

Синтез структуры органа управления полетом космических группировок

Матюшин М.М., Луценко Ю.С.*, Гершман К.Э.

*Центральный научно исследовательский институт машиностроения, ЦНИИмаш,
ул. Пионерская, 4, Королев, Московская область, 141070, Россия*

**e-mail: lusenko@mcc.rsa.ru*

Аннотация

В статье рассмотрены вопросы построения системы управления полетом космических аппаратов и группировок космических аппаратов. Главное внимание уделено вопросам качественного анализа органов управления полетом космическими группировками и синтеза их оптимальной структуры. Приведены возможные варианты структуры системы управления полетом космическими группировками, а также оптимальная структура органа управления полетом.

Ключевые слова: система управления, орган управления полетом космического аппарата и космической группировки, структура системы расчета параметров управления полетом, центр управления полетом, средства управления полетом.

В управлении полетом и в целом функционированием космических аппаратов (КА) участвуют специалисты различного профиля и привлекаются значительные

ресурсы, организация работы которых определяет эффективность управления. Наиболее важные ресурсы - материальные и временные, а показатели эффективности управления – стоимость, оперативность, надежность управления различных космических группировок.

Система управления (СУ) функционированием КА включает системы управления целевой аппаратурой и управления полетом КА, являясь при этом частью более общей системы управления космическим аппаратом (орбитальной, космической группировок). Последняя в свою очередь включает органы управления, средства управления и объект управления - КА [1,2,9-14].

Система управления космическим аппаратом может быть одноконтурной либо многоконтурной. В одноконтурной системе управления КА самостоятельно решает задачи синтеза управления в зависимости от заранее заданных целей миссии и условий функционирования (степень работоспособности бортовой аппаратуры, внешняя среда), что достигается путем установки на его борту автономной системы управления. К таким КА можно (в достаточно условной мере) отнести КА дальних космических миссий. Для КА, функционирующих на околоземных орбитах (КА дистанционного зондирования Земли, связи, научные...), периодически получающих новые задачи и передающих информацию на Землю, реализуется многоконтурная СУ.

Главными особенностями систем управления КА являются их структура и реализованная в рамках этой структуры технология управления. Отметим, что структура СУ достаточно статична при изменении характеристик ее элементов в достаточно широком диапазоне и только существенное их изменение может

потребовать изменения структуры управления (известный в философии закон перехода количественных изменений в качественные).

Коротко опишем широко распространенный в настоящее время подход к управлению КА [1-4]. Управление функционированием КА осуществляется совокупностью взаимоувязанных (по функциям и задачам) органов и средств управления.

Формированием вектора управления КА, передачей его на борт, контролем приема информации и исправности аппаратуры КА занимаются центры управления полетом (ЦУП). Оператор КА на основании заказов потребителей целевой информации передает в ЦУП КА заявки на работу целевой аппаратуры в конкретные промежутки времени полета. ЦУП КА на основании этой информации формирует заявки на работу этого КА с конкретными средствами управления в конкретные промежутки времени. Заявки поступают из ЦУП КА в органы планирования задействования (управления) средств управления, которые осуществляют планирование работы этих средств (наземных и космических) – Центр ситуационного анализа, координации и планирования (ЦСАКП) - для наземных средств управления и Центр управления ретрансляцией и связью (ЦУРС) – для космических средств управления. Подготовленный план задействования средств управления направляется в ЦУП КА, который передает его Оператору КА. Оператор КА рассчитывает управление для целевой аппаратуры и передает ее в ЦУП КА для дальнейшего использования при планировании работы служебной аппаратуры. ЦУП КА формирует вектор управления КА и с помощью средств управления передает ее на борт КА. Контроль параметров орбит КА производится в

ЦУП КА на основе анализа внешнетраекторных измерений или результатов работы аппаратуры автономной навигации. Таким образом, подготовка всех данных на управление КА происходит в несколько итераций и требует четкого взаимодействия всех органов управления. Организация управления орбитальными группировками (ОГ) производится аналогично [3-8].

