

УДК 78.25.15.29

МНОГОУРОВНЕВАЯ БАЛЛИСТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА КЛАСТЕРНОЙ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

© 2021 Н.Ф. Аверкиев, А.В. Кульвиц, Т.А. Житников

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия

Статья поступила в редакцию 26.07.2021

Рассматриваются особенности применения и обоснования орбитальных группировок дистанционного зондирования Земли, состоящих из кластеров малых космических аппаратов. Проведен обзор и анализ баллистического обоснования, построения и особенности применения орбитальных группировок дистанционного зондирования Земли. Рассмотрены современные подходы к баллистическому проектированию орбитальных группировок периодического обзора. В статье рассматривается новый комплексный подход к баллистическому построению перспективных кластерных орбитальных группировок, который позволит обеспечить требуемые потребителем пространственно-временные и точностные характеристики за счет оптимальной многоуровневой баллистической структуры. Сформулированы основополагающие принципы построения кластерной орбитальной группировки с многоуровневой баллистической структурой. Детально рассматриваются этапы формирования многоуровневой баллистической структуры с позиций системного подхода. Предложена математическая постановка задачи и иерархия показателей эффективности. Для содержательного описания моделируемой системы разработана концептуальная модель обоснования многоуровневых баллистических структур кластерной орбитальной группировки дистанционного зондирования Земли в условиях воздействия внешней среды. Модель отображает взаимосвязи основных элементов обоснования баллистической структуры кластерной орбитальной группировки дистанционного зондирования Земли и последовательность формирования частных задач. Приведены результаты моделирования как баллистической структуры кластера, так и баллистической структуры орбитальной группировки дистанционного зондирования Земли, обеспечивающей совокупность тактико-технических, пространственно-временных и структурно-устойчивых требований потребителя. Эффектом от применения разработанной концептуальной модели будет являться оптимальная стратегия применения кластерной орбитальной группировки дистанционного зондирования Земли, которая обеспечит требуемое значение ее эффективности в условиях воздействия внешней среды.

Ключевые слова: орбитальная группировка дистанционного зондирования Земли, малый космический аппарат, многоуровневая баллистическая структура, концептуальная модель.

DOI: 10.37313/1990-5378-2021-23-4-77-85

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для решения задачи дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) активно используются низкоорбитальные группировки, состоящие из кластеров малых космических

Аверкиев Николай Федорович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры навигационно-баллистического обеспечения применения космических средств и теории полета летательных аппаратов. E-mail: averkievnf@yandex.ru

Кульвиц Алексей Владимирович, кандидат технических наук, доцент, докторант кафедры навигационно-баллистического обеспечения применения космических средств и теории полета летательных аппаратов. E-mail: kulvitz33@mail.ru

Житников Тимофей Андреевич, кандидат технических наук, начальник лаборатории 1 управления военного института (научно-исследовательского). E-mail: 0606848@rambler.ru

аппаратов (МКА) [1,2]. Примерами функционирующих орбитальных группировок, состоящих из кластеров МКА, являются модернизированная система HawkEye 360 (США), Yaogan (Китай), Essaim, Elisa (Франция), Ceres (ЕС) и др. [3-6]. Кроме того, в ряде стран развернуты работы по созданию принципиально новых низкоорбитальных КА на базе унифицированных космических платформ [3]. Основными тенденциями развития космических систем данного целевого назначения являются:

- увеличение доли радиолокационных спутников различного назначения [7];

- возрастание числа оптико-электронных и космических систем высокого (от 2.5 м до 1 м) и сверхвысокого разрешения (менее 1 м) с радиолокаторами с синтезированной апертурой (РСА) и, как следствие, отказ от фотографических космических систем;

- отказ от дорогостоящих многофункциональных спутников и широкое использование кластеров малых КА [2].

При этом преимуществами использования в группировках ДЗЗ малых КА является:

- значительное увеличение оперативности получения данных наблюдения за счёт создания необходимой по численности группировки малых КА [7];

- более быстрое внедрение новых технических разработок и технологий съёмки;

- увеличение надёжности группировки за счёт её быстрого восполнения в случае необходимости;

- уменьшение затрат на создание и ввод в эксплуатацию МКА;

- всепогодный и круглосуточный мониторинг земной поверхности;

- высокое пространственное разрешение получаемой информации.

Однако для реализации указанных эффектов МКА должны совместно функционировать в составе целевых подсистем орбитальной группировки, получивших в специальной литературе наименование кластеров МКА. Следует отметить, что общепринятого понятия кластера МКА в настоящее время не существует. Как правило, к кластерам относят группы совместно функционирующих КА. Поэтому под кластером будем понимать совокупность КА различного целевого назначения не только совместно выполняющих общую задачу и воспринимаемых потребителем как единое целое, но и управляемых как единый космический объект [2].

