

УДК 621.394.343

Методика повышения эффективности обработки видеотрафика при использовании сетевых механизмов распределения мультимедийного трафика по нескольким маршрутам

Technique for increasing the efficiency of video traffic processing when using network mechanisms for distributing multimedia traffic along several routes

Одоевский / Odoevsky S.

Сергей Михайлович

(odse2017@mail.ru)

доктор технических наук, профессор.

ФГКВОУ ВО «Военная академия связи имени

Маршала Советского Союза С. М. Буденного» МО РФ

(ВАС им С. М. Буденного),

профессор кафедры сетей связи и систем

коммутации.

г. Санкт-Петербург

Рафальская / Rafalskaya M.

Маргарита Игоревна

(margo-23@bk.ru)

ВАС им. С. М. Буденного, адъюнкт кафедры сетей

связи и систем коммутации.

г. Санкт-Петербург

Ясинский / Yasinskii S.

Сергей Александрович

(yasinsky777@mail.ru)

доктор технических наук, доцент.

ЗАО "Институт телекоммуникаций",

ведущий специалист.

г. Санкт-Петербург

Сарафанников / Sarafannikov E.

Евгений Витальевич

(sev-evgen@mail.ru)

кандидат технических наук.

ВАС им. С. М. Буденного,

заместитель начальника кафедры сетей связи

и систем коммутации.

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: видеотрафик – video traffic; повышение эффективности – efficiency improvement; распределение трафика – traffic distribution; обратные задачи – inverse problems.

Описывается методика повышения эффективности обработки видеотрафика в устройствах коммутирования мультисервисной сети по трем взаимосвязанным обобщенным показателям путем решения одной прямой и двух обратных задач оптимизации распределения мультимедийного трафика по нескольким маршрутам.

The technique of increasing the efficiency of video traffic processing in multiservice network switching devices by three interrelated generalized indicators by solving one direct and two inverse problems of optimizing the distribution of multimedia traffic along several routes is described.

Введение

Настоящая статья является продолжением статьи [1], в которой было отмечено, что мультимедийный трафик в современных мультисервисных сетях (МСС) включает разнородные потоки данных, из которых наибольшую нагрузку на используемые каналы связи создает видеотрафик (ВТ), генерируемый различными оконечными устройствами видеосвязи. Отли-

чительной особенностью мультимедийного трафика (ММТ) является группирование пакетов или, иначе говоря, пачечность трафика, количественно характеризуемая всплесками интенсивности пакетов, что является одним из проявлений свойства самоподобия [2], которое присуще данному типу трафика в мультисервисных пакетных сетях [3].

Качество обслуживания ВТ внутри сети сложно оценивать по конечным субъективным показателям восприятия качества изображения [3], поэтому для этой цели используются традиционные для систем массового обслуживания (СМО) показатели задержек и потерь пакетов [4], а также доступности виртуальных каналов с необходимой пропускной способностью [5]. В ряде случаев на отдельных участках сети ВТ может передаваться в обезличенном виде, обрабатываясь в устройствах коммутирования пакетов в общем потоке мультимедийных данных, передаваемых в общем направлении, включающем несколько маршрутов. При этом возникает вопрос, насколько эффективной является обработка ВТ при использовании тех или иных сетевых механизмов (СМ) распределения ММТ трафика по нескольким маршрутам и какая обработка будет наиболее эффективной.

В качестве показателя эффективности обработки ВТ на уровне пакетов может использоваться один из указанных выше показателей качества обслуживания – задержек или потерь пакетов – или их некоторая свертка. При заданной интенсивности пакетов

и пропускной способности используемых маршрутов можно считать, чем меньше задержки и/или потери пакетов, тем лучше и, соответственно, тем эффективнее используемые СМ. Достоинством такой оценки эффективности является естественный характер причинно-следственных связей (условия функционирования → сетевые механизмы → качество обслуживания = показатель эффективности), удобный как для расчетов по прямым формулам, вытекающим из соответствующих моделей СМО, так и для контрольных измерений в реальной сети. Удобным в вычислительном смысле в данном случае является и решение оптимизационных задач поиска наилучших СМ (наилучших значений управляемых параметров) по критерию минимума выбранного показателя задержек и/или потерь пакетов.

При заданных требованиях к показателям задержек и/или потерь пакетов, что обычно и бывает на практике, СМ нацеливаются на выполнение этих требований в изменяющихся условиях функционирования (воздействия дестабилизирующих факторов). При этом в качестве показателя эффективности используемых СМ целесообразно использовать некоторую контролируемую меру условий функционирования, характеризующую их максимальное допустимое мешающее или минимальное необходимое помогающее воздействие, при котором требования к качеству обслуживания трафика еще выполняются, если они выполнялись до оптимизации, или уже выполняются, если они не выполнялись. В первом случае улучшение показателя эффективности характеризует максимальный запас устойчивости к возможным изменениям условий функционирования, а во втором – минимально необходимую компенсацию воздействия дестабилизирующих факторов (ДФ).

