

8. Biernacki A. Analysis of aggregated HTTP-based video traffic. *Journal of Communications and Networks*, 2016, vol. 18, no. 5, pp. 826–846. DOI: 10.1109/JCN.2016.000111
9. Biernacki A. Analysis and modelling of traffic produced by adaptive HTTP-based video. *Multimedia Tools and Applications*, 2017, vol. 76, no. 10, pp. 12347–12368. DOI: 10.1007/s11042-016-3623-8
10. Bobrikova E.V., Gaidamaka Yu.V. Analysis of the file distribution time in Peer-to-Peer network. *Vestnik Rossijskogo universiteta družby narodov. Seriya: Matematika, informatika, fizika*, 2018, vol. 26, no. 1, pp. 84–92. DOI: 10.22363/2312-9735-2018-26-1-84-92 (In Russ.)
11. Markovich N., Krieger U. Statistical analysis and modeling of peer-to-peer multimedia traffic. *Network Performance Engineering. Lecture Notes in Computer Science*, 2011, vol. 5233, pp. 70–97. DOI: 10.1007/978-3-642-02742-0_4
12. Markovich N. et al. Integrated measurement and analysis of peer-to-peer traffic. *Proceedings of 8th International Conference Wired/Wireless Internet Communications (WWIC 2010)*. Lulea, 2010, pp. 302–314. DOI: 10.1007/978-3-642-13315-2_25
13. Eittenberger P., Krieger U., Markovich N. Teletraffic modeling of peer-to-peer traffic. *Proceedings of 44th Winter Simulation Conference (WSC 2012)*. Berlin, 2012, pp. 1–12. DOI: 10.1109/WSC.2012.6465302
14. Bykov V.V. *Digital modeling in statistical radio engineering*: Monograph. Moscow: Sovetskoe radio, 1971, 328 p.
15. Kartashevskii I.V. *Processing of correlated traffic in infocommunication networks*: Monograph. Moscow: Goryachaya liniya-Telekom, 2023, 200 p.

Received 01.08.2024

СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

УДК 621.377

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАЩИЩЕННЫХ МНОГОТОЧЕЧНЫХ СЕАНСОВ ВИДЕОКОНФЕРЕНЦСВЯЗИ МНОГОУРОВНЕВЫМИ ГРАФАМИ

Гладких А.А.¹, Мишин Д.В.², Дрягин С.А.³, Корсунский А.С.³

¹ Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, РФ

² Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ

³ Научно-производственный центр «Марс», Ульяновск, РФ

E-mail: s_drg@mail.ru

В работе рассматривается модель многоточечного сеанса видеоконференцсвязи на основе многоуровневого графа. Предлагаемая модель позволяет задавать на сервисном уровне требования к качеству передаваемых видеопотоков между множеством терминалов и сервером многоточечной связи, а на уровнях защищенной и транспортной сети оценивать пропускную способность и задержки каналов передачи данных. Предложена модель многоуровневого графа системы видеоконференцсвязи, учитывающая особенности построения и организации защищенных сетей, в которых выделяется несколько уровней наложенных сетей поверх транспортной сети. В данной модели на сервисном уровне задается структура многоточечного сеанса, при котором терминалы видеоконференции взаимодействуют через сервер. Формируемые в ходе сеанса потоки трафика распределяются в соответствии с правилами маршрутизации на уровне защищенной сети. Учитывая множество альтернативных способов распределения трафика для каждой пары клиент-серверного взаимодействия, выбор наиболее оптимальной конфигурации маршрутов для сеанса в целом оказывается достаточно сложной задачей. В исследовании предложен алгоритм нахождения кратчайшего пути в графе защищенной наложенной сети с поэтапным проецированием каждого отдельного участка маршрута на нижележащий уровень транспортной сети для поиска кратчайшего пути в его пределах. Приведен пример решения задачи поиска маршрутов для каждого абонента с учетом правил наложенной сети и фактического продвижения трафика по транспортной сети. В качестве критерия оптимальности выбрана минимизация использования емкости арендуемых каналов. Проведены эксперименты для получения оценок качества сеанса на основе объективных методов при различных параметрах видеопотока и соответствующие им количественные оценки требуемой пропускной способности для организации сеанса.

Ключевые слова: многоуровневый граф, видеоконференцсвязь, многоточечные сеансы видеоконференцсвязи, оценка качества видеоконференцсвязи, сеть передачи данных, расчет загруженности каналов

Введение

Системы видеоконференцсвязи (ВКС) к настоящему времени стали неотъемлемым элементом повышения эффективности производственных процессов, деятельности государственных структур, а также нашли широкое применение в сфере образования и медицины. В период ограничений, вызванных пандемией, интерес к системам ВКС резко возрос, так как единственной возможностью обеспечения непрерывности процессов повседневной деятельности оказалась коммуникация пользователей в удаленном режиме. Корпоративные и ведомственные заказчики столкнулись с новыми вызовами, связанными с необходимостью обеспечить для резко возросшего числа пользователей доступ к сервисам ВКС. Ряд заказчиков, уже имеющих в составе своих информационных систем решения ВКС, столкнулся с необходимостью увеличения их производительности или модернизации. Организация многоточечного сеанса ВКС представляет собой высоконагруженную задачу обеспечения видеосвязи между несколькими пользователями.

Для решения данной задачи требуется распределить вычислительную нагрузку, преимущественно создаваемую обработкой видеопотоков, между доступными серверными ресурсами, учитывая при этом доступную пропускную способность каналов передачи данных. Качество функционирования распределенных систем ВКС во многом определяется эффективностью организации связи между ними. Производительность сетей передачи данных при этом играет ключевую роль. Достаточно большие объемы сетевого трафика, передаваемые в многоточечных сеансах, повышают актуальность исследования методов инжиниринга трафика.

Принципы организации многоточечных сеансов ВКС

Системы ВКС, являясь распределенными системами, основаны на сетях передачи данных (СПД). В свою очередь СПД являются сложными системами, функциональные части которых (каналообразующее, коммутационное и маршрутизирующее оборудование) рассредоточены территориально, а используемые каналы различаются своими параметрами – пропускной способностью, задержками, потерями.

При выстраивании систем ВКС необходимо учитывать характер передаваемых сведений в ходе сеансов конференций. Из этого следует что к СПД предъявляется ряд требований по обеспечению безопасности и организации защищенных

каналов передачи данных. В защищенных СПД реализуется наложенная структура, когда поверх транспортной сети надстраиваются логические сети, соответствующие определенным требованиям безопасности. Требования безопасности задаются на основе руководящих документов в соответствии с классами защищенности, исходя из характера передаваемых и обрабатываемых данных в ходе сеанса ВКС. Сервис ВКС надстраивается над существующими защищенными сетями, образуя поверх еще один логический уровень.

Современные подходы к проектированию рассматривают сети как многоуровневую структуру, в которой выделяют инфраструктурный, функциональный и управленческий уровни.

При многоуровневом подходе актуальными становятся вопросы выбора топологий на каждом конкретном уровне для оптимального распределения имеющихся пропускных способностей и снижения задержек при передаче данных, в результате чего обеспечивается наилучшее качество сервиса ВКС. Именно качество прикладных сервисов выступает целевым показателем, который должен быть обеспечен для конечных пользователей. В рекомендации

МСЭ-Т Е.800 [1] качество определяется как совокупность характеристик объекта, которые имеют отношение к его возможности удовлетворять установленные и предполагаемые потребности. Применительно к системам ВКС число таких характеристик может быть достаточно велико, и они могут оказывать различное влияние на функционирование систем ВКС. Качество (Q) выступает как интегральный показатель, зависящий от множества параметров.

