

На правах рукописи



САЛОМАТИНА ЕЛЕНА ВАСИЛЬЕВНА

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ
ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЕНЧЕСКИХ СЕТЕЙ И МЕТОДОВ ИХ
ЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ**

Специальность 05.12.13 –
Системы, сети и устройства телекоммуникаций

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2019

Работа выполнена на кафедре «Электромагнитной совместимости и управления радиочастотным спектром» (ЭМС и УРЧС) Московского технического университета связи и информатики (МТУСИ) при ФГУП «Научно-исследовательский институт радио», г. Москва.

Научный руководитель: **Сарьян Вильям Карпович**
доктор технических наук, академик Национальной академии наук Республики Армения, руководитель научного центра ФГУП «Научно-исследовательский институт радио», г. Москва.

Официальные оппоненты: **Мещеряков Роман Валерьевич**,
доктор технических наук, профессор РАН, начальник лаборатории «Киберфизических систем» ИПУ РАН, г. Москва.

Маколкина Мария Александровна,
кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича», (СПбГУТ),
доцент кафедры сетей связи и передачи данных.

Ведущая организация: ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт связи», г. Москва.

Защита диссертации состоится «14» мая 2019 г. в 16.00 часов на заседании диссертационного совета Д.212.025.04 при Владимирском государственном университете имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых по адресу: 600000, г. Владимир, пр-т Строителей, 3/7, ВлГУ, ауд. 301.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке университета и на сайте ВлГУ <http://dis.vlsu.ru>.

Автореферат разослан «12» марта 2019 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87, ВлГУ, РТиРС, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.025.04.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, профессор

А. Г. Самойлов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Лавинообразный рост трафика негативно сказывается на предоставлении услуг, особенно таких, которые требуют работы в реальном масштабе времени, поэтому разработке эффективных путей развития и совершенствования архитектуры сетей и систем телекоммуникаций в последнее время стали уделять повышенное внимание. Рост трафика прогнозируется настолько большим, что уже сейчас Международный Союз Электросвязи приступил к разработке способов его снижения, например, за счет внедрения систем искусственного интеллекта (ИИС) и систем машинного обучения (МОС, MLS).

Кроме того, в результате происходящих в системах связи эволюционных процессов возникают новые способы коллективной коммуникации, расширяется спектр предоставляемых услуг, изменяются подходы к построению сетей. Одновременно с этим жесткие требования обеспечения качества обслуживания (QoS, QoE) на должном уровне и эффективного использования имеющихся ресурсов только углубляют существующие проблемы лавинообразного увеличения трафика, и его существенных структурных изменений.

Основным эффективным способом снижения трафика признаны способы управления трафиком. Среди опубликованных работ можно найти как посвященные общим принципам организации сетей, так и непосредственно методам распространения информационных сообщений через сетевую структуру: алгоритмы классификации трафика, методы адаптивного управления трафиком, предиктивного управления интенсивностью трафика, балансировки нагрузки, инжиниринга трафика, методы структуризации инфокоммуникационной среды (ИКС) по различным характеристикам, методы принудительного расписания или запрета на работу в сети. Хотя эти методы связаны с поиском лучшей структуры конвергентных инфокоммуникационных систем, однако решают только отдельные вопросы. Очевидно, что область организации информационных потоков в современных сетях, требует проведения дополнительных исследований, а тема диссертации является актуальной и своевременной.

Степень разработанности темы.

Исследованиям снижения лавинообразного роста трафика путем его управления и поиска перспективной структуры посвящены работы следующих авторов: В. М. Вишневский, А. Е. Кучерявый, А. С. Парамонов, Б. С. Цыбаков, О. В. Масленников, Б. С. Гольдштейн, Г. П. Башарин, Н. А. Соколов, Б. С. Лившиц, С. Н. Степанов, А. Д. Харкевич, К. Е. Самуилов, О. И. Шелухин, В. К. Сарьян, A. Jensen, V. V. Iversen, P. Tran-Gia, W.E. Leland, I. Norros, W. Willinger и др. Если обобщить все исследования в этом направлении, то можно заметить тенденции поиска необходимой подходящей инфраструктуры как эффективного способа управления трафиком, который приводит к росту эффективности системы передачи информации в целом, в частности, за счет уменьшения, объема избыточного трафика (трафика не содержащего полезной информации).

Предлагаемые в исследованиях отечественных и зарубежных ученых решения имеют черты информационно-управленческой сети (ИУС), один из вариантов которой был реализован в РФ внедрением системы «ТВ-Информ». Здесь в качестве прямого канала использовался аналоговый ТВ канал, в котором в циркулярно-адресном режиме передавалась дополнительная цифровая информация в виде дискретных (цифровых) сообщений. Это был первый опыт построения конвергентной цифровой сети передачи информации. Однако вопросы использования ИУС для снижения трафика в сети до сих пор не рассматривались.

Целью диссертационного исследования является разработка и исследование моделей информационно-управленческих сетей и методов их использования, обеспечивающих повышение эффективности использования систем телекоммуникаций.

Для достижения поставленной цели в диссертации последовательно решаются следующие задачи:

- анализ особенностей трафика инфокоммуникационной среды и факторов, влияющих на его увеличение в современных и конвергентных сетях будущего поколения, включая сети пятого поколения 5G;
- анализ используемых концепций управления трафиком и предлагаемых

методов борьбы с его увеличением в соответствии с требованиями качества обслуживания;

- исследование структуры ИУС и анализ потенциальных возможностей ИУС;
- разработка математической модели ИУС, позволяющей определить условия оптимальности с точки зрения уменьшения влияния роста трафика и распределения ограниченных ресурсов;
- разработка аналитических моделей с помощью аппарата теории массового обслуживания для расчета вероятностно-временных характеристик трафика ИУС.

Предметом исследования являются модели и методы эффективного использования информационно-управленческих сетей.

Объектом исследования являются информационно-управленческие сети.

