгота восходящего узла орбиты [*град*]. Принимает значения из диапазона [0; 360);
- *ω*, аргумент перицентра орбиты[*град*]. Принимает значения из диапазона [0; 360);
- u, аргумент широты КА [*град*]. Принимает значения из диапазона [0; 360);

На рисунке 3.6 представлено окно ввода начальных данных КА.



Рисунок 3.6 - Окно ввода начальных данных КА

Также для каждого КА необходимо указать:

- количество СС целевого назначения (от 0 до 6) и СС управления (от 1 до 6);
- интервалы времени в течение 24 часов, в рамках которых должен быть проведен каждый СС.

На рисунке 3.7. представлена форма ввода интервала времени для СС.

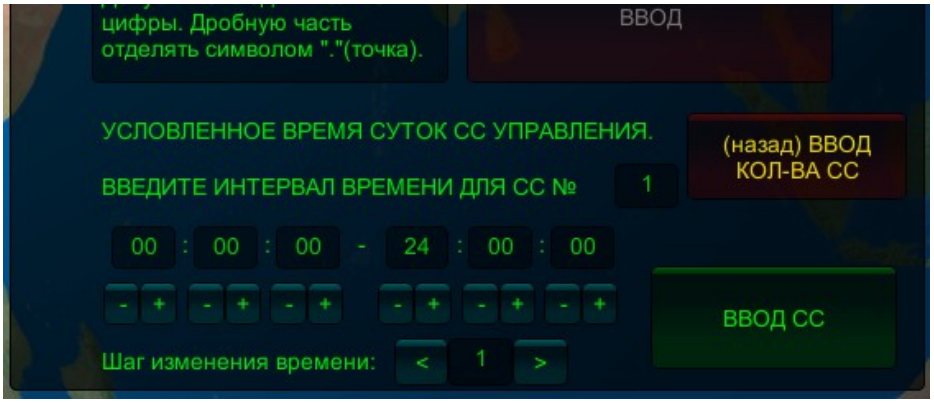


Рисунок 3.7 - Форма ввода интервала времени для СС

Формат времени: [*час*]:[*минута*]:[*секунда*]. Слева указывается начало интервала времени для СС, справа – конец интервала времени для того же СС.

3.12 Выходные данные

Как упоминалось в разделе номер 2, выходными данными программного комплекса расчета оптимального распределения средств управления крупномасштабными орбитальными группировками КА является информация, полученная по результатам моделирования. К выходной информации относится:

- списки ЗРВ для каждого КА. Все строки указанных списков содержат следующую информацию:
  - номер витка КА, считая от начального момента времени;

- время входа и выхода из ЗРВ. Формат времени: [*час*]:[*минута*]:[*секунда*];
- координаты подспутниковых точек при входе и выходе из ЗРВ. Указывается в градусах. Долгота различается на западную (W) и восточную (E), а широта – на северную (N) и южную (S);
- минимальная дистанция до КИС в течение ЗРВ. Указывается в километрах;
- минимальная угловая дистанция до КИС в течение ЗРВ. Указывается в градусах;
- максимальный угол места относительно КИС в течение ЗРВ. Указывается в градусах;
- название КИС;

В таблице 3.1 приведен пример содержания строки ЗРВ.

Таблица 3.1 - Пример содержания строки в списке ЗРВ

№ в	tвх(Ш, Д)	tвых(Ш,Д)	Мин. дист.	Мин. уг. дист.	Макс. уг. места (КИС)
01	*00:24:40(54.45N; 95.27E)*	*00:34:48(34.60N; 142.38E)*	*756.85*	*60.34*	*29.66(Углегорск)*

Все списки ЗРВ сохраняются в текстовые файлы. При каждом запуске процесса моделирование в папке «Log», расположенной по пути [*папка с программным комплексом*] > SatFly.v1(x86) > Log, создается каталог, содержащий в своем названии дату и время запуска, например:

- [date]2016-08-31[time]15.04.49;

В указанном каталоге создаются текстовые файлы для записи списков ЗРВ.

- списки СС для каждого КИС. Все строки указанных списков содержат порядковый номер КА, время начала и конца СС ([*час*]:[*минута*]:[*секунда*]). В таблице 3.2. приведен пример содержания строки СС.

Таблица 3.2 - Пример содержания строки в списке СС

№ КА	t начала СС	t конца СС
03	*00:24:40*	*00:34:48*

Аналогично спискам ЗРВ, все списки СС сохраняются в текстовые файлы. При каждом запуске процесса моделирование в папке «Log», расположенной по пути [*папка с программным комплексом*] > SatFly.v1(x86) > Log, создается каталог, содержащий в своем названии дату и время запуска. В указанном каталоге создаются текстовые файлы для записи списков СС.

- графики ЗРВ для 60 КА со следующими 4 КИС управления:
  - Балтийский КИС – «Калининград»;
  - Западный КИС – «Медвежьи озера»;
  - Центральный КИС – «Железногорск»;
  - Восточный КИС – «Углегорск».

На рисунке 3.8. приведен пример графиков ЗРВ для КИС «Медвежьи озера».

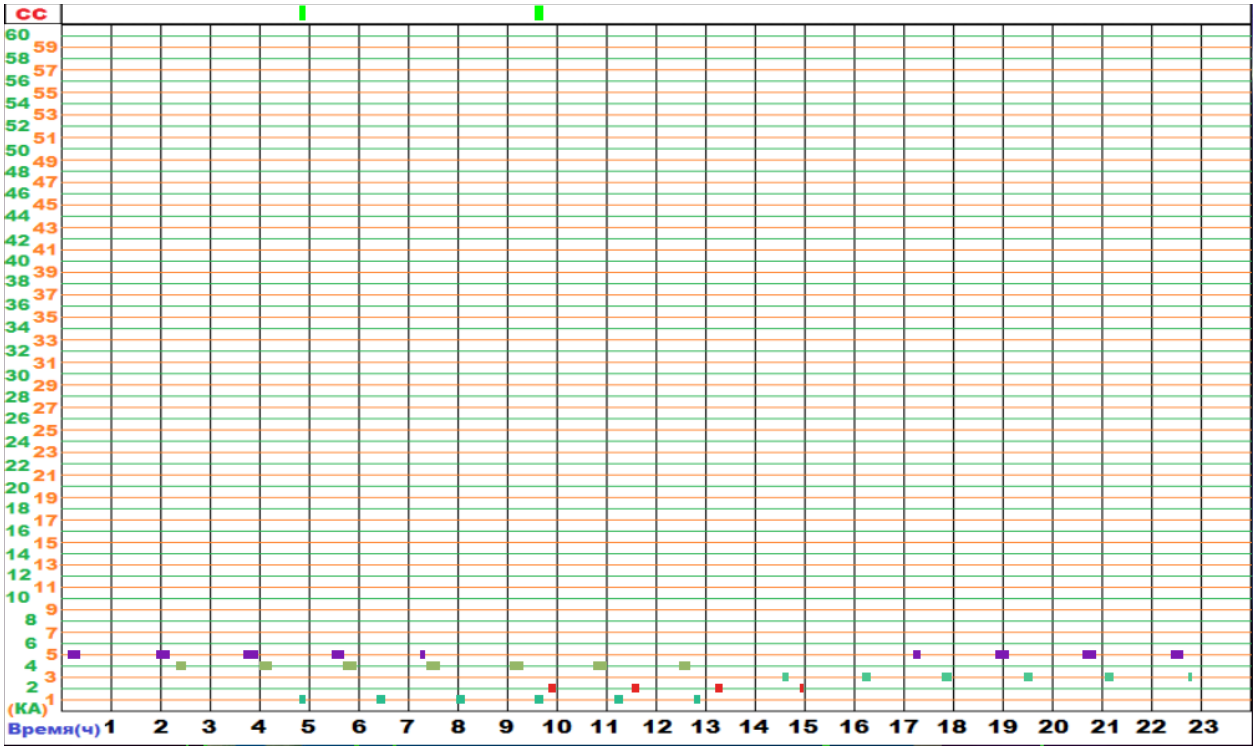


Рисунок 3.8 - Пример графиков ЗРВ КИС «Медвежьи озера»

Примечание – В верхней части графика отмечены графики СС, появляющиеся после завершения процесса моделирования.

По вертикали расположены номера КА, по горизонтали – время в часах. Длина каждого отрезка пропорциональна продолжительности ЗРВ.

- траектория движения подспутниковой точки любого КА на фоне прямоугольной развертки поверхности Земли (см. пример на рис. 3.9.).

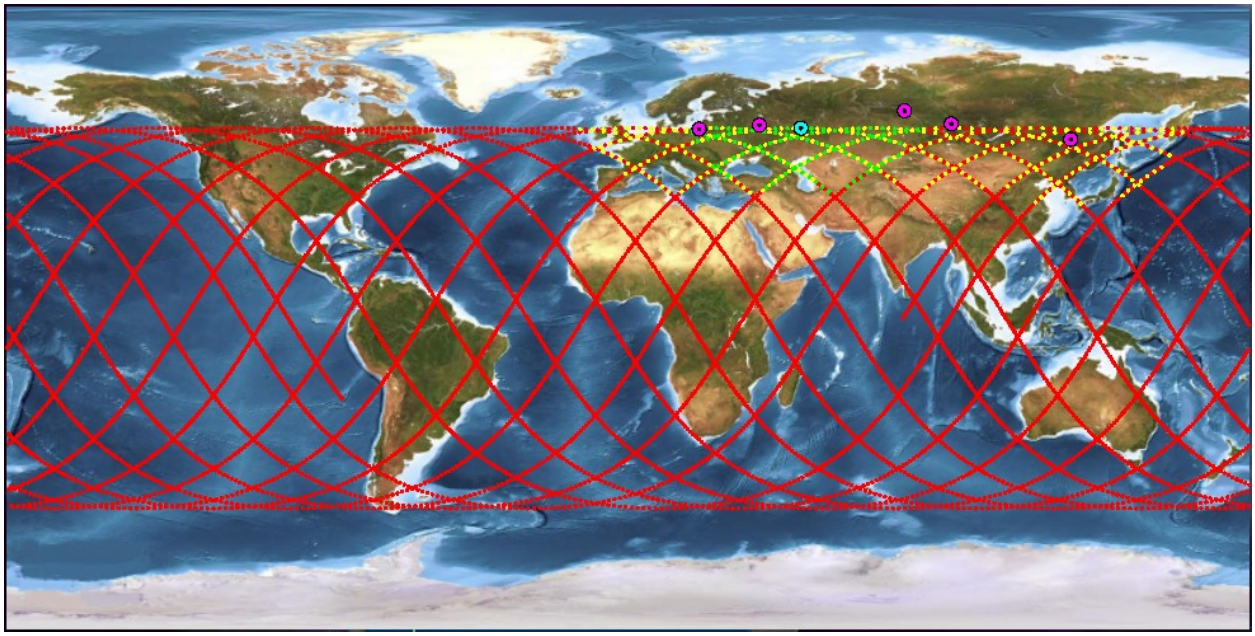


Рисунок 3.9 - Пример траектории движения подспутниковой точки КА на фоне прямоугольной развертки Земли

Фиолетовыми окружностями с черным центром отмечаются КИС управления. Салатовыми окружностями с черным центром отмечаются КИС приема целевой информации. Красным цветом отмечена траектория подспутниковой точки КА. Желтый пунктир на траектории сигнализирует о том, что КА находился в ЗРВ с КИС управления. Зелёный пунктир на траектории сигнализирует о том, что КА находился в ЗРВ с КИС приема целевой информации. Наличие одновременно и зелёного, и желтого пунктира на траектории сигнализирует о том, что КА находился в ЗРВ как с КИС управления, так и с КИС приема целевой информации.

3.13 Моделирование задействование КИС

1. Количество СС:

Каждому аппарату задается по 3 СС управления в течение 24 часов без ограничения на время проведения (00:00:00 – 24:00:00).

2. Начальные данные КИС (управления):

КИС расположены по координатам следующих городов:

- Калининград – балтийский КИС (54.717 N, 20.5 E);
- Медвежьи озёра – западный КИС (55.868 N, 37.952 E);
- Железногорск – центральный КИС (56.25 N, 93.533 E);
- Углегорск – восточный КИС (51.76 N, 128.121 E);

3. Требования к ЗРВ, участвующим в распределении под СС:

- Минимальный порог *максимального* значения угла места КА относительно КИС в течение ЗРВ составляет 5 градусов включительно.
- Минимальная продолжительность ЗРВ не меньше 4 минут.

4. Дополнительно:

Дата и время (год.месяц.день; чч:мм:сс):

2000.01.01; 17:17:17

* При указанной выше дате и времени угол Гринвичского среднего звездного времени примерно равен нулю.

* На КИС блокируется время, занимаемое под СС, и дополнительные 15 минут на подготовку к следующему СС

- a, большая полуось орбиты;
- e, эксцентриситет орбиты;
- i, наклонение орбиты;
- Ω, долгота восходящего узла орбиты;
- ω, аргумент перицентра орбиты;
- u_0, аргумент широты КА в начальный момент времени;

5. Насыщение для 1-й орбиты.

КА равномерно распределяются на одной орбите. Параметры орбиты и положение КА в начальный момент времени:

a = 6771 [км];

e = 0;

i = 55[град];

Ω = 0[град];

ω = 0[град];

u – варьируется в градусах в диапазоне [0; 360).

Результат:

Для одной орбиты удается обеспечить проведение всех 3 СС для 22 КА, при этом дистанция между аппаратами по аргументу широты составляет примерно 16,363 градуса. На рисунках 3.10.а - 3.10.г представлены графики ЗРВ с каждым КИС, а в верхней части графика – время отведенное под СС.

