

РАДИОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

УДК 621.391.1

*Воробієнко П.П., Струкало М.І., Рожновская И.Ю., Струкало С.М.
Воробієнко П.П., Струкало М.І., Рожновська І.Ю., Струкало С.М.
Vorobiyenko P.P., Strukalo M.I., Rozhnovskaya I.Yu., Strukalo S.M.*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ СЛУЖЕБНОЙ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ПЕРЕДАЧЕ ДАННЫХ В СЕТЯХ С КОММУТАЦИЕЙ ПАКЕТОВ

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ФОРМУВАННЯ СЛУЖБОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ ПРИ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ В МЕРЕЖАХ З КОМУТАЦІЄЮ ПАКЕТІВ

MODELING OF PROCESSES OF SERVICE INFORMATION GENERATION DURING DATA TRANSMISSION IN PACKET NETWORKS

Аннотация. Разработана математическая модель формирования служебной информации протоколами сетей с коммутацией пакетов, учитывающая количественные преобразования данных в процессе их передачи. При моделировании рассматривались процедуры, которые изменяют объемы передаваемой информации: выравнивают объем данных, агрегируют пакеты и сегментируют данные.

Анотация. Розроблено математичну модель формування службової інформації протоколами мереж з комутацією пакетів, яка враховує кількісні перетворювання даних в перебігу їхнього передавання. При моделюванні розглядалися процедури, котрі змінюють обсяги передаваної інформації: вирівнювання обсягу даних, агрегування пакетів та сегментування даних.

Summary. The mathematical model considering quantitative transformations of the information by packet network protocols during transmission was developed. The following procedures changing transmitting information volume were investigated when modeling: data volumes alignment, packets aggregation and segmentations of data.

Передача информации в сетях с коммутацией пакетов описывается с помощью вербальной архитектурной модели – базовой модели взаимодействия открытых систем (Open System Interconnection – OSI) [1]. Эта модель структурирует процессы обработки и передачи информации во взаимодействующих системах на семь протокольных уровней. Основная проблема, связанная со взаимодействием протоколов этих уровней, состоит в эффективной обработке и передаче информации любому потребителю с требуемым качеством (скоростью, точностью и т. п.). Для решения этой проблемы на каждом уровне модели OSI к данным пользователей, которые необходимо преобразовать и передать, протоколы добавляют необходимую служебную (управляющую) информацию. Однако эта дополнительная служебная информация приводит к ухудшению некоторых технико-экономических показателей систем передачи данных, например, таких как пропускная способность, задержка, цена передачи полезной информации и т. п. [2...8].

На пропускную способность сетей с коммутацией пакетов в значительной степени влияют используемые телекоммуникационные протоколы, имеющие свои процедурные особенности, предпочтительные области применения и параметры, например максимально допустимый размер кадра. По структуре формируемый сетевыми устройствами кадр содержит данные с информацией пользователя сети, а также заголовок и иногда концевик со служебной управляющей информацией. При анализе эффективности сети и выборе оптимального стека протоколов и технологий канального уровня важным является определение количественных соотношений между пользовательской и служебной информацией [3]. Эта задача рассматривалась во многих источниках, например в [3...8], где либо анализировались структуры полей пакетов (кадров, ячеек) [3...5], либо оценивалась эффективность отдельных протоколов и технологий сетей с коммутацией пакетов [3...6]. В [7, 8] предложены модели количественных преобразований данных использующие коэффициенты относительного изменения объема информации [7] и стоимости единицы полезной информации [8]. Однако эти модели не учитывают процедур выравнивания объемов данных и агрегирования пакетов, а сегментация данных рассматривалась для частного случая [6, 7].

Целью данной работы является обобщение, детализация и моделирование процессов количественных преобразований информации при передаче данных пользователей с учетом служебных данных, необходимых для управления передачей в сетях с коммутацией пакетов.

Для решения поставленной задачи рассмотрим основные протокольные процедуры преобразования данных во взаимодействующих системах сетей с коммутацией пакетов, которые приводят к изменению объемов передаваемой информации. Это, например, процедуры формирования заголовков и концевиков пакетов, выравнивания объемов данных, агрегатирования пакетов, сегментации (фрагментации) данных.

В передающей системе потоки данных, создаваемые приложениями пользователей при их продвижении к физическому уровню, испытывают некоторые преобразования, связанные с кодированием, шифрованием, управлением, сегментацией, адресацией и т. п. Результатом этих преобразований является изменение структуры данных и/или добавление служебной информации в заголовке (концевике) блока данных. При достижении физического уровня блоки данных (кадры, пакеты) содержат служебную информацию всех протокольных уровней.

В принимающей системе протокольные объекты каждого уровня анализируют и используют предназначенную для них служебную информацию, выполняя соответствующие данному уровню преобразования, например синхронизацию, декодирование, выявление ошибок, десегментацию и т. п. Результатом этих преобразований является восстановление исходной структуры данных и/или удаление служебной информации.

