УДК 681.324

Г.А. КУЧУК

Харьковский военный университет, Украина

МЕТОД КОНТРОЛЯ СЕТЕВОГО ТРАФИКА РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Предложен метод, позволяющий осуществить контроль сетевого трафика распределенной системы управления, который основывается на определении момента времени изменения стохастических свойств трафика, исходя из предложенной оценки функции плотности распределения вероятностей на основе заданной выборки.

сетевой трафик, распределенная система управления, долговременная зависимость, полипачечность

Введение

В распределенных системах управления авиационно-космическими объектами (РСУ АКО) превышение допустимого времени задержки пакета или его потеря могут привести к катастрофическим последствиям. Одной из причин данной ситуации в современных телекоммуникационных сетях является перегрузка виртуального канала (ВК), вызванная резким увеличением объема сетевого трафика [1]. Такие особенности сетевого трафика РСУ АКО, как наличие долговременной зависимости и длительных пульсаций, определяющие его фрактальный характер [2], не позволяют использовать классический подход [3], основанный на коррекции в режиме реального времени соответствующей трафиковой модели. В [4] показано, что широкий диапазон скоростей передачи – от нескольких сотен бит/с до сотен Мбит/с, существенный статистический характер информационных потоков в интегральных сетях, большое разнообразие сетевых конфигураций значительно усложняют описание трафика в современных информационных системах по сравнению с классическими сетями связи. В [5] обосновано требование наличия возможности любого изменения ширины полосы пропускания канала между пунктами приема и передачи, обеспечиваемое пакетной коммутацией в современных сетевых технологиях на уровне виртуального канала, причем плавно и практически на любую величину, вплоть до использования всех возможных сетевых ресурсов, что делает в ряде случаев неприемлемым для анализа характеристик реального сетевого трафика использование классического подхода, основанного на марковских или полумарковских моделях [6], управлении доступом на основе понятия эффективной пропускной способности [7] и предположениях о пуассоновском характере потоков [8].

1. Формулирование проблемы

Возникновению перегрузки сетевого трафика предшествует изменение его стохастических свойств, поэтому фиксация данного момента времени позволит принять соответствующие меры, например, оперативное перераспределение сетевого ресурса. В ряде работ анализ характеристик трафика проводится на основе его статистического характера в системах с долговременно зависимыми процессами на входе [9]. Однако, в общем виде проблема получения характеристик реального трафика в интегральных сетях, использующих современные технологии, на сегодня не решена [10]. В [11] предложен метод оценки характеристик сетевого трафика РСУ на транспорте, предполагающий частичную эластичность трафика и рассматривающий точечные источники изолированно друг от друга без учета свойств полипачечности сети.

© Г.А. Кучук

Целью данной статьи является описание метода, позволяющего осуществить контроль сетевого трафика РСУ АКО, включающей полипачечные трафиковые источники, который основывается на определении момента времени изменения стохастических свойств трафика. Основой метода является нахождение оценки функции плотности распределения вероятностей на основе заданной выборки.

2. Верхняя оценка выборки полипачечного трафика

Для определения значения верхней оценки рассмотрим произвольную выборку из *n* последовательно расположенных значений времен поступления пакетов полипачечного трафика РСУ АКО $\mathfrak{I}^* = \left(t_1^*, t_2^*, \dots, t_n^*\right)$. Для оценки плотности распределения вероятностей времен рассмотрим в соответствии с [6] $F_n^*(t)$ – эмпирическую функцию распределения, позволяющую получить приближение искомой функции $f_n^*(t)$. Однако отмечено [5], что при таком подходе получаемые оценки значительно расходятся с плотностью вероятностей распределения поступлений реального трафика при наличии «тяжелых хвостов» или длительных пульсаций. Перейдем от кусочно-непрерывной к непрерывной эмпирической функции распределения. Для этого определим $F_n^{(M)}(t)$ – непрерывную верхнюю оценку, наиболее близкую к $F_n^*(t)$.

