

АНАЛИЗ ОПТИМАЛЬНЫХ ВАРИАНТОВ ДВУХЪЯРУСНЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ НЕПРЕРЫВНОГО ОБЗОРА СФЕРИЧЕСКОГО СЛОЯ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

Разумный Ю.Н.^{1*}, Самусенко О.Е.^{2**}, Нгуен Нам Куи^{1***}

¹ Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

² Российский университет дружбы народов,
РУДН, ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, 117198, Россия

* e-mail: yury.razoumny@gmail.com

** e-mail: o.e.samusenko@gmail.com

*** e-mail: sky_moscow@mail.ru

Рассматривается задача оптимизации орбитального построения двухъярусных спутниковых систем (СС) непрерывного обзора сферического слоя околоземного космического пространства (ОКП) по критерию минимума суммарных затрат характеристической скорости на создание системы. Проведены декомпозиция данной задачи и сведение к традиционной задаче выбора в классе дельта-систем одноярусных орбитальных построений и их оптимизации по критерию минимума суммарной характеристической скорости (СХС). Обсуждаются результаты и предложение по использованию полученных оптимальных вариантов двухъярусных СС для решения различных практических задач.

Ключевые слова: спутниковая система, непрерывный обзор, околоземное космическое пространство, дельта-системы, кинематически правильные системы.

В наши дни существует обширный перечень новых практически важных задач мониторинга космическими средствами больших районов ОКП. Все такие задачи — связанные с проблемой космического мусора, технического обслуживания КА на орбитах и др. [1, 2] — в абстрактной постановке можно интерпретировать в виде математической задачи оптимизации орбитального построения СС непрерывного обзора заданных сферических слоев ОКП.

Задача выбора орбитального построения СС — одна из важнейших задач, решаемых при баллистическом проектировании СС. Сложность баллистического проектирования СС — многоуровневого процесса, требующего учета множества факторов, не позволяет сразу получить необходимое решение, поэтому задача баллистического проектирования СС решается поэтапно. На начальном этапе оптимизация орбитального построения СС осуществляется по критериям обзора.

Исследования в данном направлении начались в 60-х годах прошлого века с изучения вопросов

оптимизации орбитального построения СС непрерывного однократного глобального землеобзора.

Первоначально для оптимизации орбитального построения таких систем был предложен метод спутниковых цепочек: в каждой плоскости спутники движутся по одной круговой орбите на равном удалении друг от друга, каждой такой цепочке ставится в соответствие полоса обзора, а оптимизация орбитального построения заключается в определении состава цепочек и их относительного расположения при условии сплошного покрытия Земли полосами обзора [3, 4].

Д.Д. Уолкер, занимаясь вопросами непрерывного одно- и двукратного обзора, открыл так называемые дельта-системы и обосновал их высокое качество в задаче непрерывного глобального землеобзора [5].

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.

Г.В. Можаяев, работая параллельно с Уолкером, теоретически обосновал широкий класс рациональных вариантов орбитальных структур — класс кинематически правильных систем (КПС). Оказалось, что дельта-системы Уолкера представляют собой удачный подкласс КПС [6—10].

Таким образом, к 1980-м годам была найдена предпочтительная область оптимизации орбитальных построений СС непрерывного глобального обзора — класс КПС, и в частности класс дельта-систем.

Для КПС и дельта-систем универсальным показателем качества непрерывного глобального покрытия сферы круговыми зонами обзора спутников является α -характеристика L -кратного обзора α^L — минимальный угловой радиус зон обзора α , обеспечивающий непрерывное сплошное L -кратное покрытие сферы.

Б.П. Бырков в 1970-х годах сформулировал ряд теоретических положений и составил каталог α -характеристик дельта-систем с числом спутников до 24 включительно и кратностью обзора от 1 до 5 [11]. Ценность каталога состояла в том, что, в отличие от Можаяева, Бырков не только получил оптимальные варианты (варианты с минимальными α -характеристиками), но и рассчитал α -характеристики для перечня фиксированных значений наклона орбит.

Задача обзора ОКП возникла в 1980-х годах, когда на спутниковые системы стали возлагать функции обслуживания не только наземных, но и космических потребителей; ее можно интерпретировать как задачу обзора каждой сферы в заданном сферическом слое ОКП. При такой интерпретации очевидна не только аналогия, но и сродство задачи непрерывного обзора Земли с задачей непрерывного обзора ОКП. Аналогичны и основные методические принципы решения обеих задач. Поэтому в качестве области оптимизации орбитальных построений для СС непрерывного обзора ОКП принято также рассматривать класс КПС (дельта-систем), а для поиска рациональных вариантов орбитальных построений использовать каталог α -характеристик.

Недостаточно разработана тема исследований и в части каталогизации α -характеристик. Каталоги Быркова ограничены лишь 24-мя спутниками.

Ланг Т.Д. в 1990-х годах провел дополнительные расчеты, увеличив до 100 спутников состав изученных дельта-систем [12-15]. Однако каталоги Ланга менее полно представили характеристики отдельных систем и имели невысокую точность.

Потребовалось пополнение каталога α -характеристик системами с числом спутников, превышающим 24. При этом оказалось, что с увеличением числа спутников в системах лавинообразно возросли объемы расчетов. Процесс вычисления α -характеристик должен был стать более быстродействующим.

С расширением каталога α -характеристик существенно вырос объем содержащейся в нем информации. Поэтому процесс выбора лучших вариантов в каталоге требовал автоматизации.

Постановка задачи, ее декомпозиция и методический подход к решению

Сферический слой ОКП интерпретирован как множество концентрических *сфер обзора* с центром, совпадающим с центром Земли, и высотами нахождения над Землей в диапазоне $[H_1, H_2]$, где H_1 и H_2 — высоты нижней и верхней границы (сферы) слоя соответственно.

