

УДК 004.7:621.39

**КОМПЛЕКСНОЕ УПРАВЛЕНИЕ МАРШРУТИЗАЦИЕЙ ПАКЕТОВ И РЕЖИМАМИ РАБОТЫ РАДИОСРЕДСТВ В НЕОДНОРОДНОЙ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ****Чуднов Александр Михайлович**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматизированных систем управления и связи Военной академии связи им. С.М. Буденного<sup>1</sup>.  
E-mail: chudnow@yandex.ru.

**Путилин Алексей Николаевич**

доктор технических наук, профессор, главный научный специалист ПАО «Интелтех»<sup>2</sup>.  
E-mail: a.n.putilin@yandex.ru.

**Попов Андрей Иванович**

адъюнкт кафедры автоматизированных систем управления и связи Военной академии связи им. С.М. Буденного<sup>1</sup>.  
E-mail: adropovai@yandex.ru.

<sup>1</sup>Адрес: 194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., 3.

<sup>2</sup>Адрес: 197342, Санкт-Петербург, ул. Кантемировская, 8.

*Аннотация:* Изучается задача управления маршрутизацией пакетов в сети передачи данных, использующей в качестве фрагментов пакетные сети радиосвязи с автоматически управляемыми режимами функционирования радиосредств. Основным отличием постановок задач от традиционных задач является необходимость учёта в этом случае возможности назначения (переназначения) маршрутов, которые могут быть реализованы при работе радиосредств в различных режимах, определяющих как корреспондирующее направление передачи данных, так и техническую скорость обмена информацией в данном направлении. Разработана методика оптимизации комплексного управления маршрутизацией пакетов и режимами работы радиосредств, предложен алгоритм нахождения оптимального распределения потоков по показателю вероятности своевременной доставки сообщений и приведён пример, иллюстрирующий его работу. Приведена оценка выигрыша, обеспечиваемого за счет комплексной оптимизации системы маршрутных таблиц в увязке с назначением режимов работы радиосредств.

*Ключевые слова:* система передачи данных, пакетная сеть радиосвязи, гибкая сетевая топология, распределение потоков, маршрутизация.

**Введение**

Изучается задача управления маршрутизацией пакетов в неоднородной сети передачи данных (СПД), использующей в качестве фрагментов пакетные сети радиосвязи с автоматически управляемыми режимами функционирования радиосредств.

Обычно при построении таких СПД на каналообразующие средства возлагаются задачи создания канальной структуры [1, 2], в рамках которой обеспечивалось бы эффективное функционирование СПД, в том числе с управлением маршрутизацией при различных нагрузках в информационных направлениях сети [1–12]. При этом управление режимами работы радиосредств, в частности, влияющими на скорость передачи данных в линиях связи и выбор

направления обмена данными, как правило, определяется исходя из состояния тех или иных линий, и не подстраивается под каждый или группу передаваемых пакетов данных. При таком подходе управление маршрутизацией пакетов в СПД на сетевом уровне оказывается декомпозированным на две компоненты: 1) управление канальной структурой сети и 2) управление маршрутизацией пакетов в рамках канальной структуры, определённой системой управления более высокого (по организационному признаку) уровня иерархии.

В настоящей работе решается задача построения алгоритма комплексного управления маршрутизацией в сочетании с управлением режимами работы каналообразующих радиосредств и оценки эффекта, который может

быть достигнут за счёт такого комплексирования.

Актуальность проведения исследований в этом направлении обусловлена, с одной стороны, возможностью отмеченного комплексирования управления маршрутизацией на современном уровне автоматизации управления режимами работы радиосредств и, с другой, – необходимостью и возможностью повышения на этой основе эффективности функционирования системы связи.

На основе приведённого в п. 2 концептуального описания работы СПД в п. 3 строится формализованная модель, описывающая множество допустимых распределений потоков данных в рамках так называемой политопологической структуры (ПТС), определённой множеством реализуемых режимов функционирования радиосредств. В отличие от динамической или гибкой структуры (*dynamic or flexible structure*) ПТС предоставляет алгоритму управления маршрутизацией не адаптированную к изменяющимся условиям топологию сети, а множество топологий, в рамках которых осуществляется маршрутизация пакетов. Затем для заданной ПТС в п. 4 решается задача оптимизации распределения потоков и оценивается эффективность функционирования сети. На основе полученного распределения потоков строится система таблиц маршрутизации пакетов, в которых помимо направлений выдачи пакетов определяются режимы работы соответствующих средств связи. Система таблиц маршрутизации пакетов фактически представляет собой заданный в формализованном виде оператор управления потоками в сети, и нахождение оптимальной системы таблиц эквивалентно определению оптимального алгоритма работы СПД. При использовании сформированных таблиц маршрутизации обеспечивается расчётное распределение информационных потоков по маршрутам сети и, соответственно, расчётное (оптимальное) значение показателя эффективности функционирования СПД. В качестве оптимизируемого показателя выбран показатель средней вероятности своевремен-

ной доставки сообщения, который определённым образом пересчитан к вероятности своевременной доставки пакетов. Общий подход к проведению исследований аналогичен использованному в работах [6, 7], однако особенность прикладной задачи обусловила необходимость модификации модели СПД, постановки новой оптимизационной задачи, алгоритма оптимизации и, соответственно, привела к новым результатам и выводам.

### **Концептуальное описание СПД и постановка задачи**

Для решения обозначенной выше задачи существенными являются следующие аспекты, характеризующие построение и принцип функционирования СПД [8].

