УДК 621.396.96

СИНТЕЗ МОДЕЛЕЙ ПОТОКОВ СООБЩЕНИЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ТРАФИКОМ В СПУТНИКОВЫХ СЕТЯХ

Г. В. Стогов,
доктор техн. наук, профессор
А. Ф. Богданова,
канд. техн. наук, научный сотрудник
Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского

Исследуются закономерности, характеризующие самоподобные процессы передачи информации в телекоммуникационных сетях. Основное внимание уделено моделям, основанным на реальных измерениях трафика.

We study the properties of self-similar processes of information transmission in telecommunication networks. The main attention is focused on the models based on real-life traffic measurement.

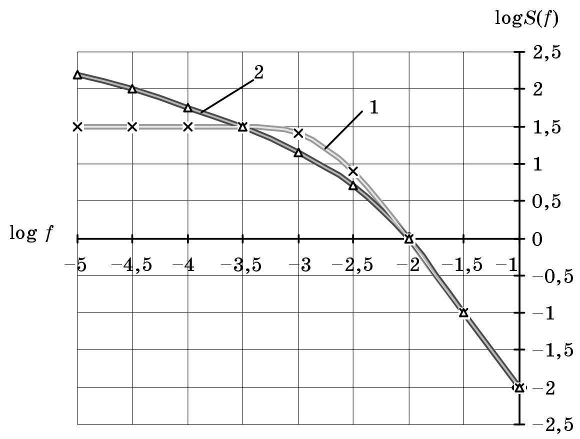
Внедрение новой технологии в спутниковые системы связи, в частности, использование АТМ-технологии в низкоорбитальных спутниковых системах (НОСС) связи, требует разработки методов и алгоритмов управления информационными потоками, которые до сих пор традиционно проводились на основе пуассоновских (или, более обобщенно, марковских) предположений относительно структуры трафиковых прибытий и экспоненциальных предположений относительно требований удержания ресурса [1]. Специфика использования спутниковых линий связи проявляется в том, что ею может пользоваться одновременно множество различных потребителей. Такая общая линия связи, к которой через специальные интерфейсы подключаются многие пользователи сети, а также оборудования земных станций, образует моноканал. Сходство сетей, реализующих моноканал, позволяет проводить аналогию между сетями, использующими спутниковые линии, и локальными вычислительными сетями (ЛВС). Следовательно, методы расчета, пригодные для ЛВС, могут быть использованы в сетевых НОСС связи. Однако внедрение АТМ-технологии с использованием средне- и высокоскоростных каналов в современных сетях показало, что традиционные модели непригодны в части общности, адекватности и устойчивости [2].

Развитие современных быстродействующих сетей и интенсивные исследования, проводимые с целью изучения их трафика, генерируемого реальными службами и приложениями, показали, что фактическая нагрузка в исследованных сетях существенно отличается от наиболее распространенных моделей телефонного и пакетного трафика.

Результаты высококачественных измерений, проводимых на множестве различных средне- и высокоскоростных сетей, в частности ЛВС, указывают на наличие фрактальных свойств измеренного сетевого трафика. Несмотря на то что глубина статистического изучения полученных измерений сильно менялась, в различных источниках отмечается, что нижним уровнем во всех случаях являлось установление того факта, что самоподобие есть реальность и не может быть игнорировано при разработке методов управления информационными потоками в средне- и высокоскоростных сетях [3].

Фрактальные процессы характеризуются так называемой долговременной зависимостью, которая вносит особую специфику в процесс анализа данных, например в оценивание параметров. Так, хорошо известно, что даже наиболее элементарные из классических статистик (например, оценивание среднего значения стационарного процесса) подчинены долговременной зависимости. Важность надежных оценок среднего становится особенно очевидной при анализе очередей со стационарным входным потоком с долговременной зависимостью, где эта оценка прямо характеризует очередь.

Долговременная зависимость является не единственной фрактальной характеристикой, которая имеет техническое влияние. Некоторые фрактальные процессы характеризуются плотностями с утяжеленными хвостами. Например, распределения, используемые для многих новых служб, спадают так медленно, что они наилучшим образом представлены распределениями с бесконечной дисперсией. Так, самоподобие, или долговременная зависимость, проявляется в поведении спектральной плотности мощности при низких частотах, которые также имеют сильное влияние на поведение очереди трафика [4]. На рис. 1 показана зависимость спектральной плотности мощности $S(f)$ от частоты f на графике log–log для двух типов моделей источников. Кривая *1* соответствует хорошо известной модели источника в виде марковской цепи с двумя состояниями. Кривая *2* соответствует модели источника типа ВКЛ/ВЫКЛ (ON/OFF) с использованием распределений периодов с утяжеленным хвостом. Такая модель демонстрирует долговременную зависимость. В то время как в случае марковского источника $\log S(f)$ быстро стремится к постоянной, когда f стремится к нулю, кривая *2* неограниченно возрастает. Влияние распределений с утяжеленными хвостами на все аспекты управления требует дополнительного исследования.



