

ПРОЦЕДУРА ОЦЕНКИ RTT СЕГМЕНТА В СЕТИ НА ОСНОВЕ ЗАШУМ- ЛЕННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Андрушко Юрий Владимирович

Харьковский национальный университет радиоэлектроники
61000, г. Харьков, пр. Ленина 14, каф. ТКС, тел. (057) 702-13-20,
e-mail: ya@kture.kharkov.ua

Article is dedicated to overview approaches of RTT estimation in different versions of TCP protocol and proposed procedure based on noisy observations.

Основная задача протокола TCP – гарантировать доставку данных от источника к получателю, причем, протокол гарантирует так же прием данных в той последовательности, в которой они были отправлены. Для решения задачи гарантированной доставки, протокол использует механизм подтверждения полученных данных приемной стороной. Стоит отметить, что в зависимости от версии протокола TCP механизмы подтверждения, роста и уменьшения окна, реакции на потерянные данные и их повторной пересылки могут отличаться. Так, к примеру, в «классической» версии протокола Tahoe TCP определены процедуры «аддитивного увеличения/мультипликативного уменьшения» и механизм медленного старта [1].

Склонность протокола TCP версии Tahoe к пониженному использованию полосы пропускания и подверженность к незначительным потерям привела к появлению новых версий протокола как стандартизированных, таких как Reno TCP [2] и Vegas TCP [3], так и перспективных, таких как FAST, H-TCP, Hybla, BIC. Основное отличие реализаций протокола – введение новых или модернизация старых механизмов определения, предотвращения перегрузки и начала соединения.

Безотносительно используемого версией протокола математического аппарата, основной характеристикой сети между отправителем и получателем, а так же ее загруженности является время кругового обращения в сети (Round Trip Time, RTT). Процедуры и методы оценки RTT, а так же их точность непосредственно влияют на использование полосы пропускания протоколом TCP. Для описания функционирования протокола при межсетевом взаимодействии можно рассмотреть пару «RTT-характеристики канала». Особенностью этих показателей является то, что они ненаблюдаемы, и кроме этого, изменяются с течением времени и взаимозависимы друг от друга. Наиболее адекватно процесс передачи может быть представлен в виде случайной марковской последовательности. При построении марковской модели процесса передачи данных по сети связи, сам процесс можно описать двумя параметрами – состоянием сети и временем кругового обращения пакета. Можно предположить, что сеть и ее каналы могут находиться в двух состояниях – свободном и загруженном. Так, в свободном состоянии сеть характеризуется низкими показателями RTT и вероятности сброса пакета, а в загруженном – возрастает как задержка, так и вероятность сброса пакета или его искажения. В таком случае динамику сети связи можно описать с помощью марковской цепи q_t с возможными состояниями:

$q_t = e_1$ - отсутствие потерь при свободном канале

$q_t = e_2$ - потеря при свободном канале

$q_t = e_3$ - отсутствие потерь при загруженном канале

$q_t = e_4$ - потеря при загруженном канале

Состояние вероятности марковской цепи q_t можно представить в виде матрицы:

$$P = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} \\ P_{41} & P_{42} & P_{43} & P_{44} \end{pmatrix},$$

где P_{ij} - вероятность наступления события.

Значения элементов матрицы могут быть различны и зависят от ряда факторов, таких как топология сети, объем передаваемых данных, тип трафика и т.д. Вне зависимости от конкретных значений, в матрице должно соблюдаться условие $\sum_{j=1}^4 P_{ij} = 1$. В результате экспериментальных исследований и имитационного моделирования, получены состояния марковской цепи, которые могут быть описаны следующей матрицей:

$$P = \begin{pmatrix} 0.92 & 0.05 & 0.03 & 0 \\ 0.4 & 0.4 & 0.2 & 0 \\ 0.08 & 0 & 0.77 & 0.15 \\ 0 & 0 & 0.4 & 0.6 \end{pmatrix}$$