С точки зрения эффективности обработки ВТ в качестве меры мешающего воздействия условий функционирования можно рассматривать суммарную интенсивность общего ММТ, а в качестве меры помогающего воздействия – суммарную пропускную способность доступных маршрутов. При выполнении заданных требований к качеству обслуживания ВТ можно считать, чем выше максимальная допустимая суммарная интенсивность мультимедийного трафика (при заданной пропускной способности доступных маршрутов) или чем ниже минимальная необходимая пропускная способность доступных маршрутов (при заданной интенсивности ММТ), тем эффективнее используемые СМ. Достоинством такой оценки эффективности является возможность её использования в качестве контролируемой меры допустимых изменений условий функционирования, на которые могут влиять соответствующие СМ ограничения нагрузки и резервирования канальных ресурсов [1]. Однако, для расчета указанных показателей эффективности необходимо решать непростые в вычислительном смысле обратные оптимизационные задачи по отношению к причинно-следственным связям и прямым формулам, вытека-

ющим из соответствующих моделей СМО. В настоящей статье рассматривается обобщенная методика повышения эффективности обработки ВТ по трем отмеченным выше показателям и приводятся примеры её использования путем решения одной прямой и двух обратных задач оптимизации распределения ММТ по нескольким маршрутам.

Формализованное представление модели обработки видеотрафика при использовании сетевых механизмов распределения мультимедийного трафика по нескольким маршрутам

Под моделью обработки ВТ будем понимать функциональные зависимости $Q=f(m,u)$ показателей качества обслуживания видеотрафика Q в рассматриваемом информационном направлении от параметров сетевых механизмов $m \in M$ и от параметров условий функционирования $u=(u_\lambda, u_\mu) \in \{U_\lambda, U_\mu\}$, где U_λ – множество возможных параметров внутренних ДФ u_λ (влияющих на характеристики общего мультимедийного трафика и суммарную интенсивность поступающих пакетов λ), U_μ – множество возможных параметров внешних ДФ u_μ (влияющих на характеристики используемых каналов связи в доступных маршрутах и их суммарную пропускную способность в виде интенсивности обслуживания пакетов μ).

При заданных требованиях к показателям качества обслуживания видеотрафика $Q_{тр}$ и наличии возможности измерения или прогноза параметров условий функционирования (u_λ, u_μ) на практике обычно решается задача поиска таких параметров сетевых механизмов $m^* \in M$, при которых обеспечивается выполнение требований к показателям качества видеотрафика $Q=f(m, u_\lambda, u_\mu) \in Q_{тр}$:

$$m^* = \arg \min_{m \in M} Q(m, u_\lambda, u_\mu) \in Q_{тр}. \quad (1)$$

Решение задачи (1) в общем случае является или неоднозначным, или отсутствующим – подходящих параметров сетевых механизмов m^* , удовлетворяющих заданным требованиям, может быть или очень много, или ни одного. Кроме того, постановка задачи (1) не позволяет сравнивать анализируемые параметры сетевых механизмов $m \in M$ между собой и судить о степени эффективности их использования при обработке ВТ. Формально эффективность в данном случае можно оценить только двумя значениями условного бинарного показателя качества: «годится» или «не годится».

Для более информативной оценки эффективности обработки ВТ при использовании различных СМ с параметрами $m \in M$ предлагается использовать следующие обобщенные показатели, характеризующие процесс обработки ВТ с трех точек зрения: каче-

ства обслуживания по показателю средней задержки пакетов T , мешающих факторов по показателю максимальной суммарной интенсивности мультимедийного трафика $\lambda_{\text{доп}}$, допустимой для обеспечения требуемой задержки $T \leq T_{\text{тр}}$, и канальных ресурсов по показателю минимальной суммарной пропускной способности используемых маршрутов $\mu_{\text{дст}}$, достаточной для обеспечения требуемой задержки $T \leq T_{\text{тр}}$.

На основании известной прямой функциональной зависимости множества показателей качества обслуживания видеотрафика $Q=f(m, u_\lambda, u_\mu)$ выбранный обобщенный показатель задержки $T \in Q$ может быть вычислен по соответствующей прямой формуле:

$$T = f(m, u_\lambda, u_\mu). \quad (2)$$

Конкретный вид функции $f(\cdot)$ зависит от используемой модели СМО, отражающей процесс обработки ВТ в составе ММТ при использовании СМ с параметрами m в условиях, характеризуемых параметрами трафика u_λ и канальных ресурсов u_μ . Будем полагать, что канальный ресурс u_μ описывается суммарной интенсивностью обслуживания μ , которая распределена между $n \geq 2$ маршрутами с долями $\gamma = \{\gamma_i\}_n$. Рассматриваемые сетевые механизмы m представим в виде некоторого правила распределения суммарного трафика с интенсивностью λ между n маршрутами с долями $\alpha = \{\alpha_i\}_n$.

Кроме интенсивности λ в качестве особой характеристики ММТ, включающего ВТ, будем считать известным параметр Хёрста $H > 0.5$. Будем полагать, что все маршруты $i = 1, n$ описываются однотипными моделями СМО $G_{\text{вх}}/G_{\text{вых}}/1$ с функциями распределения входного трафика $G_{\text{вх}}$ и времени обслуживания $G_{\text{вых}}$, отличающимися лишь контролируемыми параметрами средней интенсивности трафика $\lambda \cdot \alpha_i$ и интенсивности обслуживания $\mu \cdot \gamma_i$. Как показано в [1,6,7], для большинства таких СМО достаточно точной является следующая формула аппроксимации зависимости относительного времени ожидания $\tau_{\text{ож},i}$ от нагрузки ρ_i :

$$\tau_{\text{ож},i} = \frac{c \cdot \rho_i^a}{(1-\rho_i)^b}, \quad (3)$$

где a, b, c – параметры аппроксимации, зависящие от типа распределений $G_{\text{вх}}$ и $G_{\text{вых}}$, а также от их дополнительных параметров, в частности, от параметра Хёрста H , учет которого важен для ВТ в составе самоподобного ММТ. Так, для СМО $fbm/M/1$ данные параметры принимают вид [8]: $a=1/(2(1-H))$, $b=H/(1-H)$, $c=1$, а для СМО $P/M/1$ в [6] получены приближенные значения: $a \approx 2-H$, $b \approx (8.7-5.6H)/(10(1-H))$, $c \approx (6.7-6H)/(10(1-H))$.