В данной работе рассмотрены только круговые зоны обзора — круговые сегменты с центрами в подспутниковых точках (подспутниковые круги), т. е. кольцевые и составные зоны обзора исключены из рассмотрения.

Для проведения исследований выбран тип орбитального построения на круговых орбитах одинакового радиуса и наклона (на одинаковых круговых орбитах).

Для выбранного типа орбитального построения введены в рассмотрение следующие понятия:

- *начальное фазовое состояние спутника:*

$$\phi_j = \{\Omega_j, u_j\},$$

где j — номер спутника; Ω_j — прямое восхождение восходящего узла орбиты; u_j — аргумент широты j -го спутника в фиксированный момент времени);

- *фазовая структура системы* — набор начальных фазовых состояний всех ее N спутников:

$$\Phi = \Phi(N) = \{\phi_1, \dots, \phi_N\},$$

где N — количество спутников в системе.

С учетом введенных обозначений орбитальное построение на одинаковых круговых орбитах может быть записано как

$$s = s(N, H, i) = \{\Phi(N), H, i\},$$

где H — высота орбит; i — наклонение орбит.

Среди всего множества возможных вариантов орбитального построения на одинаковых круговых

орбитах для исследования выбран класс дельта-систем K_{Δ} . Согласно Уолкеру, дельта-системы задаются тремя числами:

T — количество спутников в системе,

P — количество плоскостей орбит (один из делителей числа T),

$F = 0 \dots (P - 1)$ — коэффициент расфазировки движения спутников в соседних плоскостях.

Фазовая структура дельта-системы, заданной числами T, P, F , определяется по алгоритму:

$$\begin{cases} \Omega = \Omega_1 + \frac{2\pi}{P} \cdot (j - 1); \\ u = u_1 + \frac{2\pi}{T} \cdot [F \cdot (j - 1) + P \cdot (i - 1)], \end{cases}$$

где Ω_1, u_1 — начальное фазовое состояние первого спутника;

$j = 1 \dots P$ — номер орбитальной плоскости;

$i = 1 \dots T/P$ — номер спутника в плоскости.

Для одноярусного варианта орбитального построения показателем качества орбитального построения в задаче непрерывного глобального L -кратного обзора традиционно является α -характеристика L -кратного обзора — α^L .

Для оптимизации двухъярусного варианта орбитального построения предложено использовать дополнительный показатель — суммарную характеристическую скорость как показатель, характеризующий энергетику системы [16—20].

Для одного яруса СХС определяется по формуле

$$V = N \left(\sqrt{\frac{\mu}{R_E} \left(\frac{R_E + 2 \cdot H}{R_E + H} \right)} - \omega R_E \cos i \right),$$

где R_E — радиус земного экватора; ω — угловая скорость вращения Земли; μ — гравитационный параметр Земли.

Для двух ярусов (для двухъярусного орбитального построения) совокупная СХС определяется как сумма СХС обоих ярусов.

Для решения задачи непрерывного обзора сферического слоя ОКП предлагается использовать двухъярусную спутниковую систему — систему, состоящую из двух разноуровневых подсистем — нижнего яруса (с большей высотой орбит) и верхнего яруса (с меньшей высотой орбит).

При этом будем полагать следующее:

- на спутниках обоих ярусов установлена однотипная бортовая (обзорная) аппаратура и геометри-

ческие параметры обзора — дальность обзора D и угол полураствора β — для всех спутников системы одинаковы;

- направленность обзора в верхнем и в нижнем ярусах противоположна — конусы обзора в верхнем ярусе направлены вниз, на Землю, а в нижнем ярусе — вверх, от Земли (рис. 1);

- каждый ярус имеет структуру дельта-системы.

Для двухъярусной СС введены дополнительные обозначения:

$N_{low}, H_{low}, i_{low}, s_{low}, \Phi_{low}$ — число спутников, высота, наклонение орбит, орбитальное построение и фазовая структура нижнего яруса;

$N_{up}, H_{up}, i_{up}, s_{up}, \Phi_{up}$ — число спутников, высота, наклонение орбит, орбитальное построение и фазовая структура верхнего яруса;

S_{II} — двухъярусное орбитальное построение.

С учетом введенных определений и обозначений задача оптимизации орбитального построения двухъярусной системы непрерывного обзора сферического слоя в общей постановке сформулирована следующим образом:

Оптимизационная задача

Для заданного сферического слоя (H_1, H_2) при заданных параметрах бортовой аппаратуры $\{\beta; D\}$ и кратности обзора L требуется найти в классе дельта-систем K_{Δ} оптимальное орбитальное построение S_{II} двухъярусной спутниковой системы, обеспечивающее непрерывный L -кратный обзор слоя с минимальным значением суммарной характеристической скорости ΣV .

То есть

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

Требуется найти:

$$S_{II} = \arg \min_{\{S_{II}\}} [\Sigma V(S_{II}) | H_1, H_2, L, \beta, D, K_{\Delta}].$$

Для упрощения поставленной оптимизационной задачи проведена ее декомпозиция и сведение к известной и хорошо изученной задаче оптимизации покрытия сферической поверхности зонами обзора спутников.

