

УДК 621.372

МЕТОДЫ ПЕРЕДАЧИ ПОЛИМОДАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

О.О. Басов^а, И.А. Сaitov^а

^а Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации, Орел, 302034, Российская Федерация
Адрес для переписки: oobasov@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 19.01.15, принята к печати 28.01.15

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-2-293-299

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Басов О.О., Сaitov И.А. Методы передачи полимодальной информации // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Том 15. № 2. С. 293–299.

Аннотация. Представлены результаты исследования возможности использования существующих методов передачи информации в полимодальных инфокоммуникационных системах. Анализ существующих способов коммутации и схем мультиплексирования показал, что современные средства телекоммуникаций способны обеспечить доставку полимодальной информации с требуемым качеством к абонентскому терминалу корреспондента. При этом в сетях передачи данных с синхронным статическим временным мультиплексированием требуется значительный расход ресурса пропускной способности, однако в такой инфраструктуре проще обеспечить синхронизацию модальностей. В сетях передачи данных со статическим временным мультиплексированием требуется использование более сложных алгоритмов обеспечения гарантированного качества доставки блоков данных. Однако из-за наличия стохастических задержек блоков данных в таких сетях сложнее обеспечить синхронизацию модальностей при их автономной обработке. В настоящее время имеются объективные предпосылки для реализации сети передачи данных, инвариантной к применяемой технологии передачи. Эта возможность определяется широким (от абонента к абоненту) применением оптических технологий в транспортной инфраструктуре полимодальных инфокоммуникационных систем. При наличии средств согласования режимов функционирования абонентских терминалов и сети передачи данных становится возможным организовать в последней каналы, адаптивно «подбирающие» наиболее эффективную сетевую технологию под текущее распределение объемов и типов модальностей в сообщениях.

Ключевые слова: полимодальная информация, многомодальный интерфейс, сеть передачи данных, инвариантная оптическая транспортная сеть, способ коммутации, схема мультиплексирования, режим переноса, пропускная способность.

METHODS OF POLYMODAL INFORMATION TRANSMISSION

O.O. Basov^a, I.A. Saitov^a

^a Academy of Federal Guard Service of the Russian Federation, Orel, 302034, Russian Federation
Corresponding author: oobasov@mail.ru

Article info

Received 19.01.15, accepted 28.01.15

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-2-293-299

Article in Russian

For citation: Basov O.O., Saitov I.A. Methods of polymodal information transmission. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol.15, no. 2, pp. 293–299. (in Russian)

Abstract. The research results upon the application of the existing information transmission methods in polymodal info communication systems are presented herein. The analysis of the existing commutation ways and multiplexing schemes has revealed that modern means of telecommunication are capable of providing polymodal information delivery with the required quality to the customer correspondent terminal. Under these conditions substantial capacity resource consumption in the data transmission networks with a simultaneous static time multiplexing is required, however, it is easier to achieve the modality synchronization within that kind of an infrastructure. The data networks with a static time multiplexing demand employing more sophisticated supporting algorithms of the guaranteed data blocks delivery quality. However, due to the stochastic data blocks delays modality synchronizing during the off-line processing is more difficult to provide. Nowadays there are objective preconditions for a data networking realization which is invariable to the applied transmission technology. This capability is defined by a wide (person-to-person) application of the optical technologies in the transport infrastructure of the polymodal info communication systems. In case of the availability of the customer terminal and networking functioning matching mode it becomes possible to organize channels in the latter which can adaptively select the most effective networking technology according to the current volume allocation and modality types in the messages.

Keywords: polymodal information, multimodal interface, data network, invariant optical transport network, switching method, multiplexing scheme, transfer mode, capacity.

Введение

В процессе своего развития национальные информационные инфраструктуры развитых стран эволюционировали [1] от узкоспециализированных сетей связи (телеграфных, телефонных и др.) сначала в телекоммуникационные сети, а затем в инфокоммуникационные системы.

