

УДК 621.396

Модели и алгоритмы динамического резервирования радиоресурса космического аппарата связи при обслуживании нестационарных информационных потоков с учетом задержки в управлении

Ковальский А.А.*, Зиннуров С.Х.**

*Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского
ул. Ждановская, 13, Санкт-Петербург, 197198, Россия*

**e-mail: sake636@mail.ru*

***e-mail: zinnurov_salavat@mail.ru*

Аннотация

В статье сформулированы задачи динамического резервирования радиоресурса космического аппарата связи в виде задачи нелинейного программирования и приведен пример ее решения при обслуживании нестационарного потока сообщений, формируемого группой речевых абонентов. В качестве модели нестационарного потока сообщений, формируемого речевыми абонентами с учетом подавления сигнала в паузах, использован модулированный марковский процесс и его частный случай – прерываемый пуассоновский процесс. Разработана математическая модель процесса обслуживания модулированного марковского процесса с задержкой в подключении дополнительных каналов в виде трехмерной марковской цепи. Разработан алгоритм и приведен числовой пример решения поставленной задачи для случая, когда входной поток формируется лишь одним абонентом и описывается прерываемым пуассоновским процессом.

Разработана и описана имитационная модель динамического резервирования радиоресурса космического аппарата связи на основе программного продукта, рекомендованного для проведения научных исследований в области математического и имитационного моделирования – Matlab/Simulink/SimEvents, вместе с интерактивным инструментом разработки сложных моделей Stateflow. Программный продукт Stateflow основан на использовании теории конечных автоматов и систем массового обслуживания – предназначен для проектирования логических систем массового обслуживания.

Распространение разработанного подхода к управлению ограниченным ресурсом КАС на случай подключения к каждой ЗС группы из множества абонентов, позволит добиться еще более существенного выигрыша в экономии радиоресурса КАС за счет динамического перераспределения его между радионаправлениями.

Ключевые слова: космический аппарат связи, динамическое резервирование, радиоресурс, земная станция, прерываемый пуассоновский поток, модулированный марковский процесс, нестационарные информационные потоки, управление с задержкой, речевой трафик.

Введение

Необходимость применения систем спутниковой связи (ССС) при организации доступа к современным инфокоммуникационным услугам особенно отчетливо ощущается абонентами, находящимися в труднодоступных и удаленных регионах России. Обширность обслуживаемых территорий с большой абонентской базой и принципиальная ограниченность радиоресурса космических аппаратов связи

(КАС) обуславливают особую актуальность задачи динамического перераспределения радиоресурса КАС между активными и пассивными направлениями связи. Основным фактором, осложняющим решение этой задачи, являются высокие задержки распространения сигналов в спутниковых радиолиниях и, соответственно, запаздывание в управлении [1, 2]. Поэтому традиционно при распределении радиоресурса операторы связи ориентируются на пиковую нагрузку для каждого радионаправления (рис. 1, а) с тем, чтобы обеспечить требуемое качество обслуживания даже в часы наибольшей нагрузки [25, 26]. В работе предлагается альтернативный подход к распределению радиоресурса, в основе которого лежит оперативный маневр свободными ресурсными единицами (каналами связи) между более и менее загруженными радионаправлениями. Достижимый в результате статистического уплотнения [3, 10-12] эффект экономии пропускной способности ΔC (рис. 1, б) по сути составляет выигрыш в пропускной способности КАС.

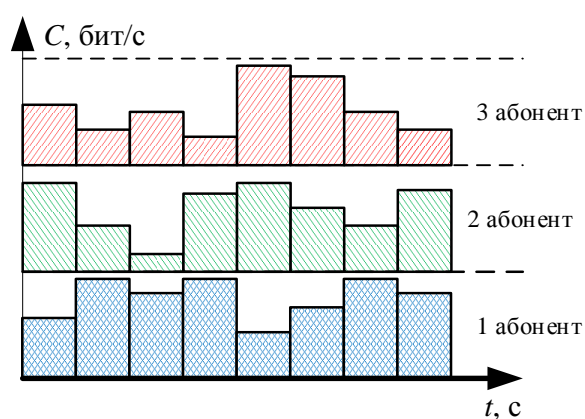


Рис. 1 а

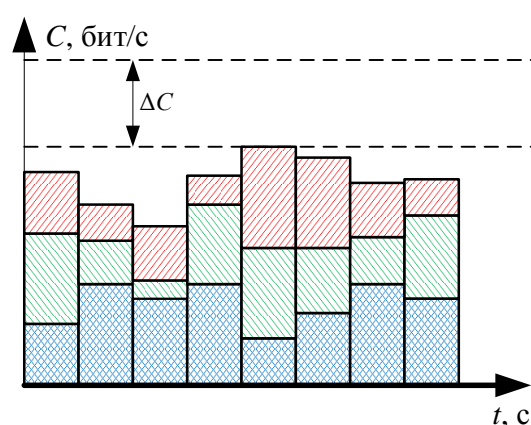


Рис. 1 б

Рис. 1. Вариант «жесткого» (а) и «гибкого» (б) распределения радиоресурса

Для компенсации задержки в управлении текущий каналный ресурс закрепляемый за конкретной земной станцией (ЗС), выделяется с некоторым запасом (резервом), который способен на некоторое время обеспечить требуемое качество обслуживания при внезапном повышении интенсивности нагрузки. Очевидно, величина этого резерва определяется задержкой в управлении и динамикой изменения интенсивности нагрузки: чем выше эти показатели, тем больше должен быть запас. И, соответственно, чем выше резерв, тем меньше ожидаемый выигрыш в пропускной способности за счет динамического резервирования. Собственно, обоснование рациональной величины резервируемого радиоресурса для каждого направления связи и составляет предмет исследования в данной работе.

Разработка математической модели обслуживания нестационарных информационных потоков

В дальнейшем в работе под радиоресурсом КАС понимается некоторое число стандартных цифровых каналов, либо некоторое число частотно-временных слотов, подобных ресурсным единицам в стандарте LTE [4], которые распределяются между множеством ЗС неким диспетчером (протоколом МД или ЦС) [4].

Дополнительным аргументом в пользу применения динамического перераспределения радиоресурса в спутниковой связи, несмотря на высокие задержки в управлении, является неоднородная и, как следствие, нестационарная с долговременной зависимостью структура трафика, формируемого новыми и вновь появляющимися мультимедийными службами [5, 6]. Однако учет такой

долговременной зависимости, так называемого эффекта «самоподобия» трафика, не позволяет воспользоваться классическим математическим аппаратом теории телетрафика на основе формул А. Эрланга при обосновании рационального резерва для радионаправлений и требует использования более сложных моделей для «самоподобного» трафика, например, на основе модулированных марковских процессов [7, 8]. Частным случаем модулированных марковских процессов является прерываемый пуассоновский процесс (ППП), который хорошо подходит для моделирования отдельного телефонного источника в режиме подавления пауз. Граф модели прерываемого пуассоновского процесса представлен на рис. 2.

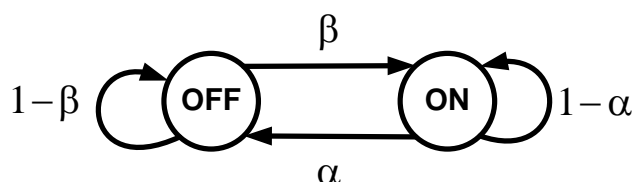


Рис. 2. Граф модели прерываемого пуассоновского процесса

Состояние «OFF» марковской цепи на рис. 2, например, соответствует паузе в процессе телефонного разговора, а состояние «ON» соответствует периоду активности. В течение периода активности предполагается, что источник генерирует пуассоновский поток сообщений (пакетов, переносящих фрагменты оцифрованной речи) с некоторой интенсивностью λ .

Модель процесса обслуживания одного абонента в логическом канале с подавлением передачи в паузах при ограниченной емкости буфера $R=N-1$ в виде двумерной цепи Маркова представлена на рис. 3.

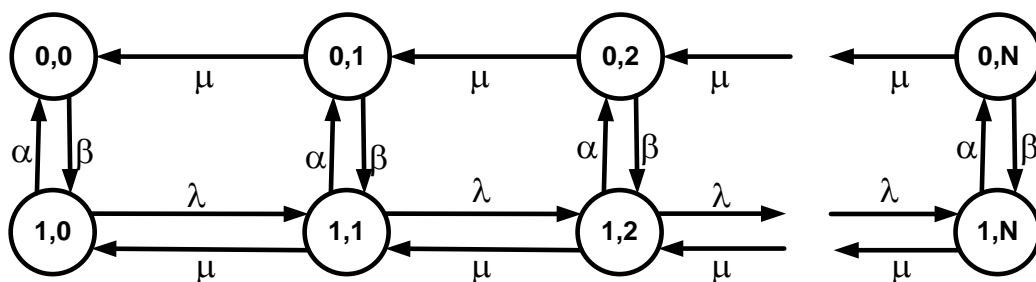


Рис. 3. Двумерная цепь Маркова с прерываемым источником

Состояния марковской цепи на рис. 3 характеризуются парой чисел (i, j) , где переменная i отражает состояние источника: $i=0$ соответствует состоянию «OFF» (абонент молчит), $i=1$ соответствует состоянию «ON» (абонент говорит); переменная $j = \overline{0, N}$ отражает число речевых пакетов, одновременно находящихся в канале обслуживания и в буфере.