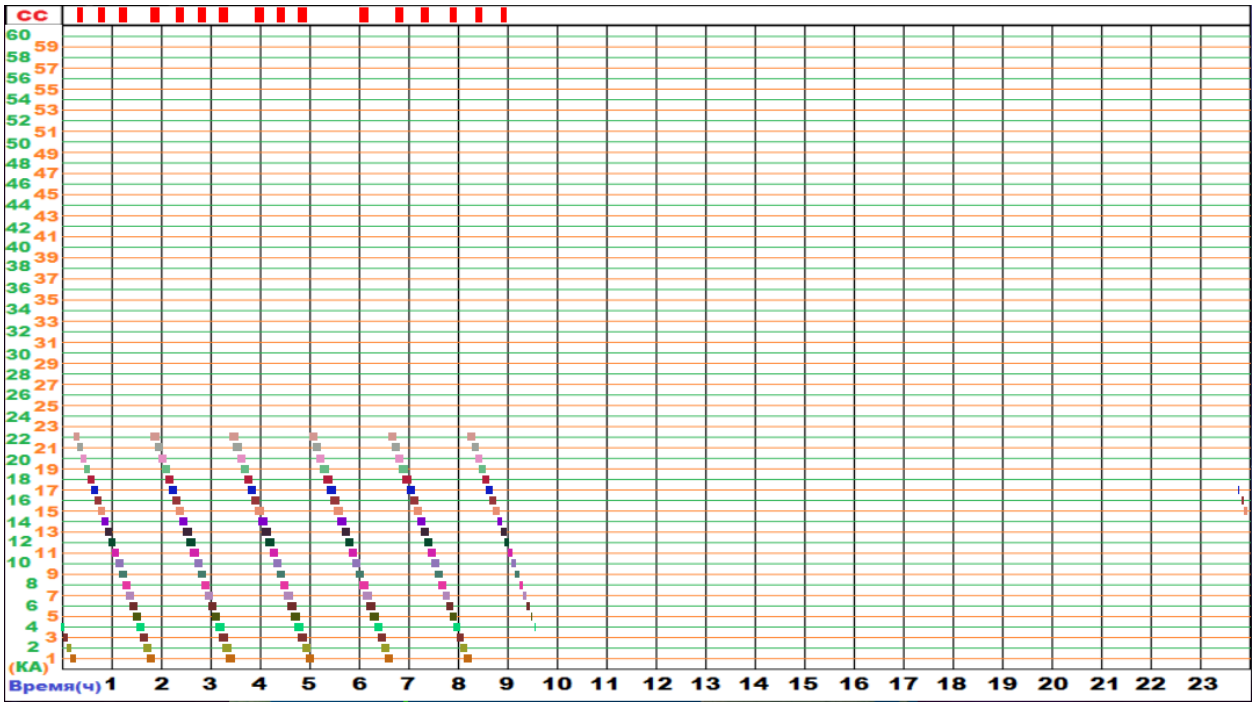


Рисунок 3.10.а - График ЗРВ и СС для КИС «Калининград» с 22 КА

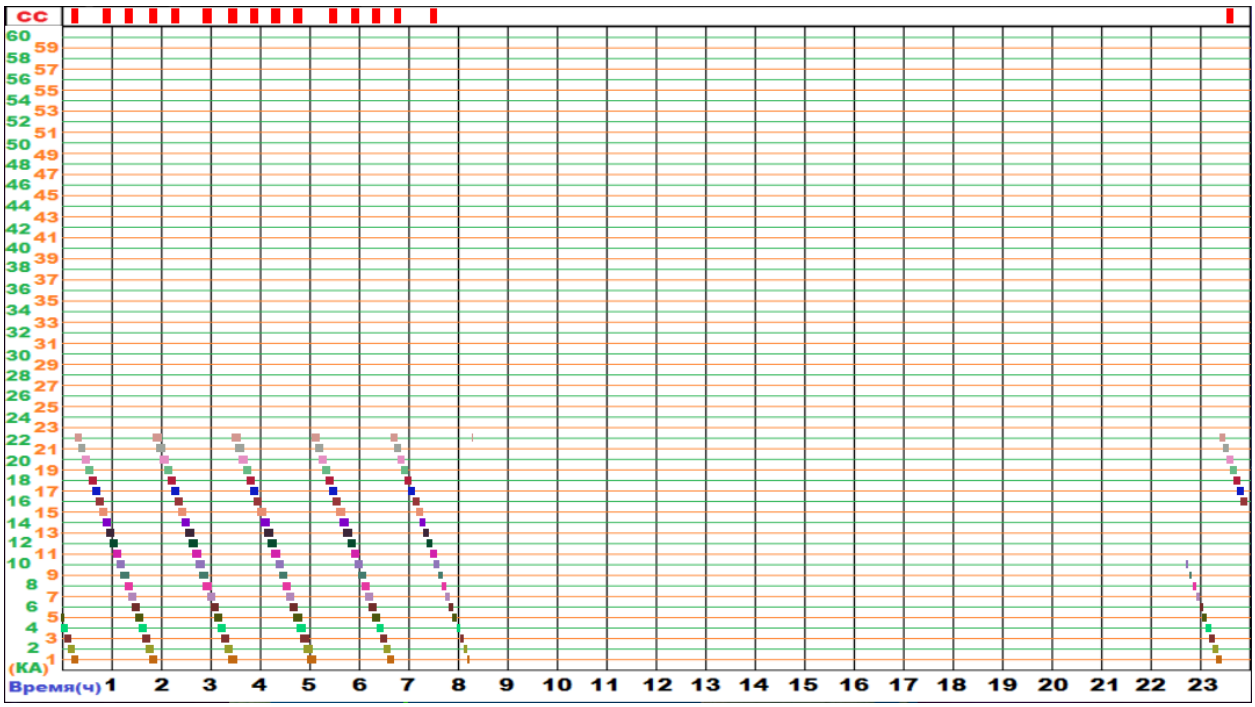


Рисунок 3.10.б - График ЗРВ и СС для КИС «Медвежьи озера» с 22 КА

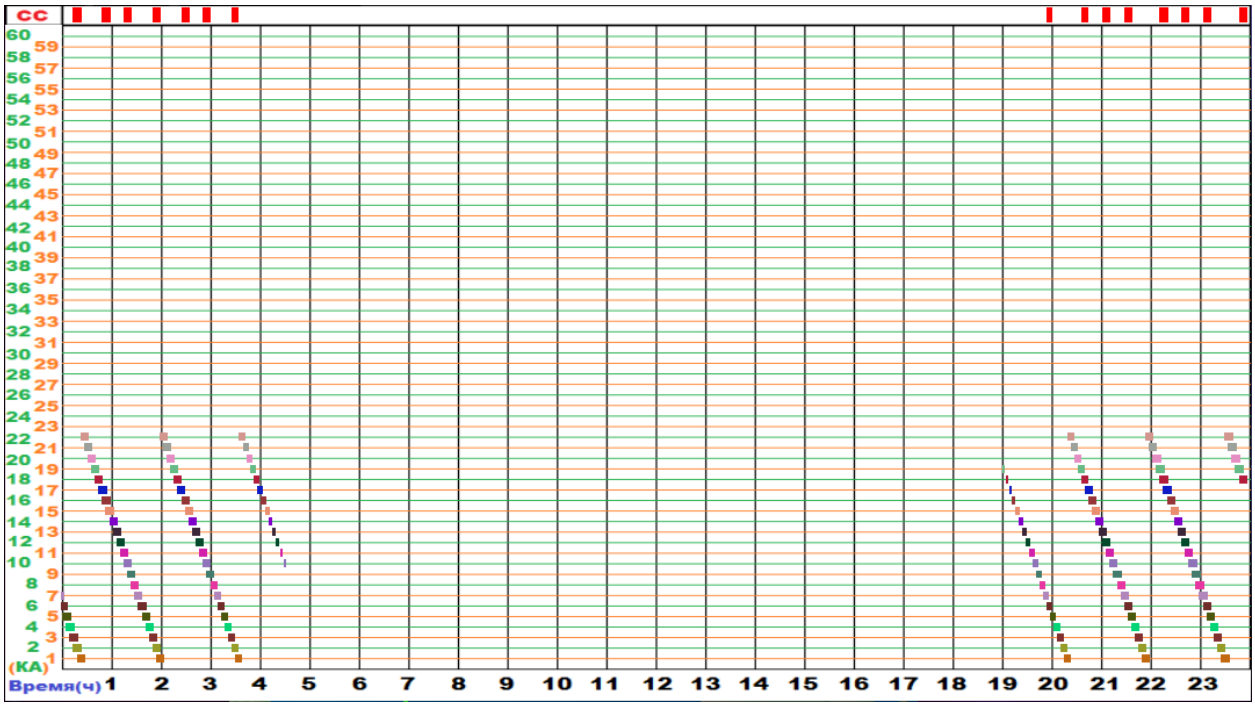


Рисунок 3.10.в - График ЗРВ и СС для КИС «Железногорск» с 22 КА

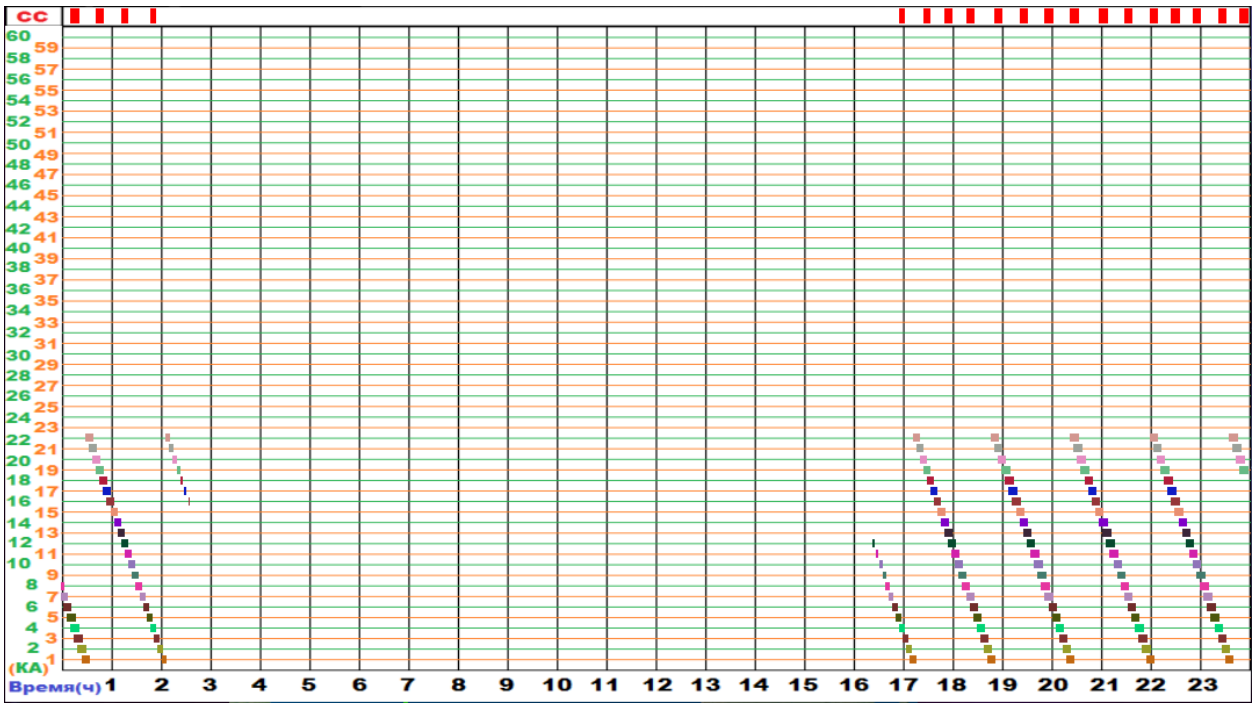


Рисунок 3.10.г - График ЗРВ и СС для КИС «Углегорск» с 22 КА

Вдоль вертикальной оси обозначены номера КА, вдоль горизонтальной оси обозначено время в часах, в верхней части графика отмечено время СС.

На рисунке 3.11 проиллюстрировано визуальное отображение 22 КА на одной орбите.

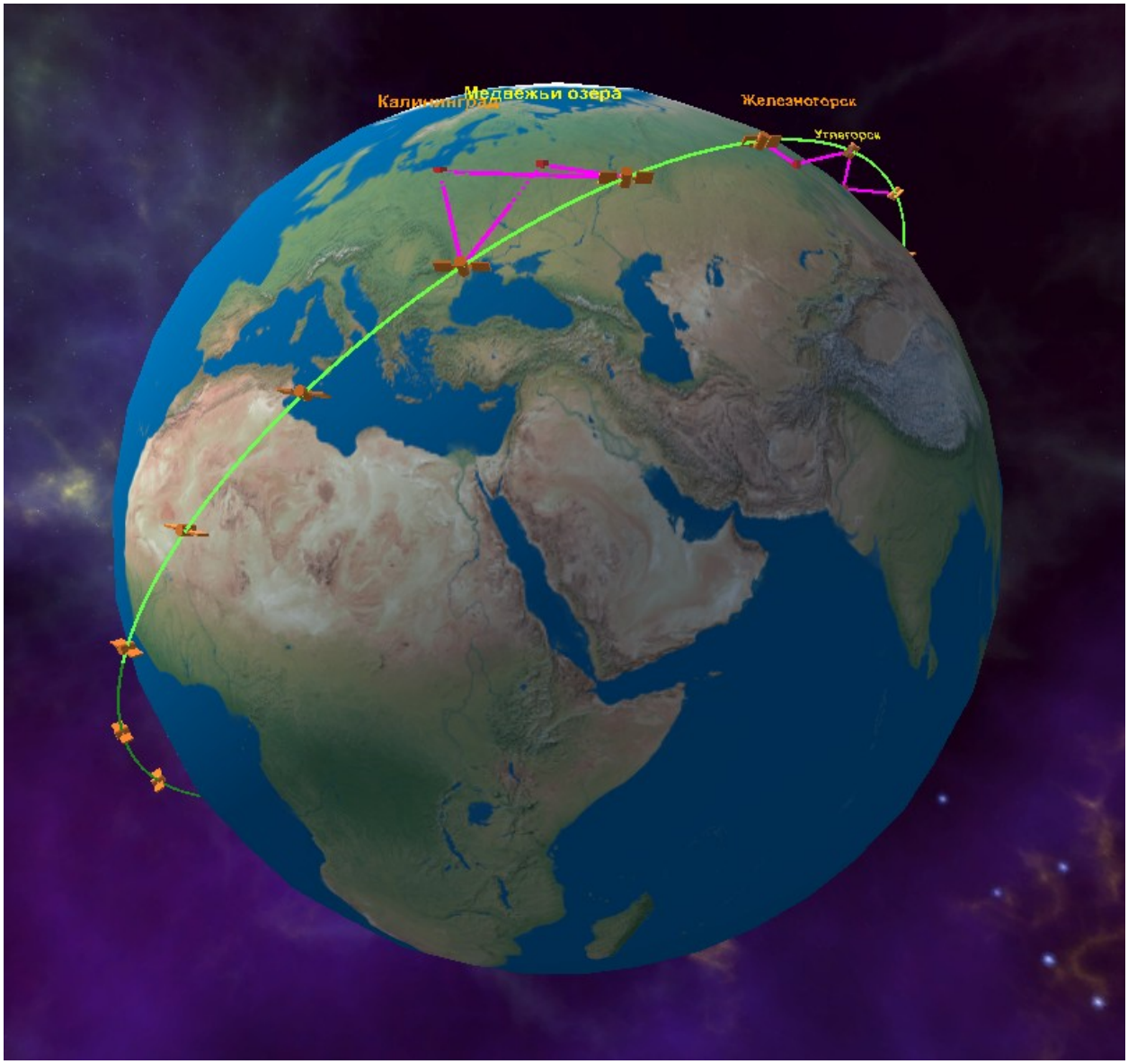


Рисунок 3.11 - 22 КА на одной орбите

6. Насыщение для 2-ух орбит.

КА равномерно распределяются на двух орбитах, разнесенных по долготе восходящего узла на 180 градусов. Параметры орбит и положение КА в начальный момент времени:

a = 6771 [км];

e = 0;

i = 55[град];

$\Omega_1 = 0[град]; \Omega_2 = 180[град];$

ω = 0[град];

и – варьируется в градусах в диапазоне [0; 360).

Результат:

Удается обеспечить проведение всех 3 СС для 22 КА на первой орбите и 21 КА на второй орбите. Дистанция между КА по аргументу широты на первой орбите составляет примерно 16,363 градуса, на второй – примерно 17,142 градуса. На рисунках 3.12.а – 3.12.г представлены графики ЗРВ с каждым КИС, а в верхней части графика – время отведенное под СС.