1. Формирование заголовков пакетов. Одной из основных протокольных процедур является формирование служебных данных в заголовках и концевиках пакета передающей системы. Количество $\Delta I^{(n)}$ служебной (управляющей) информации, формируемой в пакете на n -м уровне (подуровне) системы, зависит от вида управляющей функции $f^{(n)}$ протокола этого уровня (подуровня) и совокупности параметров его процедур, т. е.

$$\Delta I^{(n)} = f^{(n)}(I^{(n+1)}, \Lambda^{(n)}), \quad n = \overline{1, N}, \quad (1)$$

где $I^{(n+1)}$ – количество информации, поступающей с выхода $(n + 1)$ -го уровня (подуровня) на вход n -го уровня (подуровня) системы; $\Lambda^{(n)}$ – вектор параметров процедур протокола, например адресации, коммутации, контроля, приоритетной обработки, выравнивания, агрегатирования, сегментации, а также сжатия данных и т. п.; N – количество уровней (подуровней) системы.

Выполнив преобразование (1), легко определить количество информации на выходе n -го уровня (подуровня) системы

$$I^{(n)} = I^{(n+1)} + \Delta I^{(n)}, \quad n = \overline{1, N}. \quad (2)$$

Многие протоколы системы, обрабатывая данные, не преобразовывают их, а лишь формируют и добавляют к ним служебную информацию. В этом случае формула (1) упрощается, а значение $\Delta I^{(n)}$ можно найти по известному формату полей номинального (nominal) функционально необходимого заголовка (heading) и концевика протокола

$$\Delta I^{(n)} = \Delta I_{\text{nom}}^{(n)}, \quad n = \overline{1, N},$$

где
$$\Delta I_{\text{nom}}^{(n)} = \sum_{i=1}^{L^{(n)}} \Delta I_{\text{nom}, i}^{(n)}, \quad (3)$$

$\Delta I_{\text{nom}}^{(n)}$ и $\Delta I_{\text{nom}, i}^{(n)}$ – соответственно суммарный объем, и объем i -тых полей номинального функционально необходимого заголовка протокола n -го уровня (подуровня) системы; $L^{(n)}$ – количество полей номинального заголовка протокола n -го уровня (подуровня) системы.

Из вышеизложенного следует, что величина $\Delta I^{(n)}$, формируемая на n -ном уровне (подуровне) передающей системы может быть больше нуля, равна нулю, а в некоторых случаях (сжатие, кодирование информации) – меньше нуля. Следует заметить, что если $\Delta I^{(n)} = I^{(n)} - I^{(n+1)} \leq 0$, то блоки передаваемых данных не содержат явной управляющей информации n -го уровня (подуровня). В этом случае управляющая информация может передаваться в отдельных служебных блоках либо протокольные процедуры обработки данных n -го уровня (подуровня) принимающей системы не требуют управляющей информации.

Рассмотрим процесс преобразования информации, в частности изменения ее объемов, между уровнями (подуровнями) m и n передающей системы, где $m > n$. Применяя формулу (2) для уровней

(подуровней) $n + 1, n + 2, \dots, m$ и выполняя рекуррентные подстановки, найдем количество информации $I^{(n)}$ на выходе n -го уровня (подуровня) системы

$$I^{(n)} = I^{(m+1)} + \Delta I^{(m,n)}, \quad N \geq m \geq n \geq 1, \quad (4)$$

где $I^{(m+1)}$ – количество информации, поступающей с выхода уровня (подуровня) $m + 1$ на вход уровня (подуровня) m ; $\Delta I^{(m,n)}$ – суммарное количество служебной информации в блоке данных, формируемой модулями коммуникационных протоколов, которые функционируют между уровнями (подуровнями) m и n

$$\Delta I^{(m,n)} = \sum_{k=0}^{m-n} \Delta I^{(n+k)} = \sum_{k=0}^{m-n} \Delta I^{(m-k)}, \quad N \geq m \geq n \geq 1. \quad (5)$$

Полагая в (5) $m = N$, а $n = 1$, можно определить общий объем служебной информации в блоке данных пользователя на выходе системы.

2. Выравнивание объема данных. Для некоторых протоколов исследуемых систем характерны процедуры выравнивания объемов данных до определенных технологически необходимых значений. Суть процедур выравнивания заключается в определении дополнительного объема “незначащих” данных (pad date) и размещении их в поле “padding” служебного заголовка или в поле инкапсулируемых данных.

Анализируя процедуры выравнивания, можно выделить три метода выравнивания, используемых в популярных протоколах сетей с коммутацией пакетов:

- выравнивание объемов заголовков протоколов, например в протоколах транспортного TCP (Transmission Control Protocol) и сетевого IP (Internet Protocol) уровней;

- выравнивание объемов заголовков и данных, например в протоколе подуровня адаптации AAL5 (ATM Adaptation Layer 5) технологии асинхронного режима передачи (ATM – Asynchronous Transfer Mode);

- выравнивание минимально допустимого объема инкапсулируемых данных, например в протоколе канального уровня технологии сети Ethernet и т. п.

Анализируя методы выравнивания, в дальнейшем будем полагать, что процедура выравнивания заголовков и/или данных пакета, присуща протоколу n -го уровня (подуровня) системы. Независимо от рассматриваемого метода выравнивания, можно выделить четыре функционально необходимых этапа формирования служебного заголовка и “незначащих” данных:

- формирование функционально необходимого заголовка пакета номинального объема $\Delta I_{\text{nom}}^{(n)}$ (без учета данных поля “padding”);

- проверка достаточного условия необходимости активации процедуры выравнивания;

- определение объема “незначащих” данных $\Delta I_{\text{pad}}^{(n)}$ для заполнения поля “padding” в заголовке пакета или в инкапсулируемых данных;

- формирование служебной информации технологически необходимого объема $\Delta I^{(n)}$ в заголовке пакета и/или в инкапсулируемых данных.