Процесс динамического резервирования радиоресурса рассмотрим на примере одного радионаправления. Канальный ресурс выделяется ЗС в зависимости от текущей активности абонента, но с некоторым запасом (резервом) для компенсации задержки в управлении. Управление заключается в подключении дополнительного канала (радиоресурса) при возрастании активности абонента и возникновении угрозы снижения качества связи ниже нормы (например, возрастания задержки, переполнения буфера и т.п.), т.е. происходит процесс динамического резервирования радиоресурса КАС. Учитывая высокий процент (>60 %) пауз в процессе телефонного разговора [1, 5, 8] и использование пакетной формы передачи речи в режиме подавления пауз, следует ожидать, что удастся существенно сократить величину выделяемого ЗС радиоресурса и, соответственно, повысить емкость радиосети в целом. Дополнительно следует учесть некоторую смысловую

избыточность речи, которая допускает до 1–5 % потерь от общего числа речевых пакетов без снижения качества диалога [1, 5, 8].

Постановка и решение задачи выбора оптимального резерва радиоресурса космического аппарата связи

Задача динамического резервирования радиоресурса КАС состоит в том, чтобы с учетом статистических особенностей речевого трафика и задержкой в управлении определить минимально необходимую величину пропускной способности (объема одной ресурсной единицы), выделяемой каждому радионаправлению, а также момент формирования запроса на подключение дополнительного канала связи.

Предполагается, что задержка в подключении дополнительного радиоресурса КАС при заполнении буфера ЗС до некоторой величины k^* является величиной случайной с экспоненциальным законом распределения и средним значением $T_y = 1/\gamma$. Емкость буфера, выделяемого для всей группы, определяется регламентируемой задержкой и нормой потерь речевых пакетов [19, 20].

Допущение об экспоненциальных законах распределения длительностей передачи и поступления речевых пакетов, периодов активности и пауз абонента, а также запаздывания в управлении позволяет представить моделируемый процесс в виде трехмерной цепи Маркова [18, 21, 22]. Граф состояний трехмерной цепи, моделирующей процесс обслуживания одного источника ППП с учетом

запаздывания в управлении (включении дополнительного канала), приведен на рис. 4.

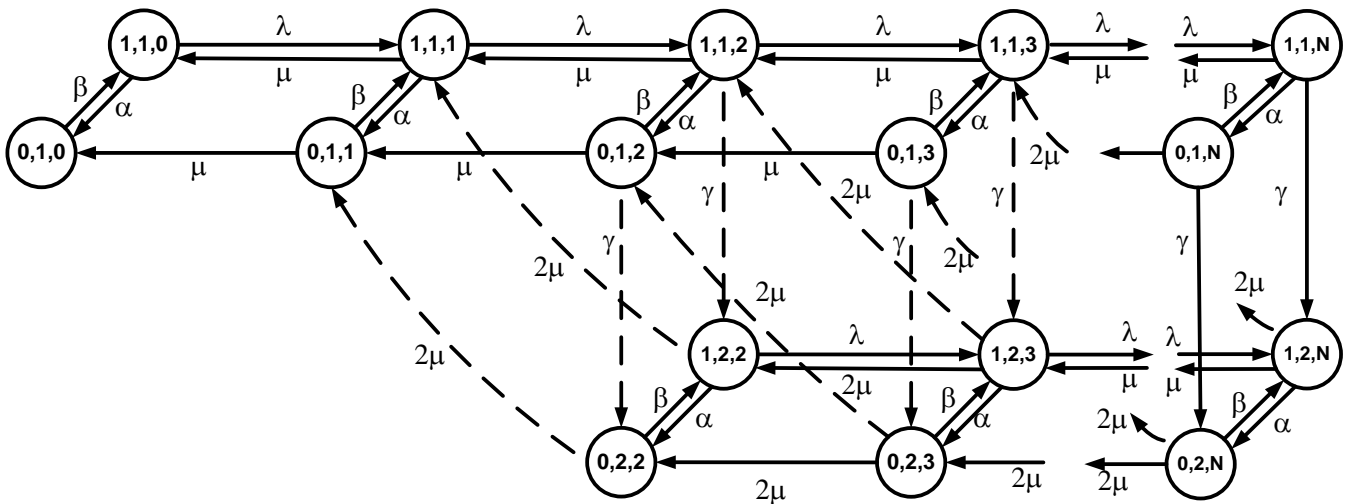


Рис. 4. Модель обслуживания одного абонента, формирующего ППП пакетов речевого трафика, с учетом задержки в подключении дополнительного канала

Состояния марковской цепи на рис. 4 характеризуются тройкой чисел (i, j, k) , где $i=0$ соответствует молчанию абонента, $i=1$ соответствует активности абонента; $j = \overline{1, 2}$ – число каналов (ресурсных единиц), выделяемых для передачи речевого трафика; $k = \overline{0, N}$ – общее число речевых пакетов в буфере ЗС.

Интенсивности переходов между состояниями графов на рис. 2–4:

λ – интенсивность поступления пакетов в активном состоянии источника;

μ – интенсивность обслуживания пакетов;

β – интенсивность перехода источника в активное состояние;

α – интенсивность перехода источника в неактивное состояние;

γ – интенсивность подключения дополнительного канала, определяются как обратные соответствующим временным интервалам, величины которых имеют показательное распределение со средними значениями:

$$T_{\Pi} = 1 / \beta - \text{средняя длительность паузы в речи};$$

$$T_a = 1 / \alpha - \text{средняя длительность периода активности в речи};$$

$T_{\text{ВП}} = 1 / \lambda$ – средний интервал времени между последовательными речевыми пакетами, генерируемыми одним абонентом;

$$T_o = 1 / \mu - \text{среднее время обслуживания одного речевого пакета};$$

$$T_y = 1 / \gamma - \text{среднее время задержки в управлении}.$$

Для расчета вероятностей состояний марковской цепи в стационарном режиме может быть составлена система линейных алгебраических уравнений вида:

$$p_{ijk} = \begin{cases} f_{ijk}(p_{ijk}, i = \overline{0,1}, j = 1, k = \overline{0,N}); \\ f_{ijk}(p_{ijk}, i = \overline{0,1}, j = 2, k = \overline{k^*, N}); \\ 0, i = \overline{0,1}, j = 2, k = \overline{0, k^* - 1}; \end{cases} \quad (1)$$

$$\sum_{i=0}^1 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=0}^N p_{ijk} = 1,$$

где линейные функции f_{ijk} определяются путем последовательного разрешения относительно p_{ijk} уравнений баланса переходов между состояниями системы массового обслуживания (СМО) на рис. 4;

k^* – число пакетов в буфере ЗС, при котором формируется запрос на выделение дополнительного радиоресурса ($k = \overline{k^*, N}$), при снижении числа пакетов в буфере ниже k^* происходит отключение дополнительного радиоресурса.

Система уравнений (1) за счет введения вектора $P = [p_z = p_{ijk}, z = \overline{1, Z}]^T$, содержащего ненулевые значения p_{ijk} , может быть представлена в векторно-матричном виде, более удобном для численного решения, а также постановки и решения задачи оптимизации:

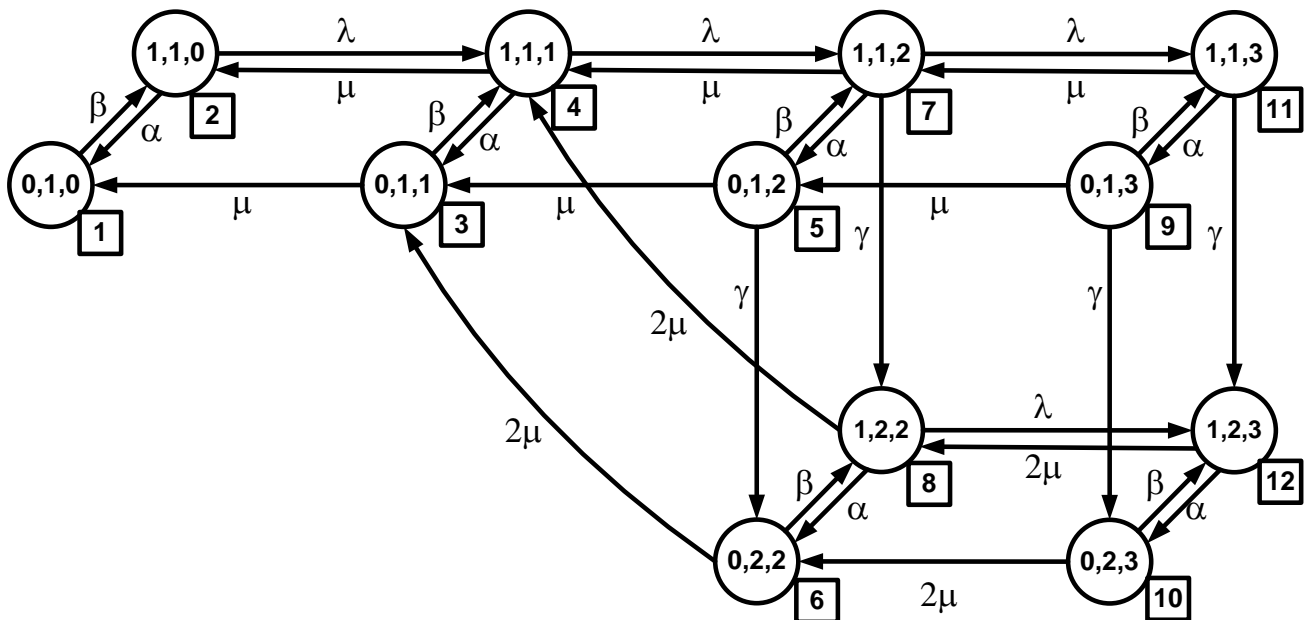
$$AP=B, \quad (2)$$

где A – $(Z+1) \times Z$ -мерная матрица интенсивностей переходов;

P – Z -мерный вектор ненулевых вероятностей состояний СМО;

B – $(Z+1)$ -мерный вектор правых частей, $Z=4(N+1)$.

В качестве примера определим матрицу A , а также вектора P и B для случая $M=1, K=2, N=3$. Граф переходов между состояниями СМО будет выглядеть в этом случае в соответствии с рис. 5, где в квадратных блоках справа снизу от каждого состояния СМО указан номер $z = \overline{1, 12}$ состояния после сквозной перенумерации.



Система алгебраических уравнений, описывающих граф на рис. 5, может быть записана в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \beta p_1 - \alpha p_2 - \mu p_3 = 0; \\ -\beta p_1 + (\lambda + \alpha) p_2 - \mu p_4 = 0; \\ (\beta + \mu) p_3 - \alpha p_4 - \mu p_5 - 2\mu p_6 = 0; \\ -\lambda p_2 - \beta p_3 + (\alpha + \mu + \alpha) p_4 - \mu p_7 = 0; \\ (\beta + \mu + \gamma) p_5 - \alpha p_7 - \mu p_9 = 0; \\ -\gamma p_5 + (\beta + 2\mu) p_8 - \alpha p_{10} - 2\mu p_{10} = 0; \\ -\lambda p_4 - \beta p_5 + (\mu + \gamma + \lambda) p_7 - \mu p_{11} = 0; \\ -\beta p_6 - \gamma p_7 + (\alpha + 2\mu + \lambda) p_8 - 2\mu p_{12} = 0; \\ (\beta + \mu + \gamma) p_9 - \alpha p_{11} = 0; \\ -\gamma p_9 + (2\mu + \beta) p_{10} - \alpha p_{12} = 0; \\ -\lambda p_7 - \beta p_9 + (\mu + \alpha + \gamma) p_{11} = 0; \\ -\lambda p_8 - \beta p_{10} - \gamma p_{11} + (\alpha + 2\mu) p_{12} = 0; \\ \sum_z p_z = 1. \end{array} \right. \quad (3)$$

В системе уравнений коэффициенты при p_z определяют ненулевые компоненты матрицы A на пересечении строк, соответствующих номеру уравнения, и столбцов, соответствующих номеру состояния z . Правые части уравнений из системы (3) определяют вектор B .

Решение матричного уравнения (2) в общем случае может быть получено в следующем виде:

$$P = A^+ B, \quad (4)$$

где A^+ – матрица, псевдообратная матрице A , определяемая как $A^+ = [A^T A]^{-1} A^T$.

Для постановки задачи оптимального выбора требуется проведение декомпозиции системы уравнений (2) с целью выделения оптимизируемых

параметров. Так, матрица A интенсивностей переходов между состояниями СМО может быть представлена в виде суммы:

$$A = A_0 + \mu A_\mu + A_\gamma, \quad (5)$$

где A_0 – матрица, содержащая интенсивности переходов α , β и λ ;

A_μ – матрица, содержащая кроме нулевых компонентов постоянные множители, стоящие перед интенсивностью переходов μ ;

A_γ – матрица, содержащая кроме нулевых компонентов интенсивность переходов γ .

Задача определения момента формирования запроса на подключение дополнительного канала может быть интерпретирована как последовательное (слева направо и сверху вниз) удаление перехода вниз на графах, приведенных на рис. 4 и 5, а также перемещение диагональной стрелки, соответствующей отключению дополнительного радиоресурса вправо. Так, например, для графа, приведенного на рис. 5, может быть сформировано только два варианта запроса дополнительного радиоресурса, один из которых приведен на рис. 5 и показывает необходимость запроса при поступлении в систему второго пакета, а другой приведен на рис. 6 и показывает необходимость запроса при поступлении в систему третьего пакета.

Каждый из перечисленных вариантов будет иметь соответствующие матрицы A_μ :

$A_\mu^{(1)}$ и $A_\mu^{(2)}$, A_γ : $A_\gamma^{(1)}$ и $A_\gamma^{(2)}$, и, соответствующие показатели качества обслуживания, например вероятность потерь $P_{\text{пот}}$.

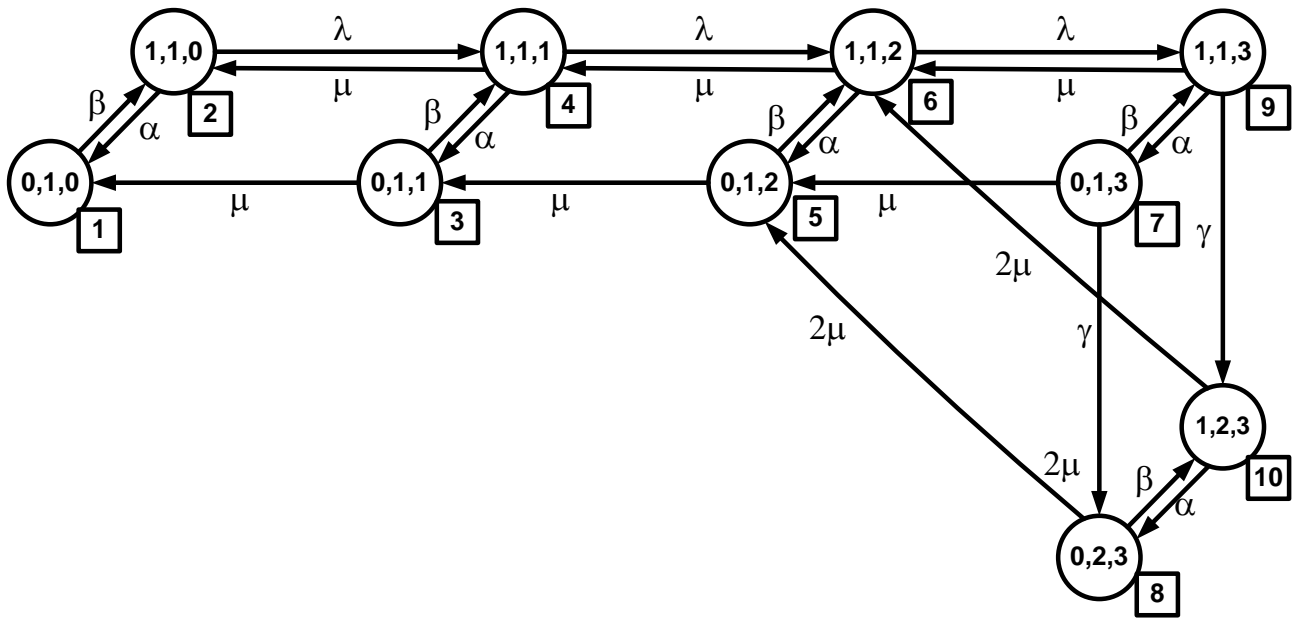


Рис. 6. Вариант графа модели обслуживания прерываемого пуассоновского потока вызовов от одного абонента

Задачу минимизации радиоресурса пропускной способности, выделяемой для каждого радионаправления, с учетом прерывистого характера трафика и возможности оперативного подключения дополнительного радиоресурса можно сформулировать как задачу нелинейного программирования в следующем виде:

$$\left[E_{\mu}^T X \right] \left[\sum_{j=1}^K j E_j^T X \right] + R^T X + s [E_u X]^T [E_u - E_U X] \rightarrow \min, \quad (6)$$

где $X = [P^T \ \mu \ U^T]^T$ – агрегированный вектор оптимизируемых параметров, включающий в себя Z -мерный вектор вероятностей состояний модели системы обслуживания, граф которой приведен на рис. 4;

μ – интенсивность обслуживания пакетов;

U – L -мерный вектор управляющих параметров, определяющих вариант матриц $A_{\mu}^{(l)}, l = \overline{1, L}$ и $A_{\gamma}^{(l)}, l = \overline{1, L}$ интенсивностей подключения дополнительной ресурсной единицы; E_{μ}^T ,

E_1^T, E_2^T, E_u и E_U – вспомогательные матрицы, позволяющие проводить декомпозицию исходного вектора X ;

R – вектор относительных приоритетов, определяющий порядок возрастания важности конкретного управляющего воздействия; s – вспомогательный параметр, определяющий величину штрафа.