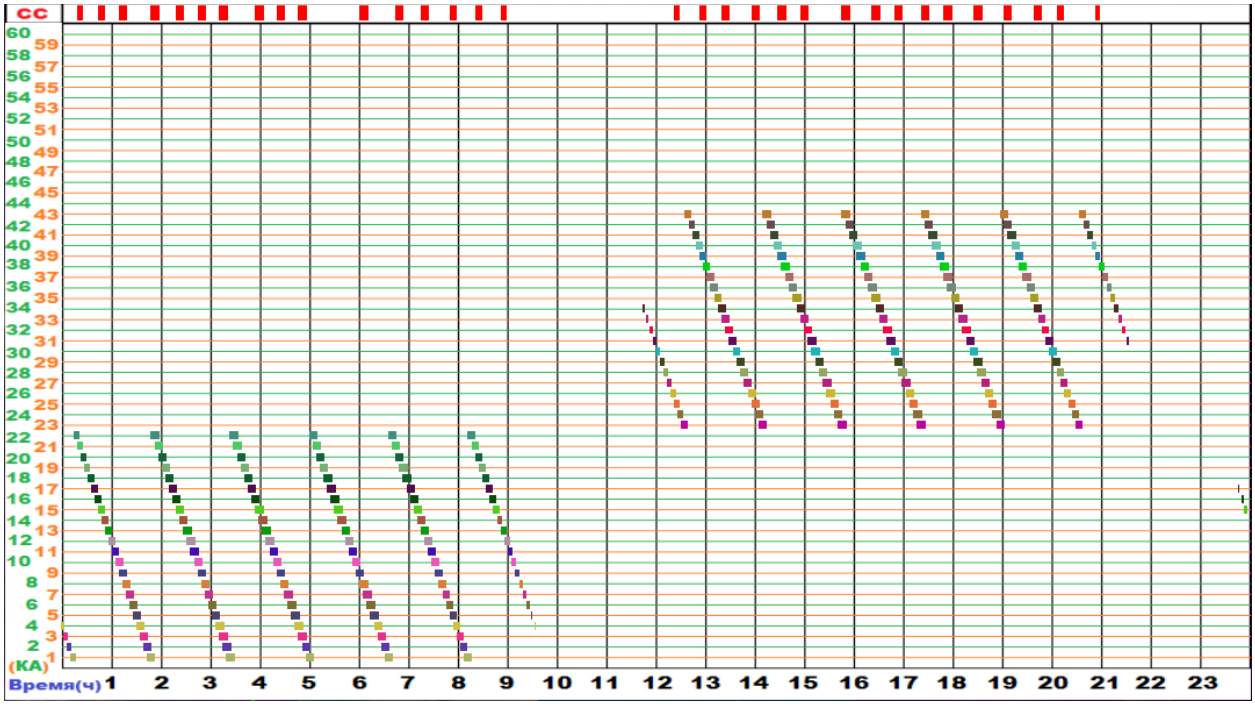


Рисунок 3.12.а - График ЗРВ и СС для КИС «Калининград» с 43 КА

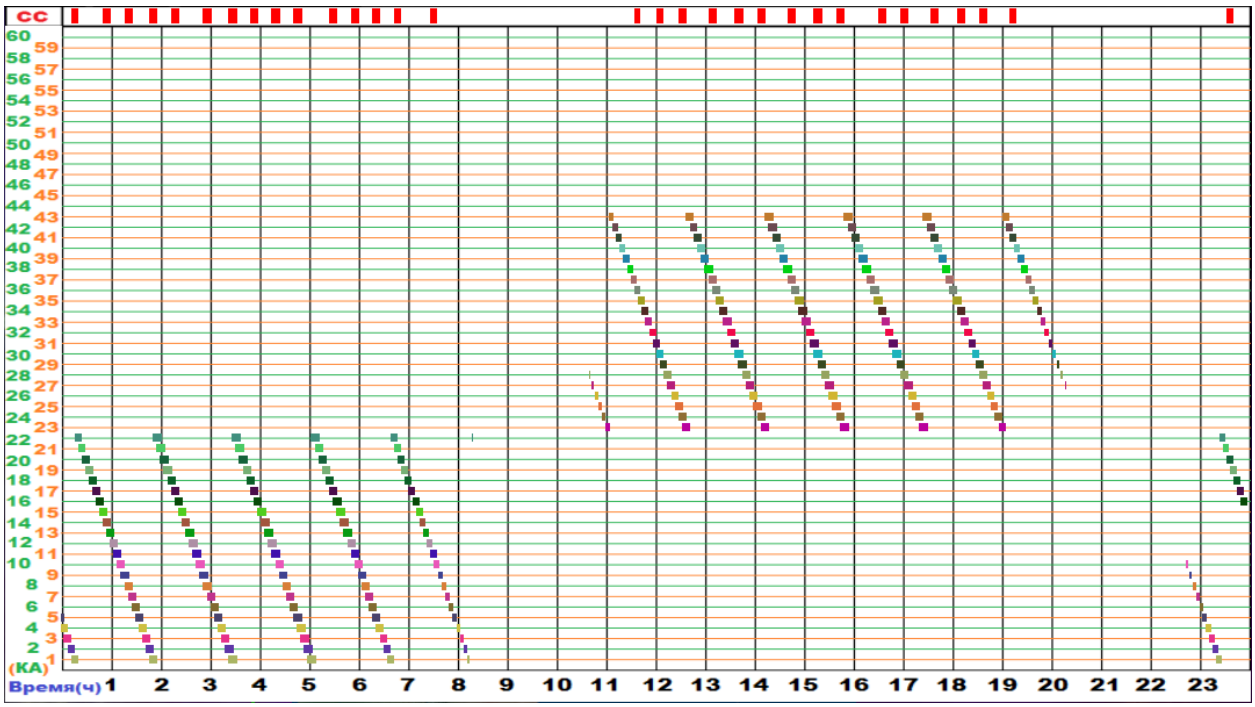


Рисунок 3.12.б - График ЗРВ и СС для КИС «Медвежьи озера» с 43 КА

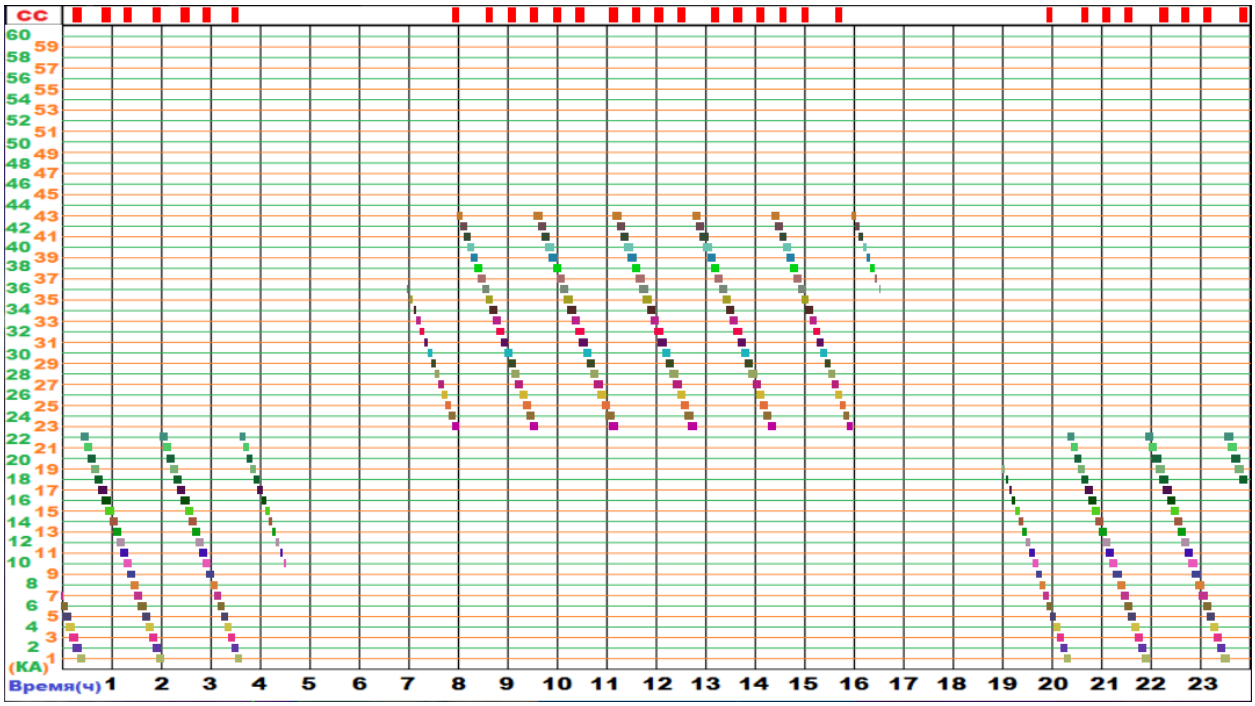


Рисунок 3.12.в - График ЗРВ и СС для КИС «Железногорск» с 43 КА

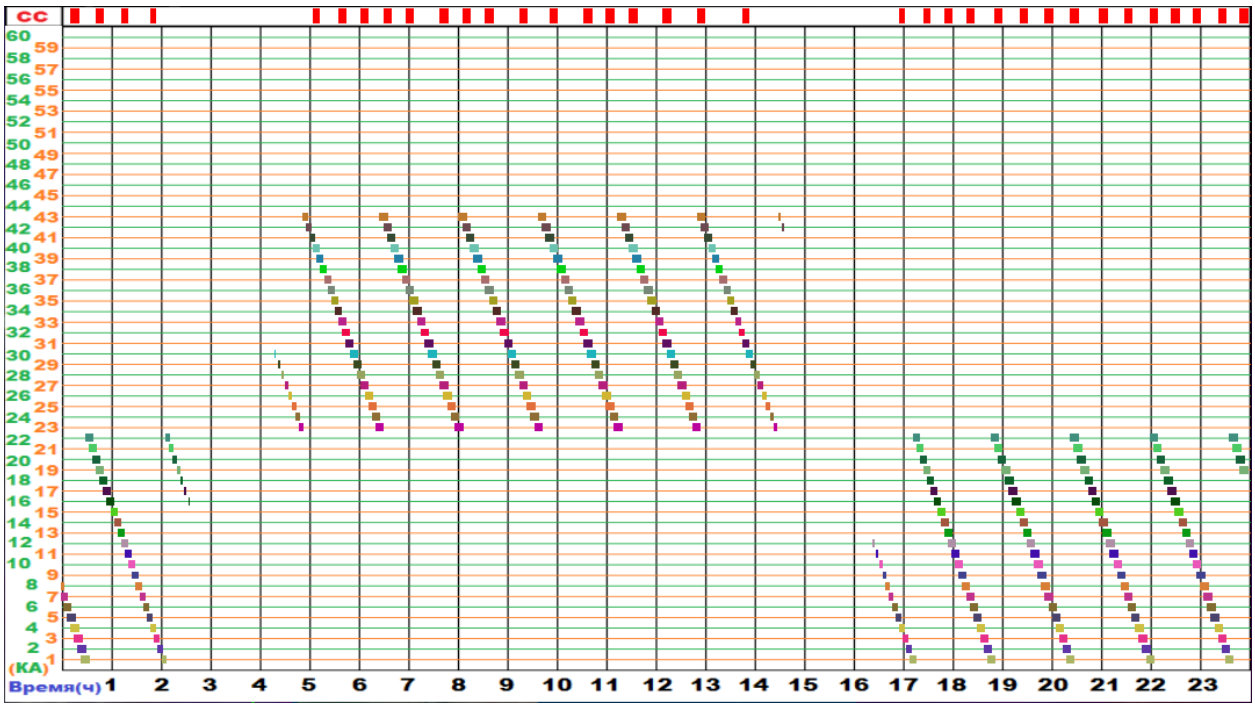


Рисунок 3.12.г - График ЗРВ и СС для КИС «Углегорск» с 43 КА

*Вдоль вертикальной оси номер КА, вдоль горизонтальной оси время в часах, в верхней части графика отмечено время СС.

На рисунке 3.13 проиллюстрировано визуальное отображение 43 КА на двух орбитах.

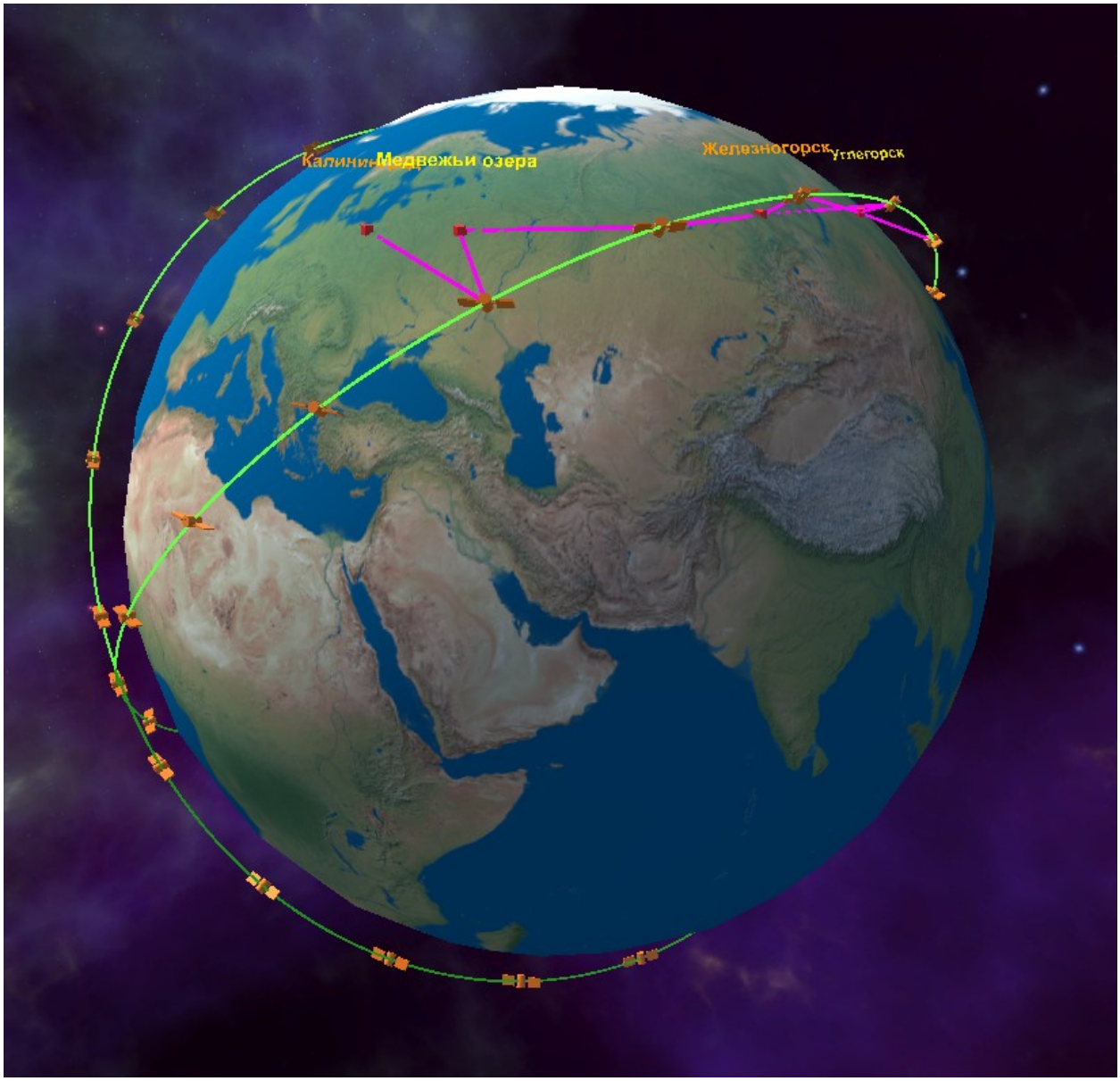


Рисунок 3.13 – 43 КА на двух орбитах

7. Насыщение для 3-ех орбит.

КА равномерно распределяются на трех орбитах, разнесенных по долготе восходящего узла на 120 градусов. Параметры орбит и положение КА в начальный момент времени:

a = 6771 [км];

e = 0;

i = 55[град];

$\Omega_1 = 0$[град]; $\Omega_2 = 120$[град]; $\Omega_3 = 240$[град];

$\omega = 0$[град];

u – варьируется в градусах в диапазоне [0; 360).

Результат:

Удается обеспечить проведение всех 3 СС для 18 КА на каждой орбите. Дистанция между КА по аргументу широты на орбите составляет 20 градусов. На рисунках 3.14.а – 3.14.г представлены графики ЗРВ с каждым КИС, а в верхней части графика – время отведенное под СС.

