

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ РАДИОРЕСУРСА СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ СВЯЗИ ДЛЯ СЕАНСОВ УПРАВЛЕНИЯ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКОЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

С.Х. Зиннуров¹, А.А. Ковальский^{1*}, Г.А. Митряев¹

¹ Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,
Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация

*Адрес для переписки: sake636@mail.ru

Информация о статье

УДК 621.396

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Зиннуров С.Х., Ковальский А.А., Митряев Г.А. Решение задачи оптимального планирования радиоресурса спутниковой системы связи для сеансов управления орбитальной группировкой космических аппаратов // Труды учебных заведений связи. 2018. Т. 4. № 1. С. 67–74.

Аннотация: В статье рассмотрена система спутниковой связи Главного испытательного космического центра. Проведен анализ входящих в ее состав элементов, их задач, системообразующих составляющих, а также используемых технологий связи. Проведено математическое моделирование выполнения сеансов связи. Сформулирована постановка задачи оптимального планирования и оперативного распределения радиоресурса системы спутниковой связи. В качестве метода решения поставленной задачи выбран подход на основе принципа максимума Л.С. Понтрягина.

Ключевые слова: система спутниковой связи, оптимальное планирование сеансов связи, оперативное распределение радиоресурса, принцип максимума Л.С. Понтрягина.

Введение

В настоящий момент наибольшая потребность в обеспечении высокоскоростных каналов спутниковой связи наблюдается в Главном испытательном космическом центре (далее – Центр). Это обусловлено тем, что в Центре имеется потребность в информационном обмене большими объемами специальных данных (телеметрии) в целях управления орбитальной группировкой космических аппаратов, обеспечения видеоконференцсвязи, трансляции телевидения и видеорепортажей с международной космической станции, а также обеспечения запусков ракет-носителей. Для решения этих задач, а также для резервирования проводных каналов связи используется система спутниковой связи (ССС) «Приморка». Система организует сеансы связи и передает около 65% объема всей необходимой информации [1].

Структурно СССР «Приморка» включает орбитальную и наземную составляющие. При этом орбитальная составляющая включает в себя совокупность космических аппаратов связи (КАС), объединенных в орбитальную группировку, кото-

рой управляет наземный автоматизированный комплекс управления. Наземная состоит из центра управления системой, нескольких центральных станций и совокупности периферийных станций.

Проведенный анализ процесса планирования и применения СССР «Приморка» показал, что их сложность обусловлена многоэтапностью технологического процесса оперативного распределения ограниченного радиоресурса орбитальной группировки КАС, а также длительной подготовкой к выполнению сеансов связи. Увеличение группировки в ближайшем будущем приведет к возрастанию требований по их информационному обеспечению, вследствие чего увеличатся требования и к пропускной способности каналов спутниковой связи [2].

Схема распределения радиоресурса типового сегмента СССР «Приморка», изображенная на рисунке 1, состоит из постоянных и предоставляемых по расписанию (требованию) каналов спутниковой связи, при этом на сегмент выделяется ограниченный радиоресурс КАС [3].

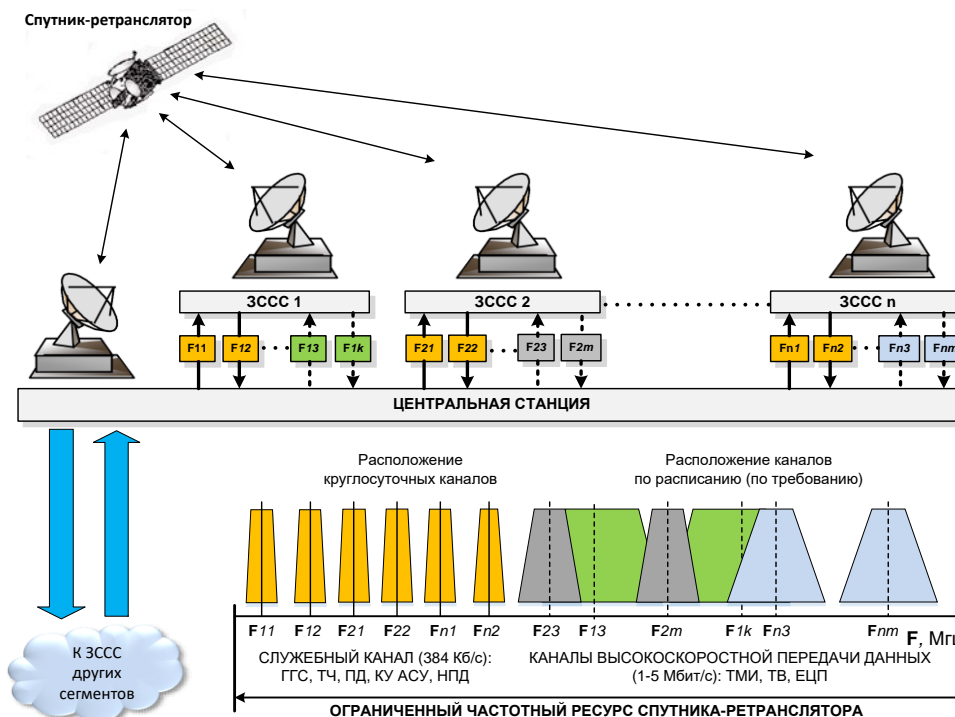


Рис. 1. Схема организации каналов связи ССС «Приморка»

