

# ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ПИЛОТИРУЕМЫХ ПОЛЕТОВ В КОСМОС

THEORY AND PRACTICE OF HUMAN SPACE FLIGHTS

УДК 629.764:621.398:004.032.26

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИЧЕСКОГО АППАРАТА ПЛАНИРОВАНИЯ КАНАЛОВ СВЯЗИ СПУТНИКОВ-РЕТРАНСЛЯТОРОВ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКОЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

М.М. Матюшин, А.В. Куимов

Докт. техн. наук М.М. Матюшин; А.В. Куимов (АО «ЦНИИмаш»)

В работе приведена математическая постановка задачи рационального планирования каналов связи спутников-ретрансляторов при управлении космическими аппаратами через спутниковую систему контроля и управления. Определены область исходных данных, искомые варьируемые параметры, показатели и критерии качества плана ретрансляции и связи, ограничения на область допустимых решений. Обосновано использование математического аппарата последовательной оптимизации для решения поставленной задачи. Разработана методическая схема поиска рациональных значений варьируемых параметров спутниковой системы контроля и управления космическими аппаратами.

**Ключевые слова:** информационный обмен, ретрансляция, пропускная способность, поиск, рациональный

### **Improvement of the Methodological Apparatus for Planning Communication Channels of Relay Satellites When Controlling the Orbital Spacecraft Group. M.M. Matyushin, A.V. Kuimov**

The paper presents a mathematical formulation of the problem of rational planning the communication channels of relay satellites when controlling spacecraft via a satellite monitoring and control system. The scope of the source data, the desired variable parameters, indicators and quality criteria of the relay and communication plan, and restrictions on the scope of acceptable solutions are determined. The use of the mathematical apparatus of sequential optimization for solving the problem is justified. A methodological scheme for finding rational values of variable parameters of the satellite system for monitoring and controlling spacecraft has been developed.

**Keywords:** information exchange, retransmission, throughput, search, rational

В настоящее время ведущими в области космической деятельности странами прорабатываются и реализуются ретрансляционные технологии управления орбитальной группировкой (ОГ) космических аппаратов (КА) с использованием спутников-ретрансляторов (СР) на геостационарной орбите, как наиболее перспективное направление совершенствования процессов обмена данными с КА. Включение СР в контур управления позволяет обеспечить глобальность управления ОГ КА и реализовать адаптивные технологические циклы управления.

Вместе с тем существующие в настоящее время технологии управления ОГ КА с использованием космической системы ретрансляции (КСР) реализуют одноканальный режим информационного обмена КА с центрами управления полетами (ЦУП) КА. При этом основное содержание планирования каналов связи СР состоит в распределении временных интервалов ретрансляции между КА и разрешении конфликтных ситуаций, связанных с поступлением заявок на одновременное проведение сеансов связи с различными КА.

Массовое внедрение ретрансляционных технологий управления ОГ КА и сбора целевой информации приводит к необходимости разработки нового методического аппарата планирования каналов связи СР, направленного не только на распределение временного ресурса и разрешения конфликтных ситуаций, но и на рациональное распределение ресурсов пропускной способности многоканальных линий связи СР между одновременно обслуживаемыми КА.

### **Постановка задачи рационального планирования каналов связи СР при управлении ОГ КА через спутниковую систему контроля и управления КА**

Для формализованного описания задачи рационального планирования каналов связи СР при управлении ОГ КА через спутниковую систему контроля и управления (ССКУ) КА, требуется однозначно определить [1, 2]:

- параметры, характеризующие степень достижения цели системы (сформировать систему показателей и критериев качества плана);
- варьируемые параметры, которыми имеется возможность распоряжаться при планировании;
- допустимые пределы изменения этих параметров;
- влияние изменения варьируемых параметров на достижение цели функционирования системы.

Анализ работ, посвященных созданию и использованию автоматизированных систем испытаний и управления космическими средствами, показывает, что в наибольшей степени целевому назначению ССКУ КА соответствуют критерии и показатели времени и объема данных [3, 4].

Множество показателей функционирования ССКУ КА можно условно разделить на две группы:

– интегральные (обобщенные) показатели функционирования ССКУ КА, по которым оценивается качество информационного обмена ЦУП с КА;  
 – частные показатели функционирования ССКУ КА, которые характеризуют качество информационных операций, выполняемых составными элементами ССКУ КА.