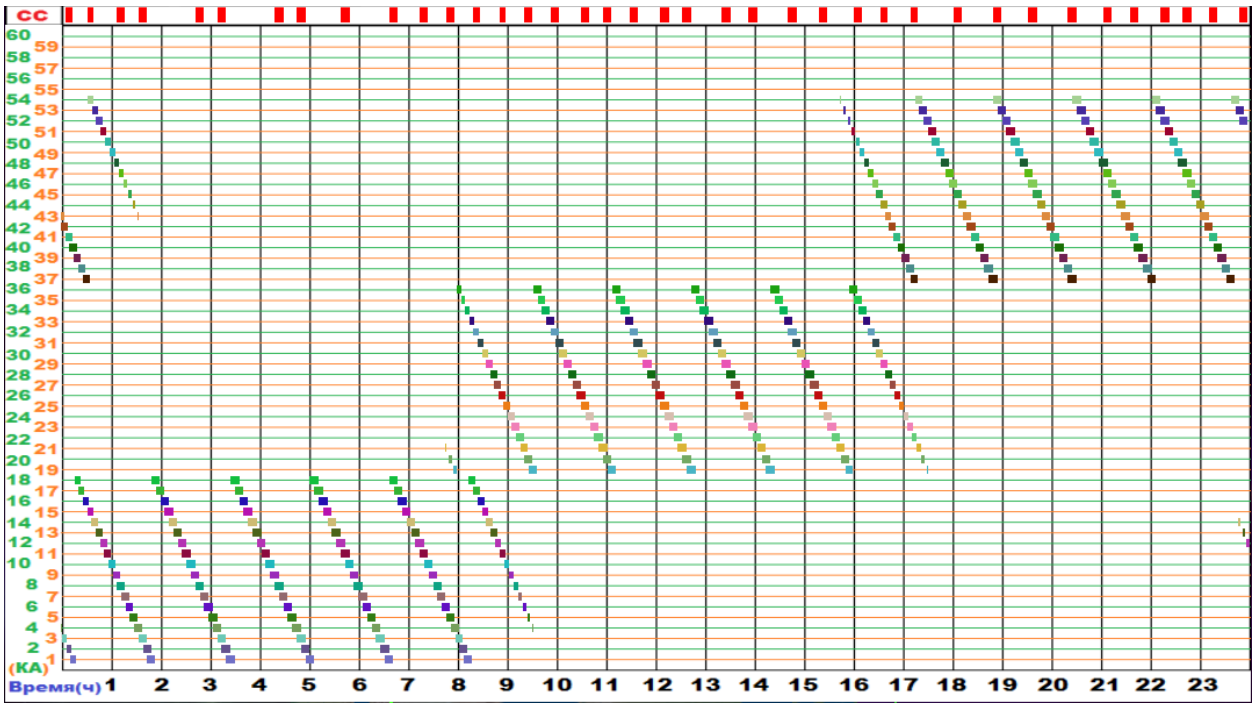


Рисунок 3.14.а - График ЗРВ и СС для КИС «Калининград» с 54 КА

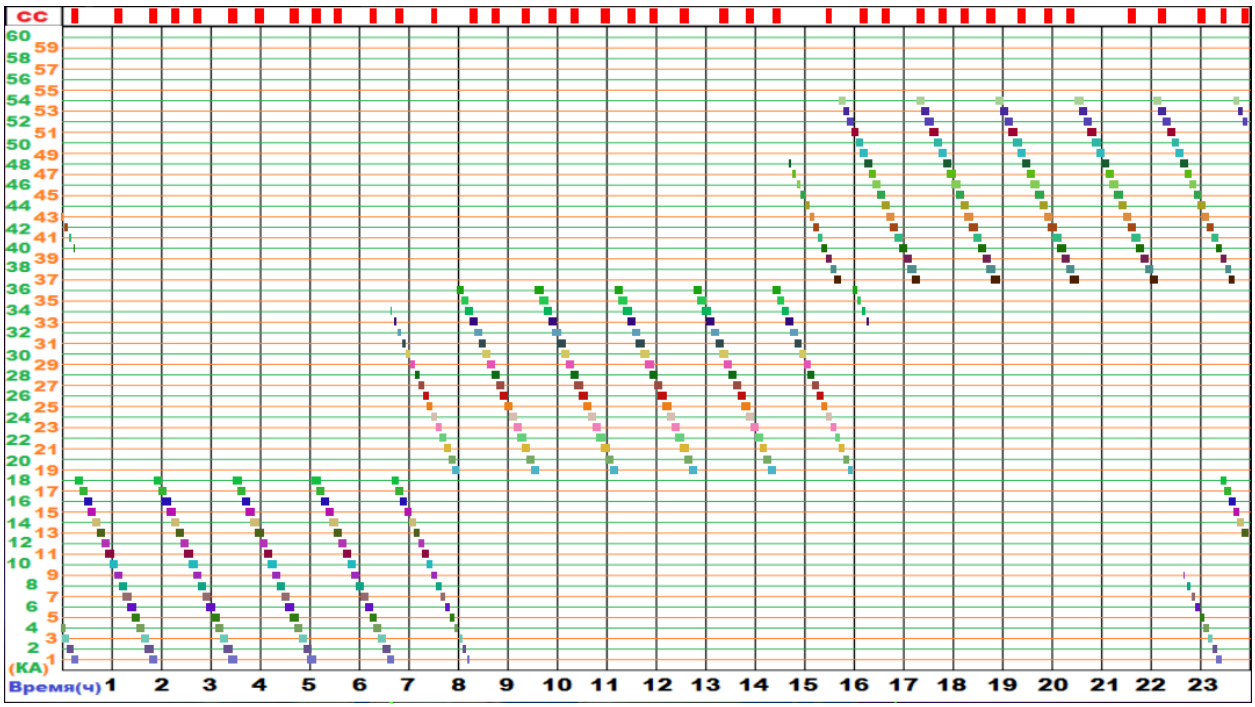


Рисунок 3.14.б - График ЗРВ и СС для КИС «Медвежьи озера» с 54 КА

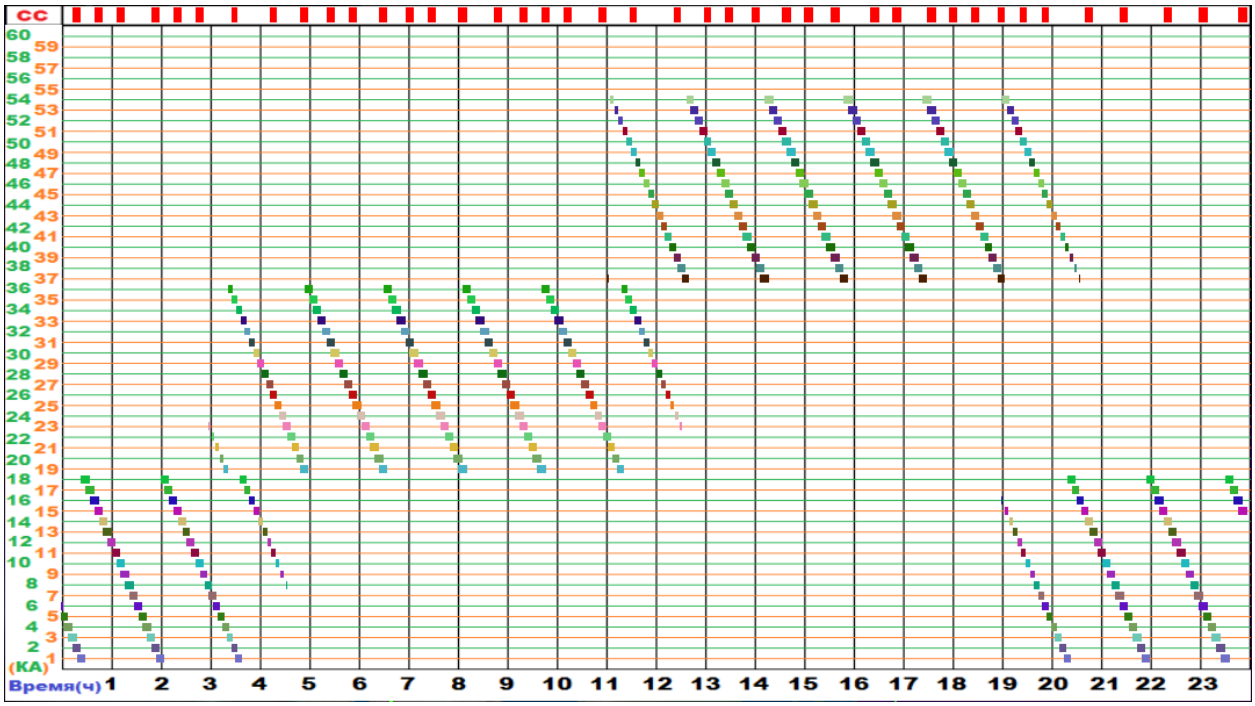


Рисунок 3.14.в - График ЗРВ и СС для КИС «Железногорск» с 54 КА

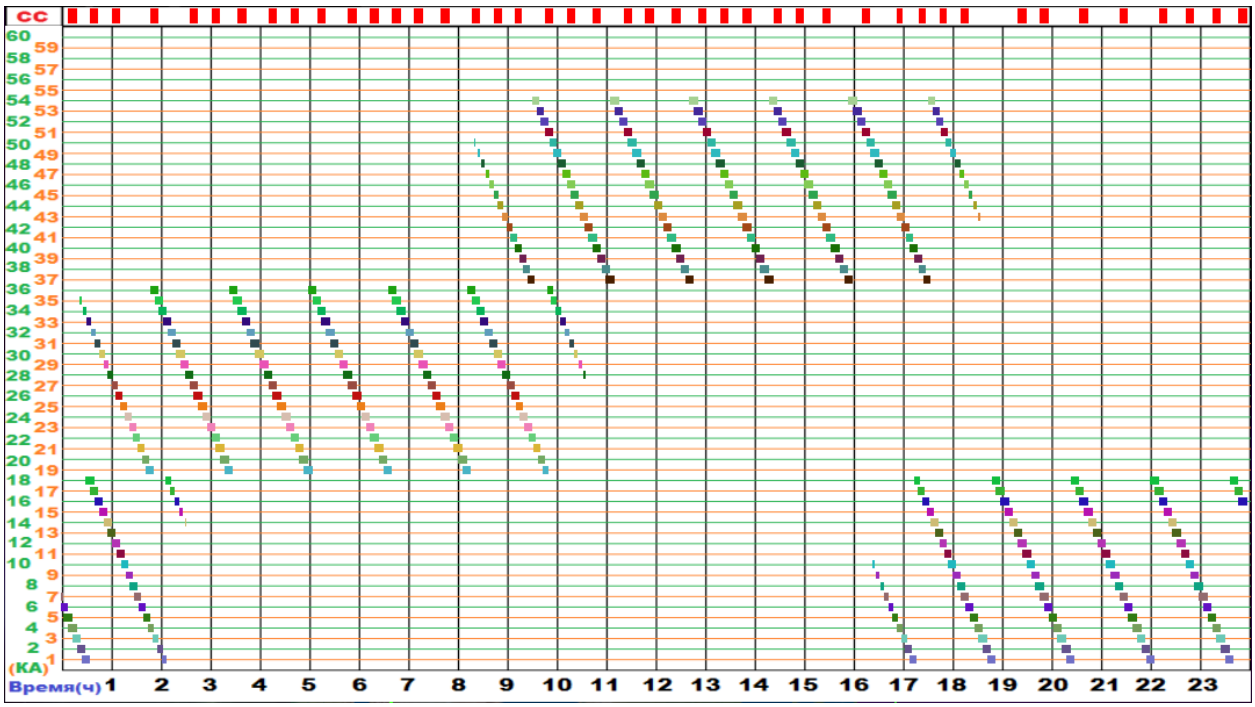


Рисунок 3.14.г - График ЗРВ и СС для КИС «Углегорск» с 54 КА

Вдоль вертикальной оси обозначены номера КА, вдоль горизонтальной оси обозначено время в часах, в верхней части графика отмечено время СС.

На рисунке 3.15 проиллюстрировано визуальное отображение 54 КА на трех орбитах

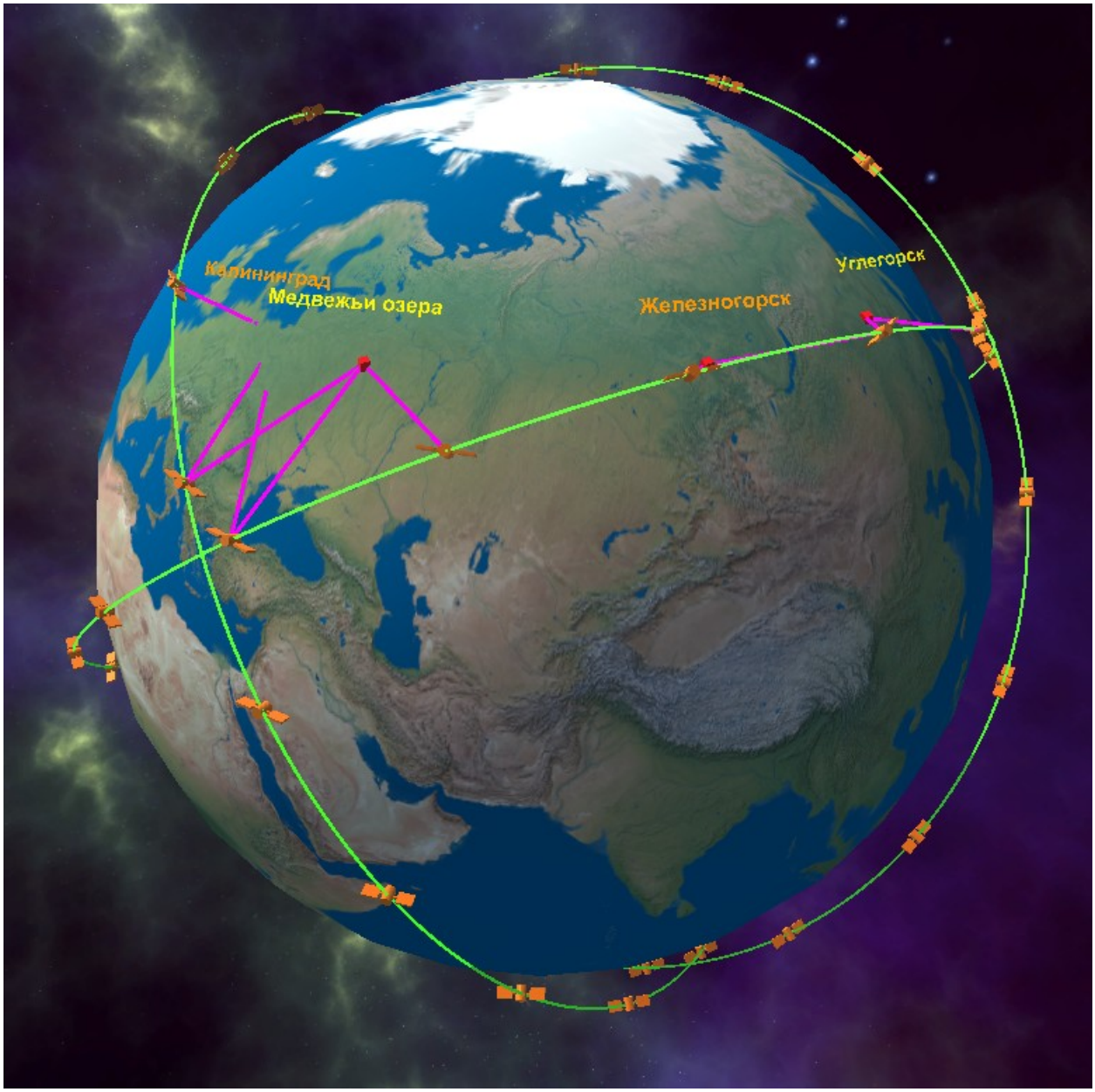


Рисунок 3.15 – 54 КА на трех орбитах

В таблице 3.3. представлено суммарно занятое под СС время на каждом КИС в процентах относительно 24 часов для разного числа КА (без учета времени подготовки к следующему СС).

Таблица 3.3 - Доля 24 часов занятая под СС на каждом КИС.

Число КА	Доля 24 часов занятая под СС [%]			
	КИС «Калининград»	КИС «Медвежьи озера»	КИС «Железногорск»	КИС «Углегорск»
22	10.61	10.85	10.20	13.07
22+21	21.26	21.07	21.04	24.04
18+18+18	26.07	27.31	28.04	30.11

На рисунке 3.16 представлена траектория подспутниковой точки одного из КА на фоне прямоугольной развертки Земли.

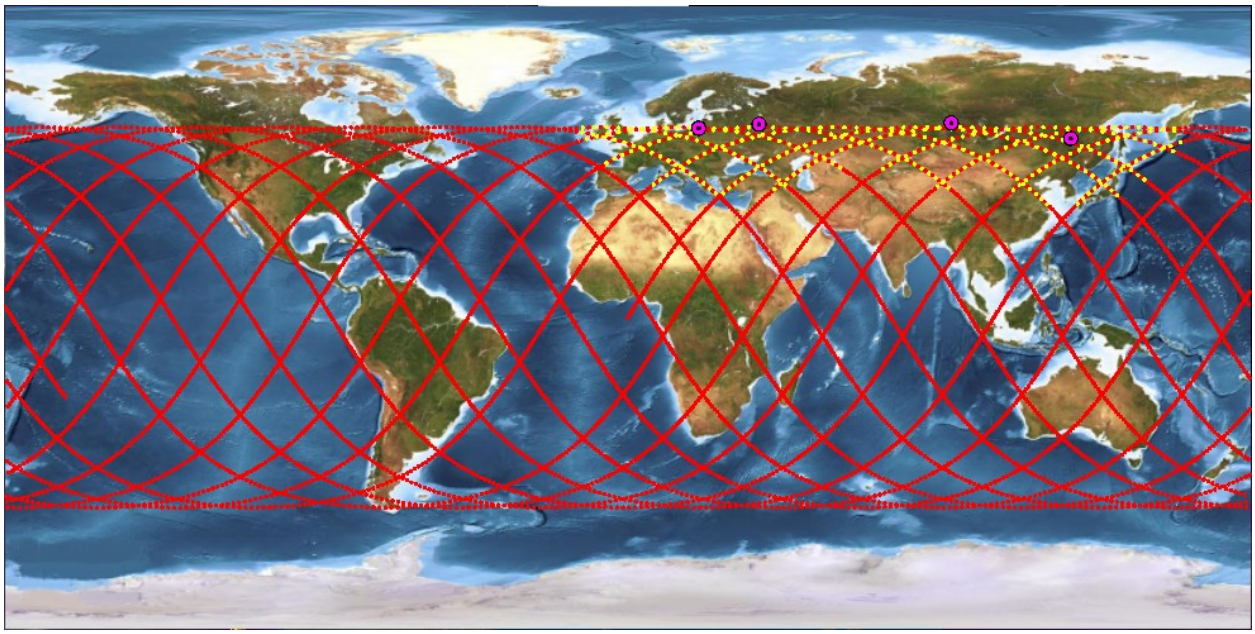


Рисунок 3.16 - Траектория подспутниковой точки КА на фоне прямоугольной развертки Земли

На рисунке 3.16 фиолетовыми окружностями с черным центром отмечаются КИС управления. Красным цветом отмечена траектория

подспутниковой точки КА. Желтый пунктир на траектории сигнализирует о том, что КА находился в ЗРВ с КИС управления.

3.14 Моделирование №2 задействование КИС

1. Количество СС:

Каждому аппарату задается по 3 СС управления в течение 24 часов без ограничения на время проведения (00:00:00 – 24:00:00).

2. Начальные данные КИС (управления):

КИС расположены по координатам следующих городов:

- Калининград – балтийский КИС (54.717 N, 20.5 E);
- Медвежьи озёра – западный КИС (55.868 N, 37.952 E);
- Железногорск – центральный КИС (56.25 N, 93.533 E);
- Углегорск – восточный КИС (51.76 N, 128.121 E);

3. Требования к ЗРВ, участвующим в распределении под СС:

- Минимальный порог *максимального* значения угла места КА относительно КИС в течение ЗРВ составляет 5 градусов включительно.
- Минимальная продолжительность ЗРВ не меньше 4 минут.

4. Дополнительно:

Дата и время (год.месяц.день; чч:мм:сс):

2000.01.01; 17:17:17

* При указанной выше дате и времени угол Гринвичского среднего звездного времени примерно равен нулю.

* На КИС блокируется время, занимаемое под СС, и дополнительные 15 минут на подготовку к следующему СС

- *a*, большая полуось орбиты;
- *e*, эксцентриситет орбиты;
- *i*, наклонение орбиты;
- *Ω*, долгота восходящего узла орбиты;
- *ω*, аргумент перицентра орбиты;

- u_0, аргумент широты КА в начальный момент времени;

5. Насыщение для 1-й орбиты.