Для передаваемого видеоизображения в сеансе ВКС качество зависит от разрешения (P_{res}) и частоты (P_{fps}) изображения, битрейта формируемого потока (P_{rate}), а также от уровня потерь при передаче (P_{loss}).

Модель многоуровневого графа многоточечных сеансов ВКС

Теория графов широко применяется при моделировании телекоммуникационных систем. Вершинами графа могут выступать сетевое и каналообразующее оборудование, а линии связи между ними – ребрами. Распределенные сервисы ВКС реализуются на базе существующей многоуровневой сетевой архитектуры, которая включает в себя транспортный уровень и надстраиваемый над ним наложенный защищенный уровень корпоративной сети. В таких решениях можно выделить логические каналы (ребра на-

ложенной защищенной сети), образуемые между криптографическими шлюзами (вершины наложенной сети), физические каналы (ребра транспортной сети) и связывающие маршрутизаторы провайдера (вершины транспортной сети). Связи двух уровней, которые осуществляются по арендуемым каналам, представлены отдельным множеством промежуточных ребер между двумя графами. Множество сервисов системы, в свою очередь, при данном подходе, также моделируются отдельными верхними сервисными уровнями.

Моделирование нескольких уровней сети в виде плоского графа оказывается затруднительным, так как на каждом уровне необходимо учитывать реализацию своей логики передачи трафика, к тому же накладываются технические и организационные ограничения, с характерной спецификой каждого отдельного уровня. Дополнительный ряд ограничений связан с масштабированием уровней. Например, на практике защищенный уровень сети может одновременно быть связан с несколькими транспортными уровнями, а сервисный уровень – с различными защищенными уровнями.

Анализ существующих работ показывает актуальность применения моделей многоуровневых графов для оптимизации сетевого тра-

фика [2; 3], проектирования мультисервисных сетей [4; 5] и транспортных сетей операторов [6].

Для моделирования защищенной системы ВКС предлагается следующая модель многоуровневого графа MLG (Multi-Layered Graph), представленная на рисунке 1.

$MLG = \{G^1, G^2, G^3, V, E\}$ – многоуровневый граф системы ВКС, в котором:

$G^3 = \{V^3, E^3\}$ – подграф уровня сервиса ВКС;

$V^3 = \{V_1^3, V_2^3, \dots, V_{10}^3\}$ – вершины (абоненты, сервера) уровня сервиса ВКС подграфа G^3 ;

$E^3 = \{e_1^3, e_2^3, \dots, e_7^3\}$ – ребра (сеансы) уровня сервиса ВКС подграфа G^3 ;

$G^2 = \{V^2, E^2\}$ – подграф наложенной защищенной сети;

$V^2 = \{v_1^2, v_2^2, \dots, v_{13}^2\}$ – вершины (крипто-шлюзы) наложенной защищенной сети G^2 ;

$E^2 = \{e_1^2, e_2^2, \dots, e_5^2\}$ – ребра (крипто-туннели) наложенной защищенной сети G^2 ;

$G^1 = \{V^1, E^1\}$ – подграф транспортной сети;

$V^1 = \{v_1^1, v_2^1, \dots, v_6^1\}$ – вершины (маршрутизаторы) транспортной сети G^1 ;

$E^1 = \{e_1^1, e_2^1, \dots, e_8^1\}$ – ребра (каналы оператора) транспортной сети G^1 ;

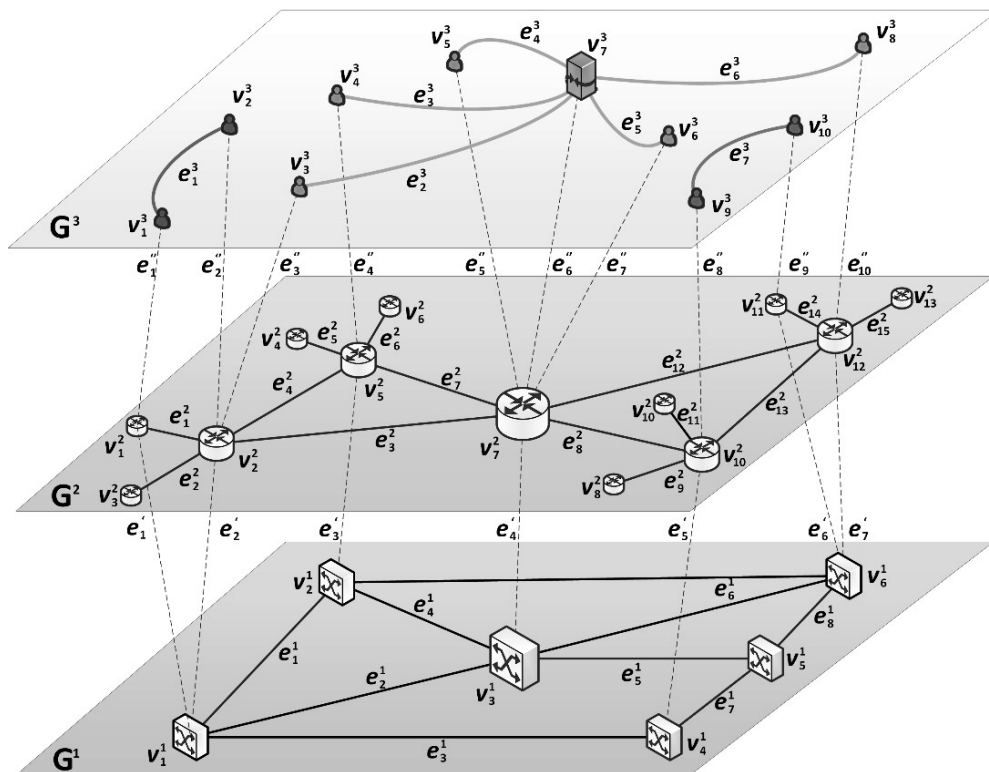


Рисунок 1. Модель защищенной системы ВКС на многоуровневом графе

$E' = \{e_1', e_2', \dots, e_7'\}$ – ребра (каналы, арендуемые у оператора), связывающее G^2 с G^1 ;

$E'' = \{e_1'', e_2'', \dots, e_7''\}$ – ребра (каналы локальной сети), связывающие G^3 с G^2 .

В представленной модели защищенной системы ВКС многоуровневый граф MLG (рисунок 2) характеризуется следующими свойствами:

1. Для каждой вершины $v_i^3 \in V^3$ существует ребро $e_i'' \in E''$, связываемое с вершиной $v_i^2 \in V^2$ – то есть для любого терминала или сервера, удовлетворяющего данному условию, разрешен доступ на уровень защищенной сети.

2. Для каждой вершины $v_i^2 \in V^2$ существует ребро $e_i' \in E'$, связываемое с вершиной $v_i^1 \in V^1$ – то есть для любого крипто-шлюза, удовлетворяющего данному условию, имеется арендованный канал подключения к уровню транспортной сети.

3. Для двух любых вершин $v_i^2, v_j^2 \in V^2$, удовлетворяющих свойству 2, может существовать ребро $e_k^2 = (v_i^2, v_j^2)$, $e_k^2 \in E^2$ – то есть между двумя любыми крипто-шлюзами может быть организован защищенный канал (туннель).