Декомпозиция проведена на основании следующего допущения: каждый из двух ярусов имеет в сферическом слое (H_1, H_2) свою зону обслуживания; учитывая направленность обзорной аппаратуры, нижний ярус обслуживает верхнюю часть слоя (H_+, H_2) , а верхний ярус — нижнюю часть слоя

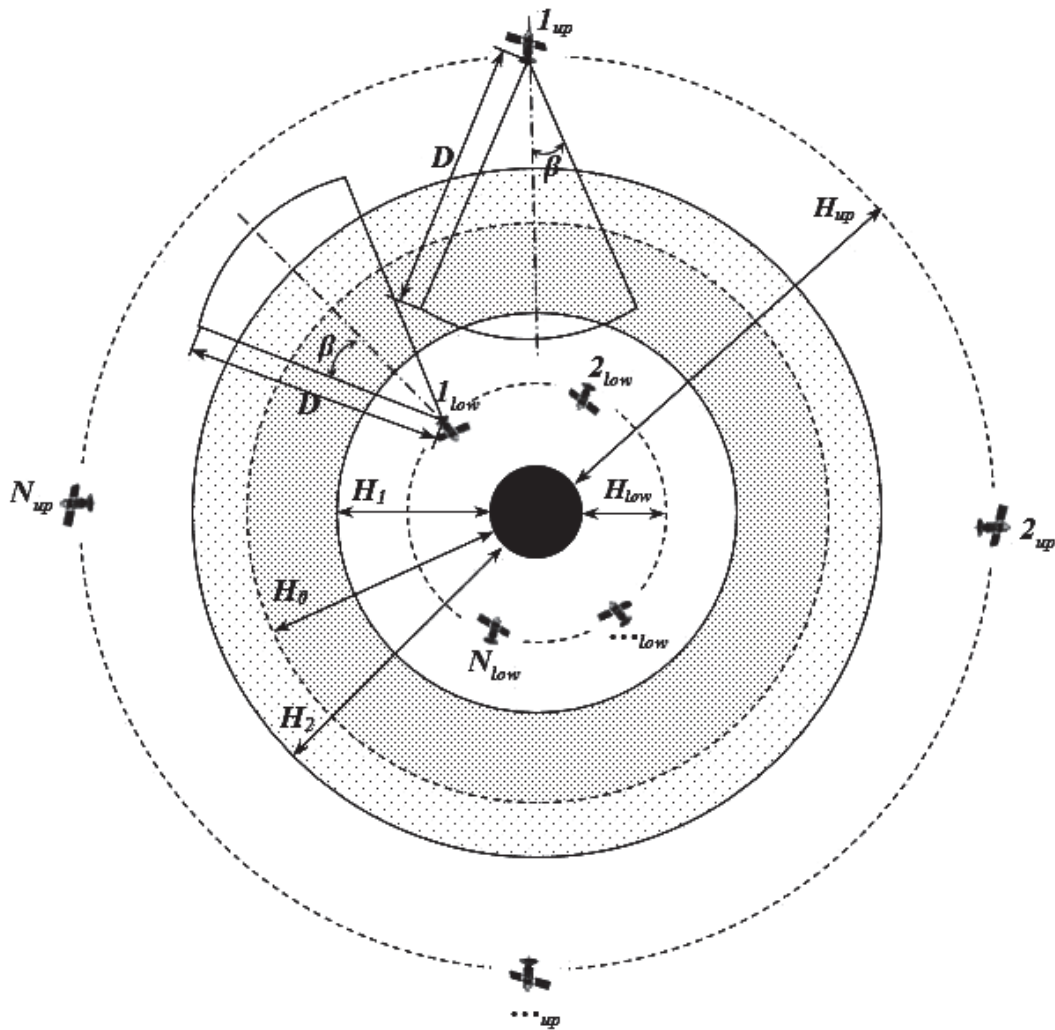


Рис. 1. Схема действия двухъярусной спутниковой системы

(H_1, H_+) , где H_+ — высота разделения зон обслуживания, $H_1 < H_+ < H_2$ (рис. 1).

Таким образом, в результате принятого допущения задача обзора сферического слоя двухъярусной системой разделена (декомпозирована) на две составляющие:

Задача 1. Обеспечить обзор нижней части слоя спутниками верхнего яруса.

Задача 2. Обеспечить обзор верхней части слоя спутниками нижнего яруса.

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 соответственно).

Для решения задачи обзора сферического слоя одноярусной системой, в свою очередь, необходимо решить две подзадачи:

Подзадача 1. Найти в сферическом слое критическую сферу — сферу с наилучшими условиями

обзора, на которой спутниковые зоны обзора имеют наименьшие размеры.

Подзадача 2. Обеспечить непрерывный глобальный L -кратный обзор критической сферы минимальным числом спутников.

В результате решения подзадачи 1 в задачах 1 и 2 определяются критические значения $\alpha_{low}(H_{low})$ и $\alpha_{up}(H_{up})$ углового радиуса зон обзора спутников нижнего и верхнего яруса — значение углового радиуса зон обзора на критической сфере верхней (H_+, H_2) и нижней (H_1, H_+) частей обслуживаемого сферического слоя (задача 2).

Если подзадача 1 решена и критические значения $\alpha_{low}(H_{low})$ и $\alpha_{up}(H_{up})$ известны, то дальнейшие действия (по решению подзадачи 2) сводятся к следующим операциям:

- поиск в классе дельта-систем K_Δ (в каталоге дельта-систем) подходящих орбитальных построе-

ний — т.е. таких, у которых α -характеристики L -кратного обзора α^L не превышают критических значений углового радиуса зон обзора;

- выбор среди подходящих орбитальных построений наиболее подходящих вариантов $s_{low}(H_{low})$ и $s_{up}(H_{up})$ для нижнего и верхнего ярусов соответственно, т.е. вариантов, состоящих из минимального числа спутников N :

$$s_{low}(H_{low}) = \arg \min_{s(H_{low}) \in K_{\text{Д}}} [N(s(H_{low})) | \alpha^L(s(H_{low})) \leq \alpha_{low}(H_{low})];$$

$$s_{up}(H_{up}) = \arg \min_{s(H_{up}) \in K_{\text{Д}}} [N(s(H_{up})) | \alpha^L(s(H_{up})) \leq \alpha_{up}(H_{up})].$$

Высота яруса выбирается также по критерию минимума числа спутников N . С использованием данного критерия определяются оптимальные высоты нижнего и верхнего ярусов:

$$H_{low}^{opt} = \arg \min_{H_{low}} [N(s_{low}(H_{low}))];$$

$$H_{up}^{opt} = \arg \min_{H_{up}} [N(s_{up}(H_{up}))]$$

и оптимальные орбитальные построения ярусов на этих высотах:

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

Использование критерия минимума числа спутников N вместо критерия минимума СХС не имеет принципиального значения — для оптимизируемых одноярусных орбитальных построений данные критерии равнозначны и найденные в результате оптимизации варианты наряду с минимальным числом спутников обладают также и минимальной СХС.