Как правило, функционирование бортовой аппаратуры определяет жёсткие требования к относительному положению МКА в составе кластера МКА во время орбитального полёта, следовательно, при проектировании орбитальных группировок возникают дополнительные ограничения, которые существенно усложняют определение баллистической структуры орбитальной группировки МКА, состоящей из кластеров МКА, имеющих собственную баллистическую структуру.

Так, например, в случае реализации кластером МКА задач радиомониторинга структура кластера должна обеспечить возможность применения различных методов измерений, таких как разностно-дальномерного, интерферометрического и др. методов, при этом необходимо чтобы структура кластера отвечала требованиям по устойчивому относительному положению МКА в составе кластера для заданного диапазона орбит [4, 8]. Но, вместе с тем, баллистическая структура самой орбитальной группировки, состоящей из кластеров МКА, должна обеспечивать и новые требования, например, пространственно-временные, тактико-технические

и энергетические. Таким образом, баллистическая структура орбитальной группировки будет носить многоуровневый характер с совокупностью требований и ограничений, в ряде случаев взаимно противоречивых.

В настоящее время создан достаточный теоретический и практический задел в области синтеза орбитальных структур систем КА периодического обзора. Фундаментальными трудами в области проектирования орбитальных группировок (ОГ) различного целевого назначения являются работы таких учёных как Баринов К.Н., Бурдаев М.Н., Мамон П.А., Можяев Г.В., Власов С.А., Горбулин В.И., Разумный Ю.Н., Скребушевский Б.С., Назаренко О.П., Улыбышев С.Ю. и др. [8, 12]. В данных работах всесторонне и в полном объёме освещены вопросы проектирования ОГ КА, обладающих так называемой «симметричной» баллистической структурой и располагающихся на одинаковых орбитах. Таким образом, оптимизация проводилась в рамках выбранного класса баллистических структур, обладающего структурной устойчивостью и рациональным построением.

Вопросам разработки моделей и методов управления кластером МКА в настоящее время уделяется повышенное внимание как у нас в стране, так и за рубежом [3, 8, 11]. Однако стоит отметить, что вопросы обоснования и создания кластерных ОГ КА, которые функционируют на различных орбитах, остались вне рамок исследований.

В данной статье рассматривается новый комплексный подход к баллистическому построению перспективных кластерных ОГ, который позволит обеспечить требуемые потребителем пространственно-временные и точностные характеристики за счёт оптимальной многоуровневой баллистической структуры.

В основе подхода лежит построение многоуровневых баллистических структур, с помощью которых формируются кластерные ОГ. Процесс формирования основывается на «компромиссном» варианте орбитального построения. Так, баллистическая структура кластера располагается на разновысотных орбитах, но при этом обеспечивает как требования для функционирования бортовой аппаратуры, так и внутреннюю структурную устойчивость. С этой целью вводится понятие опорная орбита кластера МКА, которая представляет собой совокупность незначительно отличающихся друг от друга орбит, по которым происходит движение каждого МКА из состава кластера, но при этом имеющих одинаковый цикл замыкания трассы полёта и одинаковую прецессию восходящего узла орбиты.

С другой стороны, внутренняя устойчивость МКА в составе кластера взаимосвязана с динамикой самого кластера МКА внутри орбитальной группировки.

На заключительном этапе происходит обоснование баллистической структуры кластерной ОГ МКА, основанное на синтезе баллистических структур, при котором, впервые учитываются требования на способность системы к наращиванию, перенацеливанию и совместному применению с уже функционирующими ОГ КА и одиночными КА.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В общем виде математическая постановка задачи обоснования многоуровневой баллистической структуры орбитальной группировки ДЗЗ с применением кластеров МКА сводится к двум этапам. На первом этапе формируется целевая функция, требования и ограничения, которые необходимы для успешного выполнения кластером МКА своей целевой задачи. Оптимизационная задача сводится к определению баллистической структуры кластера МКА, т.е. необходимо определить оптимальную баллистическую структуру, задаваемую в виде множества

$O_k(a_k, e_k, i_k, \Omega_k, \omega_k, u_k)$, где $k = 1(1), \dots, 3$, которое обеспечит выполнение кортежа тактико-технических требований и характеристик функционирования МКА, ОГ МКА, а также требуемые точностные характеристики потребителя.

Как правило, требуемые точностные характеристики определения координат, скорости и направления представляют в виде ограничений

$$\sigma_r \leq \sigma_{r\text{зад}}, \sigma_v \leq \sigma_{v\text{зад}}, \sigma_A \leq \sigma_{A\text{зад}}.$$

Требования функционирования бортовой аппаратуры можно свести к ограничению относительного положения МКА в составе кластера МКА

$$d_{\min} < d_{i,j}(t) < d_{\max}, \quad i \neq j$$

где i, j – номер МКА в составе кластера, t – заданный интервал функционирования кластера МКА до проведения коррекции.