Методы исследования. При решении поставленных задач использовались методы, основанные на положениях теории сетей связи, методы теории вероятностей и математической статистики, теории массового обслуживания, графодинамики, тензорного исчисления.

Научная новизна. Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

1. Разработана математическая модель ИУС, обеспечивающая повышенную скорость передачи информации и обоснована возможность достижения оптимального значения трафика в ИУС.
2. Предложена модификация ИУС - сенсорная управленческая сеть (СУС) и разработана ее математическая модель.
3. Доказана возможность использования ИУС для решения задач уменьшения негативного влияния лавинообразного трафика на качество массовых услуг.
4. Разработан метод отбора структур в конвергентной ИКС.
5. Показана эффективность использования ИУС и СУС для предоставления ИК услуг и индивидуализированного управления спасением людей при возникновении чрезвычайных ситуаций.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

- Использование предложенной модели представления ИК услуг и узла сети СУС

как системы массового обслуживания расширяют область применения теории телетрафика и теории массового обслуживания.

- Полученные выводы могут способствовать дальнейшему развитию новых принципов построения и работы сетей в конвергентной среде.

- Разработанные математические модели инфраструктуры ИУС и ее модификации СУС могут использоваться для уменьшения избыточного трафика и распределения ограниченных ресурсов в ИУС, что позволяет до 26% уменьшить объемы информационных потоков.

Достоверность и обоснованность результатов работы подтверждаются корректным использованием положений общей теории связи, теории графов, теории оптимальных процессов, применением апробированных методик, а также не противоречием результатов, полученных в работе, известным из литературы.

Личный вклад автора. На основе проведенного анализа сформулированы задачи исследования, предложены модель ИУС и ее модификация - СУС. Разработаны методики построения ИУС и СУС, использованные для уменьшения негативного влияния лавинообразного увеличения трафика в современной ИКС. Лично подготовлены и опубликованы основные результаты исследования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Предложены структуры ИУС и СУС, снижающие избыточный трафик до 26%.
2. Метод построения ИУС и СУС в современной конвергентной среде на базе существующих средств, имеющихся сегодня на сетях, не требующий дополнительного оборудования.
3. Метод повышения эффективности использования ИУС, уменьшающий негативное влияние лавинообразного увеличения трафика в современной ИКС.
4. Новые аналитические модели для расчета вероятностно-временных характеристик предложенных ИУС и СУС с малыми вычислительными затратами.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы обсуждались в рамках заседаний ITU-T FG ML&5G (Женева, Сиань (КНР), 2018), на Всероссийской научной конференции «Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук в современном информационном обществе» (МФТИ, 2013),

Международной отраслевой научной конференции «Технологии информационного общества» (МТУСИ, 2013-2014 гг.); Международной конференции «Инжиниринг&Телекоммуникации En&T» (Москва 2015, 2017), Международных конференциях ИТ-Стандарт (Москва, 2015-2017 гг.), XII Международной научно-технической конференции «Перспективные технологии в средствах передачи информации – ПТСПИ-2017», на научных конференциях профессорско-преподавательского состава ПГУ (2013-2019 гг.).

Публикации. Опубликовано 17 научных работ по теме диссертации, в том числе одна Web of Science, 4 в журналах из списка ВАК и 12 в других изданиях.

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты диссертационной работы нашли практическое применение в ФГУП Научно-исследовательский институт радио, г. Москва, в НИ ЗАО «Электромаш» при проведении перспективных опытно-конструкторских и научно-исследовательских работ, а также в учебном процессе в Академии ГПС МЧС России, МТУСИ и ПГУ, что подтверждено соответствующими актами. Результаты работы утверждены как вклады в рекомендации МСЭ: Recommendation ITU-T Y.2239 «Requirements for Information Control Networks and related applications» и Y.2222 «Sensor control networks and related applications in a next generation network environment».

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, включающего 231 наименований, и приложения. Работа изложена на 187 страницах без приложения, содержит 47 рисунков, 7 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, определены объект, предмет и методы исследования; раскрыты научная новизна, теоретическая и практическая значимости работы, ее апробация, представлены положения, выносимые на защиту.

В первой главе на основании проведенного аналитического обзора выполнен анализ факторов лавинообразного возрастания трафика в современной ИКС, выявлены причины его возрастания и негативного влияния этого возрастания на

качество предоставляемых услуг. Определены основные методы влияния роста трафика на скорость передачи информации и сформулированы задачи исследования.

Во второй главе изложены основные понятия, определения и общая характеристика предложенной ИУС, рассмотрены технические решения, используемые для построения обратных каналов в ИУС.

Основная часть целенаправленного взаимодействия в современной ИКС осуществляется в рамках типовых процессов (P_T) — регулярно воспроизводимых в данной ИУС, а значит, прогнозируемых, имеющих определенную и неизменную на какой-то сравнительно длительный срок Δt цель. Обязательным условием воспроизводства P_T является выполнение соотношения — $\Delta t \gg T_0$, где T_0 — период P_T . В связи с этим зависимость различных параметров и характеристик P_T от времени удобно представлять в виде зависимости от номера итерации n (причем $n \gg 1$) и времени начала текущей итерации t . Типовой процесс, который воспроизводит каждая информационная система в рамках ИУС, можно представить в виде суммы технологических, транспортных и информационных (ИП_T) типовых процессов, а также типовых процессов, связанных с расходом ресурсов, сопровождающих данный процесс.

Лавинообразный рост трафика снижает или вообще делает недоступным ряд услуг массовому пользователю из-за ограничения доступных ресурсов. К основным понятиям ИУС, влияющим на интенсивность трафика и возможности управления им, относятся:

- типовые информационные процессы, которые регулярно и многократно воспроизводятся и количество которых в одном ИУС принципиально ограничено.
- семантическая аномалия (СА), предполагающая использование одних и тех же понятий всеми участниками ИУС при взаимодействии в процессе выполнения ИП_T и способы поддержания общности СА всех участников ИУС,
- семантические помехи, под которыми понимаются дополнительные сигналы, меняющие смысл информации, содержащейся в сигнале ИУС.

