

Об оценках числа виртуальных соединений и качественной доставке трафика данных в сотовых сетях мобильной связи на технологии GPRS

А. Н. Назаров

На основе развития энтропийного подхода разработаны оптимизационная модель расчета числа виртуальных соединений и оптимизационная модель расчета числа виртуальных соединений с заданным качеством обслуживания трафика, позволяющие оценивать ресурсное обеспечение узлового оборудования и трактов передачи данных в сотовых сетях мобильной связи на технологии GPRS. Варьируемыми параметрами модели с заданным качеством обслуживания трафика являются значения полос пропускания битового трафика различных категорий. Расчеты по разработанным моделям сводятся к последовательному решению совместных систем линейных уравнений.

Ключевые слова: GPRS, GGSN, SGSN, QoS, оптимизационная модель.

1. Введение: основные характеристики и принципы построения подсистемы GPRS

Возросшая потребность в беспроводном доступе в Интернет привела к дальнейшему развитию системы 2G. Так появилась система, называемая 2.5G. Примером технологии 2.5G является GPRS (General Packet Radio Services) — стандартизованная технология пакетной передачи данных, позволяющая использовать оконечное устройство мобильной связи для доступа в Интернет.

GPRS использует общий физический ресурс радиointерфейса совместно с существующими ресурсами системы GSM с коммутацией каналов [1]. Подсистему GPRS можно рассматривать как наложенную на сеть GSM. Это позволяет использовать одну и ту же физическую среду в сотах как для передачи речи с коммутацией каналов, так и для передачи данных с коммутацией пакетов. Ресурсы GPRS могут выделяться под передачу данных динамически в периоды, когда отсутствует сессия передачи информации с коммутацией каналов.

Для GPRS будет использоваться те же физические каналы, но эффективность их использования намного больше по сравнению с традиционной GSM с коммутацией каналов, поскольку несколько пользователей GPRS могут использовать один канал. Это позволяет повысить утилизацию каналов. Кроме того, GPRS использует сетевые ресурсы только в период передачи и приема данных.

1.1. Архитектура подсистемы GPRS. Сеть доступа и магистральная сеть в подсистеме GPRS

Внедрение подсистемы GPRS не требует кардинальной модернизации существующей сетевой инфраструктуры GSM. Архитектура сети GSM/GPRS представлена на рис. 1 [4, 5].

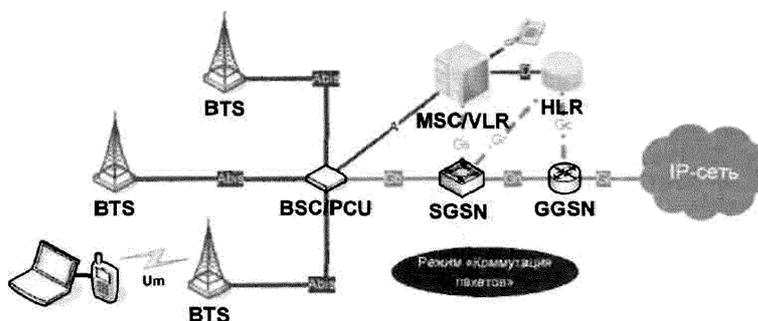


Рис. 1. Архитектура сети GSM/GPRS.

Ядро сети GPRS включает в себя совершенно новые сетевые элементы. В сети GSM появляются два новых узла [2]: Обслуживающий узел поддержки (пакетный коммутатор) GPRS — Serving GPRS Support Node (SGSN) и Шлюзовой узел поддержки GPRS — Gateway

GPRS Support Node (GGSN). Эта пара узлов физически могут быть реализованы [3] в виде одного аппаратного узла. Контроллер же базовых станций BSC объединяют с контроллером пакетов PCU (Packet Control Unit). Кроме того, для поддержки GPRS разработаны три новых класса абонентских терминалов.

На структурном уровне подсистему GPRS можно разделить на 2 части [6]: сеть доступа и сеть магистральная (опорная, базовая, Backbone). Сеть доступа включает все контроллеры и базовые станции системы GSM, которые поддерживают пакетную передачу данных на программном и аппаратном уровне. Её основным элементом, отвечающим за функциональность пакетной сети абонентского доступа, является сервисный узел SGSN, который берёт на себя все функции — от обработки пакетной информации до преобразования кадров GSM/GPRS в форматы, используемые протоколами TCP/IP сети Интернет. В сети доступа доставка данных между SGSN и BSC может осуществляться по технологии Frame Relay.

Управление радиоканалами, обработка пакетов данных между SGSN и АТ обеспечивается с помощью контроллера пакетов PCU.