Учитывая, что для отдельного i -го маршрута $\rho_i = \lambda_i / \mu_i = (\lambda \cdot \alpha_i) / (\mu \cdot \gamma_i)$ и $T_i = T_{\text{ож},i} + T_{\text{об},i} = \tau_{\text{ож},i} \cdot T_{\text{об},i} + T_{\text{об},i} = T_{\text{об},i} \cdot (\tau_{\text{ож},i} + 1) = (1/\mu_i) \cdot (\tau_{\text{ож},i} + 1)$, где $T_i, T_{\text{ож},i}, T_{\text{об},i}$ – время за-

держки, время ожидания и время обслуживания пакетов в i -м маршруте, формулу (2) расчета среднего времени задержки при передаче ММТ по n маршрутам с учетом (3) можно записать в виде:

$$T = \frac{1}{\mu} \sum_{i=1}^n \alpha_i \left(\frac{c \cdot \left(\frac{\lambda \cdot \alpha_i}{\mu \cdot \gamma_i} \right)^a}{\left(1 - \frac{\lambda \cdot \alpha_i}{\mu \cdot \gamma_i} \right)^b} + 1 \right). \quad (4)$$

Выделяя в качестве основных обобщенных параметров условий функционирования u_λ и u_μ параметры интенсивности трафика λ и интенсивности обслуживания μ , будем считать, что остальные параметры условий функционирования (параметр Хёрста H , параметры аппроксимации a, b, c и распределение $\gamma = \{\gamma_i\}_n$) подразумеваются под обозначением функции $f(\cdot)$, точный вид которой соответствует выражению (4). В таком случае прямую формулу (2) можно представить в следующем обобщенном виде:

$$T = f(m, \lambda, \mu). \quad (5)$$

Для определения второго $\lambda_{\text{доп}}$ и третьего показателя эффективности $\mu_{\text{дст}}$ необходимо задаться требуемым значением задержки $T_{\text{тр}}$ и использовать расчетные функции, обратные прямой формуле (5):

$$\lambda_{\text{доп}} = f^{-1}(m, T_{\text{тр}}, \mu) = \arg_{\lambda} (f(m, \lambda, \mu) = T_{\text{тр}}); \quad (6)$$

$$\mu_{\text{дст}} = f^{-1}(m, \lambda, T_{\text{тр}}) = \arg_{\mu} (f(m, \lambda, \mu) = T_{\text{тр}}). \quad (7)$$

Точной аналитической зависимости, обратной прямой формуле (5) в виде (4), в общем случае не существует (за редким исключением при $H=0.5$). Эффективные численные методы решения задач (6) и (7), учитывающие конкретный вид прямой функциональной зависимости (4), описаны в [1].

Сравнивая первый показатель T (соответствующий использованию сетевых механизмов m в условиях, характеризуемых параметрами трафика λ и канальных ресурсов μ) с требуемым значением $T_{\text{тр}}$ по величине $\Delta T_{\text{тр}} = T_{\text{тр}} - T$ можно судить о том, на сколько (с каким запасом) требования к задержке выполнены (если $\Delta T_{\text{тр}} \geq 0$), или на сколько (с каким недостатком) не выполнены (если $\Delta T_{\text{тр}} < 0$).

Сравнивая второй показатель $\lambda_{\text{доп}}$ (соответствующий условию выполнения требования к задержке $T \leq T_{\text{тр}}$ при использовании тех же сетевых механизмов m в условиях, характеризуемых параметром канальных ресурсов μ) с текущей или ожидаемой интенсивностью λ по величине $\Delta \lambda_{\text{доп}} = \lambda_{\text{доп}} - \lambda$ можно судить о том, на какую величину допустимо увеличение интенсивности трафика без нарушения требования к задержке (если $\Delta \lambda_{\text{доп}} \geq 0$), или на какую величину необходимо

снизить интенсивность трафика, чтобы требования к задержке были выполнены, если ($\Delta\lambda_{\text{доп}} < 0$).

Сравнивая третий показатель $\mu_{\text{дст}}$ (соответствующий условию выполнения требования к задержке $T \leq T_{\text{тр}}$ при использовании тех же сетевых механизмов m в условиях, характеризуемых параметром трафика λ) с текущей или ожидаемой интенсивностью обслуживания μ по величине $\Delta\mu_{\text{дст}} = \mu - \mu_{\text{дст}}$ можно судить о том, на какую величину допустимо снижение интенсивности обслуживания без нарушения требования к задержке (если $\Delta\mu_{\text{дст}} \geq 0$), или на какую величину необходимо повысить интенсивность обслуживания, чтобы требования к задержке были выполнены, если ($\Delta\mu_{\text{доп}} < 0$).