Объединенные оптимальные варианты s_{low}^{opt} и s_{up}^{opt} составляют лучшее двухъярусное орбитальное построение S_{II} , обеспечивающее непрерывный L -кратный обзор заданного сферического слоя (H_1, H_2)

при фиксированной высоте H_+ разделения слоя на зоны обслуживания:

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

Поэтому оптимизация орбитальных построений $S_{\text{II}}(H_+)$ (теперь уже по критерию минимума СХС) на всем множестве допустимых значений высоты разделения слоя H_+ позволяет найти оптимальную высоту разделения H_+^{opt} и в итоге решить поставленную оптимизационную задачу:

$$H_+^{opt} = \arg \min_{H_+} \Sigma V(S_{\text{II}}(H_+));$$

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

Таким образом, в результате декомпозиции задача оптимизации орбитального построения двухъярусной спутниковой системы непрерывного L -кратного обзора сферического слоя сведена к традиционной задаче выбора в классе дельта-систем одноярусных орбитальных построений и их оптимизации по критерию минимума СХС.

С учетом декомпозиции разработан следующий алгоритм решения оптимизационной задачи:

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

1) определяются оптимальная высота орбит спутников нижнего яруса $H_{low}^{max}(H_+)$ и соответствующее ей значение критического радиуса углового радиуса зон обзора $\alpha_{low}^{max}(H_+)$ путем решения системы уравнений

$$\begin{cases} \alpha_{low}^{max} = \arccos \left(\frac{(R_E + H_2)^2 + (R_E + H_{low}^{max})^2 - D^2}{2(R_E + H_2)(R_E + H_{low}^{max})} \right); \\ \alpha_{low}^{max} = \beta - \arcsin \left(\frac{(R_E + H_{low}^{max}) \sin \beta}{R_E + H_+} \right); \end{cases}$$

2) определяются оптимальная высота орбит спутников верхнего яруса $H_{up}^{max}(H_+)$ и соответствующее ей значение критического радиуса углового радиуса зон обзора $\alpha_{up}^{max}(H_+)$ путем решения системы уравнений

$$\left\{ \begin{aligned} \alpha_{up}^{\max} &= \arccos \left(\frac{(R_E + H_1)^2 + (R_E + H_{up}^{\max})^2 - D^2}{2(R_E + H_1)(R_E + H_{up}^{\max})} \right), \\ \alpha_{up}^{\max} &= \arcsin \left(\frac{(R_E + H_{up}^{\max}) \sin \beta}{R_E + H_+} \right) - \beta; \end{aligned} \right.$$

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

$$\begin{aligned} s_{low}^{\text{opt}}(H_+) &= \\ &= \arg \min_{s(H_{low}^{\max}(H_+)) \in K_{\Delta}} \left[\begin{aligned} &N(s(H_{low}^{\max}(H_+))) \\ &|\alpha^L(s(H_{low}^{\max}(H_+))) \leq \alpha_{low}^{\max}(H_+) \end{aligned} \right], \\ s_{up}^{\text{opt}}(H_+) &= \\ &= \arg \min_{s(H_{up}^{\max}(H_+)) \in K_{\Delta}} \left[\begin{aligned} &N(s(H_{up}^{\max}(H_+))) \\ &|\alpha^L(s(H_{up}^{\max}(H_+))) \leq \alpha_{up}^{\max}(H_+) \end{aligned} \right]; \end{aligned}$$

4) определяются СХС нижнего $V_{low}(H_+)$ и верхнего $V_{up}(H_+)$ ярусов и совокупная СХС двухъярусного орбитального построения:

$$\Sigma V(H_+) = V_{low}(H_+) + V_{up}(H_+).$$

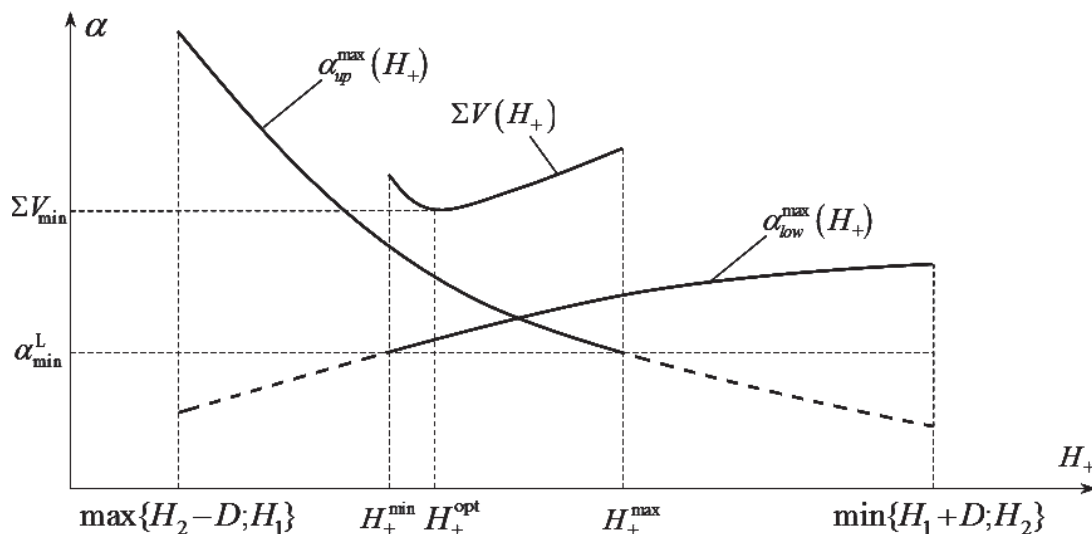


Рис. 2. Схема зависимости величин $\alpha_{low}^{\max}(H_+)$, $\alpha_{up}^{\max}(H_+)$, $\Sigma V(H_+)$

2. Определяются оптимальная высота разделения сферического слоя $H_+^{\text{opt}} = \arg \min_{H_+} \Sigma V(H_+)$ и со-

ответствующие ей оптимальные варианты орбитального построения нижнего и верхнего ярусов $s_{low}^{\text{opt}}(H_+^{\text{opt}})$ и $s_{up}^{\text{opt}}(H_+^{\text{opt}})$.

