

УДК 621.396

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ СТРУКТУРНОЙ ДИНАМИКИ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОГО РЕСУРСА СЕТИ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ СТАНДАРТА DVB-RCS

Е. А. Новиков,

канд. техн. наук, доцент

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

Рассмотрен стандарт использования спутникового ресурса DVB-RCS, в частности структура частотно-временного ресурса «обратных» каналов спутников-ретрансляторов. Определены основные недостатки используемых алгоритмов решения задачи оперативного распределения ресурса спутника-ретранслятора. Сформулирована и решена задача оптимального планирования ресурса «обратного» канала на основе моделей структурной динамики.

Ключевые слова — спутниковая связь, DVB-RCS, MF-TDMA, обратный канал, частотно-временной ресурс.

Введение

Инновационное развитие экономики России требует среди прочего интенсивного развития телекоммуникационной инфраструктуры, неотъемлемой частью которой в настоящее время является космическая составляющая. Использование спутниковых каналов передачи информации зачастую является единственным возможным вариантом организации связи и передачи данных. Анализ тенденций развития систем спутниковой связи говорит о росте функциональных возможностей и снижении стоимости спутникового оборудования как наземного, так и космического базирования. При этом у потребителя появляется возможность выбирать ту или иную технологию построения сети спутниковой связи исходя из своих потребностей и возможностей.

В настоящее время наиболее эффективным с точки зрения использования спутникового ресурса считается стандарт Digital Video Broadcasting — Return Channel via Satellite (DVB-RCS), определенный ETSI EN 301 790 v1.3.1, 2003 г. [1], а также его модификация DVB-RCS2 [2–4]. В России ведущим разработчиком бортового телекоммуникационного оборудования на основе стандарта DVB-RCS является ОАО «Научно-производственный центр «Вигстар». Основные принципы, заложенные в стандарте DVB-RCS, используются НПЦ «Вигстар» при разработке многофункцио-

нальных бортовых цифровых платформ для перспективных спутниковых платформ военного назначения.

Особенности решения задачи распределения частотно-временного ресурса «обратного» канала DVB-RCS

На этапе вхождения в связь спутниковый терминал (СТ) и центральная станция (ЦС) договариваются о применении тех или иных возможностей для обеспечения наибольшей функциональности. С технологической точки зрения стандарт DVB-RCS опирается на стандарт DVB-S2 при передаче информации в «прямом» канале и метод доступа с частотно-временным разделением каналов (MF-TDMA) при передаче информации в «обратном» канале, который лучше всего подходит для применения в спутниковых ретрансляторах с низкой линейностью и в условиях помех. Дополнительно в поток подмешивается управляющая информация и пакеты временной синхронизации. Обратный канал (в сторону ЦС) организуется с использованием MF-TDMA с инкапсуляцией MPE/DVB или LLC/ATM. Дополнительно оборудование ЦС осуществляет авторизацию терминалов, подстройку их параметров (уровня передачи, частоты, временных параметров).

Необходимо отметить, что стандарт [1] описывает физическую и логическую структуры кана-

ла спутниковой связи DVB-RCS, в то время как решение вопросов организации управления каналным ресурсом оставлено за рамками стандарта и, фактически, определяется каждым производителем оборудования самостоятельно. Очевидно, что от способа оперативного распределения каналного ресурса спутника-ретранслятора зависят показатели качества обслуживания абонентского терминала. При этом специфика спутниковой связи, заключающаяся в возможном разрушении данных при передаче информации и централизованном распределении ресурса, определяет повышенные требования к уровню качества обслуживания.

Анализ работ, посвященных вопросам оперативного распределения ресурса спутника-ретранслятора [5–9] показал, что среди требований, предъявляемых к алгоритмам распределения ресурса, как правило, выделяются следующие:

1) время решения задачи распределения каналного ресурса должно быть не более 100–200 мс [7];

2) алгоритм должен гарантировать выделение абоненту зарезервированный объем каналного ресурса [5] с вероятностью не ниже заданной;

3) алгоритм должен гарантировать абоненту время задержки, не превышающее предварительно заказанного значения [5];

4) алгоритм должен гарантировать абоненту, что неиспользуемый ресурс канала будет распределен между абонентами пропорционально объему уже выделенного ресурса и что при подключении новых абонентов избыточный ресурс будет перераспределен [5].