В большинстве классических библиографических источников предметной области и руководящих документах отрасли «Связь и телекоммуникации» под результатом функционирования информационной инфраструктуры любого уровня понимается услуга связи и (или) информационная услуга. Однако в последние годы наблюдается тенденция обезличивания отдельных инфокоммуникационных услуг – абонент часто запрашивает один вид сервиса под названием «соединение с сетью». Эта услуга подразумевает возможность получения им доступного или наиболее удобного, по его (абонента) мнению, способа взаимодействия. Понятие «удобство» реализации услуги «соединение с сетью» определяется пользователем в соответствии со своими индивидуальными предпочтениями и физическими ограничениями, а также свойствами окружающей среды, в которой происходит коммуникация. Следовательно, злободневным является рассмотрение процесса взаимодействия абонентов через инфокоммуникационную систему с позиций максимизации удобства традиционной межличностной коммуникации, когда люди общаются друг с другом непосредственно.

Во время традиционной межличностной коммуникации люди почти всегда взаимодействуют многомодально, используя вербальные и невербальные каналы [2]. Анализ существующих многомодальных интерфейсов, их основных характеристик и областей применения, а также результатов общих исследований в области многомодального взаимодействия [3–6] и дизайна интерфейсов [7, 8] позволил сделать вывод о возможности и необходимости максимального приближения процесса взаимодействия абонентов через инфокоммуникационную систему к традиционной межличностной коммуникации. Уже в настоящее время имеются объективные предпосылки для отказа от принципов разделения передаваемой информации на услуги связи и реализации полимодальных инфокоммуникационных систем (ПИКС). В этой связи особый интерес представляет анализ возможности использования в них существующих методов передачи информации.

Условия обеспечения взаимодействия источников полимодальной информации с ресурсом сетей передачи данных

Под ПИКС следует понимать взаимоувязанную совокупность систем обработки и хранения информации, телекоммуникационных сетей, их объединяющих, функционирующих под единым управлением с целью сбора, обработки, хранения, защиты, передачи и распределения, отображения и использования многомодальной информации, учитывающей смысл сообщаемых сообщений, личность абонентов (пользователей), их настроение, физиологическое и психоэмоциональное состояния. Естественно, реализация таких революционных идей невозможна без всесторонних теоретических и экспериментальных исследований.

Первым шагом на пути внедрения предлагаемого подхода является использование абонентских терминалов, реализующих многомодальные архитектуры (рис. 1) [6]. Эти устройства преобразуют информацию от вербальных и невербальных каналов межличностной коммуникации в сигналы различных модальностей. Следующим шагом является определение перечня модальностей, требуемых для коммуникации конкретной паре пользователей в текущих условиях. На этом этапе роль и место сигналов отдельных модальностей, а также требуемая для их передачи полоса пропускания канала связи являются наиболее важными аспектами исследования. Сигналы отдельных модальностей всесторонне анализируются в рамках реализации телекоммуникационных, информационных, перцептивных и интеллектуальных приложений. Сопоставление достижений когнитивной науки с результатами исследований в области инфокоммуникаций свидетельствует о необходимости и возможности перераспределения и согласования между абонентами полимодальной информации от различных сенсорных систем (анализаторов) человека [2].

Очевидно, что новые возможности инфокоммуникационного обслуживания пользователей ПИКС должны быть заложены на этапе проектирования. При синтезе (моделировании, проектировании, оптимизации) ПИКС ее удобно представить в виде двух условно автономных подсистем: совокупности абонентских терминалов (рис. 1) и сети передачи данных (СПД) [9]. Общее модельное понятие «сеть передачи данных» используется для составных физических или логических каналов связи и формирующих их узлов коммутации транспортной сети и сетей доступа. При ориентации на предоставление ПИКС единственной услуги в виде «соединение с сетью» практически важными являются две основные задачи синтеза.

Прямая задача. Имеются сведения об объемах сообщений (необходимом наборе модальностей), которые необходимо передать. Требуется определить объем ресурсов СПД, чтобы обеспечить требуемое качество приема переданной полимодальной информации.

Двойственная задача. Имеются заданные ресурсы СПД. Требуется передать максимальный объем сообщений заданного качества (в том числе с оптимальным выбором модальностей, методов их обработки: объединения/разделения, синхронизации, кодирования).

Сформулированные задачи подразумевают обеспечение взаимодействия в рамках ПИКС источников полимодальной информации с ресурсом СПД. Ряд источников предлагает использовать для решения подобных задач некую универсальную единицу канального ресурса (ЕКР) [10]. Для ПИКС под ЕКР целесообразно понимать ресурс, требуемый для передачи минимального по объему сигнала отдельной модальности:

$$e = \text{НОД}(B_1, \dots, B_J, U_1, \dots, U_K),$$

где НОД – наименьший общий делитель целочисленных значений скоростей выдачи полимодальной информации $B_j, j = 1 \dots J$ и требований к ресурсу пропускной способности $U_k, k = 1 \dots K$, необходимых для передачи такой информации.