Типовая диаграмма распределения радиоресурса между земными станциями спутниковой связи (ЗССС), изображенная на рисунке 2, показывает количество выделяемого радиоресурса каждой ЗССС во времени. Просуммировав выделение пропускной способности между ЗССС, получим типовую диаграмму распределения радиоресурса сегмента ССС во времени (рисунок 3).

Анализ диаграмм (см. рисунки 2 и 3) позволяет сделать вывод, что выделение радиоресурса происходит под пиковые значения интенсивностей информационных потоков в ЗССС, что приводит к неэффективному использованию радиоресурса при его общем дефиците. Следовательно, все более возрастающие потребности Центра в информационном обмене с использованием спутниковых каналов связи могут привести к срыву его функционала ввиду нехватки радиоресурса, а также срыву задачи по обеспечению резервирования каналов проводной связи [4].

Таким образом, в настоящее время явно прослеживается противоречивая ситуация, связанная с наличием перспективных потребностей в обеспечении высокоскоростных каналов спутниковой связи и ограниченным радиоресурсом орбитальной группировки КАС. Одним из возможных путей выхода из сложившейся ситуации является совершенствование технологической структуры процессов оперативного планирования и распределения радиоресурса ССС «Приморка» в части разработки и внедрения перспективных элементов математического (моделей, методов и алго-

ритмов управления), методического (подходов и методик решения задач планирования) и специального программного обеспечения, что позволит более эффективно распределить радиоресурс при управлении орбитальной группировкой космических аппаратов.

Решение указанной практической задачи требует применения нетривиальных методов в связи с существенной сложностью их формализации, высокими требованиями по оперативности и качеству формируемых решений. При этом в основу принимаемых решений должна быть положена известная концепция ситуационного управления, опирающиеся на нее принципы финитного управления, отвечающие идеологии программно-целевого подхода, и реализующая их технология гибких стратегий [5].

В реальных условиях сформированные оперативные планы задействования ССС в силу целого ряда объективных и субъективных факторов могут выполняться со значительными погрешностями, которые могут существенно отразиться на эффективности распределения ограниченного радиоресурса ССС, что может привести к его нехватке и срыву выполняемых задач по предназначению. В связи с этим целесообразно отказаться от технологии жесткого планирования и перейти к технологии так называемых гибких стратегий управления, обеспечивающих оперативную коррекцию плана задействования ССС с учетом текущей важности сеансов связи, а также наличия у ССС радио- и организационно-технических ресурсов [6].