Методика повышения эффективности обработки видеотрафика путем оптимизации распределения мультимедийного трафика по нескольким маршрутам

Сравнивая приведенные выше показатели эффективности T , $\lambda_{\text{доп}}$ и $\mu_{\text{дст}}$, рассчитанные при разных СМ, например, m_1 и m_2 , можно повысить эффективность обработки ВТ выбирая тот из СМ, который эффективнее в тех или иных условиях функционирования, характеризуемых разными параметрами λ и μ , а также разными требованиями к задержке $T_{\text{тр}}$.

Для примера на рис. 1 приведены зависимости первого показателя – задержки T от интенсивности трафика λ при фиксированной интенсивности обслуживания μ (рис.1.а) и от интенсивности обслуживания μ при фиксированной интенсивности трафика λ (рис.1.б) для случаев использования двух вариантов сетевых механизмов m_1 и m_2 распределения трафика между двумя маршрутами с долями общей пропускной способности $\gamma_1=0.7$ и $\gamma_2=0.3$. Сетевому механизму m_1 соответствует типовое правило – направления всего трафика по одному маршруту с большей пропускной способностью, т.е. распределения трафика с долями $\alpha_1=1$ и $\alpha_2=0$. Сетевому механизму m_2 соответствует другое типовое правило – выравнивания нагрузки, согласно которому доли трафика, направляемого по разным маршрутам, соответствуют долям их общей пропускной способности, т.е. $\alpha_1=\gamma_1=0.7$ и $\alpha_2=\gamma_2=0.3$.

Вертикальной стрелкой на рис. 1.а показано повышение эффективности по первому показателю T за счет использования сетевого механизма m_2 по сравнению с m_1 при интенсивности трафика λ_1 (в виде снижения задержки от T_1 до T'_1), а на рис. 1.б – при интенсивности обслуживания μ_1 (в виде снижения задержки от T_1 до T''_1).

Горизонтальными стрелками на рис. 1.а показано повышение эффективности по второму показателю $\lambda_{\text{доп}}$ (в виде повышения допустимой интенсивности трафика от λ_1 до λ_2), а на рис. 1.б – по третьему показателю $\mu_{\text{дст}}$ (в виде снижения достаточной интенсивности обслуживания от μ_1 до μ_2) за счет использования сетевого механизма m_2 по сравнению с m_1 при величине требуемой задержки, равной T_1 .

Горизонтальными стрелками на рис. 1.а показано повышение эффективности по второму показателю $\lambda_{\text{доп}}$ (в виде повышения допустимой интенсивности трафика от λ_1 до λ_2), а на рис. 1.б – по третьему показателю $\mu_{\text{дст}}$ (в виде снижения достаточной интенсивности обслуживания от μ_1 до μ_2) за счет использования сетевого механизма m_2 по сравнению с m_1 при величине требуемой задержки, равной T_1 .

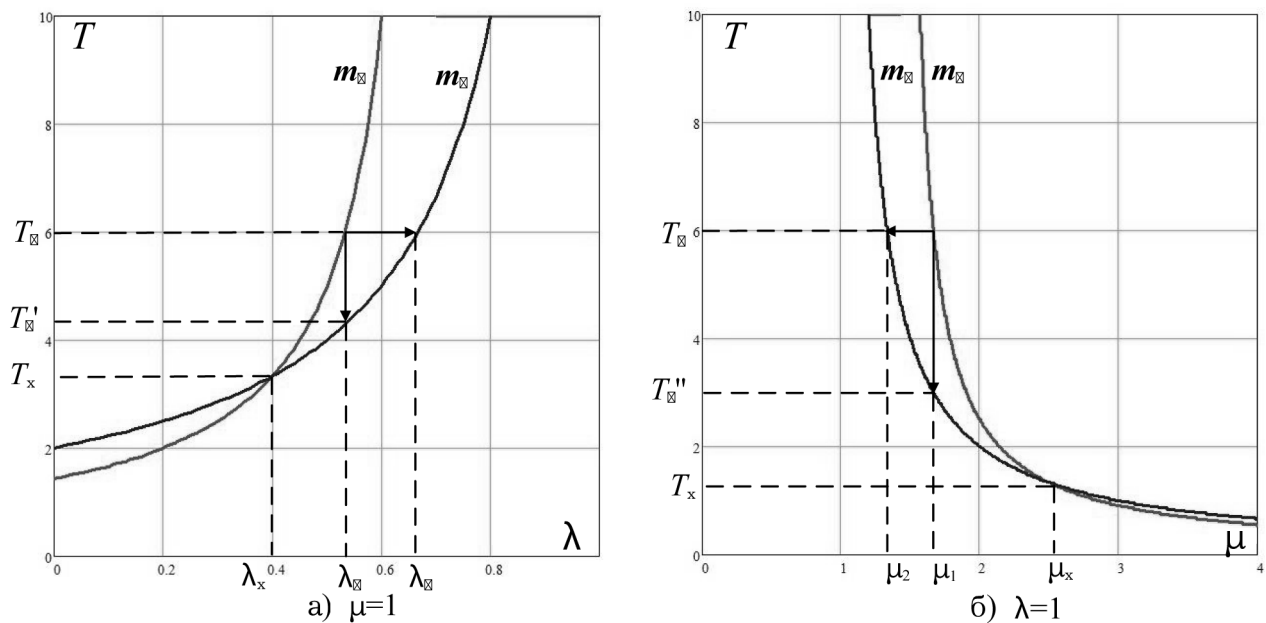


Рис. 1. Графическое представление повышения эффективности обработки трафика за счет выбора одного из двух типовых сетевых механизмов, использующих два маршрута