В состав базовой станции BTS входит новое кодирующее устройство CCU (Channel Codec Unit). Контроллер базовой станции BSC в режиме пакетной коммутации обеспечивает:

- предоставление каналов с пакетной передачей данных абонентам сети в соответствии с требуемым качеством услуг;
- фрагментацию и сборку кадров для пакетной передачи данных по радиоканалу;
- контроль качества пакетной передачи данных по радиоканалу.

Шлюзовой узел GGSN обеспечивает связь с внешними по отношению к подсистеме GPRS IP-сетями передачи пакетных данных: Интернет, Интранет и т. д. Обмен информацией в магистральной сети между SGSN и GGSN происходит на основе IP-протокола с помощью функционирующего поверх него протокола GTP, обеспечивающего механизм туннелирования. Магистральная сеть с поддержкой IP может быть построена на основе Ethernet, ATM, Frame Relay, IP/MPLS. Магистральная сеть GPRS может состоять из нескольких узлов SGSN и GGSN, в неё также входят: сервер доменных имён

DNS, шлюз для связи с системой тарификации (Charging Gateway), пограничный шлюз (Border Gateway) и др. При работе сети устанавливаются множественные соединения между узлами SGSN и GGSN. Один узел SGSN может обеспечивать сервис для множества шлюзов GGSN. Один шлюз GGSN может иметь связь со многими узлами SGSN для распределения трафика между множеством территориально распределённых абонентских терминалов (АТ).

SGSN обслуживает всех абонентов GPRS, физически расположенных в пределах географической зоны обслуживания SGSN. Этот узел управляет функциями подключения, отключения АТ, обновления информации о местоположении и т. д. Абоненты GPRS могут быть обслужены любым узлом SGSN в сети в зависимости от их местоположения.

Контроль подсистемы GPRS и ее управление осуществляются центром управления и обслуживания ОМС-R/G, являющимся своеобразным интерфейсом между технической частью системы и обслуживающим персоналом.

1.2. О виртуальных соединениях в GPRS

Для передачи пакетов данных пользователей и пакетов сигнальной информации через радиointерфейс в сети GSM/GPRS организуются логические или виртуальные соединения (ВС), отличные от каналов сети GSM. Для передачи информации они используют физические каналы, выделенные из общего частотно-временного ресурса GSM. Эти физические каналы предназначены для передачи пакетного IP-трафика между АТ и BTS и называются каналами PDCH (Packet Data Channel). Каналы PDCH могут быть сконфигурированы в действующих приемопередатчиках TRX в двух случаях:

- при их совместном использовании с обычными каналами трафика сети GSM;
- в выделенном режиме, когда для подсистемы GPRS закрепляются каналы трафика (при установлении новых блоков TRX и выделении отдельных рабочих частот).

GPRS, как расширение GSM, использует такие же частотные диапазоны, как и GSM и его «производные» (например, GSM1800,

PCS1900), такую же структуру TDMA/FDMA для формирования физических каналов [6, 7]. Для восходящих и нисходящих каналов определено множество частотных каналов FDMA с шириной полосы 200 кГц. Далее они подразделяются в TDMA фреймы длительностью 4,615 мс. Каждый фрейм TDMA делится на восемь канальных интервалов (тайм слотов, временных окон, TS), каждый из которых является физическим каналом GSM.

Для передачи абонентских пакетов и пакетов различной сигнальной информации через радиointерфейс в сети GPRS организуются BC, отличные от TS — физических каналов классической GSM.

Эти физические каналы распределяются между службой GPRS и традиционными GSM-услугами на основе коммутации каналов. Причём это распределение может быть статическим или динамическим.

Структурно каналы подсистемы GPRS надстраиваются над каналами сети GSM (используют ту же структуру тайм-слотов: 114 информационных битов, служебная информация и обучающая последовательность). Особенностью пакетных каналов PDCH является то, что их основу составляют радиоблоки емкостью $4 \times 114 = 456$ бит, которые последовательно передаются в одноименных тайм-слотах четырех кадров.

Передача информации (поток цифровых радиосигналов) в GPRS осуществляется со скоростью 270,833 кбит/с с использованием гауссовской манипуляции с минимальным сдвигом (GMSK). Теоретически GPRS позволяет выделить одному пользователю все восемь TS на одной несущей, обеспечивая максимальную скорость передачи данных 172,2 кбит/с. Однако, с учётом передачи управляющих протокольных блоков данных и избыточности кодов с коррекцией ошибок, реальная скорость составляет 115,2 кбит/с (14,4 кбит/с на TS) [6].

BC подсистемы GPRS можно разделить на две группы: BC сигнализации и BC передачи данных пользователей. По BC сигнализации осуществляется инициализация, управление и завершение GPRS-сессий, а также синхронизация, управление мощностью передачи и т. д. С целью эффективного мультиплексирования пакетного IP-трафика к/от мобильным терминалам в GPRS определён тип физического канала — так называемый канал передачи пакетированных данных PDCH (Packet Data Channel), который может быть распределён на несколько BC.

