

УДК 621.7.05

УПРАВЛЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ СПУТНИКОВЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СЕТЕЙ

С. Е. Ададуров,

доктор техн. наук, профессор

Санкт-Петербургский государственный университет путей сообщения

А. Ф. Богданова,

канд. техн. наук

Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского

Рассматривается метод локального управления производительностью сетевой низкоорбитальной спутниковой системы связи с АТМ-технологией. Метод основан на использовании теории фрактальных (самоподобных) процессов.

The paper considers a method of local throughput control of low earth orbit network satellite communication systems with ATM technology. The method is based on the theory of fractal (self-similar) processes.

Телекоммуникационные сети являются основной базой комплексов управления для систем информационного взаимодействия и принятия решений. Такими телекоммуникационными сетями являются, в частности, мультисервисные сети, т. е. широкополосные цифровые сети интегрального обслуживания на основе АТМ-технологии. Следует отметить мировую тенденцию изменения приоритетов при выборе технологий для организации сетей связи в пользу спутниковых каналов. При этом особую роль будут играть сетевые низкоорбитальные спутниковые системы (НОСС) связи как самостоятельные сетевые информационные структуры или как составная часть интегрированных спутниковых систем.

Информационный обмен (доставка информации), осуществляемый в такой сети, требует особого подхода к обслуживанию потребителей услуг сети связи, поскольку к каждому виду трафика предъявляются свои требования по качеству обслуживания. При использовании в НОСС связи АТМ-технологии определение качества обслуживания требует уточнения, поскольку в стандартах АТМ концепция качества обслуживания не имеет законченной формы, что требует разработки методов и средств его достижения.

При этом способ достижения цели качества обслуживания включает [1] и классы обслуживания, и функции управления трафиком, которые зависят от архитектуры конкретной сети (в данном случае НОСС). Если рассматривать глобальное сетевое управление и его зависимость от действий внутри элементов сети, т. е. от внутреннего управ-

ления сетевыми элементами, то можно сделать вывод о важности локального управления сетевыми элементами и необходимости разработки соответствующих алгоритмов.

Применение АТМ-технологии и качественное изменение требований пользователей приводят к тому, что так называемые «узкие звенья» сети смещаются от систем передачи к системам коммутации, что значительно повышает роль локальных форм управления. Повышение роли локального управления НОСС связи в узлах объясняется прежде всего тем, что благодаря оптимизации методов использования входящих в структуру узлов средств обработки и хранения информации вырабатываемые решения на локальном уровне обеспечивают достижение более высоких показателей устойчивости информационного обмена по сети в целом.

Анализ известных решений по управлению информационным обменом в сетях с АТМ-технологией [1] и разработанной модели качества обслуживания сетевой НОСС связи с АТМ-технологией показал, что управление перегрузкой на уровне сетевых элементов, в данном случае узлов сети, является наименее разработанной областью, не поддающейся стандартизации. Это связано с тем, что невозможно определить главные желаемые свойства алгоритмов управления элементами сети ввиду их тесной связи с конкретной разработкой сетевой системы и организацией информационного обмена в ней. Положение усложняется необходимостью учета структурных свойств фрактального трафика [2], которые влияют на все аспекты

управления трафиком, в том числе на управление перегрузкой, являющейся частью общей проблемы управления трафиком. В результате одним из наиболее эффективных средств управления происходящими в узлах НОСС процессами становятся методы, разработанные на основе аппарата самоподобных (фрактальных) процессов и использующие в качестве объектов анализа системы массового обслуживания.

При рассмотрении метода управления производительностью учитывалось, что на рассматриваемом уровне представления Эталонной модели взаимодействия открытых систем максимальная производительность (или пропускная способность) характеризуется величиной очередей заявок в узлах. Таким образом, сущность метода локального управления производительностью заключается в управлении перегрузкой на уровне АТМ на основе принципа обнаружения перегрузки по длине очереди и контроля качества обслуживания по оценке вероятности потери ячейки на основе фрактальной формализации трафика НОСС.

Вычисление длины очереди в узлах НОСС связи основывалось на использовании модели с источником типа ON-OFF (Вкл.-Выкл.) [3], который демонстрировал долговременную зависимость. При этом распределение длины очереди имеет медленно уменьшающийся или утяжеленный хвост, и наибольшие отличия в средних длинах очередей наблюдались при больших загрузках. Это соответствует случаю, когда спектральная плотность мощности в низкочастотной области имеет наибольшие значения, что эквивалентно наиболее долговременным статистическим корреляциям.