Построим новое разбиение временного интервала выборки $\tau^{(M)} = \left(t_0^{(M)}, t_1^{(M)}, \dots, t_n^{(M)}\right)$, в котором точки разбиения определяются следующим образом:

$$t_0^{(M)} = 2t_1^{(*)} - t_2^{(*)}; \quad t_n^{(M)} = t_n^{(*)};$$

$$t_i^{(M)} = \frac{t_{i-1}^* + t_i^*}{2} \text{ при } i \in \overline{1, n-1},$$

и определим $F_n^{(M)}(t)$ на $\tau^{(M)}$:

$$F_n^{(M)}\left(t_0^{(M)}\right) = 0; \; F_n^{(M)}\left(t_i^{(M)}\right) = \frac{2i+1}{2n}.$$

Верхняя оценка выборки – линейный сплайн, проходящий через точки $F_n^{(M)}\left(t_i^{(M)}\right)$, $F_n^*\left(t_i^*\right)$:

$$F_n^{(M)}(t) = \frac{1}{n}\sum_{l=0}^{n-1}\left(1 + \frac{t - t_l^{(M)}}{t_{l+1}^{(M)} - t_l^{(M)}}\right) \times \\ \times \left(\Theta\left(t - t_l^{(M)}\right) - \Theta\left(t - t_{l+1}^{(M)}\right)\right) + \Theta\left(t - t_n^{(M)}\right), \tag{1}$$

где $\Theta(\bullet)$ – функция Хевисайда.

При $n \to \infty$ функции $F_n^{(M)}(t)$ сходятся к функции распределения реального трафика $F(t)$, т.е.

$$P\left(\sup_t \left(F_n^{(M)}(t) - F(t)\right) \xrightarrow{n\to\infty} \right) = 1,$$

так как

$$\sup\left|F_n^{(M)}(t) - F(t)\right| \le \sup\left|F_n^*(t) - F(t)\right| + \frac{1}{n}.$$

3. Статистическая оценка функции плотности распределения вероятностей

Предположив, что плотность вероятности исследуемого реального трафика $f(t) \in L_2(-\infty; +\infty)$, будем искать ее из условия [9]:

$$F(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)\Theta(t - x)dx, \tag{2}$$

т.е. $f(t)$ – решение интегрального уравнения Фредгольма первого рода, не являющееся устойчивым относительно малых изменений $F(t)$. Используем для его решения метод регуляризации Тихонова, заключающийся в том, что из последовательностей $F_n^{(M)}(t)$ строится последовательность функций $f_n^{(M)}(t)$, минимизирующая функционал

$$\Phi\left(f, F_n^{(M)}\right) = \left\| \aleph f - F_n^{(M)} \right\|_{L_2}^2 + \alpha_n \Omega(f), \tag{3}$$

где $\aleph : \{f_i\} \to \{F_i\}$ – оператор взаимно-однозначного отображения функциональных пространств $\left(\text{исходя из } (2) \; \aleph f(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)\Theta(t - x)dx\right)$; $\|\bullet\|_{L_2}$ –

метрика в $L_2(-\infty;+\infty)$; α_n – константа регуляризации; $\Omega(f)$ – стабилизирующий функционал, для которого M_c – компакт $\left(\text{из } [12]\ \Omega(f)=\|f(t)\|^2_{L_2}\right)$.

Для нахождения минимума $\Phi\left(f,F_n^{(M)}\right)$ найдем производную Фреше по $f(t)$ в $L_2(-\infty;+\infty)$:

$$\Phi(f+\Delta f)-\Phi(f)=\left\|\aleph f(t)+\aleph\Delta f(t)-F_n^{(M)}(t)\right\|^2_{L_2}+$$
$$+\alpha_n\|f(t)+\Delta f(t)\|^2_{L_2}-\left\|\aleph f(t)-F_n^{(M)}(t)\right\|^2_{L_2}-$$
$$-\alpha_n\|f(t)\|^2_{L_2}=\left\|\aleph f(t)-F_n^{(M)}(t)\right\|^2_{L_2}+$$
$$+\|\aleph\Delta f(t)\|^2_{L_2}+2\left(\aleph f(t)-F_n^{(M)}(t),\aleph\Delta f(t)\right)+$$
$$+\alpha_n\|f(t)\|^2_{L_2}+\alpha_n\|\Delta f(t)\|^2_{L_2}+2\alpha_n(f(t),\Delta f(t))-$$
$$-\left\|\aleph f(t)-F_n^{(M)}(t)\right\|^2_{L_2}-\alpha_n\|f(t)\|^2_{L_2}=$$
$$=2\left(\aleph f(t)-F_n^{(M)}(t),\aleph\Delta f(t)\right)+2\alpha_n(f(t),\Delta f(t))=$$
$$=2\left(\left(\aleph^*\left(\aleph f(t)-F_n^{(M)}(t)\right)+\alpha_n f(t)\right),\Delta f(t)\right)+o(f(t)),$$

где $\aleph^*$ – оператор сопряжений с $\aleph$.