1.3. Профили качества обслуживания

В GSM/GPRS сетях абоненты могут получить широкий спектр услуг, которые характеризуются определённым качеством обслуживания QoS (Quality of Service). При подписке абонент получает профиль QoS (QoS Profile). Это максимальное качество обслуживания, которое может быть предоставлено абоненту. Профиль QoS характеризует сочетание значений атрибутов QoS. Атрибут является показателем (параметром), характеризующим процесс доставки информации абоненту в GPRS подсистеме. Значения атрибутов должны наилучшим образом приближаться к требованиям конкретных приложений интересных абоненту. Определена следующая классификация показателей QoS [6]:

- приоритетность (Precedence class);
- задержка (Delay class);
- надёжность (Reliability class);
- пиковая пропускная способность (Peak throughput class);
- средняя пропускная способность (Mean throughput class).

«Профиль» сессии (или PDP-context) записывается в АТ, а также в обслуживающие его HLR, SGSN и GGSN. PDP-context содержит много информации, включая QoS-профили и маршрутную информацию для передачи пакетов между АТ и GGSN. Во время согласования профиля QoS АТ должен иметь возможность запросить значение каждого атрибута QoS, включая хранящиеся в HLR значения по умолчанию. Сеть должна согласовать каждый атрибут на уровне, соответствующем доступным ресурсам GPRS. Сеть должна всегда стремиться предоставлять необходимые ресурсы для поддержки согласованного профиля QoS.

В таблице 1 приведены различные требования к подсистеме GPRS, предъявляемые различными услугами передачи данных [2].

В [8] для достаточно общего случая пачечного пакетного трафика в цифровых сетях с интеграцией служб, получены результаты, обладающие общностью применения к проблематике доставки трафика в подсистеме GPRS. А именно: результат ступенчатой аппроксимации полипачечного случайного процесса $b^{(s)}(t)$ битовой скорости генерации информации s -м источником (служба, услуга или абонент) на

Таблица 1.

Услуги передачи данных	Максимальная скорость передачи данных, кбит/с		Наличие (+) / Отсутствие (-) требования	
	В линии «вверх»	В линии «вниз»	К надежности	К режиму реального времени
Доступ к базам данных	9,6	28,8	+	-
Просмотр web-страниц	9,6	9,6...28,8	+	-
Аудиовизуальная информация (Формат MPEG-4)	9,6	64	-	+
Передача данных (Формат UDI)	9,6...64	9,6...64	+	-
Электронная почта	9,6...28,8	9,5...28,8	+	-
Электронные новости	9,6	28,8	+	-
Передача факсов (Группа 3)	14,4	14,4	+	+
Видеоконференцсвязь (H.324)	28,8	28,8	-	+
Видеотелефония (H.320)	64...384	64...384	-	+
Видеотелефония (H.324)	28,8	28,8	-	+
Телеметрия	9,6	9,6	+	-
Онлайн-банковские услуги	9,6	9,6...64	+	-
Диспетчерская связь	9,6	9,6	+	-
Медленные видеоизображения	9,6...19,2	9,6...19,2	-	+
Дистанционное управление системами безопасности	2,4	2,4	-	+
Мультипользовательские игры	9,6...64	9,6...64	+	+

временных пачечных интервалах $[t_{0_i}, t_{p_i}]$, $i = 1, \dots, n_s(t)$ к моменту t текущей сессии есть ([8])

$$\tilde{b}_d^{(s)}(t) = \sum_{i=1}^{n_s(t)} B_{\max_i}^{(s)} [\Theta(t - t_{0_i}) - \Theta(t - t_{p_i})], \quad (1)$$

а плотность распределения вероятностей этого случайного процесса —

$$f(\tilde{b}_d^{(s)}(t)) = \sum_{j=1}^{n_s(t)} p_j^{(s)} \delta(\tilde{b}_d^{(s)}(t) - B_{\max_j}^{(s)}) [\Theta(t - t_{0_j}) - \Theta(t - t_{p_j})],$$

где $p_j^{(s)}$ — вероятность того, что $\tilde{b}_d^{(s)}(t)$ принимает значение $B_{\max_j}^{(s)}$,

$$\Theta(t) = \begin{cases} 0, & t < 0, \\ 1, & t \geq 0, \end{cases} \quad \text{а} \quad \sum_{j=1}^{n_s(t)} p_j^{(s)} k_{\Pi_j}^{(s)} = 1 \text{ — характеристическое свойство,}$$

$k_{\Pi_i}^{(s)} = \frac{B_{\max_i}^{(s)}}{B_{\text{ср}}^{(s)}}$ — коэффициент пачечности, $B_{\max_j}^{(s)}$, $B_{\text{ср}}^{(s)}$ — соответственно максимальное на j -м пачечном временном интервале и среднее значение битовой скорости генерации информации s -м источником.