На первом этапе, независимо от метода выравнивания, номинальный объем заголовка $\Delta I_{\text{nom}}^{(n)}$ можно определить по известному формату полей функционально необходимого заголовка протокола (см. формулу (3)).

Реализация четвертого этапа инварианта для всех методов выравнивания, т. е. для всех протоколов, критичных к объему заголовка и/или данных. Очевидно, что объем служебной информации после выравнивания “незначащими” данными заголовка или инкапсулируемых данных можно рассчитать по формуле

$$\Delta I^{(n)} = \Delta I_{\text{nom}}^{(n)} + \Delta I_{\text{pad}}^{(n)}, \quad n \leq N. \quad (6)$$

С учетом (6) объем данных $I^{(n)}$ на выходе n -го уровня (подуровня) системы можно рассчитать по формуле (2).

Расчет объема “незначащих” данных $\Delta I_{\text{pad}}^{(n)}$ на третьем этапе процедуры выравнивания зависит от функций протокола, т. е. определяется методом выравнивания. Поэтому ниже для исследуемых методов выравнивания рассмотрим второй и третий этапы моделирования процедур выравнивания объемов данных.

Первый метод – выравнивание объема заголовка пакета. В результате выравнивания формируемый протоколом объем технологически необходимого заголовка $\Delta I^{(n)}$ должен быть кратен некоторому минимальному (minimal) значению $\Delta I_{\min}^{(n)}$. Достаточным условием активации процедуры выравнивания в протоколах критичных к объему заголовка, в частности ТСП и IP, является выполнение неравенства

$$u^{(n)} \Delta I_{\min}^{(n)} < \Delta I_{\text{nom}}^{(n)} < (u^{(n)} + 1) \Delta I_{\min}^{(n)}, \quad n \leq N, \quad (7)$$

где $u^{(n)}$ – коэффициент кратности номинального объема служебных данных; $\Delta I_{\min}^{(n)}$ – единица минимальной кратности объема служебных данных протокола n -го уровня (подуровня) системы. Заметим, что для протоколов ТСП и IP значение $\Delta I_{\min}^{(n)}$ равно 4 байта.

Значение коэффициента кратности номинального объема служебных данных протокола n -го уровня (подуровня) системы можно рассчитать по формуле

$$u^{(n)} = E(\Delta I_{\text{nom}}^{(n)} / \Delta I_{\min}^{(n)}), \quad n \leq N, \quad (8)$$

где $E(x)$ – математическая функция Entier – выделения целой части числа x .

При выполнении неравенства (7) объем “незначащих” служебных данных $\Delta I_{\text{pad}}^{(n)}$ для поля “padding” заголовка протокола определим по формуле

$$\Delta I_{\text{pad}}^{(n)} = \Delta I_{\min}^{(n)} \{1 - \text{del}(\Delta I_{\text{nom}}^{(n)} / \Delta I_{\min}^{(n)})\}, \quad n \leq N; \quad (9)$$

здесь $\{x\}$ – математическая функция выделения дробной части числа x .

Учитывая коэффициент кратности (8), формулы расчета объемов “незначащих” служебных данных (9) и заголовка (6) можно упростить:

$$\Delta I_{\text{pad}}^{(n)} = (u^{(n)} + 1) \Delta I_{\min}^{(n)} - \Delta I_{\text{nom}}^{(n)}, \quad n \leq N; \quad (10)$$

$$\Delta I^{(n)} = (u^{(n)} + 1) \Delta I_{\min}^{(n)}, \quad n \leq N. \quad (11)$$

Второй метод – выравнивание объема пакета. Выравнивание по этому методу предусматривает, что сумма объемов технологически необходимого заголовка $\Delta I^{(n)}$ и инкапсулируемых входных данных $I^{(n+1)}$ n -го уровня должна быть кратна некоторой единице номинального объема данных $I_{\text{nom}}^{(n)}$.

Рассмотрим методику определения объема заголовка $\Delta I_{\text{pad}}^{(n)}$ для второго метода выравнивания, который используется, например, протоколом подуровня адаптации AAL5 технологии АТМ. Достаточным условием активации процедуры выравнивания заголовка и данных протоколом n -го уровня (подуровня) системы является выполнение неравенства

$$v^{(n)} I_{\text{nom}}^{(n)} \leq I^{(n+1)} + \Delta I_{\text{nom}}^{(n)} \leq (v^{(n)} + 1) I_{\text{nom}}^{(n)}, \quad n \leq N, \quad (12)$$

где $v^{(n)}$ – коэффициент кратности единицы номинального объема данных на выходе n -го уровня (подуровня) системы; $I_{\text{nom}}^{(n)}$ – единица номинального объема данных на выходе n -го уровня (подуровня) системы.

Значение коэффициента кратности номинального объема данных протокола n -го уровня (подуровня) системы можно определить по формуле

$$v^{(n)} = E[(I^{(n+1)} + \Delta I_{\text{nom}}^{(n)}) / I_{\text{nom}}^{(n)}], \quad n \leq N. \quad (13)$$

Объем “незначащих” данных $\Delta I_{\text{pad}}^{(n)}$ для поля “padding” заголовка пакета, формируемого протоколом n -го уровня (подуровня) системы, можно рассчитать по формуле

$$\Delta I_{\text{pad}}^{(n)} = I_{\text{nom}}^{(n)} (1 - \{(I^{(n+1)} + \Delta I_{\text{nom}}^{(n)}) / I_{\text{nom}}^{(n)}\}), \quad n \leq N; \quad (14)$$

здесь $\{x\}$ – математическая функция выделения дробной части числа x .