Заданную структурную устойчивость можно задать в виде временного интервала структурной устойчивости кластера МКА, который обусловлен ограничениями на запасы баллистической скорости

$$\Delta t_{\text{стр}} \geq \Delta t_{\text{стр}}^{\text{зад}} (\Delta V_{\text{хар}}^{\text{зад}}).$$

На втором этапе обосновывается баллистическая структура ОГ ДЗЗ, причем структурным элементом является кластер МКА. При этом исходными данными являются:

1) Пространственные характеристики поверхности Земли (широтного пояса или района наблюдения): $R_{\psi} \in [\psi_H, \psi_B]$;

2) Заданное время разрыва в наблюдении – $\Delta t_{\text{зад}}$ (заданная периодичность наблюдения обслуживаемой поверхности Земли):

$$\Delta t_{\max} \leq \Delta t_{\text{зад}}, \text{ где } \Delta t_{\max} = \max_{R_{\psi}} \Delta t_{\text{раз}}(\psi, \lambda);$$

3) Параметры орбит функционирования кластера МКА: $a \in [a_{\min}, a_{\max}]$, $T_{\text{эф}}/T_{\Omega} = p/q$, $i \in i_{\text{дон}}$ – диапазон наклонений орбиты кластера МКА;

С учетом значительного числа ограничений и требований, как к условиям функционирования кластера МКА, так и к требованиям потребителя, которые, как показывает анализ, являются противоречивыми, необходимо сформировать систему показателей эффективности и свести задачу к оптимизационной многокритериальной задаче.

Показатели эффективности, характеризующие выполнение кластерной ОГ МКА, целевой задачи также можно свести к двум типам. Первый тип показателей – это внутренние показатели эффективности, которые характеризуют выполнение МКА своей целевой задачи в составе кластера МКА, второй тип – это показатели, которые обеспечивают пространственно-временные характеристики кластерной ОГ МКА.

Общая характеристика и иерархия показателей эффективности функционирования кластерной ОГ МКА представлена в табл. 1 и на рис. 1.

Таким образом, постановка задачи обоснования многоуровневой баллистической структуры орбитальной группировки ДЗЗ с применением кластеров МКА может быть представлена в общем виде.

Определить: Баллистическую структуру кластеров МКА O_N^* , которая на множестве допустимых баллистических структур $O_N^{\text{дон}}$, с учетом заданных пространственно-временных требований, точностных характеристик и ограничений, обеспечит минимум числа кластеров МКА в системе N_{\min}

$$J_1 = N_{\min} = N(O_N^*);$$

$$N(O_N^*) = \operatorname{argmin}_{O_N \subset O_N^{\text{дон}}} \{N[O_N(O_k, m, n)]\};$$

$$O_N^{\text{дон}} = \{O_N(O_k, m, n) / \frac{T_{\text{эф.}}}{T_{\Omega}}\}, \quad (1)$$

$$i, \varphi_3(r), \Delta t_{\max} \leq \Delta t_{\text{зад}}, R_{\psi}\},$$

где O_k – баллистическая структура кластера МКА, $j = 1, 2, \dots, m$; $i = 1, 2, \dots, n$; m – число кластеров МКА во фронтальной группе, n – число фронтальных групп.

Таблица 1. Общая характеристика показателей результативности функционирования ОГ ДЗЗ с применением кластера МКА

Виды показателей	Функционал	Физический смысл	Решаемые задачи
Основные	$J_1(O_N) = N_{\min}$	Минимальное количество кластеров МКА	Баллистическое обоснование кластерной ОГ МКА
	$J_2(O_N) = \min \Delta t_{\max}$	Минимальное время наибольшего разрыва наблюдения заданных стратегических (операционных) направлений	Наращивание, перенацеливание, совместное применение ОГ МКА
Внутренние	$J_4(O_k) \rightarrow \max$	Максимальное время функционирования с требуемыми точностными характеристиками наблюдения	Обеспечение точностных требований и характеристик наблюдения потребителя
	$J_3(O_k) < \Delta V_{\text{хар}}^{\text{зад}}$	Баллистическая структура кластера МКА, обеспечивающая требуемое значение структурной устойчивости кластера МКА	Обеспечение структурно-устойчивых требований функционирования ОГ МКА