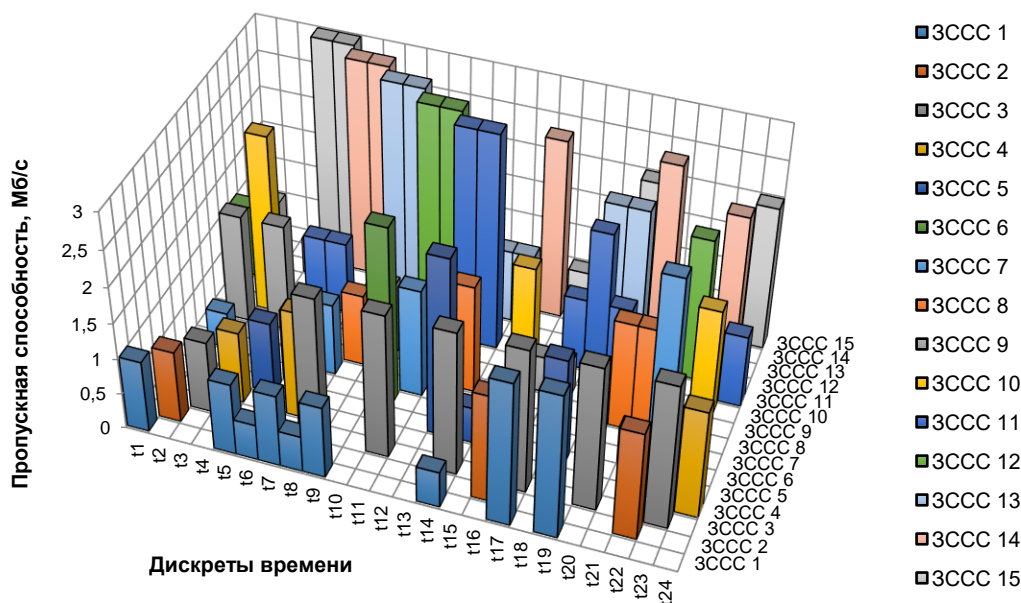


Рис. 2. Типовая диаграмма распределения радиоресурса между ЗССС

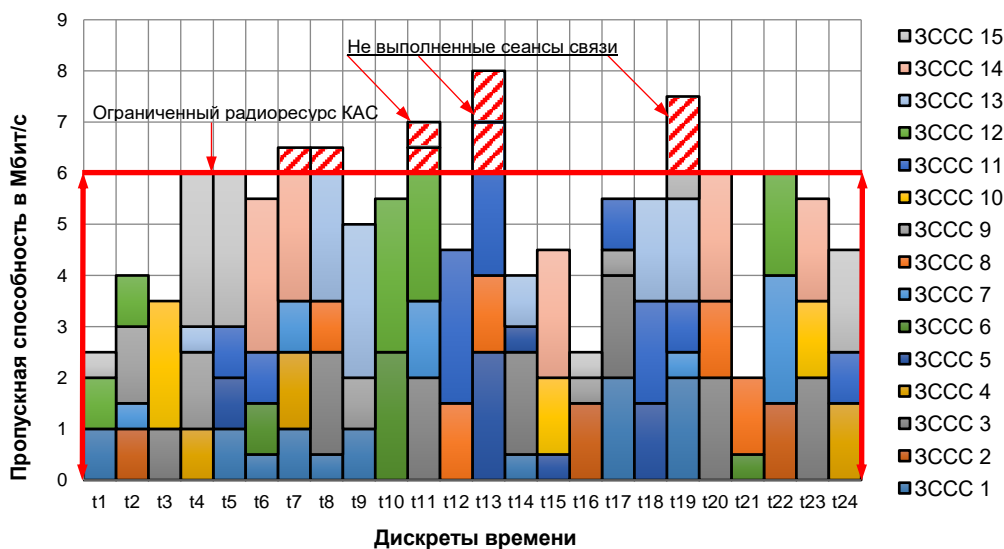


Рис. 3. Типовая диаграмма распределения радиоресурса сегмента ССС

В центр управления ССС «Приморка» целесообразно включить систему оперативного планирования, оснатив ее необходимым алгоритмическим и программным обеспечением, реализованным в виде системы поддержки принятия решений, которая позволит не только автоматизировать наиболее рутинные операции сбора, обработки и анализа информации о состоянии орбитальной группировки КАС и ЗССС, но и обеспечит оперативную генерацию оптимальных вариантов распределения радиоресурса с соответствующей коррекцией сеансов связи.

При создании такой системы можно использовать унифицированные проблемно-ориентированные модули из состава специального математического и программного обеспечения, созданного на основе автоматизированной системы управления

ССС «Приморка». Основные усилия, при этом, можно сосредоточить на разработке непосредственно модуля генерации гибких стратегий оперативного планирования сеансов связи ССС. Алгоритм функционирования этого модуля должен реализовывать оптимальные или локально-оптимальные стратегии в реальном масштабе времени. Для их синтеза задача оперативного планирования и распределения радиоресурса ССС должна быть сформулирована в оптимизационной постановке.

1. Теоретико-множественные построения

Для формализации задачи оптимального планирования осуществим необходимые теоретико-множественные построения [7]. Введем в рассмотрение следующие множества:

1) $A = \{A_v, v = \overline{1, n}\}$ – множество КАС, из состава орбитальной группировки, обладающих радиоресурсом;

2) $B = \{B_\mu, \mu = \overline{1, m}\}$ – множество ЗССС, размещенных на отдельных командно-измерительных комплексах Центра;

3) $C = \{C_\lambda, \lambda = \overline{1, l}\}$ – множество наземных комплексов управления, входящих в состав наземного автоматизированного комплекса управления космическими аппаратами, которым ЗССС предоставляют спутниковые каналы связи;

4) $D = \{O_\chi, \chi = \overline{1, k}\}$ – множество сеансов связи, включенных в состав последовательности сеансов связи, необходимых для информационного обмена в ходе выполнения однотипных задач наземными комплексами управления;

5) $K_{TC} = \{K_\lambda, \lambda = \overline{1, l}\}$ – обобщенная последовательность сеансов связи обеспечения всех наземных комплексов управления, где $D \times D \times \dots \times D \rightarrow K_\lambda, \lambda = \overline{1, l}$ – последовательности сеансов связи для λ -го комплекса управления.

Временной ресурс задается временным интервалом $T = [t_0, t_f]$, отведенным на выполнение K_{TC} , а также множеством интервалов времени, так называемых, контактного потенциала R , потенциала доступности Q и канального потенциала E .