4. Между двумя вершинами $v_i^2, v_n^2 \in V^2$ существует маршрут из последовательности вершин $v_1^2, v_2^2, \dots, v_{n-1}^2, v_n^2$, между которыми существуют ребра $e_1^2 = (v_1^2, v_2^2)$, $e_2^2 = (v_2^2, v_3^2)$, $\dots$, $e_m^2 = (v_{n-1}^2, v_n^2)$, удовлетворяющие свойству 3 – то есть между двумя крипто-шлюзами может быть обеспечена связанность по маршруту из защищенных каналов (туннелей).

Между двумя вершинами $v_i^3, v_j^3 \in V^3$ существует ребро $e_k^3 = (v_i^3, v_j^3)$ при удовлетворении свойств 1-4 – то есть между двумя терминалами или терминалом и сервером может быть организован защищенный сеанс ВКС.

На основе представленного многоуровневого графа могут быть смоделированы сеансы ВКС, в которых:

$S1 = \{v_3^3, \dots, v_8^3 \in V^3, e_2^3, \dots, e_6^3 \in E^3\}$ – многоточечный сеанс ВКС, где:

$v_3^3, v_4^3, v_5^3, v_6^3, v_7^3, v_8^3$ – терминалы абонентов сеанса ВКС;

v_7^3 – сервер многоточечной связи;

$e_i^3 = f(P_{res}, P_{fps}, P_{rate}, P_{loss})$ – параметры сеанса ВКС, где:

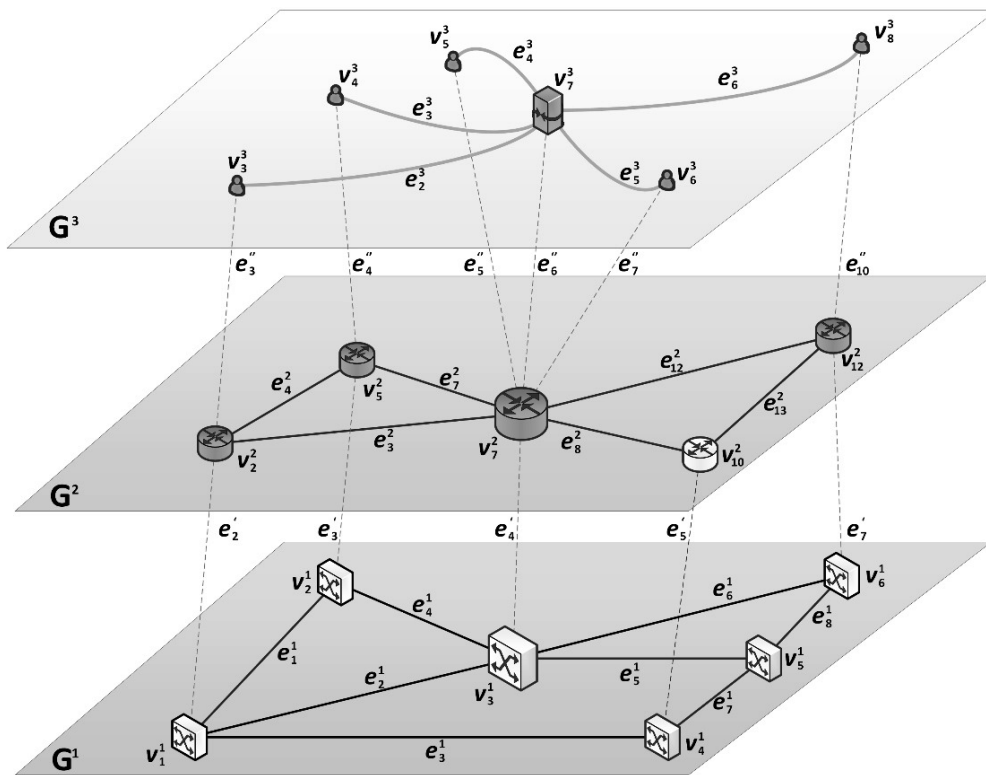


Рисунок 2. Модель многоточечного сеанса ВКС на многоуровневом графе

P_{res} – разрешение видеоизображения сеанса;
 P_{fps} – частота видеоизображения сеанса;
 P_{rate} – битовая скорость трафика сеанса;
 P_{loss} – допустимый уровень потерь для трафика сеанса;
 $V_2^2, V_5^2, V_7^2, V_{12}^2$ – крипто-шлюзы, задействованные в сеансе;
 $e_i^2 = f(B^2, D^2, J^2)$ – параметры туннеля, где:
 B^2 – пропускная способность туннеля;
 D^2 – средняя задержка в туннеле;
 J^2 – вариация задержки в туннеле;
 $e_i' = f(B', D', J')$ – параметры внешнего канала, где:
 B' – пропускная способность канала;
 D' – средняя задержка в канале;
 J' – вариация задержки в канале.

Оценка качества видеоизображения многоточечного сеанса ВКС

В модели многоуровневого графа системы ВКС на уровне графа G^3 описываются многоточечные сеансы, организуемые между терминалами и сервером. Параметры сеанса ВКС задают веса ребер v^3 и предъявляют требования к пропускной способности для нижележащего уровня G^2 с учетом параметров внешних каналов $e' \in E'$. Удовлетворение заданных требований определяет качество видеоизображения многоточечного сеанса.

Для оценки качества видеоизображений могут применяться два класса методов: субъективные и объективные [7; 8]. Применение субъективных и объективных методов оценки качества видео-

изображений связано со сравнением некоторой полученной результирующей видеопоследовательности с ее эталонной, исходной видеопоследовательностью. Для систем ВКС в качестве эталонной видеопоследовательности может выступать изображение, получаемое с видеокамеры на стороне отправителя. А результирующей видеопоследовательностью выступает перекодированное видеоизображение, переданное через СПД и отображаемое на стороне получателя.

Субъективные методики требуют организации отдельного процесса оценки видеоизображений с привлечением экспертов [9]. Данный процесс является достаточно затратным по времени. Субъективные методики при этом не всегда дают достаточно точные результаты оценки качества. Из-за особенностей человеческого восприятия ограничиваются как продолжительность проводимого эксперимента, так и количество процедур попарных сравнений. Также с низкой точностью оцениваются кратковременные (мгновенные) искажения или пространственно-временные частотные изменения видеоизображения [10].

Объективные методики, с одной стороны лишены ряда недостатков субъективных методик. Их применение позволяет детализировать недоступные человеческому зрению изменения видеоизображения, а также получать более точные оценки качества изображения, но уже в автоматизированном режиме.