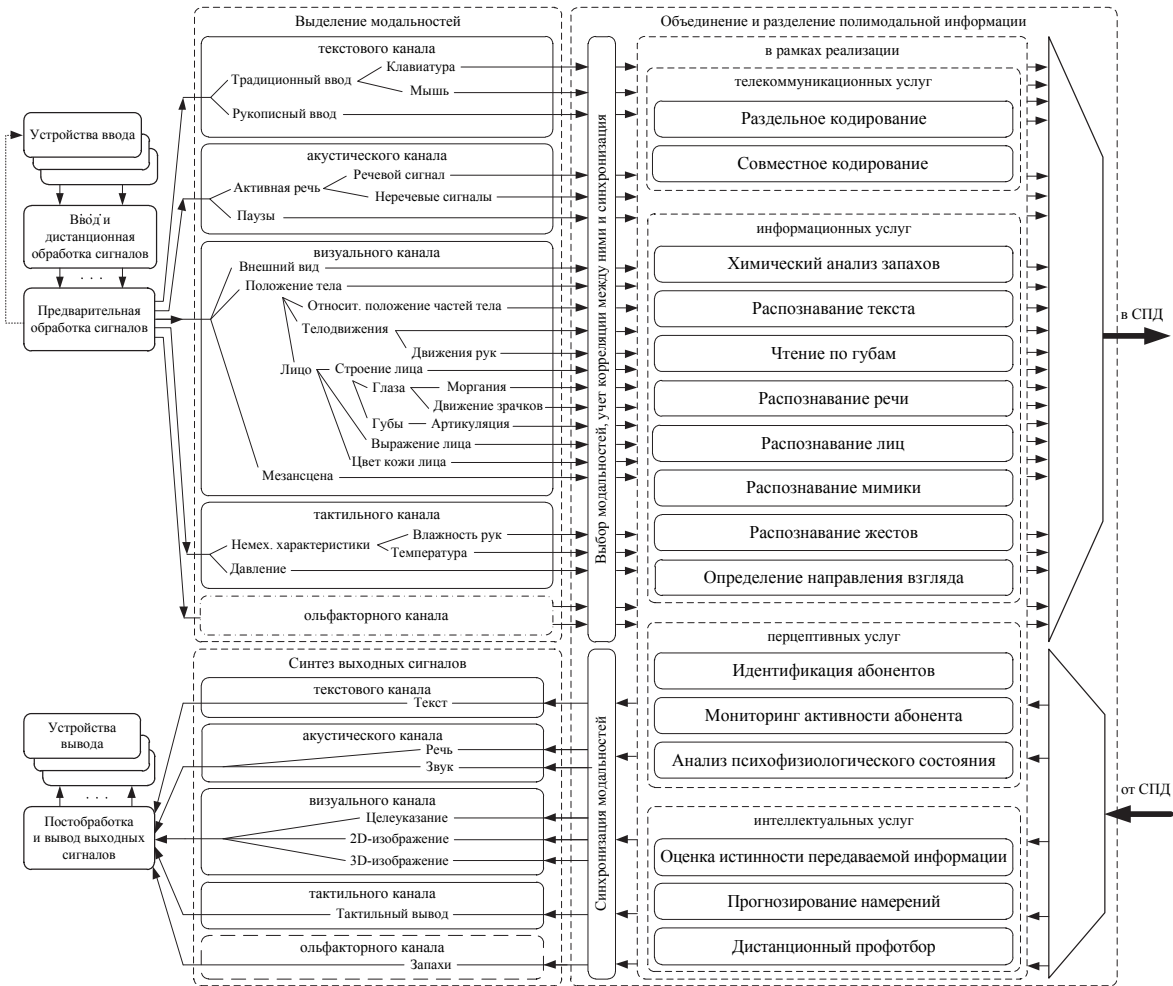


Рис. 1. Архитектура абонентского терминала ПИКС

Очевидно, что величина e будет меньше любого «шага квантования» производительности, используемых в традиционных задачах синтеза телекоммуникационных систем, что свидетельствует об увеличении числа степеней свободы при решении задач синтеза ПИКС. Результаты моделирования канального ресурса на базе ЕКР являются более прецизионными, а решение задач выбора скорости передачи (выдачи) – более точным.