Итак, минимум рассматриваемого функционала $\Phi\left(f,F_n^{(M)}\right)$ достигается на $f(t)$, для которых

$$\aleph^*\left(\aleph f(t)-F_n^{(M)}(t)\right)+\alpha_n f(t)\equiv 0. \qquad (4)$$

После подстановки (4) в (2), учитывая то, что $\aleph f(t)\equiv F(t)$, получим тождество

$$\int_{-\infty}^{+\infty}\Theta(x-t)\left(\int_{-\infty}^{+\infty}\Theta(x-\chi)f(\chi)\,d\chi-F_n^{(M)}(t)\right)dx+$$
$$+\alpha_n f(t)\equiv 0,$$

а после применения обобщенного преобразования Фурье [7] получим выражение

$$\left(-\frac{1}{ix}+\pi\delta(x)\right)\cdot\left(-\frac{1}{ix}+\pi\delta(x)\right)\hat{f}(x)-$$
$$-\hat{F}_n^{(M)}(t)+\alpha_n\hat{f}(x)=0, \qquad (5)$$

в котором:

$$\hat{F}_n^{(M)}(x)=\int_{-\infty}^{+\infty}F_n^{(M)}(t)e^{-itx}dt;\quad \hat{f}(x)=\int_{-\infty}^{+\infty}f(x)e^{-ix\chi}d\chi.$$

После преобразования (1):

$$F_n^{(M)}(t)=\frac{1}{n}\sum_{l=0}^{n-1}\left(1-\frac{t_l^{(M)}}{t_{l+1}^{(M)}-t_l^{(M)}}\right)\times$$
$$\times\left(\Theta\left(t-t_l^{(M)}\right)-\Theta\left(t-t_{l+1}^{(M)}\right)\right)+$$
$$+\frac{1}{n}\sum_{l=0}^{n-1}\frac{t}{t_{l+1}^{(M)}-t_l^{(M)}}\cdot\left(\Theta\left(t-t_l^{(M)}\right)-\right.$$
$$\left.-\Theta\left(t-t_{l+1}^{(M)}\right)\right)+\Theta\left(t-t_n^{(M)}\right).$$

Получив преобразование Фурье для функции Хевисайда [9]:

$$\hat{\Theta}(t-\beta)=\pi\delta(t)-\frac{ie^{-it\beta}}{t};$$

$$\widehat{t\Theta}(t-\beta)=i\left(\pi\delta(1-t)+\frac{ie^{-it\beta}}{t^2}-\frac{\beta e^{-it\beta}}{t}\right),$$

можем записать преобразование Фурье для $F_n^{(M)}(t)$:

$$\hat{F}_n^{(M)}(x)=\frac{i}{nx}\sum_{l=0}^{n-1}\left(e^{-ixt_{l+1}^{(M)}}-e^{-ixt_l^{(M)}}\right)\times$$
$$\times\left(1-\frac{i}{t\left(t_{l+1}^{(M)}-t_l^{(M)}\right)}\right)+\frac{i}{nx}\sum_{l=0}^{n-1}e^{-ixt_{l+1}^{(M)}}+ \qquad (6)$$
$$+\pi\delta(x)-\frac{i}{x}e^{-ixt_n^{(M)}}.$$

Подставив (6) в (5), получим

$$\left(-\frac{1}{ix}+\pi\delta(x)\right)\left(-\frac{1}{ix}\hat{f}(x)+\pi\delta(x)\times\right.$$
$$\times\int_{-\infty}^{+\infty}f(t)e^{-itx}dt-\frac{1}{n}\sum_{l=0}^{n-1}\frac{i}{x}\left(e^{-ixt_{l+1}^{(M)}}-e^{-ixt_l^{(M)}}\right)\times$$
$$\times\left(1-\frac{i}{x(t_{l+1}^{(M)}-t_l^{(M)})}\right)--\frac{1}{n}\sum_{l=1}^{n-1}\frac{i}{x}e^{-ixt_{l+1}^{(M)}}- \qquad (7)$$
$$\left.-\pi\delta(x)+\frac{i}{x}e^{-ixt_n^{(M)}}\right)+\alpha_n\hat{f}(x)=0.$$

Так как для дельта-функции Дирака [9]:

$$f(x)\delta(x)=f(0)\delta(x);\quad \pi\hat{f}(x)\delta(x)=\pi\delta(x),$$

то после соответствующих преобразований выражение (7) принимает следующий вид:

$$\hat{f}(x)-i\pi\delta(x)\hat{f}(x)+\alpha_n\pi x^2\hat{f}(x)+$$
$$\frac{1}{n}\left(\frac{1}{ix}+\pi\delta(x)\right)\left(\sum_{l=1}^{n-1}\xi_l e^{e^{-ixt_l^{(M)}}}+\right.$$

$$+\left(\frac{e^{-ixt_n^{(M)}}}{t_n^{(M)}-t_{n-1}^{(M)}}-\frac{e^{-ixt_0^{(M)}}}{t_1^{(M)}-t_0^{(M)}}\right)\Bigg)=0,$$