A1. Система (подсистема) управления сетью может строиться как система с централизованным, частично (локально) централизованным или децентрализованным управлением. Эти варианты управления также могут комплексироваться, а именно, в некоторых состояниях сети (её фрагмента) отдельные станции могут брать на себя функции региональных или локальных пунктов управления маршрутизацией. Особенности этих случаев для решаемой задачи состоят в необходимости обеспечения таких станций достаточным вычислительным ресурсом и обеспечении связности и достаточной пропускной способностью сети служебной связи.

Таким образом, полагается, что в СПД реализована подсеть обмена служебной информацией, обеспечивающая обмен управляющих и исполнительных элементов подсистемы управления сетью данными о состоянии линий связи, нагрузках на сеть в информационных направлениях, задержках пакетов в элементах сети, а также командами управления от управляющей станции в случае централизованного или частично централизованного управления.

A2. Режимы функционирования радиосредств могут определяться набором данных, в частности, включающих: направление связи (рабочая частота передачи/приёма, параметры

управления диаграммами направленности антенн,...), техническую скорость передачи, мощность излучения и другие. Переключение режимов работы радиосредств должно осуществляться достаточно быстро, чтобы инерционность не приводила к потерям эффективности функционирования СПД.

А3. Возможности радиосредств по обеспечению связей в различных направлениях определены конструктивными особенностями приёмопередающих устройств (мощностью передатчиков, параметрами антенно-фидерных трактов, показателями чувствительности приёмников,...), свойствами среды распространения, помеховой ситуацией на рабочих частотах и другими факторами. Для принятия решений по управлению маршрутизацией существенной информацией является лишь возможность установления связи (построения линии связи) в том или ином направлении взаимодействия радиосредств, а также пропускная способность линии в данном направлении – при наличии такой возможности.

А4. В пределах отмеченных ограничений для радиосредств сети может быть предусмотрено несколько градаций технической скорости передачи данных. Однако в рассматриваемой далее модели учитывается лишь ограниченность максимальной скорости без учёта квантованности допустимых скоростей передачи данных, которая полагается достаточной, чтобы не вносить существенных потерь в эффективность функционирования сети.

А5. Комплексное управление маршрутизацией направляется на максимизацию вероятности своевременной доставки сообщений в СПД, что обеспечивается решением задачи оптимизации распределения потоков в сети и построения на этой основе системы таблиц маршрутизации пакетов для всех коммутационных центров сети. На концептуальном уровне задача оптимизации распределения потоков формулируется в виде

$$P(S|C, \Lambda) \rightarrow \max_{S \in \mathcal{S}(C)}, \quad (1)$$

где  $S$  – оптимизируемое распределение пото-

ков по маршрутам сети (потокосная структура);  $\mathcal{S}(C)$  – множество допустимых распределений потоков, определённое политопологической структурой  $C$ ;  $\Lambda$  – набор параметров, определяющих информационную нагрузку на сеть (матрица тяготения [2, 6, 7]);  $P(S|C, \Lambda)$  – показатель, характеризующий среднюю вероятность своевременной доставки сообщений в сети. При управлении в соответствии с (1) в каждом состоянии внешней среды потокосная структура сети переводится в состояние

$$S^*(C, \Lambda) = \operatorname{argmax}_{S \in \mathcal{S}(C)} P(S|C, \Lambda), \quad (2)$$

которое является оптимальным в рамках ПТС  $C$  при нагрузке на сеть  $\Lambda$ . Распределение  $S^* = S^*(C, \Lambda)$ , в конечном счёте, определяет алгоритм маршрутизации пакетов в системе в условиях, соответствующих исходным данным задачи (1). Реализация алгоритма маршрутизации, соответствующего распределению  $S^*(C, \Lambda)$ , осуществляется на основе формирования, рассылки и ввода в действие модифицированных технологических данных – таблиц маршрутизации пакетов, которые в данном случае определяют порт выдачи и режим работы радиосредств при передаче каждого пакета (группы пакетов). Принятие решений на формирование, рассылку и, соответственно, ввод в действие модифицированных таблиц маршрутизации предпочтительно осуществлять при условии заметного (существенного) прироста эффективности функционирования СПД.

А6. Таблицы маршрутизации пакетов (ТМП) строятся, вообще говоря, в рандомизированном варианте, допускающем возможность рандомизированного выбора порта выдачи пакета для получателя с заданным адресом. Такой вариант маршрутизации непосредственно вытекает из решения задачи оптимизации распределения потоков и, соответственно, обеспечивает более эффективное управление маршрутизацией пакетов в СПД. При этом процедура маршрутизации на основе рандомизированной ТМП может быть реализована с использованием как датчиков случайных чисел, так и детерминированных алгоритмов,

обеспечивающих требуемые частоты выбора портов выдачи пакетов.

А7. В СПД должно быть обеспечено согласованное взаимодействие передающих и приёмных средств при формировании линий связи. Полученные в работе результаты соответствуют наиболее простому варианту обеспечения такого взаимодействия, при котором на определённых временных интервалах приёмным и передающим средствам для образования радиолинии определены моменты времени начала и окончания сеанса связи независимо от заполнения пакетами буферов (очереди) в тех или иных направлениях связи. Вместе с тем этот аспект влияет в основном на вероятностно-временные характеристики прохождения пакетов по маршрутам сети, при этом разработанные методики допускают обобщение на другие варианты взаимодействия передающих и приёмных средств.