В выражении (6) первое слагаемое имеет смысл среднего радиоресурса КАС, потребляемого одним радионаправлением и выраженного через интенсивность обслуживания одним каналом следующим образом:

$$M = \left[E_{\mu}^T X \right] \left[\sum_{j=1}^2 j E_j^T X \right] = \mu \left[\sum_{i=0}^1 \sum_{k=0}^N \sum_{j=1}^2 j p_{ijk} \right]. \quad (7)$$

Второе слагаемое в выражении имеет смысл ранжирования альтернатив управления по вкладу в результирующую целевую функцию. Очевидно, что компоненты $Z+L+1$ -мерного вектора R должны быть тем больше, чем больше ненулевых компонентов в соответствующих матрицах $A_{\mu}^{(l)}, l = \overline{1, L}$ и $A_{\gamma}^{(l)}, l = \overline{1, L}$. В свою очередь чем больше ненулевых компонентов в матрицах $A_{\mu}^{(l)}, l = \overline{1, L}$ и $A_{\gamma}^{(l)}, l = \overline{1, L}$, тем ранее есть возможность послать запрос на выделение дополнительного канала, что влечет за собой повышение средней интенсивности задействования системы.

Третье слагаемое в выражении (6) имеет смысл индикатора первого порядка, т.е. переключателя между альтернативами управления.

Ограничения для задачи (1) сведены в таблицу.

Таблица 1 – Ограничения для задачи (1)

Ограничение	Формализованная запись ограничения
Учитывающее порядок переходов в модели на рис. 1	$\left[A_0 + \sum_{l=1}^L \left(\left[A_{\gamma}^{(l)} + A_{\mu}^{(l)} \right] \left[E_l^T X \right] \right) \right] \left[E_p X \right] = B$
На вероятность потерь	$E_0^T X \leq P_{3.отк}$
Неотрицательности значений вероятностей	$E_p X \geq 0$
Нормирующее значения управляющих параметров	$E_u^T X = 1$
Неотрицательности значения интенсивности обслуживания	$E_{\mu}^T X > 0$
На диапазон значений управляющих параметров	$0 \leq E_u \leq 1$

Сформулированная задача нелинейного программирования может быть решена с использованием метода возможных направлений [9].

Исследование эффективности разработанного алгоритма динамического резервирования радиоресурса космического аппарата связи при обслуживании нестационарных информационных потоков с учетом задержки в управлении

Для моделей небольшой размерности, например, при емкости буфера 10–40 пакетов, оптимальное решение задачи (6)–(7) может быть получено путем прямого перебора. Сначала для каждого варианта управления решается задача поиска минимального значения средней интенсивности обслуживания при ограничении на вероятность отказа $P_{\text{отк}} \leq 0,01$, затем решается задача выбора варианта управления, доставляющего минимальное значение средней интенсивности обслуживания.

Результаты моделирования для различной емкости системы обслуживания $N=10,20,30,40$ и заданной вероятности отказа $P_{\text{отк}} \leq 0,01$ приведены на рис. 7, а–г.

При моделировании использовались следующие допущения:

- скорость кодирования речи $C_k=10$ Кбит/с;
- дискретность работы пакетизатора речи $\Delta t_{\text{п}}=20$ мс;
- средняя длительность активности абонента $T_a=1,2$ с, соответственно, интенсивность перехода в состояние молчания абонента $\alpha=1/T_a=0,83$;
- средняя продолжительность паузы $T_{\text{п}}=1,8$ с, соответственно, интенсивность перехода в состояние активности абонента $\beta=1/T_{\text{п}}=0,56$;
- среднее время распространения радиосигнала от ЗС до КАС и обратно $T_y=0,25$ с, соответственно, интенсивность удовлетворения запросов на выделение дополнительного радиоресурса $\gamma=1/T_y=4$.

При принятых допущениях средний объем речевого пакета составит $V_{\text{пак}}=200$ бит, а средняя длительность его передачи $T_{\text{пак}}=\Delta T_{\text{пак}}=20$ мс. С учетом принятых допущений о продолжительности периодов активности и пауз интенсивность поступления речевых пакетов в буфер ЗС составит от 20 до 50 пакетов/с.

На графиках (см. рис. 7) сплошная горизонтальная линия отражает значение средней интенсивности обслуживания одноканальной системы обслуживания (см. рис. 3) при условии поступления нестационарного речевого трафика. Кривая, имеющая в качестве маркера точку, отражает зависимость средней интенсивности обслуживания стационарного трафика двухканальной системой с задержкой в управлении. Кривая, имеющая в качестве маркера знак умножения, отражает зависимость средней интенсивности обслуживания нестационарных информационных потоков двухканальной системой с задержкой в управлении (см. рис. 4).

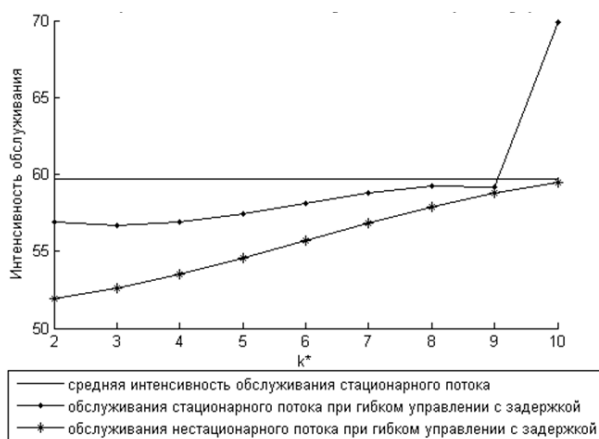


Рис. 7 а

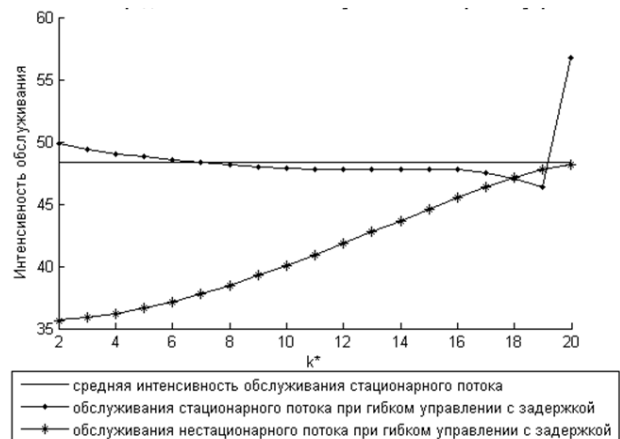


Рис. 7 б

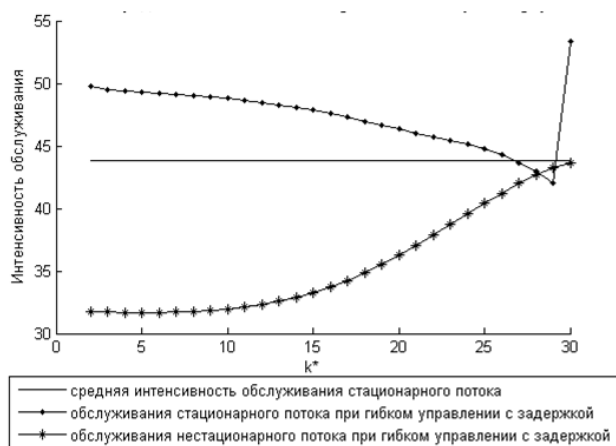


Рис. 7 в

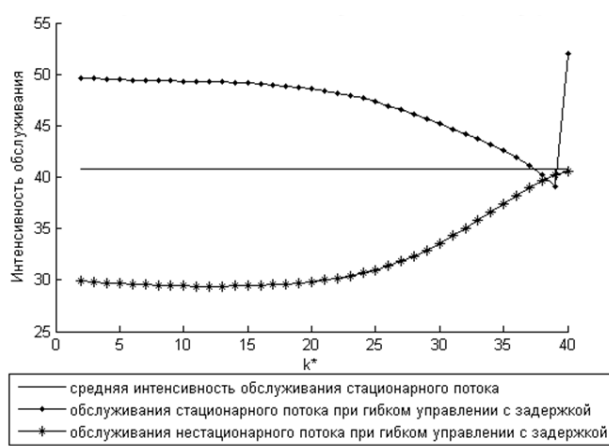


Рис. 7 г

Рис. 7. Зависимость средней интенсивности обслуживания от варианта управления при емкости системы $N=10$ (а); $N=20$ (б); $N=30$ (в); $N=40$ (г)

