

На правах рукописи



НГУЕН НАМ КУИ

**МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ ОРБИТАЛЬНОГО ПОСТРОЕНИЯ  
ДВУХЪЯРУСНЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ  
НЕПРЕРЫВНОГО ОБЗОРА СФЕРИЧЕСКОГО СЛОЯ  
ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА**

Специальность 05.07.09

Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва, 2018 г.

Работа выполнена на кафедре «Системный анализ и управление» ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: **Разумный Юрий Николаевич**, профессор кафедры «Системный анализ и управление» Аэрокосмического института Московского авиационного института (национального исследовательского университета), доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Саульский Виктор Константинович**, главный специалист Акционерного общества «Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» имени А.Г. Иосифьяна», доктор технических наук

**Белоконов Игорь Витальевич**, заведующий межвузовской кафедрой космических исследований Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королёва, доктор технических наук, профессор

Ведущая организация: **Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского** (Федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» Минобороны России)

Защита состоится 14 марта 2019 года в 14:00 на заседании диссертационного Совета Д 212.125.12 в Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете, МАИ) по адресу: 125993, г.Москва, А-80, ГПС-3, Волоколамское ш., д.4

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского авиационного института (национального исследовательского университета, МАИ) по адресу: 125993, г.Москва, А-80, ГПС-3, Волоколамское ш., д.4 и на сайте МАИ: [https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT\\_ID=100305](https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=100305)

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

Отзывы, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 125993, г.Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское ш., д.4, Ученый совет МАИ

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 212.125.12

А.В.Старков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В связи с интенсивным развитием космических средств решения задач глобальной навигации, обеспечения безопасности космической деятельности, мониторинга засорённости космического пространства и ряда других перспективных задач в настоящее время остро встает вопрос определения рациональных вариантов орбитального построения спутниковых систем (СС), осуществляющих в абстрактной постановке непрерывный обзор районов в заданном сферическом слое околоземного космического пространства.

Объектом исследований в настоящей работе являются СС непрерывного обзора сферического слоя околоземного космического пространства (ОКП). При этом изучается общий случай  $L$ -кратного ( $L \geq 1$ ) обзора сферического слоя, когда для каждой точки сферического слоя в любой момент времени активного функционирования СС обеспечивается обзор не менее чем  $L$  спутниками системы.

Предметом исследований являются методы оптимизации орбитального построения СС непрерывного обзора сферического слоя ОКП.

Актуальность темы исследований определяется постановкой задачи оптимизации СС непрерывного обзора сферического слоя ОКП, недостаточностью проработки вопросов проектирования СС подобного типа и необходимостью совершенствования методологии оптимизации орбитального построения таких систем.

Степень разработанности вопросов оптимизации СС обзора сферического слоя ОКП можно охарактеризовать существующим уровнем проработки вопросов оптимизации орбитальных структур для обзора концентрических сфер, которыми может быть аппроксимирован сферический слой, так как вопросы оптимизации орбитальных структур СС непосредственно для обзора ОКП ранее практически не рассматривались. Исследования в области оптимизации СС непрерывного обзора сферы были начаты в 60-х годах прошлого века, когда в работах Л. Варго, Ф. Гобетца и некоторых других авторов был предложен и обоснован способ построения СС по принципу спутниковых цепочек, имеющий, как выяснилось позднее, существенный недостаток: способ применим только в случае, когда общее число спутников в системе кратно числу спутников в отдельных орбитальных плоскостях, из которых состоит СС, а число спутников в одной плоскости достаточно для формирования сплошной полосы обзора. Данный способ дает завышенные оценки необходимого числа спутников по сравнению с предложенными

Дж. Уолкером и Г.В. Можаяевым позднее, на рубеже 1960-х и 1970-х годов, и изученными в 1970-х и 1980-х годах ими совместно с другими исследователями так называемыми *дельта-системами* (в терминологии Дж. Уолкера, данный термин будем использовать в дальнейшем), получившими в иностранной литературе название системы Уолкера.

Дельта-системы строятся на круговых орбитах одинакового радиуса и наклона, имеют одинаковое количество спутников в орбитальных плоскостях, характеризуются равномерным распределением спутников вдоль орбиты и равномерным распределением восходящих узлов орбит вдоль экватора. Универсальным показателем качества дельта-систем непрерывного глобального покрытия сферы круговыми зонами обзора спутников принято считать  $\alpha$ -характеристику  $L$ -кратного обзора (обозначается  $\alpha^L$ ) – минимальный угловой радиус  $\alpha$  зон обзора, обеспечивающий непрерывное сплошное  $L$ -кратное покрытие сферы.

Задача непрерывного обзора ОКП появилась в последние годы в связи с развитием космической техники и ее применением в области глобальной навигации космических потребителей, мониторинга загрязненности космического пространства, решения задач инспекции спутников и их орбитального обслуживания и др. Обзор сферического слоя ОКП в абстрактной постановке можно интерпретировать как обзор отдельных концентрических сфер, которыми аппроксимируется сферический слой. Несмотря на имеющееся сходство в решении задач обзора единичной сферы и сферического слоя ОКП, последняя задача представляется существенно более сложной, так как оптимальные варианты СС обзора сферического слоя, как показано в настоящей работе, в общем случае лежат не в традиционном классе одноярусных СС (характеризующихся одинаковой высотой и наклоном орбит для всех спутников, что соответствует, например, существующему подходу к решению задачи обзора сферического слоя в исследованиях О.Е. Самусенко), а в классе предложенных в работе двухъярусных СС, состоящих из двух традиционных одноярусных СС (частным случаем двухъярусной системы является традиционное одноярусное построение). При этом предполагается, что орбитальная структура каждого из двух ярусов в отдельности формируется на основе применения теории дельта-систем, показавших высокую эффективность в задаче непрерывного обзора сферы. В результате оптимизация двухъярусной СС непрерывного обзора сферического слоя состоит в оптимизации орбитальной структуры спутников, находящихся на орбитах с разными значениями

высоты и наклона. Автору не известны работы других авторов в рассматриваемой в диссертации области оптимизации СС непрерывного обзора сферического слоя ОКП на разновысотных и разнонаклонных по отношению к экватору орбитах.

Цель настоящих исследований – разработка методического и программно-алгоритмического аппарата для решения задачи оптимизации двухъярусного орбитального построения СС непрерывного обзора сферического слоя ОКП.

Для достижения поставленной цели в работе проводятся исследования по следующим направлениям (решаются следующие частные задачи):

1. Разработка методического подхода к решению задачи оптимизации орбитального построения двухъярусных СС непрерывного обзора сферического слоя ОКП.

2. Разработка теоретических положений, определяющих способ оптимизации двухъярусных орбитальных построений с использованием  $\alpha$ -характеристик дельта-систем.

3. Разработка алгоритмов и программ для расчета требуемых характеристик и оптимизации орбитального построения двухъярусных СС (программное обеспечение должно быть разработано на языке программирования С++).

4. Формирование электронного каталога оптимальных вариантов орбитального построения двухъярусных СС непрерывного обзора сферического слоя ОКП, их сравнение с одноярусными вариантами.

Исследования в указанных направлениях позволили, с одной стороны, сформулировать и обосновать новые научные положения в области оптимизации орбитального построения двухъярусных СС, а с другой стороны – разработать основные положения методики, алгоритмы решения частных задач и вычислительные программы, дающие необходимые для практики инструментальные средства оптимизации орбитального построения СС непрерывного обзора сферического слоя ОКП.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Предложен новый способ формирования орбитального построения СС непрерывного обзора сферического слоя ОКП на основе использования двухъярусных орбитальных структур при оснащении спутников верхнего и нижнего ярусов разнонаправленной бортовой аппаратурой наблюдения.

2. Впервые показано, что задача проектирования орбитального построения двухъярусной СС может быть решена на основе рационального определения и

изучения так называемых зон ответственности каждого из двух ярусов системы при обслуживании (мониторинге) заданного сферического слоя ОКП.