Тем не менее, на сегодняшний день, несмотря на высокую положительную динамику процессов развития, масштабирования, планирования и проектирования GPRS подсистем, отсутствуют универсальные методы оценки таких интегральных характеристик этих подсистем, как: потенциально возможное число ВС, потребный ресурс и число ВС с различным QoS трафика. Эти характеристики непосредственно связаны с абонентской емкостью, производительностью узлового, коммутационного оборудования и пропускной способностью как сети доступа, так и магистральной сети GPRS подсистемы. Все это предопределяет актуальность предложенных в данной статье новаций.

2. Постановка задачи расчета числа ВС в подсистеме GPRS

Пространство, где развернута территориально-распределенная подсистема GPRS, включает в себя: магистральную компоненту, построенную на туннельной GTP-технологии, наложенной на IP и сети абонентского доступа, построенную на технологии Frame Relay.

Требуется найти распределение ВС между узлами GGSN и абонентами, заинтересованными в услугах данной GPRS, которое обеспечивает максимальное число абонентов.

Такое распределение ВС данной подсистемы GPRS от источников информации до получателей информации, является достаточно полной оценкой наполнения подсистемы GPRS в информационном смысле, то есть по трафику.

Следуя рекомендациям [9, 10] определим покрывающую область рассматриваемой подсистемы GPRS, исходя из нижеследующего.

Пусть i — номера узлов SGSN, $i = \overline{1, n}$, а j — номера узлов GGSN, $j = \overline{1, m}$, составляющих магистральную сеть подсистемы GPRS на некоторый фиксированный момент времени.

При определении связей между узлами наиболее существенным для каждой пары узлов является общее число ВС от источников информации, замыкаемых на i -й узел SGSN сети доступа, связанных с шлюзовым j -м узлом GGSN. Обозначим это число через x_{ij} . Матрица $X = \|x_{ij}\|$ называется распределением ВС магистральной сети подсистемы GPRS или матрицей тяготений и характеризует свойства этой сети.

Обозначим через B_i^{ICX} [бит/с] производительность i -го узла SGSN, предназначенную для транспортирования исходящего абонентского трафика, а через B_j^{BX} производительность j -го узла GGSN, предназначенную для приема входящего трафика из внешней по отношению к рассматриваемой подсистеме GPRS сети. Пусть b_{ij} — текущее усредненное значение суммарной битовой скорости передачи информации [9, 10] от всех источников i -го узла SGSN, передающих информацию по x'_{ij} ВС в j -й узел GGSN, определяемое как

$$b_{ij} = \frac{1}{x'_{ij}} \sum_{s=1}^{x'_{ij}} b_{ij}^{(s)}, \quad (2)$$

где $b_{ij}^{(s)}$ есть определяемое с помощью (1) значение битовой скорости s -го источника, ВС которого соединяет i -й узел SGSN с j -м узлом GGSN.

Введем новую вспомогательную переменную $B_j^{i\text{BX}}$ с помощью следующего соотношения

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} b_{ij} = \sum_{i=1}^n B_j^{i\text{BX}}, \quad j = \overline{1, m}. \quad (3)$$

Заметим, что смысловое значение $B_j^{i\text{BX}}$ — производительность j -го узла GGSN, затрачиваемая на обработку пакетного трафика, поступающего от i -го узла SGSN.

$$\prod_{i=1}^n \frac{B_j^{i\text{BX}}}{B_j^{\text{BX}}} = \frac{\prod_{i=1}^n B_j^{i\text{BX}}}{(B_j^{\text{BX}})^n} = \varepsilon, \quad j = \overline{1, m},$$

где ε играет роль показателя относительной производительности (ресурсов) инцидентных узлов и может задаваться как параметр из практических соображений. Выбор ε обусловлен учетом свойств пакетной технологии магистральной сети и сети доступа подсистемы GPRS, особенностями функционирования системы управления подсистемы GPRS и выполнении других функций (то есть некий ресурс со упомянутым значением ε должен играть роль «неприкосновенного запаса»). Логарифмируя, получим

$$\sum_{i=1}^n \ln B_j^{i\text{BX}} = n \ln \varepsilon B_j^{\text{BX}} = \ln B_j^{\prime\text{BX}}, \quad j = \overline{1, m}.$$

При $\varepsilon = \frac{1}{(B_j^{\text{BX}})^{n-1}}$ выполняется $\ln B_j^{\prime\text{BX}} = \ln B_j^{\text{BX}}$. Запишем следующие соотношения

$$\sum_{i=1}^n \ln B_j^{i\text{BX}} = \ln B_j^{\prime\text{BX}}, \quad j = \overline{1, m}, \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} b_{ij} = \sum_{j=1}^m B_i^{j\text{ИСХ}}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^m \ln B_i^{j\text{ИСХ}} = \ln B_i^{\prime\text{ИСХ}}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (6)$$

Заметим, что по аналогии с (3) смысловое значение вспомогательной переменной $B_i^{j\text{ИСХ}}$ — производительность i -го узла SGSN, затрачиваемая на обработку пакетного трафика, поступающего от j -го узла GGSN.