Анализ графиков на рис. 7 показывает очевидное преимущество при использовании схемы гибкого управления обслуживанием нестационарных информационных потоков, даже с учетом ощутимой задержки в доведении управляющего воздействия. В среднем выигрыш от применения алгоритма гибкого управления обслуживанием нестационарных информационных потоков по сравнению с неуправляемым вариантом обслуживания нестационарных информационных потоков составляет порядка 15 %, а по сравнению с алгоритмом гибкого управления обслуживанием стационарного трафика с задержкой до 60 %.

Кроме того, результаты моделирования показали, что при сравнительно небольшой емкости буфера (10, 20 пакетов), необходимость формирования запроса на подключение второго канала обслуживания возникает уже при образовании очереди в 2 пакета, по существу, при первых признаках очереди. При увеличении

емкости буфера до 30, 40 пакетов, оптимальный момент посылки запроса на выделение дополнительного радиоресурса сдвигается вправо (при возрастании очереди до 5–7 пакетов) [23].

**Имитационная модель динамического резервирования радиоресурса
космического аппарата связи при обслуживании нестационарных
информационных потоков с учетом задержки в управлении**

Для проверки адекватности приведенных выше моделей и алгоритма динамического резервирования радиоресурса космического аппарата связи при обслуживании нестационарных информационных потоков с учетом задержки в управлении, а также результатов, представленных в работах [13-15] в работе проведено имитационное моделирование. Для построения адекватной имитационной модели динамического резервирования радиоресурса космического аппарата связи при обслуживании нестационарных информационных потоков с учетом задержки в управлении использован программный продукт, рекомендованный для проведения научных исследований в области математического и имитационного моделирования – Matlab/Simulink/SimEvents, вместе с интерактивным инструментом разработки сложных моделей Stateflow. Программный продукт Stateflow основан на использовании теории конечных автоматов и систем массового обслуживания – предназначен для проектирования логических систем массового обслуживания. Необходимо отметить, что при моделировании сетей и систем связи или их элементов возникают сложности в представлении или моделировании сетевых пакетов. В общем случае сетевой пакет

это определенным образом, сформированная совокупность данных, которая используется для передачи сообщения (информации) и обладает фиксированным объемом (для IPv4 – 4 бита, UDP – 8 бит и др.). В качестве сетевого пакета в Matlab/Simulink используются сущности (Entity), которые представляют собой дискретные элементы, позволяющие смоделировать изменения режимов работы сетевого оборудования и вызвать переходы состояний внутри систем. В зависимости от используемой модели данные сущности могут представлять собой совокупность самолетов, людей, сетевых пакетов, а также многое другое. Генерация, движение и обработка сущностей (пакетов) в системе вызывают события (Event) – такие, как получение или передача пакета, вылет самолета и тп. В свою очередь, эти события изменяют состояния в системе и влияют на поведение системы.

Библиотека SimEvents позволяет моделировать такие компоненты сети как сервер (Entity Server), источник пакетов (Entity Generator), буферная память (Entity Queue), учитывать порядок обслуживания пакетов, моделировать процесс коммутации пакетов (Entity Input/Output Switch), а также анализировать и рассчитывать пропускную способность сети, задержки при передаче пакетов, число потерянных пакетов и др. В свою очередь использование программного продукта Stateflow позволяет реализовать в имитационной модели логику переключения источника нестационарных информационных потоков из активного состояния в состояние паузы.

Структурная схема имитационной модели динамического резервирования радиоресурса космического аппарата связи при обслуживании нестационарных

информационных потоков с учетом задержки в управлении реализованная в программной среде Matlab/Simulink представлена на рис. 8

Имитационная модель состоит из структурно-функциональных блоков связанных между собой логическими функциями:

где блок №1 – ON-OFF источник, который моделирует поступление нестационарных информационных потоков в канал связи;

блок №2 – буфер с дисциплиной обслуживания FIFO (First in first out, первый поступил – первый обслужен), который моделирует работу оперативной памяти модемное оборудование станции спутниковой связи при поступлении нестационарных информационных потоков;

блок №3 – коммутационное устройство, предназначенное для распределения передаваемых пакетов между двумя каналами связи (основным и резервным, который адаптивно подключается при переполнении буфера в случае $P_{отк} \geq 0,01$);

блок №4 – первый сервер, который работает постоянно и моделирует функционирование основного спутникового канала связи;

блок №5 – второй сервер, который работает адаптивно и моделирует функционирование резервного (дополнительного) спутникового канала связи подключение которого происходит в случае $P_{отк} \geq 0,01$;

блок №6 – в данном блоке производится расчет вероятностно-временных характеристик модели $P_{отк}$.

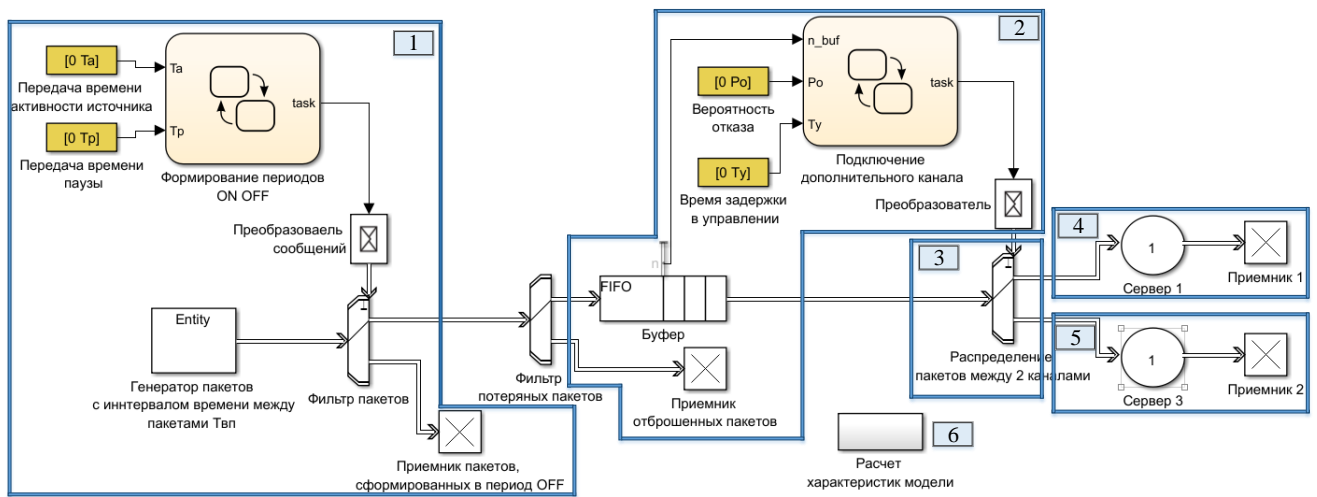


Рис. 8. Структурная схема имитационной модели динамического резервирования радиоресурса космического аппарата связи при обслуживании нестационарных информационных потоков с учетом задержки в управлении.

Приведенные блоки имитационной модели функционируют по разработанному алгоритму, который представлен на рис. 9.