В литературе достаточно подробно рассмотрены задачи каждого органа управления. Хорошо описаны процессы работы ЦУП КА. Отдельно рассматривается работа средств управления КА. Системный анализ возможных способов организации взаимодействия органов управления, средств управления и объекта управления, оптимизации построения в целом системы управления КА (тем более космических группировок) в литературе не описан. Очевидно, что разработка системы управления КА должна начинаться с анализа назначения КА, состава и характеристик его аппаратуры, характеристик средств управления и информационных потоков. Далее - синтез структуры системы управления КА, оценка ее управляемости, устойчивости, надежности и эффективности, обоснование требований к подсистемам. Таким образом, для корректного решения вопросов управления КА необходимо вначале разработать структуру системы управления КА, а далее структуру и характеристики ее подсистем, но не наоборот, т.к. решение частных оптимизационных задач без рассмотрения вопросов оптимизации структуры системы в целом в общем случае ухудшает ее свойства. В этом направлении зарубежные исследователи продвинулись несколько дальше. Так в работе [7] отмечено, что в результате внедрения результатов проведенных Лабораторией реактивного движения JPL (США) научных исследований, в

настоящее время в организации, занятой управлением десятками КА, задействовано, не считая научных сотрудников, не более 10-20 человек, а не несколько сотен, как было в недавнем прошлом.

Отметим, что вся информация, функционирующая в системе управления КА, по скорости ее использования в процессе управления может быть условно разбита на два подмножества. В случае, когда функционирование всех систем КА происходит в штатном режиме, операции по управлению КА являются стандартными и описаны в соответствующих инструкциях. Контур управления, использующий такого рода информацию, можно считать быстрым. Если функционирование КА осуществляется в нештатном режиме, для расчета вектора управления необходим более глубокий анализ информации, поступающей с борта КА. В этом случае к управлению привлекаются дополнительные органы и средства, а его выработка может потребовать значительного времени, принимаются нестандартные решения. Такой контур управления является медленным. Его функции и структура будут рассмотрены в отдельной статье. В настоящей статье ограничимся вопросами синтеза структуры органов управления КА, орбитальными и космическими группировками для штатных режимов их функционирования.

Для одинакового понимания обсуждаемых в статье вопросов определимся с терминологией [1,2].

Система управления – система, состоящая из управляющего объекта и объекта управления. В состав системы управления могут быть включены в качестве самостоятельных объектов системы (комплексы) доведения управляющих

воздействий до объекта управления и его реакций до управляющего объекта (по сути дела - каналы передачи информации).

Объект управления – объект (система), предназначенный для достижения некоторой поставленной цели, выполняющий для достижения цели определенные задачи посредством реализации доведенных до него управляющих воздействий.

Орган управления (управляющий объект) – объект, осуществляющий планирование действий объекта управления, подготовку данных на управление, передачу их на объект управления и контроль исполнения.

Орбитальная группировка (ОГ) – совокупность однотипных КА, предназначенных для совместного решения одной или нескольких задач (КА типа «Ресурс», система «Глонасс»...).

Космическая группировка (КГ) – совокупность одиночных КА и орбитальных группировок, предназначенных для решения определенного типа задач (космическая группировка дистанционного зондирования Земли...)

Сектор управления – ЦУП отдельного КА или орбитальной группировки.

Органы управления космической группировкой – органы, рассчитывающие текущие векторы управления функционированием КА, средствами и каналами связи с КА, а именно:

- сектор управления КА – C_{ca} ;
- орган планирования задействования наземных средств управления КА – $C_{нсу}$;
- орган планирования задействования космических средств управления – $C_{ксу}$;
- орган планирования и расчета вектора управления целевой аппаратуры КА –

$C_{ца}$.

Средства управления (связи) КА:

- наземный комплекс средств управления и измерений (НСУ), включающий каналы связи, командно-измерительные станции (КИС) и средства измерений параметров траектории полета КА - $M_{НСУ}$;
- космический комплекс управления (КСУ), включающий наземные КИС и космические аппараты ретрансляции и установленные на них средства связи- $M_{КСУ}$;
- наземные станции приема целевой информации и передачи (СПЦИ) ее Оператору КА для дальнейшей обработки и передачи заказчикам.

Как уже отмечалось ранее, система управления современными КА является многоконтурной. При этом, чем больше контуров в системе управления, тем она более сложная, дорогая и менее оперативная. Однозначной связи между надежностью системы управления и ее структурой нет.

С учетом разделения информации на информацию, используемую в контуре управления полетом КА, и информацию, используемую в контуре управления целевой аппаратурой, исходная система управления КА S представляется в виде двух подсистем, что отражено на Рис.1.

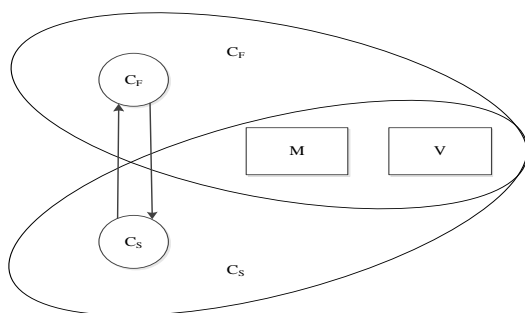


Рис. 1 Взаимодействие систем управления полетом и целевой аппаратурой

Здесь:

- S_F - система управления полетом КА;
- S_S - система управления целевой аппаратурой КА.