Утрата абонентами территориальной изоляции в современной ИКС стала

причиной возникновения феномена «многолучёвости» информации в ИУС, который приводит к снижению или полной утрате изоляции «свойственности». Важнейшей характеристикой, определяющей величину изоляции «свойственности» всех объектов, входящих в систему S_α , является их семантическая аномалия (CA_i – семантическая аномалия абонента; $CA_{C_\mu S_\alpha}$ – семантическая аномалия центра системы S_α). «Многолучёвость» информации, как и в классическом случае, возникает при передаче сигнала от одного источника до одного абонента (объект) ИУС AP_i в анизотропной среде, за счет различной интерпретации $C_i S_i$ этого события разными серверами и БД, которые доступны данному абоненту (Рис. 1). Это влияние является причиной возникновения семантических помех. Выявлены направления снижения семантических помех, связанные с необходимостью усиления влияния центра ИУС на абонента путем увеличения количества и качества воздействия.

ИУС характеризуются предоставлением регулярно востребованных многими пользователями информационных услуг и тем самым возможностью управлять информационным потоками. А это означает наличие мощных информационных центров (C), формирующих мультимедийные и мультисервисные услуги и предоставляющих их практически любому абоненту, преодолевая языковые и государственные границы. Причем это взаимодействие принципиально существенно неравновесное: объем информации от центра к пользователю намного превышает объем информации от абонента к центру.

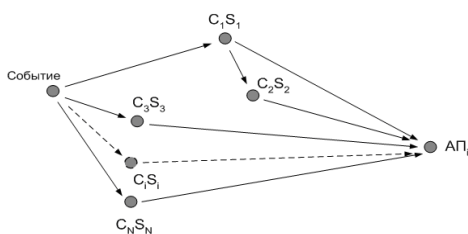


Рис. 1 Иллюстрация анизотропности среды

По разным причинам одни и те же человеко-машинные (ЧМС) и машинные системы (МС) могут одновременно участвовать в воспроизводстве одного или разных $П_T$ в различных структурах или переходить из одной

ИУС в другую. Предлагается фундаментальным объектом для описания нелинейных процессов в ИУС считать типовой информационный процесс (ИП_T).

Любая семантическая аномалия представляет собой организованную и постоянно поддерживаемую неоднородность в ИУС. Периодическое

воспроизведение типовых ИП_т, существующих в ИУС, обеспечивает стационарность данной системы. Анализ трафика в современной ИКС показывает, что типовые процессы занимают более 80% от общего трафика. Типовой ИП_т характеризуется снижением энтропии по сравнению с внешней средой, обеспечивает стабильность энтропии системы и объекта, участвующего в работе этой ИУС.

Третья глава посвящена разработке математической модели ИУС.

Информационно-управленческие сети, работа которых основана на организации многоуровневого взаимодействия между множеством её элементов, относятся к классу «графодинамических систем». Для моделирования ИУС используем взвешенный ориентированный граф $x(t)$, отображающий топологию системы и скорость передачи данных, при этом закон изменения графа во времени может быть записан в форме некоторого рекуррентного процесса

$$x(t+1) = F(x(t)) \quad (1)$$

где F – некоторый оператор над графом, преобразующий граф, наблюдаемый в момент t , в граф, наблюдаемый в момент времени $t+1$.

Объектом исследования в рассматриваемой динамической задаче служит не движение по графу, а изменение графа в целом. На множестве графов, моделирующих структуру ИУС, вводится метрика, отражающая ряд показателей, характеризующих канал передачи данных от вершины к вершине ИУС. Кроме простой метрики на графе вводится сложная метрика, являющаяся композицией значений с некоторыми весовыми коэффициентами:

$$f_1 * S + f_2 * P + f_3 * D \quad (2)$$

где S – матрица весовых коэффициентов, характеризующих скорость передачи информации от вершины $АП_i$ к вершине $АП_j$; P – множество весовых коэффициентов, характеризующих пропускную способность канала передачи данных от вершины $АП_i$ к вершине $АП_j$; D – обозначение максимально возможной задержки при передаче данных.

При преобразованиях структуры сети инвариантными остаются количество вершин и потоки информации, входящие и выходящие из каждой вершины:

$$\mathbf{V}^\alpha_\beta \mathbf{x}^\beta = \mathbf{y}_\alpha = const \quad (3)$$

Для описания функции преобразования ИУС и для каждого из наборов значений, характеризующих ребро графа введем тензор $\mathbf{F}^{\gamma}_{\alpha}$, который характеризует переход от одной топологической структуры ИУС $\mathbf{V}^{\alpha}_{\beta}$ к другой структуре $\mathbf{V}^{\gamma}_{\beta}$ и тензорный объект: \mathbf{Z}_{α} ; \mathbf{P} ; \mathbf{D}_{α} . В тензорной форме функция (3) будет записана как

$$\mathbf{G}(\mathbf{B}) = \mathbf{V}^{\alpha}_{\beta} (f_1 \mathbf{Z}_{\alpha} + f_2 \mathbf{P}_{\alpha} + f_3 \mathbf{D}_{\alpha}) \mathbf{x}^{\beta} \quad (4)$$

Основной особенностью класса систем S_{α} типа ИУС является особое положение вершин типа $C_{\mu S_{\alpha}}$ (асимметрично относительно остальных вершин типа АП_{*i*}). Для доказательства утверждения оптимальности топологии ИУС, при которой все объекты ИУС оказываются в любой момент времени симметричными относительно любого центра $C_{\mu S_{\alpha}}$ и абонента АП_{*i*}, произведем декомпозицию сети на подсети, каждая из которых имеет единственный центр. Все утверждения, доказанные для такого класса сетей, будут справедливы и для общей сети, поскольку результирующая сеть является линейной комбинацией подсетей.

