

## РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ СИНТЕЗА ТОПОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

*А.А. Сорокин, П.С. Резников*

В работе показано, что одна из проблем систем телекоммуникаций — это неопределенность отношения элемента к определенной подсистеме сети передачи информации, элемент может использоваться как абонентское оборудование и как подсистема управления. В результате затрудняется внедрение ad hoc сетей в структуру систем мобильной связи. Для устранения проблемы разработан метод описания структуры системы инфокоммуникаций. Метод основан на представлении системы как единой логической структуры. Основа структуры — это виртуальные узлы. Совокупность виртуальных узлов образует виртуальную сеть. Пропускная способность виртуальной сети изменяется по вероятностным законам. Вероятностные законы определяются на основе статистики посещения виртуального узла физическими узлами. Область использования для систем связи заключается в повышении эффективности управления за счет прогнозирования альтернативных маршрутов передачи информации и синтеза систем связи различных стандартов. Результаты можно использовать для исследования взаимодействий социальных и экономических систем региона. Для демонстрации результатов проведен эксперимент по прогнозированию количества физических узлов в заданном виртуальном узле. По полученным данным рассчитана вероятность появления в виртуальном узле физических объектов. Результаты расчета позволяют построить карту посещаемости территории физическими узлами и рассчитать маршруты передачи трафика между виртуальными узлами.

*Ключевые слова:* система, анализ, инфокоммуникации, топология, структура, синтез, информация, управление, обработка, сеть.

### Введение

Системы инфокоммуникаций интегрируются в разные виды деятельности человека. Область использования систем инфокоммуникаций достаточно широка, начиная от обеспечения голосовой связи и досуга и заканчивая участием в процессах управления транснациональными корпорациями. Учитывая факторы взаимного влияния социума и систем передачи и обработки информации, порождаются новые рыночные ниши и технические решения. Одна из общесистемных черт сетей инфокоммуникаций — взаимная интеграция (или конвергенция) различных программных и аппаратных средств передачи и обработки информации. В результате конвергенции технических и программных решений разрабатываются новые методы построения телекоммуникационных систем. Пример подобной конвергенции — создание класса ad hoc сетей. Согласно работам [1–4] термин ad hoc сети означает самоорганизующиеся распределенные системы передачи и обработки информации (СРСПОИ). В состав класса ad hoc сетей входят MANET (Mobile ad hoc networks) [1], VANET (Vehicular ad hoc networks) [2], Mesh и сенсорные сети [3, 4]. В результате взаимодействия структурных элементов подобных систем происходит синтез необходимых топологических структур в зависимости от внешних условий. Функционирование СРСПОИ происходит как без подключения к системам связи общего пользования, так и совместно с ними при помощи взаимодействия через шлюзы. Область использования СРСПОИ разнообразна — это обмен информацией между неболь-

шими группами подвижных и статичных пользователей (MANET сети); обмен служебной информацией между подвижными объектами с целью автоматизации управления транспортными потоками (VANET сети); быстро-развертываемые системы доступа к сети Интернет (Mesh сети); системы сбора данных с технологических объектов (сенсорные сети).

Широкое применение самоорганизующихся систем передачи и обработки информации сдерживаются относительно низким качеством передачи трафика и сложностями взаимодействия с системами связи общего пользования, например сетями мобильной связи [1–5]. Исследование способов повышения эффективности передачи трафика в системах связи с изменяемой топологией показали, что первопричиной ограничений являются принципы формального представления топологии систем данного класса, так как данные принципы применяются во время разработки протоколов, работа которых влияет на качество передачи информации [5, 6]. Следовательно, необходимо совершенствование формального аппарата, на основе которого разрабатываются протоколы управления самоорганизующихся систем передачи и обработки информации. Учитывая тенденцию на интеграцию структур ССПОИ с сетями связи общего пользования формальный аппарат должен предусматривать структурно-параметрический синтез двух классов систем и позволять прогнозировать развитие системы с учетом различных внешних воздействий.

Цель работы: разработка и программная реализация математического обеспечения для описания синтеза топологических структур систем инфокоммуникаций.

Статья состоит из следующих разделов. В первом разделе рассмотрены общие принципы формирования структур инфокоммуникационных систем, проанализированы тенденции их развития. Во втором разделе показаны ограничения современных моделей и методы описания топологии систем инфокоммуникаций. В третьем разделе описан новый метод формирования топологии сети инфокоммуникационной системы. В четвертом разделе описана реализация алгоритмического обеспечения, которая позволяет сформировать топологическую структуру из узлов различной степени подвижности. В заключении приводятся в обобщенном виде основные результаты работы.

## **1. Анализ структурных элементов инфокоммуникационных систем**

Тенденции развития современного рынка инфокоммуникаций показывают эффект взаимного влияния социально-экономических и технических составляющих. К числу подобных составляющих можно отнести: спрос пользователей и предложения создателей контента, разработчиков программного обеспечения, различные виды абонентского оборудования, уровень развития сетей операторов связи [1, 3]. Примером подобного влияния стало появление мобильных устройств (ноутбуков и коммуникаторов) и развитие систем мобильной связи второго и четвертого поколений. Мобильные устройства вызвали потребность в доступе с них к сети Internet, что привело к интенсивному внедрению сетей мобильной связи третьего поколения с тарифными планами и средствами доступа к сети Internet. Доступные тарифные планы увеличили спрос и предложение смартфонов и планшетных компьютеров, создание Internet площадок для установки программ (Apple Store, Google play и др.), социальных сетей, видеохостингов. Возможностей сетей третьего поколения стало недостаточно. Операторы стали внедрять сети четвертого по-

коления, начались изыскания в области систем связи новых поколений. Таким образом, на развитие оператора связи оказывает влияние поведение абонентов сети, а новые возможности сети порождают новые потребности у пользователей сети.