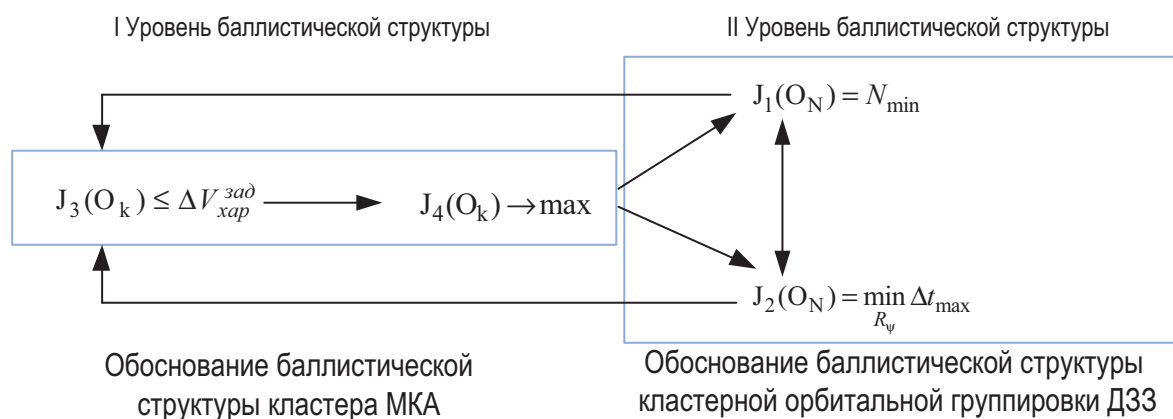


Рис. 1. Иерархия показателей эффективности функционирования кластерной ОГ ДЗЗ

МНОГОУРОВНЕВАЯ БАЛЛИСТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ ДЗЗ С ПРИМЕНЕНИЕМ КЛАСТЕРОВ МКА

Для обеспечения требуемой периодичности обзора заданной поверхности Земли необходимо расположить кластеры МКА определённым образом в пространстве, т.е. задать баллистическую структуру. Многоуровневая баллистическая структура кластерной ОГ ДЗЗ $N[O_N(O_k, m, n)]$ определяется изомаршрутным (изомаршрутным со сдвигом по долготе) способом построения [8, 9]. Расположение базовых

МКА (индекс «1») определяется изомаршрутным (изомаршрутным со сдвигом по долготе) способом построения с помощью следующих соотношений:

$$u_{1,j,i} = u_{1,j,i-1} - \Delta u,$$

$$\Omega_{1,j,i} = \Omega_{1,j-1,i} + \Delta \Omega \pm \Delta,$$

причём выполняется следующее равенство

$$u_{1,j,i} = u_{1,j-1,i},$$

$$\Omega_{1,j,i} = \Omega_{1,j-1,i} + \Delta \lambda^{\text{КЛ}}.$$

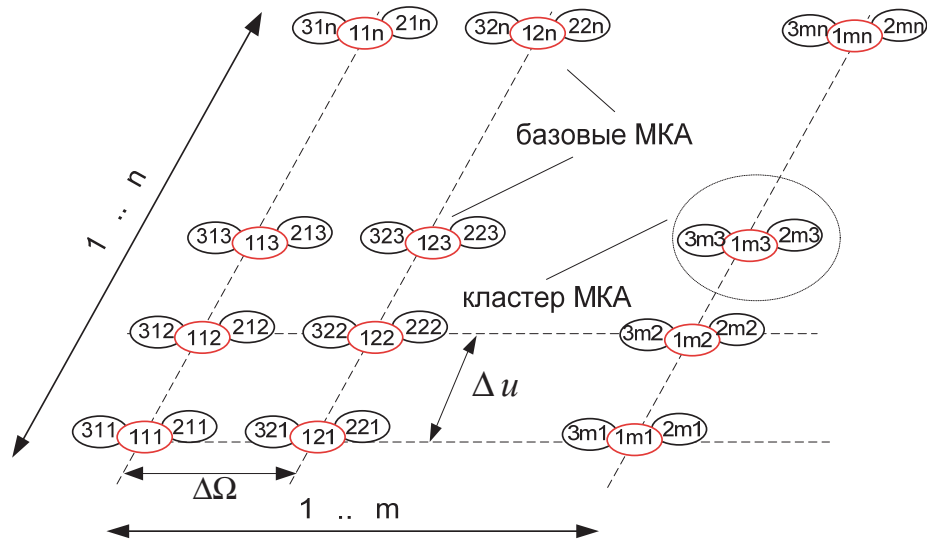


Рис. 2. Многоуровневая баллистическая структура кластерной ОГ ДЗЗ

Второй и третий МКА, образующие кластер МКА, задаются следующим образом:

$$u_{2,j,i} = u_{1,j,i} + u_2^*,$$

$$\Omega_{2,j,i} = \Omega_{1,j,i} + \Omega_2^*,$$

$$u_{3,j,i} = u_{1,j,i} + u_3^*,$$

$$\Omega_{3,j,i} = \Omega_{1,j,i} + \Omega_3^*,$$

где $\Delta\Omega = \Delta t_n \frac{2\pi}{T_{\text{эф}}}$, $\Delta u = \Delta t_n \frac{2\pi}{T_{\Omega}}$, $\Delta t_n = \frac{\Delta t_1}{n}$,

$j = 1, 2, \dots, m, i = 1, 2, \dots, n$.

ОСНОВНЫЕ ЧАСТИ КОНЦЕПЦИИ И ПРИНЦИПЫ ОБОСНОВАНИЯ МНОГОУРОВНЕВОЙ БАЛЛИСТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ КЛАСТЕРНОЙ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ ДЗЗ

Теория и практика разработки и создания сложных технических систем показывает, что решение поставленной проблемы может быть осуществлено на основе сочетания методов структурно-параметрического синтеза и оптимизации параметров, влияющих на возможности системы, её принципиальные особенности и отличия от известных (разработанных ранее) сложных информационных систем [13]. Сформулируем основные части концепции:

1) Анализ современного состояния обоснования баллистической структуры орбитальной группировки состоящей из кластеров МКА.