3. Формируется оптимальное двухъярусное орбитального построения $S_{II} = \{s_{low}^{\text{opt}}(H_+^{\text{opt}}); s_{up}^{\text{opt}}(H_+^{\text{opt}})\}$.

На рис. 2 показан характерный вид зависимости $\alpha_{low}^{\max}(H_+)$, $\alpha_{up}^{\max}(H_+)$, $\Sigma V(H_+)$. Здесь же отмечена нижняя граница α_{\min}^L значений α -характеристик L -кратного обзора α^L , содержащихся в каталоге дельта-систем.

Числовые результаты исследования и их обсуждение

В результате выполненной работы получен электронный каталог оптимальных вариантов орбитального построения двухъярусных спутниковых систем непрерывного L -кратного обзора заданного сферического слоя ОКП.

Оптимальные двухъярусные варианты даются в сравнении с лучшими одноярусными системами, построенными либо на нижнем ярусе (под сферическим слоем с направленными вверх конусами обзора спутников), либо на верхнем ярусе (над сферическим слоем с направленными вниз конусами обзора спутников). В таблице результаты оптимизации приведены в виде значения СХС (верхняя строка ячейки, в км/с) и соответствующей этому

Оптимальные варианты орбитальных построений СС ($L = 1, \beta = 30^\circ$)

$H_2, \text{ км}$	$H_1, \text{ км}$										
	15000	16000	17000	18000	19000	20000	21000	22000			
28000	78 39 32 42783 72.4	62 31 26 44115 68.6	49 49 22 45347 67.7	41 41 18 46476 65.4	36 18 13 47504 68.5	32 32 28 48434 73.8	27 9 5 49267 59.9	23 23 14 50008 58.7	241		
	383	367	359	343	336	329	320	320			
	49 49 22 300 67.7	47 47 21 300 66.5	46 23 18 300 67.4	44 22 17 300 65.6	43 43 19 300 68.1	42 21 16 300 69.2	41 41 18 300 65.4	41 41 18 300 65.4	434		
	473	462	457	450	443	434	434	434			
30000	11 11 4 3251 53.8	10 10 7 32627 47.9	11 11 4 35067 53.8	11 11 4 36863 53.8	11 11 4 38305 53.8	11 11 4 40025 53.8	11 11 4 41091 53.8	11 11 4 42727 53.8			
	462 318 300 67.4	46 23 18 300 67.4	44 22 17 300 65.6	43 43 19 300 68.1	42 21 16 300 69.2	41 41 18 300 65.4	41 41 18 300 65.4	41 41 18 300 65.4			
	=1183	910	756	590	485	432	381	326			
	=112 1 43448 74	86 43 36 44917 4.3	71 71 16 54629 481.5	56 28 23 47575 67.6	46 23 18 48761 67.4	41 41 18 49851 65.4	36 18 13 50847 68.5	31 31 9 51751 60.9			
32000	418	367	359	343	336	329	320	320			
	52 26 21 755 68.1	47 47 21 300 66.5	46 23 18 300 67.4	44 22 17 300 65.6	43 43 19 300 68.1	42 21 16 300 69.2	41 41 18 300 65.4	41 41 18 300 65.4			
	507	462	457	450	443	434	434	434			
	13 13 5 35058 58.4	10 10 7 32626 47.9	11 11 4 35069 53.8	11 11 4 36862 53.8	11 11 4 38305 53.8	11 11 4 40026 53.8	11 11 4 41092 53.8	11 11 4 42727 53.8			
34000	462 318 842 67.4	46 23 18 300 67.4	44 22 17 300 65.6	43 43 19 300 68.1	42 21 16 300 69.2	41 41 18 300 65.4	41 41 18 300 65.4	41 41 18 300 65.4			
	=1763	=1337	1017	826	692	550	464	413			
	=166 1 43950 81	=126 1 45535 78	96 48 41 47037 74.5	78 39 32 48452 72.4	65 65 59 49778 79.6	52 26 21 51014 68.1	44 22 17 52159 65.6	39 39 17 53215 68.8			
	646	499	388	343	336	329	320	320			
36000	73 73 67 2772 80.8	59 59 27 1808 68.0	48 24 19 808 68.7	44 22 17 300 65.6	43 43 19 300 68.1	42 21 16 300 69.2	41 41 18 300 65.4	41 41 18 300 65.4			
	680	568	485	450	443	434	434	434			
	186 2 37212 56.6	13 13 5 36513 58.4	11 11 4 35547 53.8	11 11 4 36865 53.8	11 11 4 38305 53.8	11 11 4 40025 53.8	11 11 4 41092 53.8	11 11 4 42727 53.8			
	5628 23 2977 67.6	51 51 23 1905 66.8	46 23 18 830 67.4	43 43 19 300 68.1	42 21 16 300 69.2	41 41 18 300 65.4	41 41 18 300 65.4	41 41 18 300 65.4			
38000	>2621	=1989	=1476	1134	913	768	624	519			
	>246 1 44320	=187 1 46003 81	=139 1 47612 77	107 107 50 49143 73.8	86 43 36 50592 74.3	72 72 66 51958 79.3	59 59 27 53239 68.0	49 49 22 54434 67.7			
	911	713	586	441	372	329	320	320			
	99 99 46 4714 73.5	79 79 36 3800 72.9	66 66 6 2853 81.3	52 26 21 1870 68.1	46 23 18 853 67.4	42 21 16 300 69.2	41 41 18 300 65.4	41 41 18 300 65.4			
40000	874	755	635	547	470	434	434	434			
	147 4 35778 54.0	171 7 738428 55.5	171 7 740150 55.5	11 11 4 37002 53.8	11 11 4 38476 53.8	11 11 4 40027 53.8	11 11 4 41093 53.8	11 11 4 42727 53.8			
	79 79 36 4917 72.9	64 32 27 4010 68.5	52 26 21 3025 68.1	51 51 23 1892 66.8	44 22 17 866 65.6	41 41 18 300 65.4	41 41 18 300 65.4	41 41 18 300 65.4			

