

© Кукушкин С.С., Потюпкин А.Ю., Николаев Б.П.

ПРИКЛАДНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ЦЕЛЕВОГО ПРИМЕНЕНИЯ КЛАСТЕРОВ МАЛОГАБАРИТНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Рассматривается задача целевого применения кластеров малогабаритных КА. Особенностью задачи является необходимость учета системных факторов, обусловленных спецификой построения орбитальных группировок кластерного типа. Предложен ряд подходов, позволяющих решать задачи выбора структуры кластера при выполнении целевой задачи, построения алгоритма его функционирования и организации технологического цикла управления.

Перспектива развития космических технологий, разработанная в настоящее время различными организациями, является неопределенной по многим причинам. Во-первых, отсутствует методологическое обоснование основных направлений их развития [1]. Во-вторых, о новых технологиях много говорят, но мало делается для их практической реализации. Если и формулируется подобная задача в НИРах и ОКРах, то это делается в основном только для того, чтобы обосновать их открытие. Потом оказывается, что в выполненной и успешно сданной работе есть все за исключением того, ради чего она открывалась. Чаще всего это происходит из-за того, что нет достаточного задела под заявленные цели.

Поэтому в сложившихся условиях становится актуальным не только создание КА, но и обеспечение рациональной организации их функционирования. В данной статье предлагается одно из возможных решений второй задачи, связанной с разработкой методологических основ создания перспективных КА и их группировок. Она предполагает разработку алгоритма функционирования кластера малогабаритных космических аппаратов (МГКА). Для ее конкретизации целесообразно воспользоваться известными наработками в области построения алгоритмов функционирования сложных высокодинамичных КА дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). В качестве исходных предпосылок к проведению исследований необходимо напомнить, что для выполнения задач управления существует инструментарий в виде управляющих программ БКУ или так называемых «функ-

циональных режимов», организующих взаимосвязанное включение необходимых для выполнения режимов элементов бортовой аппаратуры, сбор и «упаковку» контрольной информации о выполнении функциональной задачи. Каждый из режимов в свою очередь состоит из ряда алгоритмов и отдельных операций, протекающих на борту КА.

Существующая технология предусматривает для КА зондирования земной поверхности следующие режимы функционирования [6]:

- режим первоначальной ориентации;
- режим работы аппаратуры зондирования;
- режим совершения маневра;
- режим управления при обнаружении неисправностей (ориентированный дежурный полет; неориентированный полет);
- режим автономных навигационных измерений;
- режим доставки информации зондирования на Землю.

Таким образом, весь процесс функционирования КА ДЗЗ может быть представлен последовательностью указанных режимов. При этом объекты постоянно находятся в одном из предусмотренных для них режимов функционирования.

Исходя из этого, примем следующую вербальную формулировку научной задачи, которую необходимо решить. Обобщенный алгоритм функционирования кластера A^* представляет собой упорядоченный кортеж режимов, частных алгоритмов и отдельных операций $A^* = \{R_i\}$, где i – номер режима. Далее, учитывая двухуровневую организацию управления кластером МГКА, можно сделать вывод, что для организации функционирования кластера МГКА целесообразно использовать два вида режимов: системные $\{R_i^c\}$, как режимы более высокого уровня, и индивидуальные $\{R_i^H\}$. При этом режимы раз-

Кукушкин Сергей Сергеевич – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник 4 ЦНИИ Минобороны России; Потюпкин Александр Юрьевич – доктор технических наук, доцент, начальник кафедры ВА РВСН имени Петра Великого; Николаев Борис Павлович – адъюнкт ВА РВСН имени Петра Великого.

ных уровней могут выполняться как одновременно, так и по отдельности. Следует отметить, что индивидуальные режимы по своему содержанию будут в основном сходны с известными. Отличаться они будут лишь спецификой информационно-управляющего взаимодействия «лидера» и «ведомого» МГКА. В связи с этим следует обратить внимание на содержание новых системных режимов. Анализ задач, выполняемых кластером МГКА, показал, что необходимо ввести следующие новые режимы функционирования:

- режим первоначальной ориентации и формирования исходной структуры кластера МГКА;

- дежурный режим;
- режим формирования рабочей структуры кластера МГКА;
- режим автономного функционирования элементов МГКА.

Рассмотрим их содержание. Режим первоначальной ориентации и формирования исходной структуры кластера МГКА имеет целью формирование исходной структуры кластера МГКА после вывода его на орбиту (рис.1).

Основная задача дежурного режима будет заключаться в поддержании готовности кластера выполнить целевую задачу. Этапы работы дежурного режима пред-