При $i = j$ выполняется неравенство

$$B_i \geq B_i^{\text{ИСХ}} + B_j^{\text{BX}},$$

где B_i — значение производительности i -го узла SGSN.

Все существенные технико-экономические требования к сети GPRS-подсистемы можно записать [9] в виде

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{ij}^{\ell} x_{ij} = C^{\ell}, \quad \ell = \overline{1, L}, \quad (7)$$

где c_{ij}^{ℓ} — значение ℓ -го технико-экономического показателя при осуществлении связи из i -й области, где расположен источник информации, в j -ю область, где расположен граничный коммутатор принимающей стороны; C^{ℓ} — ограничение на ℓ -й технико-экономический показатель; L — число ограничений на технико-экономические показатели, учитываемые в модели.

С учетом того, что число ВС в магистральной GPRS-подсистеме может быть записано в виде

$$N = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij},$$

число состояний магистральной GPRS-подсистемы может быть записано в виде

$$W(X) = \frac{N!}{\prod_{ij} x_{ij}!}.$$

Так как рассматривается территориально-распределенная подсистема GPRS, взаимодействующая в общем случае со всем Internet-сообществом, то число источников информации велико. С использованием формулы Стирлинга [9, 10] можно записать

$$\ln W = \ln N! - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij} \ln x_{ij}. \quad (8)$$

Тогда задача поиска матрицы $X = \|x_{ij}\|$, с которой связано наибольшее число $W(X)$ состояний при ограничениях (3)–(7), формально сводится в «энтропийной постановке» к поиску максимума $\ln W$ при ограничениях (3)–(7).

3. Оптимизационная модель числа ВС подсистемы GPRS

Решение данной задачи условной оптимизации находится по методу неопределенных множителей Лагранжа, при условии применимости данного метода, а именно, $nm > 2(n + m) + L$. Если же это условие не выполняется, что соответствует малой размерности задачи условной оптимизации, то решение находится, например, тотальным перебором и сравнением.

Составим лагранжиан с учетом выражения (8)

$$\begin{aligned}
 L = \ln N! - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij} \ln x_{ij} + \\
 + \sum_{j=1}^m \left[\lambda 1_j \sum_{i=1}^n (B_j^{i\text{BX}} - x_{ij} b_{ij}) + \lambda 2_j \left(\sum_{i=1}^n \ln B_j^{i\text{BX}} - \ln B_j^{\text{BX}} \right) \right] + \\
 + \sum_{i=1}^n \left[\lambda 3_i \sum_{j=1}^m (B_i^{j\text{ИСX}} - x_{ij} b_{ij}) + \lambda 4_i \left(\sum_{j=1}^m \ln B_i^{j\text{ИСX}} - \ln B_i^{\text{ИСX}} \right) \right] + \\
 + \sum_{\ell=1}^L \lambda 5_\ell \left(c^\ell - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{ij}^\ell x_{ij} \right),
 \end{aligned}$$

здесь $\lambda 1_j \div \lambda 5_\ell$ — множители Лагранжа.

Приравнивая нулю первые частные производные лагранжиана по x_{ij} , получим систему уравнений, каждое из которых имеет вид

$$-\ln x_{ij} - 1 - \lambda 1_j b_{ij} - \lambda 3_i b_{ij} - \sum_{\ell=1}^L \lambda 5_\ell c_{ij}^\ell = 0.$$

Общий вид решения упомянутой системы уравнений

$$x_{ij} = \exp \left(-1 - \lambda 1_j b_{ij} - \lambda 3_i b_{ij} - \sum_{\ell=1}^L \lambda 5_\ell c_{ij}^\ell \right). \quad (9)$$