■ ***Рис. 1.*** *Зависимость спектральной плотности от частоты*

Анализ результатов моделирования очередей, питаемых потоком фрактального трафика, показал, что распределение длины очереди асимптотически более «тяжелое», чем предсказывается обычными марковскими моделями. Более тяжелые, чем «экспоненциальные спады», распределения длин очереди являются важными характеристиками для размера буфера: при всех других равных факторах более тяжелая асимптотика должна означать больше буферных требований.

На основе анализа отличительных особенностей фрактального трафика, его влияния на статистическое оценивание параметров трафика, а также на различные аспекты управления трафиком был сделан вывод о необходимости фрактальной формализации описания трафика сетевой НОСС связи с АТМ-технологией.

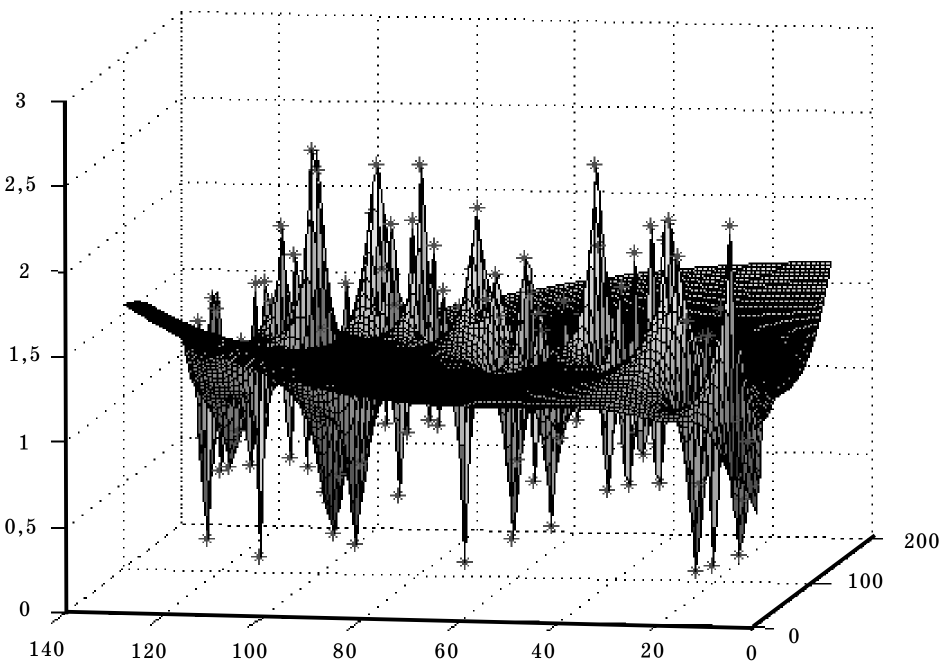
В рамках формализованного описания сетевого трафика применительно к трафику НОСС связи необходимо рассматривать фрактал как стохастический объект, подобный временны́м рядам, обладающим свойством самоподобия, которое понимается в статистическом смысле [5], а именно: статистические характеристики пакетной нагрузки имеют структурное сходство при ее измерении в разных масштабах времени. Общими характеристиками таких процессов являются долговременная зависимость, которая характеризуется поведением хвоста автокорреляционной функции $\gamma_x(k) \sim c_\gamma|k|^{-(1-\alpha)}$, когда $k \to \infty$, $\alpha \in (0, 1)$, где c_γ – положительная константа, а также эквивалентная формулировка долговременной зависимости в частотной области (по теореме Винера–Хинчина), описываемая в окрестности начала координат в виде $f_x(v) \sim c_f|v|^{-\alpha}$, $|v| \to 0$, которая известна как «спектр типа $1/f$».

Сравнительный анализ традиционных и нетрадиционных методов моделирования трафика показал [6], что традиционные модели пакетного трафика дают слишком оптимистичные характеристики по сравнению с характеристиками, полученными из реальных данных. Модели, соответствующие высокосложной динамической структуре реального трафика [7], в основном имеют спектр мощности вида $1/f$, такие как фрактальное броуновское движение (ФБД), фрактальный гауссовский шум (ФГШ) и синтез, основанный на вейвлетах. ФБД является гауссовским нестационарным стохастическим процессом $Z(t)$ с нулевым средним и единственным масштабным параметром (Хёрст-параметром H), таким, что $0 < H < 1$. ФБД рассматривается как естественное расширение обычного броуновского движения с $H = 1/2$. Характеристика нестационарности раскрывается структурой ковариации: $\mathrm{cov}[Z(t), Z(s)] = \sigma^2/2(|\tau|^{2H} + |s|^{2H} - |t-s|^{2H}$.