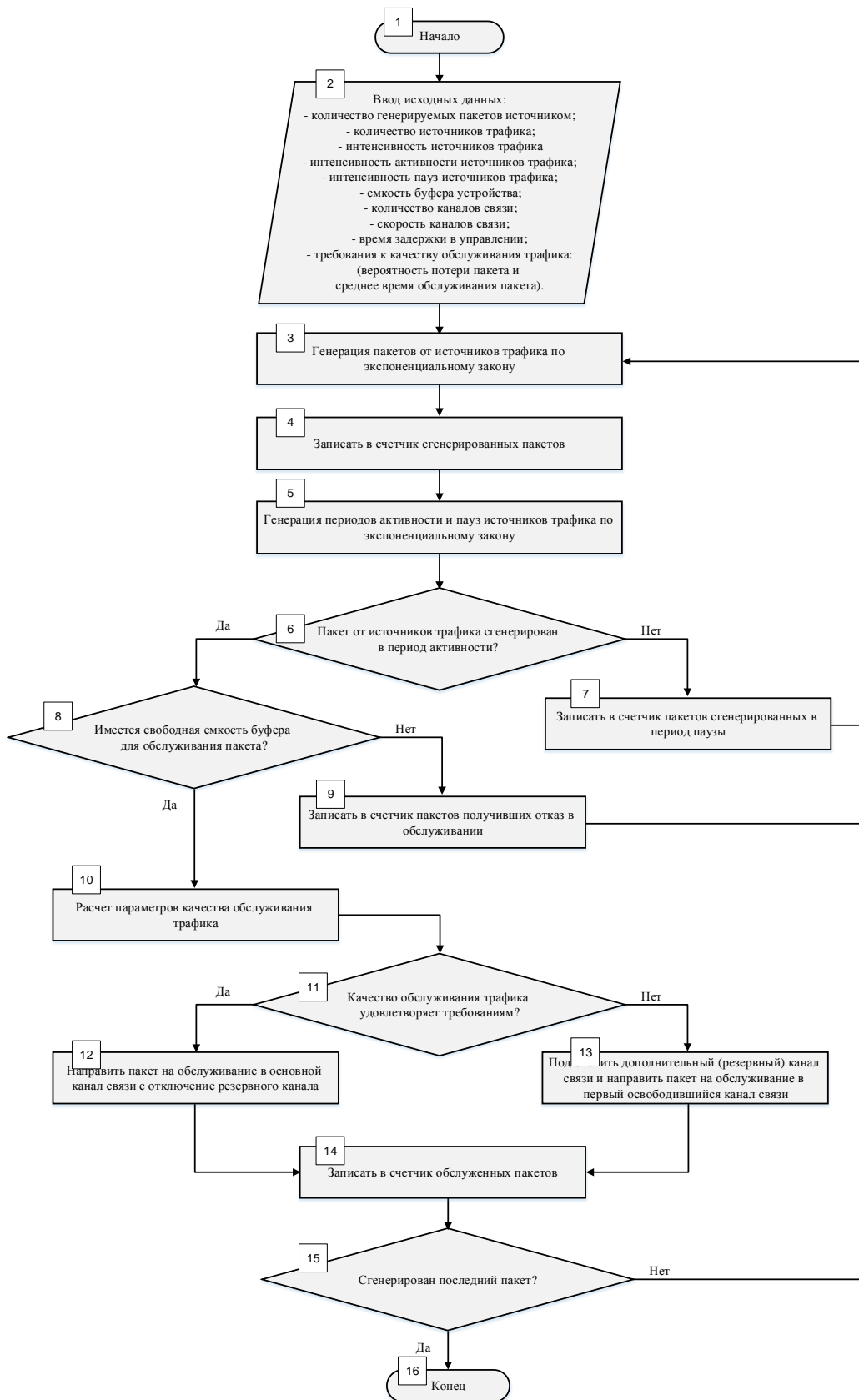


Рис. 9. Алгоритм функционирования имитационной модели динамического резервирования радиоресурса космического аппарата связи при обслуживании нестационарных информационных потоков с учетом задержки в управлении

На 1 этапе работы алгоритма для формирования статистики производится ввод исходных данных (блок №2 алгоритма), таких как:

- количество генерируемых пакетов источником;
- количество источников трафика;
- интенсивность источников трафика
- интенсивность активности источников трафика;
- интенсивность пауз источников трафика;
- емкость буфера устройства;
- количество каналов связи;
- скорость каналов связи;
- время задержки в управлении;
- требования к качеству обслуживания трафика – вероятность потери пакета и

среднее время обслуживания пакета.

На 2 этапе производится генерация пакетов по заданному закону распределения с записью их в счетчик, а также генерация длительности активности и пауз источников трафика с последующей проверкой на условие генерации пакетов в активные периоды и записью их в счетчик пакетов (блоки №3-7).

На 3 этапе проверяются условия наличия свободной емкости буфера устройства для обслуживания пакета с записью их в счетчик пакетов, получивших отказ в обслуживании из-за переполнения буфера (блоки №8-9).

На заключительном этапе производится расчет параметров качества обслуживания трафика с проверкой по критерию их удовлетворения заданным требованиям, в случае неудовлетворения происходит запрос на подключение резервного канала передачи данных (блоки №10-14).

Рассмотрим структурные блоки имитационной модели динамического резервирования радиоресурса космического аппарата связи при обслуживании нестационарных информационных потоков с учетом задержки в управлении более подробно.

Генератор пакетов непрерывно в течении времени моделирования T_{mod} генерирует пакеты (рис. 10). Логика работы ON-OFF источника предполагает, что пакеты поступают в систему только в периоды ON (активности источника), а в периоды OFF (паузы) пакеты в систему не поступают. При этом длительности периодов активности t_{on} и паузы t_{off} являются случайными величинами распределенными по экспоненциальному закону.

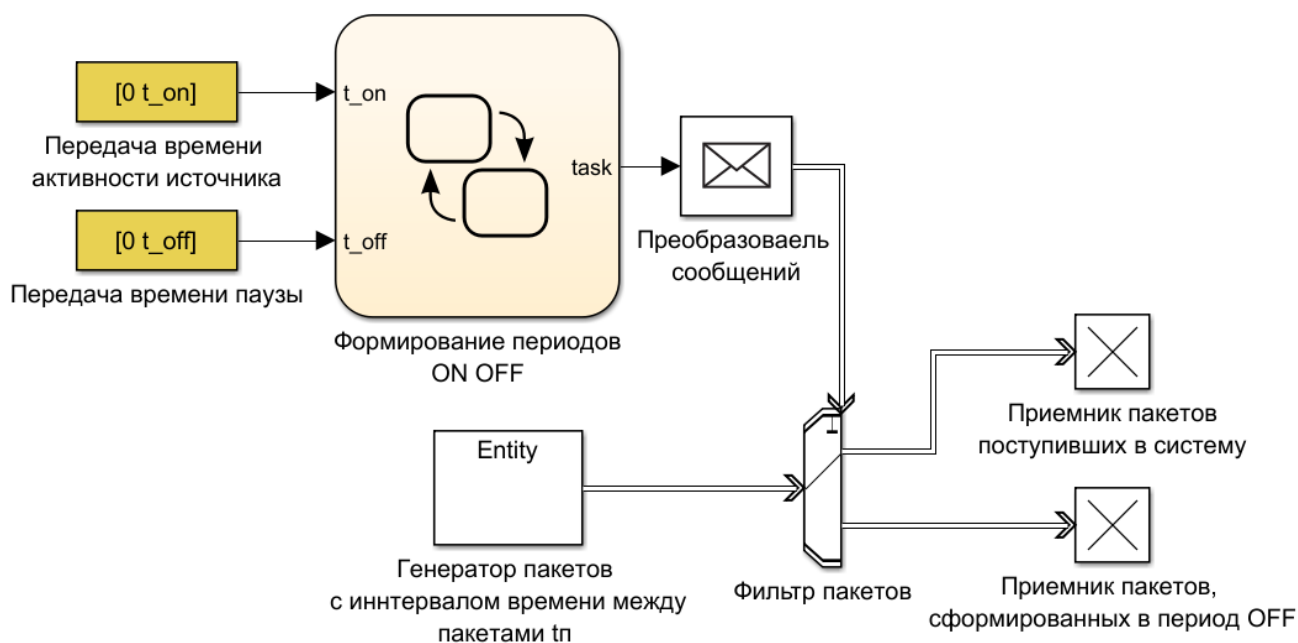


Рис. 10. Структурная схема имитационной модели ON-OFF источника нестационарных информационных потоков.

Для реализации данной особенности ON-OFF источника в модели используется блок Matlab/Simulink/Stateflow (формирование периодов ON OFF) (рис. 11). Блок ON находится в активном состоянии в течении времени t_{on} , заявки сформированные во время интервала t_{on} перемещаются в систему, так как активным считается выход 1 фильтра пакетов ($task=1$). После окончания интервала времени t_{on} , активным становится блок OFF. Данный блок находится в активном состоянии в течении интервала времени t_{off} (рис. 11). Пакеты, сгенерированные в период активности блока OFF в систему не поступают, в расчете характеристик модели не участвуют, перемещаются в приемник пакетов, сформированных в период OFF ($task=2$) (рис. 11). Таким образом интервалы активности и паузы источника являются случайными величинами, распределенными по

экспоненциальному закону. Вовремя активности источника пакеты поступают в систему, а во время паузы пакеты в систему не поступают.

