



УДК 681.511.4

© 2011 г. **Е.Л. Еремин**, д-р техн. наук
(Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск),
С.С. Охотников,
Д.А. Теличенко, канд. техн. наук
(Амурский государственный университет, Благовещенск)

ГИБРИДНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТСП ПОТОКАМИ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПАРАМЕТРОВ СЕТИ¹

На основе ранее синтезированного робастного алгоритма управления очередью маршрутизатора получена гибридная система управления ТСП потоками. Проверена работоспособность дискретного алгоритма управления в условиях априорной неопределенности параметров сети.

Ключевые слова: гибридные системы управления, априорная неопределенность, управление сетевыми заторами, имитационное моделирование.

Введение

Программное обеспечение современных маршрутизаторов реализует широкий спектр алгоритмов управления очередями пакетов и механизмов предотвращения сетевых заторов. Так, в наиболее распространенных операционных системах с открытым исходным кодом FreeBSD и Linux можно насчитать соответственно от шести до восьми реализаций дисциплин обслуживания очередей, в экспериментальных же релизах – до четырнадцати. Не отстает в разнообразии и поддержка различных вариантов ТСП – основного транспортного протокола сети Интернета: шесть основных реализаций и около пятнадцати экспериментальных [1].

Основой повышенного интереса к вопросам управления сетевыми заторами (Congestion Control) [2] является то, что качество обслуживания конечных пользователей сети Интернета является в настоящее время определяющим фактором успешности научных и коммерческих проектов в областях распределенных вычислений и коммуникаций.

Ввиду гетерогенности глобальной сети и неопределенности параметров ее компонент детерминированное моделирование дискретных по своей природе процессов, происходящих в ней, требует большой вычислительной мощности и возможно лишь в отдельных, достаточно частных случаях [3]. В связи с этим ос-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке АБЦП "Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2011 годы)" в рамках проекта «Адаптивные и робастные системы управления сложными динамическими объектами с запаздыванием» (регистрационный номер: 2.1.2/9255).

нованное на стохастических моделях математическое описание динамики каналов, очередей и окна ТСП получило достаточно широкое распространение. Особый класс таких моделей, названный жидкостными (Fluid Flow) [3, 4], позволяет рассматривать процессы в сети с помощью системы обычных нелинейных параметрически неопределенных дифференциальных уравнений.

В работе [5] была предложена основанная на [6] модель динамики долгоживущих потоков ТСП, обслуживаемых очередями двух последовательно соединенных маршрутизаторов – удаленного и локального. На базе критерия гиперустойчивости В.М. Попова был синтезирован робастный закон управления очередью локального маршрутизатора и решена задача стабилизации скорости передачи данных в условиях априорно неопределенных параметров сети, приведены результаты имитационного моделирования.

Целью настоящей работы является получение условий работоспособности гибридной системы управления, позволяющей реализовать предложенный в [5] контроллер очереди непосредственно в виде программного кода, выполняющегося на локальном маршрутизаторе.

Непрерывная система управления

Рассматривается априорно неопределенный нелинейный объект с запаздыванием по управлению вида:

$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) + B(b + \tilde{b}(x(t), x(t-t)))u(t-t) + B\tilde{g}(x(t)), \quad (1)$$

$$y(t) = C^T x(t),$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & N \\ 0 & 0 & -F_0 & N \\ 0 & k_1 a_{11} C_1 & -a_{11} C_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -a_4 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$B = [0 \ 0 \ 0 \ 1]^T, \quad C^T = [1 \ 0 \ 0 \ 0], \quad b = \frac{a_4^2}{2}(1 - a_3),$$

$$\tilde{b}(x(t), x(t-t)) = \frac{1}{2} \left((1 - x_3(t-t) - a_3)(x_4^2(t) + 2a_4 x_4(t)) - a_4^2 x_3(t-t) \right),$$

$$\tilde{g}(x(t)) = \frac{1}{R^2(x_1(t), x_2(t))} - \frac{1}{2}(x_4^2(t) + a_4^2) +$$

$$+ \frac{x_4(t) + a_4}{R(x_1(t), x_2(t))} \left[\frac{Nx_4 - F_0 x_3(t)}{C_1} + \frac{Nx_4(t)}{C_2} \right],$$

$$R(x_1(t), x_2(t)) = D + (x_2(t) + a_2)/C_1 + x_1(t)/C_2. \quad (3)$$

Здесь $x(t) = \{x_i(t)\}$ – вектор состояния сети; $x_1(t) = q_2(t)$, $q_2(t)$ – измеряемое состояние локальной очереди (пакетов); $x_2(t) = q_1(t) - a_2$, $q_1(t)$ – неизмеряемое состояние удаленной очереди (пакетов) с дисциплиной обслуживания RED;