Нестационарное ФБД имеет стационарные инкременты, что означает, что вероятностные свойства процесса $X(k) = Z(k+1) - Z(k)$, $k \geq 0$, зависят только от переменной $(t-s)$. Процесс $X(t)$ есть ФГШ, его автокорреляционная функция $r(k) = 1/2(|k+1|^{2H} - 2|k|^{2H} + |k+1|^{2H}$, $k \geq 1$, демонстрирует долговременную зависимость.

Рассмотрение возможности использования вейвлет-анализа для моделирования процессов ФБД и ФГШ также показало, что собственное масштабирующее свойство вейвлетного базиса хорошо приспособлено для анализа самоподобных процессов, причем прямо посредством коэффициентов масштабно-временно́й вейвлетной декомпозиции.

Модель самоподобного трафика может быть получена методом имитационного моделирования, в частности, на основе быстрого преобразования Фурье [8]. При этом использовались реальные измерения ковариационной матрицы (или спектра мощности), а также свойства циркулянтных матриц с использованием метода линейного программирования. В результате полученный дискретный процесс имеет характеристики, близкие к реально наблюдаемому сетевому трафику (рис. 2).



■ *Рис. 2. Случайный процесс*

Составной частью формализованного описания трафика являются методики оценивания параметров и прогнозирования трафика. На основе анализа известных методов оценки параметров самоподобного трафика было отмечено, что для описания трафика требуется только три параметра: скорость, параметр Хёрста и пиковость, – чтобы многие теоретические проблемы, такие как определение длины очереди, размера буфера и потери ячейки, были решены. Поэтому Хёрст-параметру принадлежит центральное место в описании самоподобного трафика. Однако методы оценивания Хёрст-параметра, основанные на R/S-статистике, дают сильно смещенную оценку, поэтому был использован метод Абри–Вейтча (AV-оценка) [9, 10], основанный на вейвлет-анализе, для совместного оценивания долговременной зависимости и параметра Хёрста. AV-оценка основывается на том, что при использовании вейвлет-анализа среднее E_j на каждой шкале равно $E_j = \frac{1}{N_j}\sum_k |d_{j,k}|^2$, где $d_{j,k}$ – вейвлетные коэффициенты, а N_j – число вейвлетных коэффициентов на каждой шкале j. Тогда E_j – мера энергии, которая лежит внутри данной ширины полосы 2^{-j} около частоты $2^{-j}\lambda_0$, λ_0 – произвольная эталонная частота, полученная выбором материнской вейвлеты ψ_0, и, таким образом, может быть рассмотрена как статистическая оценка для спектра.

Получение AV-оценки параметров трафика НОСС с АТМ-технологией было основано на использовании следующей последовательности: вейвлетная декомпозиция, оценка дисперсии деталей, анализ с использованием диаграммы с логарифмической шкалой, оценивание параметров. Вейвлетная декомпозиция осуществляется на основе дискретного вейвлетного преобразования с использованием алгоритма кратномасштабного анализа, в результате которой генерируются детали $d_x(j, k)$ на диадической сетке. На следующем этапе на каждой фиксированной октаве j детали возводятся в квадрат и усредняются по «времени» k для получения μ_j – оценки дисперсии деталей. Так как математические ожидания деталей все тождественно равны нулю, μ_j – среднее квадратов деталей при данном j является оценкой дисперсии при этом j. Для процессов с долговременной зависимостью μ_j следует степенному закону в j с экспонентой α. Анализ с использованием диаграммы с логарифмической шкалой позволил определить масштабный диапазон (j_1, j_2) из графика $y_i = \log(\mu_j)$ от j диаграммы, где измерение y_i происходит по прямой линии. При оценивании параметров использовалась взвешенная линейная регрессия на области масштабирования.

Исходя из фрактальной формализации сетевого трафика и полученных оценок параметров [9, 10] необходимо было рассмотреть прогнозирование фрактального трафика для целей управления трафиком. Для этого рассмотрим процесс ФБД (Z_t: $t \in (-\infty, \infty)$) с параметром $H \in (1/2, 1)$ [11]. Задача прогноза формулировалась как предсказание Z_a ($a>0$) на основе величин Z_t, полученных на интервале $(-T,\ 0)$. Из-за стационарности приращений Z_t это эквивалентно задаче предсказания разности $Z_{t+a}-Z_t$ на основе разности Z_s-Z_t, $s\in(t-T,\ t)$.