3. Разработаны теоретические положения, определяющие способ оптимизации предложенного в работе нового класса двухъярусных орбитальных построений СС непрерывного обзора сферического слоя ОКП.

Теоретическая значимость работы состоит в следующем:

1. На основе декомпозиции задачи оптимизации орбитального построения двухъярусных СС непрерывного обзора ОКП по критерию минимума затрат характеристической скорости на развёртывание таких СС разработаны теоретические положения по оптимизации зон ответственности (выбору зон обслуживания) каждого из двух ярусов системы в пределах наблюдаемого сферического слоя ОКП.

2. Сформулированы теоретические положения, позволяющие рассматривать подлежащий обзору сферический слой как совокупность соприкасающихся слоев, обслуживаемых каждым из двух ярусов. Отдельно для верхнего и нижнего ярусов получено аналитическое решение задачи определения оптимальной высоты орбит и минимально необходимого углового радиуса зон обзора спутников яруса для фиксированной высоты разделения наблюдаемого сферического слоя на зоны ответственности каждого яруса. Разработан численный алгоритм определения оптимальной высоты разделения наблюдаемого сферического слоя на зоны ответственности каждого из двух ярусов по критерию минимума потребных затрат суммарной характеристической скорости на формирование двухъярусной СС.

3. С целью проведения глобальной оптимизации двухъярусных СС теоретически обоснован быстродействующий способ расчета  $\alpha$ -характеристик непрерывного обзора сферы и выбора оптимального варианта двухъярусной СС обзора требуемого сферического слоя ОКП на основе создания электронной базы (электронного каталога) рациональных вариантов СС в широком диапазоне изменения параметров орбит и характеристик обзора и их целенаправленного сканирования с использованием заданных исходных данных.

Практическая значимость работы состоит в создании методического и программно-алгоритмического аппарата, позволяющего значительно повысить эффективность решения задачи выбора орбитального построения СС непрерывного обзора сферического слоя ОКП на начальной стадии баллистического проектирования целевых космических систем.

Методы исследования – методы системного анализа, численные методы

оптимизации, теория симметричных систем.

Положения, выносимые на защиту:

1. Постановка задачи оптимизации орбитального построения двухъярусных СС непрерывного обзора ОКП и ее декомпозиция.

2. Методический подход и основные положения методики оптимизации орбитального построения двухъярусных СС непрерывного обзора сферического слоя ОКП.

3. Аналитические соотношения для определения оптимальной высоты формирования нижнего и верхнего ярусов двухъярусной СС непрерывного многократного обзора сферического слоя ОКП.

4. Комплекс компьютерных программ и автоматизированная система для оптимизации орбитального построения двухъярусных СС непрерывного многократного обзора сферического слоя ОКП.

5. Предложения по применению двухъярусного орбитального построения для СС непрерывного обзора сферического слоя ОКП, результаты сравнения двухъярусного и одноярусного вариантов орбитального построения, предпочтительные варианты двухъярусного орбитального построения СС непрерывного обзора сферического слоя ОКП.

Степень достоверности полученных результатов.

Достоверность полученных результатов подтверждается их сопоставлением с известными частными решениями, полученными другими авторами (Т. Лэнг, Г.В. Можаяев, Дж. Уолкер) в области непрерывного глобального покрытия сферы.

Апробация результатов и публикации.

Результаты диссертационной работы докладывались и получили одобрение на 4-х международных научных конференциях. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 6 печатных работах, в том числе в двух журналах из перечня ВАК и в одном источнике, индексируемом в базе данных Scopus, а также использованы при подготовке пяти заявок на получение патентов РФ на изобретения, проходящих экспертизу установленным порядком.

Соответствие паспорту специальности.

Работа соответствует паспорту специальности 05.07.09 «Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов». Исследования проводились в области «Баллистическое проектирование летательных аппаратов различного назначения» (область исследований № 2 паспорта специальности).

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы

из 105 наименований. Она содержит 142 страницы текста, включающего 46 рисунков и 5 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, отмечены научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены основные положения диссертационной работы, выносимые на защиту, а также сведения об апробации полученных результатов.

**В первой главе** дана постановка решаемой оптимизационной задачи – задачи оптимизации орбитального построения двухъярусных СС непрерывного обзора сферического слоя ОКП.

Подлежащий обзору сферический слой ОКП представлен как множество *сфер обзора* с общим центром, совпадающим с центром Земли, и высотами над поверхностью Земли в диапазоне  $[H_1, H_2]$ , где  $H_1$  и  $H_2$  – высоты нижней и верхней границ сферического слоя соответственно.

Предложен и обоснован новый способ формирования двухъярусного орбитального построения на основе оснащения спутников верхнего и нижнего ярусов разнонаправленной бортовой аппаратурой (аппаратура спутников нижнего яруса направлена вверх по вертикали, а аппаратура верхнего яруса – вниз, в направлении надира) с одинаковым углом полураствора бортовой аппаратуры (конуса обзора)  $\beta$  и одинаковой дальностью обзора  $D$ . Предполагается, что каждый из двух ярусов орбитального построения имеет структуру дельта-системы, определяемую, в соответствии с теорией симметричных систем, тройкой целых чисел  $T, P, F$ , где  $T$  – количество спутников в системе (далее в работе число спутников обозначается символом  $N$ ),  $P$  – количество плоскостей орбит,  $F$  – коэффициент расфазировки движения спутников в соседних плоскостях ( $F=0, 1, \dots, P-1$ ).

*Начальное фазовое состояние* каждого спутника дельта-системы характеризуется вектором  $\phi = \{\Omega, u\}$ , где  $\Omega$  – прямое восхождение восходящего узла орбиты спутника,  $u$  – аргумент широты спутника в некоторый фиксированный момент времени, и определяется следующим образом:

$$\begin{aligned} \Omega &= \Omega_1 + \frac{2\pi}{P} \cdot (\lambda - 1), \\ u &= u_1 + \frac{2\pi}{T} \cdot [F \cdot (\lambda - 1) + P \cdot (v - 1)], \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\Omega_1$  и  $u_1$  – прямое восхождение восходящего узла и аргумент широты первого спутника,  $\lambda$  – номер орбитальной плоскости ( $\lambda=1, 2, \dots, P$ ),  $v$  – номер спутника в плоскости орбиты ( $v=1, 2, \dots, T/P$ ).



При этом понимается, что любая дельта-система характеризуется числом  $N$  спутников, высотой  $H$  и наклоном  $i$  орбит, а также фазовой структурой  $\Phi$ , включающей начальные фазовые состояния  $\phi^{(j)}$  всех спутников ( $j=1, 2, \dots, N$ ):

$$\Phi = \Phi(N) = \{\phi^{(1)}, \phi^{(2)}, \dots, \phi^{(N)}\}. \quad (2)$$

Орбитальное построение нижнего  $s_{low}$  и верхнего  $s_{up}$  ярусов характеризуется следующими параметрами:

$$\begin{aligned} s_{low} &= \{\Phi_{low}(N_{low}), H_{low}, i_{low}\}, \\ s_{up} &= \{\Phi_{up}(N_{up}), H_{up}, i_{up}\}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $N_{low}$  и  $N_{up}$  – количество спутников,  $\Phi_{low}(N_{low})$  и  $\Phi_{up}(N_{up})$  – фазовая структура,  $H_{low}$  и  $H_{up}$  – высота орбит спутников,  $i_{low}$  и  $i_{up}$  – наклонение орбит спутников соответственно для нижнего и верхнего ярусов.