$x_3(t) = p_1(t) - a_3$, $p_1(t)$ – неизмеряемая приведенная частота удаления пакетов либо маркирования пакета в удаленной очереди; $x_4(t) = V(t) - a_4$, $V(t)$ – скорость передачи данных единичного ТСП потока в локальную сеть (пакетов в секунду); скалярный вход $u(t) = 1 - p_2(t)$ ограниченный в силу того, что $p_2(t) \in [0, 1]$ есть приведенная частота удаления пакетов, прибывших в локальную очередь. Параметры сети $a_4 = C_2 / N$, $a_3 = (C_2 - C_1 + F_0) / F_0$ и $a_2 = \underline{q}_1 + a_3 / k_1$ выражаются через следующие значения: N – ожидаемое количество долгоживущих ТСП потоков; C_2 – известная агрегированная скорость передачи данных в локальную сеть (пакетов в секунду); C_1 – ожидаемая агрегированная скорость передачи данных от удаленного маршрутизатора (пакетов в секунду); D – ожидаемая транспортная задержка (секунд); F_0 – ожидаемая часть пропускной способности, зарезервированная для короткоживущих ТСП и не-ТСП потоков (пакетов в секунду); \underline{q}_1 , k_1 и a_{11} – ожидаемые настройки RED удаленного маршрутизатора; t – известное время возврата подтверждения RTT (секунд). Предполагается выполненным условие $b > 0$.

Основной контур обратной связи синтезированного в [5] контроллера определяется выражением, содержащим только измеряемые величины:

$$u(t) = (z_m(t) - \bar{y}_H(t) - z_k(t))(r_0 + \mathbf{g}_0 + \mathbf{a}_0^T |\bar{x}_H(t)| + b_0 |u(t-t)|), \quad (4)$$

где известные константы являются оценками абсолютных величин неопределенных параметров либо ограниченных функций:

$$\begin{aligned} |r(t)| &\leq r_0, \quad |\tilde{\mathbf{g}}(x(t))| \leq \mathbf{g}_0, \\ |\mathbf{a}_i| &\leq \mathbf{a}_{0,i}, \quad i = 1..4, \\ |\tilde{\mathbf{b}}(x(t), x(t-t))| &\leq b_0. \end{aligned} \quad (5)$$

Для определения вектора \mathbf{a}_0^T согласно [5] необходимо представить исходную систему в управляемой фробениусовой форме. Следуя [6], вычислим матрицу управляемости системы (1) – (3):

$$U = \begin{bmatrix} B | AB | A^2 B | A^3 B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & N & -C_2 & C_2^2 / N \\ 0 & N & -C_2 & -(k_1 a_{11} C_1 F_0 N^2 - C_2^2) / N \\ 0 & 0 & k_1 a_{11} C_1 N & -k_1 a_{11} C_1 (a_{11} C_1 N + C_2) \\ 1 & -C_2 / N & (C_2 / N)^2 & -(C_2 / N)^3 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Исходя из того, что управляемая каноническая форма задается в виде

$$A_c = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -a_1 & -a_2 & -a_3 & -a_4 \end{bmatrix}, \quad B_c = [0 \ 0 \ 0 \ 1]^T, \quad C_c = [c_1 \ c_2 \ c_3 \ c_4], \quad (7)$$

аналогичным образом вычислим матрицу управляемости канонической системы (7): $U_c = \begin{bmatrix} B_c | A_c B_c | A_c^2 B_c | A_c^3 B_c \end{bmatrix}$. Теперь матрица преобразования системы (1) в (7)

может быть найдена в виде [6]:

$$P = U_c U^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{k_1 a_{11} C_1 N F_0} & -\frac{1}{k_1 a_{11} C_1 N F_0} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{k_1 a_{11} C_1 N} & 0 \\ 0 & \frac{1}{N} & -\frac{1}{N k_1} & 0 \\ 0 & -\frac{a_{11} C_1}{N} & \frac{-k_1 F_0 - a_{11} C_1}{N k_1} & 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

а коэффициенты матрицы $A_c = P A P^{-1}$ и вектора $C_c = C P^{-1}$ равны соответственно:

$$\begin{aligned} a_1 = 0, \quad a_2 = k_1 a_{11} C_1 C_2 F_0 / N, \quad a_3 = a_{11} C_1 (C_2 + N k_1 F_0) / N, \\ a_4 = (C_2 + N a_{11} C_1) / N, \quad c_1 = k_1 a_{11} C_1 F_0 N, \quad c_2 = a_{11} C_1 N, \quad c_3 = N, \quad c_4 = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Вектор состояния канонической системы находится как $x_c(t) = P x(t)$, где вход в силу $B = B_c$ и выход в силу $y_c(t) = C_c x_c(t) = C P^{-1} P x(t) = C x(t) = y(t)$ не изменяются при переходе от исходной формы представления к канонической.