КА равномерно распределяются на одной орбите. Параметры орбиты и положение КА в начальный момент времени:

a = 6771 [км];

e = 0;

i = 90[град];

Ω = 0[град];

ω = 0[град];

u – варьируется в градусах в диапазоне [0; 360).

Результат:

Для одной орбиты удается обеспечить проведение всех 3 СС для 17 КА, при этом дистанция между аппаратами по аргументу широты на орбите составляет примерно 21,176 градуса. На рисунках 3.17.а – 3.17.г представлены графики ЗРВ с каждым КИС, а в верхней части графика – время отведенное под СС.

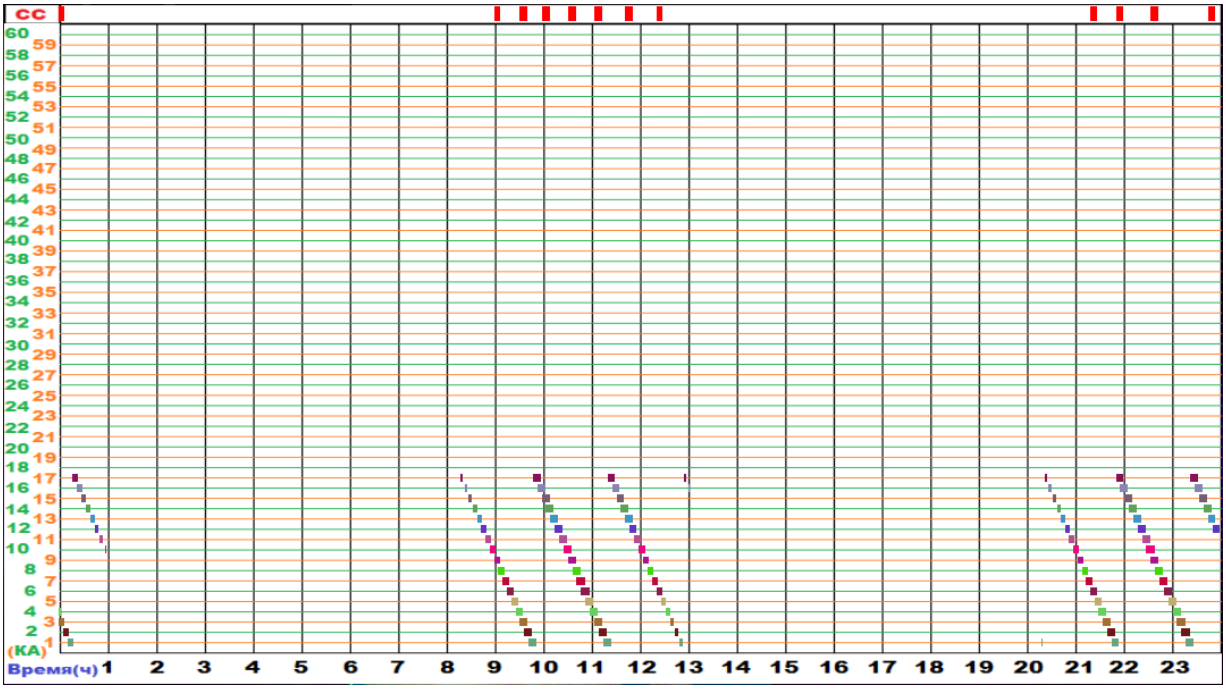


Рисунок 3.17.а - График ЗРВ и СС для КИС «Калининград» с 17 КА

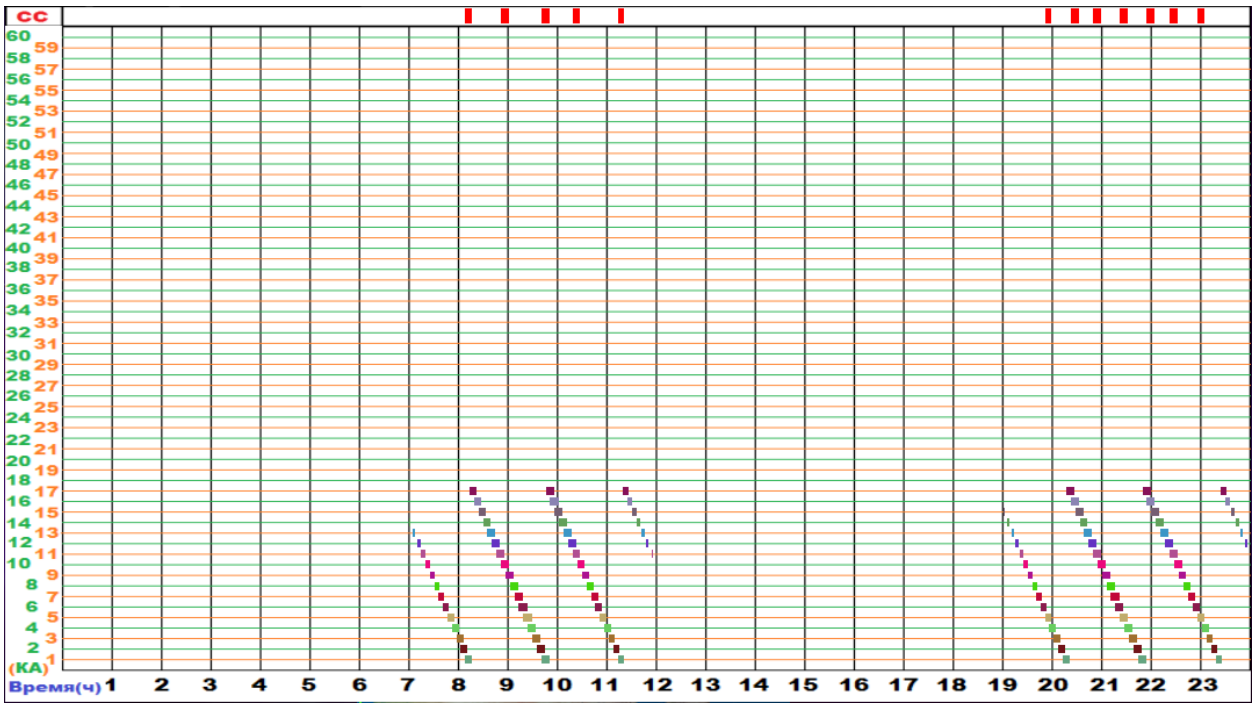


Рисунок 3.17.б - График ЗРВ и СС для КИС «Медвежьи озера» с 17 КА

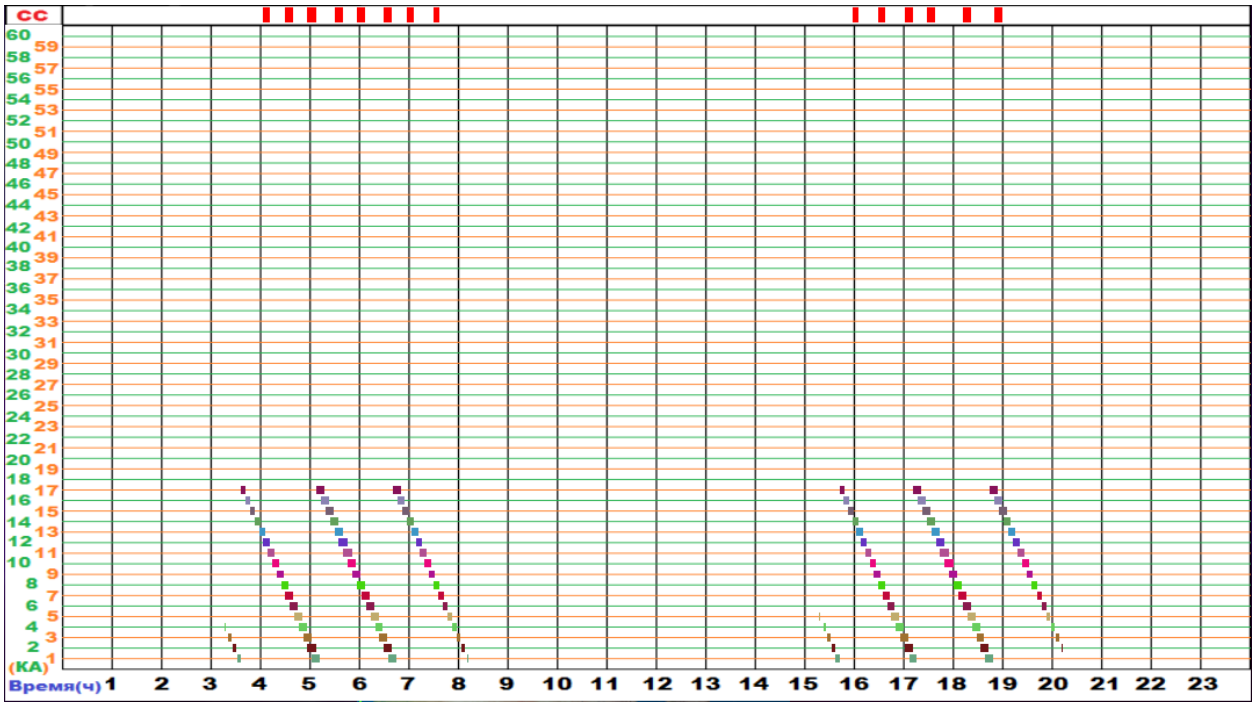


Рисунок 3.17.в - График ЗРВ и СС для КИС «Железногорск» с 17 КА

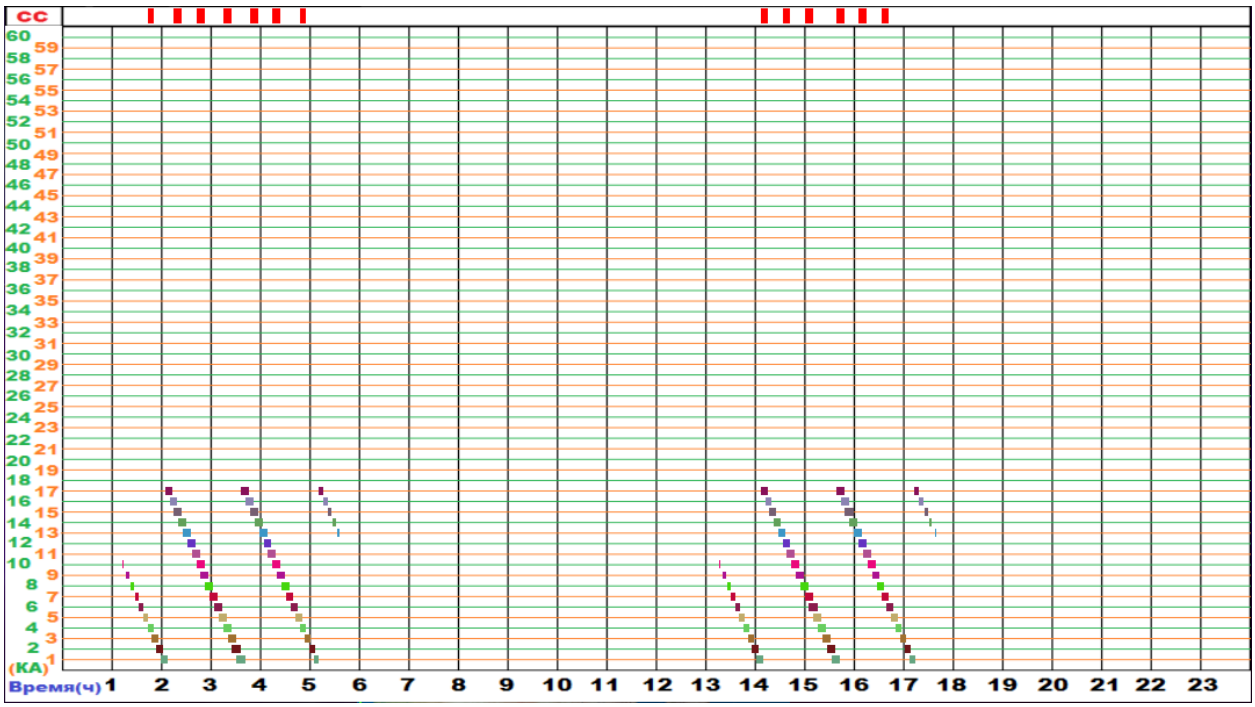


Рисунок 3.17.г - График ЗРВ и СС для КИС «Углегорск» с 17 КА

Вдоль вертикальной оси обозначены номера КА, вдоль горизонтальной оси обозначено время в часах, в верхней части графика отмечено время СС.

На рисунке 3.18 проиллюстрировано визуальное отображение 17 КА на одной полярной орбите.

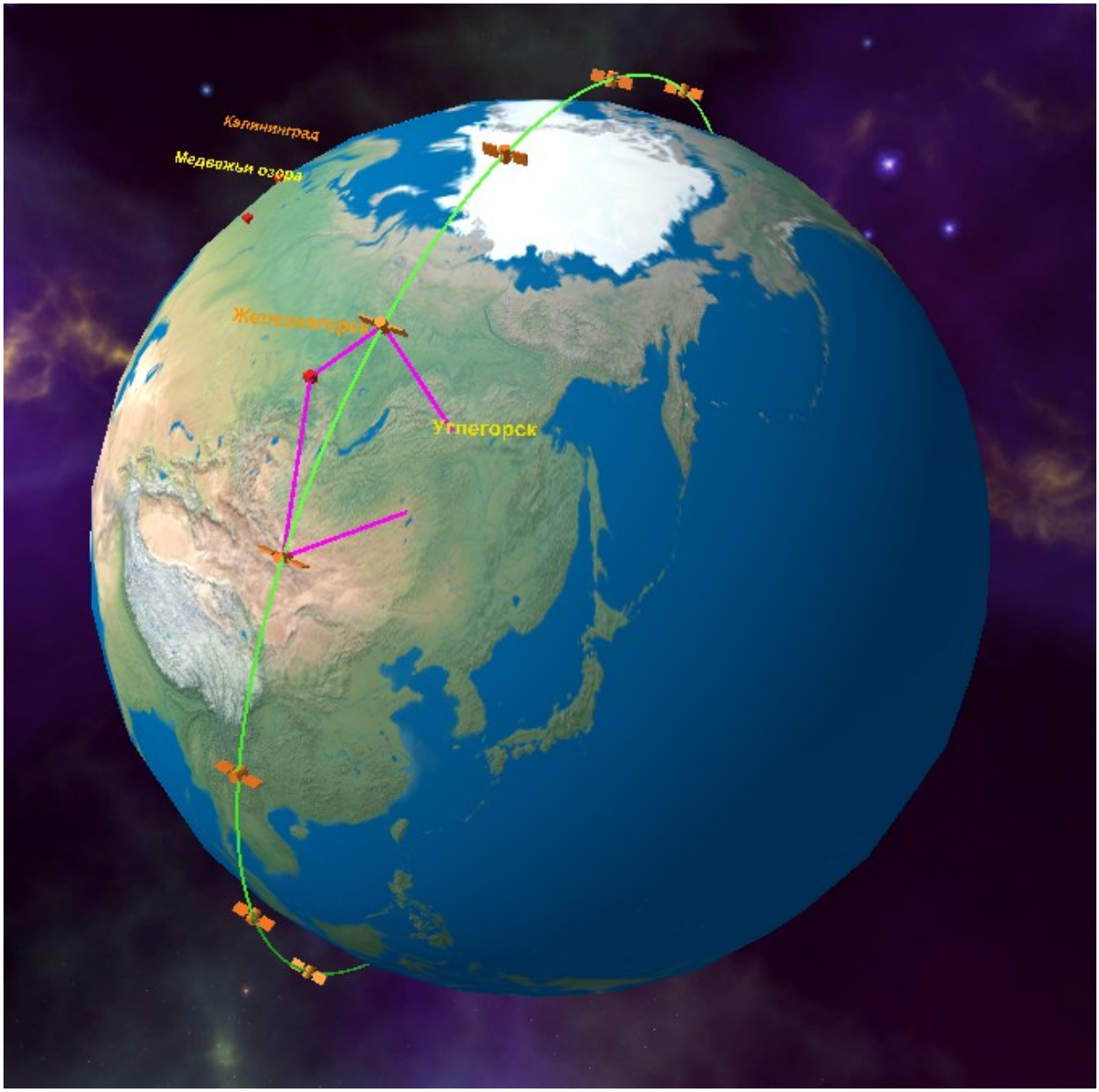


Рисунок 3.18 – 17 КА на одной полярной орбите.

6. Насыщение для 2-ух орбит.

КА равномерно распределяются на двух орбитах, разнесенных по долготе восходящего узла на 90 градусов. Параметры орбит и положение КА в начальный момент времени:

a = 6771 [км];

e = 0;

i = 90[град];

$\Omega_1 = 0$*[град];* $\Omega_2 = 90$*[град];*

$\omega = 0$*[град];*

u – варьируется в градусах в диапазоне [0; 360).