В качестве интегральных (обобщенных) показателей функционирования ССКУ КА целесообразно принять суммарную длительность обслуживания КА  $T_X = \sum_{x \in X_R} t_x$  и «информационную производительность», которая характеризуется объемом сообщений, передаваемых между ЦУП и КА в единицу времени  $V_X = \sum_{x \in X_R} v_x$ ,

где  $X_R$  – множество обслуженных КА КСР, в составе множества  $R$  спутников-ретрансляторов,

$t_x$  – длительность обслуживания  $x$ -го КА,

$v_x$  – плотность потоков информационного обмена с  $x$ -м КА.

В качестве частных показателей ЦУП целесообразно принять следующие:

$C$  – множество ЦУП, подключённых в ССКУ КА;

$X_{\max} = \sum_{c \in C} x_{\max c}$  – пропускная способность ЦУП определяемая как количество одновременно управляемых КА, где  $x_{\max c}$  – пропускная способность  $c$ -го ЦУП.

В качестве частных показателей КСР целесообразно принять следующие:

$R$  – множество СР в системе;

$D_R = \bigcup_{r \in R} d_r$  – зона покрытия КСР (диапазоны географической широты и долготы) СР;

$L_R = \sum_{r \in R} l_r$  – количество каналов передачи информации КСР;

$V_R = \sum_{r \in R} v_r$  – пропускная способность КСР,

где  $d_r$  – зона покрытия  $r$ -го СР,

$l_r$  – количество каналов передачи информации  $r$ -го СР,

$v_r$  – пропускная способность  $r$ -го СР.

В качестве частных показателей плана сеансов ретрансляции и связи при управлении КА (на контрольном интервале времени) принять следующие:

$X = \sum_{r \in R} x_r$  – количество обслуженных КА;

$T_{XR} = \sum_{x \in X_R, r \in R} t_{xr}$  – суммарная длительность обслуживания КА через  $r$ -й СР;

$V_{XR} = \sum_{x \in X_R, r \in R} v_{xr}$  – суммарная выделенная пропускная способность КСР

для обмена с КА, где  $x_r$  – количество КА, обслуженных через  $r$ -й СР,  $v_{xr}$  – выделенная пропускная способность  $r$ -го СР для информационного обмена с  $x$ -м КА.

Частные показатели функционирования составных элементов ССКУ КА определяют обобщенные следующим образом:

- суммарная длительность обслуживания КА определяется показателями:  $X, T_{XR}$ ;
- информационная производительность определяется показателями:  $X, V_{XR}$ ;
- показатели  $x_r, t_{xr}, v_{xr}$  являются варьируемыми параметрами ССКУ КА, составляющими план задействования каналов связи СР при управлении ОГ КА;
- показатели  $C, X_{\max}, R, D_R, L_R, V_R$  являются ограничивающими факторами для параметров плана сеансов ретрансляции и связи при управлении полетами КА через ССКУ КА.

Исходя из цели функционирования, критерием качества функционирования ССКУ КА является обеспечение максимальной суммарной длительности информационного обслуживания КА при наличии ограничений на «информационную производительность» по ресурсам пропускной способности КСР и ЦУП.

В общем виде указанный критерий интегральных (обобщенных) показателей функционирования ССКУ КА можно представить следующим образом:

$$T_x \rightarrow \max \text{ при } V_x \leq V_R.$$

При рассмотрении критериев частных показателей функционирования элементов ССКУ КА следует исходить из того положения, что значения показателей КСР формируются на этапах создания как отдельных СР, так и КСР в целом и определяют границы области допустимых значений показателей плана сеансов ретрансляции и связи при управлении КА.

Таким образом, критерии частных показателей функционирования ССКУ КА, направленных на обеспечение выполнения критериев интегральных (обобщенных) показателей, формулируются следующим образом:

- критерий количества обслуженных КА – обеспечение полного охвата обслуживанием КА согласно технологическому циклу управления при ограничении на количество одновременно обслуживаемых КА по количеству каналов передачи информации СР и пропускной способности ЦУП;
- критерий длительности обслуживания КА – обеспечение максимальной продолжительности обслуживания КА в пределах зоны покрытия КСР;
- критерий выделенной пропускной способности КСР – обеспечение потребной пропускной способности каналов передачи информации для проведения сеансов информационного обмена ЦУП с КА при ограничениях ресурсов пропускной способности СР.