Окончание таблицы

36000	>3368 >316 + 44587 ≈1406	>2785 >261 + 46352 1020	>2200 >206 + 48051 783	≈1627 ≈153 + 49681 78 655	≈1267 ≈119 + 51238 78 518	998 9447 40 52718 73.3 416	839 79 79 36 54119 72.9 349	715 67 67 6 155440 78.9 320
	≈148 + 6600 78 1076	109 109 51 5725 73.7 938	85 85 39 4823 73.6 824	72 72 66 3889 79.3 696	59 59 27 2923 68.0 594	49 49 22 1925 67.7 523	43 43 19 893 68.1 463	41 41 11 8300 65.4 434
38000	22 22 63837 58.3 89 89 41 7008 74.1	17 17 73840 55.5 81 81 37 5992 74.2	147 4138663 54.0 73 73 67 4990 80.8	147 440239 54.0 616 1284026 68.2	131 3541005 58.4 52 26 21 3009 68.1	111 11440171 53.8 48 24 19 1940 68.7	111 11441093 53.8 43 43 19 893 68.1	111 11442774 53.8 41 41 11 8300 65.4
	>4040 >379 + 44773 >2262	>3489 >327 + 46605 ≈1537	>2938 >275 + 48380 ≈1133	>2374 >222 + 50094 871	≈1793 ≈168 + 51743 81 719	≈1419 ≈133 + 53323 80 602	1106 104 52 45 5483 173.6 475	904 85 85 39 56265 73.6 391
40000	>232 + 8448 1330	≈160 + 7601 77 1138	≈119 + 6733 78 996	939 343 5841 72.8 881	78 39 32 4920 72.4 768	66 66 6 3969 81.3 652	54 27 22 2986 67.3 572	46 23 18 1972 67.4 506
	37 37 1640607 66.4 97 97 45 9121 72.7	26 26 1640808 59.5 90 45 388084 73.8	171 71740193 55.5 86 43 367022 74.3	168 54 1079 56.5 76 383 16056 74.1	171 71743186 55.5 64 32 27 5120 68.5	147 443222 54.0 56 28 23 4082 67.6	111 11441505 53.8 52 26 21 2996 68.1	111 11442775 53.8 46 23 18 1972 67.4
D, км	>4658 >437 + 44894 >3166	>4130 >387 + 46782 >2409	>3600 >337 + 48620 ≈1713	>3069 >287 + 50406 ≈1267	>2537 >237 + 52134 950	≈1997 ≈187 + 53800 81 778	≈1536 ≈144 + 55401 78 651	≈1202 ≈113 + 56934 74 533
	>320 + 10281 1633	>245 + 9444 1397	≈176 + 8600 81 1205	≈131 + 7739 83 1049	100 50 43 6855 74.0 934	83 83 38 5945 72.6 832	70 70 64 5007 79.9 716	59 59 27 4039 68.0 617
	52 26 21 41847 68.1 110 55 4811182 74.9	36 18134222 68.5 104 52 45 10127 73.6	26 26 1642514 59.5 96 484 19105 74.5	22 22 643317 58.3 858 539 8134 73.6	20 10 744343 56.8 76 38 31 7168 74.1	171 71744860 55.5 69 69 63 6163 82.3	19 19 547318 57.4 56 28 23 5221 67.6	147 446368 54.0 52 26 21 4138 68.1
	30000	31000	32000	33000	34000	35000	36000	37000

значению оптимальной спутниковой структуры в формате $T|P|F|H|i$, где T, P, F — тройка целых чисел, определяющая фазовую структуру дельта-системы; H, i — высота и наклонение орбит. Для двухъярусной системы в средней строке приведена структура верхнего яруса, в нижней — структура нижнего яруса. Темным цветом выделены двухъярусные построения, превосходящие одноярусные системы по критерию минимума СХС, и, следовательно, имеющие наименьшую энергетiku.

Анализ каталога оптимальных вариантов орбитального построения двухъярусных спутниковых систем позволил локализовать области предпочтительного применения двухъярусного построения — параметры размещения сферического слоя (параметры размещения его нижней и верхней границ), при которых двухъярусный вариант орбитального построения имеет преимущество перед одноярусным вариантом по критерию минимума суммарной характеристической скорости.

Результаты локализации представлены в таблице. Области локализации оптимальных двухъярусных вариантов отмечены темным фоном, полужирным шрифтом и пунктирными линиями среди одноярусных вариантов дополнительно отделены области локализации оптимальных нижнеярусных вариантов — одноярусных построений в нижней части (ниже) сферического слоя с направленными вверх конусами обзора.

Анализ возможностей применения двухъярусного орбитального построения для создания СС непрерывного обзора сферического слоя ОКП, проведенный на основании полученных результатов, выявил следующие закономерности.

Проектирование нижнего яруса с направленной вверх аппаратурой обзора имеет смысл лишь в том случае, если верхняя граница слоя настолько высока, а дальность действия и угол полураствора бортовой аппаратуры настолько велики, что спутниковые зоны обзора в верхней части слоя имеют размеры, достаточные для создания требуемых условий обзора при числе спутников, приемлемом для практической реализации.