#### Формализованная модель и постановка задачи

##### Формализация конструкций модели

Для формализованной постановки описанной выше задачи (1) строится модель системы, основным назначением которой является формализация конструкций  $C, S(C)$ . Основное отличие используемой в данной задаче модели СПД от моделей [1–7] состоит в формализации описания ПТС сети, учитывающей многовариантность топологий сети, формируемых при работе радиосредств в различных режимах. В модели используются следующие конструкции:

– матрица  $C = (c_{kl})_{kl=1, \dots, n}$  пропускных способностей линий связи, каждый элемент  $c_{kl}$  которой соответствует пропускной способности  $(k, l)$ -линии, реализуемой в соответствующем режиме работы корреспондирующих средств;

– векторы (наборы параметров)  $U = (u_k)_{k=1, \dots, n}, V = (v_k)_{k=1, \dots, n}$ , компоненты которых представляют собой параметры, характеризующие ресурс соответственно пере-

дающих и приёмных средств  $k$ -узла;

– граф  $G$  сети (вообще говоря, орграф без петель и кратных дуг);

– матрица  $\Lambda = (\lambda_{ij})$  интенсивностей потоков пакетов в информационных направлениях системы (матрица тяготения), где  $\lambda_{ij}$  – интенсивность потока, обусловленного обменом данными в  $(i, j)$ -направлении, т. е. между пользователями (группами пользователей), соответствующими  $i$ -му и  $j$ -му узлам сети;

– маршрут  $\mu$  сети – маршрут в графе  $G$ ;

–  $\mathcal{M} = \mathcal{M}(C)$  – множество маршрутов в сети (графе  $G$ );

–  $\mathcal{M}(k, l) \subseteq \mathcal{M}$  – множество маршрутов в сети, проходящих через  $(k, l)$ -линию (т. е. содержащих  $(k, l)$ -дугу графа  $G$ );

–  $\mathcal{M} \langle i, j \rangle \subseteq \mathcal{M}$  – множество маршрутов, проходящих в  $\langle i, j \rangle$ -направлении в сети (т. е. из  $i$ -вершины в  $j$ -вершину графа  $G$ );

–  $s(\mu)$  – интенсивность информационного потока, обеспечиваемую для передачи по  $\mu$ -маршруту.

–  $S = \langle s(\mu) \rangle_{\mu \in \mathcal{M}}$  – распределение (функция распределения) потоков по маршрутам  $s: \mathcal{M} \rightarrow \mathbb{R}_+$ , где  $\mathbb{R}_+ = \{x \in \mathbb{R} | x \geq 0\}$  – множество неотрицательных действительных чисел.

Для маршрута  $\mu \in \mathcal{M}$  величина  $s(\mu)$  определяет интенсивность информационного потока, проходящего по маршруту  $\mu$ . Для распределения потоков  $S = \langle s(\mu) \rangle_{\mu \in \mathcal{M}}$  интенсивности реализованных потоков в  $\langle i, j \rangle$ -направлениях определяются соотношениями

$$s_{\langle i, j \rangle} = \sum_{\mu \in \mathcal{M} \langle i, j \rangle} s(\mu), \quad (3)$$

причём, вообще говоря, имеет место условие  $s_{\langle i, j \rangle} \leq \lambda_{ij}, i, j = 1, \dots, n$ .

##### Описание множества допустимых распределений потоков

В формализованном виде ПТС системы представляется объединением так называемых однородных политопологических структур, соответствующих подсетям, образованным на базе однотипных средств, т. е. средств, допус-

кающих, в принципе, (в подходящих режимах работы) образование линий связи для любой пары корреспондирующих узлов. Однородная ПТС представляется тройкой  $\langle C, U, V \rangle$ , где  $C = (c_{k,l})_{k,l=1,\dots,n}$  матрица пропускных способностей линий связи, каждый элемент  $c_{k,l}$  которой соответствует пропускной способности  $(k, l)$ -линии, реализуемой в соответствующем режиме работы корреспондирующих средств,  $U = (u_k)_{k=1,\dots,n}$ ,  $V = (v_l)_{l=1,\dots,n}$  – векторы, характеризующие ресурс, соответственно, передающих и приёмных средств. При этом для ПТС  $\langle C, U, V \rangle$  потоки в сети ограничены неравенствами вида

$$0 \leq s_{k,l}, \sum_l \frac{s_{k,l}}{c_{k,l}} \leq u_k, \sum_k \frac{s_{k,l}}{c_{k,l}} \leq v_l \quad (k, l = 1, \dots, n), \quad (4)$$

где

$$s_{k,l} = \sum_{\mu \in M(k,l)} s(\mu) \quad (5)$$

– интенсивность информационного потока, передаваемого по  $(k, l)$ -линии.

Отношение  $s_{k,l}/c_{k,l}$  имеет физический смысл относительного времени использования  $(k, l)$ -линии передающими средствами  $k$ -узла (приёмными средствами  $l$ -узла). Заметим, что условие  $\sum_l \frac{s_{k,l}}{c_{k,l}} \leq 1$  соответствует ограничению на коэффициент использования одного комплекта передающих средств  $k$ -узла, который не может превышать единицу, поэтому неравенством  $\sum_l \frac{s_{k,l}}{c_{k,l}} \leq u_k$  в общем случае учитывается ограничение на ресурс передающих средств  $k$ -узла. Аналогично этому последнее неравенство в (4) соответствует ограничению на ресурс приёмных средств  $l$ -узла. Неравенства в (4) в принципе можно нормировать, например, относительно  $u_k$  (т. е. принять  $u_k = 1$ ).