2) Оценивание возможностей по проектированию, развёртыванию, наращиванию, переадресованию ОГ КА, состоящей из кластеров

МКА, на основе современного состояния средств выведения, информационного обеспечения, а также уровня разработки сложных систем и технологий создания новых средств и систем наблюдения.

3) Анализ и тенденции развития тактико-технических требований и пространственно-временных характеристик, перспективных ОГ КА для произвольных районов земной поверхности.

4) Требования к способам применения кластерной орбитальной группировки ДЗЗ.

5) Обоснование приоритетных направлений, принципов создания и применения кластерных орбитальных группировок ДЗЗ.

В связи с этим в основу обоснования многоуровневой баллистической структуры кластерной орбитальной группировки ДЗЗ, как сложной технической системы, целесообразно положить следующие принципы.

Принцип системности заключается в том, что обоснование баллистической структуры кластерной ОГ МКА основывается на свойствах и характеристиках одиночных МКА, объединённых в подсистемы (кластеры МКА), которые должны обеспечивать совокупность внутренних требований и ограничений (в ряде случаев противоречивых), сохраняя целостность и связь в составе ОГ, и при этом обеспечивать её эффективное функционирование. В таком случае ОГ с применением кластеров МКА будет иметь многоуровневую баллистическую структуру.

Принцип оптимальности предполагает оптимизацию решений, обеспечивающих максимальной целевой эффект функционирования ОГ МКА, путём обоснования баллистических структур МКА при формировании кластера МКА, а также кластерной ОГ ДЗЗ.

Принцип устойчивости предусматривает сохранение возможностей эффективного решения поставленных перед кластерной ОГ МКА задач в условиях воздействия внешней среды на баллистическую структуру.

Принцип агрегирования основывается на декомпозиции задач обоснования баллистической структуры кластерной ОГ, при котором локальные целевые задачи и функции кластера МКА соответствуют целям и функциям всей ОГ ДЗЗ.

Принцип управляемости – возможность коррекции баллистической структуры ОГ ДЗЗ для поддержания структурной устойчивости, наращивания (перенацеливания в случае изменения районов наблюдения) при сохранении пространственно-временных и точностных характеристик [14].

Принцип развития требует, чтобы кластерная ОГ ДЗЗ разрабатывалась и функционировала как развивающаяся система, в которой предусмотрена возможность совершенствования, модернизации компонентов системы (наращивание и восполнение ОГ ДЗЗ) и связей между ними на основе принципов агрегирования и системности.

Предложенные принципы позволяют сформировать концептуальную модель обоснования многоуровневой баллистической структуры кластерной орбитальной группировки ДЗЗ.

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ОБОСНОВАНИЯ МНОГОУРОВНЕВОЙ БАЛЛИСТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ КЛАСТЕРНОЙ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ ДЗЗ

Для содержательного описания моделируемой сложной системы разработана концептуальная модель обоснования многоуровневой баллистической структуры кластерной орбитальной группировки наблюдения в условиях воздействия внешней среды. Модель отображает взаимосвязи основных элементов обоснования кластерной ОГ ДЗЗ и последовательность формирования частных задач.

Основная цель концептуальной модели – это охватить проблему выработки решения в целом, представить её основные элементы, которые необходимо сформировать для получения окончательного решения о стратегии проведения операции [15]. Тогда обобщенная модель проблемной ситуации представляется в виде системы: $\langle U, \Lambda, H, G, \Psi, W, K, P, \theta \rangle$.

В соответствии с информацией о цели операции, лицо, принимающее решение (ЛПР), последовательно формирует множества U (множество стратегий) и Λ (множество определенных факторов) на основе информации θ_u и θ_Λ , опираясь на подмодели P_u , P_Λ модели предпочтений P (рис. 3).

Аналогично на основе подмоделей предпочтений P_G и P_Y с учётом информации θ_H об имеющихся средствах построения моделей H выбираются характеристики Y (множество исходов операции) исхода G (характеристики операции) и устанавливается вид соответствия $H : U \times \Lambda \rightarrow Y(G)$, а также формируется величина требуемого результата операции Y^{TP} . Далее по информации Y , Y^{TP} с учетом предпочтений P_W о виде показателя эффективности устанавливается один из возможных видов метрики $P(Y, Y^{TP})$ и формируется модель Ψ «результат – показатель». Одновременно формируется критерий K по информации и θ_{A_0} подмодели предпочтения P_K , которая может задавать критерий в форме решающего правила.