Однако в традиционных инфокоммуникационных системах каждая ЕКР находится в результате нахождения НОД от значений продолжительности кадров уже после применения заданных технологий передачи. Следовательно, для «новых услуг» ПИКС должны применяться «свои» ЕКР, что может оказаться расточительным с точки зрения эффективности использования ресурса СПД.

Методы передачи блоков данных в СПД

Современные СПД могут строиться на разнообразных технологиях передачи, причем транспортные сегменты таких сетей используют, как правило, высокопроизводительные волоконно-оптические линии связи [1, 11–24]. Подавляющее большинство стандартизованных транспортных сетевых технологий уже на этапе разработки подразумевали использование оптической среды распространения и соответствующих методов передачи. Оптические транспортные сети (ОТС) федеральных операторов связи Рос-

сийской Федерации используют в качестве базовых технологий синхронную цифровую иерархию (СЦИ, SDH – Synchronous Digital Hierarchy), оборудование которой реализует коммутацию каналов и синхронное статическое (поканальное) временное мультиплексирование (SyTDM – Synchronous Time Division Multiplexing), и технологию Ethernet, обеспечивающую коммутацию пакетов и статическое временное мультиплексирование (StTDM – Statistical Time Division Multiplexing). Господству синхронной цифровой иерархии способствует комплекс факторов [11], в том числе физико-географические особенности нашей страны.

Существенным недостатком транспортных сетей с СЦИ является ограниченность номиналов (градаций деления) типовых трактов, предоставляемых под нагрузку, и отсутствие динамического регулирования пропускной способности, выделяемой по запросам пользователей в процессе передачи [11, 16, 25]. Разрабатываемые меры [16], направленные на модернизацию и развитие существующих систем передачи СЦИ, носят тактический характер, не устраняя основного недостатка средств статического мультиплексирования. Тем не менее, с точки зрения ПИКС такие СПД имеют и преимущество: из-за постоянства временных соотношений между блоками данных в ходе передачи упрощается решение вопросов синхронизации модальностей [6].

Разработанные к настоящему времени способы коммутации и схемы мультиплексирования, ориентированные ранее на приложения сетей доступа, породили новые методы передачи блоков данных. В настоящее время для транспортирования данных стали применяться средства быстрой коммутации каналов. Форумом ATM (Asynchronous Transfer Mode – асинхронный способ передачи данных) предложен целый ряд методов передачи, основанных на коммутации ячеек постоянной длины в рамках архитектурной модели ATM [26]. Эти технологии предполагают адаптацию нагрузки под формат канального уровня. Широкополосная коммутация пакетов и коммутация блоков при этом подразумевают синхронный режим переноса, а быстрая коммутация пакетов и асинхронное временное разделение каналов – асинхронный. Однако реализация этих методов передачи не гарантирует качества передачи, имеет высокую стоимость.

Коммутация пакетов переменной длины традиционно применяется в СПД для повышения эффективности использования ресурсов пропускной способности [10]. Наметилась тенденция использования этих технологий в ОТС [27–30]. Технология Ethernet, реализующая передачу кадров переменной длины, в последние годы все чаще создает конкуренцию технологии СЦИ в ОТС России [31]. Однако, как показывают исследования [1, 11, 32–34], переход к технологиям StTDM в таких сетях приводит к сложности обеспечения гарантированной своевременности передачи блоков данных. Для передачи блоков данных ПИКС, критичных к задержке, в таких системах должны быть предусмотрены специальные методы и средства управления трафиком, существенно повышающие общую стоимость СПД.

Устранению некоторых недостатков систем с коммутацией пакетов (высокой сложности протоколов обработки пакетов, влияния случайных задержек на качество передачи блоков данных) способствовала разработка мультипротокольной коммутации по временным меткам (MPLS – Multiprotocol Label Switching) [27, 34, 35]. В качестве облика перспективных СПД группой известных специалистов объявлены сети связи следующего поколения (NGN – Next Generation Network) [10, 11, 15, 17, 19, 31, 34] и программно-конфигурируемые сети (SDN – Software Defined Networks). Эти сети в идеале должны иметь транспортную подсистему, инвариантную к типу транспортируемой нагрузки. В современных телекоммуникациях эта инвариантность подразумевает инкапсуляцию кадров различных форматов, поступающих от терминалов, электрическими средствами мультиплексирования, что приводит к сложным технологическим цепочкам доступа к ресурсу СПД. Такой подход, наряду с усложнением и удорожанием аппаратно-программных средств связи из-за высокой интегративности, приводит к снижению технической надежности СПД [36–39].