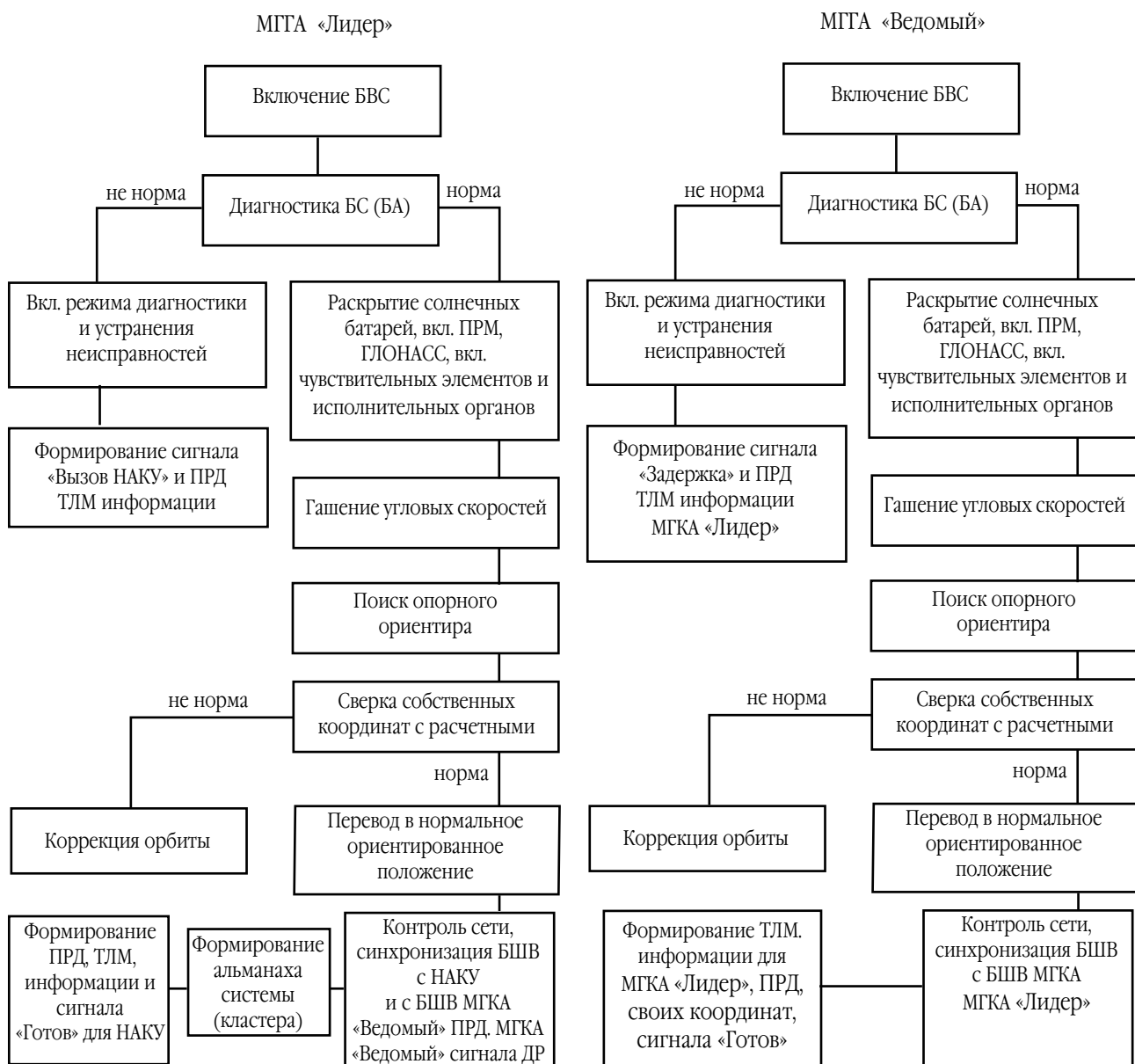


Рис.1. Режим первоначальной ориентации и формирования исходной структуры кластера МГКА



Рис.2. Дежурный режим функционирования кластера МГКА

ставлены на рис. 2.

Режим формирования рабочей структуры кластера МГКА является ключевым, так как при выполнении этого режима формируется рабочая группа из элементов системы (с учетом технического состояния и конструктивных особенностей МГКА), способных выполнить задачу мониторинга с требуемыми показателями (рис.3). Автономный режим функционирования элементов кластера МГКА предусматривается в следующих случаях:

- нарушения целостности системы как окончания периода прямой видимости между элементами кластера;
- выхода из строя МГКА-«лидера». Наличие этого режима позволит в первом случае продлить время существования (т.е. увеличить продолжительность прямой видимости) кластера МГКА (предположение требует дополнительных исследований) и самостоятельно выполнять целевую задачу элементами кластера по классической