На основе суждения о степени достижения цели операции либо осуществляется выбор лучшей альтернативы из множества $u \in U$, либо осуществляется возврат и коррекция элементов модели проблемной ситуации.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ОБОСНОВАНИЯ МНОГОУРОВНЕВОЙ БАЛЛИСТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ КЛАСТЕРНОЙ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Рассмотрим пример обоснования многоуровневой баллистической структуры кластерной орбитальной группировки дистанционного зондирования Земли. В таблице 2 приведены оптимальные баллистические структуры кластера МКА для трёх вариантов квазисинхронных орбит: $T_{\text{эф.}}/T_\Omega = 79/6$, $T_{\text{эф.}}/T_\Omega = 93/7$, $T_{\text{эф.}}/T_\Omega = 66/5$. Из таблицы 2 видно, что параметры орбит МКА незначительно отличаются как по геометрии орбиты, так и по положению в пространстве, что позволяет с одной стороны обеспечить требования функционирования бортовой аппаратуры МКА, с другой стороны удовлетворить требования по структурной устойчивости.

В таблице 3 приведены характеристики обзора ОГ ДЗЗ для заданной периодичности наблюдения обслуживаемой поверхности Земли (широтного пояса), т.е. $R_{\psi}[-88^\circ, 88^\circ]$.

В таблице 4 представлена оптимальная многоуровневая баллистическая структура ОГ ДЗЗ для случая, когда требуемая периодичность наблюдения $\Delta t_{\text{зад}} = 1,5$ часа.

Таким образом, используя результаты, представленные в табл. 4, определяют оптимальную баллистическую структуру ОГ ДЗЗ – O_N ($N = 14, O_k, m = 2, n = 7$), а используя результаты, представленные в табл. 2 – баллистическую структуру каждого кластера МКА (O_k) в составе ОГ ДЗЗ.

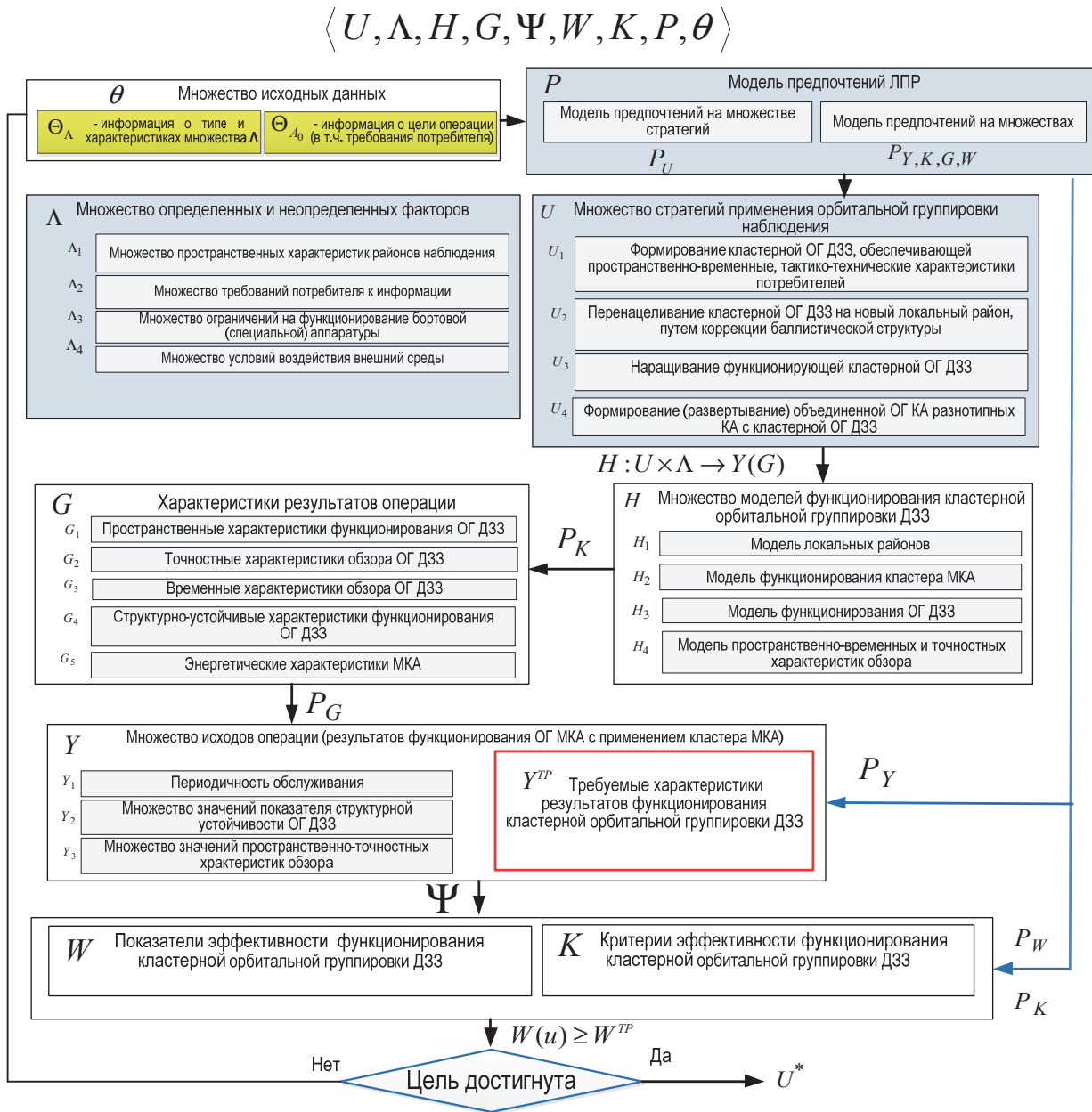


Рис. 3. Концептуальная модель обоснования многоуровневой баллистической структуры кластерной орбитальной группировки ДЗЗ