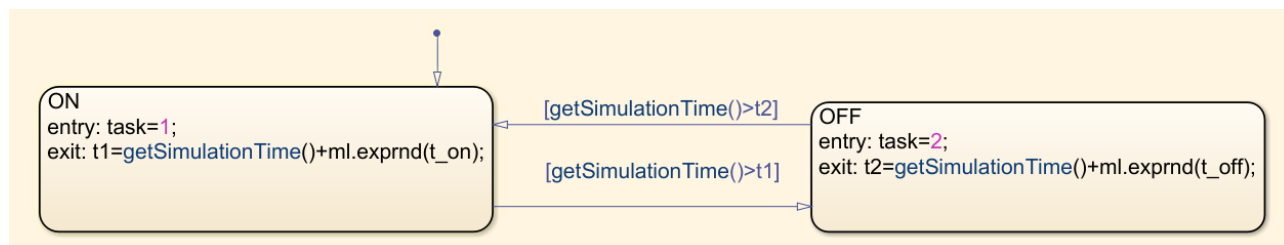


Рис. 11. Реализация переключения периодов активности и паузы

Рассмотрим работу составных элементов модели, расположенных в блоке № 2.

В блоке № 2 основным элементом является буфер с дисциплиной обслуживания FIFO. Пакеты поступают в буфер после ON-OFF источника. В случае если буфер занят, заявки, которые поступают в буфер будут отбрасываться в приемник пакетов, не поступивших систему. Вероятность потери пакетов для имитационной модели получается при помощи отношения числа отброшенных пакетов перед буфером на

общее число пакетов
$$P_{отк} = \frac{N_{ном}}{N_{общ}}$$
.

Далее в модели используется блок Matlab/Simulink/Stateflow, который формирует запрос на подключение второго канала (рис. 12).

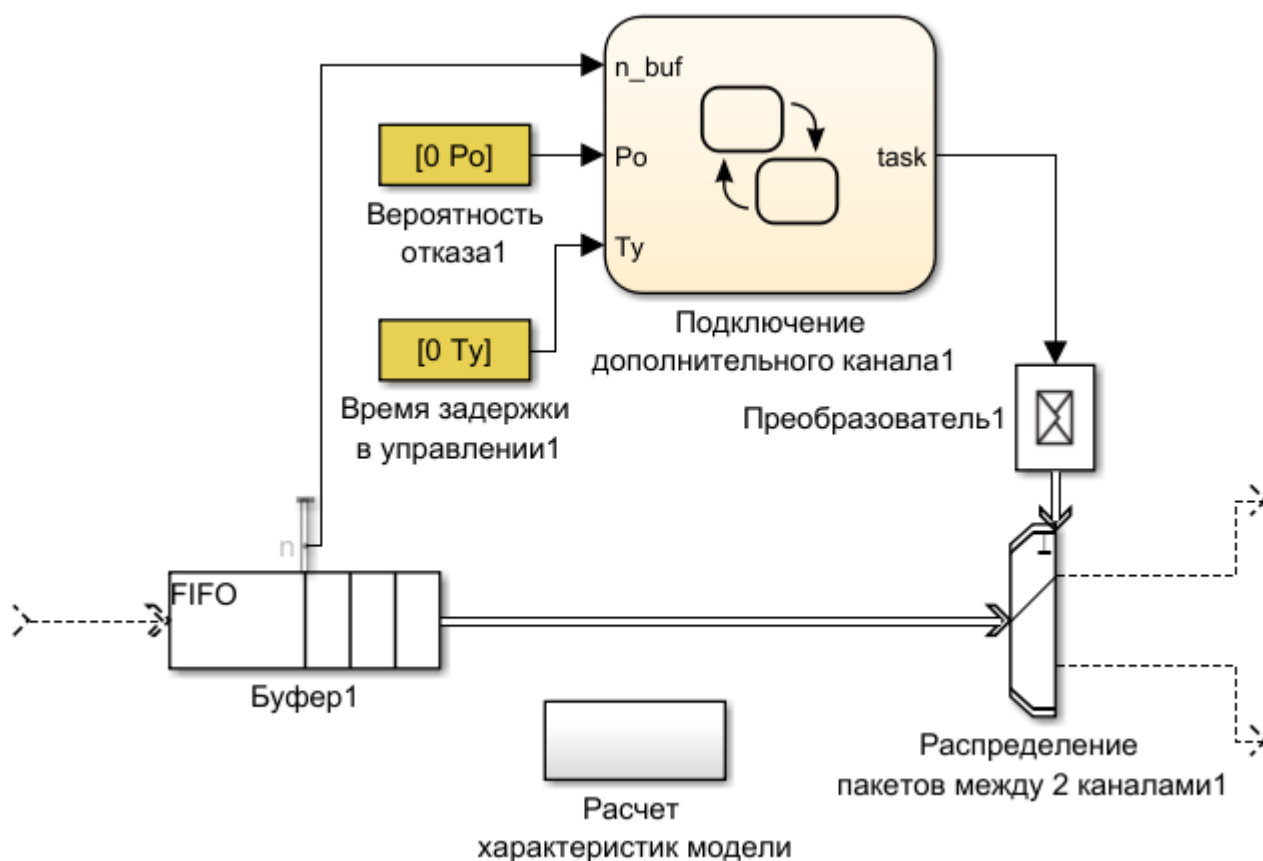


Рис. 12. Реализация переключения периодов активности и паузы

По умолчанию обслуживание пакетов происходит в первом сервере (Server_1, рис 13) со средним временем обслуживания одного речевого пакета $T_0 = 0.18c$. В случае если вероятность потери пакетов $P_{отк} \geq 0.01$ происходит переход в блок (Server_2) и формируется запрос на подключение второго канала ($task=2$). При этом формирование запроса на подключение дополнительного канала происходит с учетом задержки в управлении ($T_y = 0.25c$), то есть подключение дополнительного канала происходит не мгновенно, а с учетом времени необходимого для формирования запроса на подключение второго канала (рис. 13). После того как вероятность потери пакетов принимает значение $P_{отк} < 0.01$ использование второго

канала прекращается и обслуживание пакетов производится через первый обслуживающий прибор (Server_1). Этот процесс попеременного использования двух обслуживающих приборов продолжается в течение времени моделирования $T_{mod} = 10 \times 10^6 c$.

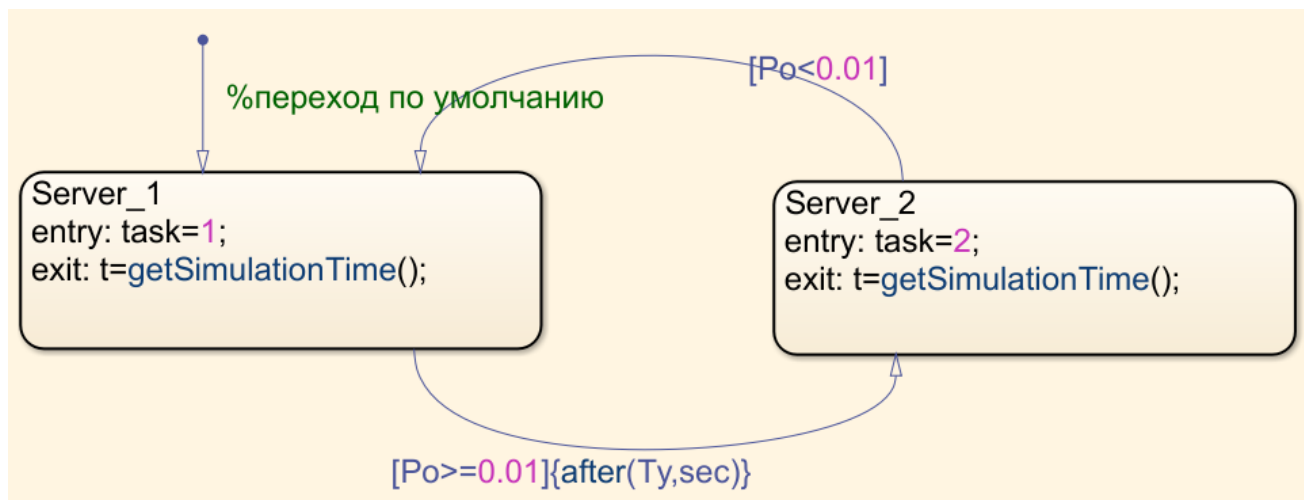


Рис. 13. Реализация переключения периодов активности и паузы

Блок № 3 модели предназначен для переключения между двумя обслуживающими устройствами, при этом переключение между обслуживающими устройствами происходит после расчета в блоке № 2 допустимой вероятности потери пакетов $P_{отк} \geq 0.01$ и анализа количества пакетов в буфере. Блоки № 4, 5 представляют собой обслуживающие устройства, со средним временем обслуживания одного речевого пакета $T_0 = 0.18c$, при этом данное время является случайной величиной распределенной по экспоненциальному закону. В блоке № 6 происходит расчет характеристик модели: времени моделирования T_{mod} , вероятности потери пакетов $P_{отк}$ и подсчет общего числа пакетов $N_{общ}$.