В системах ВКС применение объективных методик реализуется путем получения максимально качественного видеоизображения при наиболее

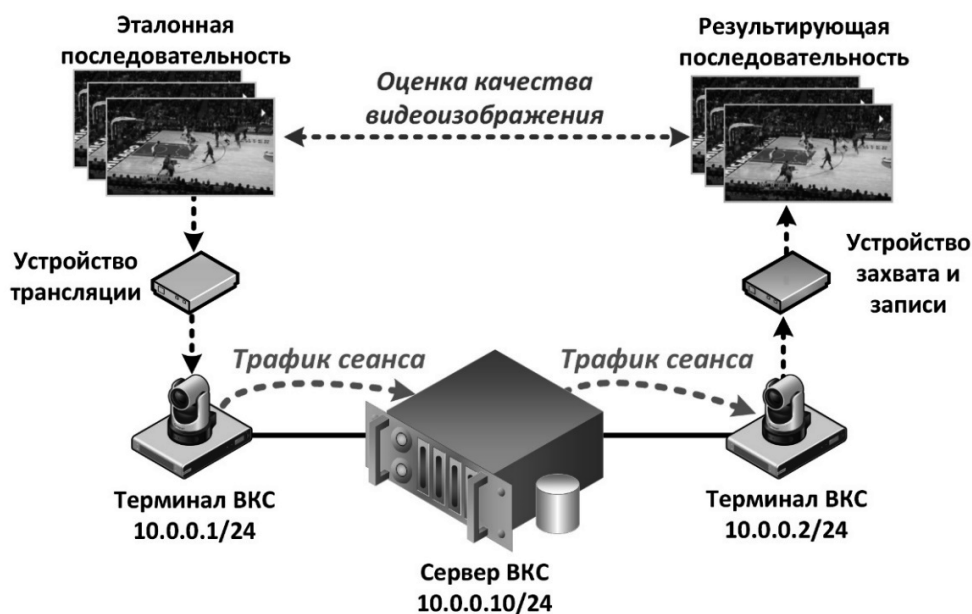


Рисунок 3. Организация стенда тестирования и оценки качества сеансов

благоприятных условиях проведения сеанса ВКС без ухудшения характеристик каналов передачи данных. В качестве источника передаваемого видеоизображения может использоваться некоторый набор видеофайлов, соответствующих характеру передаваемого видеопотока в ходе сеанса. Полученные таким способом видеопоследовательности будут выступать эталонными и

в последующем сравниваться с видеопоследовательностями, получаемыми в условиях моделирования процесса передачи трафика, например, более низкой пропускной способностью или внесением задержек в каналы передачи данных.

В рамках текущего исследования получение объективных оценок осуществлялось средствами имитационного моделирования на сформирован-

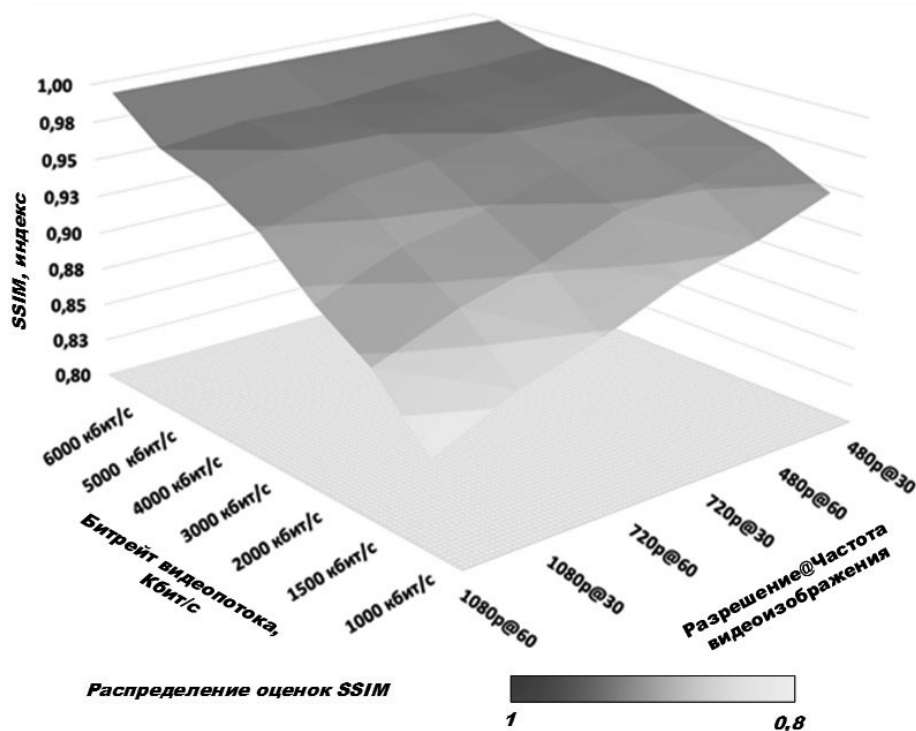


Рисунок 4. Распределение оценок качества метода SSIM при различных параметрах сеанса ВКС

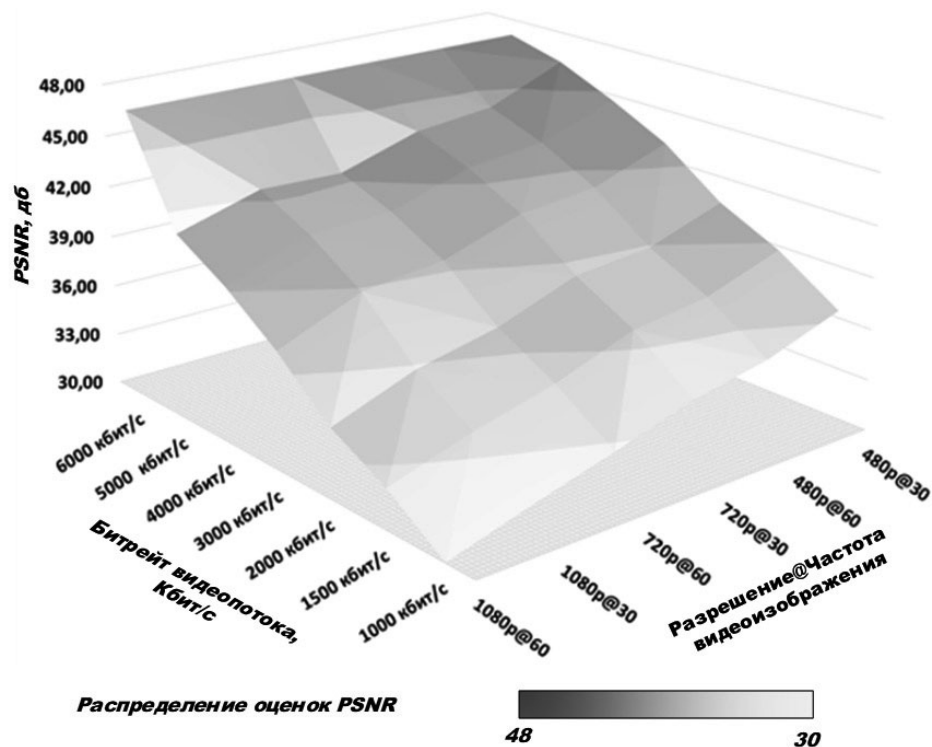


Рисунок 5. Распределение оценок качества методом PSNR при различных параметрах сеанса ВКС

ном стенде, представленном на рисунке 3. Между терминалами последовательно организуются сеансы ВКС с различными параметрами передаваемого видеопотока. Источником выступает устройство видеотрансляции, передающее на терминал отправителя видеопоток из файла (эталона). На стороне получателя видеоизображение сеанса передается на устройство захвата и записи, которое формирует результирующий файл. В качестве объективных методик выбраны SSIM (structure similarity, индекс структурного сходства) [11] и PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio, пиковое отношение сигнала к шуму) [12]. На основе выбранных методик сравниваются эталонный и результирующий файлы, в результате каждого сравнения производится количественная оценка качества.