Прогнозное значение $\hat{Z}_{a,\,T}=E\left[Z_a\,|\,Z_s,\ s\in(-T,\ 0)\right]$ ищется как интеграл $\int_{-T}^{0} g_T(a,\ t)\mathrm{d}Z_t$, где:

– для $T<\infty$, $t\in(0,\ T)$

$$g_T(a,\ -t)=\frac{\sin\left(\pi\left(H-\frac{1}{2}\right)\right)}{\pi}t^{-H+\frac{1}{2}}(T-t)^{-H+\frac{1}{2}}\times$$
$$\times\int_0^a\frac{\sigma^{H-\frac{1}{2}}(\sigma+T)^{H-\frac{1}{2}}}{\sigma+t}\mathrm{d}\sigma;$$

– для $T=\infty$, $t>0$

$$g_T(a,\ -t)=\frac{\sin\left(\pi\left(H-\frac{1}{2}\right)\right)}{\pi}t^{-H+\frac{1}{2}}\int_0^a\frac{\sigma^{H-\frac{1}{2}}}{\sigma+t}\mathrm{d}\sigma=$$

$$=\frac{\sin\left(\pi\left(H-\frac{1}{2}\right)\right)}{\pi}\left(\frac{1}{H-\frac{1}{2}}\left(\frac{t}{a}\right)^{-H+\frac{1}{2}}-\right.$$
$$\left.-B_{a/(t+a)}\left(H-\frac{1}{2},\ \frac{1}{2}-H\right)\right),$$

где $\mathrm{B}(\cdot,\cdot)$ – неполная бета-функция. Функция $g_T(a,\cdot)$ является решением интегрального уравнения $\alpha\int_0^T g_T(a,-t)[t-s]^{\alpha-1}\mathrm{d}t=(a+s)^{\alpha}-s^{\alpha},\ s\in(0,\ T)$, где $\alpha=2H-1$ и обладает свойством масштабирования $g_T(a,\ t)=g_{T/a}(1,\ t/a)$.

Проведенный анализ дисперсии ошибки $\dfrac{D^2(Z_a-\hat{Z}_{a,\,\infty})}{D^2(Z_a)}$ как функции T показал, что предсказание Z_a дает очень малое отличие от того, известно Z на $(-a,\ 0)$ или на $(-\infty,\ 0)$. Однако оно становится существенным, если попытаться моделировать ФБД шаг за шагом вперед. Таким образом, делается вывод о целесообразности использования только самой последней секунды, чтобы предсказать следующую секунду самой последней минуты для предсказания следующей минуты и т. д.

Полученные результаты могут быть положены в основу метода управления производительностью сетевой низкоорбитальной спутниковой системы связи.

Литература

1. **Шелухин О. И., Тенякшев А. Н., Осин А. В.** Фрактальные процессы в телекоммуникациях. М.: Радиотехника, 2003. 479 с.
2. **Erramili A., Pruthi P., Willinger W.** Resent Developments in Fractal Traffic Modelling// St. Peterburg Int. Teletraff. Semin. «New Telecommun, Serv. Dev. Networks», St. Peterburg, 25 June–2 Jule, 1995: Proc. St. Peterburg, 1995. P. 240–251.
3. **Бестугин А. Р., Стогов Г. В., Богданова А. Ф.** Самоподобные процессы в высокоскоростных сетях// Оборонная техника. 2003. № 7. С. 41–47.
4. **Laevens K.** Power spectral density of ON/OFF sourses // Electronics Letters. 27 March 1997. Vol. 33. N 7. P. 559–560.
5. **Stark T., Bresloff P.** Iterated Function Systems and Their Application // Wavelets, Fractals and Fourier Transforms: Detection and Analysis of Structure. Clarendon Press. Oxford, 1999. P. 65–90.
6. **Бестугин А. Р., Стогов Г. В., Богданова А. Ф.** Контроль и диагностирование телекоммуникационных сетей: Монография. СПб.: Политехника, 2003. 174 с.
7. **Богданова А. Ф., Невейкин М. Е., Стогов Г. В.** Модель фрактального трафика системы связи//Оборонная техника. 2003. № 9. С.73–74.
8. **Красюк В. Н., Стогов Г. В., Богданова А. Ф.** Моделирование самоподобной нагрузки на основе быстрого преобразования Фурье // III Междунар. симпоз. «Аэрокосмические технологии. АПТ'04». Санкт-Петербург, 2–4 июня, 2004: Материалы конф. С. 250–251.
9. **Богданова А. Ф., Павлов Б. А.** Оценивание параметров трафика // Оборонная техника. 2003. № 7. С. 66–75.
10. **Богданова А. Ф.** Вейвлетная оценка Хёрст-параметра // III Междунар. симпоз. «Аэрокосмические технологии. АПТ'04». Санкт-Петербург, 2–4 июня, 2004: Материалы конф. С. 252.
11. **Бестугин А. Р., Стогов Г. В., Богданова А. Ф.** Вопросы прогнозирования трафика в высокоскоростных сетях // Оборонная техника. 2003. № 7. С. 48–56.