Результат:

Удается обеспечить проведение всех 3 СС для 17 КА на каждой орбите. Дистанция между КА по аргументу широты на каждой орбите составляет примерно 21,176 градуса. На рисунках 3.19.а – 3.19.г представлены графики ЗРВ с каждым КИС, а в верхней части графика – время отведенное под СС.

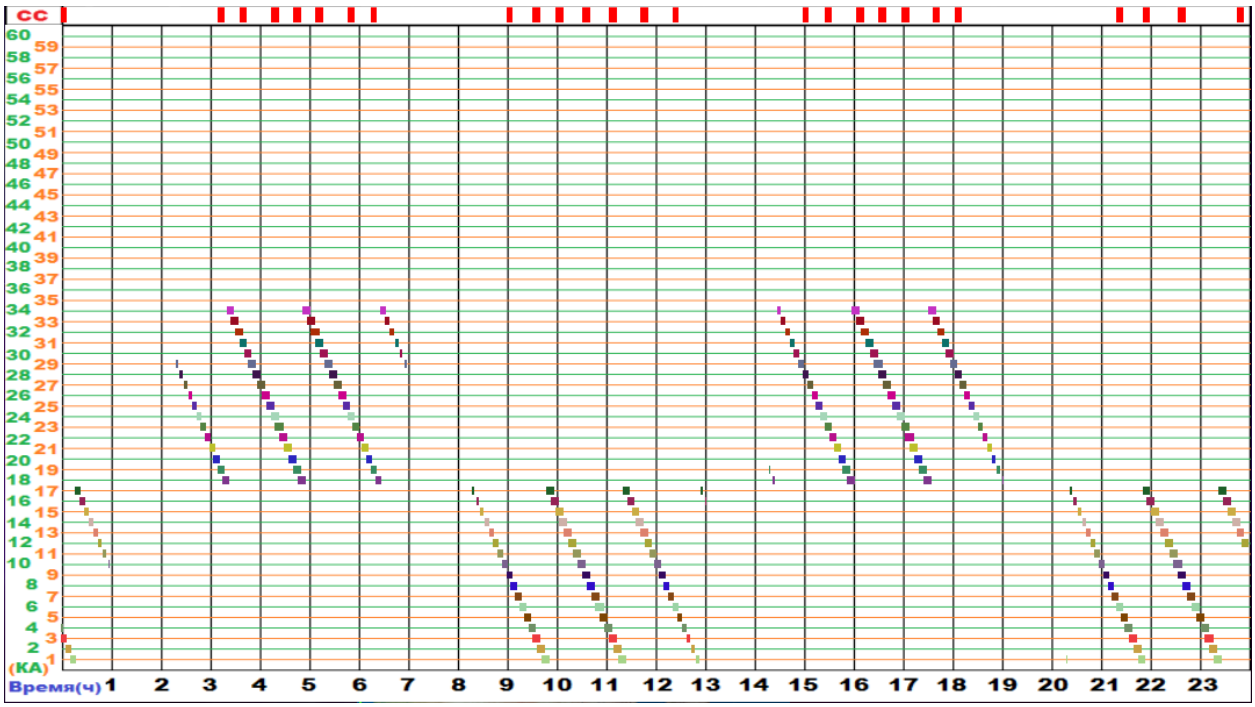


Рисунок 3. 19.а - График ЗРВ и СС для КИС «Калининград» с 34 КА

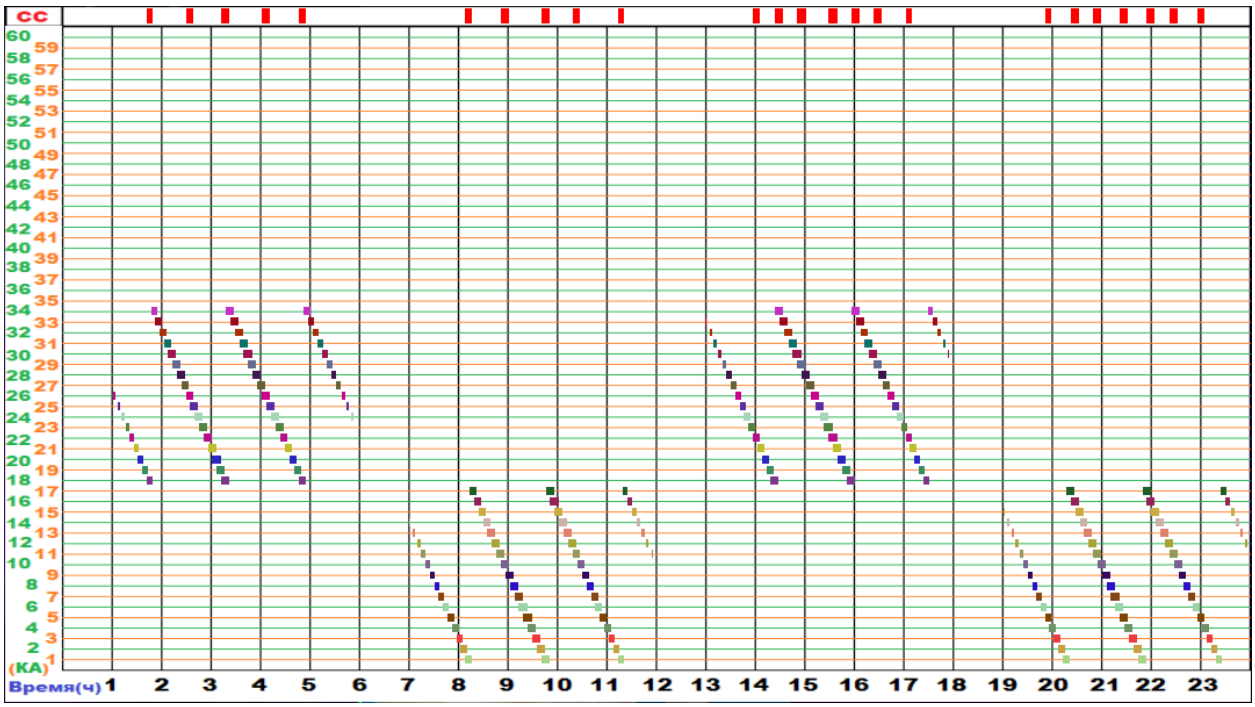


Рисунок 3. 19.б - График ЗРВ и СС для КИС «Медвежьи озера» с 34 КА

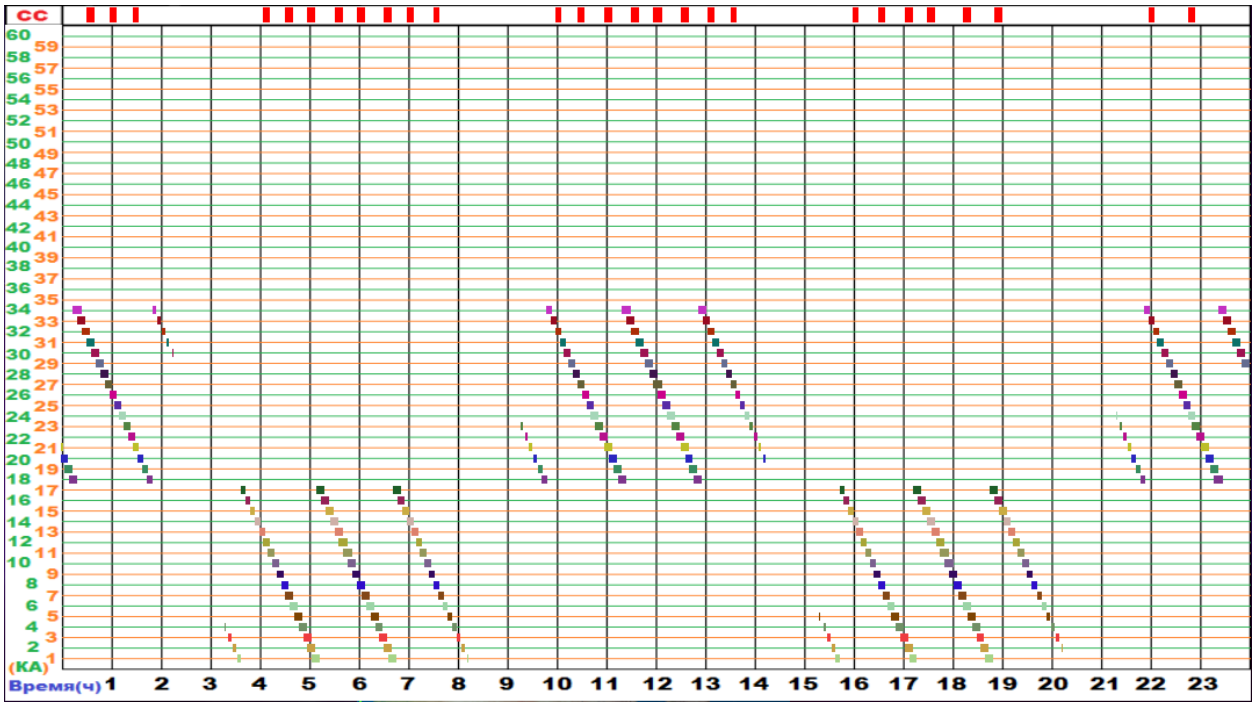


Рисунок 3. 19.в - График ЗРВ и СС для КИС «Железногорск» с 34 КА

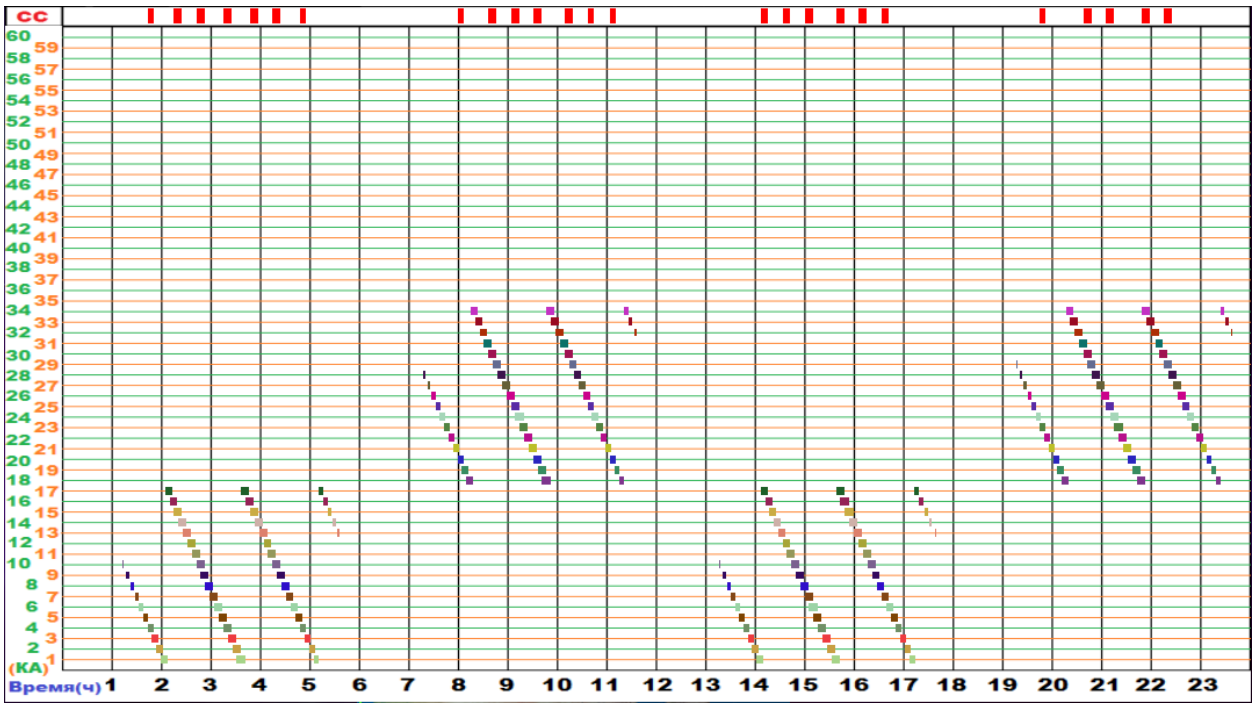


Рисунок 3. 19.г - График ЗРВ и СС для КИС «Углегорск» с 43 КА

Вдоль вертикальной оси обозначены номера КА, вдоль горизонтальной оси обозначено время в часах, в верхней части графика отмечено время СС.

На рисунке 3.20 проиллюстрировано визуальное отображение 34 КА на двух полярных орбитах.

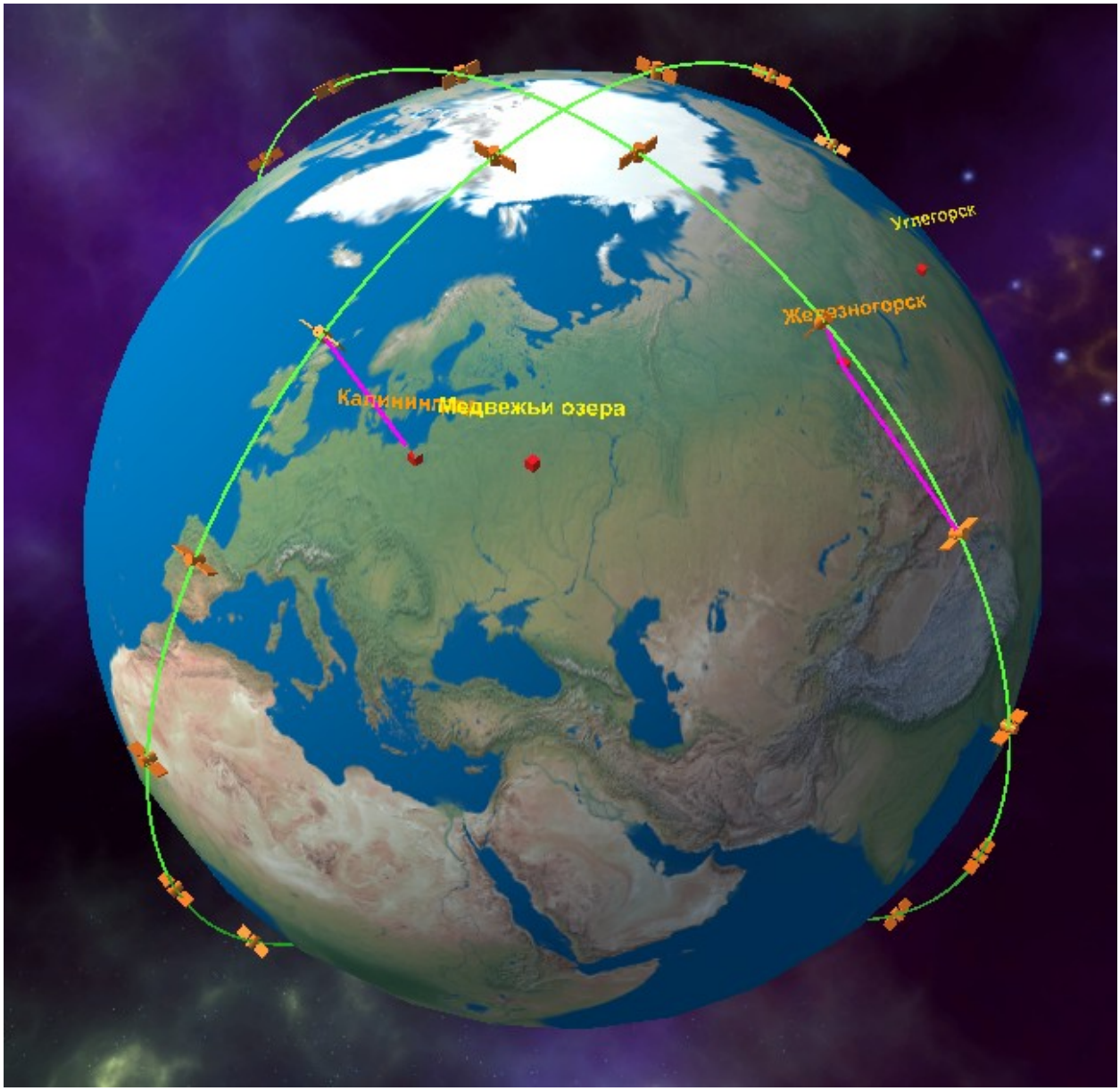


Рисунок 3.20 – 34 КА на двух полярных орбитах

7. Насыщение для 3-ех орбит.

КА равномерно распределяются на трех орбитах, разнесенных по долготе восходящего узла на 120 градусов. Параметры орбит и положение КА в начальный момент времени:

a = 6771 [км];

e = 0;

i = 90[град];

$\Omega_1 = 0[град]; \Omega_2 = 120[град]; \Omega_3 = 240[град];$

$\omega = 0[град];$

u – варьируется в градусах в диапазоне [0; 360).

Результат:

Удается обеспечить проведение всех 3 СС для 16 КА на первой орбите, 17 КА второй и 17 КА третьей орбите. Дистанция между КА по аргументу широты на первой орбите составляет 22,5 градуса. Дистанция между КА по аргументу широты на второй и третьей орбите составляет примерно 21,176 градуса. На рисунках 3.21.а – 3.21.г представлены графики ЗРВ с каждым КИС, а в верхней части графика – время отведенное под СС.