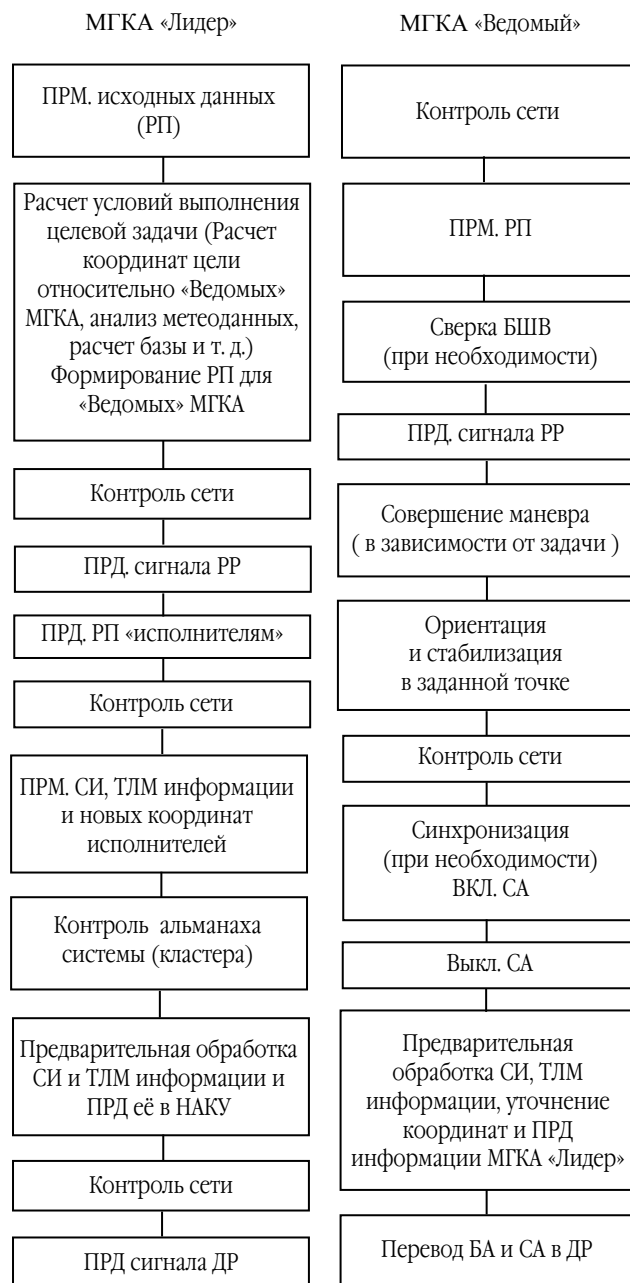


Рис. 3. Режим формирования рабочей структуры кластера МГКА

схеме. Во втором случае позволит повысить надежность функционирования кластера МГКА при технической реализации возможности передачи «полномочий лидера» между элементами кластера.

Таким образом, общий алгоритм функционирования кластера МГКА будет представлять собой упорядоченную последовательность указанных системных и индивидуальных режимов $A^* = \{R_i^c, R_i^f\}$, выполняемых как «лидером» кластера, так и «ведомыми» МГКА.

В результате решения задачи на первом этапе из исходной структуры кластера МГКА будет выделена рабочая структура, то есть, определены конкретные МГКА, предназначенные для выполнения целевой задачи. На

втором этапе разработан алгоритм функционирования кластера МГКА как совокупность определённых режимов работы его элементов, и на третьем этапе необходимо обеспечить устойчивость кластера как системы, то есть определить содержание технологического цикла управления (ТЦУ), под которым будем понимать совокупность решения задач управления КА, обеспечивающую реализацию его целевого предназначения.

Рассмотрим структуру и содержание типового ТЦУ при управлении космическим объектом. Структура ТЦУ включает в себя последовательное решение задач командно-программного (КПО), информационно-телеметрического (ИТО), навигационно-баллистического (НБО) и частотно-временного обеспечения (ЧВО). Реализация ТЦУ предусматривает выполнение следующих операций управления: закладки рабочих и временных программ (РП и ВП) на КА; проведения измерений текущих навигационных параметров (ИТНП) КА средствами наземного комплекса управления (НКУ); съёма информации обобщенного контроля (ИОК) с КА, передаваемой по радиолинии командно-измерительных систем (КИС); проведения сверки бортовой и единой шкалы времени; получения телеметрической информации (ТМИ) и других операций, определяемых спецификой управляемого объекта. При этом часть задач КПО, связанная с планированием работы орбитальных средств, осуществляется заблаговременно в пунктах управления НКУ. Следует отметить, что задачи КПО, ИТО, НБО и ЧВО являются достаточно хорошо отработанными при управлении одиночными объектами, а в ряде случаев, например, для системы ГЛОНАСС, и для группового объекта.

В случае управления кластером МГКА наличие дополнительного управляющего звена позволяет организовать двухуровневую систему управления, состоящую из 1-го уровня: Земля – кластер (МГКА – «лидер») и 2-го внутрикластерного уровня: «лидер»– «ведомые». При этом и структура ТЦУ также окажется двухуровневой.

Представляется, что ТЦУ 1-го уровня должен быть построен на основе перспективных технологий управления КА [6], перечень которых приведен в табл. 1.

Конкретное содержание ТЦУ 2-го уровня будет определяться особенностями кластера МГКА как объекта управления, среди которых можно выделить следующие:

- необходимость пространственной и временной координации действий МГКА в кластере для реализации прикладных эффектов;
- наличие в составе кластера дополнительного управляющего звена – МГКА – «лидера»;
- кластер МГКА представляет собой локальную

телекоммуникационную систему, оснащенную оконечными устройствами и сетью БЦВМ, изменяющую своё местоположение во времени и пространстве.

Это подразумевает появление новых задач видов обеспечения (табл. 2) и их решение.

В частности, возникают задачи поддержания целостности системы: управление конфигурацией; прогнозирование баллистического существования кластера как единого целого; оценка состояния кластера в целом; поддержание групповой шкалы времени кластера.

Следует отметить, что современная практика управления многоспутниковыми группировками позволяет предложить и эффективный способ представления системных данных – это формирование «альманаха системы».

Примерный состав альманаха кластера МГКА

1. Календарный номер суток внутри периода, начиная с такого-то года.
2. Литер несущей частоты.
3. Условный номер МГКА в кластере.
4. Условный номер типа МГКА в кластере.
5. Поправка к среднему значению наклона орбиты МГКА, рад.
6. Поправка к среднему значению драконического периода обращения МГКА, с.
7. Аргумент перигея орбиты МГКА, рад.
8. Эксцентриситет орбиты МГКА.
9. Грубое значение сдвига шкалы времени МГКА относительно шкалы времени системы.
10. Скорость изменения драконического периода обращения МГКА.
11. Прогнозная оценка времени баллистического существования кластера.
12. Количество технически исправных МГКА в кластере на текущий момент времени, усл. номера.
13. Исходные данные расхода ресурса по типам МГКА в соответствии с режимами функционирования.
14. Таблица маршрутизации сообщений.
15. Таблица вариантов передачи функций «лидера».

