Информационные процессы, Том 4, № 2, 2004, стр. 133–140.

Оптимизация потока передачи данных в TCP/IP методами теории стохастического управления [1]

Б.М.Миллер, К.В.Степанян

Институт проблем передачи информации, Российская академия наук, Москва, Россия
Поступила в редколлегию 11.03.2004

Аннотация—Работа основана на математических моделях динамических систем, управляемых скрытыми Марковскими процессами и на методах теории стохастического управления. Наблюдаемый процесс скорости потери пакетов связан со скоростью передачи пакетов и с ненаблюдаемым состоянием канала передачи данных. Текущая скорость передачи пакетов является управлением потоком данных и одновременно управлением косвенными измерениями.
В работе представлена модель канала передачи данных и модель потока потерь. Задача оптимального управления формулируется как задача максимизации среднего количества успешно переданных пакетов. Решена задача фильтрации и выведены уравнения для семейства достаточных статистик, что позволило свести исходную задачу управления по неполным данным к эквивалентной задаче управления по полным данным.
Результаты моделирования демонстрируют поведение полученного решения.

1. ВВЕДЕНИЕ

Современные беспроводные системы передачи данных зачастую функционируют в условиях значительных флуктуаций свойств каналов, по которым могут эти данные передаваться. Изменение свойств канала обусловлено как внешними условиями, так и изменением взаимного положения приемника-передатчика и проявляется в изменении частотных характеристик канала. Эти изменения могут проявляться в виде достаточно медленных флуктуаций, если это связано с погодными и прочими внешними условиями, или достаточно резко, если это связано с изменением взаимного положения при движении приемника и/или источника. При моделировании подобных каналов часто применяется модель скрытого Марковского процесса, частным случаем которой является модель Гильберта [1], в которой состояние канала связи упрощенно описывается в терминах “хорошее” - “плохое”, а переходы между ними, описываются Марковской цепью. При оптимизации работы систем передачи данных обычно требуется максимизировать объем передаваемой информации. При этом согласование скорости передачи данных с текущим состоянием канала приобретает решающее значение. Один из известных и развиваемых в ИППИ РАН (под руководством профессора В.В. Зяблова) подходов состоит в идентификации характеристик канала и выборе оптимального метода кодирования сигнала, согласованного с текущей частотной характеристикой канала. Хотя этот метод обеспечивает, по-видимому, результаты весьма близкие к оптимальным, его аппаратная реализация достаточно сложна. В тоже время в уже действующих системах связи используются более или менее эффективные методы управления скоростью передачи данных, позволяющие согласовать ее с текущим состоянием канала. В качестве примера можно указать протокол TCP/IP, где скорость передачи пакетов увеличивается по линейному закону до тех пор, пока не происходит потеря пакета. После этого скорость передачи уменьшается скачком в фиксированной пропорции и далее снова растет по линейному закону. Следует подчеркнуть, что данный способ управления является типичной реализацией некоторого

[1] Работа выполнена при поддержке Программы 7.2 ОИТВС РАН “Новые физические и структурные решения в инфотелекоммуникациях” (проект № 4.6д) и гранта РФФИ № 02-01-00361.

управления стохастическим процессом по неполным данным. Действительно, скорость потери пакетов является наблюдаемым процессом, связанным как с ненаблюдаемым состоянием канала, так и со скоростью передачи пакетов, а текущая скорость передачи пакетов есть и управление потоком данных, и одновременно управление косвенными измерениями. В последние годы были предложены механизмы управления, в которых производится прямое измерение параметров потока потерь пакетов и производится настройка сети таким образом, чтобы обеспечить максимальную *дружественность к пользователю* [2]. Модели, описывающие протокол TCP/IP в терминах стохастических процессов, управляемых скрытыми Марковскими процессами широко исследуются в последние годы и доказали свою состоятельность при сравнении результатов моделирования с практикой (см. например, серию работ, выполненных в последнее время группой исследователей ИНРИА Франция, София-Антиполис: [3], [4], [5]).

В тоже время простой перенос уже существующих технических решений на беспроводные линии связи приведет к явно не оптимальным решениям, так как уровень флуктуаций в беспроводных линиях связи, а главное их временные характеристики существенно отличаются от их аналогов в стационарных опто-волоконных и проводных линиях связи.

С другой стороны в теории стохастического управления в системах со скрытыми Марковскими процессами есть результаты, позволяющие надеяться на успех при их применении в задачах управления системами передачи данных. Предлагаемый подход основан на следующих предпосылках:

– состояние канала описывается цепью Маркова с конечным множеством состояний и известными интенсивностями переходов;
– скорость передачи данных есть управляющий параметр, а интенсивность потерь пакетов, есть известная монотонная функция от скорости передачи и состояния канала;
– целью управления является выбор такого закона изменения скорости передачи данных, при котором достигается максимум среднего значения успешно переданных пакетов.