С другой стороны объем “незначащих” данных можно определить, используя неравенство (12)

$$\Delta I_{\text{pad}}^{(n)} = (v^{(n)} + 1) I_{\text{nom}}^{(n)} - I^{(n+1)} - \Delta I_{\text{nom}}^{(n)}, \quad n \leq N. \quad (15)$$

Заметим, что если условие (12) не выполняется, то $\Delta I_{\text{pad}}^{(n)} = 0$, а объем данных $I^{(n)}$ на выходе n -го протокольного уровня (подуровня) системы кратен величине $I_{\text{nom}}^{(n)}$, т. е.

$$I^{(n)} = v^{(n)} I_{\text{nom}}^{(n)}, \quad n \leq N, \quad (16)$$

в противном случае $\Delta I_{\text{pad}}^{(n)} \geq 0$, а объем данных $I^{(n)}$ определим по формуле

$$I^{(n)} = (v^{(n)} + 1) I_{\text{nom}}^{(n)}, \quad n \leq N. \quad (17)$$

Третий метод – выравнивание объема данных пакета. Этот метод используется в протоколах, критичных к объему инкапсулируемых данных. Достаточным условием активации процедуры выравнивания объема передаваемых данных при их инкапсуляции протоколом n -го уровня (подуровня) системы является выполнение неравенства

$$I^{(n+1)} < I_{\text{min}}^{(n)}, \quad n \leq N, \quad (18)$$

где $I^{(n+1)}$ – объем информации на входе n -го уровня (подуровня) системы; $I_{\text{min}}^{(n)}$ – минимальный объем инкапсулируемых данных. Например, для технологии сети Ethernet значение $I_{\text{min}}^{(n)}$ равно 46 байт.

При выполнении условия (18) объем $\Delta I_{\text{pad}}^{(n)}$ поля “padding”, которое используется для дополнения инкапсулируемых данных на n -ном уровне (подуровне) системы “незначашими” данными, можно рассчитать по формуле

$$\Delta I_{\text{pad}}^{(n)} = I_{\text{min}}^{(n)} - I^{(n+1)}, \quad n \leq N. \quad (19)$$

3. Агрегатирование пакетов данных. В процессе передачи информации, с целью повышения некоторых показателей эффективности сети, на определенных уровнях системы возникает необходимость агрегатирования данных. При агрегатировании блоки данных накапливаются и объединяются в один пакет (кадр). Эта процедура повышает эффективность сети по пропускной способности, но увеличивает задержки информации. Агрегатирование данных характерно для протоколов прикладного и канального уровней системы. Вокодеры прикладного уровня, например G.728, G.729, G.723.1 и др., при передаче речи накапливают и кодируют речевые отсчеты в блоки речевой информации небольших объемов (10, 10, 24 байт соответственно). Технологии канального уровня, например Token Ring, Gigabit Ethernet и др., могут присоединять накопленные кадры для непрерывной пакетной передачи их по сети.

В общем случае при агрегатировании блоков данных протокольными объектами n -го уровня (подуровня) системы процессы количественных преобразований служебной информации можно описать выражением

$$I^{(n)} = \sum_{i=1}^{g^{(n)}} (I_i^{(n+1)} + \Delta I_i^{(n)}) + \Delta I_{\text{agg}}^{(n)}, \quad n \leq N, \quad (20)$$

где $g^{(n)}$ – допустимое количество блоков данных в агрегатном пакете на n -ном уровне (подуровне) системы; $I_i^{(n+1)}$ – количество информации в i -тых блоках данных на выходе $(n+1)$ -го уровня (подуровня) системы; $\Delta I_i^{(n)}$ – количество служебной информации, добавляемой к i -тым блокам данных на n -ном уровне (подуровне) системы; $\Delta I_{\text{agg}}^{(n)}$ – количество служебной информации, добавляемой к агрегатному пакету на n -ном уровне (подуровне) системы.

Формулу (20) приведем к каноническому виду (2). Для этого в формуле (20) выделим два слагаемых:

– суммарный объем информации в блоках данных $I^{(n+1)}$, поступающей вход n -го уровня (подуровня) системы,

$$I^{(n+1)} = \sum_{i=1}^{g^{(n)}} I_i^{(n+1)}, \quad n \leq N; \quad (21)$$

– суммарный объем служебной информации $\Delta I^{(n)}$, добавляемой к агрегируемым блокам данных,

$$\Delta I^{(n)} = \sum_{i=1}^{g^{(n)}} \Delta I_i^{(n)} + \Delta I_{\text{agg}}^{(n)}, \quad n \leq N. \quad (22)$$

Заметим, что в частных случаях слагаемые $\Delta I_i^{(n)}$ суммы (22) и/или второе слагаемое $\Delta I_{\text{agg}}^{(n)}$ этой формулы могут отсутствовать. Кроме того, если объемы служебной информации $\Delta I_i^{(n)}$, добавляемой к i -тым агрегируемым блокам данных одинаковы, то формулу (22) можно упростить:

$$\Delta I^{(n)} = g^{(n)} \Delta I_i^{(n)} + \Delta I_{\text{agg}}^{(n)}, \quad i = 1, \overline{g^{(n)}}, \quad n \leq N. \quad (23)$$