При этом в работах [5, 10–17] рассматриваются эвристические алгоритмы распределения каналного ресурса спутника-ретранслятора, являющиеся модификацией аналогичных алгоритмов для проводных сетей:

— иерархический циклический алгоритм (HRR) [11, 12];

— алгоритмы, основанные на фиксированном приоритете потоков [16];

— алгоритмы, основанные на растущем приоритете потоков [14].

Недостатками указанных алгоритмов являются отсутствие решения задачи распределения каналного ресурса для многочастотного варианта, отсутствие строгого математического обоснования выбора и неоптимальность получаемых решений. Последнее обстоятельство говорит о неэффективном использовании имеющегося ресурса, особенно в условиях повышенного спроса абонентов на услуги спутниковой связи.

В работе [13] приводится постановка задачи линейного программирования, решение которой позволяет определить такие параметры фрейма, как количество частотных и временных позиций

внутри фрейма, а также длительность позиции по частоте и времени.

Наиболее успешное решение задачи оптимального оперативного распределения ресурса спутника-ретранслятора приведено в работе [7]. При этом в ней изначально формулируется задача стохастического нелинейного целочисленного программирования, которая, однако, затем сводится к задаче нелинейной безусловной оптимизации с ослаблением ограничения целочисленности переменных до непрерывных значений и последующим эвристическим поиском целочисленных оптимальных значений. Полученное решение позволило обосновать возможный прирост коэффициента использования арендуемой пропускной способности на 16 %.

Характерными особенностями подходов [7, 8, 18] к решению задач оперативного распределения ресурса «обратного» канала являются, во-первых, предположение о случайном (стохастическом) характере поступления запросов абонентов сети спутниковой связи, а, во-вторых, использование для синтеза структуры фрейма методов только тематического программирования, опирающегося на статические модели принятия решений.

Очевидно, что использование подхода, основанного на стохастическом детерминизме, для описания неопределенности системы и среды (граница, разделяющая исследуемую систему и среду, достаточно условна и определяется исследователем в каждом конкретном случае исходя из целей исследования), с одной стороны, прочно зарекомендовало себя как апробированный аппарат получения вероятностных оценок достижения целевых показателей системы, а, с другой стороны, нередко заставляет исследователей существенно упрощать реальные представления о системе и среде в угоду получению аналитических оценок. Тогда как реальное поведение системы и (или) среды зачастую трудно поддается формализации, а упрощенная формализация в итоге приводит к существенному снижению эффективности принятия решений в реальных системах.

В случаях, когда затруднительно пользоваться стохастическими методами ввиду отсутствия информации о распределении вероятностей параметров системы и среды, возможно применение нечетких методов [19] при математических расчетах в слабо формализуемых областях или детерминированных методов, вообще не использующих стохастическую или нечеткую информацию о системе и среде.

В свою очередь использование методов математического программирования существенно ограничивает возможности по выработке эффективных решений при организации оперативного управления ресурсом «обратного» канала, по-

сколькx статические модели, по определению, не подчиняются принципу причинности и не обладают прогнозными свойствами. При этом динамические модели, например на основе дифференциальных уравнений, нашли широчайшее применение при решении достаточно сложных задач управления орбитальным движением космического аппарата, а также во многих других областях науки и техники.

Постановка и решение задачи оптимального планирования частотно-временного ресурса «обратного» канала

Предлагается в задачах распределения ресурса «обратного» канала по методу MF-TDMA использовать научно-методический аппарат на основе моделей структурной динамики [20], описываемых системой линейных дифференциальных уравнений в модифицированной форме Коши:

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{B} \circ \mathbf{U}(t), \quad t \in [0, T_f], \quad (1)$$

где $\mathbf{X}(t) = \text{col}(x_v(t), v = \overline{1, n})$ — n -мерный вектор объемов информации, передаваемых в рамках одного фрейма по каждому «обратному» каналу, $v = \overline{1, n}$ — номер СТ; $\mathbf{B} = \text{col}(b_v, v = \overline{1, n})$ — n -мерный вектор скоростей передачи информации по «обратному» каналу, определяемых конфигурацией модема СТ (возможные значения компонентов вектора \mathbf{B} приведены в таблице); $\mathbf{U}(t) = [u_{v\mu}(t)] \in \{0, 1\}$, $v = \overline{1, n}, \mu = \overline{1, m}$ — $n \times m$ -мерная матрица управляемых параметров, определяющая конфигурацию обратного канала в момент времени $t \in [0, T_f]$, $\mu = \overline{1, m}$ — номер частотного интервала минимальной ширины; T_f — длительность фрейма; $[\circ]$ — специальная операция матричного умножения, выполняемая по правилу $\dot{x}_v(t) = \sum_{\mu=1}^m b_v u_{v\mu}(t)$.