Распределение потоков  $S = \langle s(\mu) \rangle_{\mu \in M}$  называется допустимым ПТС  $\langle C, U, V \rangle$ , если для него выполняются условия (4) и, кроме того, условия, обеспечивающие возможность согласованного включения передающих и приёмных средств (см. А7 раздела «Концептуаль-

ное описание ...»). Для упрощения изложения методики, с одной стороны, и рассмотрения наиболее важных для практики случаев – с другой, будем считать, что ресурс приёмных средств на узлах связи достаточен, чтобы организовать их взаимодействие с передающими в любых допустимых ПТС режимах работы передающих радиосредств. В этом случае множество  $\mathcal{S}(C)$  допустимых распределений потоков в однородной ПТС можно определить соотношением

$$\mathcal{S}(C) = \{ \langle s(\mu) \rangle_{\mu \in M} \mid 0 \leq s_{k,l}, \sum_l \frac{s_{k,l}}{c_{k,l}} \leq 1, \quad k = 1, \dots, n \}. \quad (6)$$

При этом же условии для неоднородной ПТС область  $\mathcal{S}(C)$  определится соотношением:

$$\mathcal{S}(C) = \{ \langle s(\mu) \rangle_{\mu \in M} \mid 0 \leq s_{k,l}, \sum_l \frac{s_{k,l}}{c_{k,l}^m} \leq 1, \quad (k = 1, \dots, n; m = 1, \dots, N_m) \}, \quad (7)$$

где  $N_m$  – число однородных ПТС, составляющих общую ПТС сети.

В рамках условий (7) могут быть представлены также «обычные» сетевые структуры, для которых множество допустимых распределений потоков ограничено лишь пропускными способностями линий связи и производительностями коммутационных центров [1–7]. Фрагменты таких сетей в (7) могут быть представлены наборами условий вида  $s_{k,l}^m \leq c_{k,l}^m$  и  $\sum_l s_{k,l}^m \leq u_k^m$ .

Следует обратить внимание на то, что множество допустимых распределений  $\mathcal{S}(C)$  в общем случае не представляется объединением множеств  $\mathcal{S}(C_m)$  различных однородных сетей, образующих в совокупности интегрированную сеть, поскольку имеется (и учитывается в (7)) возможность формирования маршрутов, образованных средствами различных типов, что расширяет множество  $\mathcal{S}(C)$  по отношению к простому объединению множеств  $\mathcal{S}(C_m)$ .

Расчётные соотношения. Как и в [6], вероятность своевременной доставки сообщений в СПД будем пересчитывать к вероятности своевременной доставки пакетов. При этом в задаче (1) в качестве критерия оптимальности при-



нимается значение функции распределения вероятностей (ФРВ)  $P(S|C, \Lambda) = P\{t_{\pi} \leq \tau | S\}$  времени доставки пакета в СПД (при подходящем значении  $\tau$ ), которая определяется путём усреднения соответствующих ФРВ по маршрутам сети

$$P(S|C, \Lambda) = P\{t_{\pi} \leq \tau | S\} = \frac{1}{\lambda_{\Sigma}} \sum_{\mu \in \mathcal{M}} s(\mu) P\{t(\mu) \leq \tau\}, \quad (8)$$

где  $P\{t(\mu) \leq \tau\}$  – ФРВ времени прохождения пакета данных по  $\mu$ -маршруту, определяемая сверткой соответствующих ФРВ  $P\{t(k, l) \leq \tau | s_{k, l}\}$  времени задержки  $t(k, l)$  пакетов в  $(k, l)$ -линиях  $\mu$ -маршрута

$$P\{t_{\pi}(\mu) \leq \tau\} = \prod_{(k, l) \in \mu}^{\otimes} P\{t(k, l) \leq \tau | s_{k, l}\}, \quad (9)$$

где  $\otimes$  – операция свертки распределений.

В частности, для сравнения различных алгоритмов управления маршрутизацией зависимости  $P\{t(k, l) \leq \tau | s_{k, l}\}$  могут использоваться модели СМО [1]. Так, например, для простейшей СМО M/M/1 принимается

$$P\{t(k, l) \leq \tau | s_{k, l}\} = 1 - \exp\left(-\frac{\tau}{T_{k, l}}\right), \quad (10)$$

где  $T_{k, l} = \frac{1}{c'_{k, l} - s_{k, l}}$  – среднее время задержки пакета в  $(k, l)$ -линии с пропускной способностью  $c'_{k, l}$ , которая определяется с учётом максимально возможного времени использования линии соотношением:  $c'_{k, l} = \eta_{k, l} c_{k, l}$ , где  $\eta_{k, l} = us_{k, l} / c_{k, l} \sum_1 \frac{s_{k, l}}{c_{k, l}}$ .