4. Сегментация (фрагментация) данных. С целью повышения некоторых показателей эффективности сети, а также для согласования объема передаваемых данных с максимально допустимым значением объема информации, которую можно передавать с использованием технологии канального уровня, возникает необходимость сегментации (фрагментации) данных. В процессе сегментации (фрагментации) блоки данных больших объемов разделяются и передаются отдельными сегментами (фрагментами). Эти процедуры характерны для протоколов транспортного и сетевого уровней системы, например TCP и IP соответственно. Реже сегментация потоков данных выполняется протоколами прикладного уровня и технологиями канального уровня, например подуровнем адаптации AAL5 технологии ATM.

В гетерогенных сетях с неравномерной нагрузкой, когда используются разные технологии канального уровня и необходимо оптимизировать нагрузку в сети, сегментацию данных, как правило, выполняют многофункциональные протоколы транспортного уровня. При этом ограничения максимальной единицы передачи MTU (Maximum Transmission Unit) могут учитываться при фрагментации данных протоколами сетевого уровня или канальными технологиями. В гомогенных сетях наиболее оптимальной является сегментация потока данных на транспортном уровне с учетом существующих на канальном уровне ограничений MTU, которые являются общими для вышележащих уровней [3].

Пусть процедура сегментации (фрагментации) данных свойственна функциям протокола n -го уровня (подуровня) системы. Необходимое условие выполнения исследуемых процедур – это их активация, а достаточное условие – превышение количества информации $I^{(n+1)}$, поступающей на вход n -го уровня (подуровня) над оптимальным (optimum) объемом информации $I_{\text{opt}}^{(n)}$, передаваемой протоколом этого уровня, т. е.

$$I^{n+1} > I_{\text{opt}}^{(n)}, \quad n \leq N. \quad (24)$$

При сегментации данные объемом $I^{(n+1)}$ разделяются на $q^{(n)}$ сегментов (фрагментов) так, чтобы сумма объемов $I_i^{(n+1)}$ i -тых сегментов (фрагментов) равнялась объему $I^{(n+1)}$, т. е.

$$I^{(n+1)} = \sum_{i=1}^{q^{(n)}} I_i^{(n+1)}, \quad n \leq N. \quad (25)$$

В результате количество информации в сегментах (фрагментах) будет равно или меньше некоторого оптимального значения $I_{\text{opt}}^{(n)}$, т. е.

$$I_i^{(n+1)} = I_{\text{opt}}^{(n)}, \quad I_{q^{(n)}}^{(n+1)} \leq I_{\text{opt}}^{(n)}, \quad n \leq N, \quad i = \overline{1, (q^{(n)} - 1)}. \quad (26)$$

В частном случае, если объем данных $I^{(n+1)}$ на $(n + 1)$ -м уровне (подуровне) системы подвергался выравниванию, что характерно, например, для технологии ATM, то $I_{q^{(n)}}^{(n+1)} = I_{\text{opt}}^{(n)}$.

Количество сегментов (фрагментов) данных $q^{(n)}$ на n -ом уровне (подуровне) системы можно определить по формуле

$$q^{(n)} = \text{ceil}(I^{(n+1)} / I_{\text{opt}}^{(n)}), \quad n \leq N, \quad (27)$$

где – $\text{ceil}(x)$ – функция округления числа x до большего целого значения.

Оптимальный объем информации $I_{\text{opt}}^{(n)}$ в передаваемых сегментах (фрагментах) n -го уровня (подуровня) системы определяется и контролируется логистикой, а также процедурными характеристиками коммуникационных протоколов с целью:

- оптимизации загрузки сети;
- согласования $I_{\text{opt}}^{(n)}$ с MTU канального уровня.

В первом случае значение $I_{\text{opt}}^{(n)}$ зависит от процедурных характеристик протоколов n -го уровня (подуровня) системы и загрузки сети, а во втором – от применяемых технологий канального уровня.

Рассмотрим процедуру определения $I_{\text{opt}}^{(n)}$ для второго случая. Пусть $I_{\text{MTU}}^{(z)}$ – количество информации максимальной единицы передачи, т.е. MTU технологии канального уровня (z -го подуровня). Тогда оптимальный объем информации $I_{\text{opt}}^{(n)}$ в сегментах (фрагментах) n -го уровня (подуровня) системы определим по формуле

$$I_{\text{opt}}^{(n)} = I_{\text{MTU}}^{(z)} - \sum_{k=z+1}^n \Delta I^{(k)}, \quad z < k \leq n \leq N, \quad (28)$$

где $\Delta I^{(k)}$ – максимальное количество служебной информации, добавляемой к сегментам (фрагментам) данных на k -тых уровнях (подуровнях) системы, $z < k \leq n$. Заметим, что MTU технологий канального уровня имеют существенный разброс значений, например для технологии сети ATM $I_{\text{MTU}}^{(z)} = 48$ байт, а для – Ethernet (кадр RAW 802.3) $I_{\text{MTU}}^{(z)} = 1500$ байт.