Контактный потенциал (рисунок 4) представляет собой совокупность временных интервалов возможного взаимодействия v -го КАС μ -ой ЗССС, обусловленного пространственно-временными условиями наличия КАС в зоне радиовидимости соответствующей ЗССС:

$$R = [r_{v\mu}(t): r_{v\mu} \in \{0; 1\}; v = \overline{1, n}; \mu = \overline{1, m}, t \in T].$$

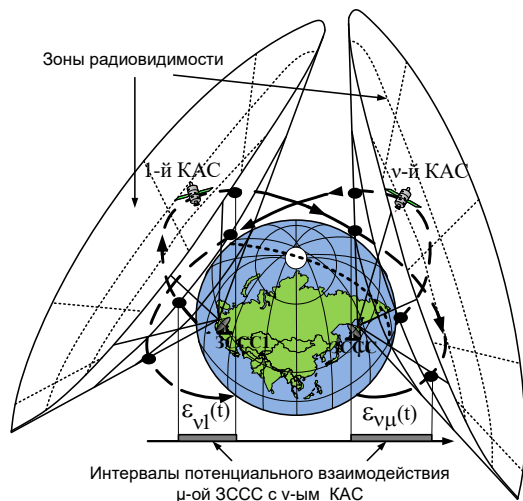


Рис. 4. Контактный потенциал взаимодействия μ -ой ЗССС с v -ым КАС

Потенциал доступности представляет собой совокупность временных интервалов готовности μ -ой ЗССС к выполнению сеанса связи для предоставления канала связи λ -му наземному комплексу

управления, обусловленной ее исправностью, завершенностью проведения на ней профилактических работ и наличием квалифицированного обслуживающего персонала дежурных смен, а также отсутствием ограничений (запретов) на использование, обусловленных задействованием для выполнения специальных работ:

$$Q = [q_{\mu\lambda}(t): q_{\mu\lambda} \in \{0; 1\}; \mu = \overline{1, m}; \lambda = \overline{1, l}, t \in T].$$

Канальный потенциал представляет собой совокупность временных интервалов, когда μ -ая ЗССС готова к выполнению χ -го сеанса связи для обеспечения λ -го наземного комплекса управления каналом спутниковой связи, используя радиоресурс v -го КАС:

$$R \times Q \times D \rightarrow E = \left[\varepsilon_{v\mu\lambda\chi}(t): \varepsilon_{v\mu\lambda\chi} \in \{0; 1\}; v = \overline{1, n}, \mu = \overline{1, m}; \lambda = \overline{1, l}; \chi = \overline{1, k}; t \in T \right].$$

Для составления модели управляемого процесса выполнения сеансов связи будем использовать линейную нестационарную дифференциальную динамическую систему в модифицированной форме Коши [8]:

$$\dot{X}(t) = B(t) \circ U(t), \tag{1}$$

где $X(t) = [x_{\lambda\chi}(t), \lambda = \overline{1, l}; \chi = \overline{1, k}]$ – $l \times k$ -мерная матрица переменных состояния последовательности сеансов связи для наземных комплексов управления λ -го типа;

$$B(t) = \left[b_{v\mu\lambda\chi}(t): b_{v\mu\lambda\chi}(t) = \varepsilon_{v\mu\lambda\chi}(t) \times \omega_{v\mu\lambda\chi} \right]_{v = \overline{1, n}; \mu = \overline{1, m}; \lambda = \overline{1, l}; \chi = \overline{1, k}} -$$

$n \times m \times l \times k$ -мерная матрица потенциальной возможности обеспечения последовательностью сеансов связи, элементы которой определяются произведением соответствующих элементов матрицы $E(t)$ канального потенциала на элементы матрицы $\Omega = [\omega_{v\mu\lambda\chi}: v = \overline{1, n}; \mu = \overline{1, m}; \lambda = \overline{1, l}; \chi = \overline{1, k}]$, скорости передачи соответствующих типов информации;

$$U(t) = \left[u_{v\mu\lambda\chi}(t): u_{v\mu\lambda\chi} \in \{0; 1\} \right]_{v = \overline{1, n}; \mu = \overline{1, m}; \lambda = \overline{1, l}; \chi = \overline{1, k}} -$$

$n \times m \times l \times k$ -мерная матрица управляющих параметров.

Учитывая операцию матричного умножения, возможно обобщенную модель выполнения последовательности сеансов связи представить в виде:

$$\dot{x}_{\lambda\chi}(t) = \sum_{v=1}^n \sum_{\mu=1}^m b_{\lambda\chi}(t) u_{\lambda\chi}(t); \lambda = \overline{1, l}; \chi = \overline{1, k}.$$

2. Формализация системы ограничений

Первым шагом формализации является формальное описание системы всех ограничений: функциональных, пространственно-временных, ресурсных и краевых.