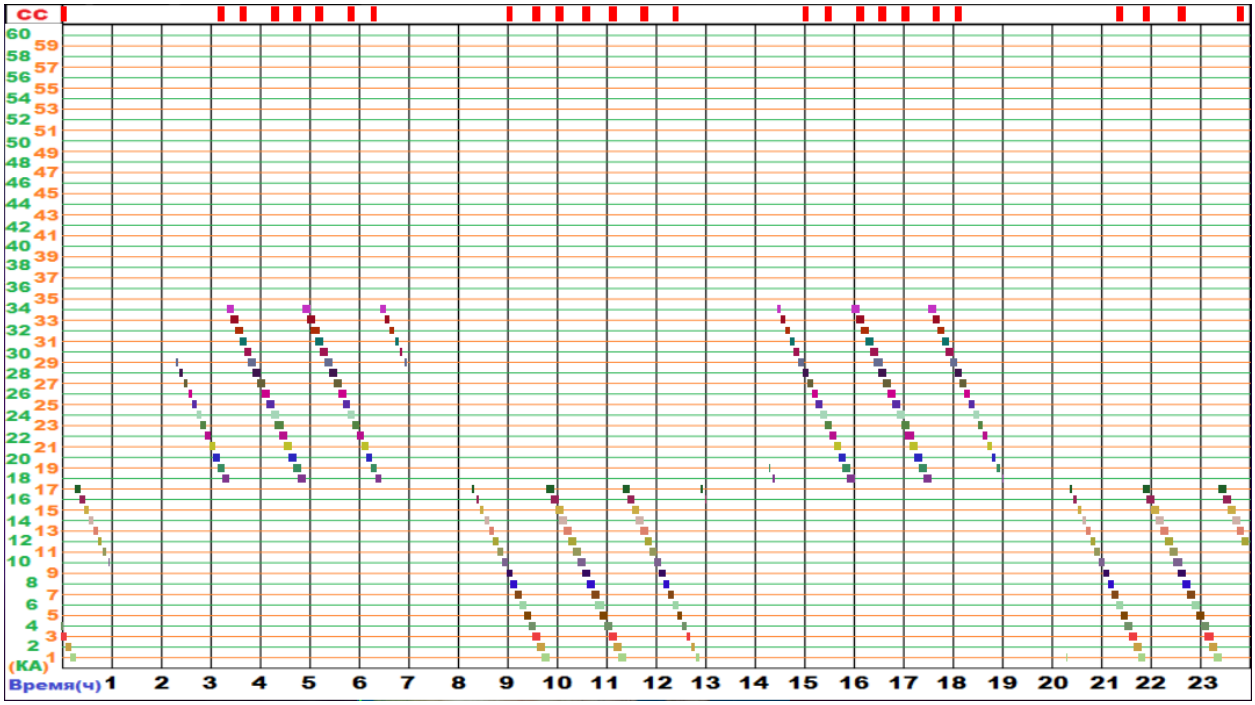


Рисунок 3.21.а - График ЗРВ и СС для КИС «Калининград» с 50 КА

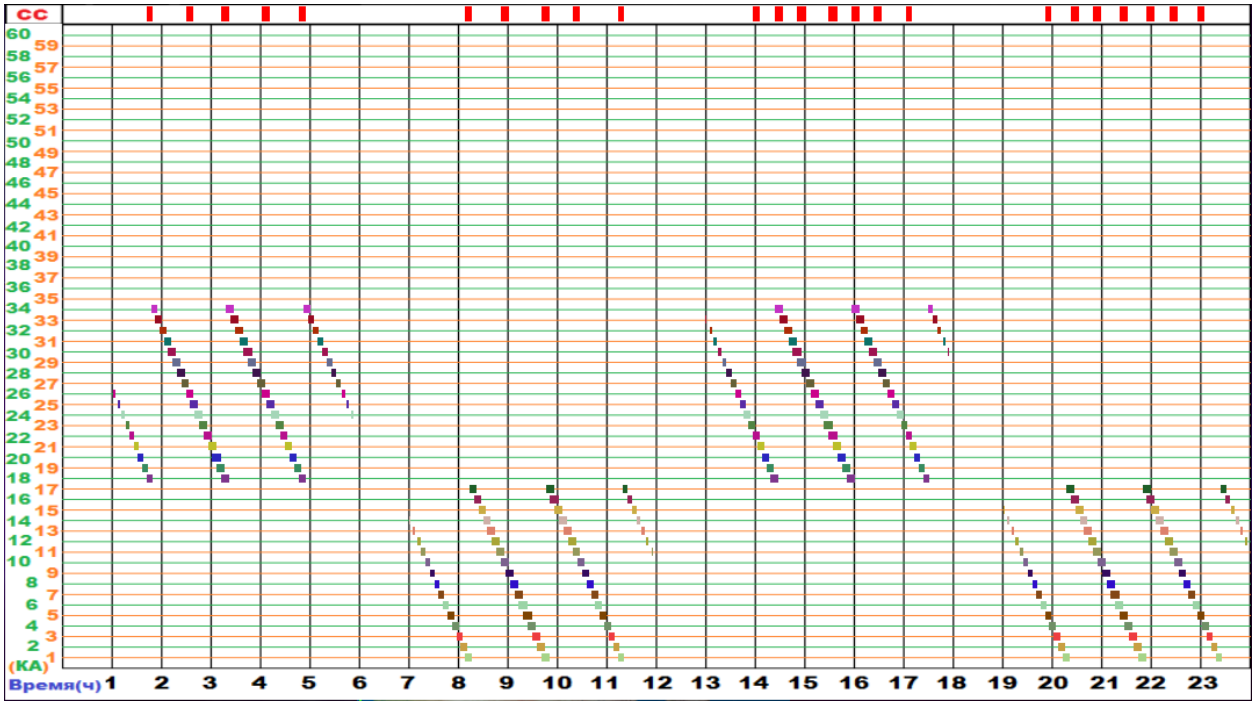


Рисунок 3.21.б - График ЗРВ и СС для КИС «Медвежьи озера» с 50 КА

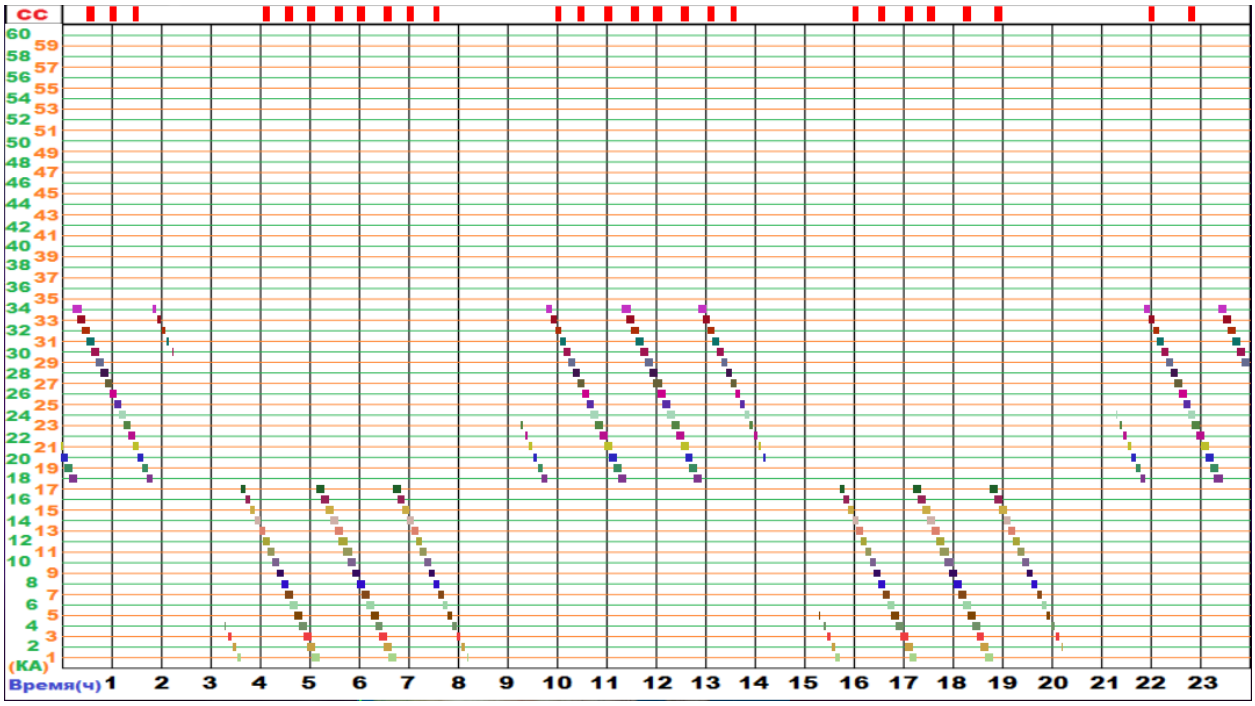


Рисунок 3.21.в - График ЗРВ и СС для КИС «Железногорск» с 50 КА

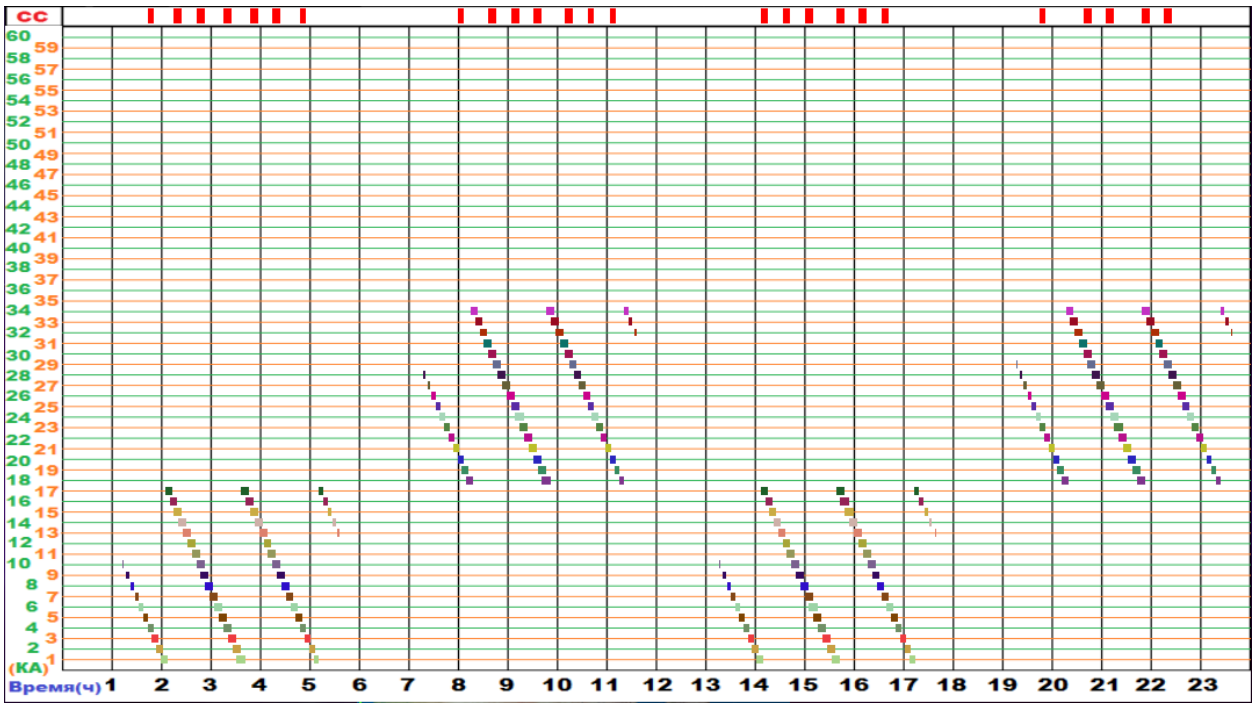


Рисунок 3.21.г - График ЗРВ и СС для КИС «Углегорск» с 50 КА

*Вдоль вертикальной оси номер КА, вдоль горизонтальной оси время в часах, в верхней части графика отмечено время СС.

На рисунке 3.22 проиллюстрировано визуальное отображение 50 КА на трех полярных орбитах.

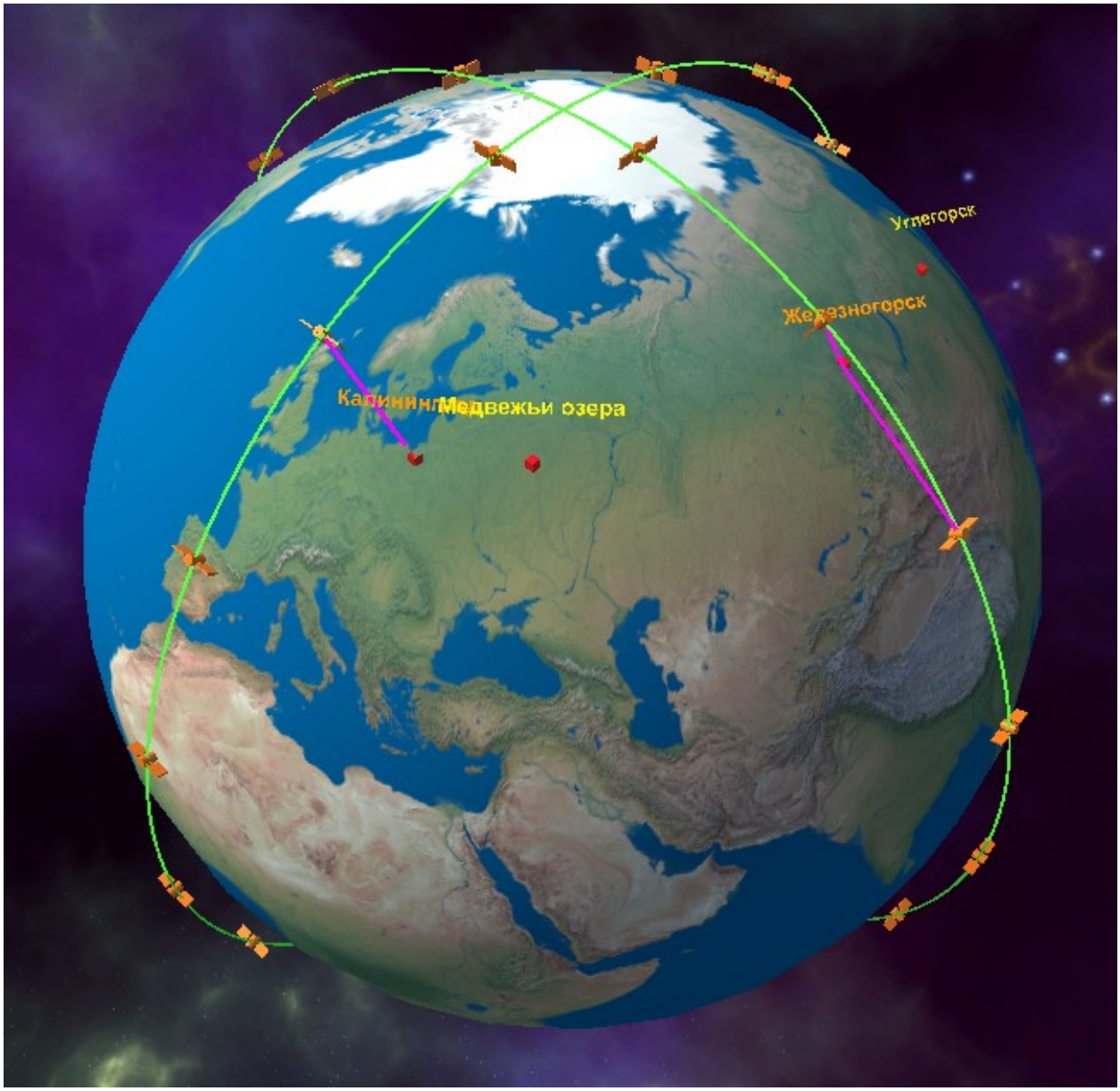


Рисунок 3.22. 50 КА на трех полярных орбитах

В таблице 3.4. представлено суммарно занятое под СС время на каждом КИС в процентах относительно 24 часов для разного числа КА (без учета времени подготовки к следующему СС).

Таблица 3.4 - Доля 24 часов занятая под СС на каждом КИС.

Число КА	Доля 24 часов занятая под СС [%]			
	КИС «Калининград»	КИС «Медвежьи озера»	КИС «Железногорск»	КИС «Углегорск»
17	7.42	7.57	8.76	8.19
17+17	16.20	15.15	16.57	15.57
16+17+17	21.43	24.67	24.02	22.13

На рисунке 3.23 представлена траектория подспутниковой точки одного из КА, двигающегося по полярной орбите, на фоне прямоугольной развертки Земли.