С учетом служебной информации n -го уровня (подуровня) системы количество информации $I_i^{(n)}$ в i -тых сегментах (фрагментах), сформированных на выходе этого уровня (подуровня), можно рассчитать по аналогичной (2) формуле

$$I_i^{(n)} = I_i^{(n+1)} + \Delta I_i^{(n)}, \quad n \leq N, \quad (29)$$

где $I_i^{(n+1)}$ – количество информации в i -том сегменте (фрагменте) из потока данных, поступивших с выхода $(n+1)$ -го уровня (подуровня) системы; $\Delta I_i^{(n)}$ – количество служебной информации, добавляемой к каждому i -тому сегменту (фрагменту) данных на n -ом уровне (подуровне) системы.

Суммируя количество информации во всех сегментах (фрагментах) передаваемого сообщения на выходе n -го уровня (подуровня) системы, получим

$$I^{(n)} = \sum_{i=1}^{q^{(n)}} (I_i^{(n+1)} + \Delta I_i^{(n)}), \quad n \leq N, \quad (30)$$

где $I^{(n)}$ – общее количество информации во всех сегментах (фрагментах) данных на выходе n -го уровня (подуровня) системы.

С учетом (25) формулу (30) приведем к каноническому виду (2). Для этого выделим суммарный объем данных $I^{(n+1)}$ (формула (25)) и суммарный объем служебной информации $\Delta I^{(n)}$ во всех сегментах (фрагментах) на выходе n -го уровня (подуровня) системы, где

$$\Delta I^{(n)} = \sum_{i=1}^{q^{(n)}} \Delta I_i^{(n)}, \quad n \leq N. \quad (31)$$

Если количество служебной информации, добавляемой к каждому i -тому сегменту (фрагменту), одинаково, что характерно для многих протоколов, например TCP, IP, ATM, тогда формула (31) упрощается:

$$\Delta I^{(n)} = q^{(n)} \Delta I_{\text{ceg}}^{(n)}, \quad n \leq N, \quad (32)$$

где $\Delta I_{\text{ceg}}^{(n)} = \Delta I_i^{(n)} = \Delta I^{(n)} / q^{(n)}$, $i = \overline{1, q^{(n)}}$. (33)

С учетом (32) формула (2) примет вид, совпадающий с известными результатами, например [7]:

$$I^{(n)} = I^{(n+1)} + q^{(n)} \Delta I_{\text{ceg}}^{(n)}, \quad n \leq N. \quad (34)$$

Алгоритм расчета количества служебной информации, формируемой протоколами систем в сетях с коммутацией пакетов при передаче данных пользователя, представлен на рис. 1. Исходными данными для расчета являются: объем данных пользователя; объемы форматов полей заголовков и концевиков протоколов $\Delta I_{\text{ном}, i}^{(k)}$; технологические параметры протоколов, например $\Delta I_{\text{мин}}^{(k)}$, $I_{\text{мин}}^{(k)}$, $I_{\text{MTU}}^{(k)}$, $I_{\text{opt}}^{(k)}$ и т. п., где $n \leq k \leq m$.

Рассмотрим **пример** расчета количества служебной информации стека протоколов TCP/IP и технологии ATM, которые поддерживают функции выравнивания и сегментации данных.

Пусть протоколом прикладного уровня SMTP сформированы данные объемом $I^{(N)} = 1100$ байт, где $N = 7$. Протокол транспортного уровня UDP, инкапсулируя эти данные, формирует и добавляет к ним свой заголовок объемом $\Delta I^{(6)} = 8$ байт (рис. 2).

Сетевой протокол IP формирует свой минимальный заголовок объемом $\Delta I^{(5)} = 20$ байт. В данном случае протокол IP не выравнивает объем заголовка и не фрагментирует данные. Используя формулу (4), определим объем данных на выходе сетевого уровня (5-го уровня по сквозной нумерации протокольных уровней и подуровней, см. рис. 2) $I^{(5)} = 1128$ байт.

Выравнивание данных с целью их дальнейшей сегментации выполняет протокол подуровня сходимости CS AAL5 технологии ATM. В соответствии с описанным выше алгоритмом выравнивания (первый этап), используя поля формата номинального заголовка протокола подуровня CS AAL5, по формуле (3) определим объем $\Delta I_{\text{ном}}^{(4)} = 7$ байт.

Затем, на втором этапе процедуры выравнивания, проверим выполнение неравенства (12). Для этого, используя формулу (28), вычислим значение единицы номинального объема данных $I_{\text{ном}}^{(4)} = I_{\text{opt}}^{(3)} = I_{\text{MTU}}^{(2)} - \Delta I^{(3)} = 44$ байт, где $I_{\text{MTU}}^{(2)} = 48$ байт, $\Delta I^{(3)} = 4$ байт. По формуле (13) рассчитаем коэффициент кратности единицы номинального объема данных $\nu^{(4)} = 25$.

В соответствии с третьим этапом процедуры выравнивания по формуле (14) или (15) рассчитаем объем “незначущих” данных $\Delta I_{\text{pad}}^{(4)} = 9$ байт.

Далее, по формулам (6) и (17), находим объемы соответственно заголовка подуровня сходимости CS AAL5 $\Delta I^{(4)} = 16$ байт и данных на выходе этого подуровня $I^{(4)} = 1144$ байт.