В нашем случае $S=\{S_F, S_S\}$, $C=\{C_F, C_S\}$.

Управление КА могут осуществляться через НСУ и КСУ, поэтому можно выделить наземный и космический контуры управления КА, как показано на рисунке 2.

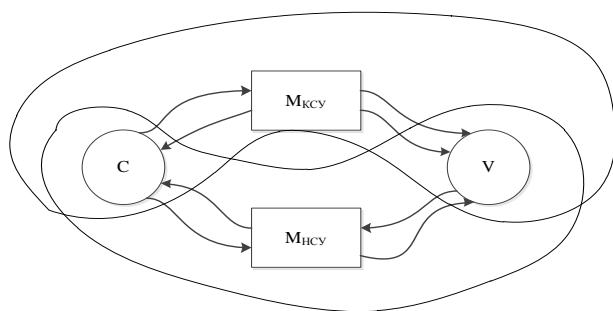


Рис. 2 Наземный и космический контуры управления

Под органом управления C в СУ космическим аппаратом (ОГ) будем понимать совокупность органов управления, осуществляющих расчет векторов управления средствами управления - U_M , служебной - U_S и целевой аппаратурой КА - U_P , реализацию вектора управления U_M , передачу на борт КА векторов U_S и U_P , контроль их реализации.

Система S описывается соотношениями:

$$S=\{C, M, V\}, \quad (1)$$

$$U=\{U_M, U_V\}, \quad (2)$$

$$U_V=\{U_S, U_P\}, \quad (3)$$

причем

$$U_s=f(U_p,X), \quad (4),$$

где

$$C=\{C_{ca},C_{ца},C_{ксу},C_{нсу}\},$$

$$M=\{M_{нсу}, M_{ксу}\},$$

V – множество КА,

U_M – вектор управления средствами управления (наземными и космическими),

U_v – вектор управления функционированием КА,

U_p – вектор управления целевой аппаратурой КА,

U_s – вектор управления служебной аппаратурой КА,

X – вектор текущих фазовых координат КА.

На основе имеющихся в настоящее время органов управления и принципах, заложенных в бортовую аппаратуру КА можно строить разные структуры органа управления С КА (ОГ, КГ).

Учтем, что в настоящее время управление КА (ОГ, КГ) может осуществляться НСУ и КСУ. Рассмотрим различные варианты построения структуры органа управления космической группировкой С.

Вариант №1.

Примем (как это реализовано в настоящее время), что каждую составляющую вектора управления U рассчитывает свой орган управления.

Векторы $U_{нсу}$ и $U_{ксу}$ рассчитываются в органах планирования, соответственно, наземных и космических средств управления. В каждом из них производится решение задачи бесконфликтного планирования работы конкретных средств управления с конкретными КА в конкретные промежутки времени. Результатом автономного решения задачи планирования задействования средств управления являются два вектора - $U_{нсу}$ и $U_{ксу}$. Для устранения дублирования задействования средств управления (НСУ и КСУ) и получения единого вектора управления необходимо множество КА поделить на два подмножества: одно из них управляется средствами НКУ, а другое - средствами ККУ. Такое решение можно принять один раз, что может уменьшить вероятность реализации задачи управления КА и эффективность использования средств управления, либо принимать его на каждом очередном цикле планирования. Такое решение может приниматься в одном из органов планирования, что чревато конфликтом интересов, либо в некотором новом, самостоятельном органе управления $C_{кп}$. Это приводит к некоторому усложнению структуры органов управления, но позволяет избежать конфликтов. Выходом этого органа управления является вектор

$$U_{кп} = U_{нсу} \cap U_{ксу} \quad (5)$$

Вектор управления целевой аппаратурой $U_{ца}$ в настоящее время формируется Оператором КА, являющимся также органом управления целевой аппаратурой - $C_{ца}$. Для его формирования в $C_{ца}$ сообщаются траектория полета КА и вектор $U_{кп}$, в соответствии с которыми рассчитывается вектор управления $U_{ца}$.

Вектор управления полетом КА U_s рассчитывается по соотношениям (3) в секторе управления полетом КА C_{ca} с учетом поступивших из $C_{ца}$ вектора управления $U_{ца}$, из $C_{кп}$ плана задействования средств управления $U_{кп}$:

$$U_{ca} = U_{кп} \cup U_{ца} \cup U_s \quad (6)$$

Для рассмотренного варианта структура системы управления КГ и информационные связи между отдельными органами управления представлены на рисунке 3.