Таким образом, используя (9), можно получить оценки $a_{0,i} \geq |a_i|$, $i = 1..4$, формирующие закон управления. Входящие в (4) функции времени образованы вспомогательными контурами управления следующим образом:

$$\frac{dz_m(t)}{dt} = -a_0 z_m(t) + r(t) \quad (10)$$

– эталонный скалярный сигнал $z_m(t)$, $r(t)$ – задающее скалярное воздействие, величина a_0 определяет желательную динамику переходных процессов в замкнутой системе; стационарный наблюдатель полного порядка имеет вид

$$\frac{dx_H(t)}{dt} = A_* x_H(t) + B u(t) + M y(t), \quad y_H(t) = C^T x_H(t), \quad \bar{y}_H(t) = g^T \bar{x}_H(t), \quad (11)$$

в котором $\bar{x}_H(t)$ – измеряемый вектор состояния наблюдателя, нормированный величиной $K = -g^T A_*^{-1} M$; $\bar{y}_H(t)$ – обобщенный скалярный выход наблюдателя; векторы g^T , M и матрица A_m выбираются таким образом, чтобы, с одной стороны, выполнялось условие минимальной структурной сложности передаточной функции эталонной модели: $W_m(s) = \frac{g^T \text{Adj}(sE - A_m) B}{\det(sE - A_m)} = \frac{a_0 (s + a_0)^{n-1}}{(s + a_0)^n} = \frac{a_0}{s + a_0}$, а

с другой, – обеспечивалось расположение в комплексной плоскости собственных значений матрицы $A_* = (A_m - M C^T)$ существенно левее точки $(-a_0, 0)$; динамика скалярного выхода $z_k(t)$ упредитель-компенсатора описывается уравнением вида

$$\frac{dz_k(t)}{dt} = -a_0 z_k(t) + u(t) - u(t - t). \quad (12)$$

Цель управления сформулирована относительно измеряемых выходов наблюдателя (11), эталона (10) и компенсатора (12):

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |z_m(t) - \bar{y}_H(t) - z_k(t)| \leq d^2 = const, \quad (13)$$

где d^2 достаточно мала.

Переход к гибридной системе управления

В соответствии с методикой, изложенной в [8, 9], для построения гибридной системы управления и обеспечения требования устойчивости (в нашем случае – диссипативности) для системы (1) – (4), (10) – (12) необходимо основной и дополнительные контуры управления описать уравнениями, связывающими отсчеты непрерывных функций в дискретные моменты времени $t_m = ml$, где $m = 0, 1, 2, \dots$, а l – шаг дискретизации:

$$u_m = u(t_m), z_{m,m} = z_m(t_m), \bar{y}_{H,m} = \bar{y}_H(t_m), z_{k,m} = z_k(t_m), \bar{x}_{H,m} = \bar{x}_H(t_m). \quad (14)$$

Выбрав l таким образом, чтобы выполнялось $t = ld$, где d – натуральное число, определим $u_{m-d} = u(t_m - t)$. С учетом принятых обозначений запишем дискретные приближения уравнений (4), (10) – (12):

$$\begin{cases} u_m = (z_{m,m} - \bar{y}_{H,m} - z_{k,m})(r_0 + g_0 + a_0^T |\bar{x}_{H,m}|) + b_0 u_{m-d}, \\ z_{m,m+1} = (1 - l a_0) z_{m,m} + l r_m, \\ x_{H,m+1} = \tilde{A}_* x_{H,m} + \tilde{B} u_m + \tilde{M} y_m, \\ y_{H,m} = C^T x_{H,m}, \\ \bar{x}_{H,m} = K x_{H,m}, \\ \bar{y}_{H,m} = g^T \bar{x}_{H,m}, \\ z_{k,m+1} = (1 - l a_0) z_{k,m} + l u_m - l u_{m-d}, \end{cases} \quad (15)$$

где коэффициенты третьего уравнения определяются согласно [6] как

$$\tilde{A}_* = E + l(A_m - MC^T), \quad \tilde{B} = lB, \quad \tilde{M} = lM.$$

Таким образом, получена гибридная система управления, включающая непрерывное описание объекта управления (1)-(3) и дискретную аппроксимацию основного и вспомогательных контуров управления, описываемых системой (15).