Вариант послойного представления традиционной мультипротокольной телекоммуникационной системы, в транспортной сети которой в качестве направляющей среды используется оптическое волокно (ОВ), представлен на рис. 2.

Режимы переноса полимодальной информации

Моделирование методов передачи блоков данных в традиционных научных школах часто осуществляется по функциональным признакам послойно. При этом из-за возможности комбинирования оборудования в ОТС (на уровнях эталонной модели взаимодействия открытых систем (ЭМВОС) ниже сетевого) совокупность применяемых способа коммутации и схемы мультиплексирования принято называть термином «режим переноса» [15, 33, 36, 37, 40].

1. Гомогенная ОТС (СЦИ/ОВ) имеет линии передачи SyTDM с ограниченным числом градаций скоростей передачи: 0,155; 0,622; 2,5; 10 и 40 Гбит/с. С точки зрения ПИКС такой «шаг квантования» пропускной способности не способствует адаптации СПД под изменение скорости выдачи полимодальной информации, а задача синтеза такой сети состоит в экстенсивном наборе такого ресурса, который бы обеспечил передачу трафика на «наихудший случай».
2. Электрически инвариантная ОТС (IP/Ethernet/СЦИ/ОВ; ATM/СЦИ/ОВ; IP/MPLS/Ethernet/ОВ или IP/MPLS/ATM/ОВ) подразумевает «электрическую» инкапсуляцию блоков данных в формат кадра

канального уровня. Она имеет эффективность использования пропускной способности, определяемую вариантом инкапсуляции пакетов в кадр, случайную величину сетевой задержки на всем пути доставки и требует мер по ограничению максимальной входящей нагрузки от многомодальных абонентских терминалов [26, 36]. Задача синтеза такой сети состоит в наборе такого ресурса, который бы обеспечил передачу каждого типа трафика (терпимых и критичных к задержкам блоков данных) с учетом увеличения его объема в ходе инкапсуляции. При этом ресурс линий передачи «нарезается» на полосы максимально возможной равной пропускной способности, канальная емкость которых приоритетно предоставляется первому типу трафика, а при наличии оставшегося – второму. Таким образом, в существующих транспортных сетях с «электрическим» мультиплексированием организуется максимальное число каналов равного качества, а для каждого режима переноса разработаны и реализуются соответствующие методы передачи сигналов [13, 14]. Очевидно, что при изменении состава используемых модальностей согласованно с ним должна изменяться производительность соответствующего тракта СПД, но шаг этого изменения в первом случае кратен ступени иерархии СЦИ, а в другом сопряжен с избыточными затратами ресурсов пропускной способности и времени, обусловленными многоступенчатыми актами вложения/извлечения блоков данных.