Принципы функционирования системы инфокоммуникаций описаны в концептуальных моделях. К числу подобных моделей относятся: модель взаимодействия открытых систем (OSI), модель стека протоколов TCP/IP, четырехуровневая модель управления сетью TMN (Telecommunication Management Network) [7]. Модели TCP/IP и OSI рассматривают систему с позиции решения задач передачи трафика. Модель TMN ориентирована менеджмент в управлении оператором связи, но не содержит, в явном виде, описание средств построения обратных связей между прогнозированием спроса пользователей сети и принятием решений в области управления сетью.

Опыт управления инфокоммуникационными бизнес-процессами показывает, что успех проекта зависит от правильного таргетинга абонентов. Таргетинг, согласно [8], — это выделение целевой аудитории по заданным критериям для демонстрации предложений. В рамках исследований под таргетингом абонентов понимается, выделение целевой группы, в зависимости от времени суток, места нахождения, социального статуса для предоставления желаемой инфокоммуникационной услуги. Поддержка и принятие решений по управлению бизнес-процессом в области инфокоммуникаций должна опираться на систему четко выстроенных обратных связей. Обратные связи должны передавать информацию о особенностях распределения абонентской базы сети инфокоммуникаций.

С учетом работы [9] систему инфокоммуникаций можно представить в виде совокупности множеств структурных элементов четырех подсистем:

- множества элементов абонентского оборудования —  $\{Sb_\alpha\}$ , где  $\alpha \in [0, A]: A \rightarrow \infty$  число элементов множества абонентского оборудования,
- множества элементов подсистемы доступа —  $\{Ap_\beta\}$ , где  $\beta \in [0, B]: B \neq \infty$  число элементов множества подсистемы доступа,
- множества элементов подсистемы транспортной сети —  $\{Tn_\gamma\}$ , где  $\gamma \in [0, \Gamma]: \Gamma \neq \infty$  число элементов множества подсистемы транспортной сети,
- множества элементов подсистемы управления —  $\{M_\phi\}$ , где  $\phi \in [0, \Phi]: \Phi \neq \infty$  число элементов множества подсистемы управления.

Объединение множеств  $\{Sb_\alpha\}$ ,  $\{Ap_\beta\}$ ,  $\{Tn_\gamma\}$ ,  $\{M_\phi\}$  образует топологическую структуру инфокоммуникационной системы:

$$IS \supseteq \{Sb_\alpha\} \cup \{Ap_\beta\} \cup \{Tn_\gamma\} \cup \{M_\phi\}. \quad (1)$$

Обзор работ [1–3, 9, 10] и практический опыт эксплуатации систем инфокоммуникаций показывает, что большая часть оборудования всех подсистем — это программно-аппаратные комплексы. Принципы работы аппаратной части оборудования различных подсистем идентичны. Различия оборудования, как правило, заключаются в функциональных особенностях отдельных модулей. Например, мощности передающего оборудования или объемом встроенной памяти. Основные отличия оборудования различных подсистем наблюдаются в области программного обеспечения (ПО). В зависимости от вида ПО устройство выполняет разные функции: обрабатывает приложения пользователей, решает задачи поиска маршрутов передачи информации. Принципы функционирования ПО разного оборудования могут совпадать, так как реализованы на основе идентичных операционных систем (ОС), например на основе Unix подобных ОС (Linux, Free-

BSD) или Windows ОС. Общий признак систем инфокоммуникаций — возможность использовать один программно-аппаратный комплекс в разных подсистемах. Подобная возможность позволяет оборудованию одной подсистемы решать задачи других подсистем, в зависимости от состояния сети. В результате нарушается распределение функций между подсистемами абонентского оборудования, уровня доступа, транспортной сети и управления. В рамках проводимых исследований подобное явление целесообразно назвать эффектом перераспределения функциональных задач. Эффект перераспределения функциональных задач оборудования наблюдается в сети Internet. В сети Internet устройство может одновременно выполнять функции сервера (подсистема управления), рабочей станции (подсистема абонентского оборудования) и маршрутизатора (подсистема управления и транспортной сети). Практические примеры реализации — это сети peer-to-peer, различные виды VPN (Virtual Private Network).

Явное распределение функций наблюдалось в телефонных сетях общего пользования, системах сотовой связи первого и второго поколений. Явное распределение функций между подсистемами инфокоммуникационной сети можно описать соотношением вида:

$$Sb \Leftrightarrow \{F_{Sb}\} \wedge Ap \Leftrightarrow \{F_{Ap}\} \wedge Tn \Leftrightarrow \{F_{Tn}\} \wedge M \Leftrightarrow \{F_M\}, \quad (2)$$

где  $\{F_{Sb}\} \wedge \{F_{Ap}\} \wedge \{F_{Tn}\} \wedge \{F_M\}$  — множество функциональных задач, которые решают элементы подсистем абонентского оборудования, доступа, транспортной сети, управления. В сети Internet перераспределение функциональности оборудования наблюдается со стороны подсистемы доступа, что можно описать соотношением вида:

$$Sb = \{F_{Sb}\} \cup \{f_M\} : \{f_M\} \subset \{F_M\}, \quad (3)$$

где  $\{f_M\}$  — это часть функций оборудования подсистемы управления. Обзор ряда зарубежных [1, 2, 11] и отечественных [5, 12] работ показывает, что в самоорганизующихся системах передачи и обработки информации, перераспределение функциональности представляется в виде:

$$Sb = \{F_{Sb}\} \cup \{f_{Ap}\} \cup \{f_{Tn}\} \cup \{f_M\} : \{f_{Ap}\} \subset \{F_{Ap}\} \wedge \{f_{Tn}\} \subset \{F_{Tn}\} \wedge \{f_M\} \subset \{F_M\}, \quad (4)$$

где  $\{f_{Ap}\} \wedge \{f_{Tn}\}$  — это часть функций оборудования подсистемы доступа и транспортной сети.