1) Функциональные пространственно-временные ограничения формализуются с использованием модели управляемого процесса выполнения последовательности сеансов связи следующим образом:

$$\Phi(\dot{X}, X, U, T) = \dot{X}(t) - B(t) \circ U(t) = 0.$$

2) Технические ограничения на выполнение последовательности сеансов связи состоят из следующих:

$\sum_{\chi=1}^k b_{\lambda\chi}(t) u_{\lambda\chi}(t) \leq C_{\lambda}, \lambda = \overline{1, l}, \chi = \overline{1, k}$ - ограничение на одновременное проведение сеансов связи;

$\sum_{\lambda \in C_v} \sum_{\chi=1}^k b_{\lambda\chi}(t) u_{\lambda\chi}(t) \leq D_{C_v} - (card(C_v) + 1),$

$\lambda = \overline{1, l}, \chi = \overline{1, k}, v = \overline{1, n}$ - ограничение на радиоресурс КАС.

3) Временные ограничения или ограничения на временной ресурс являются особым видом ограничений, которые также можно разделить на дифференциальные и интегральные. Под первыми понимается условие принадлежности текущего момента времени t процесса выполнения последовательности сеансов связи заданному временному интервалу $T = [t_0, t_f]: t \in T$, отведенному на выполнение последовательности сеансов связи, а вторые учтены в модели выполнения последовательности сеансов связи в форме, так называемого, канального потенциала $E = R \times Q \times D$.

4) Краевые или граничные условия накладываются на матрицу X состояния последовательности сеансов связи. При этом в обязательном порядке устанавливаются граничные условия на левом конце фазовой траектории движения системы, характеризуемом моментом времени $t = t_0: X(t_0) = X_0$.

Краевые условия, накладываемые на матрицу X на правом конце фазовой траектории, могут быть сформированы в виде некоторой области Θ_x :

$$X(t_f) \in \Theta_x = \left\{ X: \begin{matrix} x_{\lambda\chi}(t_f) \in [x_{\lambda\chi}^{\min}, x_{\lambda\chi}^{\max}], \\ x_{\lambda\chi}^{\min} = 0, 9x_{\lambda\chi}^{\max}, \lambda = \overline{1, m}, \chi = \overline{1, k} \end{matrix} \right\}, \quad (2)$$

несколько «сужающие» «подвижный правый конец», но обеспечивающие поиск не только оптимизационных, но и сатисфакционных (удовлетворяющих всей системе ограничений) решений.

3. Формализация вектора показателей качества

Показатель качества, иногда называемый функционалом качества, является скалярным алгебраическим выражением, содержащим в качестве

своих аргументов матрицу X фазовых координат состояния КСС и матрицу управляющих параметров U . Показатель качества в формализованном виде определяет пожелания к качеству переходного процесса управляемого движения системы в фазовом пространстве (пространстве состояний). Для решения нашей задачи использован терминальный функционал Майера, имеющий представление следующего вида:

$$J(X(t_f), X_f) = (X(t_f) - X_f)^2 = \sum_{\lambda=1}^l \sum_{\chi=1}^k (x_{\lambda\chi}(t_f) - x_{\lambda\chi f})^2, \quad (3)$$

где $J(X(t_f), X_f)$ имеет смысл полноты выполнения запланированных последовательностей сеансов связи от желаемых, а X_f и $X(t_f)$ - матрицы требуемого (предельно-возможного) и финального состояния последовательностей сеансов связи.

4. Формализация критерия оптимальности

Критерий оптимальности (оптимизации) или, как его еще называют, критерий выбора оптимальной альтернативы, в обобщенном виде предъявляет требования к выбору оптимального управления выполнением сеанса связи. При его конструировании используются показатели качества, спроектированные на предыдущем шаге формализации задачи оптимального управления. Критерий должен однозначно определять состав используемых показателей и направление устремления их в процессе оптимизации к экстремуму (extr) - максимуму (max) или минимуму (min). Для решения данной оптимизационной задачи с «уни-предпочтением» (авторск. с одним показателем качества) критерий оптимизации будет иметь вид:

$$U_{opt}(T) = \operatorname{argmin}_{U \in U_{\Delta}} \{J(X(t_f), X_f)\}, \quad (4)$$

и означает, что оптимальной реализацией управления СС на временном интервале T будет $U_{opt}(T)$, являющаяся аргументом, минимизирующим показатель качества $J(X(t_f), X_f)$ на множестве U_{Δ} допустимых альтернатив управления, то есть альтернатив, удовлетворяющих всей системе ограничений.