Результаты имитационного моделирования динамического резервирования радиоресурса космического аппарата связи при обслуживании нестационарных информационных потоков с учетом задержки в управлении

Отличие имитационной модели от аналитической заключается в том, что оптимальное решение задачи (6) – (7) может быть получено в том для случая, когда емкость буфера $N_{\text{буф}} > 100$. Так как расчет аналитической модели производится путем прямого перебора, поэтому для сравнения результатов имитационного и аналитического моделирования будем рассматривать случай, когда емкость буфера $N_{\text{буф}} = 30$.

При моделировании использовались следующие допущения и исходные данные:

- скорость кодирования речи $C_k = 10$ Кбит/с;
- дискретность работы пакетизатора речи $\Delta t_{\text{п}} = 20$ мс;
- средняя длительность активности абонента $T_a = 1,2$ с, соответственно, интенсивность перехода в состояние молчания абонента $\alpha = 1/T_a = 0,83$;
- средняя продолжительность паузы $T_{\text{п}} = 1,8$ с, соответственно, интенсивность перехода в состояние активности абонента $\beta = 1/T_{\text{п}} = 0,56$;
- среднее время распространения радиосигнала от ЗС до КАС и обратно $T_y = 0,25$ с, соответственно, интенсивность удовлетворения запросов на выделение дополнительного радиоресурса $\gamma = 1/T_y = 4$.

Результаты моделирования представлены на рис. 14.

На рисунке 14 представлены сравнение результатов имитационного и аналитического моделирования. Расчет допустимой вероятности потери пакетов для имитационной модели производился в течение всего времени моделирования $T_{mod} = 10 \times 10^6 c$, при этом существенное отклонение значения имитационного моделирования от значения $P_{отк}$ для аналитической модели наблюдается в момент неустойчивого состояния системы $T_{mod} = 1 \times 10^6 c$, после этого результаты аналитического и имитационного моделирования значительно друг от друга не отличаются.



Рис. 14 Управление подключением дополнительно канала для поддержания заданного уровня потерь пакетов

На рисунке 15 представлены результаты загрузки системы для различного количества обслуживающих устройств. В случае если в системе нет дополнительного обслуживающего устройства, загрузка сервера $\gamma_1 = 1$. В случае подключения дополнительного обслуживающего устройства при условии обеспечения требуемого уровня потери пакетов и минимальной интенсивности обслуживания загрузка первого сервера $\gamma_1 \approx 0,7$, загрузка дополнительного сервера

$\gamma_2 \approx 0,3$ следовательно экономия радиоресурса первого обслуживающего устройства составляет около 70%.



Рис. 15 Загрузка одноканальной и двухканальной системы.

Заключение

Распространение предложенного подхода по динамическому резервированию ограниченного радиоресурса КАС, а также результатами представленными в работах [16, 17, 24], позволит добиться существенного выигрыша в экономии канального ресурса КАС за счет динамического перераспределения его между радионаправлениями. Следует отметить, что выигрыш будет зависеть от многих факторов, например, таких как требования к качеству обслуживания трафика, времени запроса и выделения канального ресурса и других, поэтому он может варьироваться в пределах от 50 до 100%, что в среднем составляет 75% и согласуется с результатами имитационного моделирования. Анализ вычислительной сложности предложенного алгоритма показал, что одной из проблем, возникающих

на пути создания и внедрения технологии адаптивного резервирования радиоресурса КАС является применение более производительной элементной базы и повышение объема оперативной памяти при создании каналообразующей аппаратуры ЗССС.

Следует ожидать, что разработанный подход по управлению ограниченным ресурсом КАС на случай подключения к каждой ЗС группы из M абонентов, позволит добиться еще более существенного выигрыша в экономии радиоресурса КАС за счет динамического перераспределения его между радионаправлениями. Однако, изучение этого вопроса, учитывая существенное увеличение размерности задачи, является предметом отдельного исследования.

Библиографический список

1. Антонян А.Б. Пакетная коммутация для передачи речи // Вестник связи. 1999. № 5. С. 68 - 71.
2. Bae J.J., Suda T. Survey of Traffic Control Schemes and Protocols in ATM Networks // Proc. IEEE, 1991, vol. 79, no. 2, pp. 170 - 186.
3. Chandra K. Statistical Multiplexing. The Wiley Encyclopedia of Telecommunicatins, John Wiley & Sons Publication, 2002, vol. 5, pp. 2420 – 2432.
4. Cox C. An Introduction to LTE: LTE, LTE-Advanced, SAE and 4G Mobile Communications, John Wiley & Sons Ltd, 2012, 337 p.
5. Коган А.В. IP-телефония: оценка качества речи // Технологии и средства связи. 2001. № 1. С. 78 - 84.

6. Петров В.В. Структура телетрафика и алгоритм обеспечения качества обслуживания при влиянии эффекта самоподобия: дис. ... канд. техн. наук. - М.: 2004. – 199 с.
7. Michiel H., Laevens K. Teletraffic Engineering in a Broad-Band Era // Proc. IEEE, 1997, vol. 85, no 12, pp. 2007 – 2033.
8. Шелухин О.И., Лукьянцев Н.Ф. Цифровая обработка речи. – М.: Радио и связь, 2000. – 256 с.
9. Bazaraa M.S., Shetty C.M. Nonlinear Programming: Theory and Algorithms. N. Y., John Wiley & Sons, 1979, 872 p.
10. 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.
11. Ковальский А.А. Модели статистического уплотнения и алгоритмы диспетчеризации разнородного трафика земных станций спутниковой связи в условиях изменяющейся помеховой обстановки // Труды МАИ. 2016. № 90. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=74818>
12. Ковальский А.А. Организация динамического мультиплексирования трафика мультисервисных сетей в каналообразующей аппаратуре земных станций спутниковой связи с учетом изменяющейся помеховой обстановки // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 1. С. 175 - 212
13. Кузичкин А.В., Зиннуров С.Х., Ковальский А.А. Динамическое распределение радиоресурса ретранслятора с учетом неоднородности трафика

и запаздывания при управлении // Прикладная физика и математика. 2014. № 6. С. 8 - 14.

14. 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.

15. Топорков И.С., Ковальский А.А., Зиннуров С.Х. Модель и алгоритм управления процессом резервирования радиоресурса сети спутниковой связи при обслуживании мультисервисного нестационарных информационных потоков // Известия института инженерной физики. 2016. Т. 1. № 39. С. 37 - 47.

16. Новиков Е.А. Оперативное распределение радиоресурса спутника-ретранслятора при нестационарном входном потоке сообщений с учетом запаздывания в управлении // Информационно-управляющие системы. 2014. Т. 2. № 69. С. 79 – 86.

17. Новиков Е.А. Оценка пропускной способности спутника-ретранслятора при резервировании радиоресурса с упреждением // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2014. Т. 3. № 15. С. 62 - 69.

18. Шелухин О.И., Тенякшев А.М., Осин А.В. Моделирование информационных систем. – М.: Радиотехника, 2005. – 368 с.

19. Макаренко С.И. Методика оценки времени задержки пакета в канале связи в условиях нестабильности входного трафика // Инфокоммуникационные технологии. 2007. Т. 5. № 3. С. 95 - 96.

20. Кихтенко А.В., Макаренко С.И. Методика оценки времени задержки пакета в спутниковой сети связи в условиях нестабильности входного трафика // Системы управления и информационные технологии. 2007. Т. 27. № 1.3. С. 344 - 348.
21. Adas A. Traffic models in broadband networks // IEEE Communication magazine, 1997, vol. 35, no. 7, pp. 82 - 89.
22. Muscariello L. Markov models of internet traffic and a new hierarchical MMPP model // Computer communications, 2005, vol. 28, no. 16, pp. 1835 - 1851.
23. Клейнрок Л. Вычислительные системы с очередями. Пер. с англ. / Под ред. Б.С. Цыбакова. - М.: Мир, 1979. – 600 с.
24. Новиков Е. А., Макаренко С. И. Оперативное управление ресурсом АТМ-коммутатора при обеспечении заданного качества обслуживания нестационарных информационных потоков // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2013. Т. 1. № 9. С. 43 - 52.
25. Бахтин А.А., Омелянчук Е.В., Семенова А.Ю. Анализ современных возможностей организации сверхвысокоскоростных спутниковых радиолиний // Труды МАИ. 2017. № 96. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=85828>
26. Генов А.А., Осипов В.В., Савилкин С.Б. Принципы реализации сети спутниковой связи стандарта DVB-RCS с пространственно-частотно-временным разделением ресурса на основе многолучевых АФАР X-диапазона // Труды МАИ. 2016. № 87. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=69734>