Обобщение соотношений (2–4) показывает процесс эволюции принципов построения и управления сетями инфокоммуникаций, а функционал (1) — принцип объединения задач управления по передаче информации в телекоммуникационной системе. Из теории управления известно, что для решения оптимизационных задач применяются модели объекта. «Классические» модели сетей связи развивались на основе принципа описанного функционалом (2). Для современных сетей, сформированных с учетом функционала (3), классические модели модернизировались для решения частных задач. Основная проблема общей методологии моделирования системы телекоммуникаций, сформированной с учетом функционалов (3 и 4) — неопределенность отношения элемента к определенной подсистеме сети передачи информации, что приводит к увеличению затрат времени на прогнозирование развития системы. Для устранения проблемы необходим поиск нового метода описания структуры сети. Новый метод должен описывать топологию в виде единой структуры с узлами различной степени подвижности и типом управления. Дополнительно метод должен показывать взаимодействие с социальными и экономическими процессами, которые затрагивают абонентов.

## 2. Анализ методов формального описания топологической структуры

Методы формального описания структур инфокоммуникационных систем базируются на теории графов, согласно данной теории, сеть представляется в виде графа [9]:

$$G = (V, E), \quad (5)$$

где  $V$  — множество вершин  $\{v_i\}: i \in [2, I]: I \rightarrow \infty$ , различное оборудование связи: абонентские терминалы, точки доступа, базовые станции, серверы, маршрутизаторы, коммутаторы и др. оборудование, которое создает поток информационных данных или канализирует его.  $E$  — множество ребер графа  $\{e_j\}: j \in [1, \Psi]: \Psi \rightarrow \infty$  — кабельные или беспроводные каналы связи. При этом,  $\forall v_i \wedge \forall e_j \exists M$ , где  $M$  — вес вершины или ребра графа сети, которое имеет численное значение. Данное значение описывает параметры элемента сети, если  $M = 0 \vee \infty$ , значит произошла аварийная ситуация или между узлами отсутствует канал связи (в некоторых отдельных случаях  $M = 0$ , означает, что вершина «замкнута на себя», что изначально оговаривается во время использования модели). При помощи теории графов описаны системы мобильной и проводной связи, системы космической связи, различные классы самоорганизующихся систем передачи и обработки информации. Для каждого класса систем разработаны модели. Различия моделей обусловлены особенностями топологической структуры системы. Ad hoc сети описываются моделями, основанными на теории случайных графов [6]. Системы мобильной связи описываются разновидностями классической графовой модели, которые дополняются методами теории вероятности [11]. Часто для одного класса систем, в зависимости от вида моделируемой подсистемы, используются различные виды моделей. Например, для систем сотовой связи для описания топологической структуры элементов множеств  $\{Ap_\beta\}$ ,  $\{Tn_\gamma\}$  и  $\{M_\phi\}$  используются модели, основанные на классических методах теории графов, учитывающих вероятности отказа оборудования, а описание подсистемы  $\{Sb_\alpha\}$  выполняют модели подвижности абонентов [11, 13–17].

Модели подвижности подсистемы абонентского оборудования  $\{Sb_\alpha\}$  разделены на два класса, класс для описания подвижности групп абонентов и класс для описания индивидуальной подвижности абонента. Описание групповой подвижности производится моделями: «Потока» (Fluid Flow Model); «Распространения» (Diffusion Model); «Гравитационной» (Gravity Model); «Перемещения абонентов по городу» (City Area Model); и др. [11]. Описание индивидуального перемещения абонента производится моделями «Случайной прогулки» (Random Walk Model) [11] и «Случайного перемещения» (Random way point mobility model) [13], а также моделями, представленными в работах [14–17], которые направлены на прогнозирование перемещения абонента внутри сети мобильной связи. Модели групповой подвижности применяются для прогнозирования нагрузки в различных местах зоны обслуживания сети. Перераспределение нагрузки в сети происходит из-за перемещения абонентов. Модели описания индивидуальной подвижности ориентированы на решение задач «передачи» абонента между точками доступа или базовыми станциями [11], описывают поведения абонентов во время установления «peer-to-peer» связей в ad hoc сетях [13] или прогнозируют последовательность сот по которым будет перемещаться абонент [14–17].

Направленность на решение задач, связанных исключительно с прогнозированием перемещения отдельного абонента или группы абонентов по зоне обслуживания инфокоммуникационной системы, является обобщенным ограничением применения множества проанализированных моделей. Единой методологии, которая позволяет изучать и систему инфокоммуникаций и межструктурные взаимосвязи с другими системами региона, в проанализированных моделях, не выявлено. Важность выявления и формализация межструктурных взаимосвязей инфокоммуникационной системы с другими системами региона обусловлена тем, что инфокоммуникации являются «нервной» системой ряда экономических и социальных процессов.

### 3. Разработка метода описания системы инфокоммуникаций для реализации алгоритмического обеспечения синтеза топологических структур

Основываясь на результатах исследований моделей топологических структур инфокоммуникационных систем, предлагается метод, основанный на использовании понятия виртуального сетевого узла. Метод заключается в разделении земной поверхности на участки  $s_i$  определенного размера. Участок имеет форму прямоугольника либо правильного многоугольника. В рамках описываемых исследований выбран участок прямоугольной формы. Совокупность прямоугольников  $\{s_i\}$ , где  $i$  — это номер элемента, образует сеть. В каждом прямоугольнике, в течение дискретного момента времени  $\Delta T = const$ , находится определенное множество сетевых узлов  $\{v_j\}$ ,  $j$  — это номер:

$$\{v_j\} \subset s_i. \quad (6)$$

В результате суммы  $\Delta T$  образует условный период повторения состояния виртуального узла —  $T$ :

$$T = const: \sum_n \Delta T_n = T: n \neq \infty \wedge n \in \mathbb{N}, \quad (7)$$