Область допустимых альтернатив для рассматриваемой формализации может быть сформирована в следующем виде:

$$U_{\Delta} = \left\{ \begin{matrix} U(t) | \Phi(\dot{X}, X, U, T) = 0; \sum_{\chi=1}^k b_{\lambda\chi}(t) u_{\lambda\chi}(t) \leq C_{\lambda}, \lambda = \overline{1, l}; \chi = \overline{1, k}; \\ \sum_{\lambda \in C_v} \sum_{\chi=1}^k b_{\lambda\chi}(t) u_{\lambda\chi}(t) \leq D_{C_v} - (card(C_v) + 1)\Delta d, \lambda = \overline{1, l}; \chi = \overline{1, k}; \\ X(t_f) \in \Theta_x, \quad t \in T \end{matrix} \right\}, \quad (5)$$

где учтена система функциональных пространственно-временных ограничений, технических ограничений, краевых условий и ограничений на временной ресурс.

5. Динамическая интерпретация задачи

Динамическая интерпретация задачи оптимального планирования выполнения сеансов связи позволяет для поиска решения сформулированной задачи использовать формализм принципа максимума Л.С. Понтрягина, технология практического применения которого предполагает выполнение следующих действий.

1) Для начала введем в рассмотрение $l \times k$ -мерную матрицу (совпадающую по размерности с матрицей X), так называемых, сопряженных переменных $P(t) = [p_{\lambda\chi}(t), \lambda = \overline{1, l}, \chi = \overline{1, k}]$.

2) Затем с использованием матрицы $P(t)$, а также модели (1) выполнения сеансов связи, показателя качества (3) и критерия оптимизации (4) решаемой задачи оптимального планирования и распределения ресурса ССС сконструируем скалярную функцию Гамильтона (гамильтониан) в следующем обобщенном виде:

$$H(t) = P(t) * \dot{X}(t) = P(t) * B(t) \circ U(t) = \sum_{\lambda=1}^l \sum_{\chi=1}^k p_{\lambda\chi}(t) \varepsilon_{\lambda\chi}(t) \omega_{\lambda\chi} u_{\lambda\chi}(t).$$

3) Сформируем канонические соотношения, позволяющие получить математические модели прямой и сопряженной систем:

$$\dot{X}(t) = \left[\frac{\partial H}{\partial P} \right]^T = B(t) \circ U(t);$$

$$\dot{P}(t) = - \left[\frac{\partial H}{\partial X} \right]^T = \left[\frac{\partial g(U, X)}{\partial X} \right]^T.$$

Причем первое каноническое соотношение, являющееся моделью (1) прямой системы, служит для проверки правильности составления гамильтониана.

4) Сформируем условия стационарности гамильтониана, позволяющие получить так называемую структуру оптимального управления или, как ещё говорят, сформировать оптимальную стратегию управления на множестве U_{Δ} допустимых альтернатив (5) в каждый момент времени t , принадлежащий временному интервалу T управления:

$$U_{opt}(t) = \arg \max_{U \in U_{\Delta}} H(P(t), X(t), U(t)), \forall t \in T. \quad (6)$$

Считается, что использование условия стационарности принципа максимума позволяет свести сформулированную оптимизационную задачу, имеющую, в общем случае, континуальное (беско-

нечное) множество допустимых решений, к стандартной краевой задаче. Алгоритм решения такой задачи сводится к выбору значений матрицы P сопряженных переменных на левом конце траектории – $P(t_0) = P_0$, обеспечивающих выполнение краевых условий задачи (2) с использованием управления, формируемого на основе условия стационарности. Поскольку краевые условия используются при формировании множества U_{Δ} допустимых альтернатив, то формулировка краевой задачи может быть еще более сокращена.

Требуется найти такую матрицу P_0 значений сопряженных переменных на левом конце фазовой траектории движения прямой и сопряженной систем, при которых будет найдено допустимое решение (принадлежащее множеству U_{Δ} допустимых альтернатив) с использованием управления $U(t)$, $t \in T$, полученного из условия стационарности (6). При этом утверждается, что полученное решение будет оптимальным, то есть условие стационарности предоставляет нам необходимые условия получения оптимального решения. Кроме этого, доказано, что для линейных динамических систем, к классу которых относится и рассматриваемая нами модель (1), условия стационарности принципа максимума являются не только необходимыми условиями оптимальности, но и достаточными. То есть, полученное с их помощью оптимальное решение является еще и единственным.

6. Выбор подхода и алгоритма решения краевой задачи для поиска оптимального решения

Для получения оптимального решения организуется итерационный процесс, предполагающий последовательное приближение от некоторого начального решения, называемого диспетчерским, к требуемому – оптимальному. С этой целью каким-либо образом может быть задано начальное приближение матрицы сопряженных переменных $P^{(0)}(t_0) = P_0^{(0)}$ и организован итерационный процесс его уточнения с целью максимально полного удовлетворения краевым условиям задачи оптимального планирования. С целью определения направления, в котором должна идти коррекция матрицы P_0 , необходимо сформировать матрицу невязок краевых условий $\Delta X_f^{(j)} = X^{(j)}(t_f) - X_f$, где j – номер итерации решения краевой задачи.