Имитационное моделирование

На этапе имитационного моделирования была проверена работоспособность системы управления при уровне неопределенности, заданном следующими неравенствами:

$$30 \leq N \leq 100, \quad 1250 \leq C_1 \leq 3200, \quad 0.8C_1 \leq C_2 \leq 0.9C_1, \quad 0.1C_1 \leq F_0 \leq 0.2C_1. \quad (16)$$

Остальные численные значения взяты такими же, как в работах [4, [7]: $t = 0.24$; $q_1 = 200$ при среднем размере пакета в 500 байт, $k_1 = 5e-4$, $K = 2.45e-4$, $a_{11} = 1.33e-4$.

При выборе параметров контроллера (15), в связи со спецификой гибридных систем управления, были учтены практические рекомендации [10]: во-первых, при квантованном измерении выхода необходимо использовать низкочастотный фильтр во избежание эффекта транспонирования высокочастотных

шумов, во-вторых, частота квантования должна быть достаточно высокой – приблизительно в 5-10 раз выше желаемой полосы пропускания замкнутого контура.

Первая рекомендация может быть выполнена подходящим выбором коэффициентов наблюдателя, позволяющего осуществлять низкочастотную фильтрацию выхода объекта управления. Выполнение второй рекомендации связано с соответствующим выбором a_0 и I и предполагает на этапе реализации наличие достаточных вычислительных ресурсов системы, выполняющей программный код контроллера.

В связи с вышеизложенным, но в отличие от работы [5] были использованы настройки контроллера (15): $a_0=2$; $g^T = a_0[8 \ 12 \ 6 \ 1]$; $M = [18; 88; 22; 16]$; $r_0 + g_0 = 2.5$; $a_0^T = [0.2 \ 0.2 \ 0.2 \ 0.2]$; $b_0 = 0.2$.

В результате моделирования в среде SIMULINK было определено максимальное значение шага дискретизации $I = 0.12$ с, при котором в условиях неопределенности (16) при постоянном возмущении F_0 выход гибридной системы отличается от выхода исходной непрерывной системы управления (1) – (4), (10) – (12) не более 5%. На рис. 1 показаны скорости передачи данных для двух вариантов дискретного управления при кусочно-постоянном задающем воздействии r_m .