Если же сферический слой расположен высоко над Землей, а его толщина значительно меньше дальности действия бортовой аппаратуры, то, наоборот, наиболее эффективным вариантом представляется одноярусное построение системы с направленной вверх аппаратурой обзора.

Выводы

Двухъярусное орбитальное построение во многих случаях не имеет преимущества перед традици-

онным одноярусным вариантом, однако при определенных условиях все же оказывается предпочтительным.

В тех случаях, когда дальность обзора не превышает толщины сферического слоя (но, конечно, больше половины его толщины), двухъярусный вариант орбитального построения является безальтернативным.

Те случаи, когда в результате наших исследований лучшим оказался одноярусный вариант, можно считать вырождением двухъярусного орбитального построения в одноярусное за счет «обнуления» числа спутников в одном из ярусов.

Библиографический список

1. Усовик И.В., Дарных В.В., Малышев В.В. Методика оценки эволюции техногенного засорения низких околоземных орбит с учетом взаимных столкновений и активного удаления космического мусора // Вестник Московского авиационного института. 2015. Т. 22. № 3. С. 54-62.
2. Дарных В.В., Малышев В.В. Оптимизация баллистического построения орбитальных группировок космических систем наблюдения на основе оперативного планирования их целевого функционирования // Вестник Московского авиационного института. 2011. Т. 18. № 6. С. 25-34.
3. Vargo L.G. Orbital patterns of satellite systems // The Journal of the Astronautical Sciences. 1960. Vol. 7. № 4, pp. 78-86.
4. Gobetz F.W. Satellite networks for global coverage // Advances in astronautical sciences. 1963. Vol. 9, pp. 134-156.
5. Walker J.G. Satellite Constellations // Space Technology. 1984. Vol. 37, pp. 559-572.
6. Можяев Г.В. Задача о непрерывном обзоре Земли и кинематически правильные спутниковые системы. Часть I // Космические исследования. 1972. Т. 10. № 6. С. 833-840.
7. Можяев Г.В. Задача о непрерывном обзоре Земли и кинематически правильные спутниковые системы. Часть II // Космические исследования. 1973. Т. 11. № 1. С. 59-69.
8. Можяев Г.В. Синтез орбитальных структур спутниковых систем: теоретико-групповой подход. — М.: Машиностроение, 1989. — 304 с.
9. Можяев Г.В. Проблемы оптимизации движения спутниковых систем: состояние исследований и перспективы // Труды МАИ. 2009. № 34. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=8227>
10. Власов С.А. Основы баллистического проектирования систем КА землеобзора: Учебное пособие. — СПб.: Министерство обороны РФ, 1998. — 98 с.
11. Бырков Б.П., Силов В.В., Никитин И.Н. Использование временных диаграмм видимости для выбора одномаршрутных систем ИСЗ на эллиптических орбитах // Труды XVIII чтений К.Э. Циолковско-

- го (Калуга, 13-16 сентября, 1983). Секция «Механика космического полета». — М.: ИИЕиТ АН СССР, 1984. С. 38-45.
12. Lang T.J. Symmetric circular orbit satellite constellations for continuous global coverage // Proceedings of the AAS/AIAA Astrodynamics Conference, Kalispell, Aug. 10-13, 1987. — San Diego, CA, Univelt, Inc. Part 2 (A89-12626 02-12). 1988, pp. 1111-1132.
 13. Lang T.J. Optimal low earth orbit constellations for continuous global coverage // AAS/AIAA Astrodynamics Specialist Conference, Victoria, Canada, 16-19 August 1993, no. 597, 18 p.
 14. Lang T.J. A parametric examination of satellite constellations to minimize revisit time for low earth orbits using a genetic algorithm // AAS/AIAA Astrodynamics Specialist Conference, Quebec, Canada, 30 July-2 August 2001, vol. 109, pp. 625-640.
 15. Lang T.J. Walker Constellations to Minimize Revisit Time in Low Earth Orbit // 13-th AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting, Ponce, Puerto Rico, 9-13 February 2003. Paper AAS 03-178, 16 p.
 16. Razoumny Yu.N. Route satellite constellations for Earth discontinuous coverage and optimal solution peculiarities // Journal of Spacecraft and Rockets. 2017. Vol. 54. No. 3, pp. 572-581. DOI: 10.2514/1.A33689
 17. Razoumny Yu.N. Fundamentals of the Route Theory for Satellite Constellation Design for Earth Discontinuous Coverage. Part 3: Low-Cost Earth Observation with Minimal Satellite Swath // Acta Astronautica. 2016. Vol. 129, pp. 447-458. DOI: 10.1016/j.actaastro.2016.07.018
 18. Разумный Ю.Н. Машиностроение. Энциклопедия: В 40 т. Т. IV-22. Ракетно-космическая техника. Кн. 1. — М.: Машиностроение, 2012. С. 180-225.
 19. Разумный Ю.Н., Самусенко О.Е., Нгуен Нам Куи. О задаче оптимизации орбитальной структуры многоярусных спутниковых систем непрерывного обзора околоземного пространства // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2018. № 4(697). DOI: 10.18698/0536-1044-2018-4-68-79
 20. Razoumny Yu.N., Samusenko Oleg, Nguyen Nam Quy. Satellite Constellation Design for Near Earth Space Coverage Basing on Two-Tier Satellite Structures // Advances in the Astronautical Sciences. 2017. Vol. 161, pp. 1142-1149.