Соотношения (8)–(10), в конечном счёте, определяют вероятность своевременной доставки сообщений в СПД. С учётом введённых определений задача (1) является задачей M-параметрической оптимизации ( $M = |\mathcal{M}|$ ) и состоит в нахождении оптимального распределения  $S \in \mathcal{S}(C)$  информационных потоков по маршрутам СПД с политопологической структурой  $C$ , обеспечивающего максимальную вероятность своевременной доставки пакетов данных в системе. Сформированная в соответствии с оптимальным распределением  $S^*$  система таблиц маршрутизации определяет для каждого маршрутизируемого пакета, вообще

говоря, рандомизированный алгоритм назначения  $(k, l)$ -пары приёмопередающих радиосредств и их режима работы. При этом таблица маршрутизации по адресу получателя назначает порт выдачи пакета, который может определяться с использованием датчика случайных чисел либо, например, по циклу с обеспечением требуемого распределения вероятностей выбора  $(k, l)$ -пары.

В качестве важной особенности сформулированной оптимизационной задачи отметим тот факт, что в её рамках решается также задача управления нагрузкой. Действительно, при оптимальной функции распределения потоков  $\langle s^*(\mu) \rangle_{\mu \in \mathcal{M}}$  рассчитанные интенсивности потоков в информационных направлениях  $s_{\langle i, j \rangle}$  могут быть ниже, чем для потоков, заявленных на обслуживание (т. е.  $s_{\langle i, j \rangle} < \lambda_{i, j}$ ), что обусловлено целесообразностью соответствующего ограничения нагрузки для устранения потери эффективности сети при её перегрузках.

### Алгоритм оптимизации распределения потоков и примеры расчетов

#### Алгоритм оптимизации

В сформулированном виде задача (1) относится к задачам конечномерной оптимизации в множестве  $\mathcal{S}(C) \subset \mathbb{R}_+^M$ . Как видно из соотношения (4), множество  $\mathcal{S}(C)$  выпукло, так как определено линейными ограничениями в евклидовом пространстве  $\mathbb{R}^M$  и замкнуто. Кроме того, на основе анализа соотношений (8)–(10) можно установить, что в области  $\tau > T_{\mu}$  ФРВ  $P\{t_{\pi}(\mu) \leq \tau\}$  – выпуклая сверху функция. С учётом этого решение задачи (1) может быть получено методами выпуклого программирования. Для рассматриваемых ниже примеров были применены адаптированные к задаче алгоритмы: а) покоординатного спуска и б) градиентного поиска [14].

1. Алгоритм покоординатного спуска (подъёма). Построение адаптированного к задаче алгоритма распределения потоков в общих чертах описано в [6]. Процедура оптимизации со-

стоит из двух циклов: на внутреннем цикле дается прирост значения максимально значимой компоненты, на внешнем цикле осуществляется сброс значений всех компонент на некоторую величину. Работа алгоритма останавливается при возврате внешнего цикла в малую окрестность предыдущей точки.

2. Градиентный алгоритм с перестраиваемым шагом. Особенность реализации процедуры оптимизации по отношению к традиционной (см., например, [14]) состоит в необходимости контроля выполнения условий (6) и соответствующего корректирования расчётных точек. Для рассмотренных ниже примеров алгоритм покоординатного спуска выигрывает по времени нахождения  $\varepsilon$ -оптимальной точки у градиентного алгоритма более 10–20 раз, что обусловлено выполнением меньшего числа шагов, а также выполнением на каждом шаге меньшего числа операций. Впрочем, это замечание относится к использованным в работе вариантам реализации и не претендует на общую сравнительную характеристику указанных алгоритмов.

#### Примеры расчётов

С целью проверки работоспособности методики, установления условий эффективности и выявления особенностей комплексного управления маршрутизацией пакетов выполнены примеры решения оптимизационной задачи для фрагмента СПД с однородной ПТС  $\langle C, U, V \rangle$ , где матрица  $C$  пропускных способностей радиолиний и векторы  $U, V$ , характеризующие соответственно ресурс передающих и приёмных средств узлов, определены условиями:  $C = (c_{i,j})$ ,  $U = (u_i)$ ,  $V = (v_i)$ ,  $i, j = 1, \dots, 5$ , где  $c_{1,2} = 400$ ,  $c_{1,4} = 200$ ,  $c_{2,1} = 200$ ,  $c_{2,3} = 600$ ,  $c_{2,4} = 300$ ,  $c_{3,2} = 400$ ,  $c_{4,1} = 200$ ,  $c_{3,5} = 200$ ,  $c_{4,2} = 60$ ,  $c_{4,5} = 600$ ,  $c_{5,3} = 400$ ,  $c_{5,4} = 100$  (для остальных компонент  $c_{i,j} = 0$ );  $u_i = 1$ ,  $v_i = \infty$ ,  $i = 1, \dots, 5$ . Как оговорено выше, в исходных данных осуществлено нормирование неравенств (4) и учтено допущение о достаточности ресурса приёмных

средств для обеспечения взаимодействия с передающими средствами сопряженных узлов.

Для различных интенсивностей потоков в информационных направлениях СПД найдены оптимальные распределения потоков и соответствующие показатели вероятности своевременной доставки сообщений. Ниже приведём результаты расчётов для семи матриц тяготения вида  $\Lambda^k = (\lambda_{i,j}^k)$ , где:  $\lambda_{i,j}^k = \lambda^k$ :  $\lambda^1 = 20$ ,  $\lambda^2 = 25$ ,  $\lambda^3 = 30$ ,  $\lambda^4 = 40$ ,  $\lambda^5 = 50$ ,  $\lambda^6 = 60$ ,  $\lambda^7 = 80$ . Оптимальные для соответствующих условий работы СПД распределения потоков (обозначаются  $s^k$ ) задействуют для передачи данных из общего числа 64 маршрутов соответственно 48, 36, 30, 23, 20, 16 и 14 маршрутов.