Качество двухъярусной СС на разновысотных и разнонаклонных орбитах характеризуется суммарной характеристической скоростью (СХС)  $\Sigma V_{II}$ , необходимой для выведения спутников с поверхности Земли и формирования их орбит. Величина СХС  $\Sigma V_{II}$  определяет, по сути, «энергетику» СС и рассчитывается по формуле

$$\begin{aligned} \Sigma V_{II} &= \Sigma V_{low} + \Sigma V_{up} = \\ &= N_{low} \cdot \left( \sqrt{\frac{\mu}{R_e} \left( \frac{R_e + 2 \cdot H_{low}}{R_e + H_{low}} \right)} - \omega \cdot R_e \cdot \cos i_{low} \right) + N_{up} \cdot \left( \sqrt{\frac{\mu}{R_e} \left( \frac{R_e + 2 \cdot H_{up}}{R_e + H_{up}} \right)} - \omega \cdot R_e \cdot \cos i_{up} \right), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\omega$  – угловая скорость вращения Земли ( $\omega=7,2921159 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$ ),  $R_e$  – средний радиус Земли ( $R_e=6371 \text{ км}$ ),  $\mu$  – гравитационный параметр Земли ( $\mu=398\,600 \text{ км}^3/\text{c}^2$ ),  $\Sigma V_{low}$  и  $\Sigma V_{up}$  – суммарная характеристическая скорость нижнего и верхнего ярусов соответственно.

Решаемая задача оптимизации орбитального построения двухъярусной СС непрерывного обзора сферического слоя ОКП формулируется следующим образом. Для заданного сферического слоя  $(H_1, H_2)$  при заданных параметрах бортовой аппаратуры  $(\beta, D)$  и кратности обзора  $L$  требуется найти оптимальное орбитальное построение  $S_{II}^{\text{opt}}$  двухъярусной спутниковой системы  $S_{II} = \{s_{low}; s_{up}\}$ , обеспечивающее непрерывный  $L$ -кратный обзор слоя с минимальным значением суммарной характеристической скорости  $\Sigma V_{II}$ . При этом орбитальное построение в каждом ярусе отыскивается в классе  $K_{\Delta}$  дельта-систем.

Математическая постановка задачи имеет следующий вид.

Дано:

$$H_1, H_2, \beta, D, L, K_{\Delta}.$$

Найти:

$$S_{\Pi}^{\text{opt}} = \arg \min_{\{S_{\Pi}\}} \left[ \Sigma V_{\Pi}(S_{\Pi}) \mid H_1, H_2, L, \beta, D, K_{\Delta} \right]. \quad (5)$$

Теоретические положения разработанной автором методики оптимизации СС непрерывного обзора заданного сферического слоя ОКП позволили декомпозировать данную оптимизационную задачу и свести ее к традиционной задаче оптимизации покрытия сферы зонами обзора спутников. Основное содержание указанных теоретических положений состоит в следующем.

В заданном наблюдаемом сферическом слое  $(H_1, H_2)$  каждому из двух ярусов сопоставляется своя зона ответственности (обзора) в виде одной из двух подобластей указанного сферического слоя, получаемых делением последнего на две части сферой на фиксированной высоте  $H_+$  – сферического слоя  $(H_1, H_+)$  для верхнего яруса (далее – нижняя часть заданного сферического слоя ОКП) и сферического слоя  $(H_+, H_2)$  для нижнего яруса (далее – верхняя часть заданного сферического слоя ОКП). Такое разделение является рациональным с учетом разнонаправленности бортовой аппаратуры спутников нижнего и верхнего ярусов: аппаратура спутников нижнего яруса направлена вверх по вертикали, а аппаратура верхнего яруса – вниз, в направлении надира. Высота  $H_+$  сферы разделения принимается в качестве дополнительного параметра оптимизации.

В результате задача обеспечения обзора сферического слоя двухъярусной системой разделяется (декомпозируется) на две задачи:

- обеспечение обзора нижней части сферического слоя спутниками верхнего яруса (задача 1);
- обеспечение обзора верхней части сферического слоя спутниками нижнего яруса (задача 2).

Каждая из этих задач в отдельности представляет собой задачу обзора сферического слоя (слоя  $(H_1, H_+)$  или слоя  $(H_+, H_2)$ ) одноярусной системой спутников (системой верхнего или нижнего ярусов). Для решения задачи обзора сферического слоя одноярусной системой, в свою очередь, необходимо решить две подзадачи:

- нахождение в сферическом слое *критической сферы* с наихудшими условиями обзора, то есть сферы, на которой спутниковые зоны обзора имеют наименьшие размеры (подзадача 1);
- нахождение орбитальной структуры с минимальным числом спутников, обеспечивающей непрерывный L-кратный обзор критической сферы (подзадача 2).

В результате решения подзадачи 1 в каждой из задачах 1 и 2 необходимо

определить *критические значения*  $\alpha_{low}(H_{low})$  и  $\alpha_{up}(H_{up})$  углового радиуса зон обзора спутников нижнего и верхнего яруса – значения углового радиуса зон обзора на критической сфере верхней  $(H_+, H_2)$  и нижней  $(H_1, H_+)$  части наблюдаемого сферического слоя, соответствующих решению задач 1 и 2.

Решение подзадачи 1 и полученные в результате ее решения критические значения  $\alpha_{low}(H_{low})$  и  $\alpha_{up}(H_{up})$  являются исходными данными для решения подзадачи 2, которая, в прямой постановке, должна была бы состоять в переборе возможных высот  $H_{low}$  формирования орбит нижнего яруса и высот  $H_{up}$  формирования орбит спутников верхнего яруса:

– для каждого яруса проводится поиск всех вариантов орбитальных построений в классе дельта-систем  $K_\Delta$  (для этого используется специально разработанный электронный каталог дельта-систем), характеризующихся тем, что соответствующие им  $\alpha$ -характеристики L-кратного обзора ( $\alpha^L$ ) не превышают критического значения  $\alpha_{low}(H_{low})$  для орбитальной структуры нижнего яруса или  $\alpha_{up}(H_{up})$  для орбитальной структуры верхнего яруса (такие варианты орбитальных структур называются подходящими);

– для каждого яруса среди всех подходящих вариантов определяется наилучший вариант (как правило это группа наилучших вариантов СС с одинаковыми характеристиками обзора и различными высотами формирования)  $\mathbf{s}_{low}(H_{low})$  (для нижнего яруса) и  $\mathbf{s}_{up}(H_{up})$  (для верхнего яруса), характеризующийся минимальным потребным числом спутников для обеспечения обзора соответствующей критической сферы в нижней или верхней частях заданного сферического слоя (такие оптимальные варианты орбитальных структур для обзора критических сфер верхней и нижней частей наблюдаемого сферического слоя являются оптимальными и для обзора любой другой сферы из соответствующей части сферического слоя):

$$\mathbf{s}_{low}(H_{low}) = \arg \min_{s_{low}(H_{low}) \in K_\Delta} \left[ N_{low}(s_{low}(H_{low})) \mid \alpha^L(s_{low}(H_{low})) \leq \alpha_{low}(H_{low}) \right], \quad (6)$$

$$\mathbf{s}_{up}(H_{up}) = \arg \min_{s_{up}(H_{up}) \in K_\Delta} \left[ N_{up}(s_{up}(H_{up})) \mid \alpha^L(s_{up}(H_{up})) \leq \alpha_{up}(H_{up}) \right]. \quad (7)$$

Далее среди всех полученных вариантов СС для нижнего и верхнего ярусов, в пределах диапазона изменения высоты соответствующего яруса, определяются оптимальные высоты  $H_{low}^{opt}$  и  $H_{up}^{opt}$  орбит спутников в нижнем и верхнем ярусах:

$$H_{low}^{opt} = \arg \min_{H_{low}} \left[ N_{low}(\mathbf{s}_{low}(H_{low})) \right], \quad (8)$$

$$H_{up}^{opt} = \arg \min_{H_{up}} \left[ N_{up}(\mathbf{s}_{up}(H_{up})) \right] \quad (9)$$

и соответствующие им оптимальные орбитальные построения  $s_{low}^{opt}$  и  $s_{up}^{opt}$  на этих высотах при фиксированной высоте разделения сферического слоя  $H_+$ :

$$\begin{aligned} s_{low}^{opt}(H_+) &\equiv s_{low}^{opt} = \mathbf{s}_{low}(H_{low}^{opt}), \\ s_{up}^{opt}(H_+) &\equiv s_{up}^{opt} = \mathbf{s}_{up}(H_{up}^{opt}). \end{aligned} \quad (10)$$

Соответствующее выражениям (10) двухъярусное орбитальное построение

$$S_{II}(H_+) = \{s_{low}^{opt}(H_+); s_{up}^{opt}(H_+)\}. \quad (11)$$

является оптимальным вариантом двухъярусного орбитального построения для непрерывного обзора заданного сферического слоя при априори фиксированной высоте  $H_+$  разделения слоя на зоны обслуживания.