Известно, что скорость сходимости градиентных процедур поиска оптимальных решений, а именно к этому классу относятся процедуры решения краевых задач, во многом зависит от качества первого приближения, называемого диспетчерским решением, а точнее от близости его к искомому оптимальному. Используемое условие трансверсальности для оценки первого приближения матрицы P сопряженных переменных на правом конце траектории – $P(t_f) = P_f$, которые могут быть представлены в следующем виде:

$$P(t_f) = - \left[\frac{\partial h(X(t_f), X_f^3)}{\partial X(t_f)} \right]^T. \quad (7)$$

Затем с использованием второго канонического соотношения:

$$\dot{P}(t) = - \left[\frac{\partial H}{\partial X} \right]^T = \left[\frac{\partial g(U, X)}{\partial X} \right]^T,$$

определяющего модель сопряженной системы, может быть произведен прогноз значений матрицы P на левый конец фазовой траектории – P_0 . Однако в общем случае этот прогноз должен осуществляться совместно с прямой системой. Для этого необходимо задать ее краевые условия на правом конце фазовой траектории такие, которые в наибольшей степени соответствовали бы требуемым и для получения которых программа управления $U(t)$, $t \in T$ была бы известна и принадлежала бы множеству допустимых альтернатив U_Δ , то есть являлась бы неким «сатисфакторным» (*от англ. satisfactory – удовлетворительный, приемлемый, достаточный*) решением. Такое решение называется опорным, так как весь дальнейший итерационный процесс поиска оптимального решения опирается на полученный с его помощью результат.

При практической реализации краевых задач пользуются, как правило, методом последовательных приближений (итераций). Суть решения любой краевой задачи сводится к отысканию такого решения заданной системы дифференциальных уравнений, которое обеспечило бы удовлетворение требуемых краевых (граничных) условий. Следует заметить, что для решения краевой задачи необходимо иметь свободные параметры управления. Для единственности решения краевой задачи число свободных параметров (с математической точки зрения произвольных постоянных) должно быть равно числу краевых условий. При решении поставленной задачи предполагается, что все, ранее наложенные ограничения на параметры активного участка, должны быть выполнены. Решение краевой задачи условно можно разбить на два следующих этапа:

1) составление системы дифференциальных уравнений движения при условии, что ни один управляющий параметр не возмущен, и при условии последовательного возмущения одного из управляющих параметров. Таким образом, необходимо решить составленную систему уравнений $(n+1)$ раз, где n – число управляющих параметров;

2) на основании информации, полученной на первом этапе, необходимо составить и решить систему линейных уравнений с целью отыскания уточненных значений управляющих параметров.

Эта процедура повторяется до тех пор, пока полученные краевые условия не будут отличаться от требуемых не более чем на заданные заранее величины. На этом заканчивается решение краевой задачи.

Заключение

Таким образом, для получения оптимального решения организуется итерационный процесс, предполагающий последовательное приближение от некоторого начального решения, называемого диспетчерским, к требуемому – оптимальному. С этой целью может быть задано начальное приближение матрицы сопряженных переменных $P(t_0) = P_0$ и организован итерационный процесс ее уточнения до выполнения условий $|J^{(j-1)} - J^{(j)}| \leq \varepsilon$, где ε – малый параметр, характеризующий требуемую точность вычисления плана.

Для получения диспетчерского решения можно воспользоваться двумя приемами. В первом случае, который может быть назван ручным, следует в качестве диспетчерского выбрать любой допустимый по ограничениям (сатисфакционный) план. Во втором случае, который может быть назван автоматизированным, следует получить субоптимальный план в предположении, что на интервале планирования $[t_0, t_f]$ характер сопряженных переменных может представляться кусочно-постоянными функциями, численные значения которых в моменты времени возможного по тем или иным причинам переключения управления определяется выражением для модифицированных условий трансверсальности:

$$\begin{aligned} P(t) &= - \left[\frac{h(X(t), X_f^3)}{X(t)} \right]^T = \\ &= - \left[\frac{(X(t) - X_f^3)^T \Lambda (X(t) - X_f^3)}{X(t)} \right]^T = \\ &= - \left[\frac{\sum_{\lambda=1}^l \sum_{\chi=1}^k \alpha_{\lambda\chi} (x_{\lambda\chi}(t) - x_{\lambda\chi f}^3)^2}{x(t)} \right]^T = \\ &= [2 \times \alpha_{\lambda\chi} (x_{\lambda\chi f}^3 - x_{\lambda\chi}(t)), \lambda = \overline{1, l}, \chi = \overline{1, k}]. \end{aligned} \quad (8)$$

Итерационный процесс последовательного уточнения матрицы P_0 может производиться с использованием известных методов решения краевых задач и численной оптимизации. В частности, в рассматриваемом случае можно воспользоваться методом Крылова-Черноушко, методом Ньютона и его модификациями, градиентными и субградиентными методами, например, покоординатного спуска, а также методами штрафных функций.