где  $n$  — порядковый номер  $\Delta T$ ,  $n \in \mathbb{N}$ , означает, что  $n$  — относится к множеству натуральных чисел. На момент проведения исследований полагается, что  $T = 88400$  секунд (1 сутки). Считается что,  $\forall \Delta T$  между каждой парой узлов множества  $\{v_j\}$ , существует множество каналов  $\{e_{jLINE}\}$  передачи данных. Топология сети внутри  $s_i$  стремится к связанности по принципу каждый с каждым. С учетом выражения (6), объединение множества  $\{v_j\}$  и  $\{e_{jLINE}\}$  образует виртуальный узел  $V_{Ei}$ :

$$V_{Ei} = [\{v_j\} \cup \{e_{jLINE}\} \subset s_i]. \quad (8)$$

Совокупность  $V_{Ei}$ , для всей поверхности и  $\forall \Delta T$ , образует множество виртуальных узлов  $\{V_{Ei}\}$ . Аналогично обычному сетевому узлу, одной из основных характеристик виртуального узла является пропускная способность —  $u_i$ . Изменение пропускной способности узла  $V_{Ei}$ , в течение  $T$  — дискретная функция  $U_i$ . Значение функции  $U_i$  зависит от состава узла  $V_{Ei}$  в моменты времени  $\Delta T$ :

$$U_i = f(V_{Ei}, \Delta T). \quad (9)$$

Обобщая выражения (8) и (9) можно сделать вывод, что зона обслуживания сети  $\forall \Delta T$  представляет поверхность  $S$ , покрытую множеством виртуальных узлов  $\{V_{Ei}\}$ .

Каждому элементу множества  $\{V_{E_i}\}$ , соответствует элемент множества  $\{u_i\}$  — пропускные способности виртуальных узлов:

$$\forall \Delta T \exists [\{V_{E_i}\} \leftrightarrow \{u_i\}] \subset S. \quad (10)$$

$\forall \Delta T$  соотношение (10), на примере девяти виртуальных узлов показано на рис. 1.

Передача информации между виртуальными узлами сети осуществляется взаимодействием интерфейсов отдельных элементов  $V_{E_i}$  с интерфейсами элементов соседних  $V_{E_{i+1}}$ . Прогноз значений зависимости (9) реализуется сбором и обработкой текущей и ретроспективной информации о статистике посещения физическими узлами территории  $s_i$ . Точность прогноза корректируется накоплением статистики посещения территории виртуального узла физическими узлами. Прогноз может учитывать информацию о дополнительных воздействиях внешней социальной, экономической и экологической среды, которая влияет на посещаемость территории виртуального узла.

$\forall \Delta T \exists$

$V_{E1}$	$s_1$	$V_{E2}$	$s_2$	$V_{E3}$	$s_3$
	$u_1$		$u_2$		$u_3$
$V_{E4}$	$s_4$	$V_{E5}$	$s_5$	$V_{E6}$	$s_6$
	$u_4$		$u_5$		$u_6$
$V_{E7}$	$s_7$	$V_{E8}$	$s_8$	$V_{E9}$	$s_9$
	$u_7$		$u_8$		$u_9$

**Рис. 1.** Описание совокупности виртуальных узлов  $\forall \Delta T$

Формирование и обработка базы статистических данных (БД) происходит поэтапно:

1. Предварительный мониторинг сети для накопления статистики посещения территории виртуальных узлов физическими (сетевыми) узлами разной степени подвижности. В результате выполнения операции накапливается база данных состояния виртуального узла. Для достоверного прогноза объем выборки базы данных  $\nu_{Db}$  должен быть не ниже определенного значения  $\nu_{Db\min}$ , на формирование которой затрачивается определенный интервал времени  $\tau$  значение которого должно быть не менее  $\tau_{Db\min}$  (интервал времени необходимого для формирования  $\nu_{Db\min}$ ). Длительность  $\tau_{Db\min}$  зависит от стабильности повторяемости количества узлов в зоне развертывания сети:

$$\nu_{Db} \geq \nu_{Db\min} : \tau \geq \tau_{Db\min}. \quad (11)$$

2. Определение вероятности, того, что количество сетевых узлов  $\{v_j\}$  будет не менее  $\zeta$  в момент  $\Delta T_n$ , который наступает с заданной периодичностью  $T$ .
3. С учетом количества узлов  $V_{E_i}$ , выражения (9) составляются карты (топологии) пропускных способностей различных виртуальных узлов для всех  $\Delta T$ .

4. На основе полученной топологии формируется матрицы  $[M_n]$  состояния зоны обслуживания  $\forall \Delta T$ .
5. При помощи матриц  $[M_n]$  определяются параметры для управления сетью: маршруты передачи трафика между абонентскими терминалами без участия сети оператора, собирается информация о состоянии зоны покрытия систем мобильной связи и др.
6. Корректировка БД о пропускных способностях  $V_{E_i}$  и оптимизация длительности  $T$  по критерию повторяемости пропускной способности виртуальных узлов.

Фактически условие (11) означает ограничение используемого формального метода при описании топологии сетей инфокоммуникаций и то, что для работы модели необходим первоначальный анализ повторяемости количества физических узлов на территории виртуального узла за некоторый промежуток времени. Как следствие, подобная модель, в представленном виде, не подходит для описания классических ad hoc сетей, развертывание которых происходит спонтанно, а статистика перемещения узлов, по области развертывания, не сформирована.

Проведение экспериментов по мониторингу наличия абонентов показало, что в отдельные  $\Delta T$  число элементов множества  $\{v_j\}$  (физических узлов) равно нулю. Следовательно, пропускная способность виртуального узла  $V_{E_i}$ , становилась равной нулю. Для выполнения наличия минимальной пропускной способности:

$$\forall \Delta T : U_{i \min} \neq 0, \quad (12)$$

необходимо, чтобы в виртуальном узле  $V_{E_i}$  находился хотя бы один статический узел  $\omega_{vs}$ , который может выполнять функцию контроллера. Контроллер, в соответствии с номером  $\Delta T$  производит рассылку информации о настройках узла  $V_{E_i}$ , вновь прибывшим физическим узлам. Совокупность  $\omega_{vs}$  образует множество узлов-контроллеров  $\{\omega_{vs}\}$ . Узлы контроллеры связаны отдельными каналами связи  $e_\omega$ . При этом  $e_\omega \subset \{E_\omega\}$ , где  $\{E_\omega\}$  — множество каналов связи между узлами контроллерами. Множество узлов-контроллеров  $\{\omega_{vs}\}$ , соединенных каналами связи  $\{e_\omega\}$  образуют виртуальный узел  $\Omega_E$  более высокого уровня иерархии и т.д.:

$$\{\omega_{vs}\} \cup \{e_\omega\} \subset \Omega_E. \quad (13)$$

В результате виртуальная топология сети получает свойства иерархичности и самоподобия. В зависимости от технических особенностей физических узлов, входящих в состав виртуального узла, роль контроллеров может выполнять оборудование: аналогичное оборудованию подсистем доступа беспроводных сетей передачи данных, систем мобильной связи 2-го и последующих поколений, сетей спутниковой связи. Расположение подобного оборудования реализуется на вышках (зданиях), аэроплатформах, искусственных спутниках земли. Обобщенно процесс моделирования топологии сети реализуется при помощи представления в виде многослойного графа, состоящего из множества виртуальных узлов различных уровней иерархии. Для случая когда, виртуальные узлы не обладают общей границей, передача информации между ними осуществляется по маршруту, сформированному из промежуточных виртуальных узлов.

Таким образом, основа метода формирования топологии сети заключается в получении системы связи с единой логической структурой. В состав структуры входят физические узлы с различной подвижностью и пропускной способностью. При помощи

функционалов (6–10) прогнозируется пропускная способность сети из виртуальных узлов. Виртуальные узлы образуются за счет нахождения на определенной территории физических узлов. Необходимым условием применимости предложенного метода является наличие накопленной базы данных по статистке перемещения узлов в зоне обслуживания сети, что описывается выражением (11). Условием достаточности работоспособности, является выражение (13), которое требует наличия узлов более высокого уровня иерархии, которые выполняют функцию контроллера и при необходимости обеспечивают минимальную пропускную способность узлов более низкого ранга.

В целом область использования разработанной модели распространяется на различные инфокоммуникационные системы сети сотовой связи, проводные и беспроводные сети передачи данных, распределенные вычислительные комплексы и системы. Подобная широкая применимость метода достигается за счет представления топологии сети не в виде отдельных сегментированных структур, а в виде синтезированной виртуальной топологии. В подобной виртуальной топологии пространственные изменения положения элементов в реальной сети представляются в виде изменения пропускной способности неподвижных виртуальных узлов.

Обобщенно отличие предложенного метода описания системы инфокоммуникаций от методов и моделей, представленных в работах [6, 13–17], а также моделях, описывающих индивидуальную подвижность абонентов в работе [11], заключается в отсутствии необходимости мониторинга и непрерывного прогнозирования перемещения каждого узла (абонента). Процесс мониторинга и прогнозирования индивидуального перемещения абонентов замещается накоплением, обработкой и систематизацией ретроспективной информации о посещаемости определенных участков зоны покрытия сети (виртуальных узлов), что сокращает объем вычислительных ресурсов. Отличие от моделей, описывающих групповую подвижность абонентов, представленных в [11], заключается в представлении зоны обслуживания сети в виде покрытия из конечного множества элементов определенной формы (виртуальных узлов) меньшего размера, в сравнении с размером улиц или районов. Подобное представление позволяет более точно определять и прогнозировать состояние сети в заданной зоне обслуживания.

Учитывая, что начальным элементом иерархии является мобильные устройства пользователей, то сбор и обработка информации, о пользователе позволяет дополнительно показывать и обобщать социальные и экономические интересы абонентов на заданной территории. Таким образом, предлагаемый метод моделирования инфокоммуникационной сети закладывает принципы для создания единой методологии, которая позволяет изучать не только систему инфокоммуникаций в отдельности, но и межструктурные взаимосвязи в системах региона, на основе информации собираемой о пользователях телекоммуникационной сети.

#### **4. Практическая реализация алгоритмического обеспечения для формирования виртуальной топологической структуры**

Для реализации метода формирования топологической структуры в качестве источника сведений о месте расположения физических узлов использовался ресурс FlightRadar24 (URL: <http://www.flightradar24.com>). FlightRadar24 позволяет наблюдать перемещение воздушных судов. В число получаемых с ресурса сведений входят: координаты

наты воздушного судна, скорость перемещения, номер рейса, начальный и конечный пункты назначения, тип и бортовой номер. В качестве допущения принято, что участие в виртуальном узле не зависит от высоты полета и типа объекта. Первым этапом является задание при помощи градусной сетки границ виртуального узла,  $x_a \wedge x_b$  и  $y_a \wedge y_b$ , аналогично примеру, показанному на рис. 2.

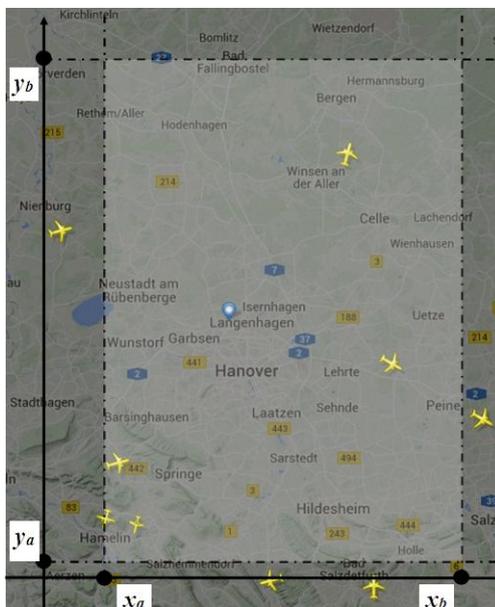


Рис. 2. Пример выделения виртуального узла на территории поверхности Земли

После определения границ на основе текущей информации о физических узлах формируется БД состояния виртуального узла:

$$Db = \{\xi\} : \xi_i(t_i; x_i; y_i; \mathcal{G}_i) \wedge \xi \in (0, \Xi] : \Xi \neq \infty \wedge \Xi \in \mathbb{N}, \quad (14)$$

где  $\xi$  — параметр, описывающий свойства физического узла,  $t_i \in [t_{start}, t_{stop}]$  — момент времени приема данных о состоянии физического узла,  $t_{start}$  и  $t_{stop}$  — время начала и окончания наблюдения,  $x_i \wedge y_i : x_i \in [x_a, x_b] \wedge y_i \in [y_a, y_b]$  — координаты нахождения физического сетевого узла,  $\mathcal{G}_i$  — уникальный идентификатор физического сетевого узла (например, бортовой номер самолета).