Свободный параметр  $H_+$  используется для нахождения оптимального варианта  $S_{II}^{opt}$  двухъярусного орбитального построения СС (11) по критерию минимума СХС на множестве допустимых значений данного параметра:

$$H_+^{opt} = \arg \min_{H_+} \Sigma V_{II}(S_{II}(H_+)), \quad (12)$$

$$S_{II}^{opt} = S_{II}(H_+^{opt}). \quad (13)$$

Разработанный в данной главе методический подход позволяет находить оптимальный вариант орбитального построения двухъярусной СС обзора сферического слоя ОКП по критерию минимума СХС, сводя решаемую задачу к традиционной задаче оптимизации орбитальной структуры СС обзора сферы. При этом, как показано в следующей главе, указанные выше довольно трудоемкие процедуры прямого перебора различных высот формирования орбит спутников в нижнем и верхнем ярусах удается избежать за счет получения для расчета таких оптимальных высот специальных аналитических соотношений.

**Во второй главе** проводится алгоритмический анализ разработанных в первой главе основных положений методики. В частности, получены аналитические соотношения для определения критических значений углового радиуса зон обзора и нахождения оптимального значения высоты орбит нижнего и верхнего ярусов при фиксированном значении высоты разделения сферического слоя  $H_+$ .

Показано, что критическое значение  $\alpha_{low}(H_{low})$  углового радиуса зон обзора спутников нижнего яруса вычисляются по формулам:

$$\mathbf{\alpha}_{low}(H_{low}) = \begin{cases} f_1^{H_2} = \arccos \left( \frac{(R_e + H_2)^2 + (R_e + H_{low})^2 - D^2}{2(R_e + H_2)(R_e + H_{low})} \right) & \text{при } H_{low} \in (H_2 - D, H_{low}^{opt}), \\ \alpha_{low}^{max} & \text{при } H_{low} = H_{low}^{opt}, \\ f_2^{H_+} = \beta - \arcsin \left( \frac{(R_e + H_{low}) \cdot \sin \beta}{R_e + H_+} \right) & \text{при } H_{low} \in (H_{low}^{opt}, H_+). \end{cases} \quad (14)$$

Оптимальная высота орбит  $H_{low}^{opt} = \arg \max_{H_{low}} [\mathbf{\alpha}_{low}(H_{low})]$  спутников нижнего яруса определяется путем решения системы уравнений:

$$\begin{cases} \alpha_{low}^{max} = \arccos \left( \frac{(R_e + H_2)^2 + (R_e + H_{low}^{opt})^2 - D^2}{2(R_e + H_2)(R_e + H_{low}^{opt})} \right), \\ \alpha_{low}^{max} = \beta - \arcsin \left( \frac{(R_e + H_{low}^{opt}) \cdot \sin \beta}{R_e + H_+} \right). \end{cases} \quad (15)$$

Критическое значение  $\mathbf{\alpha}_{up}(H_{up})$  углового радиуса зон обзора спутников верхнего яруса вычисляется по формулам:

$$\mathbf{\alpha}_{up}(H_{up}) = \begin{cases} f_2^{H_+} = \arcsin \left( \frac{(R_e + H_{up}) \cdot \sin \beta}{R_e + H_+} \right) - \beta & \text{при } H_{up} \in (H_+, H_{up}^{opt}), \\ \alpha_{up}^{max} & \text{при } H_{up} = H_{up}^{opt}, \\ f_1^{H_1} = \arccos \left( \frac{(R_e + H_1)^2 + (R_e + H_{up})^2 - D^2}{2(R_e + H_1)(R_e + H_{up})} \right) & \text{при } H_{up} \in (H_{up}^{opt}, H_1 + D). \end{cases} \quad (16)$$

Оптимальная высота орбит  $H_{up}^{opt} = \arg \max_{H_{up}} [\mathbf{\alpha}_{up}(H_{up})]$  спутников верхнего яруса определяется путем решения системы уравнений

$$\begin{cases} \alpha_{up}^{max} = \arccos \left( \frac{(R_e + H_1)^2 + (R_e + H_{up}^{opt})^2 - D^2}{2(R_e + H_1)(R_e + H_{up}^{opt})} \right), \\ \alpha_{up}^{max} = \arcsin \left( \frac{(R_e + H_{up}^{opt}) \cdot \sin \beta}{R_e + H_+} \right) - \beta. \end{cases} \quad (17)$$

На основе полученных аналитических соотношений взаимовлияния основных параметров двухъярусной СС предложен следующий эффективный

алгоритм нахождения оптимального варианта орбитального построения двухъярусной СС непрерывного обзора заданного сферического слоя ОКП.

1. Варьируется высота разделения сферического слоя  $H_+$  в области допустимых значений и для каждого значения высоты разделения  $H_+$ :

– определяются оптимальная высота орбит спутников нижнего яруса  $H_{low}^{opt}(H_+)$  и соответствующее ей критическое значение углового радиуса зон обзора  $\alpha_{low}^{max}(H_+)$  с использованием соотношений (14)-(15);

– определяются оптимальная высота орбит спутников верхнего яруса  $H_{up}^{opt}(H_+)$  и соответствующее ей критическое значение углового радиуса зон обзора  $\alpha_{up}^{max}(H_+)$  с использованием соотношений (16)-(17);

– отыскиваются в каталоге дельта-систем оптимальные варианты орбитального построения нижнего и верхнего ярусов  $s_{low}^{opt}(H_+)$  и  $s_{up}^{opt}(H_+)$  как варианты, имеющие минимальное число спутников и  $\alpha$ -характеристики L-кратного обзора, не превышающие критических значений углового радиуса зон обзора:

$$\begin{aligned} s_{low}^{opt}(H_+) &= \arg \min_{s_{low}(H_{low}^{opt}(H_+)) \in K_{\Delta}} \left[ N_{low}(s_{low}(H_{low}^{opt}(H_+))) \mid \alpha^L(s_{low}(H_{low}^{opt}(H_+))) \leq \alpha_{low}^{max}(H_+) \right], \\ s_{up}^{opt}(H_+) &= \arg \min_{s_{up}(H_{up}^{opt}(H_+)) \in K_{\Delta}} \left[ N_{up}(s_{up}(H_{up}^{opt}(H_+))) \mid \alpha^L(s_{up}(H_{up}^{opt}(H_+))) \leq \alpha_{up}^{max}(H_+) \right]. \end{aligned} \quad (18)$$

– определяются СХС нижнего и верхнего ярусов  $\Sigma V_{low}(H_+)$  и  $\Sigma V_{up}(H_+)$  и совокупная СХС двухъярусного орбитального построения  $\Sigma V_{II}(H_+) = \Sigma V_{low}(H_+) + \Sigma V_{up}(H_+)$ .

2. Определяется оптимальная высота разделения сферического слоя  $H_+^{opt} = \arg \min_{H_+} \Sigma V_{II}(H_+)$  и соответствующие ей оптимальные варианты орбитального

построения нижнего и верхнего ярусов  $s_{low}^{opt}(H_+^{opt})$  и  $s_{up}^{opt}(H_+^{opt})$ .