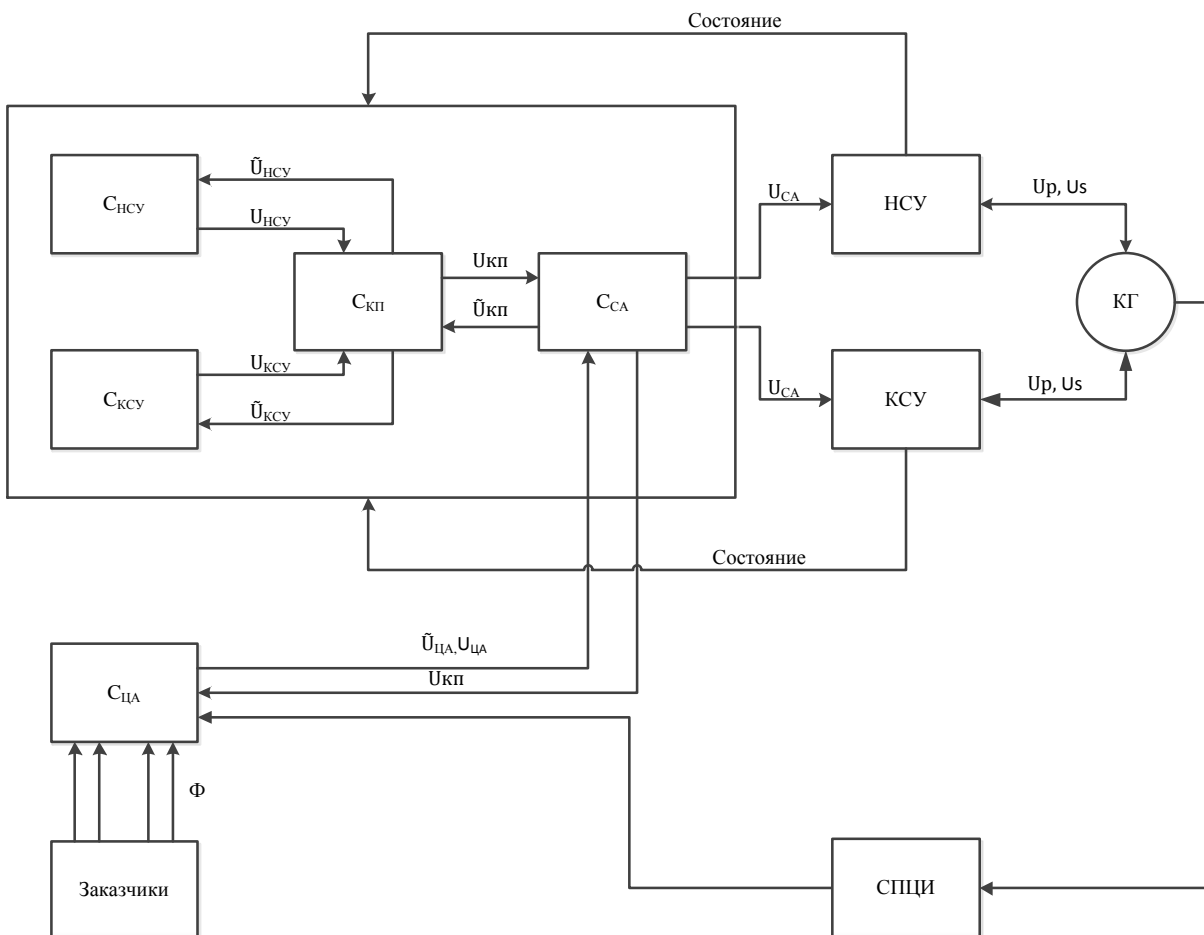


Рис.3 Система управления космической группировкой – вариант 1.

Принятые обозначения:

$\tilde{U}_{\text{НСУ}}, \tilde{U}_{\text{КСУ}}$ - заявки секторов управления на работу НСУ и КСУ;

$\tilde{U}_{\text{кп}}$ - предварительный план заявок;

$\tilde{U}_{\text{ца}}$ - заявки на получение целевой информации;

Φ - заявки заказчиков на получение целевой информации.

Очевидно, что такая организация управления функционированием КА включает много промежуточных действий и является достаточно сложной. Ряд выполняемых задач дублируются (например, отдельное планирование задействования НСУ и КСУ), некоторые операции требуют проведения циклов взаимодействия разных органов управления для окончательного расчета вектора управления. Все это приводит к увеличению времени расчета вектора управления $U_{\text{са}}$, передаваемого на борт КА, и не позволяет решать задачу оптимального распределения средств управления.