Примерные значения скоростей передачи информации приведены в таблице в зависимости от вида модуляции M и скорости кода R_k для фиксированных символьной скорости и минимальной ширины частотного интервала (например, для КА «Экспресс АМ-22» в Ку-диапазоне $\Delta f_\mu = 200$ кГц, $\mu = \overline{1, m}, R_s = 156$ ксимв/с, $T_f = 360$ с).

Модель распределения ресурса «обратного» канала (1) должна быть дополнена системой ограничений, к которым относятся технические и временные ограничения, а также краевые условия. Технические ограничения могут быть сформированы следующим образом:

— ограничение на использование одного частотного канала более чем одним СТ

$$\sum_{v=1}^n u_{v\mu}(t) - 1 = 0, \quad \forall \mu = \overline{1, m}; \quad (2)$$

— ограничение на количество частотных каналов, занимаемых одним СТ:

$$\begin{aligned} \sum_{\mu=1}^m u_{v\mu}(t) - 1 = 0, \quad \text{или} \quad \sum_{\mu=1}^m u_{v\mu}(t) - 2 = 0, \\ \text{или} \quad \sum_{\mu=1}^m u_{v\mu}(t) - 4 = 0, \\ \text{или} \quad \sum_{\mu=1}^m u_{v\mu}(t) - 8 = 0, \quad \forall v = \overline{1, n}. \end{aligned} \quad (3)$$

Временные ограничения могут быть сформированы следующим образом:

— интегральное временное ограничение

$$t \in [0, T_f]; \quad (4)$$

— дифференциальное временное ограничение, определяющее длительность интервала дискретизации, равного длительности одного тайм-слота (например, 4 мс):

$$\Delta t = t_{ts}. \quad (5)$$

Краевые условия должны быть заданы в форме «подвижного» правого конца:

$$x_v(T_f) \in [x_v^{\min}, x_v^{\max}], \quad v = \overline{1, n}, \quad (6)$$

где $x_v^{\min} = b_v t_{ts}$ — объем информации, переданный в течение одного тайм-слота за время t_{ts} ; x_v^{\max} — объем информации, планируемый к передаче в соответствии с классом сервиса, заказанным абонентом, и включающий в себя объем информации, поставленный в очередь после распределения ресурса предыдущего фрейма.

Учет ограничений (2)–(6), накладываемых на модель (1), позволяет сформировать множество допустимых альтернатив управления U_Δ .

■ Скорость передачи информации в зависимости от конфигурации модема

Конфигурация модема	Вид модуляции								
	BPSK	QPSK				8PSK			
	Скорость кода R_k								
	1/2	1/2	2/3	3/4	7/8	1/2	2/3	3/4	7/8
Скорость передачи, Кбит/с	78	156	208	234	273	234	312	351	409,5

Показатель качества решения задачи распределения ресурса «обратного» канала может быть сформирован в виде функционала Майера [21]

$$J_1(T_f) = \sum_{i=1}^s \alpha_i \left(\sum_{v \in Q_i} x_v(T_f) - y_i \right)^2, \quad (7)$$

отражающего уровень требований к обеспечению дифференцированного качества QoS (Quality of Service) по классам сервиса, где $\mathbf{A} = \text{col}(\alpha_i, i = \overline{1, s})$ — s -мерный вектор удельных весовых коэффициентов (штрафов) за отказ в полном обслуживании абонента соответствующего класса сервиса; $Q_i, i = \overline{1, s}$ — непересекающиеся множества индексов абонентов, сгруппированные по классам сервиса; $y_i = \sum_{v \in Q_i} x_v^{\max}, i = \overline{1, s}$ — суммарный объем информации, накопленный в буфере и сгруппированный по классам сервиса.