3. Формируется оптимальное двухъярусное орбитальное построение  $S_{II}^{opt} = \left\{ s_{low}^{opt}(H_+^{opt}); s_{up}^{opt}(H_+^{opt}) \right\}$ .

На рис.1 показан характерный вид зависимостей  $\alpha_{low}^{max}(H_+)$ ,  $\alpha_{up}^{max}(H_+)$ ,  $\Sigma V_{II}(H_+)$ . Здесь же отмечена нижняя граница  $\alpha_{min}^L$  значений  $\alpha$ -характеристик L-кратного обзора  $\alpha^L$ , содержащихся в каталоге дельта-систем.

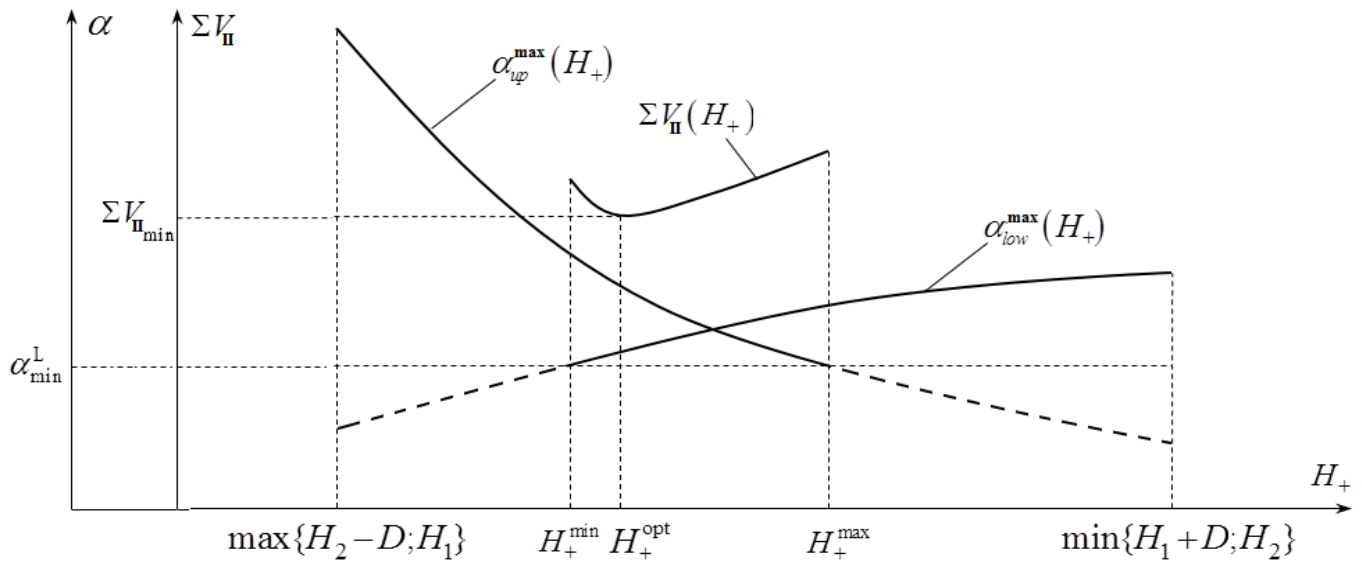


Рис.1. Характерный вид зависимостей  $\alpha_{low}^{max}(H_+)$ ,  $\alpha_{up}^{max}(H_+)$ ,  $\Sigma V_{II}(H_+)$

Алгоритм решения оптимизационной задачи предполагает наличие каталога дельта-систем, содержащего заранее рассчитанные значения  $\alpha$ -характеристик для различной кратности обзора и широкого перечня значений числа спутников в системе.

Для расчета  $\alpha$ -характеристик L-кратного обзора сферы с помощью дельта-систем в диссертации разработан и реализован в виде программы на ЭВМ следующий алгоритм.

1. Выбирается конкретная N-спутниковая дельта-система – задается определяющая ее структура тройка чисел  $\{T, P, F\}$  и наклонение орбит  $i$  ее спутников.

2. Вычисляется фазовая структура дельта-системы по алгоритму (1).

3. Рассматриваются подспутниковые точки на единичной сфере обзора в фиксированной момент времени  $t$  и рассчитывается мгновенная  $\alpha$ -характеристика L-кратного обзора  $\alpha_t^L$  следующим образом:

– перебираются всевозможные сочетания двух и трех подспутниковых точек ( $C_N^2$  и  $C_N^3$  сочетаний соответственно). Через каждую такую пару или тройку точек проводится плоскость – соответственно двух- и трехточечное сечение (двухточечное сечение проводится перпендикулярно радиусу-вектору центра соединяющего точки отрезка);

– подсчитывается число  $m_{g+}$  дополнительных точек сечения (точек, наряду с образующей сечение парой или тройкой точек, попавших в сечение);

– подсчитывается число  $m_p$  поверхностных точек на каждом из двух отсеченных круговых сегментов единичной сферы;

– проверяется выполнение условия  $L-1-m_{g+} \leq m_p \leq L-1$ ;

- если круговой сегмент удовлетворяет данному условию, он заносится в специальный перечень сегментов  $\{p\}$ ;
- по завершению перебора всех сочетаний двух и трех подспутниковых точек определяется мгновенная  $\alpha$ -характеристика  $\alpha_t^L$  как  $\arccos$  углового радиуса максимального сегмента из перечня  $\{p\}$ :

$$\alpha_t^L = \arccos \left[ \max_{\{p\}} \rho(p) \right]. \quad (19)$$

4. Определяется искомая обобщенная  $\alpha$ -характеристика  $L$ -кратного обзора как максимальное значение мгновенной  $\alpha$ -характеристики на периоде  $\tau$  повторения состояний дельта-системы:

$$\alpha^L = \max_{t \in [0, \tau]} \alpha_t^L. \quad (20)$$

**В третьей главе** приведено описание разработанного программно-математического обеспечения расчета оптимальных вариантов орбитального построения СС непрерывного обзора заданного сферического слоя ОКП в классе двухъярусных орбитальных структур по заданным исходным данным, а также созданного электронного каталога оптимальных вариантов СС непрерывного  $L$ -кратного обзора заданного сферического слоя ОКП, имеющих в зависимости от исходных данных двухъярусную или традиционную одноярусную структуру. Каталог рассчитан для значений кратности непрерывного обзора  $L=1, 2, 3, 4$ , различных значений угла полураствора бортовой аппаратуры спутников  $\beta$  и различных высот  $H_1$  нижней границы наблюдаемого сферического слоя. Указанные параметры определяют структуру электронного каталога по томам, приведенную на рис.2. В диссертации приведено описание графического интерфейса, используемого оператором при решении практических задач с использованием электронного каталога оптимальных вариантов СС.