Основная задача протокола подуровня сегментации SAR AAL5 – разделение данных объемом $I^{(4)}$ на сегменты оптимального объема $I_{\text{opt}}^{(3)}$. Рассчитанное выше по формуле (28) значение $I_{\text{opt}}^{(3)}$ составляет 44 байта. По формуле (27) находим количество сегментов данных $q^{(3)} = 26$ ед. При передаче каждого i -того сегмента протокол подуровня SAR AAL5 формирует заголовок и концевик общим объемом $\Delta I_i^{(3)} = 4$ байт, где $i = 1, q^{(3)}$. В результате объем данных в i -том сегменте на выходе третьего подуровня системы составляет $I_i^{(3)} = 48$ байт.

Протоколы подуровня ATM и физического уровня ATM, формируя из i -того сегмента данных ячейку, добавляют служебную информацию объемами соответственно $\Delta I_i^{(2)} = 4$ байт и $\Delta I_i^{(1)} = 1$ байт.

Используя формулу (32), рассчитаем количество служебной информации во всех 26-ти сегментах подуровня SAR AAL5 $\Delta I^{(3)} = 104$ байт, подуровня ATM $\Delta I^{(2)} = 104$ байт и физического уровня ATM $\Delta I^{(1)} = 26$ байт.

Используя формулу (5), рассчитаем суммарное количество служебной информации на выходе физического уровня ATM $\Delta I^{(6,1)} = 278$ байт. В результате общее количество информации на выходе системы (формула (4)) составляет $I^{(1)} = 1378$ байт.

Как видим, при передаче 1100 байт данных протокола прикладного уровня SMTP необходимо дополнительно передавать 278 байт (25,3 %) управляющей информации, генерируемой протоколами стека TCP/IP и технологии ATM. Эффективность [6] $\gamma = I^{(7)} / I^{(1)}$ по пропускной способности рассматриваемого в примере стека протоколов системы при передаче 1100 байт данных составляет $\gamma = 79,8$ %.