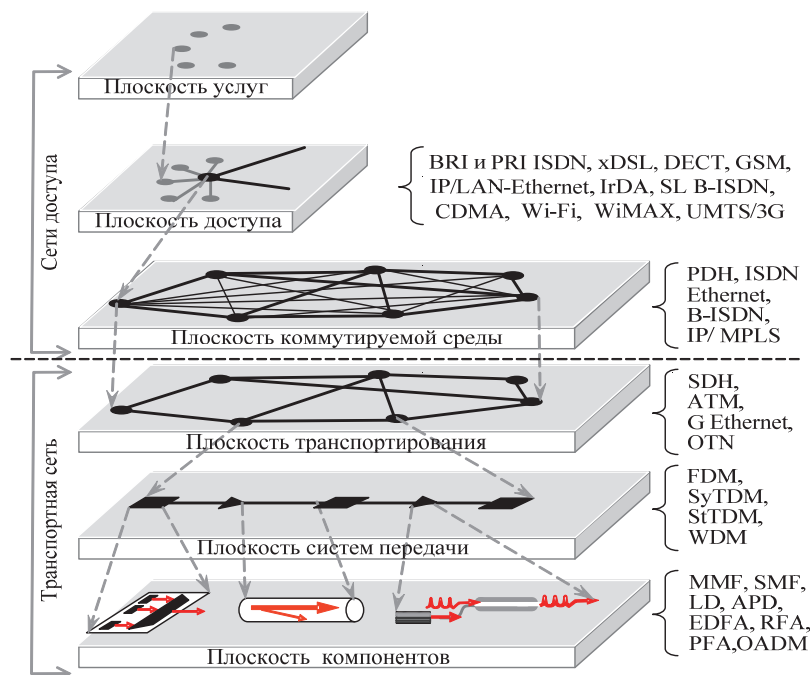


Рис. 2. Послойное представление инфокоммуникационной системы:

BRI – Basic Rate Interface; PRI – Primary Rate Interface; ISDN – Integrated Services Digital Network; DSL – Digital Subscriber Line; DECT – Digital Enhanced Cordless Telecommunication; GSM – Global System Mobile; IP – Internet Protocol; LAN – Local Area Network; IrDA – Infrared Data Association; SL – Selected Line; B-ISDN – Broadband Integrated Services Digital Network; CDMA – Code Division Multiple Access; Wi-Fi – Wireless Fidelity; WiMAX – Worldwide Interoperability for Microwave Access; UMTS – Universal Mobile Telecommunication System; PDH – Plesiochronous Digital Hierarchy; MPLS – Multiprotocol Label Switching; SDH – Synchronous Digital Hierarchy; ATM – Asynchronous Transfer Mode; OTN – Optical Transport Network; FDM – Frequency Division Multiplexing; SyTDM – Synchronous Time Division Multiplexing; StTDM – Statistical Time Division Multiplexing; WDM – Wavelength Division Multiplexing

- Логичным выходом из создавшегося положения становится обеспечение инвариантности ОТС к используемой технологии передачи «на оптическом уровне» вне традиционных принципов деления пропускной способности линий СПД на равные доли (энергии сигналов на равные порции). Такой подход, наряду с упрощением внедрения в ОТС инновационных технологий, позволит расширить возможности использования существующих интегрированных аппаратно-программных средств связи, включающих в себя разнородные средства мультиплексирования, обеспечив передачу примитивов канального уровня ЭМВОС, транспортирующих сведения об активных модальностях в оптической среде без промежуточной «электрической» инкапсуляции. Теоретические основы и принципы построения ОТС связи, инвариантных к технологии передачи, представлены в [1].

Заключение

Анализ методов передачи, использование которых возможно и целесообразно в сетях передачи данных полимодальных инфокоммуникационных систем, позволил сделать целый ряд выводов, существенных с точки зрения настоящего исследования.

1. Самой доступной сегодня для полимодальных инфокоммуникационных систем является электрически инвариантная сеть передачи данных с коммутацией пакетов. В таких системах единица канального ресурса составит значение порядка 64 кбит/с, что обеспечит достаточную чувствительность всей системы к изменению числа активных модальностей. Для моделирования таких сетей передачи данных полимодальных инфокоммуникационных систем может использоваться инструментарий анализа современных мультипротокольных телекоммуникационных сетей, в качестве источников нагрузки которых будут выступать многомодальные абонентские терминалы (рис. 1). Для построения теоретической модели сети передачи данных с коммутацией пакетов необходимо выделить, определить и формально описать ее структурные элементы, охарактеризовать их основное назначение и специфику процессов их функционирования. Основными элементами сетей связи с накоплением являются абонентские терминалы и сети передачи данных: узлы коммутации и связывающие их каналы связи. Существенное влияние на качество синхронизации модальностей при их автономной обработке и передаче соответствующих блоков данных через сеть передачи данных с коммутацией пакетов будет оказывать сетевая задержка.
2. Наличие и случайный характер сетевой задержки свидетельствуют о том, что в сети передачи данных с коммутацией пакетов целесообразно реализовать совместную обработку модальностей в абонентском терминале, а соответствующие блоки данных передавать с использованием механизмов обеспечения гарантированного качества обслуживания.
3. Для полимодальных инфокоммуникационных систем перспективной является реализация в сети передачи данных принципов построения оптических транспортных сетей, инвариантных к технологии передачи. Метод передачи в таких сетях передачи данных будет определяться текущим множеством активных пользователей, составом используемых модальностей в их абонентских терминалах.
4. В настоящее время вместо традиционных гомогенных волоконно-оптических линий связи все чаще реализуются на практике гетерогенные волоконно-оптические линии связи, использующие в различных спектральных каналах оптического волокна разные сетевые технологии. При наличии средств согласования режимов функционирования многомодальных абонентских терминалов и сети передачи данных становится возможным организовать в последней каналы и тракты, адаптивно «подбирающие» наиболее эффективную сетевую технологию (SyTDM или StTDM) под текущее распределение объемов и типов модальностей в сообщениях. Естественно, такой подход обуславливает необходимость оптимизации в дальнейшем целого ряда функциональных характеристик элементов сети для передачи полимодальной информации, что потребует новых теоретических исследований в предметной области.