В формализованном виде критерии показателей плана сеансов ретрансляции и связи при управлении КА через ССКУ КА можно представить следующим образом:

$$t_x \rightarrow \max \text{ при } t_x \in t_{xd} \text{ для } x \in X_R; \quad (1)$$

$$X = X_c = \sum_{c \in C} x_c \text{ при } x_r(t) \leq l_r \text{ для } r \in R \text{ и } x_c(t) \leq x_{\max c} \text{ для } c \in C; \quad (2)$$

$$v_{xr}(t) \geq v_x(t) \text{ при } \sum_{x \in X_R} v_{xr}(t) \leq v_r \text{ для } r \in R, \quad (3)$$

где  $t_{xd}$  – интервалы времен пролета  $x$ -го КА в зоне покрытия СР;

$v_x$  – плотность потока информации на сеансе связи  $x$ -го КА с ЦУП.

Разработанная система показателей и критериев является основой для постановки задачи рационального планирования сеансов ретрансляции и связи при управлении ОГ КА через ССКУ КА. Математическая постановка которой выглядит следующим образом:

Дано:

$X$  – ОГ КА, управляемых с использованием ССКУ КА.

$C$  – управление КА осуществляется из ЦУП.

$R$  – информационный обмен между ЦУП и КА осуществляется через СР.

$V_x$  – циркулирующие информационные потоки между ЦУП и КА в ССКУ КА.

Обмен информации между ЦУП и КА через КСР осуществляется в соответствии с планом сеансов ретрансляции и связи, который характеризуется варьируемыми параметрами ССКУ КА.

В принятой системе показателей функционирования ССКУ КА требуется найти решение векторных функциональных зависимостей варьируемых параметров ССКУ КА:

$$\mathbf{x}_r(t) = f(\mathbf{t}_{xd}, \mathbf{I}_r);$$

$$\mathbf{t}_{xr} = f(\mathbf{t}_{xd}, \mathbf{x}_r(t)); \quad (4)$$

$$\mathbf{v}_{xr}(t) = f(\mathbf{v}_x(t), \mathbf{x}_r(t)),$$

максимизирующих целевую функцию ССКУ КА (обобщенный критерий качества):

$$T_X = \sum_{x \in X_R} t_x \rightarrow \max \text{ при } V(t) = \sum_{x \in X, r \in R} v_{xr}(t) \leq V_R = \sum_{r \in R} v_r,$$

что обеспечивается выполнением критерия частного показателя качества функционирования ССКУ КА – «длительность обслуживания КА» (1) при ограничениях (2, 3).

Решение поставленной задачи рационального планирования каналов связи СР заключаются в формировании и анализе исходных данных о нахождении КА в зоне видимости КСР и информационных потоков между КА и ЦУП через ССКУ КА, оценке пропускной способности КСР и ЦУП КА; определении расписания обслуживания КА и распределении ресурса каналов СР; оценке полученных результатов и формирования плана сеансов ретрансляции и связи при управлении ОГ КА через ССКУ КА.

## **Выбор методов, обеспечивающих рациональное планирование каналов связи СР при управлении ОГ КА через ССКУ КА**

Рациональное планирование каналов связи СР при управлении ОГ КА через ССКУ КА относится к классу задач условной многомерной оптимизации при ограничениях типа неравенств.

Методы решения задач многомерной оптимизации многочисленны и разнообразны, при этом ни один метод или класс методов не обладает универсальностью и не позволяет с одинаковой эффективностью решать оптимизационные задачи различных типов. В частности, возможны случаи, когда вычисление значений целевой функции требует чрезмерных затрат времени и вычислительных ресурсов ЭВМ; в ряде задач невыполнимо, либо весьма затруднительно найти аналитические выражения для производных целевой функции. В итоге возникает необходимость в сопоставлении и анализе основных закладываемых принципов и способов решения конкретной прикладной задачи [5].

В общем случае можно выделить два подхода к решению задачи параметрического синтеза ССКУ КА:

- аналитический;
- поисковый.