При помощи соотношения (7) задается интервал дискретизации:

$$\Delta T = const : \sum_n \Delta T = T : n \neq \infty \wedge n \in \mathbb{N},$$

где  $T = 86400$  с (1 сутки), а  $\Delta T = 900$  с (15 мин).

При этом должно выполняться условие пропорциональности:

$$\sum_m T_m = T_{obs} : T_{obs} = t_{stop} - t_{start} \wedge m \neq \infty \wedge m \in \mathbb{N}, \quad (15)$$

где  $m$  — номер условного периода повторения состояния виртуального узла в процессе всего наблюдения  $T_{obs}$  — время наблюдения (obs. от англ. observation – наблюдение). Затем производится выделение непересекающихся множеств БД по каждому  $T$  из общего множества БД за весь период наблюдения. Например, БД за  $T_1$  (первые сутки наблюдения) имеет вид:

$$Db_{T_1} = \{Db\}_{\Delta T_1} \cup \{Db\}_{\Delta T_2} \cup \dots \cup \{Db\}_{\Delta T_n}.$$

За весь период наблюдения база данных примет вид:

$$\left. \begin{aligned} Db_{T_1} &= \{Db\}_{\Delta T_1} \cup \{Db\}_{\Delta T_2} \cup \dots \cup \{Db\}_{\Delta T_n} \\ Db_{T_2} &= \{Db\}_{\Delta T_1} \cup \{Db\}_{\Delta T_2} \cup \dots \cup \{Db\}_{\Delta T_n} \\ &\dots\dots\dots \\ Db_{T_m} &= \{Db\}_{\Delta T_1} \cup \{Db\}_{\Delta T_2} \cup \dots \cup \{Db\}_{\Delta T_n} \end{aligned} \right\} \rightarrow [t_{stop}, t_{start}] \quad (16)$$

В завершении при помощи индикаторной функции рассчитывается вероятность, что в составе  $\{Db\}_{\Delta T}$ , число физических узлов  $\eta$  будет не менее определенного числа  $\zeta$ .

$$P(\eta \geq \zeta) = \frac{1}{\mu} \sum_{i=\zeta}^{\mu} \chi(\eta_i \geq \zeta) : \chi(\eta_i \geq \zeta) = 1 \wedge \chi(\eta_i < \zeta) = 0 \quad (17)$$

Расчет производится для каждого значения  $\zeta \in [1, \zeta_{max}]$ , где  $\zeta_{max}$  максимальное количество физических узлов внутри виртуального узла за период наблюдения  $T_{obs}$ . На основании формул (14–17) и с использованием соотношений (6–8) составлен алгоритм и программа (скриптовый файл) для получения и обработки данных с ресурса FlightRadar24. Использование разработанной программы позволило спрогнозировать количество физических узлов в квадрате, показанном на рис. 2 в различные моменты времени  $\Delta T$  результаты приведены в таблице.

В таблице показана вероятность появления в виртуальном узле физических объектов в виде самолетов в течение 20 суток наблюдения. Аналогичная ситуация наблюдалась в соседних виртуальных узлах. На основании эксперимента можно утверждать, что обобщение данных о состоянии соседних виртуальных узлов позволяет построить общую карту покрытия территории, аналогично описанной на рис. 1 и сформировать матрицу вероятностей наличия заданных пропускных способностей между парами виртуальных узлов.

Таблица

Вероятность нахождения не менее определенного количества физических узлов в заданном квадрате

№ $\Delta T = 900$ с	Время	$P(\eta \geq 1)$	$P(\eta \geq 2)$	$P(\eta \geq 3)$	$P(\eta \geq 4)$
4	1:00	0,952	0,905	0,857	0,81
5	1:15	0,952	0,905	0,857	0,81
6	1:30	0,952	0,905	0,857	0,81
7	1:45	0,952	0,905	0,857	0,857
8	2:00	0,952	0,905	0,857	0,857
9	2:15	0,952	0,905	0,857	0,857
10	2:30	0,952	0,905	0,8577	0,857

Особенность алгоритма — отсутствие привязки к особенностям траектории перемещения объектов, важной составляющей является факт наличия физического объекта на территории виртуального узла.

## Заключение

В работе показано, что одной из проблем моделирования систем телекоммуникаций, является неопределенность отношения элемента к определенной подсистеме сети передачи информации. Неопределенность возникла из-за особенностей работы современных

систем телекоммуникаций. В современных системах один элемент может выступать как абонентское оборудование, подсистема доступа, подсистема управления и подсистема транспортной сети. В результате затрудняется внедрение информационных технологий, основанных на использовании самоорганизующихся распределенных систем передачи и обработки информации, предназначенных для увеличения доступности систем связи общего пользования и автоматизации управления транспортными средствами.

Для устранения описанной проблемы разработан метод описания структуры системы инфокоммуникаций. Метод заключается в представлении инфокоммуникационной системы как единой логической структуры. Основу структуры составляют виртуальные узлы — части земной поверхности, на которой находятся физические узлы. Физические узлы — это оборудование абонентов и провайдеров. Совокупность виртуальных узлов образует многослойную иерархическую виртуальную сеть. Пропускная способность полученной сети изменяется по вероятностным законам, которые определяются статистикой посещения виртуального узла физическими узлами. Область использования полученных статистических данных различна. Применительно к системам связи — это повышение эффективности управления структурой сети за счет прогнозирования альтернативных маршрутов передачи информации между абонентами, решения задач балансировки трафиковой нагрузки, перераспределения канального ресурса. Результаты анализа зоны обслуживания систем инфокоммуникаций можно использовать для исследования взаимодействий социальных и экономических систем региона.