Литература

1. Сайтов И.А. Основы теории построения защищенных мультипротокольных оптических транспортных сетей телекоммуникационных систем. Орел: Академия ФСО России, 2008. 220 с.
2. Басов О.О., Сайтов И.А. Основные каналы межличностной коммуникации и их проекция на инфокоммуникационные системы // Труды СПИИРАН. 2013. № 7 (30). С. 122–140.
3. Ронжин А.Л., Карпов А.А. Многомодальные интерфейсы: основные принципы и когнитивные аспекты // Труды СПИИРАН. 2006. Т. 1. № 3. С. 300–319.
4. Ронжин А.Л., Карпов А.А., Ли И.В. Речевой и многомодальный интерфейс. М.: Наука, 2006. 173 с.
5. Карпов А.А. Когнитивные исследования ассистивного многомодального интерфейса для бесконтактного человеко-машинного взаимодействия // Информатика и ее применения. 2012. Т. 6. № 2. С. 77–86.
6. Басов О.О., Карпов А.А., Сайтов И.А. Методологические основы синтеза полимодальных инфокоммуникационных систем государственного управления. Орел: Академия ФСО России, 2015. 277 с.
7. Сергеев С.Ф., Падерно П.И., Назаренко Н.А. Введение в проектирование интеллектуальных интерфейсов. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2011. 108 с.
8. Ронжин А.Л., Карпов А.А. Проектирование интерактивных приложений с многомодальным интерфейсом // Доклады ТУСУР. 2010. № 1–1. С. 124–127.
9. Басов О.О., Сайтов И.А. Качество функционирования и эффективность полимодальных инфокоммуникационных систем // Труды СПИИРАН. 2014. №1 (32). С. 152–170.
10. Степанов С.Н. Основы телетрафика мультисервисных сетей. М.: Эко-Трендз, 2010. 392 с.
11. Бакланов И.Г. NG SDN: практический взгляд на новую революцию в системах передачи. М.: PR-GROUP, 2006. 678 с.
12. Слепов Н.Н. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи. М.: Эко-Трендз, 2000. 468 с.
13. Иванов А.Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения. М.: Компания Сайрус Системс, 1999. 663 с.
14. Алексеев Е.Б., Гордиенко В.Н., Крухмалев В.В. и др. Проектирование и техническая эксплуатация цифровых телекоммуникационных систем и сетей. М.: Горячая линия-Телеком, 2008. 392 с.
15. Кучерявый А.Е., Цуприков А.Л. Сети связи следующего поколения. М.: ФГУП ЦНИИС, 2006. 278 с.