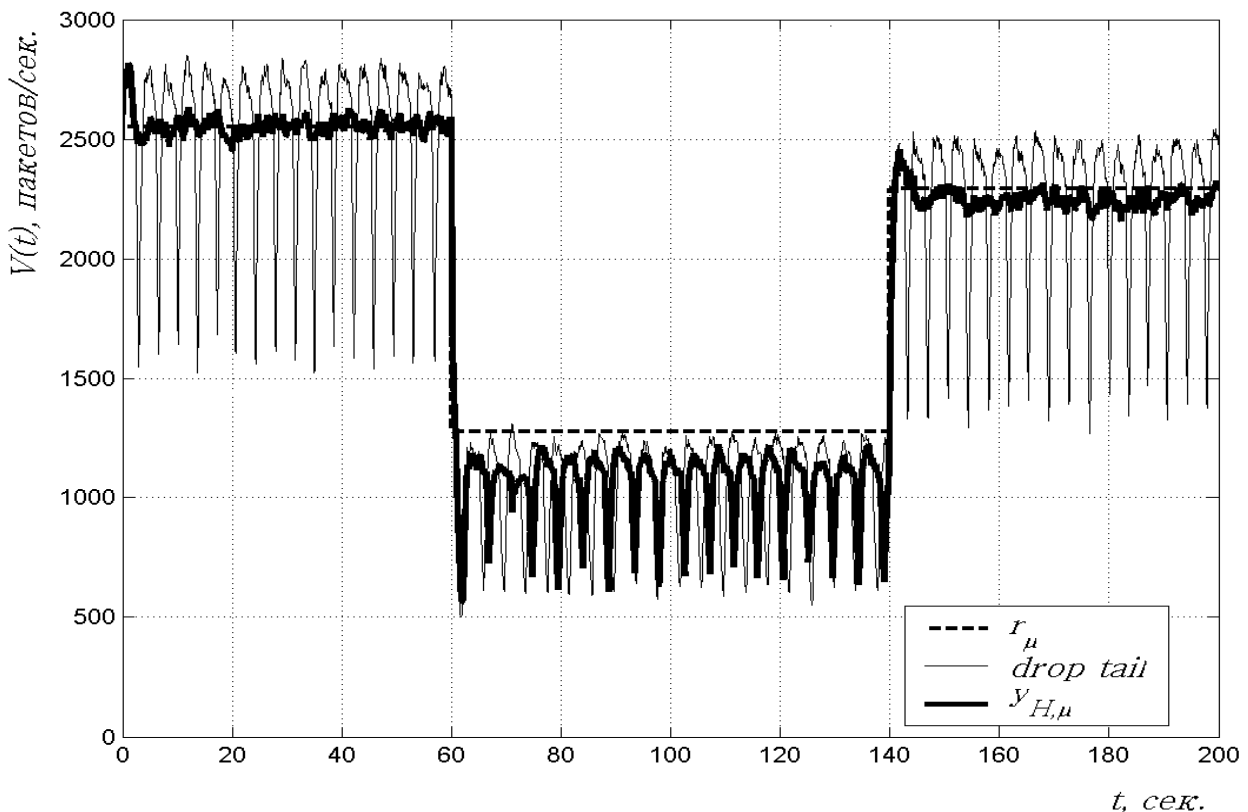


Рис. 1. Слежение за уставкой r_m скорости передачи данных $V(t)$ дискретным контроллером (15) $y_{H,\mu}$ и дисциплиной *tail drop* в условиях интенсивного высокочастотного шума.

В режиме слежения за ступенчатым управляющим воздействием при наличии высокочастотного шума (например, UDP трафика) области диссипативности (13) для соответствующих гибридных систем различны. Наблюдаемый переход

TCP потоков в режим автоколебаний (см. рис. 1) при достаточно низком уровне задающего сигнала (так называемая глобальная синхронизация [1]) является проблемой и для штатно используемых дисциплин обслуживания очередей *tail drop* и RED [2, 3, 7].

В целом полученная система демонстрирует хорошее качество функционирования в условиях значительной параметрической неопределенности. Простота полученного дискретного алгоритма и его работоспособность при достаточно большом шаге квантования, продемонстрированные в ходе имитационного моделирования, позволяют реализовать (15) непосредственно на маршрутизаторе, обслуживающем очередь.

Заключение

Рассмотрена нелинейная система дискретного управления непрерывным объектом с запаздыванием. В условиях неопределенности параметров сети проведена серия вычислительных экспериментов, подтвердивших достаточно хорошую эффективность работы алгоритма управления (15). Выявлены некоторые особенности динамики гибридной системы, что на этапе реализации позволяет использовать дополнительные фильтры, добиваясь желательного качества управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. TCP and Queue Management // Agilent Technologies, Inc., White Paper, January 21, 2008.
2. Floyd S., Jacobson V. Random Early Detection gateways for congestion avoidance // IEEE/ACM Transactions on Networking. – 1997. – Vol. 1, No 4.
3. Misra V., Wei-Bo Gong, Towsley D. Fluid-based Analysis of a Network of AQM Routers Supporting TCP Flows with an Application to RED // Proceedings of ACM/SIGCOMM, 2000.
4. Holot C.V., Misra V., Towsley D., Wei-Bo Gong. A control theoretic analysis of RED // IEEE INFOCOMM, 2001.
5. Еремин Е.Л., Охотников С.С., Теличенко Д.А. Синтез робастного контроллера очереди AQM маршрутизатора // Вестник ТОГУ. – 2010. – № 4(19). – С. 13-22.
6. Мирошник И.В. Теория автоматического управления. Линейные системы. – СПб.: Питер, 2005.
7. Holot C.V., Misra V., Towsley D., Wei-Bo Gong. Analysis and Design of Controllers for AQM Routers Supporting TCP Flows // IEEE Transactions on automatic control. – 2002. – Vol. 47, No 6.
8. Еремин Е.Л., Теличенко Д.А., Чепак Л.В. Дискретно-непрерывная система адаптивного управления температурным режимом паронагревателя // Информатика и системы управления. – 2004. – № 1(7). – С. 117-129.
9. Шеленок Е.А. Гибридная система управления нелинейным скалярным объектом в циклических режимах // Информатика и системы управления. – 2010. – № 3(25). – С. 147-156.
10. Гудвин Г.К., Гребе С.Ф., Сальгадо М.Э. Проектирование систем управления. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004.

E-mail:

Еремин Е.Л. – ereminel@mail.ru;

Охотников С.С. – ovs@amursu.ru;

Теличенко Д.А. – telichenko@yandex.ru.