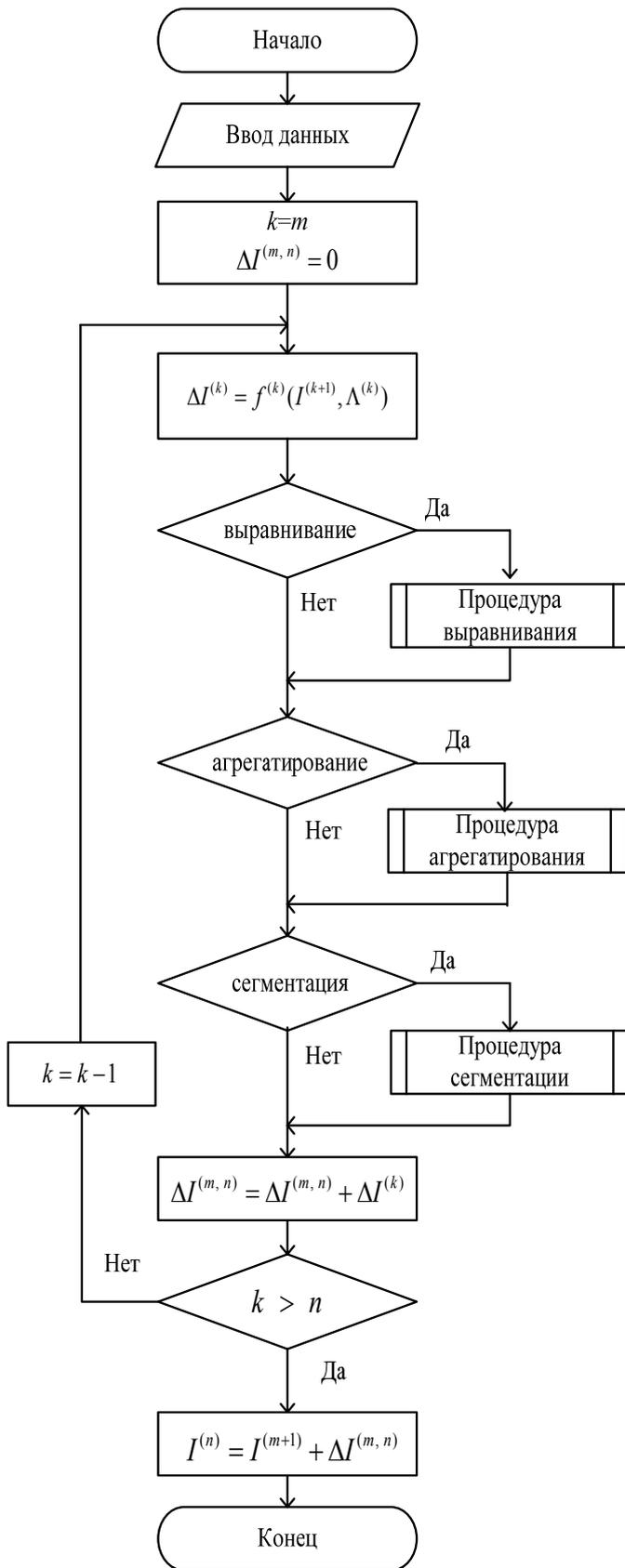


Рисунок 1 – Алгоритм формирования количества служебной информации

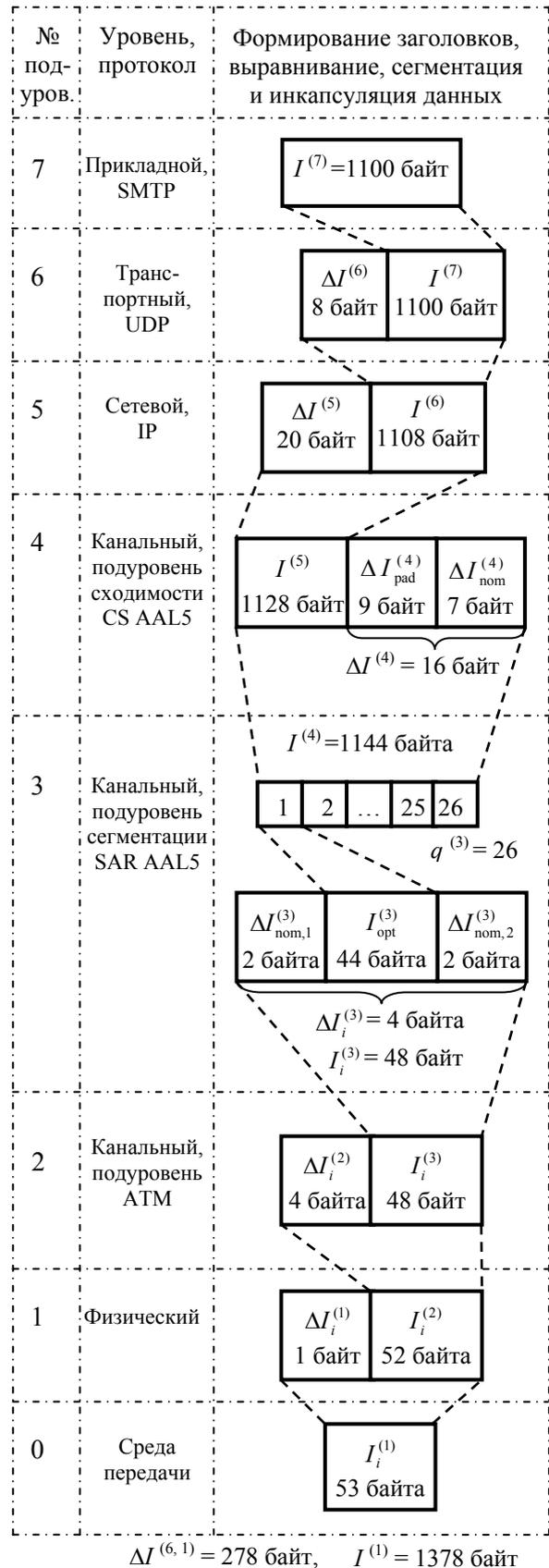


Рисунок 2 – Пример формирования количества служебной информации

В *заключенні* отметим, что рассмотренная модель процессов формирования служебной информации учитывает основные процедурные особенности, характерные для широкого спектра протоколов сетей с коммутацией пакетов. В частности, это формирование и выравнивание объемов протокольных заголовков и/или данных, инкапсуляция и агрегатирование пакетов, сегментирование данных.

Использование предложенной модели дает возможность в дальнейшем:

- проводить исследования соотношений между объемами служебной и пользовательской информации для широкого спектра протоколов сетей с коммутацией пакетов;
- выбирать оптимальные стеки протоколов систем, применяя в качестве критерия, например, минимум объема служебных данных (максимум эффективности по пропускной способности);
- оптимизировать объемы передаваемых полезных данных для заданных технологий сетей с коммутацией пакетов по критерию эффективности использования пропускной способности системы.

Литература

1. *Information technology. Open Systems Interconnection. Basic Reference Model. The basic model: ITU-T Recommendation X.200.* – ITU-T, 1994.
2. *Парамонов А.А.* Методика оценки эффективности информационных систем с использованием технологий открытых систем (на примере сетевой среды банка) [Электронный ресурс]: автореф. дис. на соиск. ученой степени канд. техн. наук: спец. 05.13.13 “Телекоммуникационные системы и компьютерные сети” / А.А. Парамонов. – М., 2006. – 24 с. – Режим доступа: <http://www.ineum.ru/download/areft.doc>.
3. *Олифер Н.А.* Средства анализа и оптимизации локальных сетей [Электронный ресурс] / Н.А. Олифер, В.Г. Олифер // Центр Информационных Технологий – 1998. – Режим доступа: <http://www.citforum.ru/nets/optimize/index.shtml>.
4. *Назаров А.Н.* Модели и методы расчета структурно-сетевых параметров сетей АТМ / Назаров А.Н. – М.: Наука, 2002. – 315 с.
5. *Лаем Куин.* Fast Ethernet / Лаем Куин, Ричард Рассел. – К.: Издательская группа BHV, 1998. – 448 с.
6. *Струкало М.И.* Анализ эффективности систем коммутации пакетов по пропускной способности при передаче речи / М.И. Струкало, С.В. Ракитина // Системы и средства передачи и обработки информации: VIII междунар. науч.-практ. конф., 7-12 сент. 2004 г.: тезисы докл. – Одесса: ОНАС, 2004. – С. 86-87.
7. *Воробийенко П.П.* Обобщенная информационная модель взаимодействия систем инфокоммуникаций / П.П. Воробийенко, М.И. Струкало // Электросвязь. – 2004. – № 6. – С. 24-26.
8. *Воробийенко П.П.* Деякі граничні співвідношення в мережах з комутацією пакетів / Воробийенко П.П. // Радиотехніка. – Харьков: ХНУРЕ, 2002. – Вып. 125. – С. 170-173.