Оценка вероятности потери ячейки основывалась на теории больших уклонений [4] для самоподобного трафика в сети с АТМ-технологией. При этом вероятность потери ячейки (или вероятность переполнения буфера) определяется как $P_r(Q > B)$, где Q – длина очереди, а B – размер буферного пространства.

В качестве модели исходного трафика рассмотрим модель в виде $A(0, t) = mt + Z(t)$, где $A(0, t)$ – интегральное поступление из каждого N -потока на временном интервале $(0, t)$; $m > 0$ – средняя входная скорость; $Z(t)$ – фрактальное броуновское движение (ФБД) с Хёрст-параметром H . Производящая функция λ_i каждого потока определяется как

$$\lambda_i(\theta) = \frac{1}{t} \log E \exp(\theta A(0, t)).$$

Тогда, согласно теории больших уклонений, выражение для стационарной вероятности превышения Q уровня Nb имеет вид

$$P_r(A_t^N > N(ct + b)) \cong \exp(-N \sup_{\theta} [\theta(b + ct) - t\lambda_i(\theta)]),$$

где b и c – величина буферного пространства и ширина полосы соответственно, $B = Nb$ и $C = Nc$; $A_t^N = \sum_{i=1}^N A(-t, 0)$ обозначает агрегированное по-

ступление на интервале длины t . В случае ФБД

$$\Pr(Q > B) \cong \exp \left[-N^{2H-1} \frac{(c-m)^{2H} B^{2-2H}}{2\sigma^2 k^2(H)} \right].$$

Вероятность потери ячейки является мерой качества обслуживания на уровне АТМ и откликом на переполнение буфера в СР-узле, т. е. вероятности превышения длины очереди некоторого порога, что должно привести к действиям управления (сбросу излишних ячеек, изменению маршрута и т. д.).

Анализ эффективности метода управления в узлах НОСС связи производительноностью спутниковой сети с использованием фрактальной формализации проводился с помощью метода имитационного моделирования процесса адаптивного управления информационными потоками на основе диффузионной модели сети, описанного в работах [5, 6]. Было показано, что моделью функционирования сетевой НОСС связи в условиях значительных загрузок, учитывающей большое количество узлов и, следовательно, большую размерность решаемой задачи, является диффузионная аппроксимация. Диффузионная аппроксимация позволяет существенно понизить размерность задачи. Получение значения параметров сноса и диффузии процесса, аппроксимирующего состояние узла, дает возможность получить уравнение Фоккера–Планка–Колмогорова для каждого узла сети. Имея диффузионную модель функционирования одного узла и используя матрицу связности, можно получить многомерное дифференциальное уравнение, являющееся по своей сути уравнением состояния. Таким образом, если известны первые два момента распределения входящего потока требований в каждом узле сети и если существует матрица распределения информационных потоков, формируемая с учетом матрицы маршрутных перемешиваний, то можно построить многомерную модель информационного взаимодействия в сети.

Расчет загруженности узлов производился с использованием аппроксимации дискретных процессов изменения очередей пакетов на узлах сети непрерывными процессами диффузионного типа [5, 6].

Обозначим количество пакетов r -го приоритета в сети вектором

$$\mathbf{X}_s^r(t) = (x_1^r(t), x_2^r(t), \dots, x_N^r(t)),$$

где $x_i^r(t)$ – количество пакетов r -го приоритета в i -м узле сети.

В этом случае плотность вероятности перехода состояния НОСС в условиях высокой загрузки узлов сети информационными пакетами описывается многомерным уравнением Фоккера–Планка–Колмогорова

$$\begin{aligned} \frac{\partial P(\mathbf{X}_s^r, t)}{\partial t} = & - \sum_{i=1}^N \frac{\partial}{\partial \mathbf{X}^r} [a_i(\mathbf{X}_s^r, t) P(\mathbf{X}_s^r, t)] + \\ & + \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^N \frac{\partial^2}{\partial X_i^r \partial X_j^r} [\beta_{ij}(\mathbf{X}_s^r, t) P(\mathbf{X}_s^r, t)], \end{aligned}$$