Оценку полного времени расчета текущего вектора управления в этом случае можно получить из соотношения:

$$\tau_{\text{упр}}^{\text{расч}} = n * \{ \max \{ \tau_{\text{НСУ}}, \tau_{\text{КСУ}} \} + \tau_{\text{кп}} \} + \tau_{\text{ца}} + \tau_{\text{са}} + n * \sum_{i=2} \tau_i^{\text{пер}} \quad (7),$$

где:

n – число итераций взаимодействия соответствующих органов управления при расчете планов задействования средств управления;

τ – время работы органа управления с соответствующим нижним индексом;

$\tau_i^{\text{пер}}$ – время передачи информации в i -том канале связи между органами управления.

Вариант 2.

Второй вариант – планирование задействования всех средств управления ОГ (КА, КГ) производится в объединенном органе планирования наземных и космических средств управления), т.е.

$$C_{\text{кп}} = C_{\text{нсу}} \cap C_{\text{ксу}} \quad (8)$$

Такая постановка задачи вполне целесообразна. Во-первых, приемо-передающие антенны КСУ расположены на геостационарных КА и координаты их могут быть представлены в таком же виде, как и координаты наземных средств. Во-вторых, управление ими происходит аналогично, как и наземными антеннами КИС. В целом (8) равносильно тому, что количество одновременно планируемых средств управления возрастает. Задача планирования сеансов связи для варианта объединения наземных и космических средств управления в этом случае может быть поставлена в виде задачи оптимизации, причем по разным показателям. Такой подход соответствует принципам системного проектирования [9,10] – в системе необходимо объединять подобные функции и задачи в одном месте, т.е. сводить число моментов принятия решений (органов управления) к минимуму. Преимущества объединения планирования всех средств управления в одном органе очевидны:

- сокращается количество органов управления, следовательно, время и затраты на планирование;

- появляется возможность постановки и решения задачи оптимизации задействования всех средств управления;

- повышается надежность планирования (разрешения конфликтных ситуаций) сеансов управления КА.

Однако даже при большом количестве средств управления в процессе планирования могут появляться конфликтные ситуации. Например, сектора управления разными КА направляют заявки на задействование одних и тех же средств в одни и те же промежутки времени (пересекающиеся промежутки времени). В этом случае $C_{\text{кп}}$ одновременно осуществлял бы разрешение такого рода конфликтов. Это еще одно из преимуществ описанной структуры по сравнению с предшествующей. \cup

Такой вариант системы управления космической группировкой показан на рис. 4.