В основе аналитического подхода лежат классические методы, среди которых методы функционального анализа, вариационных исчислений и др. Аналитические методы позволяют получить наиболее полное и общее представление об исследуемом процессе планирования каналов связи СР, наглядно установить влияние варьируемых параметров и ограничений на целевую функцию. Однако их применение во многих случаях ограничивается характером целевой функции и ограничений. Аналитическое представление функциональных зависимостей, описывающих основные процессы функционирования ССКУ КА, является весьма сложным, что серьезно затрудняет отыскание совокупности стационарных точек и множества точек, где производная от целевой функции не определена. Число варьируемых параметров элементов ССКУ КА достигает нескольких тысяч. Высокая размерность задачи планирования каналов связи СР резко усложняет вычислительные процедуры, так как возникает необходимость решать систему соответствующего числа уравнений, являющихся следствием условий экстремума функции многих переменных. Наличие ограничений на область допустимых значений варьируемых параметров приводит к необходимости анализа на выполнение условий глобального минимума целевой функции не только стационарных точек (и точек, где производная не определена), но и всех крайних точек области допустимых решений. Поэтому использование аналитических методов в значительной степени утрачивает силу при переходе к реальному процессу планирования каналов связи СР при управлении ОГ КА через ССКУ КА.

Поисковый подход, позволяющий решать большинство задач условной оптимизации, основан на использовании итерационных процедур последовательного приближения к точке экстремума целевой функции. В отличие от аналитических поисковые методы не дают точного решения, однако позволяют получить приближенные решения оптимизационных задач большой размерности с требуемой точностью. При этом используемые в поисковых методах итерационные процедуры имеют сравнительно простую численную реализацию на ЭВМ.

Анализ математических методов оптимизации привел к целесообразности использования аппарата последовательной оптимизации для решения задачи параметрического синтеза ССКУ КА [6, 7]. Последовательная оптимизация заключается в сведении решения исходной задачи большой размерности к последовательному решению нескольких более простых задач меньшей размерности. При этом основная идея состоит в разделении варьируемых параметров на две группы. В одну группу объединяются параметры, для которых трудно определить аналитические описания, а в другую – параметры, аналитические описания которых сравнительно легко сформировать при фиксированных значениях параметров первой группы. Частные подзадачи с варьируемыми параметрами первой и второй групп решаются отдельно с проведением, при необходимости, координирующих расчетов, обеспечивающих связь подзадач и сходимость решения.

Решение задачи планирования каналов связи СР на основе последовательной оптимизации заключается в последовательном решении задач поиска рациональных значений параметров: расписания обслуживания КА и ресурса каналов СР. Решение данных задач сводится к [5, 8]:

- анализу и классификации варьируемых параметров;
- построению математической модели, описывающей взаимосвязи независимых параметров, варьируемых параметров и параметров, определяющих качество функционирования ССКУ КА;
- анализу сформированной модели и определению специфических особенностей решения задач;
- определению частных подзадач и методов поиска их решения;
- вычислению варьируемых параметров;
- оценке влияния независимых переменных (параметров возмущающих воздействий) на зависимые выходные переменные (параметры, определяющие качество функционирования ССКУ КА).

В общем виде функциональные зависимости искомых варьируемых параметров (4) при применении аппарата последовательной оптимизации можно представить совокупностью следующих векторных функций:

1. Функциональные зависимости варьируемых параметров, не имеющих четкого аналитического описания:

$$\mathbf{x}_r(t) = f(\mathbf{t}_{xd}, \mathbf{I}_r);$$

$$\mathbf{t}_{xr} = f(\mathbf{t}_{xd}, \mathbf{x}_r(t)) \text{ при } t_x \rightarrow \max$$

при  $t_x \in t_{xd}$  для  $x \in X_R$ ;  $X_R = X$  и  $x_r(t) \leq l_r$  для  $r \in R$ ;  $x_c(t) \leq x_{\max c}$  для  $c \in C$ .

2. Функциональные зависимости варьируемых параметров, имеющих четкие аналитические описания:

$$\mathbf{v}_{xr}(t) = f(\mathbf{v}_x(t), \mathbf{x}_r(t))$$

$$\text{при } v_{xr}(t) \geq v_x(t) \text{ и } \sum_{x \in X_R} v_{xr}(t) \leq v_r \text{ для } r \in R.$$

Для решения задачи рационального планирования каналов связи СР необходимо сформировать методический аппарат поиска рациональных значений трех групп варьируемых параметров элементов ССКУ КА на основе аппарата последовательной оптимизации.