Наряду с общесистемными задачами поддержания целостности кластера требуется решение ряда проблемно-ориентированных задач обеспечения реализации прикладных эффектов. Так, к примеру, реализация эффекта стереосъёмки предполагает решение следующих задач: назначение МГКА для съёмки, предполагающей определение рабочей структуры; расчет базы для получения высокого качества изображения; определение требований по точности движения ЦМ каждого

Таблица 1

Эффект от реализации новых технологий управления действующими и перспективными КА

Целевая направленность новой технологии	Схемотехнические решения и технологические операции	Ожидаемый эффект от внедрения новой технологии
Автономное (без участия НКУ) поддержание работоспособности КА на заданном уровне	Автоматическая диагностика состояния и восстановление работоспособности систем КА с помощью БКУ	Увеличение срока автономного функционирования (АФ) КА до 30 сут. Сокращение числа сеансов телеконтроля и решаемых задач ИТО в НКУ в 5... 10 раз
Автономное поддержание заданных параметров орбиты КА и обеспечение сверки и коррекции бортовой шкалы времени (БШВ)	Применение на борту КА НАП КНС ГЛОНАСС/GPS. Комплексирование НАП с БКУ. Автономное решение в БКУ задач НБО	Увеличение срока АФ КА до 30 сут. Повышение точности НБО в 3... 6 раз. Сокращение числа сеансов ИТНП КА, сверки и коррекции БШВ в 10... 30 раз
Обеспечение непрерывности и глобальности управления КА и контроля запусков средств выведения при ограниченном числе КИПов	Использование ретрансляционных режимов обмена информацией НКУ с КА через СР, включенные в контур управления. Передача через СР ТМИ с РН и РБ	Сокращение числа КИПов в НКУ и измерительных пунктов в измерительном комплексе космодрома до двух (с учетом резерва). Повышение глобальности управления КА до единицы. Обеспечение практически реального масштаба времени управления КА
Повышение автономности решения целевых задач КА ДЗЗ	Использование координатного метода управления целевым применением КА ДЗЗ. Закладка с Земли РП в виде "координаты-операции". Автономное формирование в БКУ программ работы БС КА во время съемки	Сокращение частоты сеансов связи с КА и объемов передаваемой командно-программной информации в 5... 10 раз. Уменьшение числа КИПов в НКУ до 1... 2. Сокращение объема и времени проведения работ в ЦУПе по формированию РП целевого применения КА
Обеспечение оперативного контроля состояния КА в ЦУПе без привлечения средств НКУ на этапе штатной эксплуатации	Совмещение в одном радиоканале передачи целевой и контрольной информации с КА	Сокращение числа сеансов телеконтроля КА, проводимых наземными станциями НКУ на этапе штатной эксплуатации
Повышение автономности функционирования КА	Формирование на КА и передача в НКУ сигнала "Вызов НКУ" при возникновении на борту нештатной ситуации	Увеличение срока АФ КА. Сокращение числа сеансов телеконтроля и решаемых в НКУ задач ИТО в 5... 15 раз

МГКА, ориентации и синхронизации взаимной работы; контроль состояния каждого МГКА и линий связи между ними; выполнение съёмки; контроль работы специальной аппаратуры; передачи информации на МГКА – «лидер» и её обработки; контроль качества результата.

Таким образом, двухуровневая структура ТЦУ кластера МГКА будет включать в себя как традиционные для управления КА задачи КПО, НБО, ИТО и ЧВО, так и новые задачи, конкретное содержание которых требует дальнейшего исследования и определяется техническим

обликом кластера и составляющих его МГКА. Следует отметить, что представление кластера в виде сети ЭВМ, должно позволить использовать ряд наработок по управлению сетями на основе модели открытых систем.

Исходя из приведенного выше определения кластера МГКА дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), условием его существования является восприятие потребителем кластера как единого «виртуального» космического аппарата, выполняющего целевую задачу, т.е. наличие устойчивых связей между всеми элементами (МГКА),

Таблица 2

Задачи по видам обеспечения для реализации прикладных эффектов кластера МГКА

Виды обеспечения			
КПО	НБО	ИТО	ЧВО
Выдача исходных данных для формирования рабочей структуры. Управление конфигурацией системы. Решение задач маршрутизации передачи служебной и специальной информации. Формирование и поддержание альманаха системы.	Расчет и прогнозирование движения центра масс (ЦМ) каждого МГКА. Расчет и поддержание баз в установленных пределах. Прогнозирование баллистического существования кластера.	Контроль состояния и функционирования каждого элемента группировки. Контроль состояния линий связи. Оценка состояния кластера в целом. Оценка выполнения целевой задачи.	Синхронизация и поддержание групповой шкалы времени (ШВ) кластера. Синхронизация бортовой ШВ (БШВ) на всех элементах системы.

составляющими кластер. Другими словами, кластер МГКА ДЗЗ будет существовать до тех пор, пока не нарушатся связи между его элементами, и этот интервал времени будет зависеть от времени прямой видимости между элементами кластера МГКА ДЗЗ.