Как видно из графиков на рис.1, сетевой механизм распределения трафика m_2 в данном примере является более эффективным по сравнению с m_1 только при интенсивности трафика $\lambda > \lambda_x$, интенсивности обслуживания $\mu < \mu_x$ и требуемой задержке $T_{тр} > T_x$. При других параметрах условий функционирования и требованиях к задержке предпочтение меняются местами и более эффективным оказывается сетевой механизм m_1 , а не m_2 . Этот факт подсказывает целесообразность использования адаптивного переключения указанных СМ (динамического выбора более эффективного) в зависимости от контролируемых условий функционирования (при наличии такой возможности).

В случае наличия не двух, а множества доступных СМ (или одного с перестраиваемыми параметрами) $m \in M$ представляет интерес решение оптимизационной задачи нахождения такого СМ (или его параметров) $m_0 \in M$, при котором обеспечивается наилучшее значение выбранного показателя эффективности во всех условиях функционирования (при любых интенсивностях λ и μ и требованиях $T_{тр}$). Относительно трех рассмотренных выше показателей – задержки T , допустимой интенсивности трафика $\lambda_{доп}$ и достаточной интенсивности обслуживания $\mu_{дст}$ – указанную оптимизационную задачу можно представить в формализованном виде следующим образом:

$$T_0 = \min_{m \in M} f(m, \lambda, \mu) = f(m_0, \lambda, \mu), \text{ где } m_0 = \arg \min_{m \in M} f(m, \lambda, \mu); \quad (8)$$

$$\lambda_{доп.0} = \max_{m \in M} f^{-1}(m, T_{тр}, \mu) = f^{-1}(m_0, T_{тр}, \mu),$$

где $m_0 = \arg \max_{m \in M} f^{-1}(m, T_{тр}, \mu); \quad (9)$

$$\mu_{дст.0} = \min_{m \in M} f^{-1}(m, \lambda, T_{тр}) = f^{-1}(m_0, \lambda, T_{тр}),$$

где $m_0 = \arg \min_{m \in M} f^{-1}(m, \lambda, T_{тр}). \quad (10)$

В рассматриваемом случае использования сетевых механизмов $m \in M$ распределения трафика по n маршрутам множеству возможных параметров M соответствует множество A возможных распределений $\alpha = \{\alpha_i\}_n \in A$, которое описывается следующими ограничениями:

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1; \quad (11)$$

$$0 \leq \alpha_i \leq 1, \quad \forall i = \overline{1, n}. \quad (12)$$

При $n=2$ ограничения (11) и (12) можно свести к одному ограничению (12) на долю трафика $\alpha = \alpha_1$ только в первом маршруте: $0 \leq \alpha \leq 1$, а долю трафика во втором учитывать как $1-\alpha$. На рис. 2 в качестве примера приведены зависимости трех показателей эффективности от доли трафика α в первом маршруте при тех же параметрах условий функционирования и требуемой задержки, для которых на рис. 1 демонстрировалось повышение эффективности за счет использования сетевого механизма m_2 по сравнению с m_1 .

На рис. 3 приведены графики, аналогичные графикам на рис. 1, дополненные зависимостями задержки первого показателя – задержки T от интенсивности трафика λ (рис. 3.а) и от интенсивности обслуживания μ (рис. 3.б) для случая использования оптимального распределения трафика m_0 , найденного в результате решения оптимизационной задачи (8).

Как видно из графиков на рис. 3, за счет использования оптимального сетевого механизма m_0 распределения трафика по двум маршрутам обеспечивается максимально возможное повышение эффективности по всем трем показателям во всем диапазоне возможных значений параметров условий функционирования $\lambda \in [0, \mu]$, $\mu \in (\lambda, \infty)$ и требований $T_{тр} \in [1/\mu, \infty)$. Из сравнения результатов повышения эффективности по первому показателю T в случае $\lambda = \lambda_1$ (рис. 1.а и рис. 3.а) и в случае $\mu = \mu_1$ (рис. 1.б и рис. 3.б) при

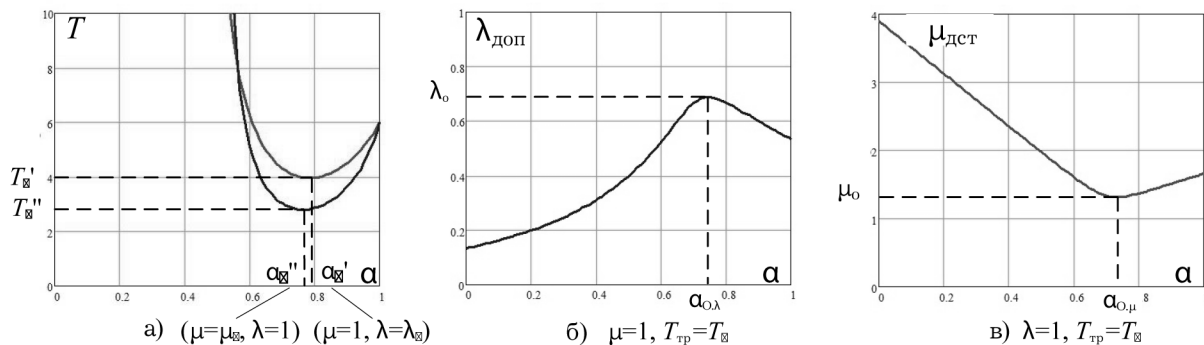


Рис. 2. Обеспечение максимального повышения эффективности обработки трафика по трем разным показателям за счет выбора его наилучшего распределения по двум маршрутам