16. Докучаев В.Л., Серебренников В.К. Совершенствование транспортных сетей SDH // *Электросвязь*. 2003. № 9. С. 5–9.
17. Меккель А.М. Оптическая транспортная сеть и NGN // *Lightwave Russian Edition*. 2006. № 2. С. 18–22.
18. Qiao C., Yoo M. Choices, features and issues in optical burst switching // *Optical Networking Magazine*. 2000. V.1. N 2. P. 36–44.
19. Yoo M., Qiao C., Dixit S. QoS performance of optical burst switching in IP-over-WDM networks // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2000. V. 18. N 10. P. 2062–2071. doi: 10.1109/49.887925
20. Shinohara M., Yorinaga T., Kenji I., Itoh H., Itoh A., Yamada K. Extended model of ATOMIS 16: multiservice switching system // *NEC Research and Development*. 2001. V. 42. N 2. P. 143–146.
21. Duser M., Bayvel P. Analysis of a dynamically wavelength-routed optical burst switched network architecture // *Journal of Lightwave Technology*. 2002. V. 20. N 4. P. 574–585. doi: 10.1109/50.996576
22. Chen Y., Qiao C., Yu X. Optical burst switching: a new area in optical networking research // *IEEE Network*. 2004. V. 18. N 3. P. 16–23. doi: 10.1109/MNET.2004.1301018
23. Azodolmolky S., Klinkowski M., Marin E., Careglio D., Pareta J.S., Tomkos I. A survey on physical layer impairments aware routing and wavelength assignment algorithms in optical networks // *Computer Networks*. 2009. V. 53. N 7. P. 926–944. doi: 10.1016/j.comnet.2008.11.014
24. Angelou M. Cross-Layer Optimization for Optical Networks. PhD Dissertation. Universitat Politecnica de Catalunya, 2012. 152 p.
25. Саитов И.А., Мясин Н.И. О формировании полностью оптической транспортной сети телекоммуникационных систем специального назначения // *Труды 31-й научно-практической конференции РВКУС*. Рязань, 2006. С.17–20.
26. Лохмотко В.В. Модели и методы оптимизации структуры телекоммуникационных сетей. Дисс. ... д-ра техн. наук. СПб.: СПбГУТ, 1998. 301 с.
27. Dotaro E., Vigoureux M., Papadimitriou D. Multi-region networks: generalized multi-protocol label switching (GMPLS) as enabler for vertical integration // *Proc. IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2004)*. Dallas, USA, 2004. P. 374–379.
28. Malicksco G., Fodor G., Pioro M. Link capacity dimensioning and path optimization for networks supporting elastic services // *IEEE Int. Conf. on Communications*. NY, 2002. V. 4. P. 2304–2311.
29. Кобаяши К. Тенденции развития волоконно-оптической связи: от высокой емкости к гибкости оптических сетей // *Lightwave Russian Edition*. 2003. N 1. С. 5.
30. Пасечников И.И. Методология анализа и синтеза предельно нагруженных информационных сетей. М.: Машиностроение, 2004. 216 с.
31. Awduche D.O. MPLS and Traffic Engineering in IP Networks // *IEEE Communications Magazine*. 1999. V. 37. N 12. P. 42–47. doi: 10.1109/35.809383
32. Саитов И.А., Миронов А.Е. Проблемы применения современных технологий передачи и распределения информации в сетях связи специального назначения // *Вестник СГК*. 2006. С. 18–20.
33. Бакланов И.Г. Многопараметричность и ренессанс аналогового мышления. М.: Метротек, 2004. 136 с.
34. Гольдштейн А.Б., Гольдштейн Б.С. Технологии и протоколы MPLS. СПб.: БХВ, 2005. 304 с.
35. Rosen E., Viswanathan A., Callon R. RFC 3031 Multiprotocol label switching architecture. 2001. 144 p.
36. Назаров А.Н. Модели и методы расчета структурно-сетевых параметров сетей АТМ. М.: Горячая линия – Телеком, 2002. 256 с.
37. Мардер Н.С. Современные телекоммуникации. М.: ИРИАС, 2006. 384 с.
38. Яновский Г.Г., Руин А.А. Транспортные сети следующего поколения // *Вестник связи*. 2004. № 2. С. 68–70.
39. Барри Д.Д. T-MPLS и PBT/PBB-TE – транспорт пакетов на основе соединений // *Lightwave Russian Edition*. 2008. № 1. С. 12–14.
40. Руководящий технический материал по качеству услуг и качеству обслуживания на телефонных сетях связи общего пользования и сетях связи с подвижными объектами. СПб.: ЛОНИИС, 2002. 57 с.

Басов Олег Олегович

– кандидат технических наук, докторант, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации, Орел, 302034, Российская Федерация, oobasov@mail.ru

Саитов Игорь Акрамович

– доктор технических наук, профессор, начальник факультета, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации, Орел, 302034, Российская Федерация, akramovish@mail.ru

Oleg O. Basov

– PhD, doctoral candidate, Academy of Federal Guard Service of the Russian Federation, Orel, 302034, Russian Federation, oobasov@mail.ru

Igor A. Saitov

– D.Sc., Professor, Dean, Academy of Federal Guard Service of the Russian Federation, Orel, 302034, Russian Federation, akramovish@mail.ru