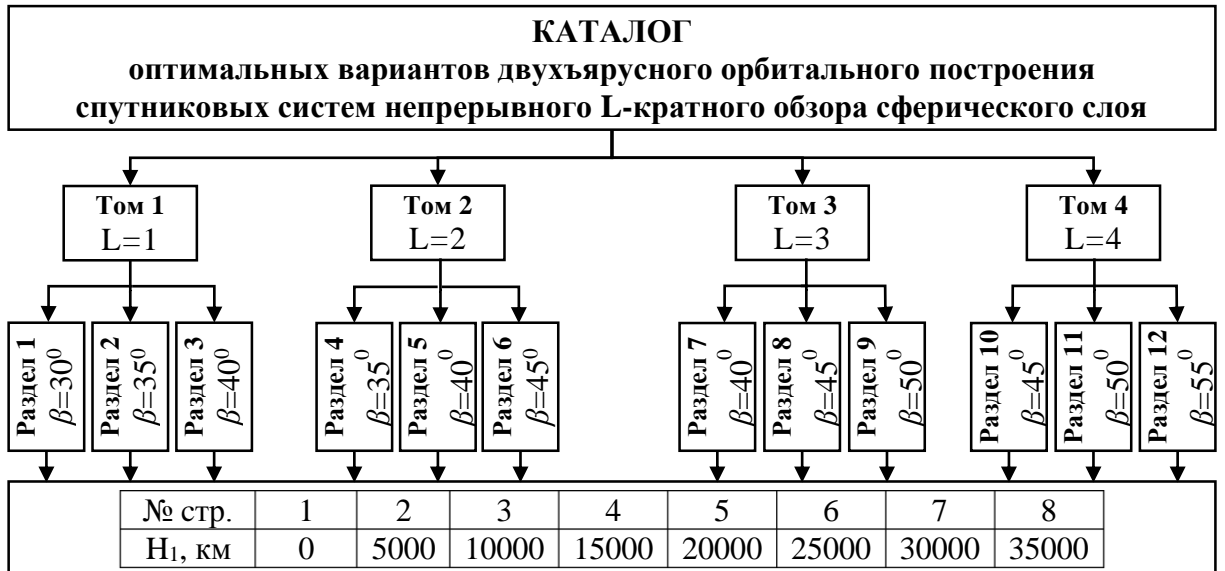


Рис.2. Структура каталога оптимальных вариантов двухъярусного орбитального построения спутниковых систем непрерывного L-кратного обзора сферического слоя

Более детальное структурирование данных электронного каталога имеется внутри каждого тома. Типовая страница тома каталога приведена на рис.3 для случая кратности  $L=1$ , угла полураствора  $\beta=35^\circ$  в диапазоне высот нижней границы сферического слоя  $H_1=15000 \dots 24000$  км и диапазоне высот верхней границы сферического слоя  $H_2=28000 \dots 40000$  км. В нижней части таблицы приведены рассматриваемые для каждой высоты нижней границы слоя значения дальности  $D$  действия аппаратуры спутника.

Типовая ячейка таблицы содержит следующую информацию:

1-2 строки: вариант традиционного одноярусного построения на базе высоты верхнего яруса (1 строка – СХС (км/с); 2 строка – параметры дельта-системы Т (N – число спутников), P, F, высота (км) и наклонение (град) орбит спутников);

3-4 строки: вариант традиционного одноярусного построения на базе высоты нижнего яруса (структура параметров аналогична строкам 1-2);

5-7 строки: вариант предложенного двухъярусного орбитального построения СС (5 строка – СХС (км/с), в 6 и 7 строках приведены параметры для верхнего и нижнего ярусов в формате строк 4 и 2 соответственно).

Из типовой страницы каталога, приведенной на рис.3, видно, что поиск оптимального варианта СС обзора сферического слоя ОКП в классе двухъярусных орбитальных структур может приводить к результатам трех типов: одноярусному орбитальному построению на высотах нижнего (цветом не выделено) или верхнего яруса (выделено желтым цветом), а также к двухъярусным орбитальным построениям предложенного типа (выделено синим цветом).

Оптимальные варианты орбитальных построений двухъярусных СС при  $L=1$ ,  $\beta=35^\circ$ 