выборе одного из двух типовых вариантов распределения трафика m_1 и m_2 (рис. 1) и при выборе оптимального распределения m_0 (рис. 3) видно, что минимальные задержки T_0 и T''_0 при выборе m_0 заметно меньше значений T'_2 и T''_2 при выборе m_2 (лучшего в данных условиях, чем m_1), что подтверждает целесообразность предлагаемой оптимизации распределения трафика по данному показателю в данных условиях.

Показанное на рис. 3 горизонтальными стрелками дополнительное повышение эффективности по второму показателю $\lambda_{доп}$ (рис. 3.а) и третьему показателю $\mu_{дст}$ (рис. 3.б) за счет использования сетевого механизма m_0 при оптимальном распределении $\alpha_{o,\lambda}$ (рис. 2.б) и $\alpha_{o,\mu}$ (рис. 2.в), соответственно, не столь заметно по сравнению с m_2 , но это является следствием выбранной для примера требуемой задержки T_1 , обеспечиваемой при интенсивностях трафика и обслуживания в области таких значений, при которых типовое правило распределения трафика пропорционально пропускной способности доступных маршрутов является близким к оптимальному.

Для расчета графиков на рис.1 – 3 использовалась формула (4) при значениях параметров аппроксимации $c=a=b=1$ ($H=0.5$), что соответствует модели СМО М/М/1 [9]. При указанных параметрах выражение (4) значительно упрощается и позволяет найти аналитические выражения для обратных функций (6) и (7), а также аналитически решить задачи оптимизации (8) при $n=2$ по первому показателю. Используя найденную в [10] аналитическую зависимость минимальной задержки T_0 от параметров λ и μ , можно простыми численными методами [1,12] решить обратные задачи оптимизации распределения трафика по второму (9) и третьему показателю (10).

При обслуживании ММТ, включающего ВТ, с параметром Хёрста $H > 0.5$, найти аналитические выражения ни для обратных функций (6), (7), ни,

тем более, для представления результатов решения задач оптимизации (8) – (10) при использовании $n > 2$ маршрутов не удается, поэтому для поиска параметров сетевых технологий, обеспечивающих максимальную эффективность обработки ВТ, необходимо привлекать специальные численные методы.

Задача оптимизации (8) с целевой функцией (4) является классической задачей нелинейного программирования с выпуклой целевой функцией и дополнительными ограничениями (11), (12). Для решения данной задачи можно использовать метод множителей Лагранжа [11], позволяющий учесть дополнительное ограничение в виде равенства (11), или более общий метод, основанный на теореме Куна-Таккера [11], позволяющий учесть также и ограничения в виде неравенств (12).

С учетом обнаруженного предпочтения направления всего или большей части трафика прежде всего по маршрутам с наибольшей пропускной способностью в рассматриваемой методике предлагается находить решение оптимизационной задачи (8) последовательно, предполагая использование разного количества маршрутов $k=1, n$, упорядоченных от большей пропускной способности к меньшей: $\gamma_1 \geq \gamma_2 \geq \dots \geq \gamma_n$. При $k=1$ оптимальным является вырожденное распределение трафика: $\alpha_{o1}=1, \alpha_{o2}=\dots=\alpha_{on}=0$, а при каждом очередном значении $k > 1$ учитывается только ограничение в виде равенства (11), что позволяет использовать для нахождения оптимального распределения $\{\alpha_{oi}\}_k$ метод множителей Лагранжа. Найденное распределение $\{\alpha_{oi}\}_k$ проверяется на выполнение ограничений в виде неравенств (12) и, если ограничения выполняются, то в случае, когда $k < n$, количество используемых маршрутов увеличивается $k=k+1$, и расчет $\{\alpha_{oi}\}_k$ методом множителей Лагранжа повторяется, а если $k=n$, то расчеты заканчиваются с итоговым оптимальным распределением $\alpha_o=\{\alpha_{oi}\}_n$. Если при

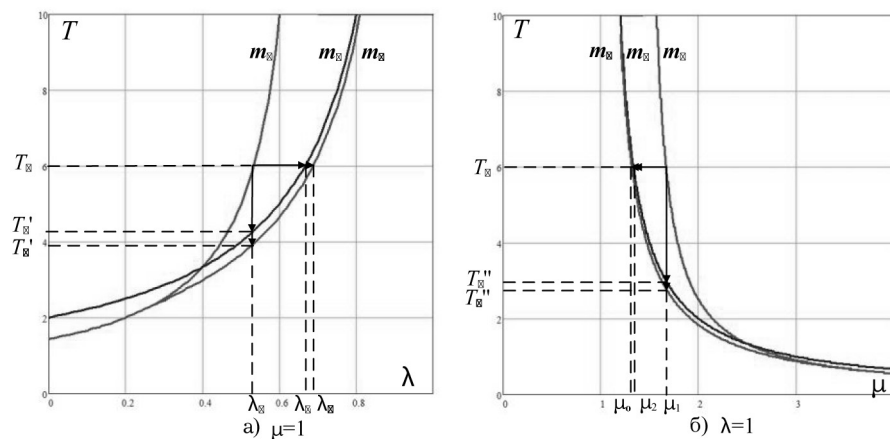


Рис .3. Графическое представление максимального повышения эффективности обработки трафика за счет оптимизации его распределения по двум маршрутам

очередном количестве k ограничения (12) не выполняются, то оптимальным принимается распределение $\alpha_o = \{\alpha_{oi}\}_{k-1}$, найденное на предыдущем шаге при использовании $k-1$ маршрутов, и расчеты заканчиваются.