Таблица 2. Оптимальные баллистических структуры кластера МКА

Номер баллистической структуры	$T_{эф.}/T_\Omega$	номер КА	а, км	е	i , град	ω , град	u , град	Ω , град
5	79/6	1	7532.415	0.002	62.792	270	0	0
		2	7532.415	0.004	62.792	270	1.43	0.07
		3	7532.415	0.006	62.793	270	0.501	1.184
12	93/7	1	7485.366	0.004	75.503	270	0	0
		2	7485.366	0.004	75.503	270	1.23	0.07
		3	7485.366	0.006	75.504	270	0.401	1.284
16	66/5	1	7518.745	0.003	62.0	270	0	0
		2	7518.745	0.004	62.01	270	1.33	0.1
		3	7518.745	0.006	62.02	270	0.401	1.184

Таблица 3. Оптимальные баллистические структуры кластера МКА

N, количество кластеров МКА	ΔT_{\max} , час		
	$T_{\text{эф.}}/T_{\Omega} = 79/6,$	$T_{\text{эф.}}/T_{\Omega} = 93/7,$	$T_{\text{эф.}}/T_{\Omega} = 66/5$
17	1.28	1.27	1.28
16	1.36	1.35	1.36
15	1.45	1.44	1.45
14	1.53	1.51	1.52
13	1.68	1.66	1.67
12	1.82	1.80	1.81
11	2.31	2.29	2.31
10	2.54	2.52	2.54
9	2.83	2.80	2.82
8	3.18	3.15	3.17
7	3.64	3.59	3.63
6	4.24	4.20	4.23
5	5.09	5.04	5.08
4	6.36	6.31	6.35
3	16.36	16.21	16.32
2	23.63	23.42	23.57

Таблица 4. Оптимальная баллистическая структура ОГ ДЗЗ

Номер кластера МКА	u_j , град	Ω_j , град
1	0	0
2	51.428	19.29
3	102.857	38.591
4	154.285	57.88
5	205.714	77.183
6	257.142	96.479
7	308.571	115.74
8	0.03	135.07
9	51.428	154.366
10	102.857	173.66
11	154.285	192.95
12	205.714	212.253
13	257.142	231.549
14	308.571	250.84

После обоснования многоуровневой баллистической структуры кластерной орбитальной группировки дистанционного зондирования Земли, которая обеспечивает все требования потребителя, моделируются свойства баллистических структур при наращивании или перенацеливании на новый район и совместное применение с уже функционирующими орбитальными группировками. Полученные свойства баллистических структур являются основанием для принятия оптимальной стратегии достижения цели операции ЛПР.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предложенные принципы обоснования многоуровневой баллистической структуры кластерной орбитальной группировки ДЗЗ направлены на обеспечение эффективно функционирующей системы и определяют совокупность требований и ограничений, а также последовательность их удовлетворения на каждом этапе обоснования. Сформированная концептуальная модель позволяет на формальном уровне обосновать не только многоуровневую