$H_1, \text{км}$ $H_2, \text{км}$	15000	16000	17000	18000	19000	20000	21000	22000	23000	24000		
28000	823 78 39 32 42783 72.4 383 49 49 22 300 67.7 473 11 11 4 32511 53.8 46 23 18 300 67.4	653 62 31 26 44115 68.6 367 47 47 21 300 66.5 462 10 10 7 32627 47.9 46 23 18 300 67.4	516 49 49 22 45347 67.7 359 46 23 18 300 67.4 457 11 11 4 35067 53.8 44 22 17 300 65.6	431 41 41 18 46476 65.4 343 44 22 17 300 65.6 450 11 11 4 36863 53.8 43 43 19 300 68.1	380 36 18 13 47504 68.5 336 43 43 19 300 68.1 443 11 11 4 38305 53.8 42 21 16 300 69.2	339 32 32 28 48434 73.8 329 42 21 16 300 69.2 434 11 11 4 40025 53.8 41 41 18 300 65.4	283 27 9 5 49267 59.9 320 41 41 18 300 65.4 434 11 11 4 41091 53.8 41 41 18 300 65.4	241 23 23 14 50008 58.7 320 41 41 18 300 65.4 434 11 11 4 42772 53.8 41 41 18 300 65.4	210 20 10 7 50661 56.8 320 41 41 18 300 65.4 434 11 11 4 44521 53.8 41 41 18 300 65.4	178 17 17 7 51232 55.5 305 39 39 17 300 68.8 433 13 13 5 48068 58.4 38 19 14 300 67.3		
	30000	$\approx 1183$ $\approx 112$ - - 43448 74 418 52 26 21 755 68.1 507 13 13 5 35058 58.4 46 23 18 842 67.4	910 86 43 36 44917 74.3 367 47 47 21 300 66.5 462 10 10 7 32626 47.9 46 23 18 300 67.4	756 71 71 65 46294 81.5 359 46 23 18 300 67.4 457 11 11 4 35069 53.8 44 22 17 300 65.6	590 56 28 23 47575 67.6 343 44 22 17 300 65.6 450 11 11 4 36862 53.8 43 43 19 300 68.1	485 46 23 18 48761 67.4 336 43 43 19 300 68.1 443 11 11 4 38305 53.8 42 21 16 300 69.2	432 41 41 18 49851 65.4 329 42 21 16 300 69.2 434 11 11 4 40026 53.8 41 41 18 300 65.4	381 36 18 13 50847 68.5 320 41 41 18 300 65.4 434 11 11 4 41092 53.8 41 41 18 300 65.4	326 31 31 9 51751 60.9 320 41 41 18 300 65.4 434 11 11 4 42772 53.8 41 41 18 300 65.4	273 26 26 16 52566 59.5 320 41 41 18 300 65.4 434 11 11 4 44450 53.8 41 41 18 300 65.4	242 23 23 14 53295 58.7 305 39 39 17 300 68.8 433 13 13 5 48025 58.4 38 19 14 300 67.3	
		32000	$\approx 1763$ $\approx 166$ - - 43950 81 646 73 73 67 2772 80.8 680 18 6 2 37212 56.6 56 28 23 2977 67.6	$\approx 1337$ $\approx 126$ - - 45535 78 499 59 59 27 1808 68.0 568 13 13 5 36513 58.4 51 51 23 1905 66.8	1017 96 48 41 47037 74.5 388 48 24 19 808 68.7 485 11 11 4 35547 53.8 46 23 18 830 67.4	826 78 39 32 48452 72.4 343 44 22 17 300 65.6 450 11 11 4 36865 53.8 43 43 19 300 68.1	692 65 65 59 49778 79.6 336 43 43 19 300 68.1 443 11 11 4 38305 53.8 42 21 16 300 69.2	550 52 26 21 51014 68.1 329 42 21 16 300 69.2 434 11 11 4 40025 53.8 41 41 18 300 65.4	464 44 22 17 52159 65.6 320 41 41 18 300 65.4 434 11 11 4 41092 53.8 41 41 18 300 65.4	413 39 39 17 53215 68.8 320 41 41 18 300 65.4 434 11 11 4 42773 53.8 41 41 18 300 65.4	372 35 35 31 54182 74.7 320 41 41 18 300 65.4 434 11 11 4 44450 53.8 41 41 18 300 65.4	316 30 10 6 55064 60.6 305 39 39 17 300 68.8 433 13 13 5 48025 58.4 38 19 14 300 67.3
			34000	$>2621$ $>246$ - - 44320 - 911 99 99 46 4714 73.5 874 14 7 4 35778 54.0 79 79 36 4917 72.9	$\approx 1989$ $\approx 187$ - - 46003 81 911 79 79 36 3800 72.9 755 17 17 7 38428 55.5 64 32 27 4010 68.5	$\approx 1476$ $\approx 139$ - - 47612 77 586 66 66 6 2853 81.3 635 17 17 7 40150 55.5 52 26 21 3025 68.1	1134 107 107 50 49143 73.8 441 52 26 21 1870 68.1 547 11 11 4 37002 53.8 51 51 23 1892 66.8	913 86 43 36 50592 74.3 372 46 23 18 853 67.4 470 11 11 4 38476 53.8 44 22 17 3866 65.6	768 72 72 66 51958 79.3 320 42 21 16 300 69.2 434 11 11 4 40027 53.8 41 41 18 300 65.4	624 59 59 27 53239 68.0 320 41 41 18 300 65.4 434 11 11 4 41093 53.8 41 41 18 300 65.4	519 49 49 22 54434 67.7 320 41 41 18 300 65.4 434 11 11 4 42774 53.8 41 41 18 300 65.4	445 42 21 16 55543 69.2 320 41 41 18 300 65.4 434 11 11 4 44451 53.8 41 41 18 300 65.4
36000				$>3368$ $>316$ - - 44587 - $\approx 1406$ $\approx 148$ - - 6600 78 1076 22 22 6 38371 58.3 89 89 41 7008 74.1	$>2785$ $>261$ - - 46352 - 1020 109 109 51 5725 73.7 938 17 17 7 38407 55.5 81 81 37 5992 74.2	$>2200$ $>206$ - - 48051 - 783 85 85 39 4823 73.6 824 14 7 4 38663 54.0 73 73 67 4990 80.8	$\approx 1627$ $\approx 153$ - - 49681 78 655 72 72 66 3889 79.3 696 14 7 4 40239 54.0 61 61 28 4026 68.2	$\approx 1267$ $\approx 119$ - - 51238 78 518 59 59 27 2923 68.0 594 13 13 5 41005 58.4 52 26 21 3009 68.1	998 94 47 40 52718 73.3 416 49 49 22 1925 67.7 523 11 11 4 40171 53.8 48 24 19 1940 68.7	839 79 79 36 54119 72.9 349 43 43 19 893 68.1 463 11 11 4 41093 53.8 43 43 19 893 68.1	715 67 67 61 55440 78.9 320 41 41 18 300 65.4 434 11 11 4 42774 53.8 41 41 18 300 65.4	572 54 27 22 56680 67.3 320 41 41 18 300 65.4 434 11 11 4 44451 53.8 41 41 18 300 65.4
	38000			$>4040$ $>379$ - - 44773 - $\approx 2262$ $>232$ - - 8448 - 1130 37 37 16 40607 66.4 97 97 45 9121 72.7	$>3489$ $>327$ - - 46605 - $\approx 1537$ $\approx 160$ - - 7601 77 1138 26 26 16 40808 59.5 90 45 38 8084 73.8	$>2938$ $>275$ - - 48380 - $\approx 1133$ $\approx 119$ - - 6733 78 996 17 17 7 40193 55.5 86 43 36 7022 74.3	$>2374$ $>222$ - - 50094 - 871 93 93 43 5841 72.8 881 16 8 5 41079 56.5 76 38 31 6056 74.1	$\approx 1793$ $\approx 168$ - - 51743 81 719 78 39 32 4920 72.4 768 17 17 7 43186 55.5 64 32 27 5120 68.5	$\approx 1419$ $\approx 133$ - - 53323 80 602 66 66 6 3969 81.3 652 14 7 4 43222 54.0 56 28 23 4082 67.6	1106 104 52 45 54831 73.6 475 54 27 22 2986 67.3 572 11 11 4 41505 53.8 52 26 21 2996 68.1	904 85 85 39 56265 73.6 391 46 23 18 1972 67.4 506 11 11 4 42775 53.8 46 23 18 1972 67.4	781 73 73 67 57622 80.8 332 41 41 18 928 65.4 447 11 11 4 44452 53.8 41 41 18 928 65.4
		40000		$>4658$ $>437$ - - 44894 - $>3166$ $>320$ - - 10281 - 1633 52 26 21 41847 68.1 110 55 48 11182 74.9	$>4130$ $>387$ - - 46782 - $>2409$ $>245$ - - 9444 - 1397 36 18 13 42221 68.5 104 52 45 10127 73.6	$>3600$ $>337$ - - 48620 - $\approx 1713$ $\approx 176$ - - 8600 81 1205 26 26 16 42514 59.5 96 48 41 9105 74.5	$>3069$ $>287$ - - 50406 - $\approx 1267$ $\approx 131$ - - 7739 83 1049 22 22 6 43317 58.3 85 85 39 8134 73.6	$>2537$ $>237$ - - 52134 - 950 100 50 43 6855 74.0 934 20 10 7 44343 56.8 76 38 31 7168 74.1	$\approx 1997$ $\approx 187$ - - 53800 81 778 83 83 38 5945 72.6 832 17 17 7 44860 55.5 69 69 63 6163 82.3	$\approx 1536$ $\approx 144$ - - 55401 78 651 70 70 64 5007 79.9 716 19 19 5 47318 57.4 56 28 23 5221 67.6	$\approx 1202$ $\approx 113$ - - 56934 74 533 59 59 27 4039 68.0 617 14 7 4 46368 54.0 52 26 21 4138 68.1	990 93 93 43 58396 72.8 449 51 51 23 3041 66.8 617 14 7 4 47769 54.0 46 23 18 3115 67.4
			$D_1, \text{км}$	30000	31000	32000	33000	34000	35000	36000	37000	38000

Рис.3. Страница каталога оптимальных вариантов орбитального построения спутниковых систем непрерывного обзора сферического слоя

Анализ больших данных электронного каталога оптимальных вариантов СС непрерывного обзора заданного сферического слоя ОКП показывает, что полученные варианты двухъярусных СС могут превосходить традиционные варианты одноярусных СС в соответствующих областях их локализации по критерию минимума затрат суммарной характеристической скорости на формирование СС до двух раз. Локализация того или иного типа орбитальной структуры зависит от исходных данных (требований к проектируемой СС). Выявлены закономерности в локализации указанных типов орбитальной структуры. В частности, показано, что двухъярусные варианты орбитального построения имеют преимущество в случае, когда сферический слой имеет значительные размеры (значительную толщину), то есть когда верхняя граница сферического слоя настолько высока, что зоны обзора спутников нижнего яруса в верхней части слоя имеют размеры, достаточные для решения задачи непрерывного L-кратного обзора при числе спутников, соизмеримом с числом спутников в верхнем ярусе. В тех случаях, когда дальность обзора меньше толщины сферического слоя (но больше половины его толщины), двухъярусный вариант орбитального построения является не только преимущественным, но и безальтернативным.

Одноярусное построение СС непрерывного обзора сферического слоя ОКП оказывается предпочтительным, если сферический слой расположен высоко над Землей, а дальность действия бортовой аппаратуры значительно превышает толщину слоя. Здесь преимущество имеет одноярусный вариант орбитального построения с направленной вверх бортовой аппаратурой. Когда сферический слой имеет небольшие размеры и располагается в приземном пространстве (например, прилегает к Земле), предпочтительным является одноярусный вариант орбитального построения с направленной вниз (в направлении надира) бортовой аппаратурой.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. Предложен новый способ формирования двухъярусного орбитального построения СС непрерывного обзора сферического слоя ОКП, состоящий в формировании нижнего и верхнего ярусов с разнонаправленной спутниковой аппаратурой обзора – спутники нижнего яруса размещаются в нижней части сферического слоя (под сферическим слоем) и имеют направленный вверх конус обзора, а спутники верхнего яруса размещаются в верхней части сферического слоя

(над сферическим слоем) и имеют направленный вниз конус обзора.