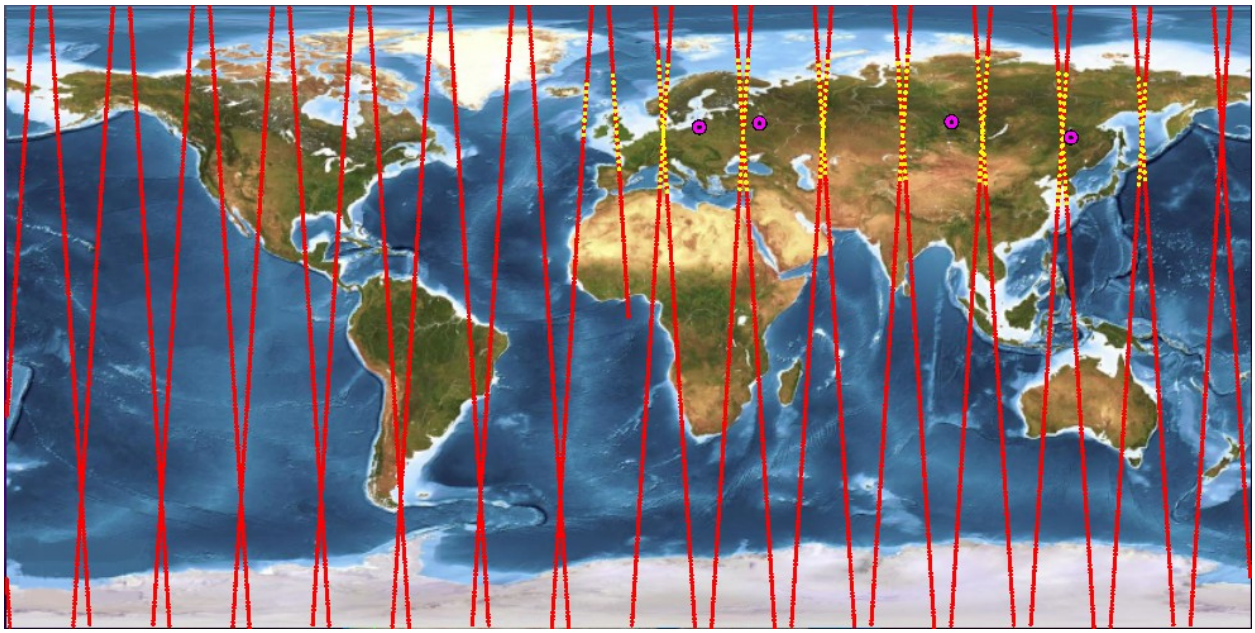


Рисунок 3.23 - Траектория подспутниковой точки КА, двигающегося по полярной орбите, на фоне прямоугольной развертки Земли

На рисунке 3.23 фиолетовыми окружностями с черным центром отмечаются КИС управления. Красным цветом отмечена траектория подспутниковой точки КА. Желтый пунктир на траектории сигнализирует о том, что КА находился в ЗРВ с КИС управления.

Испытания программного комплекса расчета оптимального распределения средств управления крупномасштабными орбитальными группировками КА прошли успешно:

- программный комплекс запускается и корректно работает на ПЭВМ с характеристиками не хуже указанных в требованиях. Испытания проводились на двух ПЭВМ – под управлением ОС Windows XP (SP2) и под управлением ОС Windows 7.
- в процессе испытаний взаимодействие со всеми элементами графического интерфейса вызывало заявленный эффект. Процесс ввода начальных данных для простоты восприятия разбит несколько этапов. Реализована возможность быстрого заполнения форм графического интерфейса при использовании готовых шаблонов начальных данных.
- на ПЭВМ с характеристиками не хуже требуемых все элементы графического интерфейса, а также элементы 3D визуализации отображались корректно.
- Программный комплекс выполняет свое функциональное назначение в полном объеме, что и продемонстрировано в примере, приведенном в настоящего документа.

По результатам испытаний можно сделать заключение о готовности программного комплекса для расчета оптимального распределения средств управления крупномасштабными орбитальными группировками КА к эксплуатации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты исследований по разработке методов, алгоритмов и программного комплекса расчета оптимального распределения средств управления крупномасштабными орбитальными группировками КА сводятся к следующему:

1. Основным принципом планирования применения ТС НАКУ КА НСЭН как системы массового обслуживания является принцип коллективного использования ТС НКУ, заключающийся в том, что одни и те же средства задействуются для управления КА НСЭН различного назначения. Этот принцип обуславливает необходимость централизации выполнения работ при планировании применения ТС НАКУ КА НСЭН.

2. Задачи планирования приобретают повышенную актуальность при ограниченном ресурсе средств наземного автоматизированного комплекса управления (НАКУ), а также в связи с различными условиями полета и орбитальным построением крупномасштабных группировок КА.

3. В рамках разработки методов и алгоритмов расчета оптимального распределения средств управления крупномасштабными орбитальными группировками (КОГ) КА на основе анализа требований к организации процесса управления и основных направлений эволюции перспективной космической инфраструктуры рассмотрены существующие методологические подходы к решению проблем управления ОГ КА.

Рассмотрены методы распределения средств НКУ для ОГ «Глонасс», ОГ «Гонец», ОГ ФГУП «Космическая связь», ОГ РС МКС и ОГ КА НСЭ, однако наибольший интерес для создания крупномасштабных ОГ представляют КА НСЭН, управляемые из ЦУП АО «ЦНИИмаш».

«Введенный в эксплуатацию ЦСАКП обеспечивает планирование средств НКУ для управление текущей ОГ ЦУП АО «ЦНИИмаш», но он не обеспечивает управление КОГ. Рассмотренные в данной работе средства планирования распределения НКУ больших ОГ, перечисленных выше, не обладают возможностью работать с КОГ. В связи с этим в данной ВКР был

разработан метод и алгоритм для управления КОГ.

4. В основу методологического подхода к оптимизации структурного построения средств управления орбитальными группировками КА положены принципы формирования иерархических уровней с последующей оптимизацией процессов взаимодействия элементов сложных систем. На основе анализа функционирования элементов системы в процессе разработки методов и алгоритмов планирования определены основные иерархические уровни, взаимодействие которых определяет уровни взаимодействия оптимизацией процессов взаимодействия элементов сложных систем.

5. Предложенные методологические подходы и модели позволяют решить задачи, играющие основную роль в формировании перспективной космической инфраструктуры. Вместе с тем, для окончательного выбора и обоснования оптимальных решений представляется необходимым проведение имитационного моделирования возможных ситуаций при управлении орбитальных группировок КА для широкого набора начальных условий и исходных данных. Эти подходы могут найти широкое применение в различных областях научно – исследовательской и практической деятельности.

6. Предложена методика планирования комплексного задействования технических средств управления крупномасштабными орбитальными группировками КА.

7. Осуществлена разработка алгоритмов и программного комплекса расчета оптимального распределения средств управления крупномасштабными орбитальными группировками КА.

8. Программный комплекс расчета оптимального распределения средств управления крупномасштабными орбитальными группировками КА, предназначен для решения следующих функциональных задач:

а) моделирование движения переменного числа КА (группировки КА) по орбитам вокруг Земли в течение 24 часов на основе начальных данных,

введенных пользователем;

b) определение зон радиовидимости (ЗРВ) каждого КА с переменным числом командно-измерительных систем (КИС), размещенных на поверхности Земли (КИС подразделяются на КИС управления и КИС приема целевой информации);

c) планирование СС на основе полученных ЗРВ и начальных данных, введенных пользователем (СС подразделены на СС управления и СС передачи целевой информации);

d) отображение всей доступной пользователю информации посредством графического интерфейса;

e) сохранение списков ЗРВ и СС в текстовых файлах.

9. Программный комплекс расчета оптимального распределения средств управления крупномасштабными орбитальными группировками КА обладает следующими возможностями:

1) моделировать движение до 1000 КА одновременно (при задании количества КА следует учитывать мощность ПЭВМ);

2) работать с размещенными на поверхности Земли до 500 КИС управления одновременно (при задании количества КИС следует учитывать мощность ПЭВМ). 4 КИС управления («Балтийский», «Западный», «Центральный» и «Восточный») размещены по умолчанию и могут быть частично либо полностью пользователем исключены;

4) рассчитывать прогноз орбитальной обстановки на основе исходных данных на период 24 часа, считая от заданного начального момента времени.

10. Программный комплекс расчета оптимального распределения средств управления крупномасштабными орбитальными группировками КА является завершенным, применяемым с самостоятельной программой с пользовательским графическим интерфейсом.

10.1. На входе программы задается:

- начальный момент времени работы программного комплекса;

- конфигурация орбитальной группировки КА и наземных средств

управления (КИС).

10.2. На выходе пользователь получает план СС в соответствии с предъявленными требованиями к времени их проведения и другую вспомогательную информацию.

10.3. Работу программного комплекса можно условно разбить на 3 этапа:

- ввод начальных данных;

- моделирование движения КА по орбитам Земли на основе начальных данных и определение ЗРВ;

- планирование и расчет СС, на основе полученных ЗРВ и начальных данных, введенных пользователем.

10.4. Программный комплекс состоит из следующих основных модулей:

- модуль ввода и обработки начальных данных;

- модуль расчета движения КА;

- модуль определения ЗРВ;

- модуль планирования СС;

- модуль сохранения результатов моделирования.

11. Программный комплекс в настоящее время готов для моделирования зон радиовидимости и сеансов связи по исходным данным.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Соловьев В.А., Лысенко Л.Н., Любинский В.Е. Управление космическими полетами. Ч. 1, 2. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009, 912 с.
2. Любинский В.Е., Соловьев В.А. Управление полетом МКС: развитие методов и средств управления орбитальными комплексами. Полет, 2005, № 6,
3. Ванин А.В., Воронов Е.М., Карпунин А.А. Оптимизация управления в двухуровневой иерархической системе стабилизации — наведения летательного аппарата. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки, 2012, № 6, с. 19–42.
4. Багдасарян А.Г. Общая структура информационной экспертной системы моделирования и анализа сложных иерархических систем в контуре управления. Управление большими системами. Сб. тр. Москва, Изд-во Института проблем управления РАН, 2008, № 21, с. 58–70.
5. Sokolov N.L. Optimization methodology of hierarchical control of orbit groups. Lambert academic publishing, 2014, 70 p.
6. Подиновская О.В., Подиновский В.В. Анализ иерархических многокритериальных задач принятия решений методами теории важности критериев.
7. Проблемы управления, 2014, № 6, с. 2–8.
8. Матюшин М.М. Использование логико-вероятностной модели для оценки значимости структурных элементов оперативного контура управления РС МКС. Космонавтика и ракетостроение, 2007, вып. 1(46), с. 144–153.
9. Bulekbaeva K., Brener A., Turalina M. Relaxation models of competing manufactures dynamics. 13th International Conference on Systems Theory and Scientific Computation (ISTASC 13). Valencia, Spain, 6–8 August, 2013, pp. 147–151.
10. Матюшин М.М., Соколов Н.Л., Овечко В.М., Поливников В.М. Проектирование рациональных схем распределения средств управления при эксплуатации крупномасштабных орбитальных группировок

космических аппаратов. Научно-технический журнал «Полет» №5-6 2016 г., с 10-16.

11. Матюшин М.М., Соколов Н.Л., Гершман К.Э., Овечко В.М. Стохастический метод формализации процесса оптимального распределения наземных средств управления группировкой космических аппаратов. Научно-технический журнал «Полет» №5-6 2016 г., с 3-8.
12. Матюшин М.М., Соколов Н.Л., Овечко В.М. Направление развития средств и технологий управления перспективными орбитальными группировками космических аппаратов. Актуальные проблемы Российской космонавтики. Материалы XXXIX академических чтений по космонавтике. Москва, январь 2015г. С. 296-297.
13. Матюшин М.М., Соколов Н.Л., Овечко В.М. Методологические подходы к решению проблем управления крупномасштабными группировками космических аппаратов. XL Академические чтения по космонавтике. Сборник тезисов, 26-29 января. С. 278-279.
14. Соколов Б.В. Динамические модели и алгоритмы комплексного планирования работы наземных технических средств с навигационными космическими аппаратами. Труды СПИИРАН. 2010. Вып. 2(13)
15. Месарович М., Мако Д., Ткахара И. Теория иерархических многоуровневых систем – М., Мир, 1973. –с. 344.
16. Разработка методологии автоматизированного планирования, универсальных математических моделей комплексного задействования средств НАКУ и МКСР «Луч» при организации управления перспективной ОГ КА НСЭН. СЧ НИР «Магистраль» (Облик). ФГУП ЦНИИмаш, 2013г.
17. Анализ проблем оптимизации аппаратно-программных комплексов ЦСАКП и алгоритмов планирования работы средств НАКУ КА НСЭН на основе методов теории массового обслуживания. НИР «Магистраль-2». ФГУП ЦНИИмаш, 2010 г.
18. Разработка предложений по созданию аппаратно-программного комплекса ЦСАКП для автоматизированного решения задач планирования

применения средств НАКУ при обеспечении управления КА НСЭН. НИР «Магистраль» (Гарантия) ФГУП ЦНИИмаш, 2011 г.

19. Лысенко Л.Н., В.В. Бетанов. Принципы и основные направления совершенствования наземного автоматизированного комплекса управления космическими полетами. ISSN 0236-3941. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Машиностроение”. 2011. №1
20. Лабуткина Т.В., А.Н. Петренко. Днепропетровский национальный университет, Украина. Информационная система для задач анализа конфликтности многоэлементного множества орбитальных объектов. ISSN 1814-4225. Радіоелектронні і комп’ютерні системи, 2013, № 3 (62)
21. В.М. Илюшко, Е.С. Козелкова. Исследование возможности управления закрепленной орбитальной группировкой космических аппаратов единым центром управления полетами
22. Automating the satellite range scheduling process. Timothy D. Gooley, B.S. Operations Research, MBA Captain, USAF March, 1993
23. Соловьев В.А., Лысенко Л.Н., Любинский В.Е. Управление космическими полетами. Части 1, 2. Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2009. 912 с.
24. Любинский В.Е., Соловьев В.А. Управление полетом МКС: развитие методов и средств управления орбитальными комплексами. // М.: Полет, 2005. № 6.
25. ФГУП «Космическая связь» http://www.turkaramamotoru.com/ru.html
26. КРЫЛОВ А. Спутниковые системы связи и вещания. Состояние и перспективы развития. Москва 2014. http://rscc.ru/
27. Дятлов А.П. Системы спутниковой связи с подвижными объектами. Учебное пособие, Ч.1. Таганрог. ТРТУ. 1997г. 95 с.
28. Дудко А.Н., Литвиненко А.О., Сохранный Е.П. Использование метода ситуационного анализа при планировании задействования технических средств наземного автоматизированного комплекса управления с целью обеспечения управления орбитальной группировкой космических

аппаратов научного и социально-экономического назначения // Космонавтика и ракетостроение. 2012. № 4(69). С.128-141.

29. В.В. Князев В.В., В.В. Летунов В.В. Математическое обеспечение оптимизации наращивания орбитальной группировки низкоорбитальных систем спутниковой связи. http://lab18.ipu.ru/projects/conf2015/2/28.htm.

30. Литвиненко А.О. Программный комплекс автоматизированного планирования задействования средств наземного автоматизированного комплекса управления. Труды МАИ. Выпуск №86.

31. Дудко А.Н., Кучеров Б.А., Литвиненко А.О., Сохранный Е.П. Метод планирования бесконфликтного задействования наземных технических средств при обеспечении управления группировкой космических аппаратов // Космонавтика и ракетостроение. 2014. № 1(74). С.155-163.

32. Способ разрешения конфликтных ситуаций при управлении полетами космических аппаратов. Патент РФ 2566171. МПК B64G 3/00./ ФГУП ЦНИИмаш / Дудко А.Н., Кучеров Б.А., Литвиненко А.О., Овечко В.М., Паздников В.Ю., Сохранный Е.П. Бюл. № 29. Опубл. 20.10.2015.

33. Свешников А.А. Прикладные методы теории случайных функций. М.: Наука. - 1968. – с. 463.

34. Соколова Б.В. «Динамические модели и алгоритмы комплексного планирования работы наземных технических средств с навигационными космическими аппаратами. Труды СПИИРАН. 2010. Вып. 2(13).

35. Соколов Н.Л. Стохастический метод исследования возмущенного движения КА в атмосфере. Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королева. – 2014. - № 3. – т. 45. - с. 16-24.

36. Венцель Е.С. Исследование операций. М.: Советское радио. - 1972.- с. 407.

37. Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф. Математическая теория оптимальных процессов. М.: Наука. -1969. – с. 384.

38. Летов А.М. Динамика полета и управление. М.: Наука. - 1969. – с. 360.
39. Виноградов И. М. Теория множеств. Математическая энциклопедия. — М., Советская энциклопедия 1977—1985
40. Крылов И.А., Черноусько Ф.Л. Алгоритм метода последовательных приближений для задач оптимального управления. Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1972. - № 1. – т. 12. – с. 14-24.
41. Венцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Наука. – 1969. – с. 576.
42. Отчет о патентных исследованиях часть 2. – с. 285.