Проведенный анализ показывает, что на продолжительность прямой видимости между элементами кластера МГКА, ключевое влияние оказывает разность между высотами орбит МГКА: разность ΔH (рис. 4) должна составлять от десятков до сотен метров в зависимости от высоты орбиты. Расчет производится в соответствии с выражением [11]

$$T_{\text{дзз}} = \frac{\arccos \frac{R_c + h_2 \sin \gamma}{R_c + h_1} + \arccos \frac{R_c + h_2 \sin \gamma}{R_c + h_2} - \gamma}{\sqrt{\frac{\mu}{(R_3 + h_2)^3}} - \sqrt{\frac{\mu}{(R_3 + h_1)^3}}}, \quad (1)$$

где R_c – средний радиус Земли; $h_2 \sin \gamma$ – граница ионосферы; h_1 – высота орбиты МГКА1; h_2 – высота обиты МГКА2; γ – начальный угол расхождения между МГКА; μ – гравитационный параметр Земли.

Разность между высотами орбит МГКА необходимо учитывать при выборе средств выведения. Например, точность выведения для РКН «Стрела», в рассматриваемом диапазоне высот и наклонов составляет: по высоте не более 1%, по наклонению не более 0,05°.

Увеличение ΔH приводит к значительному уменьшению интервала времени прямой видимости между МГКА (рис. 5), но в то же время уменьшает интервал пропадания прямой видимости (рис. 6), который все же, остается достаточно большим для повторения интервала прямой видимости между МГКА (относительно срока существования

кластера МГКА) (рис. 7). При орбитальном полете элементов кластера без проведения коррекции орбиты наблюдается линейная зависимость времени существования кластера МГКА от изменения высоты полета (рис.8).

Для достижения прикладных эффектов, таких, как стереосъемка, комплексирования информации и передача «эстафеты», необходимо однотипные МГКА выводить на одну орбиту, причем также требуется рассчитывать и поддерживать «базу» и угол между соответствующими космическими аппаратами в заданных пределах.

Расчет «базы» между МГКА проводился с учетом зависимости [10]

$$\eta = \arccos \left[\frac{R_c \cos \chi}{R_c + h_1} \right] - \chi, \quad (2)$$

где η – угол для режима стереосъемки относительно центра Земли; χ – минимально допустимая высота; R_c – средний радиус Земли; h_1 – высота орбиты МГКА РЛН.

Для расчета «базы» между МГКА рассмотрим прямоугольный треугольник AOF (см. рис. 9) и получим следующее равенство:

$$AF = OF \cdot \sin \eta. \quad (3)$$

С учетом того, что $OF \neq R_3 + h_1$ окончательно для расчета «базы» между МГКА

$$AF = 2 \cdot (R_c + h_1) \cdot \sin \eta. \quad (4)$$

Аналогичным образом рассчитывается «база» для МГКА ОЭН.

В табл. 3 представлены результаты расчетов для проведения стереосъемки для варианта баллистического построения кластера МГКА, изображенного на рис. 4. Выполнение требований по поддержанию «базы» и угла между соответствующими МГКА в заданных пределах обеспечивается коррекцией орбит МГКА, выполняющих