К настоящему времени опубликовано значительное число работ, в которых последовательная оптимизация применяется для построения работоспособного методического аппарата параметрического синтеза сложных технических систем. Наряду с работами, содержащими положительный опыт применения последовательной оптимизации, отмечались случаи, когда достичь желаемого результата не удавалось. Основная причина неудач заключается в неполном анализе данных, необходимых для учета специфических особенностей задачи.

Эти обстоятельства весьма существенны и их нельзя игнорировать без риска получить отрицательный результат. К ним относятся:

- высокая размерность задачи;
- неоднородный характер изменения независимых параметров входов и элементов ССКУ КА во времени;
- различные типы варьируемых параметров ССКУ КА;
- вид и характеристики целевой функции и ограничений;
- воздействие случайных возмущающих факторов и др.

Многообразие и разнородный характер перечисленных особенностей требует разработки специальных мер, обеспечивающих работоспособность методического аппарата последовательной оптимизации.

В связи с этим весьма ответственным этапом является анализ целевых функций и ограничений для выявления специфических особенностей подзадач, которые оказывают существенное влияние на процесс их решения, это: неразрывность и дифференцируемость целевой функции, вид ограничений, ограниченность области допустимых решений и значений целевой функции, возможность существования не единственных решений, существование допустимого решения [5, 9]. Данные характеристики определяют вид используемой информации при вычислении начальной допустимой точки, направлений, шага и условия останова поиска рациональных значений варьируемых параметров, то есть определяют



частный метод решения подзадачи. Применение поискового подхода при решении задачи рационального планирования каналов связи СР не исключает использование аналитических методов в качестве частных при решении подзадач.

Необходимо отметить, что аппарат последовательной оптимизации построен в предположении, что решения подзадач оптимальны относительно предшествующих. Однако в реальных условиях оптимальные результаты решения подзадач не всегда приводят к желаемому решению исходной задачи. Это обусловлено наличием методических погрешностей вычислений, связанных с допущениями в модели реальной системы, приближенным характером решения поисковыми методами, а также аппаратно-программными погрешностями вычислительных процедур на ЭВМ. Практически это проявляется в возрастании погрешности вычисления при решении каждой последующей подзадачи [9].

В общем случае приращение погрешности вычислений может быть столь значительным, что может привести к нарушению сходимости решения задачи, либо решение теряет практический смысл. Поэтому важно проводить оценку результатов решения подзадач с целью определения необходимости уточнения целевой функции, области допустимых решений и значений варьируемых параметров с последующим проведением координирующих расчетов.

Все это приводит к необходимости разработки соответствующих прикладных методических подходов, совокупности специальных процедур, обеспечивающих корректность применения аппарата последовательной оптимизации для рационального планирования каналов связи СР при управлении ОГ КА через ССКУ КА.

Таким образом, анализ методов решения задач многомерной условной оптимизации показывает, что для решения поставленной задачи необходимо использовать математический аппарат последовательной оптимизации. Суть данного метода заключается в декомпозиции исходной оптимизационной задачи на подзадачи меньшей размерности. Решение задачи рационального планирования каналов связи СР получается в результате решения последовательности подзадач. При этом необходимо учитывать обстоятельства, вызывающие нарушения сходимости решения.

### **Методическая схема решения задачи рационального планирования каналов связи СР при управлении ОГ КА через ССКУ КА**

Методический подход к решению задачи рационального планирования каналов связи СР при управлении ОГ КА через ССКУ КА представляет многоуровневую иерархическую систему и включает ряд этапов.

Основным содержанием первого этапа является:

- анализ информационных потоков между КА и ЦУП через ССКУ в направлениях «Земля–Борт» и «Борт–Земля»;
- анализ баллистических данных ОГ КА – временные интервалы нахождения КА в зонах покрытия СР;
- анализ ограничений по пропускной способности ЦУП и КСР;
- формирование системы исходных данных, необходимых для решения поставленной задачи.