В случае несимметричной конфигурации сети с одним информационным центром информация, предназначенная для *i*-ой вершины, проходит по пути, состоящему из последовательности дуг, и составляющие элементы суммируются. Вычтем значения целевой функции для симметричного случая из общего случая. Поскольку в итоговом выражении все составляющие положительны, то:

$$\mathbf{G}(\mathbf{B}_2) - \mathbf{G}(\mathbf{B}_1) > \mathbf{0}, \text{ тогда } \mathbf{G}(\mathbf{B}_2) > \mathbf{G}(\mathbf{B}_1)$$

Это значит, что значение целевой функции на любой несимметричной S_{α} всегда больше значения целевой функции на симметричной S_{α} и, следовательно, $\mathbf{G}(\mathbf{B}_1) = \mathbf{min}$. Поэтому построенная таким образом сеть оптимальна в смысле комплексного критерия затрат, задержек и пропускной способности каналов.

В силу свойства не отрицательности коэффициентов f_i можно утверждать, что полученная в результате декомпозиции объемная компонента будет монотонно убывать при преобразовании сети к более централизованной и симметричной относительно центра. Любое продвижение S_{α} в сторону оптимальной топологии сопровождается уменьшением объема передаваемой в ИУС информации. Следовательно, к общим чертам условия оптимальности топологии ИУС относятся:

1) наличие зоны обслуживания, внутри которой все участники сети имеют однородные характеристики каналов в прямом и обратном направлении; 2) наличие единого центра; 3) отношение к классу систем с множественным доступом.

Будем считать распределение ресурсов эффективным, когда перераспределение ресурсов обеспечивает каждому k -му участнику значение целевой функции не меньшее, чем $f_k(x_k^0)$ и хотя бы одному – большее.

Рассмотрена задача

$$\left. \begin{aligned} \sum_{k \in \alpha_s} f_k(x_k) &\rightarrow \max \\ \sum_{k \in \alpha_s} x_k &= \sum_{k \in \alpha_s} x_k^{s-1} \\ x_k &\geq 0, \quad k \in \alpha_s \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

и $x_k^s, k \in \alpha_s$ является ее решением. Распределение ресурсов, когда ни одна из сделок не даёт положительного приращения суммарной полезности, будем считать тупиковым. Однако, тупиковая точка может и не быть оптимальной. В общем случае для каждого фиксированного состояния множество ресурсов образует группы, так что ценность малого приращения каждого ресурса для данного участника группы зависит от приращения других ресурсов из той же группы и не зависит от приращений остальных ресурсов. Множество ресурсов, обладающих данным свойством, называется комплектом.

Распределение ресурсов считается целесообразным, если в результате происходит увеличение функции полезности хотя бы одного из участников и ни для одного из них полезность не уменьшается. Для существования оптимизирующей последовательности сделок достаточно на каждом шаге выбирать такую допустимую сделку, которая дает наибольшее приращение суммарной полезности. Такое перебор требует централизованной информации. Очень часто передача всей информации в один центр невозможна или нерациональна, и выделяется специальный участник («центр»), через которого осуществляется координация, при этом прямые контакты между участниками отсутствуют.

В этой же главе рассмотрены характеристики трафика в ИУС и принципиальные отличия ИУС от существующих сетей. Все большее количество

типовых информационных процессов абонент начинает воспроизводить через ИУС. Причем оформление массовой услуги является типовым информационным процессом и одновременно операторным сигналом (позволяющим сохранить работоспособность ИУС, обеспечивая локальную изоляцию абонентов). В течение короткого начального периода возникновения ИУС воспроизводство, освоение или изменение всех своих локальных ИП_т всеми абонентами ИУС увеличивает случайную компоненту трафика в ИУС. Но затем происходит процесс типизации локальных информационных процессов в глобальные ИП_т. Внедрение массовых услуг в ИУС сложно осуществить без прогнозирования и управления информационным взаимодействием абонентов (объектов) ИУС, участвующих в воспроизводстве данного ИП_т, поэтому можно прогнозировать величину и направление трафика в сети и управлять значимой частью трафика сети.

В ИУС возможно управление не только трафиком, но и контентом. Управление контентом связано с семантическими помехами. Нельзя одновременно и длительное время воспроизводить произвольно созданные массовые услуги в одной ИУС. Поэтому закрепляются только такие массовые услуги, которые могут агрегироваться друг с другом, так как само определение массовой услуги делает невозможным семантическое противоречие этих услуг.

В четвертой главе исследуются модели трафика на базе ИУС.

Для модели предоставления ИК услуг в ИУС задействован цифровой телевизионный канал. Схема организации ИУС представлена на рис. 2. ИУС в части предоставления ИК услуг представляет собой одноканальную модель СМО $M/G/1/\infty$ с пуассоновским входным потоком и произвольным распределением времени обслуживания, дисциплиной обслуживания FIFO, с бесконечной очередью. Система описывается двумерным состоянием $S(t)$, которое характеризуется не только количеством запросов $n(t)$ в системе в момент t , но и временем $\tau(t)$, истекшим к моменту t с момента начала обслуживания текущего обслуживаемого запроса: $S(t)=\{n(t),\tau(t)\}$. Введем дополнительную переменную ζ_i обозначающую момент завершения обслуживания i -го запроса, поступившего в очередь: $S(\zeta_i)\equiv n(\zeta_i)\equiv n_i$

Поведение очереди $M/G/1$ в моменты завершения обслуживания описывает уравнение:

$$n_{i+1} = n_i + I(n) + a_{i+1} \quad (6)$$

где $I(n)$ – функция Хевисайда, равная 1 для положительных значений аргумента, и равная 0 для остальных значений; a_{i+1} – требования, пришедшие во время обслуживания последнего запроса.