Следует отметить, что показатель качества (7) может быть преобразован к более удобному для дальнейшего использования виду

$$J_2(T_f) = \sum_{i=1}^s \alpha_i \sum_{v \in Q_i} \left(x_v^{\max} - x_v(T_f) \right)^2. \quad (8)$$

В таком виде показатель качества точно выражает штраф за невыполнение заявки на передачу определенного объема информации с учетом заданного класса сервиса.

С учетом соотношения (8) может быть сформулирована задача динамической оптимизации

$$\mathbf{U}_{\text{opt}}(t) = \arg \min_{\mathbf{U} \in U_{\Delta}} J_2(\mathbf{X}, \mathbf{U}, t). \quad (9)$$

Динамическая интерпретация задачи оптимального планирования ресурса бортового ретранслятора позволяет для поиска решения сформулированной задачи управления использовать условие стационарности принципа максимума Л. С. Понтрягина [21]

$$\mathbf{U}_{\text{opt}}(t) = \arg \max_{\mathbf{U} \in U_{\Delta}} H(\mathbf{P}(t), \mathbf{X}(t), \mathbf{U}(t)), \forall t \in T, \quad (10)$$

где $H(t) = \sum_{v=1}^n p_v(t) \sum_{\mu=1}^m b_{v\mu} u_{v\mu}(t)$ — функция Гамильтона; $p_v(t)$ — элементы s -мерного вектора сопряженных переменных $\mathbf{P}(t)$, совпадающего по размерности с вектором $\mathbf{X}(t)$.

Условие (10) дополняется каноническими соотношениями, позволяющими получить математические модели прямой и сопряженной систем:

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \left[\frac{\partial H}{\partial \mathbf{P}} \right]^T = \mathbf{B}(t)\mathbf{U}(t); \quad \dot{\mathbf{P}}(t) = - \left[\frac{\partial H}{\partial \mathbf{X}} \right]^T = 0. \quad (11)$$

Для получения оптимального решения организуется итерационный процесс, предполагаю-

щий последовательное приближение от некоторого начального решения, называемого диспетчерским, к требуемому оптимальному. Известно [22], 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. В этих случаях часто пользуются так называемым условием трансверсальности

$$\mathbf{P}(T_f) = - \left[\frac{\partial h(\mathbf{X}(T_f), \mathbf{X}_f^{\max})}{\partial \mathbf{X}(T_f)} \right]^T, \quad (12)$$

позволяющим определить состояние сопряженной системы в момент времени T_f , где функционал $h(\mathbf{X}(T_f), \mathbf{X}_f^{\max})$ в нашем случае представлен показателем качества (8).

Хорошим опорным решением, в частности, может служить так называемое локально-оптимальное управление

$$\mathbf{U}_{l\text{opt}}(t) = \arg \max_{\mathbf{U} \in U_{\Delta}} H(\mathbf{P}(t), \mathbf{X}(t), \mathbf{U}(t)), \forall t \in T, \quad (13)$$

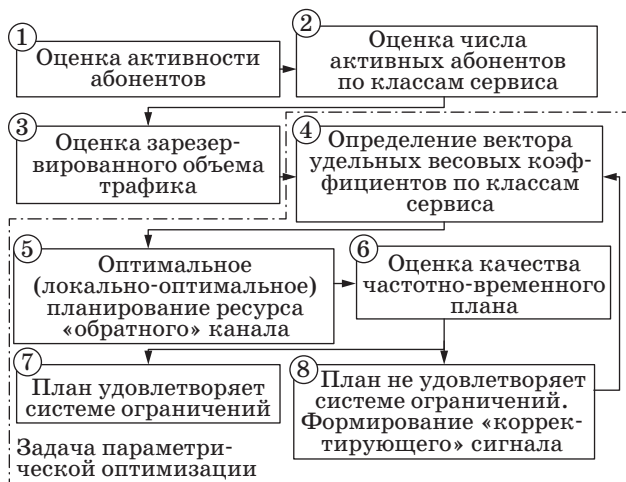
синтезируемое на основе условия стационарности (10) заменой вектора сопряженных переменных ее расчетным аналогом, полученным за счет модификации условий трансверсальности:

$$\mathbf{P}(t) = - \left[\frac{J_2(\mathbf{X}, \mathbf{U}, t)}{\partial \mathbf{X}(t)} \right]^T, \quad \forall t \in T,$$

путем замены вектора $\mathbf{X}(T_f)$ на $\mathbf{X}(t), \forall t \in T$. В результате такой замены получена однопроходная процедура синтеза локально-оптимального управления. При этом соотношение (13) является алгоритмом синтеза управления в форме обратной связи, которое выгодно отличается от оптимального программного управления, формируемого в результате решения краевой задачи, гибкостью и устойчивостью управляемого процесса.