Проанализировав значения параметров, можно видеть, что самым стабильным состоянием является $q_t = e_1 (P_{11} = 0.92)$, то есть ситуация когда сеть не загружена и нет потерь. Однако даже в этом состоянии, хоть и с низкой долей вероятности, возможна потеря пакета, а следовательно, переход в состояние $q_{t+1} = e_2, P_{12} = 0.05$. Кроме этого так же возможна ситуация перехода в загруженное состояние $q_{t+1} = e_3, P_{13} = 0.03$. В случае потери пакета при свободном канале (состояние $q_t = e_2$) с большой долей вероятности ($P_{21} + P_{22} = 0.8$), цепь останется в незагруженном состоянии $q_{t+1} = e_1$, если потеря пакета не повторится, или $q_{t+1} = e_2$, если повторится. Так же возможен переход (с вероятностью $P_{23} = 0.2$) в загруженное состояние $q_{t+1} = e_3$. В случае когда сеть загружена $q_t = e_3$, чаще происходят потери пакетов $q_{t+1} = e_4, P_{34} = 0.15$, тем не менее достаточно вероятно ($P_{33} = 0.77$), что на следующем шаге потерь не будет $q_{t+1} = e_3$, так же с вероятностью $P_{31} = 0.08$ канал может освободиться $q_{t+1} = e_1$. Повышенная вероятность блокирования трафика и повторных потерь в состоянии $q_t = e_4$ моделирует явление «коллпаса», связанное с потерей нескольких пакетов сразу. Такая ситуация зачастую встречается в тривиальных механизмах активного управления очередями, таких как DropTail. Динамику марковской цепи q_t можно описать в виде рекуррентного уравнения:

$$q_t = P_t^* q_{t-1} + \Delta Q_t^q \quad (1)$$

где P - постоянная матрица перехода с начальным состоянием p_0 , что означает, что в начальный момент времени канал не загружен.

Если обозначить RTT как Y_t , его динамику можно описать с помощью дискретного марковского процесса:

$$Y_t = \lambda_t^* (I - \text{diag } q_t) \theta_{t-1} Y_{t-1} + \mu^* S_t \theta_{t-1} + \Delta M_t^Y, \quad (2)$$

где λ - вектор, состоящий из диагональных элементов матрицы переходных вероятностей;

I - индикаторная функция;

q - вектор вероятностей скачка процесса Y без смены состояния θ ;

θ - марковская цепь;

Y - входной случайный процесс;

μ - стохастическая мера;

S - конечное число состояний $\{e_1, \dots, e_N\}$ цепи θ ;

M - мартингал.

Данный процесс порожден марковской цепью q_t и последовательностями $\{V_t\}$ и $\{X_t\}$. Порождающую последовательность индикаторов скачков без смены состояния марковской цепи $\{V_t\}$ можно задать следующим вектором вероятностей

$p_t = p = (0,05; 0,05; 0,05; 0,05;)^*$. На практике это означает, что в моменты времени t_k'' отличные от моментов переходов состояния марковской цепи q_t , значение времени кругового обращения может измениться с вероятностью $p_i = 0,05$ вне зависимости от состояния цепи q_t и времени. Кроме этого, предполагается, что распределение RTT остается таким же, как и на предыдущем шаге.

В качестве закона распределения времени кругового обращения в случае загруженного канала, можно выбрать логарифмически нормальное распределение $\psi_1(y)$, для которого $m_\eta = 5$, $\sigma = 0,5$ рис. 1, 1. В случае свободного канала, распределение RTT описывается логарифмически нормальным распределением $\psi_2(y)$ с соответствующими параметрами $m_\eta = 2$, $\sigma = 1$ рис. 2.1, 2.

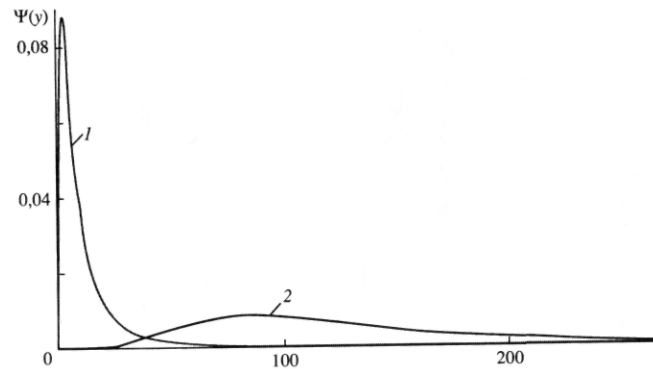


Рис. 1. Плотность распределения RTT

Таким образом, $\{X_t\}$ может быть представлен как последовательность независимых одинаково распределенных четырехмерных векторов с составляющими $x_t^1, x_t^2 \sim \psi_1(y)$ для незагруженных состояний сети $q_t \in \{e_1, e_2\}$ и $x_t^3, x_t^4 \sim \psi_2(y)$ - для загруженных ($q_t \in \{e_3, e_4\}$).

В дополнение к уравнениям состояния (1) и (2) необходимо так же рассмотреть наблюдаемый процесс потери пакетов:

$$\eta_t = A_t^* \theta_{t-1}, \quad (3)$$

где $A = (0, 1, 0, 1)$.

В уравнении наблюдения (3) учтено, что наблюдения являются незашумленными. При этом $\eta_t = 1$ в случае потери пакета или $\eta_t = 0$ если потерь нет.