Поскольку переменные в момент ζ_{i+1}

зависят только от переменных в момент ζ_i , уравнение характеризует систему $M/G/1$ с помощью встроенной цепи Маркова. Среднее время обслуживания обозначим как $E[X]$. Уравнение (6) можем записать, как $E[n_{i+1}] = E[n_i] - E[I(n_i)] + E[a_{i+1}]$. Взяв предел обеих сторон для $i \rightarrow \infty$, и, используя распределения вероятностей состояний, получим вероятность P_0 того, что новое требование найдет пустую очередь $M/G/1$

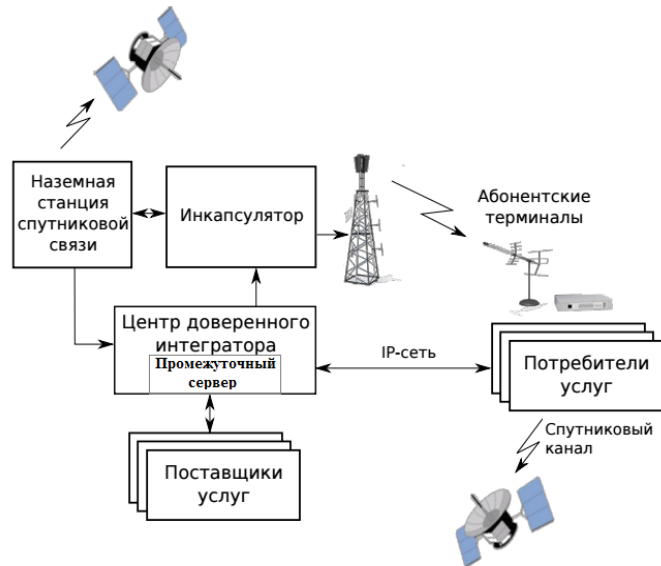


Рис.2. Схема организации ИУС

$$P_0 = 1 - E[a] \quad (7)$$

$E[a] = \int_0^{\infty} E[a|X=t]g(t)dt = \lambda \int_0^{\infty} tg(t)dt = \lambda E[X]$ соответствует интенсивности трафика, выраженной в эрлангах, $g(t)$ - плотность вероятности времени обслуживания.

Решим уравнение (6) в области z с помощью аппарата производящих функций. Обозначим через $P(z)$ производящую функцию распределения вероятностей состояний во встроенные моменты. Пусть $A(z)$ – производящая функция количества поступлений в течение времени обслуживания запроса.

$$P(z)\{z - A(z)\} = P_0(z-1)A(z) \Rightarrow P(z) = P_0 \frac{(z-1)A(z)}{z - A(z)}$$

Среднее количество запросов в очереди N во встроенные моменты зависит от первых двух производных $A(z)$, вычисленных при $z=1$. При $z=1$ и используя (7) для P_0 , и выражения для производных $A'(1)$, $A''(1)$ мы получаем

$$N = \lambda E[X] + \frac{\lambda^2 E[X^2]}{2[1 - \lambda E[X]]} \quad (8)$$

Применив теорему Литтла, получаем выражение, совпадающее с известной формулой Поллачека-Хинчина для средней задержки в очереди

$$T = \frac{N}{\lambda} = E[X] + \frac{\lambda E[X^2]}{2[1 - \lambda E[X]]} \quad (9)$$

Среднее время ожидания (второе слагаемое) увеличивается с изменением времени обслуживания. Если интенсивность трафика процесса поступления требований $\lambda E[X]$, стремится к 1 Эрлангу, то средняя задержка стремится к бесконечности. В случае экспоненциально распределенного времени обслуживания (средняя скорость μ) формулы (6)-(9) дают выражения для очереди $M/M/1$:

$$\Gamma(s) = \frac{\mu}{\mu + s}, \quad E[X] = \frac{1}{\mu}, \quad E[X^2] = \frac{2}{\mu^2}$$

Можем сделать вывод, что N запросов, оставшихся в системе в момент завершения обслуживания, являются теми, которые поступили во время системной задержки T_D , с которой столкнулся только что обработанный запрос.

Рассмотрим коэффициент вариации C_V распределения времени обслуживания очереди $M/G/1$:

$$C_V^2 = \frac{Var[X]}{E^2[X]} = \frac{E[X^2]}{E^2[X]} - 1 \Rightarrow E[X^2] = E^2[X](C_V^2 + 1) \quad (10)$$

$C_V=0$ для детерминированного времени обслуживания, $C_V=1$ для экспоненциального распределения и $C_V \rightarrow +\infty$ для распределений с тяжелыми хвостами.

Сравним среднее количество запросов в нашей очереди $M/G/1$ с запросами в очереди $M/M/1$, имеющих одинаковую интенсивность трафика ρ .

$$N_{M/M/1} = \frac{\lambda E[X]}{1 - \lambda E[X]}$$

С помощью коэффициента вариации C_V распределения времени обслуживания запишем выражение для очереди $M/G/1$

$$N_{M/G/1} = \lambda E[X] + \frac{\lambda^2 E[X^2]}{2[1 - \lambda E[X]]} = N_{M/M/1} \left[1 + \lambda E[X] \left(\frac{C_V^2 - 1}{2} \right) \right]$$

$$N_{M/M/1} < N_{M/G/1}, C_V > 1$$

Сравнивая, получаем, что: $N_{M/M/1} > N_{M/G/1}, C_V < 1$

Предложенная выражениями (7)–(10) аналитическая модель позволяет рассчитывать характеристики загруженности сети, такие как среднее количество запросов в очереди, вероятность загрузки ТВ канала, среднее время обслуживания и среднее время ожидания.

Рассмотрим предложенную в работе модель СУС, эффективность которой была подтверждена системой управления спасением людей при возникновении чрезвычайных ситуаций, разработанной в ГосНИИРадио. На рис. 3 приведена схема СУС, используемая при экспериментах. Цель функционирования СУС – выработка команд управления узлам-исполнителям на основе данных, собранных с сенсорных узлов сети (mote), контроллера СУС и центра управления.

СУС предполагает два способа функционирования: централизованный и децентрализованный. При централизованном способе управления исполнитель получает обработанные данные от контроллера СУС через центральный канал связи, на основе которых формируется команда управления. Контроллер СУС собирает данные от сенсорных узлов через ad-hock сеть. При этом обеспечивается анализ наиболее полной информации о состоянии ЧС.