Метод решения задачи основан на построении семейства достаточных статистик для текущего состояния канала и выбора такого значения скорости передачи, которое обеспечивает максимум условной реальной скорости передачи (условная разность между скоростью передачи данных и интенсивностью потока потерь). Предварительные результаты показывают, что при некоторых зависимостях интенсивности потерь от скорости передачи оптимальный закон управления будет иметь вид, похожий на принятый в протоколе TCP/IP.

Кроме введения и заключения статья содержит четыре раздела. В следующем разделе представлена модель канала передачи данных и модель потока потерь, зависящего от состояния соединения и скорости передачи пакетов. Задача оптимального управления формулируется как задача максимизации среднего количества успешно переданных пакетов. В 3 разделе приводится решение задачи фильтрации и определения набора достаточных статистик и их эволюции. Использование семейства достаточных статистик к позволяет свести исходную задачу управления по неполным данным к задаче управления, основанной на полной информации. В разделе 4 мы анализируем решение задачи управления и сравниваем различные механизмы с “субоптимальным” механизмом, принятым в действующем протоколе TCP/IP. Результаты моделирования приведены в разделе 5.

2. ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ

2.1. Модель состояния соединения

Мы полагаем, что состояние линии связи описывается Марковским процессом с конечным множеством состояний $\theta_t \in \{1, \cdots, n\}$, имеющим матрицу интенсивностей переходов $\Lambda_t = \{\lambda_t^{ij}\}_{i,j=1,\cdots,n}$. Предположим также, что функции λ_t^{ij} непрерывны. Введем обозначения

$$X_t^i = I\{\theta_t = i\}, X_t = \{X_t^1, \cdots, X_t^n\}$$

где $I\{A\}$ есть индикаторная функция множества A. Тогда процесс $X = \{X_t;\, t \geq 0\}$ допускает представление (см. [6])

$$X_t = X_0 + \int_0^t \Lambda_s^* X_s ds + M_t,$$

где X_0 начальное состояние и $M = \{M_t;\, t \geq 0\}$, $M_t = \{M_t^1, \cdots, M_t^n\}$ — квадратично интегрируемый мартингал с квадратичной характеристикой (см. [7], [8])

$$\langle M \rangle_t = -\int_0^t \left[\Lambda_s^*\, diag\, X_s + diag\, X_s \Lambda_s\right] ds + \int_0^t diag\,(\Lambda_s^* X_s)\, ds,$$

где

$$diag\, X = diag\{X^1, \cdots, X^n\}$$

обозначает диагональную матрицу с элементами $X^1, \cdots, X^n$ и “*” - символ операции транспонирования. Эта модель обобщает известную модель Гильберта [1], в которой имеется только два состояния: “хорошее” и “плохое”. В действительности, конечно, невозможно определить истинное состояние соединения θ_t, хотя более или менее надежная оценка его характеристик могла бы быть весьма полезной для настройки параметров протокола и скорости передачи данных с целью обеспечения максимальной пропускной способности.

2.2. Модель наблюдаемого процесса и закона управления

В действующих протоколах TCP/IP процесс потери пакетов играет роль источника информации о состоянии сети. Если рассматривать его как процесс наблюдений, то естественно предположить, что интенсивность потери пакетов зависит с одной стороны от состояния соединения, а с другой от скорости передачи данных, которую естественно рассматривать как параметр управления потоком. С точки зрения теории случайных процессов поток потерь образует так называемый считающий процесс

$$N_t = \sum_{\tau_i \leq t} I\{t \geq \tau_i\},$$

где τ_i моменты потери пакетов [9],[10]. Управление потоком $U(t)$ или текущая скорость передачи пакетов формируется как функционал от наблюдений $U_t = U(t, N_0^t)$ и является $\mathcal{F}_t^N = \sigma\{N_s, s \leq t\}$ - предсказуемой случайной функцией. Здесь $\sigma\{N_s, s \leq t\}$ есть σ - алгебра событий, порожденных процессом N_t, и соответственно управление U_t является функцией от моментов времени $\tau_1, ..., \tau_{N_t}$ и текущего времени t. Для описания эволюции процесса N_t удобно использовать его мартингальное представление [9], [10]

$$N_t = \int\limits_0^t f(\theta_s, U_s) ds + \nu_t,$$

где ν_t - квадратично интегрируемый мартингал с квадратичной вариацией

$$\langle \nu \rangle_t = \int\limits_0^t f(\theta_s, U_s) ds.$$

Возможность использования данного представления основана на предположении, что интенсивность потока потерь $f(\theta_t, U_t)$ есть функция текущего состояния сети θ_t и текущей скорости передачи данных U_t. Эта характеристика имеет следующую интерпретацию: при передаче пакетов со скоростью U один пакет отправляется за $\Delta t = 1/U$ единиц времени. Вероятность потери пакета отправляемого при состоянии канал связи θ_t со скоростью U_t при малых Δt допускает представление:

$$P\{\text{Потери пакета } v\} = f(\theta_t, U_t)\Delta t + \mathcal{O}((\Delta t)^2),$$