где $\xi_l = 1\Big/\left(t_l^{(M)}-t_{l-1}^{(M)}\right)-1\Big/\left(t_{l+1}^{(M)}-t_l^{(M)}\right),$

а используя свойства дельта-функции Дирака [9], найдем из него $\hat{f}(x)$:

$$\hat{f}(x)=-\frac{1}{inx\left(1+\alpha_n x^2\right)}\times$$

$$\times\left(\sum_{l=1}^{n-1}\xi_l\cdot e^{-ixt_l^{(M)}}+\frac{e^{-ixt_n^{(M)}}}{t_n^{(M)}-t_{n-1}^{(M)}}-\frac{e^{-ixt_0^{(M)}}}{t_1^{(M)}-t_0^{(M)}}\right).$$

После применения обратного преобразования Фурье получим решение (2):

$$\begin{aligned}f(t)\to f_n(t)=\frac{1}{2n}\Bigg(&\sum_{l=0}^{n-1}\operatorname{sign}\left(t-t_l^{(M)}\right)\xi_l\times\\&\times\exp\left(\left|t-t_l^{(M)}\right|\Big/\sqrt{\alpha_n}\right)+\\&+\frac{\exp\left(\left|t-t_0^{(M)}\right|\Big/\sqrt{\alpha_n}\right)\cdot\operatorname{sign}\left(t-t_n^{(M)}\right)}{t_n^{(M)}-t_{n-1}^{(0)}}-\\&-\frac{1}{t_1^{(M)}-t_1^{(0)}}\exp\left(\left|t-t_0^{(M)}\right|\Big/\sqrt{\alpha_n}\right)\times\\&\times\operatorname{sign}\left(t-t_n^{(M)}\right)+\\&+2\sum_{l=0}^{n-1}\frac{\theta\left(t_{l+1}^{(M)}-t\right)-\theta\left(t_l^{(M)}-t\right)}{t_{l+1}^{(M)}-t_l^{(M)}}\Bigg),\end{aligned}\qquad(8)$$

являющееся искомой статистической оценкой.

Заключение

На основе полученной аналитической оценки (8) функции плотности распределения вероятностей можно определить числовые оценки степени изменения стохастических свойств трафика полипачечных источников интегральной сети. Направлением дальнейших исследований в данной области является разработка методики определения предельных значений стохастических параметров трафика, при которых необходимо производить оперативное перераспределение сетевого ресурса с целью предотвращения перегрузки ВК РСУ.

Литература

1. Применение транспортных технологий связи, использующих в качестве среды передачи оптическое волокно. – М.: Минсвязи РФ, 2001. – 63 с.
2. Кучук Г.А. Фрактальный гауссовский шум в трафиковых трассах // Системи обробки інформації. – Х.: ХВУ. – 2004. – Вип. 3. – С. 91 – 99.
3. Варакин Л.Е. Введение в теорию инфокоммуникаций. Ч. 1. // Электросвязь. – 2000. – № 2(14). – С. 2 – 11.
4. Захаров Г.П., Симонов М.В., Яновский Г.Г. Службы и архитектура ШЦСИО. – М.: Эко-Трендз, 1993. – 102 с.
5. Корнышев Ю.Н., Пшеничников А.П. Теория телетрафика. – М.: Радио и связь, 1996. – 272 с.
6. Cheng C.S., Thomas J.A. Effective bandwidth in high-speed digital networks // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 1995. – V. 13. – P. 1091 – 1100.
7. Королёв А.В., Кучук Г.А., Пашнев А.А. Адаптивная маршрутизация в корпоративных сетях. – Х.: ХВУ, 2003. – 224 с.
8. Королёв А.В., Кучук Г.А., Пашнев А.А. Управление сетевыми ресурсами. – Х.: ХВУ, 2004. – 224 с.
9. Цыбаков Б.С. Модель телетрафика на основе самоподобного случайного процесса // Радиотехника. – 1999. – № 5. – С. 24 – 31.
10. Столлингс В. Современные компьютерные сети. – С.-Пб.: Питер, 2003. – 784 с.
11. Кульгин М. Интеграция АТМ с локальными сетями // Byte. – 1998. – № 1. – С. 19 – 26.
12. Eramili A, Narayan O., Willinger W. Experimental queuing analyzes with long-range dependent packet traffic // IEEE/ACM Transactions on Networking. – 1996. – V. 4. – P. 209 – 223.

Поступила в редакцию 1.06.2004

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.С. Харченко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.