В ходе имитационного моделирования оцениваются значения параметров P_{res} , P_{fps} , P_{rate} , влияющие на результирующее качество получаемого видеоизображения в сеансе ВКС [13]. Типовыми разрешениями сеанса ВКС являются 1080p (FullHD, Full High Definition), 720p (HD, High Definition), 480p (SD, Standart Definition), частота обновления передаваемого видеоизображения –

30Гц, 60 Гц, формируемый битрейт видеопотока 6000-1000 Кбит/с [14].

На рисунках 4, 5 показано распределение полученных оценок методом SSIM и PSNR соответственно, на основании которых можно сделать вывод, что при организации сеанса ВКС с выбором максимального разрешения 1080p@60 оценка качества сильно зависит от доступной пропускной способности канала. За максимальную оценку (эталон) был взят битрейт видеопотока в 6000 Кбит/с.

В таблицах 1, 2 приведены значения полученных оценок методами SSIM и PSNR соответственно для различных форматов видеоизображений с битрейтом видеопотока от 6000 Кбит/с до 1000 Кбит/с.

С точки зрения восприятия качества видеоизображения конечными пользователями критерием приемлемости является оценка MOS (Mean Opinion Score, показатель усредненного мнения) [15]. В исследовании [16] предложены распределения оценок SSIM и PSNR, соответствующих оценкам по шкале MOS (таблица 3).

Таблица 1. Оценки качества, полученные методом SSIM

Разрешение\ Битрейт	1080p@60	1080p@30	720p@60	720p@30	480p@60	480p@30
6000 кбит/с	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
5000 кбит/с	0,98	0,98	0,98	0,99	0,99	0,99
4000 кбит/с	0,97	0,98	0,98	0,98	0,98	0,99
3000 кбит/с	0,95	0,96	0,97	0,98	0,98	0,98
2000 кбит/с	0,92	0,94	0,95	0,96	0,97	0,97
1500 кбит/с	0,89	0,92	0,93	0,95	0,95	0,96
1000 кбит/с	0,86	0,88	0,90	0,92	0,93	0,95

Таблица 2. Оценки качества, полученные методом PSNR

Разрешение\ Битрейт	1080p@60	1080p@30	720p@60	720p@30	480p@60	480p@30
6000 кбит/с	47,00	47,00	47,00	47,00	47,00	47,00
5000 кбит/с	40,97	42,39	42,26	43,74	44,23	46,13
4000 кбит/с	39,19	40,91	41,08	42,56	43,05	44,67
3000 кбит/с	36,89	38,88	39,41	40,94	41,38	42,98
2000 кбит/с	34,07	35,85	36,84	38,51	38,92	40,44
1500 кбит/с	32,35	33,84	35,02	36,68	37,26	38,75
1000 кбит/с	29,84	31,41	32,71	34,08	34,92	36,42

Таблица 3. Диапазоны значений объективных оценок и сопоставление с субъективными оценками качества

MOS	Отличное	Хорошее	Среднее	Низкое	Плохое
SSIM	>0,99	0,99-0,95	0,95-0,88	0,88-0,50	0,50>
PSNR	>37	37-31	31-25	25-20	20>

Решение задачи поиска маршрута и расчета требуемой пропускной способности каналов для сеанса ВКС с заданным качеством видеоизображения

Полученные объективные оценки качества видеоизображения при их последующей интерпретации в субъективные метрики восприятия конечными пользователями позволяют сформулировать более обоснованные требования к необходимым характеристикам каналов передачи данных. Либо же при изначально известных характеристиках каналов необходимо подобрать наиболее высококачественное видеоизображение при организации сеанса ВКС.

Для расчета требуемой пропускной способности сеанса на рисунке 6 приведен пример многоуровневого графа системы ВКС $MLG = \{G^1, G^2, G^3, V, E\}$. Между терминалами v_1^3, v_2^3, v_3^3 и сервером v_4^3 организуется многоточечный сеанс ВКС, в котором должна быть обеспечена передача видеоизображений максимально высокого качества (определяемого в MOS как «отличное»). Следующие параметры сеанса удовлетворяют заданному требованию $e_1^3, e_2^3, e_3^3 = (1080p, 60 \text{ Гц}, 6000 \text{ Кбит/с})$. Необходимо выбрать маршруты между терминалами и сервером с учетом минимальной загрузки каналов при организации данного сеанса.

На первом этапе проверяется связанность вершин (v_1^3, v_4^3) (v_2^3, v_4^3) (v_3^3, v_4^3) через уровень G^2 , в результате чего определяются вершины v_3^2, v_1^2, v_2^2 для терминалов и v_5^2 для сервера соответственно (рисунок 7). Тем самым подтверждается возможность организации многоточечного сеанса по доступным маршрутам на защищенном уровне сети. Критерием связанности является наличие любого доступного маршрута.

На втором этапе между вершинами графа G^2 , которые определены на первом этапе, ищутся

логические маршруты для каждой связи «терминал-сервер». Глубина поиска может ограничиваться количеством переходов, в данном примере выбираются маршруты с кратчайшим путем. Для каждого найденного маршрута проверяется связанность вершин (v_3^2, v_5^2) (v_1^2, v_5^2) (v_2^2, v_5^2) через уровень G^1 , включая возможные транзитные вершины маршрута. Например, найденные маршруты для связи (v_3^3, v_4^3) терминала 3 с сервером на уровне графа G^2 проходят через транзитные вершины v_4^2 , в первом случае, v_1^2 – во втором (рисунок 8).

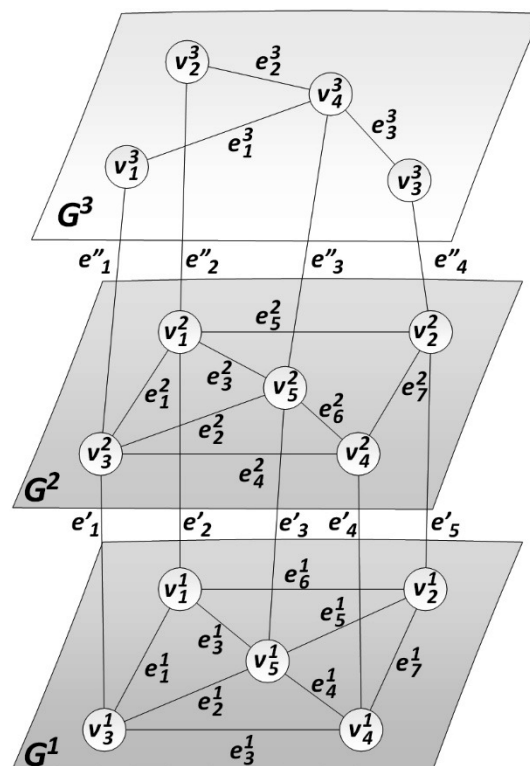


Рисунок 6. Пример решения задачи поиска маршрутов на многоуровневом графе для многоточечного сеанса ВКС