Для демонстрации реализуемости разработанных положений проведен эксперимент по прогнозированию количества физических узлов в виртуальном узле. Источником информации выбран интернет ресурс FlightRadar24 — Live AIR Traffic. По полученным данным рассчитана вероятность появления в виртуальном узле физических объектов. Обобщение данных о состоянии территории наблюдения позволяет построить карту посещаемости территории виртуальных узлов физическими узлами, а затем рассчитать матрицы вероятностей пропускных способностей между парами виртуальных узлов.

Результаты исследований открывают возможности повышения эффективности использования современных телекоммуникаций, за счет синтеза логической структуры из различных объектов передачи и обработки информации.

## Литература

1. Shih-Lin, Wu. Wireless ad hoc networking, Personal-Area, Local-Area, and the Sensory-Area Networks / W. Shih-Lin, T. Yu-Chee — Auerbach Publications Taylor & Francis Group New York 2007. — 660 p. DOI: 10.1201/9781420013825.
2. Moustafa, H. Vehicular Networks Techniques, Standards, and Applications / H. Moustafa Y. Zhang — Auerbach Publications Taylor & Francis Group 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300 2009. — 441 p.
3. Zhang, Y. Wireless mesh networking Architectures, Protocols and Standards / Y. Zhang, J. Luo, H. Hu. — Taylor & Francis Group New York 2007. — 610 p. DOI: 10.1201/9781420013542.
4. Shorey, R. Mobile, wireless, and sensor networks technology, applications, and future directions / R. Shorey, A. Ananda, C. Mun, T. Wei — John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. 2006. — 452 p. DOI: 10.1002/0471755591.

5. Сорокин А.А. Разработка программного комплекса для исследования телекоммуникационных систем с динамической топологией сети / А.А. Сорокин // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Управление, вычислительная техника и информатика. — 2011. — № 2. — С. 137–142
6. Nekmat, R. Ad-hoc networks: Fundamental properties and network topologies; Technology / R. Nekmat — The Netherlands and Rhyzen Information and Consulting Services, Zoetermeer, the Netherlands. 2006. — 546 p.
7. Мочалов, В.П. Модель системы управления услугами TMN / В.П. Мочалов // Современные наукоемкие технологии. — 2005. — № 5. — С. 71–72.
8. Володина, Е.В. Социально-демографический таргетинг контекстной рекламы информационных ресурсов / Е.В. Володина, П.А. Ермакова // Вестник Курганского государственного университета. Сер.: Гуманитарные науки. — Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та. — 2011. — № 22. — С. 6–9.
9. Комашинский, В.И. Системы подвижной радиосвязи с пакетной передачей информацией. Основы моделирования. / В.И. Комашинский, А.В. Максимов — М.: Горячая линия Телеком, 2007. — 176 с.
- 10 Дмитриев, В.Н. Многофакторный анализ социально-экономического состояния Республики Чад для создания современной инфокоммуникационной инфраструктуры / В.Н. Дмитриев, Юсуф Ахмат, А.А. Сорокин // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Управление, вычислительная техника и информатика. — 2015. — № 1. — С. 56–65
11. Mukherjee, A. Location Management and Routing in Mobile Wireless Networks / A. Mukherjee, S. Vandyopadhyay, D. Saha - Artech House Boston London 2003. — 250 p.
12. Бахтин, А.А. Эффективность реализации межуровневого взаимодействия для протокола быстрой маршрутизации в беспроводных Ad-hoc сетях. / А.А. Бахтин, Л.А. Попов, А.В. Смирнов // Вестник Московского авиационного института — 2009. — № 5. — Т. 16. — С. 159–165
13. Huuтиä, E. Random Waypoint Model in n-Dimensional Space / E. Huuтиä, J. Virtamo // Operations Research Letters. — 2005. — Vol. 33/6, — P. 567–571. DOI: 10.1016/j.orl.2004.11.006.
14. Das, S. Adaptive location prediction strategies based on a hierarchical network model in a cellular mobile environment. / S. Das, K. Sanjoy // The Computer Journal. — 1999. — Vol. 42/6, — P. 473–486. DOI: 10.1093/comjnl/42.6.473.
15. Gökhan, Y. A data mining approach for location prediction in mobile environments. / Y. Gökhan, D. Katsaros, Ö. Ulusoy, Y. Manolopoulos // Data & Knowledge Engineering. — 2005. — Vol. 54/2, — P. 121–146. DOI: 10.1016/j.datak.2004.09.004.
16. Cheng, C. Location prediction algorithms for mobile wireless systems. / C. Cheng, R. Jain, E. Berg // In Wireless internet handbook - CRC Press, Inc. — 2003. — P. 245–263. DOI: 10.1201/9780203011690.ch11.
17. Liu, T. Mobility modeling, location tracking, and trajectory prediction in wireless ATM networks. / T. Liu, B. Paramvir, C. Imrich // Selected Areas in Communications, IEEE Journal. — 1998. — Vol. 16/6 — P. 922–936. DOI: 10.1109/49.709453.

Сорокин Александр Александрович, к.т.н., доцент кафедры «Связь», Астраханский государственный технический университет (Астрахань, Российская Федерация), alsorokin2@list.ru.

Резников Петр Сергеевич, аспирант, ассистент кафедры «Связь», Астраханский государственный технический университет (Астрахань, Российская Федерация), psreznikov@gmail.com.