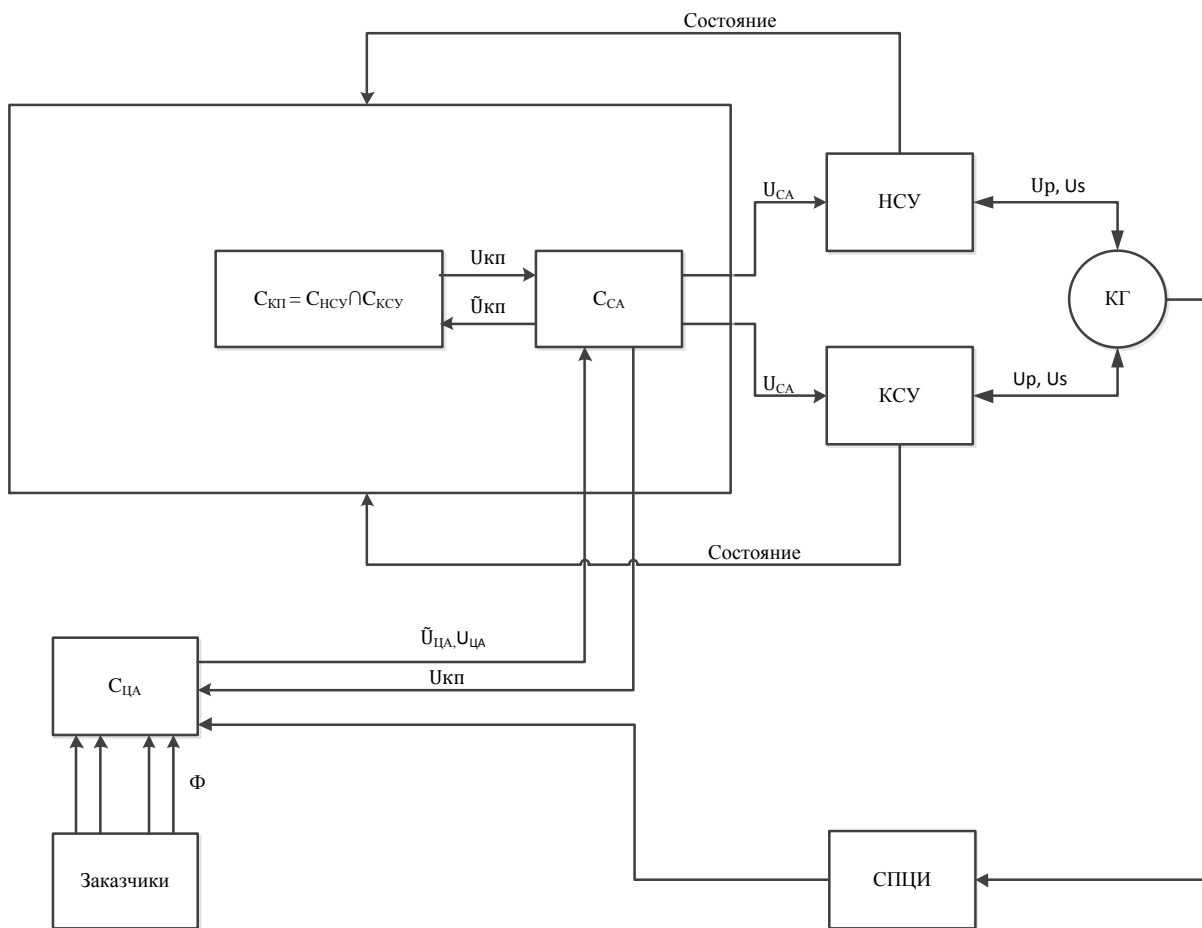


Рис. 4 Система управления космической группировкой – вариант 2.

Вариант 3

Рассмотрим теперь вариант подготовки всех компонент вектора управления функционированием КА в одном органе управления - $C_{са}$. Как уже отмечалось ранее, вектор управления целевой информацией вырабатывается в $C_{ца}$ на основе вектора $U_{кп}$, ранее полученного им из сектора управления, и пересылается в сектор управления $C_{са}$, где формируется вектор управления, передаваемый на средства управления и борт КА:

$$U_{са} = U_s \cap (U_{нсу} \cap U_{ксу}) \cap U_p \quad (9)$$

Очевидно, что объединив функции подготовки векторов управления полетом U_s и целевой аппаратурой U_p (получаемый на основе вектора $U_{ца}$) в секторе управления можно исключить $C_{ца}$ из состава органов управления, сократив таким образом общее их количество. Система управления КГ в этом случае становится проще (количество контуров управления снижается до двух), при этом показатели надежности расчета вектора управления остаются на прежнем уровне. Однако время подготовки данных управления КА в этом случае существенно сокращается (ликвидации промежуточных операций, связанных с передачей, контролем, согласованием и утверждением информации). Важным моментом является и то, что в этом случае появляется принципиальная возможность оперативно перераспределять заявки Оператора КА между КА одной ОГ в самом секторе управления КА. Действительно, с точки зрения теории систем ОГ является системой, а не просто совокупностью КА. В ОГ задачи КА и ОГ принципиально различны. Один КА не способен обеспечить выполнение целевой задачи, стоящей перед ОГ. Выполнение целевой задачи ОГ может быть достигнуто только в результате совместного функционирования КА, поэтому целесообразно в одном органе управления возможность совместного изменения векторов $U_{ца}$ и U_p для разных КА и тем самым обеспечить решение целевой задачи ОГ.

Такая структура органа управления представлена на рисунке 5.