В соответствии с методом множителей Лагранжа оптимальное распределение $\{\alpha_{oi}\}_k$ является решением следующей системы $k+1$ уравнений:

$$\left(\frac{1}{\mu} \sum_{i=1}^k \frac{\alpha_i}{\gamma_i} \left(\frac{c \cdot \left(\frac{\lambda \cdot \alpha_i}{\mu \cdot \gamma_i} \right)^a}{\left(1 - \frac{\lambda \cdot \alpha_i}{\mu \cdot \gamma_i} \right)^b} + 1 \right) \right)'_{\alpha} + \alpha_L \cdot \left(1 - \sum_{i=1}^k \alpha_i \right) = 0, \quad \alpha \in \{\alpha_1, \dots, \alpha_k, \alpha_L\}. \quad (13)$$

Учитывая, что аргументы $\alpha \in \{\alpha_1, \dots, \alpha_k, \alpha_L\}$, где α_L – множитель Лагранжа, по которым берутся производные, входят не во все слагаемые в каждом уравнении системы (13), данные уравнения можно упростить:

$$\left(\frac{\alpha_i}{\mu \cdot \gamma_i} \left(\frac{c \cdot \left(\frac{\lambda \cdot \alpha_i}{\mu \cdot \gamma_i} \right)^a}{\left(1 - \frac{\lambda \cdot \alpha_i}{\mu \cdot \gamma_i} \right)^b} + 1 \right) \right)'_{\alpha_i} - \alpha_L = 0, \quad i = \overline{1, k}; \quad (14)$$

$$\left(1 - \sum_{i=1}^k \alpha_i \right) = 0. \quad (15)$$

Производные в составе уравнений (14) удалось выразить в аналитическом виде (здесь не приводится из-за громоздкости), что позволило использовать для решения системы уравнений (14) и (15) метод Ньютона [12], согласно которому решение данной системы нелинейных уравнений сводится к итерационному решению системы линейных уравнений до достижения заданной точности.

На рис. 4 приведены графики, аналогичные графикам на рис. 3, но рассчитанные не аналитически за счет упрощения формулы (4), возможным при параметрах $c=a=b=1$ ($H=0.5$), соответствующих СМО М/М/1, а описанным выше численным методом, подходящим для решения оптимизационной задачи (8) с целевой функцией (4) с параметрами c, a, b , соответствующими СМО Р/М/1 с параметром Хёрста $H=0.75$, характерном для самоподобного ММТ трафика, включающего ВТ [4].

По сравнению с рис. 3а на рис. 4а заметно существенное смещение линий в области больших значений интенсивности трафика влево (соответственно, в области низких значений пропускных способностей на рис. 4б – вправо), а в области малых значений – небольшое смещение вниз, что характерно для функциональных зависимостей среднего времени задержки от интенсивности трафика и интенсивности обслуживания при обработке самоподобного трафика такого типа [6].

В целом, как видно из графиков на рис. 4, за счет использования оптимального сетевого механизма m_o распределения ММТ по двум маршрутам, как и в случае аналогичной обработки обычного несамопо-