В таблице 1 приведены оптимальные значения интенсивностей потоков на маршрутах, задействованных в распределениях  $s^1, s^3, s^5$ .

Следует отметить, что в условиях  $\Lambda^1, \dots, \Lambda^5$  распределения  $s^1, \dots, s^5$  индуцируют рандомизированные ТМП. Примеры таблиц маршрутизации  $TM_4^1, \dots, TM_4^5$  для узла №4, построенных на основе распределений  $s^1, \dots, s^5$  представлены таблицей 2, где номер строки  $i$  соответствует узлу (адресу) получателя, номер столбца  $j$ -порту выдачи пакета, а в  $(i, j)$ -ячейке ТМП содержится вероятность направления пакета с  $i$ -адресом на  $j$ -порт.

Для условий работы СПД, соответствующих нагрузкам  $\Lambda^6, \Lambda^7$ , оптимальные ТМП вырождаются в нерандомизированные и, кроме того, исключают передачу данных в некоторых информационных направлениях. В частности,  $TM^5, \dots, TM^7$  не предусматривают передачу данных в адрес первого узла из всех узлов, кроме четвертого. Заслуживает также внимания тот факт, что во всех случаях не используется линия связи (4,2), а линия связи (2,1) не используется  $TM^5, \dots, TM^7$ , что объясняется нерациональностью их использования в условиях перегрузки сети.

Для сравнительного анализа работы алгоритмов маршрутизации на рис. 1 приведены

Таблица 1.

$\mu$	12	14	21	23	24	32	35	41	45	53	54	123
$s^{(1)}$	18,4	12,5	7,9	18,1	17,9	19,4	17,7	18,5	18,1	19,1	17,2	17,3
$s^{(3)}$	23,7	18,8	14,6	25,0	20,1	25,0	24,9	25,0	24,8	25,0	23,2	21,7
$s^{(5)}$	40,0	39,8	22,7	40,0	39,7	40,0	39,9	39,9	40,0	40,0	30,0	39,7

$\mu$	124	145	214	235	241	245	321	324	412	453	532	541
$s^{(1)}$	7,5	18,4	12,5	7,9	7,4	12,6	7,5	17,7	11,3	17,7	18,7	6,0
$s^{(3)}$	6,0	22,0	4,9	11,0	10,6	11,8	18,4	28,5	21,8	26,2	30,0	8,9
$s^{(5)}$	0,0	39,5	0,0	22,3	0,0	45,3	0,0	48,3	11,5	50,0	49,9	0,0

$\mu$	1235	1245	1453	2145	2453	3214	3241	3245	3541	4123	4532	5321
$s^{(1)}$	1,9	1,4	1,5	1,7	1,0	2,0	7,1	1,0	5,3	2,3	8,7	7,3
$s^{(3)}$	0,0	0,0	2,7	0,0	0,0	0,3	11,4	0,0	0,0	3,5	7,9	5,7
$s^{(5)}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	32,3	0,0

$\mu$	5324	5412	12453	14532	21453	23541	32145	41235	45321	53214	53241	54123
$s^{(1)}$	1,4	1,2	1,1	1,5	0,8	4,6	1,2	1,9	1,4	1,4	6,8	0,7
$s^{(3)}$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	0,0
$s^{(5)}$	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Таблица 2.

$i \setminus j$	$TM_4^1$		$TM_4^2$		$TM_4^3$		$TM_4^4$		$TM_4^5$	
	1,0	5,0	1,0	5,0	1,0	5,0	1,0	5,0	1,0	5,0
1,0	1,0	0,0	1,0	0,0	1,0	0,0	1,0	0,0	1,0	0,0
2,0	0,6	0,4	0,6	0,4	0,7	0,3	0,7	0,3	0,3	0,7
3,0	0,1	0,9	0,2	0,8	0,1	0,9	0,0	1,0	0,0	1,0
5,0	0,0	1,0	0,0	1,0	0,0	1,0	0,0	1,0	0,0	1,0

выполненные по результатам расчетов графики зависимостей вероятности своевременной доставки сообщений  $P(\lambda|A^k)$  для различных алгоритмов  $A^k = A(TM^k)$  от интенсивности  $\lambda$  потоков в информационных направлениях сети (полагаются одинаковыми).

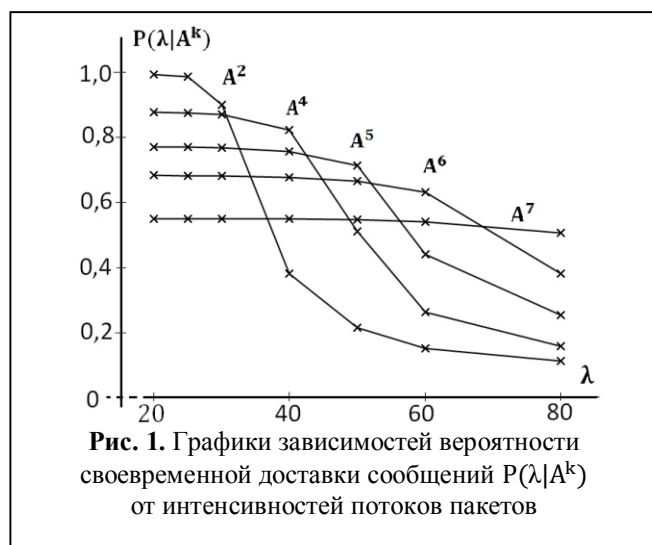


Рис. 1. Графики зависимостей вероятности своевременной доставки сообщений  $P(\lambda|A^k)$  от интенсивностей потоков пакетов

Результаты расчётов показывают, что отклонение параметров алгоритма маршрутизации от оптимального может привести к существенным потерям эффективности работы СПД. Так, использование алгоритмов  $A^1, A^2$  вместо  $A^6, A^7$  в перегруженной сети может привести к потерям 50–70% пропускной способности. Аналогично, применение  $A^6, A^7$  вместо  $A^1, A^2$  в номинально загруженной сети приводит к потерям 30–40% пропускной способности.