Результаты экспериментальных исследований по оцениванию близости полученного результата к оптимальному, показывают снижение качества локально-оптимального управления по сравнению с оптимальным не более чем на 10÷15 %, что может быть признано вполне приемлемым и позволяет повысить эффективность используемого радиоресурса на 40%, что согласуется с результатами, представленными в работах [9, 10, 11].

Список используемых источников

1. Ковальский А.А., Терещенко С.В., Шаповалов А.А. Модели и алгоритмы статистического уплотнения разнородного трафика в земных станциях спутниковой связи // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2016. № 654. С. 34–42.
2. Зиннуров С.Х., Ковальский А.А., Кузичкин А.В. Динамическое распределение радиоресурса ретранслятора с учетом неоднородности трафика и запаздывания при управлении // Известия института инженерной физики. 2014. Т. 4. № 34. С. 51–56.
3. Кузичкин А.В., Зиннуров С.Х., Ковальский А.А. Оперативное распределение радиоресурса спутника-ретранслятора при нестационарном входном потоке сообщений с учетом запаздывания в управлении // Инженерная физика. 2015. № 6. С. 49–57.
4. Топорков И.С., Ковальский А.А., Зиннуров С.Х. Модель и алгоритм управления процессом резервирования ресурса сети спутниковой связи при обслуживании мультисервисного нестационарного трафика // Известия института инженерной физики. 2016. Т. 1. № 39. С. 37–47.
5. Мануйлов Ю.С., Птушкин А.И., Стародубов В.А. Методологические основы применения гибких стратегий управления космическими аппаратами. СПб: МО РФ, 2002. 102 с.
6. Жуков С.Е., Ковальский А.А., Квасов М.Н., Митряев Г.А. Оперативное распределение радиоресурса системы спутниковой связи в целях обеспечения управления космическими аппаратами // Труды Научно-исследовательского института радио. 2017. № 2. С. 29–36.
7. Мануйлов Ю.С., Новиков Е.А. Метод и алгоритм оперативного планирования работы наземных средств на основе принципа гибких стратегий // Сборник алгоритмов и программ типовых задач. СПб: МО РФ, 2005. Вып. 23. С. 3–17.
8. Мануйлов Ю.С., Новиков Е.А. и др. Алгоритм локально-оптимального управления комплексом операций обслуживания однотипных объектов // Сборник алгоритмов и программ типовых задач. СПб: МО РФ, 2004. Вып. 22. С. 3–17.
9. Ковальский А.А. Исследование адаптивного мультиплексирования и диспетчеризации мультисервисного трафика в каналообразующей аппаратуре земных станций спутниковой связи. Часть 1. обоснование и постановка задачи // Труды учебных заведений связи. 2017. Т. 3. № 1. С. 57–65.
10. Ковальский А.А. Исследование адаптивного мультиплексирования и диспетчеризации мультисервисного трафика в каналообразующей аппаратуре земных станций спутниковой связи. Часть 2. Модели адаптивного мультиплексирования трафика // Труды учебных заведений связи. 2017. Т. 3. № 2. С. 84–92.
11. Ковальский А.А. Исследование адаптивного мультиплексирования и диспетчеризации мультисервисного трафика в каналообразующей аппаратуре земных станций спутниковой связи. Часть 3. Алгоритмы диспетчеризации // Труды учебных заведений связи. 2017. Т. 3. № 3. С. 78–85.

* * *

TASK'S SOLUTION OF SATELLITE COMMUNICATION SYSTEM'S OPTIMAL RADIO RESOURCE PLANNING FOR THE SESSIONS OF SPACE APPLIANCE'S ORBITAL GROUP MANAGING

S. Zinnurov¹, A. Kovalsky¹, G. Mitryaev¹

¹Military space academy of A.F. Mozhaysky, St. Petersburg, 197198, Russian Federation

Article info

Article in Russian

For citation: Zinnurov S., Kovalsky A., Mitryaev G. Task's Solution of Satellite Communication System's Optimal Radio Resource Planning for the Sessions of Space Appliance's Orbital Group Managing // Proceedings of Telecommunication Universities. 2018. Vol. 4. Iss. 1. PP. 67-74.

Abstract: *The satellite communication system of the main test space center is considered. The analysis of the elements which are its part, their tasks, backbone components, and also the used technologies of communication is carried out. Mathematical modeling of execution of communication sessions is carried out. The problem definition of optimum planning and operational distribution of a radio resource of satellite communication system is formulated. As a solution's method of an objective approach on the basis of the maximum principle of L.S. Pontryagin is selected.*

Keywords: *satellite communication system, optimum planning of communication sessions, operational distribution of a radio resource, maximum principle of L.S. Pontryagin.*