Можно также предположить, что в моменты, когда потери пакетов отсутствуют, возможны измерения RTT с некоторым шумом:

$$\xi_t = (e_1 + e_3)^* \theta_{t-1} Y_{t-1} + \varepsilon_t, \quad (4)$$

где ε_t - последовательность одинаково распределенных ошибок измерения, распределенных по логарифмически нормальному закону с параметрами $m_\eta = 0, \sigma = 1$.

Задача оптимального оценивания в реальном времени вектора зависимости RTT от состояния канала ($\bar{Y}_t = (\theta_t^*, Y_t)^*$) по доступным наблюдениям $\{\eta_t, \xi_t\}$ является частой задачей оптимальной нелинейной фильтрации марковских процессов. Для сравнения - в стандартном протоколе TCP [1] для оценки значения RTT используется алгоритм стохастической аппроксимации:

$$\hat{R}_k = \hat{R}_{k-1} + \alpha(M - \hat{R}_{k-1}), \quad (5)$$

где $\hat{R}$ - оценка текущего значения RTT;

α – усилительный коэффициент фильтра (шаговая постоянная, определяющая скорость сходимости к установившемуся состоянию и обеспечивающая устойчивость оценки при $0 < \alpha \leq 1$);

M – измерение RTT последнего подтвержденного пакета.

Сравнение результата оценок с использованием оценки по зашумленным наблюдениям и стандартной оценки TCP приведены на рис.2, а (для оценки по зашумленным наблюдениям) и б (для стандартного TCP).

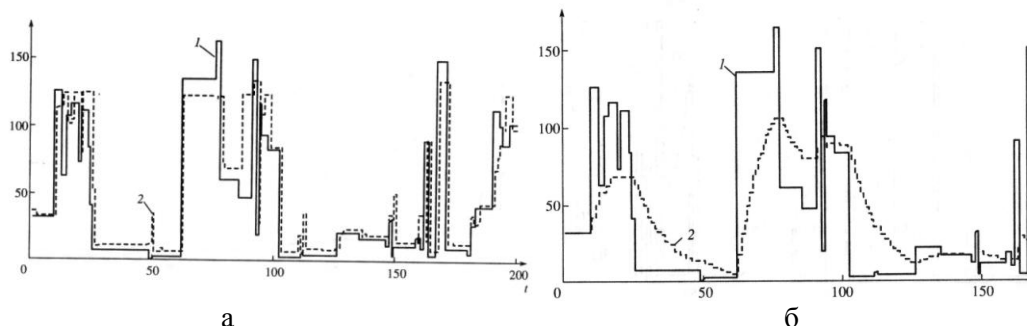


Рис. 2. Изменение RTT и его оценки при зашумленных наблюдениях (а) и стандартным способом (б)

Как следует из анализа, вне зависимости от версии протокола TCP его работа в сети более корректно представляется и поддается описанию и предсказанию с помощью аппарата случайных процессов. В отличие от используемых на сегодняшний день процедур стохастической аппроксимации для случайных величин, случайные процессы требуют более сложных процедур оценки, прежде всего процедур Калмана-Бьюси. Триада уравнений наблюдения, состояния и оценки для случайных процессов в общем виде может быть записана как [4]:

$$y(t) = H(t)x(t) + v(t), \quad (6)$$

$$\frac{dx(t)}{dt} = A(t)x(t) + C(t)\xi(t), \quad (7)$$

$$\frac{d\hat{x}(t)}{dt} = A(t)\hat{x}(t) + V(t)H^T(t)N_v^{-1}[H(t)\hat{x}(t) - y(t)], \quad (8)$$

$$\frac{dV(t)}{dt} = A(t)V(t) + V(t)A^T(t) - V(t)H^T(t)N_v^{-1}H(t)V(t) + C^T(t)N_\xi C(t), \quad (9)$$

где N_ξ – шум генерации в модели состояния;

N_v шум наблюдения в уравнении наблюдения.

Точность оценки параметра RTT – одного из важнейших показателей производительности сети и главного определяющего параметра при расчете таймеров TCP в случае использования математического аппарата марковских цепей и случайных процессов намного выше, чем в случаях использования стандартных, зачастую эвристических, методов.

Литература:

1. Jacobson V. Congestion Avoidance and Control // Comput. Commun. Rev. 1988. V. 18. №4. P. 314-329.
2. Jacobson V. Modified TCP Congestion Control and Avoidance Algorithms // Technical Report 30, Apr 1990.
3. Brakmo L.S., Peterson L.L. // TCP Vegas: End to End Congestion Avoidance on a Global Internet // IEEE Journal on Selected Areas in Communication, vol. 13[1995], (1465-1490)
4. Поповский В.В., Олейник В.Ф. Математические основы управления и адаптации в телекоммуникационных системах: учеб. / -Х.: ООО "Компания СМИТ", 2011. - 362с.