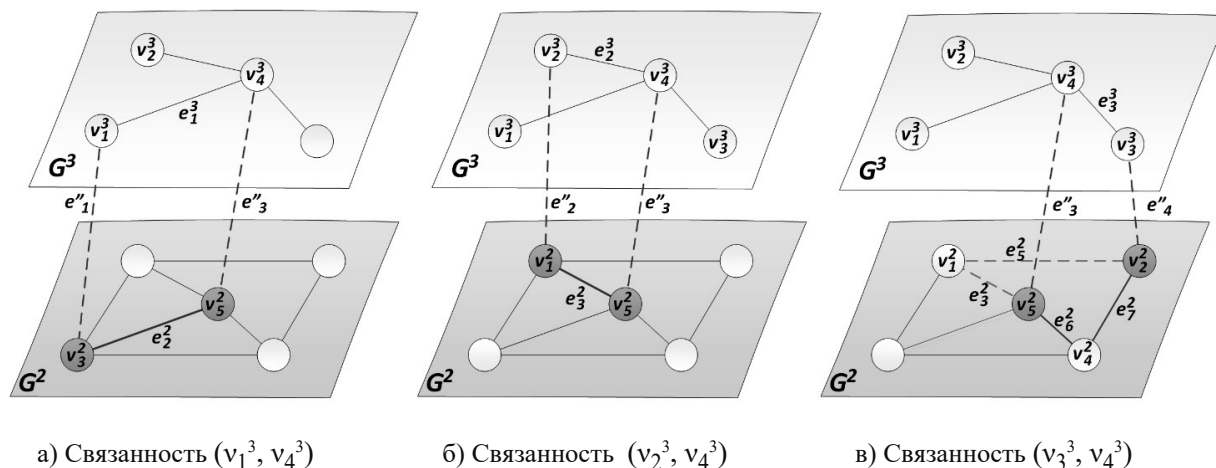
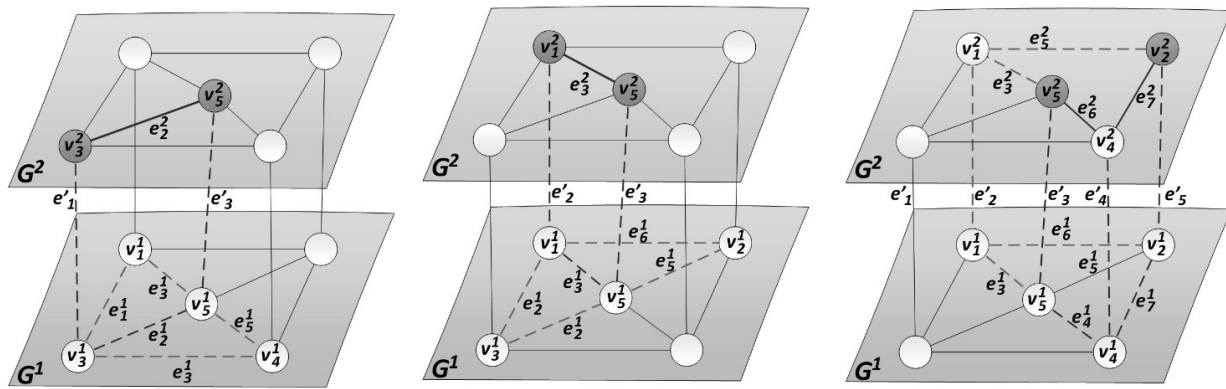


Рисунок 7. Определение связанности вершин



а) Поиск маршрутов (v_1^3, v_4^3) на графах G^2, G^1

б) Поиск маршрутов (v_2^3, v_5^3) на графах G^2, G^1

Поиск маршрутов (v_3^3, v_4^3) на графах G^2, G^1

Рисунок 8. Поиск маршрутов на графах G^2, G^1 и оценка загруженности $e_i' \in E'$

Для каждого найденного маршрута между вершинами графа G^2 определяются смежные вершины графа G^1 , между которыми ищутся маршруты, а соответствующим ребрам e' (v^2, v^1) задается пропускная способность с учетом направлений потоков:

- исходящему – начальному ребру;
- входящему – конечному ребру;
- входящему и исходящему – ребру, с транзитной вершиной.

Так как каждый найденный маршрут на уровне G^2 может иметь множество способов реализации физической связанности на уровне G^1 , то необходимо выбрать решение, при котором будут выбраны маршруты, обеспечивающие минимальную суммарную загруженность для $e_1', e_2', e_3', e_4', e_5'$.

В данном примере глубина поиска возможных маршрутов на уровне ограничивается количеством переходов, равных двум.

Первые два этапа повторяются аналогично для (v_4^3, v_1^3) (v_4^3, v_2^3) (v_4^3, v_3^3) при поиске обратных маршрутов от сервера к терминалам 1–3.

На третьем этапе выбираются решения, удовлетворяющие требованию минимальной суммарной загруженности всех каналов $e_i' \in E'$.

В таблице 4 показаны результаты двух существующих решений задачи, которые дали следующее распределение требуемой пропускной способности каналов.

На рисунке 9 представлена графическая визуализация загруженности каналов в разрезе трафиков каждого отдельного терминала и сервера, учитывая исходящее (out) и входящее (in) направления. Полученные результаты можно интерпретировать в качестве требований, предъявляемых к пропускной способности арендуемых каналов. Также на основе полученных результатов могут задаваться соответствующие политики качества обслуживания QoS (Quality of Services), гарантирующие резервирование канальных ресурсов на период проведения сеанса.

Заключение

Предложенная математическая модель многоуровневого графа позволяет решать широкий

Таблица 4. Результаты решения задачи с распределением загруженности каналов, Мбит/с

Решение 1:			Решение 2:		
Канал	in (Мбит/с)	out (Мбит/с)	Канал	in (Мбит/с)	out (Мбит/с)
e_1'	6	6	e_1'	6	6
e_2'	6	6	e_2'	12	12
e_3'	18	18	e_3'	18	18
e_4'	12	12	e_4'	6	6
e_5'	6	6	e_5'	6	6