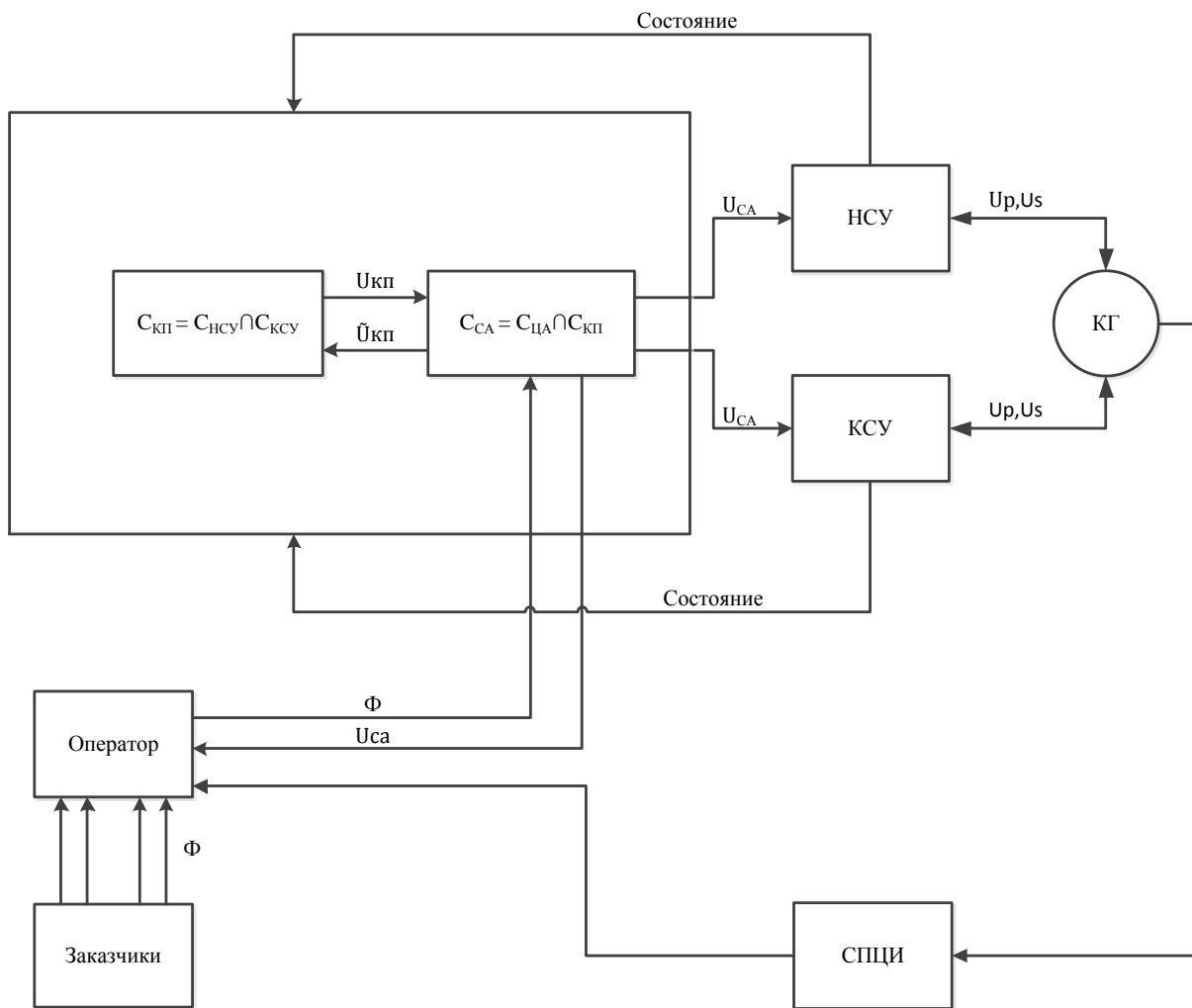


Рис.5

Система управления космической группировкой – вариант 3.

За счет сокращения числа промежуточных операций не только уменьшается время подготовки, но и возрастает надежность подготовки вектора управления $U_{са}$.

Очевидно, что все рассмотренные структуры органа управления КГ имеют право на реализацию. Однако усложнение структуры управления приводит к усложнению процесса подготовки данных на управление, возрастанию времени подготовки вектора управления $U_{са}$ и вероятности появления ошибок управления.

Построив на основе анализа технологий подготовки данных временные, стоимостные и надежностные математические модели рассмотренных структур

системы управления КГ, можно получить количественные оценки этих показателей. Качественная оценка свидетельствует, что приведенная на Рис.5 структурная схема системы управления КГ является наиболее надежной, быстродействующей и наименее дорогой из рассмотренных выше вариантов. Более того, в рамках такой системы управления появляется возможность реализовать задачи оптимального распределения средств управления и оптимального решения целевых задач.

Выводы.

В статье впервые с позиций системно-функционального анализа качественно рассмотрены различные варианты построения системы управления космическими группировками. Показано, что разработанная в 60-е годы и широко применяемая в настоящее время структура системы управления КА и космическими группировками является трехконтурной и обладает рядом недостатков. Рассмотрены варианты построения системы управления КГ, позволяющие улучшить ее характеристики. Предложенная в третьем варианте структура двухконтурной системы управления КГ, позволяет создать качественно новую систему управления, осуществляющую управление с наиболее высокой эффективностью. В этом варианте взаимосвязанные задачи планирования задействования всех средств управления и подготовки векторов управления функционированием каждого космического аппарата КГ решаются в одном органе управления на основе заявок на получение целевой информации, поступающих от Операторов КА. Это в свою очередь позволяет достичь минимальных показателей стоимости управления, сократить время подготовки вектора управления космическими группировками и

средствами управления при сохранении достигнутого в настоящее время уровня надежности.