Подставляя (9) в уравнения (3)–(5) и применяя операцию логарифмирования с учетом ее свойств, получим совместную систему линейных уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} -\lambda_1 b_{ij} - \lambda_3 b_{ij} - \sum_{\ell=1}^L \lambda_5 c_{ij}^{\ell} = 1 + \ln B_j^{i\text{BX}} - \ln b_{ij}, \quad i = 1 \div n, j = 1 \div m, \\ \sum_{i=1}^n \ln B_j^{i\text{BX}} = \ln B_j^{\text{BX}}, \quad j = 1 \div m, \\ -\lambda_1 b_{ij} - \lambda_3 b_{ij} - \sum_{\ell=1}^L \lambda_5 c_{ij}^{\ell} = 1 + \ln B_i^{j\text{ИСХ}} - \ln b_{ij}, \quad i = 1 \div n, j = 1 \div m, \\ \sum_{i=1}^m \ln B_i^{j\text{ИСХ}} = \ln B_i^{\text{ИСХ}}, \quad i = 1 \div n, \\ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left(-\lambda_1 b_{ij} - \lambda_3 b_{ij} - \sum_{\ell=1}^L \lambda_5 c_{ij}^{\ell} \right) = 1 + \ln C^{\ell} - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{ij}^{\ell}, \quad \ell = 1 \div L, \end{array} \right. \quad (10)$$

относительно $2nm + n + m + L$ неизвестных, в число которых входят: nm неизвестных $\ln B_j^{i\text{BX}}$, nm неизвестных $\ln B_i^{j\text{ИСХ}}$, n неизвестных λ_3 , m неизвестных λ_1 и L неизвестных λ_5 . Решение системы (10) из $2nm + n + m + L$ линейных уравнений позволяет оценить потенциальное количество ВС между абонентами и узлами GPRS-подсистемы, что является важной характеристикой всей подсистемы GPRS в целом. При вычислении усредненного значения суммарной битовой скорости (2) можно в качестве значения битовой скорости s -го источника использовать ее максимальное или минимальное значения, тогда решение системы линейных уравнений (10) будет служить соответственно нижней или верхней оценкой потенциального числа ВС.

4. Формулировка задачи расчета числа ВС классов трафика с заданным QoS для битовой скорости в магистральной сети подсистемы GPRS

В технологии GPRS, для обеспечения QoS, классифицирована скорость трафика различных служб. В таблице 2 представлены классы пиковой скорости, в таблице 3 — классы средней скорости [6].

Пусть $B_{\text{Тр}}$ — значение полосы пропускания в звене (SGSN–GGSN или BSC–SGSN) в данный момент времени. Тогда $B_{\text{Тр}}$ можно распределить между всеми 6 классами пиковой скорости трафика следующим образом:

Таблица 2. Классы пиковой скорости.

Класс пиковой скорости	Пиковая скорость в октетах в секунду
1	Up to 1 000 (8 кбит/с)
2	Up to 2 000 (16 кбит/с)
3	Up to 4 000 (32 кбит/с)
4	Up to 8 000 (64 кбит/с)
5	Up to 16 000 (128 кбит/с)
6	Up to 32 000 (256 кбит/с)
7	Up to 64 000 (512 кбит/с)
8	Up to 128 000 (1024 кбит/с)
9	Up to 256 000 (2048 кбит/с)

$$B^i \leq b_i \leq B_{\text{TP}} - \sum_{\substack{j=i+1 \\ j \neq N-1}}^{N-1} b_j, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (11)$$

где $b_i = \text{const}_i$, $N = 6$.

При определении качества связи в звене существенным для каждой службы является общее число ВС к/от ее абонентов. Обозначим через x_{ij} число ВС j -й службы i -й класса, где $i \in I = \{1, 2, \dots, N\}$, $j = 1 \div m$. Матрица $X = \|x_{ij}\|$ называется распределением ВС в звене GPRS-подсистемы и характеризует свойства этого распределения.

Требуется найти распределение ВС между узлами GGSN и абонентами, заинтересованными в услугах данной GPRS, которое обеспечивает QoS в части пиковой и средней пропускной способности для максимального числа абонентов.

Пусть b_{ij} — текущее усредненное значение суммарной битовой скорости передачи информации от всех x'_{ij} источников i -го класса j -й службы, передающих информацию по ВС в звене, определяемое как

$$b_{ij} = \frac{1}{x'_{ij}} \sum_{s=1}^{x'_{ij}} b_{ij}^{(s)}, \quad (12)$$

Таблица 3. Классы средней скорости.

Класс средней скорости	Пиковая скорость в октетах в час
1	Наилучшая попытка
2	100 (0,22 бит/с)
3	200 (0,44 бит/с)
4	500 (1,11 бит/с)
5	1 000 (2,2 бит/с)
6	2 000 (4,4 бит/с)
7	5 000 (11,1 бит/с)
8	10 000 (22 бит/с)
9	20 000 (44 бит/с)
10	50 000 (111 бит/с)
11	100 000 (0,22 кбит/с)
12	200 000 (0,44 кбит/с)
13	500 000 (1,11 кбит/с)
14	1 000 000 (2,2 кбит/с)
15	2 000 000 (4,4 кбит/с)
16	5 000 000 (11,1 кбит/с)
17	10 000 000 (22 кбит/с)
18	20 000 000 (44 кбит/с)
19	50 000 000 (111 кбит/с)

где $b_{ij}^{(s)}$ есть определяемое с помощью (1) значение битовой скорости s -го источника, ВС которого проходит через звено.