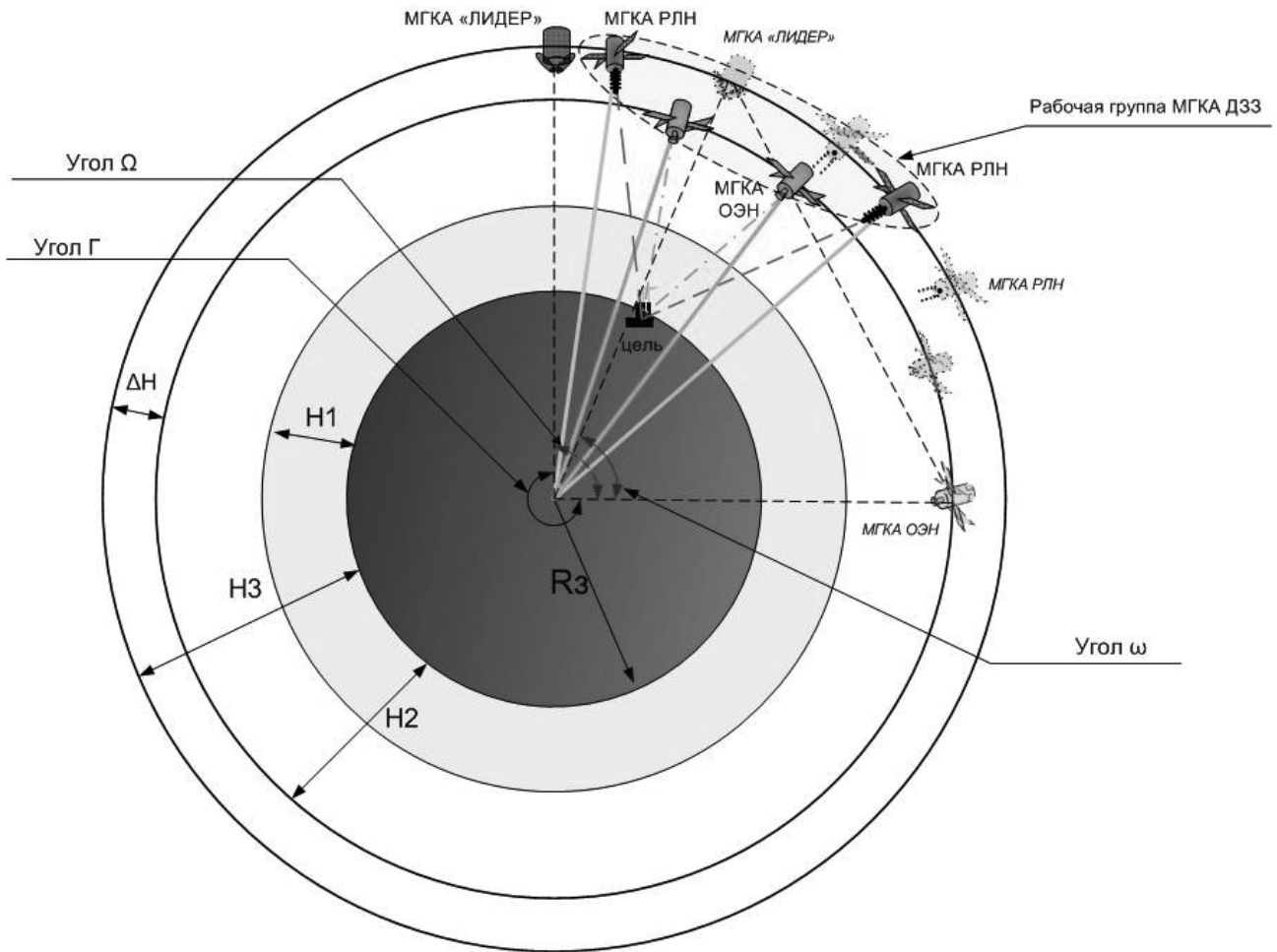


Рис.4. Вариант баллистического построения кластера МГКА (режим стереосъемки)



Рис. 5. Время прямой видимости между МГКА1 и МГКА2 при условии: $H1 = 200 \text{ км} - \text{const}$, изменения $\Delta H2 = 100 \text{ м}$



Рис. 6. Время прямой видимости между МГКА1 и МГКА2 при условии: $H_1 = 600 \text{ км} - \text{const}$, изменения $\Delta H_2 = 100 \text{ м}$