Библиографический список

1. Малышев В.В. Спутниковые системы мониторинга. Анализ, синтез и управление. - М.: МАИ, 2000. - 568 с.
2. Волик В.Г. Теория управления. Терминология. - М.: Наука, 1988. - 56 с.
3. Лебедев А.А. Курс системного анализа. - М.: Машиностроение-Полет, 2010. - 254 с.
4. Дудко А.Н., Кучеров Б.А., Литвиненко А.О., Сохранный Е.П. Метод планирования бесконфликтного задействования наземных технических средств при обеспечении управления группировкой космических аппаратов // Космонавтика и ракетостроение. 2014. № 1 (74). С.155-164.
5. Deployment of EUTELSAT's New Generation Constellation Control System (Neo) J.S. Noguero¹, S. Reid², J.C. Gil¹, A.P. Honold¹, A. Ceballos¹ 1GMV S.A. Isaac Newton 11, Tres Cantos, 28760, Spain. 2SciSys (Space & Defence) Ltd, Methuen Park, Chippenham, Wiltshire, SN140GB, UK, available at: http://www.google.ru/url?url=http://arc-test.aiaa.org/doi/pdfplus/10.2514/6.2004-313-160&rct=j&frm=1&q=&esrc=s&sa=U&ved=0ahUKEwiKirC75ZzNAhWJkSwKHblOD4UQFggTMAA&usg=AFQjCNGrpEdtO_uXRVyImha10zu9l8ByPg (accessed 10.06.2016)
6. GALILEO Constellation Control System R.S. Thompson¹, I.R. Brighton² and C.B. Payne², 1SciSys, Chippenham, Wilts hire, UK SN14 0GB. 2EADS Astrium Ltd., Portsmouth, UK PO3 5PU. Available

at:<http://www.google.ru/url?url=http://arc.aiaa.org/doi/pdf/10.2514/6.2004-404-233&rct=j&frm=1&q=&esrc=s&sa=U&ved=0ahUKEwi4vYzv5pzNAhWBXSwKHUuHDisQFggTMAA&usg=AFQjCNG3x6ERz7Y3fJJCEpKpejdemGz8SQ> (accessed 10.06.2016)

7. Mission planning for constellations Wayne Harris, Rick Blake, Duncan Woods & Roger Thompson SciSys, Methuen Park, Chippenham Wiltshire SN14 OGB U.K Phone +44(0)1249 466 466; Fax +44(0)1249 466 661; E-Mail wayne.harris@scisys.co.uk Johan Stjernevi ESA, Directorate of Telecommunications, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands. Available at:<http://arc.aiaa.org/doi/pdf/10.2514/6.2002-T3-04> (accessed 10.06.2016)

8. JPL's Multi-Mission Operations Strategy for the Next Decade, Robert K. Wilson, Affiliations: Federal Data Corporation, Jet Propulsion Laboratory, Deputy Manager, Mission Services and Applications Office, Telecommunications and Mission Operations Directorate, Mail Stop 301/250D, 4800 Oak Grove Drive, Pasadena, California 91109-8099 available at:
<http://www.google.ru/url?url=http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download%3Fdoi%3D10.1.1.499.8008%26rep%3Drep1%26type%3Dpdf&rct=j&frm=1&q=&esrc=s&sa=U&ved=0ahUKEwjXkvem6ZzNAhUJZCwKHZeBBZEQFggTMAA&usg=AFQjCNEEnnB8Lx0p hQyGFZYp4idjWbK6zQQ> (accessed 10.06.2016)

9. Денисов А.А., Колесников Д.Н. Теория больших систем управления. - М.: Энергоиздат, 1982. - 288 с.

10. Сингх М., Титли А. Системы: декомпозиция, оптимизация и управление. - М.: Машиностроение, 1986. – 496 с.

11. Дарнопых В.В., Малышев В.В., Усовик И.В. Многокритериальная оптимизация эффективности целевого функционирования орбитальных группировок систем дистанционного зондирования Земли на основе оперативного планирования // Вестник Московского авиационного института. 2014. Т.21. №5. С. 37-52.
12. Жигастова О.К., Почукаев В.Н. Программный комплекс автоматизированного планирования полёта автоматических космических аппаратов // Вестник Московского авиационного института. 2014. Т.21. №4. С. 60-70.
13. Литвиненко А.О. Программный комплекс автоматизированного планирования задействования средств наземного автоматизированного комплекса управления // Труды МАИ, 2016, №86:
<http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=67829>
<http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=67829>
14. Ногов О.А. Планирование сеансов при управлении ретрансляцией и связью с использованием МКСП «Луч» // Труды МАИ, 2013, №66:
<http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=40269>