Тогда справедливы следующие соотношения

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} b_{ij} = \sum_{j=1}^m B_i^j, \quad i \in I, \quad (13)$$

$$\sum_{j=1}^m \ln B_i^j = \ln b_i', \quad i \in I. \quad (14)$$

Здесь имеют место соображения аналогичные $\ln B_j^{\text{BX}} = \ln B_j^{\text{BX}}$ при выводе соотношений (4).

Все существенные технико-экономические требования к трафику в звене GPRS-подсистемы можно записать [9] в виде

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{ij}^{\ell} x_{ij} = C^{\ell}, \quad \ell = \overline{1, L}, \quad (15)$$

где c_{ij}^{ℓ} — значение ℓ -го технико-экономического показателя при передаче трафика i -й категории j -й службы; C^{ℓ} — ограничение на ℓ -й технико-экономический показатель; L — число ограничений на технико-экономические показатели, учитываемые в модели.

С учетом того, что число ВС в звене подсистемы GPRS может быть записано в виде

$$N = \sum_{i \in I} \sum_{j=1}^m x_{ij},$$

число состояний звена подсистемы GPRS может быть записано в виде

$$W(X) = \frac{N!}{\prod_{ij} x_{ij}!}.$$

Так как рассматривается звено территориально-распределенной подсистемы GPRS, то число источников информации велико. С использованием формулы Стирлинга [9] можно записать

$$\ln W = \ln N! - \sum_{i \in I} \sum_{j=1}^m x_{ij} \ln x_{ij}. \quad (16)$$

Тогда задача поиска матрицы $X = \|x_{ij}\|$, с которой связано наибольшее число $W(X)$ состояний при ограничениях (13)–(15), формально сводится в «энтропийной постановке» к поиску максимума $\ln W$ при ограничениях (13)–(15).

5. Оптимизационная модель расчета числа ВС трафика разных классов звена в GPRS подсистеме

По аналогии с вышеизложенным, будем искать решение данной задачи условной оптимизации с помощью метода неопределенных

множителей Лагранжа. Условие применимости данного метода здесь формулируется как $nm > 2n + L$. Если же это условие не выполняется, что соответствует малой размерности задачи условной оптимизации, то решение находится, например, тотальным перебором и сравнением.

Как и в 3 разделе составим лагранжиан с учетом выражения (16)

$$L = \ln N! - \sum_{j=1}^m x_{ij} \ln x_{ij} + \\ + \sum_{i \in I} \left[\lambda 1_i \sum_{j=1}^m (B_i^j - x_{ij} b_{ij}) + \lambda 2_i \left(\ln b'_i - \sum_{j=1}^m \ln B_i^j \right) \right] + \\ + \sum_{\ell=1}^L \lambda 3_\ell \left(c^\ell - \sum_{i \in I} \sum_{j=1}^m c_{ij}^\ell x_{ij} \right).$$

Приравнивая нулю первые частные производные лагранжиана по x_{ij} , получим систему уравнений, каждое из которых имеет вид

$$-\ln x_{ij} - 1 - \lambda 1_j b_{ij} - \sum_{\ell=1}^L \lambda 3_\ell c_{ij}^\ell = 0.$$

Общий вид решения упомянутой системы уравнений

$$x_{ij} = \exp \left(-1 - \lambda 1_j b_{ij} - \sum_{\ell=1}^L \lambda 3_\ell c_{ij}^\ell \right). \quad (17)$$

Подставляя (17) в уравнения (13)–(15) и применяя операцию логарифмирования с учетом ее свойств, получим следующую совместную систему линейных уравнений

$$\begin{cases} -\lambda 1_j b_{ij} - \sum_{\ell=1}^L \lambda 3_\ell c_{ij}^\ell = 1 + \ln B_i^j - \ln b_{ij}, & i \in I, j = 1 \div m, \\ \sum_{j=1}^m \ln B_i^j = \ln b'_i, & i \in I, \\ \sum_{i \in I} \sum_{j=1}^m \left(-\lambda 1_j b_{ij} - \sum_{\ell=1}^L \lambda 3_\ell c_{ij}^\ell \right) = 1 + \ln C^\ell - \sum_{i \in I} \sum_{j=1}^m c_{ij}^\ell, & \ell = 1 \div L, \end{cases} \quad (18)$$

Система линейных уравнений (18) содержит nm неизвестных $\ln B_i^j$, n неизвестных λ_{1i} , и L неизвестных $\lambda_{3\ell}$. Решение системы из $nm+n+L$ линейных уравнений (18) позволяет оценить потенциальное количество ВС в полосах пропускания b_i , $i \in I$ для трафиков i -го класса, что является важной характеристикой звена GPRS-подсистемы. При вычислении усредненного значения суммарной битовой скорости (12) можно в качестве значения битовой скорости s -го источника использовать ее максимальное или минимальное значения, тогда решение системы линейных уравнений (18) будет служить нижней или верхней оценкой потенциального числа ВС трафиков разных классов. Модель является параметрической относительно значений полос b_i , что позволяет проводить многовариантный расчет распределения ВС в звене подсистемы GPRS.