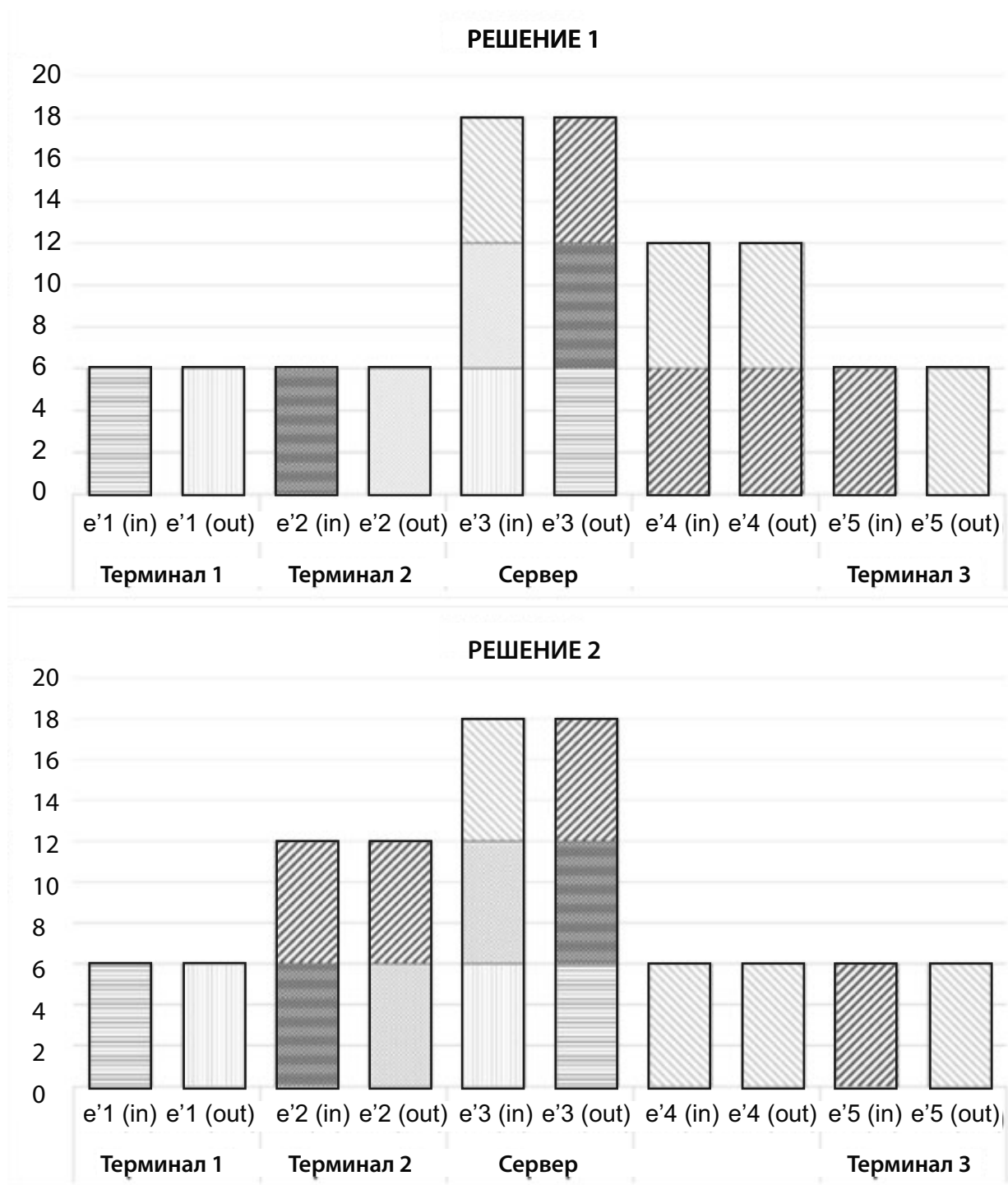


Рисунок 9. Распределение исходящего и входящего трафиков по каналам

класс задач, возникающих при организации многопоточных сеансов ВКС. В данной работе рассмотрены задачи, связанные с оценкой пропускной способности каналов, задействованных для организации сеанса. Перспективными направлениями дальнейших исследований являются задачи балансировки трафика в условиях ограничения пропускной способности отдельных каналов. Одним из способов решения задачи балансировки является применение многопуте-

вой маршрутизации на защищенном уровне сети. Актуальными также являются задачи обеспечения отказоустойчивости проводимых сеансов, для решения которых необходимо организовать одновременную передачу трафика по нескольким маршрутам одновременно. Реализация соответствующих алгоритмов в модели многоуровневого графа позволит получить количественные оценки пропускной способности каналов с учетом задержек и потерь.

Литература

1. Рекомендация МСЭ-Т E.800 (09/2008). Термины и определения, связанные с качеством услуг электросвязи. Женева: МСЭ, 2009. 32 с.
2. Ma J., Li M., Li H.-J. Traffic dynamics on multilayer networks with different speeds // IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs. 2022. Vol. 69, no. 3. P. 1697–1701. DOI: 10.1109/TCSII.2021.3102577
3. Traffic optimization in multi-layered WANs using SDN / H. Rodrigues [et al.] // IEEE 22nd Annual Symposium on High-Performance Interconnect. Mountain View, 2014. P. 71–78. DOI: 10.1109/HOTI.2014.23
4. Multilayer network simplification: approaches, models and methods / R. Interdonato [et al.] // Computer Science Review. 2020. No. 36. URL: <https://www.sci-hub.ru/10.1016/j.cosrev.2020.100246> (дата обращения: 10.06.2024).
5. Агеев Д.В. Проектирование современных телекоммуникационных систем с использованием многоуровневых графов // Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2010. Т. 4, № 2 (46). С. 75–77.
6. Агеев Д.В. Структурный синтез сети WDM с оптическими конверторами с применением модели, представленной в виде многослойного графа // Проблемы телекоммуникаций. 2012. № 2 (7). С. 3–17.
7. Study of subjective and objective quality assessment of audio-visual signals / X. Min [et al.] // IEEE Transactions on Image Processing. 2020. Vol. 29. P. 6054–6068. DOI: 10.1109/TIP.2020.2988148
8. Screen content video quality assessment: subjective and objective study / S. Cheng [et al.] // IEEE Transactions on Image Processing. 2020. Vol. 29. P. 8636–8651. DOI: 10.1109/TIP.2020.3018256
9. Рекомендация МСЭ-R BT.500-14 (10/2019). Методики субъективной оценки качества телевизионных изображений. Женева: МСЭ, 2020. 104 с.
10. Subjective and objective quality assessment of high frame rate videos / P.C. Madhusudana [et al.] // IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 108069–108082.
11. Structural similarity index (SSIM) revisited: a data-driven approach / I. Bakurov [et al.] // Expert Systems with Applications. 2022. Vol. 189. URL: https://www.researchgate.net/publication/355499235_Structural_Similarity_Index_SSIM_Revisited_a_Data-Driven_Approach (дата обращения: 10.06.2024).
12. Overview of full-reference video quality metrics and their performance evaluations for videoconferencing application / L. Zhang [et al.] // Journal of Electronic Imaging. 2019. Vol. 28, no. 2. P. 023001–023007.
13. Moldovan A.-N., Ghergulescu I., Muntean C.H. VQAMap: A novel mechanism for mapping objective video quality metrics to subjective MOS scale // IEEE Transactions on Broadcasting. 2016. Vol. 62, no. 3. P. 610–627. DOI: 10.1109/TBC.2016.2570002
14. Klink J., Uhl T. Video quality assessment: some remarks on selected objective metrics // International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM). Split, 2020. DOI: 10.23919/SoftCOM50211.2020.9238303. URL: https://www.researchgate.net/publication/345806819_Video_Quality_Assessment_Some_Remarks_on_Selected_Objective_Metrics (дата обращения: 15.06.2024).
15. Akramullah S. Digital Video Concepts, Method and Metrics. Quality, Compression, Performance and Power-off Analysis. New York City: Apress, 2014. 368 p.
16. Shahid M., Abebe M.A., Hardeberg J.Y. Assessing the quality of videoconferencing: from quality of service to quality of communication // Electronic Imaging. 2018. P. 235-1–235-7. DOI: 10.2352/ISSN.2470-1173.2018.12.IQSP-235.