*Поступила в редакцию 9 июля 2015 г.*

---

*Bulletin of the South Ural State University  
Series "Computational Mathematics and Software Engineering"  
2015, vol. 4, no. 4, pp. 64–79*

---

DOI: 10.14529/cmse150404

## DEVELOPMENT ALGORITHMIC SUPPORT FOR THE SYNTHESIS OF TOPOLOGICAL STRUCTURES OF COMMUNICATION SYSTEMS

*A.A. Sorokin*, Astrakhan State Technical University (Astrakhan, Russian Federation)  
alsorokin2@list.ru,

*P.S. Reznikov*, Astrakhan State Technical University (Astrakhan, Russian Federation)  
psreznikov@gmail.com

The paper shows that one of the problem of telecommunication systems is indeterminacy of relation of a system's element to a particular subsystem of informational network, when the element could be used either as a user equipment or a management subsystem. The result is the difficulty of re-introduction of ad hoc networks into the structure of the mobile communication systems. To solve this problem a method of describing the structure of information communications has been developed. The method is based on the presentation of the system as a single logical structure. The base of the structure are virtual nodes. A set of virtual nodes forms a virtual network. The capacity of a virtual network varies according to the laws of probability. Probability laws are determined on the basis of statistics of virtual host attendance by physical nodes. The sphere of application of communications systems is the improvement of management efficiency due to anticipating alternative routes of data transmission and different standards of communication systems synthesis. The results can be used to study the interactions of social and economic systems of the region. To demonstrate the results the experiment on the prediction of the number of physical nodes in a given virtual host has been carried out. The probability of occurrence of physical objects in the virtual site has been calculated on the bases of the obtained data. The calculation results enable us to construct a map of the area attendance by physical nodes and to calculate traffic routes between virtual hosts.

*Keywords: system, analysis, infocommunications, topology, structure, synthesis, information, management, processing, network.*

## References

1. Shih-Lin W., Yu-Chee T. Wireless ad hoc networking, Personal-Area, Local-Area, and the Sensory-Area Networks. Auerbach Publications Taylor & Francis Group New York, 2007. 660 p. DOI: 10.1201/9781420013825.
2. Moustafa H. Zhang Y. Vehicular Networks Techniques, Standards, and Applications. Auerbach Publications Taylor & Francis Group 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300, 2009. 441 p.
3. Zhang Y., Luo J., Hu H. Wireless mesh networking Architectures, Protocols and Standards. Taylor & Francis Group New York, 2007. 610 p. DOI: 10.1201/9781420013542.
4. Shorey R., Ananda A., Mun C., Wei T. Mobile, wireless, and sensor networks technology, applications, and future directions. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2006. 452 p. DOI: 10.1002/0471755591.
5. Sorokin A.A. Razrabotka programmnogo kompleksa dlja issledovanija telekommunikacionnyh sistem s dinamiceskoy topologiej seti [Development of software for the study of telecommunication systems with dynamic network topology] // Vestn. Astrahan. gos. tehn. un-ta. Ser.: Upravlenie, vychislitel'naja tehnika i informatika [Bulletin of the Astrakhan State. tehn. Univ. Ser. : Management, Computer Science and Informatics]. 2011. Vol. 2. P. 137–142
6. Hekmat R. Ad-hoc networks: Fundamental properties and network topologies; Technology. The Netherlands and Rhyzen Information and Consulting Services, Zoetermeer, the Netherlands, 2006. 546 p.
7. Mochalov V.P. Model' sistemy upravlenija uslugami TMN [Model of service management system TMN] // Sovremennye naukoemkie tehnologii [Modern high technologies]. 2005. № 5. P. 71–72.
8. Volodina, E.V., Ermakova, P.A. Social'no-demograficheskiy targeting kontekstnoj reklamy informacionnyh resursov [Socio-demographic targeting of contextual advertising information resources] // Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Gumanitarnye nauki [Bulletin of the Kurgan State University. Series: Humanities]. Kurgan: Publishing house Kurgan State. University Pres. 2011. № 22. P. 6–9.
9. Komashinskij V.I., Maksimov A.V., Sistemy podvizhnoj radiosvjazi s paket-noj peredachej informaciej. Osnovy modelirovanija [Mobile radio systems with packet transmission of information. Fundamentals of modeling.]. M.: Hotline Telecom, 2007. 176 p.
10. Dmitriev V.N., Ahmat Jusuf, Sorokin A.A. Mnogofaktornyj analiz social'no-jekonomicheskogo sostojanija Respubliki Chad dlja sozdanija sovremennoj infokommunikacionnoj infrastruktury [Multivariate analysis of social and economic state of the republic of chad for formation of the modern communication infrastructure] // Vestn. Astrahan. gos. tehn. un-ta. Ser.: Upravlenie, vychislitel'naja tehnika i informatika [Bulletin of the Astrakhan State. tehn. Univ. Ser. : Management, Computer Science and Informatics]. 2015. Vol. 1. P. 56–65
11. Mukherjee A, Bandyopadhyay S., Saha D. Location Management and Routing in Mobile Wireless Networks - Artech House Boston London, 2003. 250 p.
12. Bahtin A.A., Popov L.A., Smirnov A.V. Jeffektivnost' realizacii mezhurovnevo go vzaimodejstvija dlja protokola bystroj marshrutizacii v besprovodnyh Ad-hoc setjah [The effectiveness of the implementation of the interlayer interaction for fast routing protocol

- for wireless Ad-hoc networks] // Vestnik Moskovskogo aviacionnogo institute [Bulletin of the Moscow Aviation Institute]. 2009. Vol. 5, ie. 16 P. 159–165
13. Hyytiä E., Virtamo J. Random Waypoint Model in n-Dimensional Space // Operations Research Letters, 2005. Vol. 33/6. P. 567–571. DOI: 10.1016/j.orl.2004.11.006.
  14. Das S., Sanjoy K. Adaptive location prediction strategies based on a hierarchical network model in a cellular mobile environment. // The Computer Journal, 1999. Vol. 42/6. P. 473–486. DOI: 10.1093/comjnl/42.6.473.
  15. Gökhan Y., Katsaros D., Ulusoy Ö. Manolopoulos Y. A data mining approach for location prediction in mobile environments. // Data & Knowledge Engineering, 2005. Vol. 54/2. P. 121–146. DOI: 10.1016/j.datak.2004.09.004.
  16. Cheng C., Jain R., Berg E. Location prediction algorithms for mobile wireless systems. // In Wireless internet handbook, CRC Press, Inc., 2003. P. 245–263. DOI: 10.1201/9780203011690.ch11.
  17. Liu T., Paramvir B., Imrich C. Mobility modeling, location tracking, and trajectory prediction in wireless ATM networks. // Selected Areas in Communications, IEEE Journal, 1998. Vol. 16/6. P. 922–936. DOI: 10.1109/49.709453.

*Received July 9, 2015.*