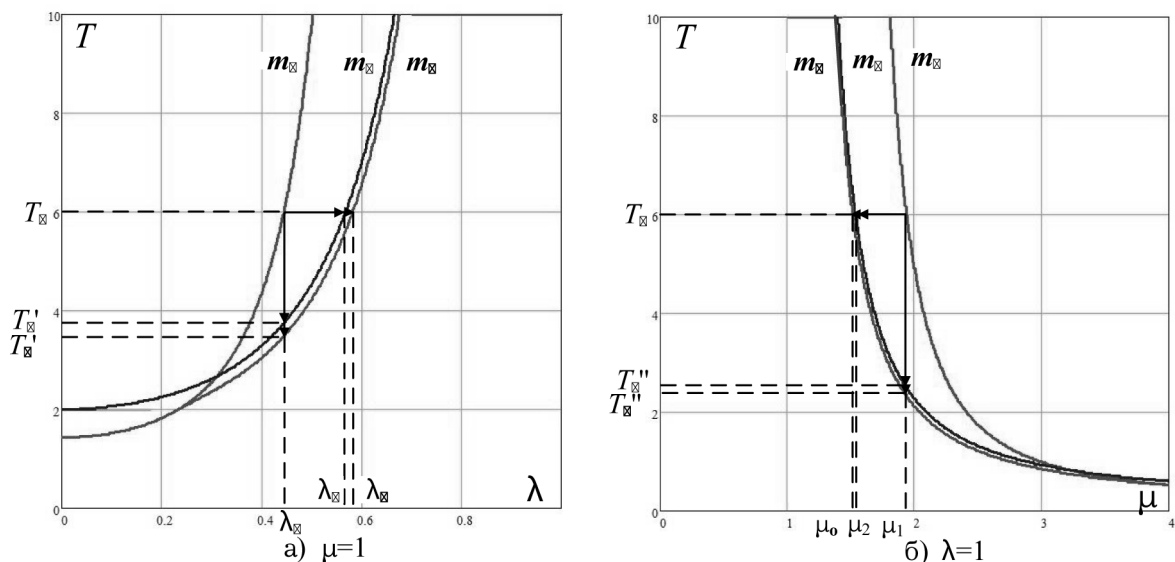


Рис. 4. Графическое представление максимального повышения эффективности обработки самоподобного мультимедийного трафика за счет оптимизации его распределения по двум маршрутам

добного пакетного трафика (рис. 3), обеспечивается максимально возможное повышение эффективности по всем трем показателям во всем диапазоне возможных значений параметров условий функционирования $\lambda \in [0, \mu)$, $\mu \in (\lambda, \infty)$ и требований $T_{\text{тр}} \in [1/\mu, \infty)$. Аналогичные результаты оптимизации распределения трафика и повышения эффективности обработки ВТ с помощью предлагаемой методики могут быть получены при произвольном количестве доступных маршрутов в отдельном информационном направлении.

Заключение

В настоящей статье представлена методика повышения эффективности обработки ВТ в устройствах коммутации МСС по трем обобщенным показателям: задержки, допустимой интенсивности входного трафика и достаточной пропускной способности используемых маршрутов путем решения одной прямой и двух обратных задач оптимизации распределения ММТ по доступным маршрутам. Описаны эффективные методы решения указанных оптимизационных задач, учитывающие особенности прямой целевой функции в виде предложенной аппроксимации статистических зависимостей результатов обработки самоподобного ММТ, включающего ВТ. Отмечены и учтены отличительные особенности оптимального распределения трафика по нескольким маршрутам, адаптивно изменяющегося в зависимости от нагрузки и сходящегося к двум типовым СМ, предполагающим направление всего трафика по одному маршруту с наибольшей пропускной способностью при низкой нагрузке и распределение трафика по всем маршрутам пропорционально их пропускной способности при большой нагрузке.

Дальнейшим развитием проводимых исследований является решение задач повышения эффективности обработки ВТ в составе ММТ путем оптимизации его распределения по нескольким маршрутам с учетом совместного использования общих канальных ресурсов в интересах нескольких направлений связи.

Литература

1. Численные методы решения обратных задач при обосновании характеристик сетевых механизмов обеспечения качества обслуживания видеотрафика на уровне пакетов / С.М. Одоевский, М.И. Рафальская, А.Н. Григорчук, С.А. Ясинский // *Информация и Космос*. – 2022. – № 3. – С. 23–31.
2. Шелухин, О. И. Самоподобие и фракталы. Телекоммуникационные приложения / О.И. Шелухин, С.М. Смольский, А.В. Осин. – Москва : Физматлит, 2008. – 368 с.
3. Маколкина, М. А. Зависимость параметра Хёрста от потерь при исследовании видеотрафика / М.А. Маколкина, А.В. Прокопьев // 69-я научно-техническая конференция СПб НТОРЭС им. А. С. Попова : сборник тезисов докладов. – Санкт-Петербург, 2013.
4. Recommendation Y.1541. Network performance objectives for IP-based services / ITU-T. – Geneva, 2011. – 55 p.
5. Степанов, С. Н. Теория телетрафика: концепции, модели, приложения / С.Н. Степанов. – Москва : Горячая линия-Телеком, 2015. – 868 с.
6. Одоевский, С. М. Аналитическая модель обслуживания мультимедийного трафика с распределением Парето на основе аппроксимации результатов имитационного моделирования / С.М. Одоевский, А.В. Бусыгин // *Системы управления, связи и безопасности*. – 2020. – № 1. – С. 74–108.
7. Одоевский, С. М. Аппроксимация статистических характеристик процесса обслуживания мультимедийного трафика на основе распределения Вейбулла / С.М. Одоевский, М.И. Рафальская // *Сборник трудов XXVIII Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация и связь»*. Том 2. – Воронеж : ВГУ, 2022. – С. 66–74.
8. Назаров, А. Н. Модели и методы расчета показателей качества функционирования узлового оборудования и структурно-сетевых параметров сетей связи следующего поколения / А.Н. Назаров, К.И. Сычев. – Красноярск : Поликом, 2010. – 389 с.
9. Крылов, В. В. Теория телетрафика и ее приложения / В.В. Крылов, С.С. Самохвалова. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2005. – 288 с.
10. Оптимальное совместное управление трафиком и пропускной способностью программно-конфигурируемой сети с промежуточной коммутацией транзитных каналов / С.М. Одоевский, А.Н. Григорчук, Д.С. Яговитов, С.А. Ясинский // *Информация и Космос*. – 2021. – № 4. – С. 6–12.
11. Дегтярев, Ю. И. Исследование операций / Ю.И. Дегтярев. – Москва : Высшая школа, 1986. – 320 с.
12. Турчак, Л. И. Основы численных методов : учебное пособие. / Л.И. Турчак, П.В. Плотников. – 2-е изд. перераб. и доп. – Москва : Физматлит, 2002. – 304 с.