Оценка выигрыша, обусловленного комплексированием управления маршрутизацией и режимами работы радиосредств, проводилась путём сравнения оптимальных значений вероятностей  $P^*(\Lambda)$  с значениями  $P'(\Lambda)$ , рассчитанными для нерандомизированных ТМП и полученных из соответствующих рандомизированных путём округления значений  $p^*(i, j)$  к  $\{0, 1\}$ . При этом при-



нималось во внимание, что на основе системы нерандомизированных ТМП можно сформировать каналную структуру СПД с фиксированными режимами работы радиосредств. Для рассмотренных выше примеров выигрыш в пропускной способности сети при использовании алгоритмов  $A^1, \dots, A^5$  составил от 5 до 25%. Вместе с тем, следует отметить, что при увеличении числа приёмопередающих средств на узлах связи рандомизированная маршрутизация пакетов может быть обеспечена при фиксированной каналной структуре сети [6].

### Заключение

Предложенный метод формирования системы маршрутных таблиц для комплексного управления маршрутизацией и режимами работы радиосредств системы связи позволяет реализовать автоматическое управление СПД на сетевом уровне функционирования с позиций обеспечения максимальной эффективности функционирования СПД в целом.

Как показано, комплексное управление может обеспечить существенный выигрыш в эффективности функционирования СПД в целом. В частных случаях такое управление может быть обоснованно декомпозировано на управление каналной структурой СПД и управление маршрутизацией пакетов в рамках заданной каналной структуры.

В работе расчётные соотношения и примеры приведены для случая «достаточного» ресурса приёмных средств на узлах связи, однако методика в целом допускает очевидное обобщение (учтённое в ограничениях (6)) на проведение анализа и оптимизации в условиях ограниченного их ресурса. Кроме того, заданное (определяемое в результате оптимизации) распределение потоков по маршрутам непосредственно определяет ресурс приёмных средств, необходимый для обеспечения согласованного взаимодействия с передающими средствами смежных узлов.

Программная реализация методики обеспечивает нахождение  $\varepsilon$ -оптимального распреде-

ления потоков и соответственно системы ТМП с требуемой для практики точностью и оперативностью, позволяющей его использовать для выработки решений по комплексному управлению маршрутизацией в реальном времени в интегрированных СПД на базе 10–30 узлов. Для более масштабных сетей необходимы модификация структуры алгоритма с оптимизацией его внутренних параметров.

Постановка задачи, методика решения и алгоритм оптимизации распределения потоков легко адаптируются к другим вариантам задания оптимизируемого функционала.

### Литература

1. Шварц М. Сети связи: протоколы, моделирование и анализ, Ч. 1, 2. М.: Наука. 1992.
2. Будко П.А., Федоренко В.В. Управление в сетях связи. Математические модели и методы оптимизации. М.: Издательство физико-математической литературы, 2003. 228 с.
3. Akyildiz I.F., Wang X. Wireless Mesh Networks, Wiley, Chichester, 2009.
4. Siachalou S. Efficient QoS routing // The International Journal of Computer and Telecommunications Networking. 2003. Vol. 43. Iss. 3. Pp. 351–367.
5. Сафонов А.А., Ляхов А.И., Юргенсон А.Н., Соколова О.Д. Многоадресная маршрутизация с возможностью выбора метода передачи в канале // Автоматика и телемеханика. 2013. Вып. 10. С. 137–153.
6. Чуднов А.М., Кирик Д.И., Курашев З.В. Оптимизация распределения информационных потоков в информационной системе по показателю вероятности своевременной доставки сообщений // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2017. № 2. С. 41–49.
7. Чуднов А.М., Курашев З.В. Принципы формирования маршрутных таблиц на основе оптимизации распределения потоков в сети передачи данных // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2017. Т. 9. № 6. С. 46–51.
8. Гук И.И., Путилин А.Н., Филиппова Т.С. Комплекс технических средств адаптивной КВ радиосвязи с использованием псевдослучайной перестройки рабочей частоты // В сборнике: Радиолокация, навигация и связь XX Международная научно-техническая конференция. 2014. С. 948–958.
9. Маркин В.Г., Рыжкова А.Г. Протоколы маршрутизации в мобильных самоорганизующихся сетях // Теория и техника радиосвязи. 2013. № 4. С. 48–56.

10. *Iwata A.* [et al.] Scalable routing strategies for ad hoc wireless networks // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 1999. Vol. 17. Is. 8. Pp. 1369–1379. DOI: 10.1109/49.779920.

11. *Hong X., Xu K., Gerla M.* Scalable routing protocols for mobile ad hoc networks. IEEE Network. 2002. Vol. 16. No. 4. Pp. 11–21. DOI:10.1109/MNET.2002.1020231.