где $a_i(X_s^r, t)$ – компоненты вектора $\mathbf{A}(X_s^r, t) = [a_1(X_s^r, t), a_2(X_s^r, t), \dots, a_N(X_s^r, t)]$, которые и определяют коэффициент сноса диффузионного процесса, описывающего загруженность i -го узла, причем

$$\mathbf{A}(X_s^r, t) = \phi'(t)A(x_i^r, t-r),$$

$$A(x_i^r, t) = [a_1(x_1^r, t), a_2(x_2^r, t), \dots, a_N(x_N^r, t)]^T,$$

а $a_i(x_i^r, t) = \lambda_i^{r+}(x_i^r, t) - \lambda_i^{r-}(x_i^r, t)$; $\beta_{ij}(X_s^r, t)$ являются компонентами матрицы $\mathbf{B}(X_s^r, t) = \|\beta_{ij}(X_s^r, t)\|$, $i, j = \overline{1, N}$ и определяют коэффициент диффузии соответствующего диффузионного процесса, причем

$$\mathbf{B}(X_s^r, t) = \phi^r(t)B(x_i^r, t-\tau)(\phi^r(t)B(x_i^r, t-\tau))^T,$$

$$B(x_i^r, t) = [\beta_1(x_1^r, t), \beta_2(x_2^r, t), \dots, \beta_N(x_N^r, t)]^T$$

и

$$\beta_i(x_i^r, t) = \lambda_i^{r+}(x_i^r, t) + \lambda_i^{r-}(x_i^r, t).$$

Здесь $\lambda_i^{r+}(x_i^r, t)$, $\lambda_i^{r-}(x_i^r, t)$ – суммарная интенсивность входного и выходного потока пакетов в i -м узле сети НОСС соответственно, а $\phi(t) = \|\phi_{ij}(t)\|$, $i, j = \overline{1, N}$.

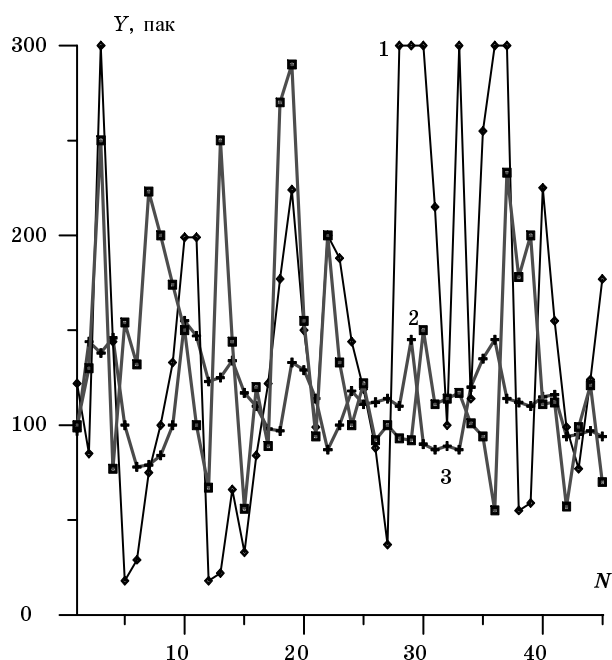
Управление сетью в реальном масштабе времени и аппроксимация процессов сетевого уровня диффузионной моделью требуют определения процедур оценивания параметров потоков пакетов на узлах НОСС. Оценивание интенсивностей должно проводиться на каждом узле сети. Служебной информацией, передаваемой между узлами сети, является оценка интенсивностей потоков пакетов и состояние узла (количества пакетов в очереди). Алгоритм рассылки сетевой информации состоит из следующих частей: измерение интенсивности потоков пакетов, циркулирующих на узлах сети; распространение служебной информации; расчет загруженности узлов сети в требуемые моменты времени; расчет оптимальных путей для пакетов с использованием динамического программирования.

Эффективность метода управления в узлах производительностью сетевой НОСС связи с использованием фрактальной формализации информации о состоянии узла (количества пакетов в очереди) сравнивалась с эффективностью метода адаптивного управления информационными потоками с использованием традиционного метода получения информации о состоянии узла. При этом эффективность алгоритмов управления сравнивалась по значениям производительности для различных условий функционирования НОСС.

Имитационное моделирование проводилось на модели сети, включающей 45 спутников-узлов, размещенных в 5 орбитальных плоскостях по 9 спутников в каждой. Высота орбиты составляет 1500 км, что соответствует одному из вариантов развертывания отечественной НОСС «Гонец» [7].