Организация контура параметрической оптимизации процесса распределения частотно-временного ресурса «обратного» канала

Необходимо отметить, что открытым остается вопрос определения значений компонентов вектора удельных весовых коэффициентов $\mathbf{A} = \text{col}(\alpha_i, i = \overline{1, s})$. При этом, как правило, подразумевается, что формирование вектора \mathbf{A} происходит один раз на основе экспертной оценки степени важности того или иного класса сервиса. Очевидно, что такой подход может полностью нивелировать достоинства любого математического аппарата, примененного для решения поставленной задачи рас-



- Организация контура параметрической оптимизации процесса распределения частотно-временного ресурса «обратного» канала

пределения ресурса «обратного» канала. В этой связи предлагается подойти к вопросу определения значений компонентов вектора \mathbf{A} удельных весовых коэффициентов как к задаче параметрической оптимизации процесса распределения частотно-временного ресурса «обратного» канала (рисунок).

Для определения вектора удельных весовых коэффициентов могут применяться как детерминированные, так и нечеткие подходы. Механизм вычисления вектора удельных весовых коэффициентов должен учитывать динамику поступления запросов на обслуживание от абонентов сети. Другими словами, должен быть разработан алгоритм оценивания объема трафика, подлежащего передаче

в составе следующего после планируемого фрейма. Для получения такого алгоритма могут применяться как детерминированные, так и нечеткие подходы. Среди детерминированных алгоритмов можно выделить алгоритм фильтр-дифференцирующего оператора [23], построенный на основе метода стохастической аппроксимации [24], обладающий минимальными потребностями в вычислительных ресурсах и нашедший применение в задачах обработки телеметрической информации. Использование нечетких подходов при решении задачи прогноза объема трафика, как правило, наталкивается на проблему численного решения дифференциальных уравнений, которая может быть решена на основе метода линеаризации [19].

Заключение

В статье проведен анализ особенностей решения задачи распределения частотно-временного ресурса «обратного» канала сети спутниковой связи на основе стандарта DVB-RCS. Сформулирована и решена задача оптимального планирования ресурса «обратного» канала на основе модели структурной динамики. Сформирована процедура локально-оптимального планирования, позволяющая получать решения, близкие к оптимальным, и не требующая организации итерационного вычислительного процесса. Сформулирована идея организации контура параметрической оптимизации, основанного на получении и учете прогнозных значений объемов трафика по классам сервиса. Решение задачи прогноза объема поступающего трафика предлагается осуществлять на основе детерминированных и нечетких подходов.

Литература

1. ETSI EN 301 790. Digital Video Broadcasting (DVB): Interaction channel for satellite distribution systems. 2000. http://etsi.org/deliver/etsi_en/301700_301799/01.05.01_60/en_301790v010501p.pdf (дата обращения: 20.12.2012).
2. ETSI TS 101 545–1. Digital Video Broadcasting (DVB), Second Generation DVB Interactive Satellite System (DVB-RCS2). Part 1: Overview and System Level specification. 2012. http://etsi.org/deliver/etsi_ts/101500_301599/01.01.01_60/ts_10154501v010101p.pdf (дата обращения: 20.12.2012).
3. ETSI EN 101 545–2. Digital Video Broadcasting (DVB), Second Generation DVB Interactive Satellite System (DVB-RCS2). Part 2: Lower layers for satellite standard. 2012. http://etsi.org/deliver/etsi_ts/101500_301599/01.01.01_60/ts_10154502v010101p.pdf (дата обращения: 20.12.2012).
4. ETSI TS 101 545–3. Digital Video Broadcasting (DVB), Second Generation DVB Interactive Satellite System (DVB-RCS2). Part 3: Higher layers for satellite specification. 2012. http://etsi.org/deliver/etsi_ts/101500_301599/01.01.01_60/ts_10154503v010101p.pdf (дата обращения: 20.12.2012).
5. Березин К. Ю. Гарантия качества обслуживания (QoS) в канале интерактивного взаимодействия цифрового спутникового телевидения // Электронный журнал «Исследовано в России». 2001. № 90. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2001/090.pdf> (дата обращения: 31.01.2013).
6. Генов А. А., Решетников В. Н. Некоторые результаты имитационного моделирования мультисервисных бортовых цифровых платформ стандарта DVB-RCS // Программные продукты и системы / ЗАО НИИ «Центрпрограммсистем». Тверь, 2008. № 3. С. 38–41.