На втором этапе проводится решение подзадач поиска рациональных значений параметров плана сеансов ретрансляции и связи при управлении ОГ КА.

На третьем заключительном этапе реализации методического аппарата проводится оценка результатов численных расчетов по определению рациональных значений искомых варьируемых параметров ССКУ КА и формирование плана сеансов ретрансляции и связи.

Сложность решения задачи планирования каналов связи СР обуславливает применение принципа декомпозиции, в соответствии с которым исходная задача разбивается на последовательность частных, решаемых с использованием различных методик.

Декомпозиция производится по иерархическому принципу в соответствии со структурой ССКУ КА, определяемой, во-первых, составом и режимами функционирования технических средств ЦУП КА и КСР, во-вторых, составом и характером изменений информационных потоков между КА и ЦУП. Она ориентируется в этом случае на последовательный поиск рациональных значений параметров плана сеансов ретрансляции и связи при управлении ОГ КА через ССКУ КА.

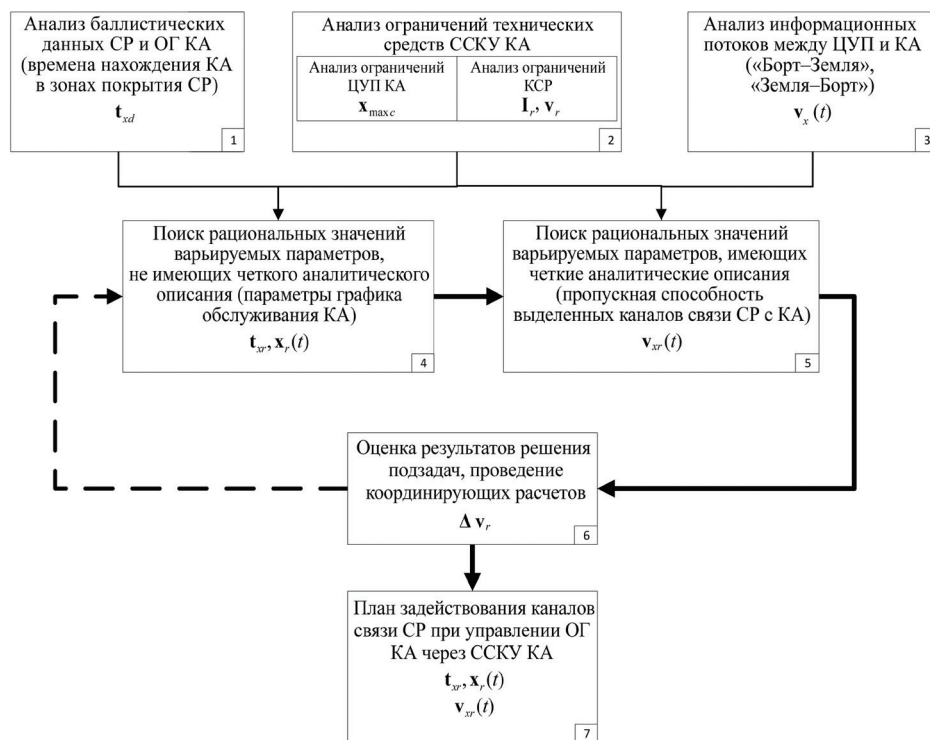
Методическое обеспечение верхнего уровня описывает влияние варьируемых параметров на степень достижения цели ССКУ КА через соответствующие обобщенные показатели. Методическое обеспечение более низкого уровня ориентировано на обеспечение качественного выполнения информационных операций в элементах ССКУ КА.

Методическая схема решения задачи планирования каналов связи СР при управлении ОГ КА через ССКУ КА представлена на рисунке.

Схема методического подхода является обобщенной, она детализируется и наполняется конкретным содержанием отдельно для задач поиска рациональных значений параметров графика обслуживания КА и пропускной способности выделенных каналов связи СР с КА.

Среди блоков методической схемы решения задачи планирования важное место занимают следующие вычислительные процедуры:

- процедура поиска рациональных значений варьируемых параметров, не имеющих четкого аналитического описания – поиск рациональных значений параметров графика обслуживания КА;
- процедура поиска рациональных значений варьируемых параметров, имеющих четкое аналитическое описание – расчеты значений пропускной способности выделенных каналов связи СР с КА;



Методическая схема решения задачи рационального планирования каналов связи СР при управлении ОГ КА через ССКУ КА

– процедура оценки результатов решения подзадач, проведения координирующих расчетов и формирования плана сеансов ретрансляции и связи при управлении ОГ КА.