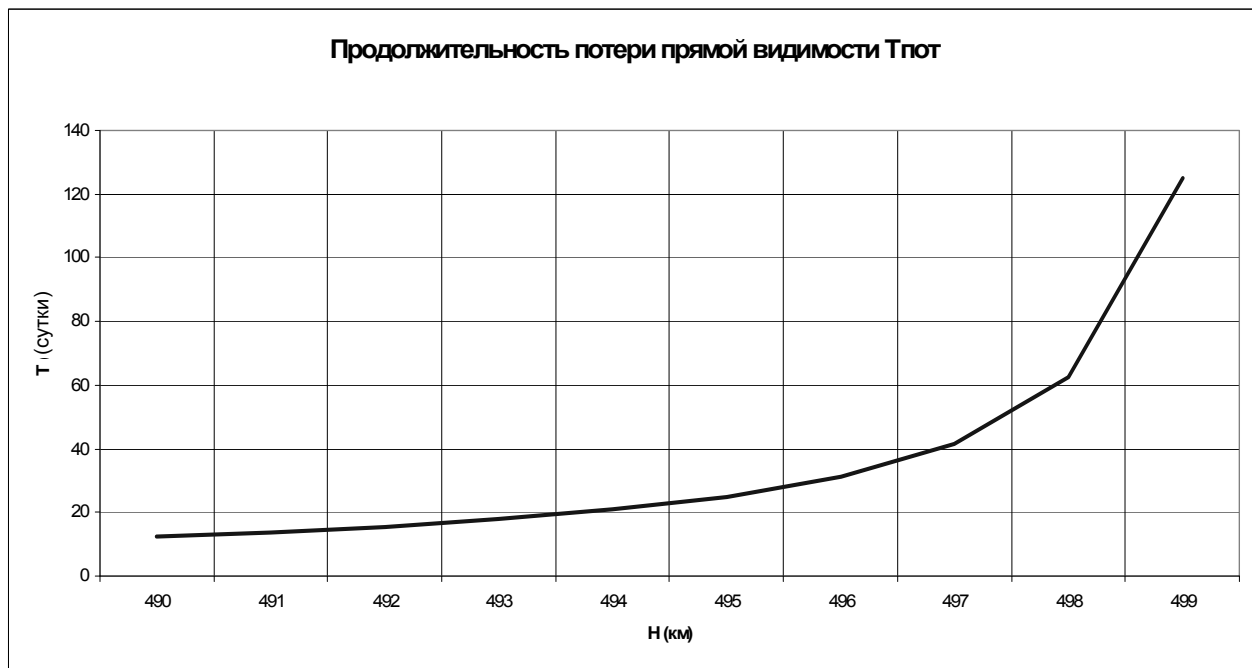


Рис.7. Зависимость продолжительности потери прямой видимости от высоты орбиты

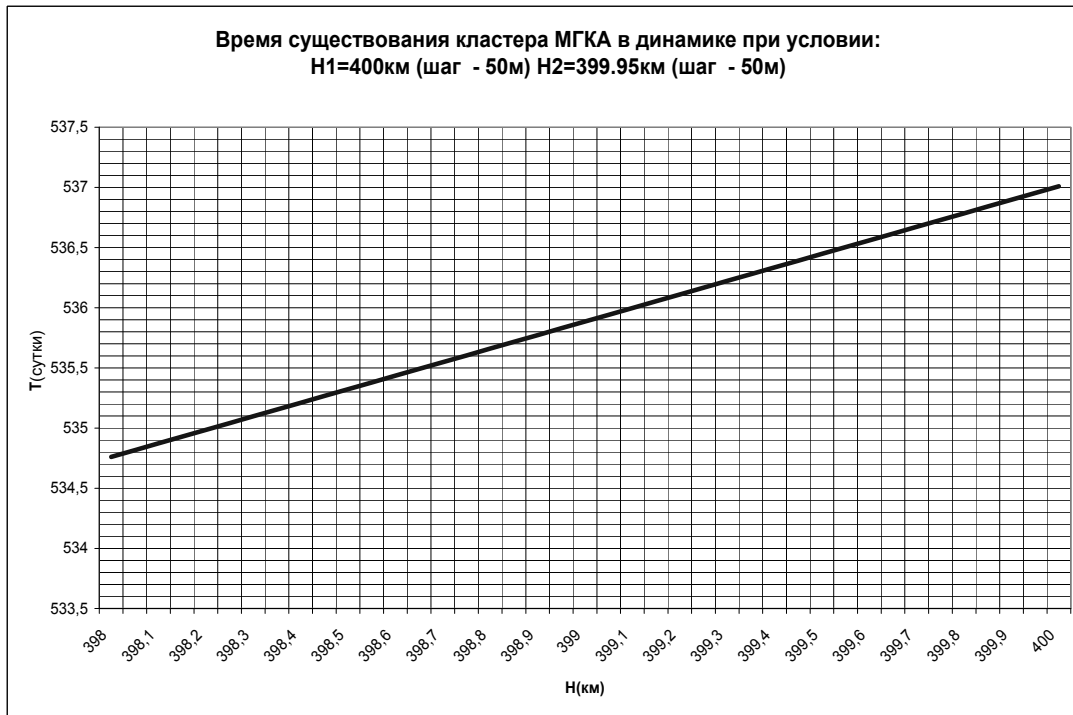


Рис.8. Время прямой видимости между МГКА1 и МГКА2 в условиях орбитального полета без коррекции орбиты