12. *Дымарский Я.С., Крутикова Н.П., Яновский Г.Г.* Управление сетями связи: принципы, про-

токолы, прикладные задачи. М.: Связь и бизнес, 2003. 382 с.

13. *Yang Yu, Prasanna V. K., Krishnamachari B.* Information Processing And Routing In Wireless Sensor Networks. London: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2006. 204 p.

14. *Поляк Б.Т.* Введение в оптимизацию. М.: Наука, 1983. 384 с.

Поступила 7 декабря 2018 г.

English

## INTEGRATED MANAGEMENT OF PACKET ROUTING AND RADIO AID OPERATING MODES IN HETEROGENEOUS DATA NETWORK

**Alexander Mikhaylovich Chudnov** – Doctor of Engineering, Professor, Department of Automated Control and Communication Systems, Military Academy of Communications named after S.M. Budenny.

*E-mail:* chudnow@yandex.ru.

*Address:* 194064, St. Petersburg, Tikhoretsky Ave., 3.

**Alexey Nikolaevich Putilin** – Doctor of Engineering, Professor, Chief Research Specialist of PAO "IntelTech".

*E-mail:* a.n.putilin@yandex.ru.

*Address:* 197342, St. Petersburg, Kantemirovskaya str., 8.

**Andrey Ivanovich Popov** – Postgraduate, Department of Automated Control and Communication Systems, Military Academy of Communications named after S.M. Budenny.

*E-mail:* adpopovai@yandex.ru.

*Address:* 194064, St. Petersburg, Tikhoretsky Ave., 3.

*Abstract:* The problem of managing packet routing in data network is examined where packet radio communication networks with automatically controlled radio aids operating modes are used as chunks. The basic difference between these problems and conventional problem statement is the need to consider here the possibility of routing (rerouting) that can be implemented while operating radio aids in various modes, which define both offset path for data transmission and data routing speed towards this path. The research relevance in this direction is conditioned, on the one hand, by the possibility of integrating routing control at up-to-date level of control automation for radio aid operating modes and, on the other hand, by the need and the ability to improve thereupon the communication system efficiency. Formalized model is constructed describing the set of flow distributions feasible within the limits due to the network physical structure and radio aid technical capability, and this model is based on the above conceptual description of data network operation. The technique was developed to optimize integrated management of packet routing and radio aid operating modes, and there was proposed the algorithm to find optimum flow distribution based on the probability index of timely delivery of messages and the example demonstrating its operation is given. The estimation of the gain ensured by the integrated optimization of the routing table system coupled with assignment of radio aid operating modes is presented.

*Keywords:* data transmission system, packet radio network, flexible network topology, flow distribution, routing.

### References

1. *Schwartz M.* Telecommunication networks: protocols, modeling and analysis, Part 1, 2. Moscow: Nauka. 1992.
2. *Budko P.A., Fedorenko V.V.* Management in communication networks. Mathematical models and optimization methods. Moscow: FIZMALIT Publishing House, 2003. 228 p.
3. *Akyildiz I. F., Wang X.* Wireless Mesh Networks, Wiley, Chichester, 2009.
4. *Siachalou S.* Efficient QoS routing. The International Journal of Computer and Telecommunications Networking. 2003. Vol. 43. Iss. 3. Pp. 351–367.

5. *Safonov A.A., Lyakhov A.I., Jurgenson A.N., Sokolova O.D.* Multiple routing with option to select transmission method in the channel. *Avtomatika i telemekhanika*. 2013. Iss. 10. Pp. 137–153.
6. *Chudnov A.M., Kirik D.I., Kurashev Z.V.* Optimization of information flow distribution in the information system based on the probability index of timely message delivery. *Radiotekhnicheskie i telekommunikacionnye sistemy*. 2017. No. 2. Pp. 41–49.
7. *Chudnov A.M., Kurashev Z.V.* Building-up principles of routing tables based on the optimization of flow distribution in the data transmission network. *High-tech in Earth Space Research*. 2017. Vol. 9. No. 6. Pp. 46–51.
8. *Guk I.I., Putilin A.N., Filippova T.S.* Hardware package of adaptive short-wave radio communication using frequency hopping spread spectrum. *Collected papers: Radar, navigation and communication. XX International Scientific and Technical Conference*. 2014. Pp. 948–958.
9. *Markin V.G., Ryzhkova A.G.* Routing protocols in mobile ad hoc networks. *Radiotekhnicheskie i telekommunikacionnye sistemy*. 2013. No. 4. Pp. 48–56.
10. *Iwata A. [et al.]* Scalable routing strategies for ad hoc wireless networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 1999. Vol. 17. Is. 8. Pp. 1369–1379. DOI: 10.1109/49.779920.
11. *Hong X., Xu K., Gerla M.* Scalable routing protocols for mobile ad hoc networks. *IEEE Network*. 2002. Vol. 16. No. 2. Pp. 11–21. DOI:10.1109/MNET.2002.1020231.
12. *Dymarsky Ya.S., Krutikova N.P., Yanovsky G.G.* *Managing communication networks: principles, protocols, application tasks*. Moscow: Svyaz' i biznes, 2003. 382 p.
13. *Yang Yu., Prasanna V.K., Krishnamachari B.* *Information Processing And Routing In Wireless Sensor Networks*. London: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2006. 204 p.
14. *Polyak B.T.* *Introduction to optimization*. Moscow: Nauka, 1983. 384 p.