Процедура поиска рациональных значений параметров графика обслуживания КА реализует процедуры поиска значений варьируемых параметров ССКУ КА, обеспечивающих выполнение критериев количества и длительности обслуживания КА. Поиск рациональных значений осуществляется для каждого СР на основе данных о нахождении КА в зоне покрытия СР, количестве комплектов каналообразующей аппаратуры на борту СР и пропускной способности ЦУП КА. В результате поисковых процедур определяются состав обслуживаемых КА и временные интервалы обслуживания, которые определяют график обслуживания КА. График коммутации представляется в виде ленточных графиков для каждого СР, где в качестве оборудования выступают комплекты каналообразующей аппаратуры, а в качестве работ – коммутированные в каналы связи КА. При этом график коммутации может быть уточнен при проведении координирующих расчетов по итогам оценки результатов расчетов по распределению ресурсов пропускной способности каналов связи СР.

Полученные в результате поисковых процедур значения варьируемых параметров являются исходными данными для расчетов по распределению ресурсов пропускной способности каналов связи СР.

В основу расчетов пропускной способности каналов связи СР положено описание процессов обмена информации между ЦУП и КА в направлениях «Борт–Земля» и «Земля–Борт». Расчеты предполагают решение задачи распределения ограниченного ресурса пропускной способности телеметрических линий связи между каналами связи с КА. Решение задачи проводится в две итерации.

Первоначально рассчитывается пропускная способность каналов передачи ТМИ исходя из значений параметров графика обслуживания КА начального решения. То есть определяется начальное решение.

На следующей итерации, по результатам координирующих расчетов и параметров уточненного графика обслуживания КА, проводятся расчеты по уточнению распределения пропускной способности каналов связи СР с КА. Процедура координирующих расчетов направлена на согласование процедур поиска рациональных значений групп варьируемых параметров и обеспечение сходимости решения исходной задачи рационального планирования каналов связи СР при управлении КА через ССКУ КА. Основной целью координирующих расчетов является установление соответствия пропускной способности каналов связи СР плотности информационных потоков между КА и ЦУП. Расчеты заключаются в вычислении недостающих либо избыточных ресурсов пропускной способности каналов связи СР. Несоответствие ресурса вычисляется для всех коммутаций КА в каналы связи СР:

$$\Delta v_r(t) = v_r - \sum_{x \in X_r(t)} v_{xr}(t),$$

где  $\Delta v_r(t)$  – величина несоответствия ресурса каналов связи  $r$ -го СР информационным потокам между ЦУП и КА.

На основе рассчитанных величин проводится уточнение параметров графика обслуживания КА. После чего повторяются уточняющие расчеты пропускной способности выделенных каналов связи СР с КА.

В результате повторения отдельных реализаций поисковых процедур по такой схеме и анализа альтернативных вариантов определяются рациональные значения параметров плана сеансов ретрансляции и связи при управлении КА через ССКУ КА.

Таким образом, разработанная методическая схема составляет структурно-логическую основу методического аппарата поиска рациональных значений варьируемых параметров ССКУ КА, ее реализация позволит осуществлять рациональное планирование сеансов ретрансляции и связи при управлении ОГ КА через ССКУ КА.

## Заключение

В рамках системного подхода проведена формализация процессов функционирования ССКУ КА, влияющих на выполнение задач обеспечения управления полетами КА. Разработанная система показателей и критериев легла в основу постановки математической задачи рационального планирования каналов связи СР при управлении ОГ КА через ССКУ КА. Решение поставленной задачи заключается в формировании и анализе исходных данных о нахождении КА в зоне видимости КСР и информационных потоков между КА и ЦУП через ССКУ КА, оценке пропускной способности КСР и ЦУП КА; определении расписания обслуживания КА и распределении ресурса каналов СР; оценке полученных результатов и формировании плана сеансов ретрансляции и связи при управлении ОГ КА через ССКУ КА.