Получено 05.07.2024

Гладких Анатолий Афанасьевич, д.т.н., профессор, профессор кафедры радиотехники, телекоммуникации и защиты информации Ульяновского государственного технического университета. 432027, Российская Федерация, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32. Тел. +7 909 357-78-37. E-mail: a_gladkikh@mail.ru

Мишин Дмитрий Викторович, д.т.н., профессор кафедры радиоэлектронных систем Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики. 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23. Тел. +7 960 816-24-46. E-mail: d.mishin@psuti.ru

Дрягин Сергей Александрович, заместитель главного конструктора научно-производственного объединения «Марс» (НПО «Марс»). 432022, Российская Федерация, г. Ульяновск, ул. Солнечная, 20. Тел. +7 908 490-97-65. E-mail: s_drg@mail.ru

Корсунский Андрей Сергеевич, к.т.н., главный конструктор НПО «Марс». 432022, Российская Федерация, г. Ульяновск, ул. Солнечная, 20. Тел. +7 960 376-55-94. E-mail: aksspb@mail.ru

MATHEMATICAL MODELING OF SECURE MULTIPOINT VIDEO CONFERENCE SESSIONS USING MULTILAYER GRAPHS

Gladkikh A.A.¹, Mishin D.V.², Driagin S.A.³, Korsunskii A.S.³

¹ Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russian Federation

² Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation

³ Research-and-Production Association «Mars», Ulyanovsk, Russian Federation

E-mail: s_drg@mail.ru

The article describes a multilayer graph model for multipoint videoconference sessions. The model presented in this study allows to specify requirements for quality of video capture quality when transferred between terminals and multipoint control unit at the service layer, as well as assessing bandwidth performance and delay of datalink channels at the secure and transport network layer. The given multilayer graph model for videoconference system is designed taking into account the features of secure network configuration, in which several overlay network layers are distinguished over transportation networks. This model specifies a structure of multipoint videoconference session at service layer, at which videoconferencing terminals interoperate through server. Traffic flows generated during session are distributed according to routing rules at the secure network layer. A purpose to select the most optimal route configuration for the entire session includes a number of alternative methods to distribute traffic for each pair of client-server communication seems to be rather complicated. The study proposes an algorithm for searching the shortest path in the graph of a secure overlay network with a step-by-step projection for each individual route section onto the underlying level of the transport network to find the shortest path within its boundaries. An example for solving a problem on finding route in regard to the overlay network requirements and the actual traffic flow through the transportation network is given. Minimization of the capacity usage of leased channels was chosen as the optimality criterion. Experiments were conducted to evaluate the session quality based on the objective methods for various video-stream parameters, and corresponding quantitative estimates of the required bandwidth in order to organize a session.

Keywords: *multilayer graph, videoconference, multipoint videoconference sessions, quality evaluation of videoconference sessions, data transmission network, calculation of required channel resources*

DOI: 10.18469/ikt.2024.22.1.04

Gladkikh Anatioliy Afanasevich, Ulyanovsk State Technical University, 32, Severny Venets Street, Ulyanovsk, 432027, Russian Federation; Professor of Radio Engineering, Telecommunications and Information Security Department, Doctor of Technical Sciences. Tel. +7 909 357-78-37. E-mail: a_gladkikh@mail.ru

Mishin Dmitry Viktorovich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; Professor of Radio Electronic Systems Department, Doctor of Technical Sciences. Tel. +7 960 816-24-46. E-mail: mishin-dv@psuti.ru

Driagin Sergey Aleksandrovich, Research-and-Production Association «Mars», 20, Solnechnaya Street, Ulyanovsk, 432022, Russian Federation; Deputy Chief Designer. Tel. +7 908 490-97-65. E-mail: s_drg@mail.ru

Korsunskiy Andrey Sergeevich, Research-and-Production Association «Mars», 20, Solnechnaya Street, Ulyanovsk, 432022, Russian Federation; Deputy Chief Designer, PhD in Technical Sciences. Tel. +7 960 376-55-94. E-mail: aksspb@mail.ru

References

1. Recommendations ITU-T E.800 (09/2008). Definition of Terms Related to Quality of Service. Geneva: MSE, 2009, 32 p. (In Russ.)
2. Ma J., Li M., Li H.-J. Traffic dynamics on multilayer networks with different speeds. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2022, vol. 69, no. 3, pp. 1697–1701. DOI: 10.1109/TCSII.2021.3102577
3. Rodrigues H. et al. Traffic optimization in multi-layered WANs using SDN. *IEEE 22nd*

- Annual Symposium on High-Performance Interconnect*. Mountain View, 2014, pp. 71–78. DOI: 10.1109/HOTI.2014.23
4. Interdonato R. et al. Multilayer network simplification: approaches, models and methods. *Computer Science Review*, 2020, no. 36. URL: <https://www.sci-hub.ru/10.1016/j.cosrev.2020.100246> (accessed: 10.06.2024).
 5. Ageev D.V. Designing the modern telecommunication systems using multilayer graphs. *Vostochno-evropejskij zhurnal peredovyh tekhnologij*, 2010, vol. 4, no. 2 (46), pp. 75–77. (In Russ.)
 6. Ageev D.V. Structural synthesis of WDM network with optical converters using a model represented as a multilayer graph. *Problemi telekomunikacij*, 2012, no. 2 (7), pp. 3–17. (In Russ.)
 7. Min X. et al. Study of subjective and objective quality assessment of audio-visual signals. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2020, vol. 29, pp. 6054–6068. DOI: 10.1109/TIP.2020.2988148
 8. Cheng S. et al. Screen content video quality assessment: subjective and objective study. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2020, vol. 29, pp. 8636–8651. DOI: 10.1109/TIP.2020.3018256
 9. Recommendations ITU-R BT.500-14. (10/2019). Methodologies for the Subjective Assessment of the Quality of Television Images. Geneva: MSE, 2020, 104 p. (In Russ.)
 10. Madhusudana P.C. et al. Subjective and objective quality assessment of high frame rate videos. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 108069–108082.
 11. Bakurov I. et al. Structural similarity index (SSIM) revisited: a data-driven approach. *Expert Systems with Applications*, 2022, vol. 189. URL: https://www.researchgate.net/publication/355499235_Structural_Similarity_Index_SSIM_Revisited_a_Data-Driven_Approach (accessed: 10.06.2024).
 12. Zhang L. et al. Overview of full-reference video quality metrics and their performance evaluations for videoconferencing application. *Journal of Electronic Imaging*, 2019, vol. 28, no. 2, pp. 023001–023007.
 13. Moldovan A.-N., Ghergulescu I., Muntean C.H. VQAMap: A novel mechanism for mapping objective video quality metrics to subjective MOS scale. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2016, vol. 62, no. 3, pp. 610–627. DOI: 10.1109/TBC.2016.2570002
 14. Klink J., Uhl T. Video quality assessment: some remarks on selected objective metrics. *International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*. Split, 2020. DOI: 10.23919/SoftCOM50211.2020.9238303. URL: https://www.researchgate.net/publication/345806819_Video_Quality_Assessment_Some_Remarks_on_Selected_Objective_Metrics (accessed: 15.06.2024).
 15. Akramullah S. *Digital Video Concepts, Method and Metrics. Quality, Compression, Performance and Power-off Analysis*. New York City: Apress, 2014, 368 p.
 16. Shahid M., Abebe M.A., Hardeberg J.Y. Assessing the quality of videoconferencing: from quality of service to quality of communication. *Electronic Imaging*, 2018, pp. 235-1–235-7. DOI: 10.2352/ISSN.2470-1173.2018.12.IQSP-235

Received 05.07.2024

ЛИНИИ СВЯЗИ И ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

УДК 681.586.54

ПОЛЕВЫЕ ИСПЫТАНИЯ МЕТОДА ПОИСКА ТРАССЫ ПРОКЛАДКИ ПОЛНОСТЬЮ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОПТИЧЕСКОГО КАБЕЛЯ

Дашков М.В., Гуреев В.О., Гаврюшин С.А., Нижгородов А.О.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ
E-mail: m.dashkov@psuti.ru, v.gureev@psuti.ru, s.gavrushin@psuti.ru, anton.socol2017@yandex.ru