6. Заключение

Полученная основе развития энтропийного подхода модель числа ВС подсистемы GPRS описывает наиболее вероятное распределение ВС между источниками и получателями информации по фиксированным в пространстве узлам SGSN и GGSN, и все ее коэффициенты имеют определенный физический смысл. Модель позволяет получать значения верхней и нижней оценок числа ВС как функций значений битовой скорости информационных источников и сводится к решению системы линейных уравнений.

Полученная на основе развития энтропийного подхода модель расчета числа ВС классифицированного трафика разных служб в звене в GPRS-подсистемы описывает наиболее вероятное распределение ВС трафика разных классов по выделенным полосам, и все ее коэффициенты имеют определенный физический смысл. Множество классов трафика может варьироваться для конкретных сетей, в зависимости от приложений, и пополняться в результате научно-технического прогресса. Модель позволяет получать верхнюю и нижнюю оценки ВС как функций битовой скорости источников информации. Модель является параметрической относительно значений полос битового трафика различных категорий, это позволяет проводить многовариантный расчет распределения ВС в звене, что может служить

исходными данными для оценки потребного ресурса как первичной сети подсистемы GPRS, так и узлового оборудования звена.

Скорость сходимости, точность и устойчивость решений напрямую зависит от размерности и значений коэффициентов решаемых систем линейных уравнений. При этом обязательно исследование матрицы, составленной из упомянутых коэффициентов, на невырожденность.

Полученные в данной работе результаты могут быть полезными при решении задачи маршрутизации и при структурно-топологическом синтезе GPRS-подсистем на предпроектной стадии.

Если перейти от рассмотрения битовой скорости источника информации (1) к пакетной скорости

$$r_{\text{cell}}^{(s)}(t) = \tilde{b}_d^{(s)}(t)/(L_{\text{inf}} + L_{\text{head}}),$$

где L_{inf} , L_{head} — соответственно длина информационной части и заголовка пакета, то весь вышеизложенный формализм после соответствующих несложных преобразований, можно применять для любых пакетных сетей, ориентированных на соединение.

Отметим, что во всех рассмотренных выше энтропийных моделях оптимизации фигурировали ограничения в виде равенств. На практике, при создании систем очень часто используются условия в виде неравенств. Ограничения в виде неравенств сводятся к ограничениям в виде равенств известным способом [9, 10], суть которого заключается в следующем. К искомым переменным добавляются новые фиктивные переменные, которые в других условиях, где они не используются, входят с нулевыми коэффициентами.

Список литературы

- [1] Громаков Ю. А., Северин А. В., Швецов В. А. Технологии определения местоположения в GSM и UMTS: Учеб. пособие. — М.: Эко-Трендз, 2005.
- [2] Тихвинский В. О., Терентьев С. В. Управление и качество услуг в сетях GPRS/UMTS. — М.: Эко-Трендз, 2007.
- [3] Обзор системы GSM. Корпоративный тренинг. — Вымпелком, 2004.

- [4] 3GPP TR 060. General Packet Radio Service (GPRS); Stage 1.
- [5] 3GPP TS 43.064. General Packet Radio Service (GPRS); Overall Description of the GPRS Radio Interface; Stage 2.
- [6] Закиров З. Г., Надеев А. Ф., Файзуллин Р. Р. Сотовая связь стандарта GSM. Современное состояние, переход к сетям третьего поколения. — М.: Эко-Тренз, 2004.
- [7] Kalden R., Meirick I., Meyer M. Ericsson Research. Wireless Internet Access Based on GPRS // Ericsson Eurolab Deutschland, IEEE Personal Communications. April, 2000.
- [8] Назаров А. Н. Модели и методы расчета структурно-сетевых параметров ATM-сетей. — М.: Горячая линия-Телеком, 2002.
- [9] Назаров А. Н. Метод покрывающих областей для расчета числа виртуальных соединений и оптимизационная модель расчета разнокатегорийного трафика звена в ATM-сети на основе энтропийного подхода // АиТ. 2003. № 11. С. 96–105.
- [10] Nazarov A. N. The Covering Regions Method for Determining the Number of Virtual Connections and the Optimization Model for the Link Hetero-Categorical Traffic Calculation in ATM-Networks Using Entropy Approach // Automation and Remote Control. Vol. 64, № 11. — USA, New York, 2003. P. 1734–1742.