OPTIMAL OPTIONS ANALYSIS OF TWO-TIER SATELLITE SYSTEMS FOR NEAR-EARTH SPACE SPHERICAL LAYER CONTINUOUS COVERAGE

Razoumny Yu.N.^{1*}, Samusenko O.E.^{2}, Nguyen Nam Quy^{1***}**

¹ *Moscow Aviation Institute (National Research University), MAI, 4, Volokolamskoe shosse, Moscow, A-80, GSP-3, 125993, Russia*

² *RUDN University,*

6, Mikluho-Maklaya str., Moscow, 117198, Russia

^{*} *e-mail: yury.razoumny@gmail.com*

^{**} *e-mail: o.e.samusenko@gmail.com*

^{***} *e-mail: sky_moscow@mail.ru*

Abstract

Nowadays, there is a wide nomenclature of practically new significant tasks of monitoring vast near-Earth space areas by space systems, associated with the “space debris” problems, spacecraft technical maintenance in orbit etc. All tasks of such kind in an abstract formulation can be interpreted in the form of mathematical problem on optimization of the satellite constellations orbital construction for continuous coverage of specified spherical layers of near-Earth space. However, still there is no theoretical apparatus for effectively solving this problem.

The article formulates for the first time the optimization problems of the two-tier satellite constellations orbital construction for near-Earth spherical layer continuous coverage by the criterion of the characteristic velocity minimum total costs on the system creation. Each tier of such a system is formed

in circular orbits with the same altitude and inclination values for all satellites. The satellites of each tier are oriented herewith in such a way that observation cone, formed by the onboard equipment of the satellites in the upper tier are directed downward towards the Earth, while in the upper tier - towards the opposite side.

Decomposition of this problem and its reduction to the traditional problem of selection in the delta-systems class of one-tier orbital constellations and their optimization by the total characteristic velocity minimum was performed in this work. The authors suggest methodological approach to this problem solving; discuss the obtained numerical results and the suggestion on application of the obtained optimal options of the two-tier satellite systems for solving various practical tasks. The two-tier orbital structure in many cases has no advantage over the traditional, single-tiered option.

However, under certain conditions the two-tier orbital construction appears after all more preferential.

Keywords: satellite system, continuous scan, near-Earth space, delta-systems, kinematically regular system.

References

1. Usovik I.V., Darnopykh V.V., Malyshev V.V. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2015, vol. 22, no. 3, pp. 54–62.
2. Darnopykh V.V., Malyshev V.V. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2011, vol. 18, no. 6, pp. 25–34.
3. Vargo L.G. Orbital patterns of satellite systems. *The Journal of the Astronautical Sciences*, 1960, vol. 7, no. 4, pp. 78–86.
4. Gobetz F.W. Satellite networks for global coverage. *Advances in astronautical sciences*, 1963, vol. 9, pp. 134–156.
5. Walker J.G. Satellite Constellations. *Space Technology*, 1984, vol. 37, pp. 559–572.
6. Mozhaev G.V. *Kosmicheskie issledovaniya*, 1972, vol. 10, no. 6, pp. 833–840.
7. Mozhaev G.V. *Kosmicheskie issledovaniya*, 1973, vol. 11, no. 1, pp. 59–69.
8. Mozhaev G.V. *Sintez orbital'nykh struktur sputnikovykh sistem: teoretiko-grupповoi podkhod* (Satellite systems orbital structures synthesis: group-theoretical approach), Moscow, Mashinostroenie, 1989, 304 p.
9. Mozhaev G.V. *Trudy MAI*, 2009, no. 34, available at: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=8227>
10. Vlasov S.A. *Osnovy ballisticheskogo proektirovaniya sistem KA zemleobzora* (Fundamentals of the Earth scanning spacecraft systems ballistic design), St. Petersburg, Ministerstvo oborony RF, 1998, 98 p.
11. Byrkov B.P., Silov V.V., Nikitin I.N. *Trudy XVIII chtenii K.E. Tsiolkovskogo (Kaluga, 13-16 sentyabrya, 1983). Sektsiya "Mekhanika kosmicheskogo poleta"*. Moscow, IIEiT AN SSSR, 1984, pp. 38–45.
12. Lang T.J. Symmetric circular orbit satellite constellations for continuous global coverage. *Proceedings of the AAS/AIAA Astrodynamics Conference, Kalispell, August 10-13, 1987. San Diego, CA, Univelt, Inc. Part 2 (A89-12626 02-12)*, 1988, pp. 1111–1132.
13. Lang T.J. Optimal low earth orbit constellations for continuous global coverage. *AAS/AIAA Astrodynamics Specialist Conference, Victoria, Canada, 16-19 August 1993*, no. 597, 18 p.
14. Lang T.J. A parametric examination of satellite constellations to minimize revisit time for low earth orbits using a genetic algorithm. *AAS/AIAA Astrodynamics Specialist Conference, Quebec, Canada, 30 July–2 August 2001*, vol. 109, pp. 625–640.
15. Lang T.J. Walker Constellations to Minimize Revisit Time in Low Earth Orbit. *13-th AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting, Ponce, Puerto Rico, 9–13 February 2003*. Paper AAS 03-178, 16 p.
16. Razoumny Yu.N. Route satellite constellations for Earth discontinuous coverage and optimal solution peculiarities. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2017, vol. 54, no. 3, pp. 572–581. DOI: 10.2514/1.A33689
17. Razoumny Yu.N. Fundamentals of the Route Theory for Satellite Constellation Design for Earth Discontinuous Coverage. Part 3 “Low-Cost Earth Observation with Minimal Satellite Swath”. *Acta Astronautica*, 2016, vol. 129, pp. 447–458. DOI: 10.1016/j.actaastro.2016.07.018
18. Razoumny Yu.N. *Mashinostroenie. Entsiklopediya v 40 tomakh*. Moscow, Mashinostroenie, 2012. Vol. IV-22 “Raketno-kosmicheskaya tekhnika”, book 1, pp. 180–225.
19. Razoumny Yu.N., Samusenko O.E., Nguen Nam Quy. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie*, 2018, no. 4(697). DOI: 10.18698/0536-1044-2018-4-68-79
20. Razoumny Yu.N., Samusenko O., Nguyen Nam Quy. Satellite Constellation Design for Near Earth Space Coverage Basing on Two-Tier Satellite Structures. *Advances in the Astronautical Sciences*, 2017, vol. 161, pp. 1142–1149.