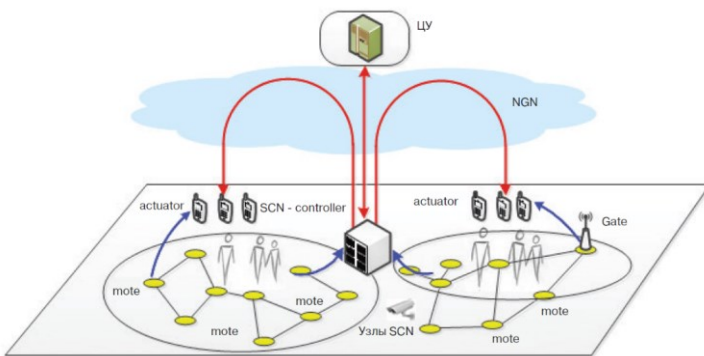


Рис.3. Комплекс средств связи в зоне ЧС с использованием СУС

Пусть СУС контроллер i генерирует пакеты в соответствии с пуассоновским процессом со скоростью λ_{gi} , а передает пакеты в соответствии с пуассоновским процессом со скоростью λ_{ii} . Принятые и переданные данные организованы в пакеты данных с фиксированным размером, которые могут храниться в буфере конечной емкости. Все пакеты поступают в конечный буфер контроллера и ожидают передачи в соответствии с дисциплиной *FIFO* без приоритетов.

В СУС для контроллера существуют следующие чередующиеся режимы: активный (A) и штатное состояние (S), продолжительность которых имеет экспоненциальное распределение со средним значением T_a и T_s . Процесс перехода состояний узла i может быть представлен как двумерная непрерывная цепь Маркова. Поскольку узел находится в насыщенном состоянии, время обслуживания T_{seri} приблизительно соответствует геометрическому распределению

$$P\left\{T_{seri} = \frac{1}{\mu_0} + T_{ACK} + jT_C\right\} = p_{tsuci} (1 - p_{tsuci})^{j-1}, \quad j = 1, 2, \dots, \quad (11)$$

где T_C – время конфликта, T_{ACK} – время получения АСК-пакета, p_{tsuci} – вероятность успешной передачи для узла i во время цикла T_{cycl} , μ_0 – скорость передачи

Из уравнения (11) получим среднее время обслуживания T_{seri}

$$E[T_{seri}] = \frac{1}{\mu_0} + T_{ACK} + \frac{T_C}{p_{tsuci}} \quad (12)$$

Пусть $a = \frac{1}{T_a}$ – скорость перехода из активного состояния в штатное состояние ожидания, а $s = \frac{1}{T_s}$ – скорость перехода из штатного состояния в активное.

Вероятность того, что узел i находится в активном p_{ai} и штатном p_{si} состояниях:

$$p_{ai} = \sum_{k=1}^K p_{ai}^k = \frac{s}{a+s} \quad p_{si} = \sum_{k=1}^K p_{si}^k = \frac{a}{a+s} \quad (13)$$

Выбор узла следующей передачи оказывает существенное влияние на скорость передачи данных. Уравнение баланса потоков в сети можно получить как

$$\Lambda_2 = (\Lambda_1 + \Lambda_2)T \quad (14)$$

где T - матрица маршрутизации. Средний коэффициент потери пакетов по всей сети может быть получен как

$$p_{loss} = \frac{\sum_{i=1}^N (p_{ai}^K \lambda_{ai} + p_{si}^K \lambda_{si})}{\sum_{i=1}^N \lambda_{gi}} \quad (15)$$

Коэффициент потери пакетов будет уменьшаться с увеличением размера буфера. Это связано с тем, что уменьшение времени ожидания помогает сократить

время пребывания пакета в очереди. Пропускная способность сети C :

$$C = \sum_{i=1}^N \lambda_{gi} - \sum_{i=1}^N (p_{ai}^K \lambda_{ai} + p_{si}^K \lambda_{si}) \quad (16)$$

Среднее число пакетов в буфере узла i равно

$$\begin{aligned} \bar{k}_i &= \sum_{k=1}^K k p_{ai}^k + \sum_{k=1}^K k p_{si}^k \\ &= [1,1] \left(I + 2G + \dots + (K-1)G^{K-2} + KHG^{K-2} \right) \begin{bmatrix} p_{ai}^1 \\ p_{si}^1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (17)$$

Средняя задержка пакета может быть рассчитана по формуле

$$\bar{D}_{all} = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{k}_i}{C} \quad (18)$$

Используя предложенную модель (11)-(18), можем получить производительность сети СУС, осуществив выбор протоколов управления сенсорной сетью и маршрутизацией трафика. Управление трафиком СУС является важной задачей, поскольку в условиях ЧС возможны массовые срабатывания большого числа автоматических устройств-исполнителей, что может привести к локальным перегрузкам сети и снижению QoS.

Производительность модели СУС (Рис.3.) можно определить по следующим показателям: количество пакетов, передаваемых по сети; средняя задержка обслуживания; средняя задержка загрузки данных. Сравниваем предлагаемую модель СУС (SCN) с традиционной моделью (сеть TCP/IP) на основе передачи данных СПД (DTN). Предположим, что стандартный размер пакета составляет 64 КБ, размер программного пакета равен 2 стандартным пакетам, а необработанный размер пакета равен стандартному пакету. Пакеты загрузки данных/ пакеты запроса на обслуживание генерируются случайным образом. Чтобы наблюдать влияние различных значений степени преобразования услуг на сетевой трафик, использовались два набора: SCN1 – от 0,5 до 0,7, SCN2– от 0,3 до 0,5, а степень агрегирования данных – от 0,7 до 0,9 для обеих групп.

Вероятность преобразования данных в сервис (p_s) – 0,3 в каждом интеллектуальном узле. Кроме того, отношение максимального количества SP, хранимых каждым интеллектуальным узлом, к количеству общих SP (s_p) – 0,6. Когда принимается пакет загрузки данных, сначала определяется, существует ли тип SP, соответствующий типу данных в этом пакете, а затем, если он существует, и данных в интеллектуальном узле достаточно для преобразования в сервис, генерируется услуга; в противном случае данные агрегируются.