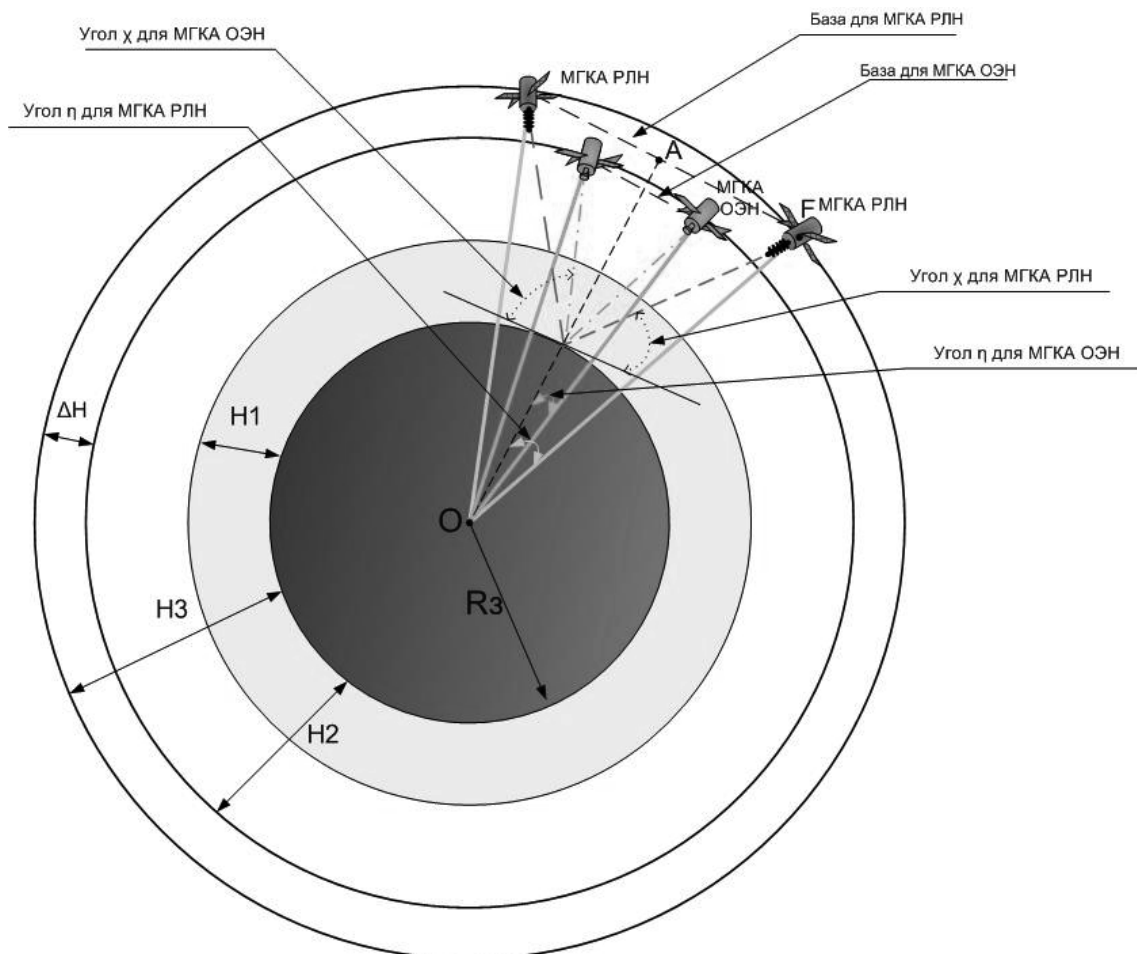


Рис. 9. Режим стереосъемки МГКА ДЗЗ

Таблица 3

Значения базы между МГКА ДЗЗ для проведения стереосъемки

Типы МГКА	Граница ионосферы, Н1	ΔН	Высота орбиты, Н2;Н3	Средний радиус Земли, R	Угол видимости, Щ	Предельный угол видимости, Д	Время существования кластера МГКА, T _{существов}	Угол потери видимости между МГКА, Г	Интервал потери видимости, T _{инт}	Угол ч	Угол з	База между МГКА, В
	(км)		(км)									
"Лидер"	120	50	450	6371	102,3	35,8	586,7	155,4	1230,47	---	---	---
РЛН			450							65	1,8	416,7
ОЭН			449,95							74	1,1	254,7

заданные режимы.

В табл.4 представлены расчеты периодичности коррекции, высоты обиты МГКА с шагом снижения вы-

соты орбиты на 100, 50 и 25м.

Приведенные выше результаты расчётов могут послужить основой для формирования и расчёта параме-

Таблица 4

Периодичность коррекции орбит

Высота орбиты Н,км	Шаг снижения Н,км	Периодичность коррекции орбиты t, час	Периодичность коррекции орбиты t, час
500	100	9,720131995	—
500	50	4,860065997	—
500	25	2,430032999	—
400	100	2,280950208	—
400	50	1,140475104	—
400	25	—	34,21425312
300	100	—	20,09131541
300	50	—	10,04565771
300	25	—	5,022828853

тров реальных ТЦУ кластеров МГКА.

Заключение

В статье определены основные направления организации функционирования кластеров МГКА, предназначенных, прежде всего, для решения задач ДЗЗ. Рассмотрены методы выбора рабочих структур для реализации новых качественных возможностей, представляемых кластерами МГКА для потребителей. Предложены подходы к построению алгоритма функционирования кластера на основе совокупности специализированных системных и индивидуальных режимов работы его

элементов. Особое внимание уделено разработке ТЦУ кластера как сложного иерархического объекта управления. Показаны новые задачи по видам обеспечения управления таким новым объектом, как кластер МГКА. Предложен примерный состав «альманаха кластера» как способа представления системных данных. Для реализации предложенных подходов в настоящее время существует достаточно много оснований: теоретическое обоснование и технологические заделы по созданию МГКА, отработанные технологии управления КА, необходимость скорейшего восстановления орбитальной группировки ДЗЗ требуемого состава.

Литература

1. Кукушкин С.С., Потюткин А.Ю., Николаев Б.П. Методологические основы создания малогабаритных космических аппаратов и управления многоспутниковыми группировками. М.: Двойные технологии, №2, 2008, с. 15-18.

2. Егошин Ю.И., Николаев Б.П., Макаренко Д.М., Потюпкин А.Ю. К вопросу кластерного построения многоспутниковых орбитальных группировок малогабаритных космических аппаратов. Статья. Материалы научно-технической конференции, посвященные 60-летию предприятия ФГУП «РНИИ КП». - М.: 2007.
3. Ермак С. Н. Комплексный подход к развитию высоких технологий в России. Доклад. Материалы конференции Четвертого Международного Форума «Высокие технологии XXI века». - М.: 2003.
4. Ермак С. Н., Стреж С. В., Трошин Е. В. Интеграция космических систем на основе создания единого информационного пространства. Доклад. Международная космическая конференция-2001 «Космос без оружия - арена мирного сотрудничества в XXI веке» 11-14 апреля 2001г., Москва. Тезисы докладов. - М.: Изд-во МАИ, 2001.
5. Квасников А. Ю., Ермак С. Н., Стреж С. В., Трошин Е. В. Инновационный подход к созданию космических систем на основе нанотехнологий. // Радиоэлектроника и управление. № 7-9, 2002.
6. Макаренко Д.М., Потюпкин А.Ю. Системный анализ космических аппаратов. – М.: ВА РВСН, 2007.
7. Макаренко Д.М., Потюпкин А.Ю. Прикладные эффекты кластерного построения группировки маломассогабаритных космических аппаратов. Тезисы доклада. Труды VIII международного форума «Высокие технологии XXI века». – М.: 2007.
8. Николаев Б.П. Вариант содержания ТЦУ кластера МГКА ДЗЗ. Статья. «Научно-практические аспекты совершенствования управления КА и информационного обеспечения запусков КА» 21 ноября 2007г., ГИЦИУ КС. Материалы научно-технической конференции. – М.: 2008.
9. Брошюра. Научно-производственное объединение машиностроения. Космический ракетный комплекс «Стрела». Справочник пользователя. – 2-я редакция. – М.: 1999.
10. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС/ Под ред. В.Н. Харисова, А.И. Перова, В.А. Болдина. – 2-е изд. исправ. – М.: ИПРЖР, 1999.
11. Полет космических аппаратов: Примеры и задачи: Справочник/Ю.Ф. Авдеев, А.И. Беляков, А.В. Брыков и др./ Под общ. ред. Г.С. Титова. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1990.
12. Управление космическими аппаратами зондирования Земли. Компьютерные технологии/ Под ред. Д.И.Козлова. – М.: Машиностроение, 1998.

Материал поступил в редакцию 12. 04. 2008г.