Результаты моделирования показали, что при малой загрузке производительность НОСС остается одинаковой при различных стратегиях маршрутизации. При увеличении загрузки происходит замедление роста производительности, а затем значительный спад в случае фиксированного управления и менее значительный спад в случае управления с использованием диффузионной модели сети. В то же время использование алгоритма с учетом фрактальной формализации является предпочтительным, так как его применение увеличивает производительность сети на 25% по сравнению с алгоритмом фиксированного управления и на 15% по сравнению с диффузионной моделью.

Следует отметить, что основной причиной повышения качества процесса функционирования сети является более эффективное использование сетевого ресурса алгоритмом управления с фрактальной формализацией информации о состоянии узлов при общей сетевой нагрузке, равной 7000 пакетов в секунду. Для того чтобы убедиться в этом, обратимся к рисунку, где представлено усредненное по 300 реализациям распределение пакетов по узлам НОСС для алгоритма фиксированного управления (кривая 1), алгоритма с использованием диффузионной модели (кривая 2), алгоритма с использованием фрактальной формализации (кривая 3) при загрузке узлов НОСС. Из анализа данных рисунка следует, что при фиксированной маршрутизации в отдельных узлах сети могут возникать существенные перегрузки, препятствующие передаче сообщений абонентов на эти узлы, в то время как другие узлы сети практически не заняты (при этом среднее количество пакетов на узлах равно 70). Так, на узлах 3, 28, 29, 30, 36, 37 ко-



■ Распределение пакетов по узлам НОСС

личество пакетов в очередях превышает 200 пакетов, в то время как на узлах 5, 12, 15 и некоторых других количество пакетов мало. Неравномерность загрузки узлов усиливается вследствие игнорирования при выборе маршрутов информации о состоянии других узлов сети.

В случае алгоритма с использованием диффузионной модели возникающие перегрузки гораздо меньше и определяются недостаточной информативностью о состоянии узлов сети вследствие неучета фактора фрактальности. Среднее количество пакетов на узлах сети составляет 130 пакетов (кривая 2). Реализация адаптивного управления, основанного на расчете и использовании прогнозов состояния узлов сети с использованием фрактальной модели, позволяет равномерно распределять нагрузку по сети – разница в количестве пакетов на наиболее и наименее нагруженных узлах сети не превышает 15–20%. Данное распределение пакетов предотвращает перегрузки и позволяет принимать в сеть больший внешний трафик. Кроме того, сокращается общее количество пакетов, находящихся в НОСС (среднее количество пакетов в узлах сети составляет 111 пакетов), что по теореме Литтла ведет к снижению задержки в сети и повышению производительности.

Таким образом, разработанный метод локального управления производительностью сетевой НОСС связи позволяет уменьшить вероятность перегрузок в узлах НОСС связи, уменьшить поте-

ри информации, повысить производительность как в отдельных узлах, так и в сети в целом, исключить опасность блокировки сети, более рационально использовать сетевые ресурсы.

Литература

1. Бестугин А. Р., Стогов Г. В., Богданова А. Ф. Контроль и диагностирование телекоммуникационных сетей: Монография. СПб.: Политехника, 2003. 174 с.
2. Бестугин А. Р., Стогов Г. В., Богданова А. Ф. Самоподобные процессы в высокоскоростных сетях // Оборонная техника. 2003. № 7. С. 41–47.
3. Laevens K. Power spectral density of ON-OFF Sources // Electronics Letters. 1997. Vol. 33. N 7. P. 559–560.
4. Саулис Л., Статулявичус В. Предельные теоремы о больших отклонениях. Вильнюс: Мокслас, 1989. 208 с.
5. Ададуров С. Е., Богданова А. Ф., Стогов Г. В., Сарычев В. А. Диффузионная модель многоприоритетной системы массового обслуживания // Радиоэлектроника и связь. 1999. Вып. 2. С. 5–14.
6. Ададуров С. Е., Анцев Г. В., Сарычев В. А. Диффузионная модель системы массового обслуживания с несколькими приоритетами // Проблемы транспорта. 2001. № 1. С. 15–19.
7. Милов Ю. Г., Рубцов Н. Н. Перспективы развития подвижной спутниковой связи в России // Электросвязь. 1995. № 2. С. 9–12.