2. Сформулирована постановка задачи оптимизации двухъярусного орбитального построения СС непрерывного обзора сферического слоя ОКП. В качестве области оптимизации орбитальных структур каждого яруса определен класс дельта-систем, а в качестве критерия оптимизации орбитального построения двухъярусной СС – суммарная характеристическая скорость (СХС), необходимая для выведения спутников на орбиты и формирования орбитального построения СС.

3. Проведена декомпозиция решаемой оптимизационной задачи на основе теоретически обоснованного предположения о том, что подлежащий обзору сферический слой может быть разделен на две зоны ответственности – два соприкасающихся слоя, каждый из которых обслуживается своим ярусом. Показано, что в этом случае задача проектирования двухъярусного орбитального построения может быть сведена к оптимизации высоты разделения наблюдаемого сферического слоя на зоны ответственности ярусов и изучения этих зон ответственности. На основе проведенной декомпозиции разработан методический подход решения задачи оптимизации орбитального построения СС непрерывного L-кратного обзора сферического слоя ОКП, заключающийся в оптимальном разделении слоя на зоны ответственности (обслуживания) и определение такой (оптимальной) высоты разделения сферического слоя, при которой достигается минимум СХС двухъярусного орбитального построения при условии обеспечения каждым ярусом непрерывного L-кратного обзора своей зоны обслуживания при минимальном числе спутников в ярусе. При этом определено, что для каждого яруса оптимальное решение отыскивается в классе дельта-систем по критерию минимума  $\alpha$ -характеристики системы – минимальной величины углового радиуса зон обзора, обеспечивающей непрерывное сплошное L-кратное покрытие сферы зонами видимости спутников.

4. Разработаны основные положения методики оптимизации орбитального построения двухъярусных СС непрерывного обзора сферического слоя ОКП на основе декомпозиции оптимизационной задачи и сведения ее к решению серии частных задач покрытия сферы зонами обзора спутников. Получены аналитические соотношения, позволяющие при фиксированном разделении сферического слоя на зоны обслуживания находить критические, минимально необходимые для каждого яруса значения углового радиуса зон обзора, определять оптимальную, соответствующую данным критическим значениям высоту орбит, а также минимально потребное число спутников и орбитальную структуру яруса при

условии непрерывного L-кратного обзора соответствующей ему зоны обслуживания в сферическом слое. Разработан алгоритм нахождения оптимальной высоты разделения сферического слоя на зоны обслуживания каждого из двух ярусов СС по критерию минимума суммарной характеристической скорости на формирование двухъярусной СС.

5. Создано программно-математическое обеспечение для расчета оптимального орбитального построения СС непрерывного обзора сферического слоя ОКП в классе двухъярусных СС, включающих традиционные одноярусные СС в качестве частного случая.

6. Создан электронный каталог оптимальных вариантов двухъярусных СС непрерывного обзора сферического слоя ОКП на основе проведения массовых расчетов  $\alpha$ -характеристик дельта-систем с числом спутников до 110 в каждом ярусе, для кратности обзора от 1 до 4 и полного диапазона изменения наклона орбит спутников каждого яруса (прямые и обратные орбиты).

7. Проведен анализ электронного каталога оптимальных вариантов СС непрерывного обзора заданного сферического слоя ОКП, имеющих в зависимости от исходных данных двухъярусную или традиционную одноярусную структуру. Показано, что полученные варианты двухъярусных СС превосходят традиционные варианты одноярусных СС в соответствующих областях их локализации по критерию минимума затрат суммарной характеристической скорости на формирование СС. Разработаны предложения по применению полученных результатов в решении различных практических задач.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **В изданиях, рекомендованных перечнем ВАК:**

1. Нгуен Нам Куи. О задаче оптимизации орбитальной структуры многоярусных спутниковых систем непрерывного обзора околоземного пространства / Разумный Ю.Н., Самусенко О.Е., Нгуен Нам Куи // Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 2018, № 4(697), с.61-72;

2. Нгуен Нам Куи. Анализ оптимальных вариантов двухъярусных спутниковых систем непрерывного обзора сферического слоя околоземного космического пространства / Разумный Ю.Н., Самусенко О.Е., Нгуен Нам Куи // Вестник Московского авиационного института, 2018, Т.25, № 3, с.171-181.

**В источнике, индексируемом в базе данных Scopus:**

3. Nguyen Nam Quy. Satellite Constellation Design for Near Earth Space Coverage Basing on Two-Tier Satellite Structures / Yury N. Razoumny, Oleg Samusenko, Nguyen Nam Quy // Proceedings of the 3d IAA International Conference on Dynamics and Control of Space Systems, Moscow, May 30 – June 1, 2017, Published by UNIVELT, Inc., USA, Advances in the Astronautical Sciences, 2017, vol.161, pp.1142-1149.

**Заявки на получение патента:**

4. Нгуен Нам Куи. Спутниковая система непрерывного глобального обзора околоземного космического пространства / Разумный Ю.Н., Самусенко О.Е., Нгуен Нам Куи, Разумный В.Ю., Купреев С.А., Федяев К.С. // Заявка № 2017146646. Зарегистрирована 28.12.2017. Решение о выдаче патента от 23.11.2018;

5. Нгуен Нам Куи. Способ поддержания функционирования спутниковой системы непрерывного глобального обзора околоземного космического пространства / Разумный Ю.Н., Самусенко О.Е., Нгуен Нам Куи, Разумный В.Ю., Купреев С.А., Федяев К.С. // Заявка № 2017146647. Зарегистрирована 28.12.2017. Решение о выдаче патента от 26.11.2018;

6. Нгуен Нам Куи. Способ поддержания функционирования спутниковой системы непрерывного глобального обзора околоземного космического пространства / Разумный Ю.Н., Самусенко О.Е., Нгуен Нам Куи, Разумный В.Ю., Купреев С.А., Федяев К.С. // Заявка № 2017146648. Зарегистрирована 28.12.2017. Решение о выдаче патента от 26.11.2018;

7. Нгуен Нам Куи. Способ поддержания функционирования спутниковой системы непрерывного глобального обзора околоземного космического пространства / Разумный Ю.Н., Самусенко О.Е., Нгуен Нам Куи, Разумный В.Ю., Купреев С.А., Федяев К.С. // Заявка № 2017146650. Зарегистрирована 28.12.2017. Решение о выдаче патента от 26.11.2018;

8. Нгуен Нам Куи. Способ построения спутниковой системы непрерывного глобального обзора околоземного космического пространства / Разумный Ю.Н., Самусенко О.Е., Нгуен Нам Куи, Разумный В.Ю., Купреев С.А., Федяев К.С. // Заявка № 2017146653. Зарегистрирована 28.12.2017. Решение о выдаче патента от 23.11.2018.

**В других изданиях:**

9. Нгуен Нам Куи. Методический подход к выбору орбитальных структур спутниковой системы непрерывного обзора околоземного пространства на основе применения многоярусных орбитальных структур / Разумный Ю.Н., Нгуен Нам Куи // 15-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2016». 14-18 ноября 2016 года. Москва. Тезисы. Сборник. - Типография «Люксор», 2016, с.122;

10. Нгуен Нам Куи. Методический подход к баллистическому проектированию многоярусных спутниковых систем непрерывного обзора сферического слоя космического пространства / Нгуен Нам Куи, Разумный Ю.Н., Самусенко О.Е. // 21-я Международная научная конференция «Системный анализ, управление и навигация». 3-10 июля 2016 года. г.Евпатория (Крым). Тезисы. Сборник. - М.: Изд-во МАИ, 2016, с.146;

11. Нгуен Нам Куи. Постановка и методическая схема решения задачи выбора орбитальной структуры спутниковой системы непрерывного обзора сферического слоя околоземного пространства / Нгуен Нам Куи // Гагаринские чтения – 2017: XLIII международная молодёжная научная конференция. 5-20 апреля 2017 года. Москва. Тезисы. Сборник. - М.: Изд-во МАИ, с.126.