Для решения поставленной задачи предложен математический аппарат последовательной оптимизации. Суть данного метода заключается в декомпозиции исходной оптимизационной задачи на подзадачи меньшей размерности. Выполнение задачи рационального планирования каналов связи СР получается в результате решения последовательности подзадач, при этом необходимо учитывать обстоятельства, вызывающие нарушения сходимости решения. Реализация разработанной структурно-логической схемы поиска значений варьируемых параметров ССКУ КА позволит формировать рациональные планы сеансов ретрансляции и связи при управлении КА через многоканальную ССКУ КА.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Волкова В.Н., Денисов А.А. Основы теории систем и системного анализа. – С.-Петербург. гос. техн. ун-т. – СПб. : Изд-во СПбГТУ, 1997. – 510 с.
- [2] Мессарович М., Такахара Я. Теория иерархических многоуровневых систем. – М.: Мир, 1973. – 344 с.
- [3] Вопросы повышения эффективности автоматизированного управления космическими средствами / под ред. Ю.С. Мануйлова. – МО РФ, 1999. – 125 с.
- [4] Основы теории испытаний. Экспериментальная отработка ракетно-космической техники / В.А. Лисейкин, Н.Ф. Моисеев, Г.Г. Сайдов, О.П. Фролов; под ред. д-ра техн. наук В.К. Чванова. – М.: Машиностроение – Полет / Виарт Плюс, 2015. – 260 с.
- [5] Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгсдел К. Оптимизация в технике. В 2-х кн., кн. 1. Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 350 с.
- [6] Атетков А.В., Галкин С.В., Зарубин В.С. Методы оптимизации: учеб. для вузов / под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко. – 2-е изд. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 440 с.
- [7] Малышев В.В. Методы оптимизации в задачах системного анализа и управления: Учебное пособие. – М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2010. – 440 с.
- [8] Сухарев А.Г., Тихомиров А.В., Федоров В.В. Курс методов оптимизации: учеб. пособие. – 2-е изд. – М.: Физматлит, 2005. – 368 с.
- [9] Методы математического программирования в задачах оптимизации сложных технических систем: учеб. пособие / А.М. Загребав, Н.А. Криныца, Ю.П. Кулябичев, Ю.Ю. Шумилов. – М.: МИФИ, 2007. – 32 с.

## REFERENCES

- [1] Volkova V.N., Denisov A.A. Fundamentals of System Theory and System Analysis. – St. Petersburg: Publishing House of SPbPU, 1997, p. 510.
- [2] Messarovich M., Takahara J. Theory of multilevel hierarchical systems. Moscow: “Mir” Publishing House, 1973, p. 344.
- [3] Issues of Increasing the Efficiency of Automated Control of Space Facilities. Manuilov Yu.S. (ed). Ministry of Defense of the Russian Federation, 1999, p. 125.
- [4] Fundamentals of Test Theory. Experimental Testing of Rocket and Space Technology / V.A. Liseikin, N.F. Moiseev, G.G. Saidov, O.P. Frolov: edited by Doctor of Engineering V.K. Chvanov. Moscow: “Mashinostroenie” Publishing House “Polyot” Viart Plus, 2015, p. 260.
- [5] Reklaitis G., Ravindran A., Ragsdell K. Engineering Optimization. In 2 books, book 1. Transl. from English. “Mir” Publishing House, 1986, p. 350.
- [6] Atetkov A.V., Galkin S.V., Zarubin V.S. Optimization Methods: Textbook for Universities edited by V.S. Zarubin, A.P. Krishchenko. 2<sup>nd</sup> edition. Moscow: BMSTU Press, 2003, p. 440.
- [7] Malyshev V.V. Optimization Methods in Problems of System Analysis and Management: textbook. Moscow: MAI-PRINT Publishing House, 2010, p. 440.
- [8] Sukharev A.G., Tikhomirov A.V., Fedorov V.V. Optimization Techniques Course: textbook. 2<sup>nd</sup> edition. Moscow: “Fizmatlit” Publ., 2005, p. 368.
- [9] Zagrebaev A.M., Krynitsa N.A., Kulyabichev Yu.P., Shumilov Yu.Yu. Methods of Mathematical Programming in Problems of Optimization of Complex Technical Systems: textbook. Moscow: MIFI Publ., 2007, p. 32.