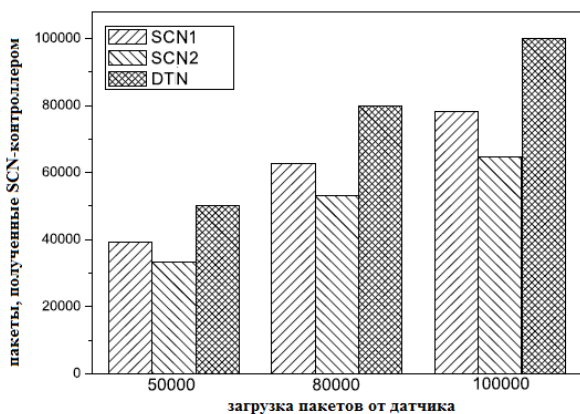


Рис.4. Количество пакетов, полученных SCN-контроллером в сети

Можем видеть, что объем данных, полученных контроллером в SCN1, меньше на 21 %, чем в DTN (Рис. 4.), тогда как в SCN2, где степень преобразование выше, объем принимаемых контроллером данных на 35 % меньше в сравнении с DTN. Следовательно, нагрузка на СУС-

контроллер снижается при использовании нашей модели. Это связано с тем, что в СУС-модели, благодаря агрегации или преобразованию в услуги, были удалены избыточные пакеты в каждом интеллектуальном узле.

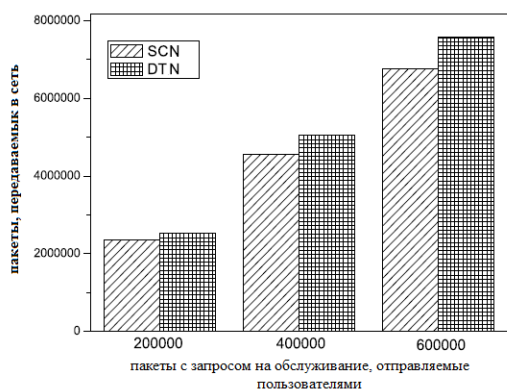


Рис.5. Количество пакетов, передаваемых в сети при $p_s = 7\%$

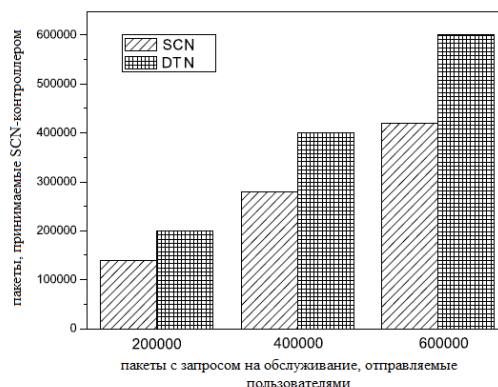


Рис.6. Количество пакетов, полученных СУС-контроллером при $p_s = 7\%$

На Рис.5 и Рис.6 при $p_s = 7,0\%$, показана тенденция изменения количества данных, передаваемых в сети, и принимаемых СУС-контроллером, соответственно, с увеличением количества пакетов с запросом на обслуживание, отправляемых пользователями. На Рис.5. и Рис.6. независимо от количества пакетов с запросом на обслуживание, объем данных, передаваемых

в СУС, меньше на 12 % и принятых СУС-контроллером, меньше на 29 % по сравнению с DTN, соответственно. Кроме того, для каждого увеличения на 200000 пакетов с запросом на обслуживание, объем данных, передаваемых в СУС, составляет 87 % от DTN, а полученных СУС-контроллером – 69 % от DTN. В СУС пакет с запросом на обслуживание не будет пересылаться, если он может быть удовлетворен, поэтому число прыжков для передачи пакета с запросом на обслуживание уменьшается и объем передаваемых данных меньше. Интеллектуальный узел вернет запрошенную услугу, если сможет удовлетворить запрос на обслуживание, поэтому пакеты с запросом на обслуживание не нужно каждый раз пересылать на СУС-контроллер, в отличие от DTN, таким образом уменьшая количество пакетов с запросом на обслуживание, принимаемых СУС-контроллером.

В эксперименте время передачи между двумя интеллектуальными узлами устанавливается от 15,0 мс до 50,0 мс.

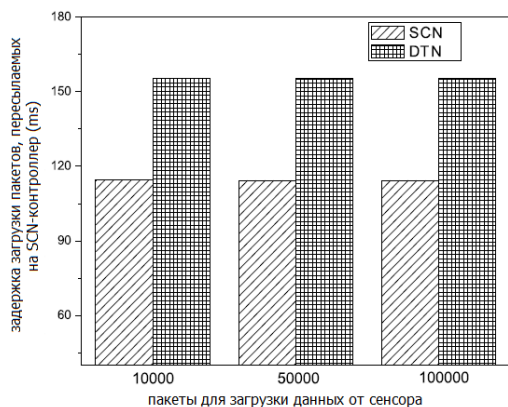


Рис.7. Средняя задержка загрузки пакетов, пересылаемых на СУС-контроллер

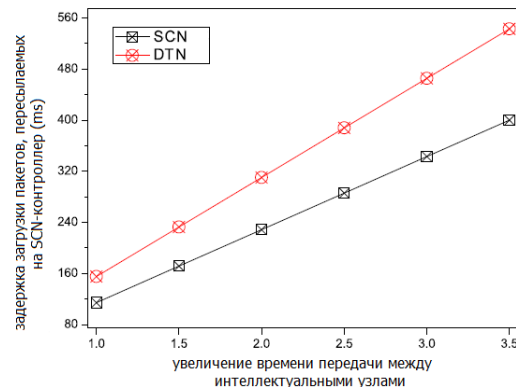


Рис.8. Средняя задержка пакетов загрузки, пересылаемых на СУС-контроллер при разном времени передачи

Как показано на Рис.7, средняя задержка загрузки данных, пересылаемых на СУС-контроллер, не сильно изменилась в случае 10000, 50000 и 100000 пакетов, и составляет 114,3 мс в каждом случае, тогда как для DTN требуется 155,1 мс. Таким образом, средняя задержка данных, загружаемых на СУС-контроллер, уменьшается до 26% по сравнению с DTN. Из Рис.8. видно, что независимо от увеличения времени передачи между интеллектуальными узлами средняя задержка загрузки данных в СУС меньше, чем в DTN, и составляет 73% от DTN.