7. **Илюхин А. А.** Способ эффективного распределения ресурса пропускной способности спутниковых сетей интерактивного доступа // Вестник РГРТУ. 2009. Вып. 30. № 4. С. 16–21.
8. **Илюхин А. А., Дубровин А. Г.** Оптимизация структуры суперфрейма для запросных каналов в спутниковых сетях стандарта DVB-RCS // Изв. ОрелГТУ. 2009. № 2/52(563). С. 68–73.
9. **Марковский С. Г., Тюрликов А. М.** Использование идентификаторов абонентов для резервирования канала множественного доступа // Информационно-управляющие системы. 2008. № 2(33). С. 28–35.
10. **Gallager R. G., Parekh A. K.** A generalized processor sharing approach to flow control in integrated services networks: The single node case // ACM Transactions on Networking. 1993. N 1. P. 344–357.
11. **Hung A., Monpetit M.-J., Kesidis G.** ATM via Satellite: A Framework and Implementation // Wireless Networks. 1998. N 4. P. 141–153.
12. **Kalmanek C., Kanakita H., Keshav S.** Rate controlled servers for very high-speed networks // IEEE Global Telecommunications Conf. 1990. P. 300.31–300.39.
13. **Lee K.-D., Cho Y.-H., Lee S. J.** Optimal Design of superframe pattern for DVB-RCS return link // ETRI Journal. 2002. Vol. 24. N 3. P. 251–254.
14. **Polyzos G. C., Sariowan H., Cruz R. L.** Scheduling for quality of service guarantees via service curves // Proc. of the Intern. Conf. on Computer Communications and Networks. 1995. N 3. P. 512–520.
15. **Stoica I., Zhang H., Ng T. S. E.** A Hierarchical Fair Service Curve Algorithm for Link-Sharing, Real-Time and Priority Service // Proc. of ACM SIGCOMM'97. 1997. P. 48–61.
16. **Verma D. C., Ferrary D.** A scheme for real time channel establishment in wide area networks // IEEE J. on Selected Areas in Communications. 1990. N 8. P. 368–379.
17. **Zhang L.** Virtual clock: A new traffic control algorithm for packet switched networks // ACM Transactions on Computer Systems. 1991. N 9. P. 101–124.
18. **Генов А. А., Решетников В. Н.** Адаптивное управление частотно-временным ресурсом космических аппаратов в сетях спутниковой связи // Информационные технологии и вычислительные системы. 2008. № 3. С. 55–62.
19. **Евдокимов А. В.** Численное решение нечетких дифференциальных уравнений методом линеаризации // Изв. Челябинского научного центра / Челябинский научный центр УрО РАН. Челябинск, 2003. № 4(21). С. 9–14.
20. **Соколов Б. В.** Комплексное планирование операций и управление структурами в АСУ подвижными объектами / МО РФ, 1992. — 232 с.
21. **Атанс М., Фалб П.** Оптимальное управление. — М.: Машиностроение, 1968. — 764 с.
22. **Моисеев Н. Н., Иванилов Ю. П., Столярова Е. М.** Методы оптимизации. — М.: Наука, 1978. — 352 с.
23. **Мануйлов Ю. С., Новиков Е. А., Павлов А. Р.** Решение задачи радиоконтроля орбиты космического аппарата на основе метода вероятностной аппроксимации // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2012. № 1. С. 43–49.
24. **Батухтин В. Д., Майборода Л. А.** Разрывные экстремальные задачи. — СПб.: Гиппократ, 1995. — 362 с.