баллистическую структуру кластерной орбитальной группировки ДЗЗ, но и определить перечень и последовательность решения частных задач, требующих решения при выборе оптимальной стратегии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Макриденко Л.А., Минаев И.В., Потюпкин А.Ю.* Концептуальные особенности повышения целевой эффективности малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2014. Т. 141, № 4. С. 17–22.
2. *Потюпкин А.Ю., Данилин Н.С., Селиванов А.С.* Кластеры малоразмерных космических аппаратов как новый тип космических объектов // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2017. Т. 4. Вып. 4. С. 45–56. DOI 10.17238/issn2409-0239.2017.4.45.
3. *Клименко Н.Н.* Современные низкоорбитальные космические аппараты для геолокации и идентификации источников радиоизлучения // Воздушно-космическая сфера. 2018. № 2(95). DOI:10.30981/2587-7992-2018-95-2-48-57
4. *Маршалов К.А.* Основные направления развития космических оптико-электронных средств вооружённых сил США // Зарубежное военное обозрение. 2015. № 12. С. 80–82.
5. *Болсуновский М.А.* Данные дистанционного зондирования Земли высокого разрешения. Ближайшие перспективы // Геопрофи. 2006. № 2. С. 13–15.
6. *Горелов В.А., Лукашевич Е.Л., Стрельцов В.А.* Развитие космических средств ДЗЗ // Новости космонавтики. 2004. № 6(229). С.34–52.
7. *Бакланов А.И.* Анализ состояния и тенденции развития систем наблюдения высокого и сверхвысокого разрешения // Вестник СГАУ. 2010 № 2. С.80–91.
8. Баллистические основы проектирования ракет-носителей и спутниковых систем / *Аверкиев Н.Ф., Власов С.А., Кульвиц А.В. и др.* – СПб.: ВКА им. А.Ф.Можайского, 2017. 302 с.
9. *Разумный Ю. Н.* Введение в теорию оптимального проектирования спутниковых систем периодического обзора // Труды МАИ. 2009. № 34. С. 27 – 44.
10. *Саульский В.К.* Векторный метод синтеза орбит и структуры систем спутников для многополосного периодического обзора Земли // *Космические исследования*. 2016. Т.54. №4. С. 334–346.
11. *Машиностроение. Энциклопедия.* Ред совет: К.В. Фролов (пред.) и др. М.: Машиностроение. Ракетно-космическая техника. Т. IV-22 / *А.П. Аджан, Э.Л. Аким, О.М. Алифанов и др.*; под ред. В.П. Легостаева. В 2 кн. Кн. 1.2012.
12. *Улыбышев С.Ю., Лысенко А.А.* Проектирование спутниковых систем оперативного глобального мониторинга с суточной кратностью повторения траектории полета // *Космические исследования*. 2019. Т.57. № 3. С. 229–238.
13. Надёжность и эффективность в технике: Справочник в 10-ти т. / Ред. совет: В.С. Авдеевский (пред.) и др. – Москва: Машиностроение, 1988. Т.3. Эффективность технических систем / Под общ. ред. В.Ф. Уткина, Ю.В. Крючкова. 328 с.
14. *Волков В.Ф., Кульвиц А.В., Коваленко А.Ю., Салухов В.И.* // Прикладные аспекты оптимизации орбитальных структур спутниковых систем за счет уточнения параметров орбитального движения // *Труды СПИИРАН*. 2020. № 4 (35). С. 719–745. DOI: 10.15622/sp.2020.19.4.1
15. *Куренков В.И.* Методы исследования эффективности ракетно-космических систем. Методические вопросы [Электронный ресурс] : Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). – Самара, 2012. 201 с.

MULTILEVEL BALLISTIC STRUCTURE OF THE CLUSTER ORBITAL GROUPING OF REMOTE SENSING OF THE EARTH

© 2021 N.F. Averkiev, A.V. Kulvits, T.A. Zhitnikov

Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky, St. Petersburg, Russia

The article was received by the editorial office 26. 07. 2021

The features of the application and justification of the orbital groupings of remote sensing of the Earth, consisting of clusters of small spacecraft, are considered. A review and analysis of the ballistic justification, construction and features of the use of orbital groups of remote sensing of the Earth is carried out. Modern approaches to the ballistic design of periodic review orbital groupings are considered. The article considers a new integrated approach to the ballistic construction of promising cluster orbital groupings, which will allow providing the spatio-temporal and accuracy characteristics required by the consumer, due to the optimal multi-level ballistic structure. The fundamental principles of constructing a cluster orbital grouping with a multi-level ballistic structure are formulated. The stages of the formation of a multi-level ballistic structure are considered in detail, from the standpoint of a systematic approach. A mathematical formulation of the problem and a hierarchy of performance indicators are proposed. For a meaningful description of the simulated system, a conceptual model for substantiating multi-level ballistic structures of a cluster orbital grouping of remote sensing of the Earth under the influence of the external environment has been developed. The model shows the interrelationships of the main elements of the substantiation of the ballistic structure of the cluster orbital grouping of remote sensing of the Earth and the sequence of formation of particular problems. The results of modeling both the ballistic structure of the cluster and the ballistic structure of the Earth remote sensing orbital grouping, which provides a set of tactical and technical, spatio-temporal and structurally stable consumer requirements, are presented. The effect of the application of the developed conceptual model will be the optimal strategy for the use of cluster orbital groupings of remote sensing of the Earth, which will provide the required value of its effectiveness under the influence of the external environment.

Keywords: orbital grouping of remote sensing of the Earth, small spacecraft, multi-level ballistic structure, conceptual model.

DOI: 10.37313/1990-5378-2021-23-4-77-85

Nikolay Averkiev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Navigation and Ballistic Support for the Use of Space Assets and the Theory of Flight of Aircraft. E-mail: averkievnf@yandex.ru
Alexey Kulvits, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Doctoral Student of the Department of Navigation

and Ballistic Support for the Use of Space Assets and the Theory of Flight of Aircraft. E-mail: kulvitz33@mail.ru
Timofey Zhitnikov, Candidate of Technical Sciences, Head of Laboratory 1 of the Department of the Military Institute (Research). E-mail: 0606848@rambler.ru