Заключение. Основные результаты работы сводятся к следующему:

1. Проведен анализ особенностей трафика современной инфокоммуникационной среды и факторов, влияющих на его увеличение.
2. Доказано, что эффективным методом борьбы с увеличением трафика является построение новых структур, способных решить проблему увеличения трафика.
3. Предложено использовать в качестве основной структуры для снижения трафика - инфраструктуру информационно-управленческой сети (ИУС). Показаны принципиальные отличия ИУС от существующих сетей.
4. Доказано, что ИУС можно реализовать в современных конвергентных сетях без значительных расходов, так как она реализуется на существующих средствах, имеющихся сегодня на сетях.
5. Предложены методы построения ИУС и СУС в конвергентной среде, позволяющие уменьшить объемы информационных потоков.
6. Разработаны аналитические модели информационно-управленческой сети, позволяющие определить вероятностно-временные характеристики.
7. Предложен метод повышения эффективности использования ИУС на основе концепции типовых информационных процессов.

Список работ, опубликованных по теме диссертации.

В периодических изданиях, входящих в перечень ВАК

1. Сарьян В. К., Назаренко А. П., Сущенко Н. А., Саломатина Е. В. Особенности реализации социальных технологий средствами современных инфокоммуникационных технологий. / Труды НИИР. – 2014. – №3. – С. 33-37.
2. Сарьян В. К., Назаренко А. П., Сущенко Н. А., Саломатина Е. В. Трафик в системе индивидуализированного управления спасением людей при возникновении ЧС / Электросвязь. – 2016. – № 5. – С. 21-26.
3. V.K. Levashov, V.K. Saryan, A.P. Nazarenko, O.P. Novozhenina, I.Z. Toshchenko, I.S. Shushpanova, E.V. Salomatina Civil society in the networks of information and communication technologies / Sociological Studies. – 2016. – № 9. – P. 13-20.

4. Саломатина Е.В. Ресурсный подход к понятию «умный город». Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2016. – Т. 19. – № 3. – С. 115-120.

5. Саломатина Е.В. Топологическая модель информационно-управленческой сети. Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2017. – Т. 20. – № 4. – С. 87-91.

В других изданиях

6. Саломатина Е. В. Ресурсное взаимодействие. Всероссийская научная конференция «Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук в современном информационном обществе» // Труды 56-ой научной конференции МФТИ. – 2013. – С. 157-159.

7. Саломатина Е. В. Резервы повышения экономической эффективности систем управления спасением людей при возникновении чрезвычайных ситуаций. // VII Международная отраслевая научная конференция «Технологии информационного общества». – М.: МТУСИ, 2013. – С. 178 .

8. Саломатина Е. В., Сарьян В. К., Назаренко А. П., Берил С.И., Смоленский Н.Н Возможности и планы использования современных инфокоммуникационных технологий (ИКТ) для повышения жизненного уровня социально-незащищённых жителей ПМР. // Республиканская научно-практическая конференция «Роль государства в развитии экономики на современном этапе». – Тирасполь, ПГУ: Ликрис, 2014. – С. 169-174.

9. Саломатина Е. В. О некоторых моделях управления ресурсами. // VIII Международная отраслевая научная конференция «Технологии информационного общества». – М.: МТУСИ, 2014. – С. 90.

10. Саломатина Е. В., Сарьян В.К., Разработка методов эффективного использования ИКТ для социально-незащищенных граждан. // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2015. – № 3(11). – С. 93-100.

11. Саломатина Е. В., Сарьян В. К., Лутохин А. С. Система индивидуализированного управления спасением пациентов e-helf в случае возникновения ЧС природного и техногенного происхождения. // II

Международная конференция «Инжиниринг & Телекоммуникации En&T 2015». – М.: МФТИ, 2015. – С. 277-279.

12. Саломатина Е.В., Назаренко А.П., Сарьян В.К. Способ повышения предсказательного потенциала существующих систем мониторинга и исследование природных ресурсов и промышленных объектов. // II Международная конференция «Инжиниринг & Телекоммуникации En&T 2015». – М.: МФТИ, 2015. – С. 40–41.

13. Саломатина Е. В., Сарьян В. К. Интернет вещей в условиях ограниченности ресурсов // ИТ-Стандарт. – 2015. – Т. 1. № 4-1 (5). – С. 5-8.

14. Саломатина Е. В., Сарьян В. К. Концептуальные аспекты построения ИОТ – системы умного города. // VII Международная конференция «ИТ-стандарт 2016», 2016. – МГУ (МИРЭА). – С. 136-143.

15. Саломатина Е. В. Развитие методов доступа к телекоммуникационным услугам на базе социально-ориентированных систем. // 12-ая Международная научно-техническая конференция «Перспективные технологии в средствах передачи информации - ПТСПИ-2017». – Суздаль. – С. 58-60.

16. Саломатина Е.В., Сарьян В.К. Управление трафиком в информационно-управленческой сети. // IV Международная конференция «Инжиниринг & Телекоммуникации En&T 2017». – М.: МФТИ, 2017. – С. 59–63.

17. Саломатина Е.В., Сарьян В.К. Управление ИТ-сервисами и контентом. Учебное пособие. - Тирасполь: РИО ПГУ, 2015. – 92 с.

Подписано в печать 11.03.2019 г.
Формат 60x84x16. Усл. печ. л. 1.1. Тираж 100 экз. Заказ _____

Издательство
Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.
600000, Владимир, ул. Горького, 87.