отсюда в частности следует соотношение

$$\frac{f(\theta, U)}{U} \leq 1 \tag{1}$$

для любых допустимых θ и U. Кроме соотношения (1) естественно предположить выполнение при любых θ следующих условий:

– выполнение равенства $f(\theta, 0) = 0$,

– положительность и монотонность функции $f(\theta, U)$ по U при $U > 0$ для любого θ,

– существование предела

$$\lim_{U \to \infty} \frac{f(\theta, U)}{U} = 1. \tag{2}$$

2.3. Критерий качества

Целью выбора закона управления является максимальное увеличение объема переданной информации в течение заданного интервала времени $[0, T]$, что можно записать следующим образом:

$$J[U(\cdot)] = E\left\{ \int_0^T U(s, N_0^s) ds - N_T \right\}.$$

Данная форма критерия качества отражает двойственность управления: с одной стороны для передачи максимального объема информации следует увеличивать скорость, с другой стороны соотношение (2) показывает, что увеличение скорости ведет к тому, что при неограниченном увеличении скорости передачи доля переданных пакетов становится очень малой. Кроме того, данное управление, модулируя процесс потерь, является источником косвенной информации относительно состояния соединения. Таким образом данная задача формулируется как одна из версий задачи одновременного управления процессом и наблюдениями [11]. Относительно управления допустимы различные формы задания ограничений, например, классическое управление скоростью передачи в классе кусочно-линейных функций [3], ограничения на мгновенную скорость передачи вида

$$U(t) \in [0, U_{max}] \tag{3}$$

или ограничения интегрального типа

$$\int_0^T U(t) dt \leq M < \infty.$$

Однако на первом этапе необходимо привести задачу к задаче управления по полным данным.

3. УРАВНЕНИЯ ФИЛЬТРАЦИИ И РЕДУКЦИЯ ИСХОДНОЙ ЗАДАЧИ

Метод оценивания основан на теории нелинейной фильтрации [6] скрытых Марковских процессов по наблюдениям некоторого считающего процесса. С использованием методов фильтрации в системах со скрытыми Марковскими процессами , [12], [13] был получен следующий результат:

Теорема. *Пусть*

$$P_t^i = E\{X_t^i | \mathcal{F}_t^N\}, \quad i = 1, ..., n. \tag{4}$$

Тогда компоненты вектора $P_t \in R^n$, *где* $P_t = \{P_t^i, \quad i = 1, ..., n\}$ *удовлетворяют следующей системе стохастических дифференциальных уравнений*

$$dP_t = \Lambda_t^* P_t dt + \Gamma_{t-} d\tilde{\nu}_t \tag{5}$$

где

$$\tilde{\nu}_t = N_t - \int_0^t \sum_{i=1}^n P_s^i f(i, U_s) ds$$

— квадратично интегрируемый мартингал с квадратической характеристикой

$$\langle \tilde{\nu} \rangle_t = \int_0^t \sum_{i=1}^n P_s^i f(i, U_s) ds \tag{6}$$

и

$$\Gamma_t = \frac{1}{\sum\limits_{i=1}^n P_t^i f(i, U_t)} \begin{pmatrix} P_t^1 f(1, U_t) \\ \dots\dots\dots\dots \\ P_t^n f(n, U_t) \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} P_t^1 \\ \dots \\ P_t^n \end{pmatrix}.$$

Данная теорема дает систему достаточных статистик и позволяет сформулировать задачу управления в терминах критерия качества, зависящего от условных вероятностей (4)[13].

Теорема. *Для любого допустимого управления* $U(t, N_0^t)$ *имеет место соотношение*

$$J[U(\cdot)] = E\left\{ \int_0^T \left[U(s, N_0^s) - \sum_{i=1}^n P_s^i f(i, U(s, N_0^s)) \right] ds \right\}.$$

4. ЛОКАЛЬНО ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ

Сформулированная выше задача управления, согласно терминологии, введенной М. Дэвисом [14], принадлежит к классу задач управления кусочно-детерминированными процессами. В настоящее время удалось получить управление в форме обратной связи, обеспечивающее максимум передаваемой информации в текущий момент времени при ограничениях типа (3)

$$U(t, N_0^t) = \underset{0 \le u \le U_{max}}{argmax} \left[u - \sum_{i=1}^n P_t^i f(i, u) \right]. \tag{7}$$

Можно показать, что данное управление принадлежит классу предсказуемых управлений, и при определенных весьма естественных условиях на функции $f(i, u)$, таких как существование максимума по $u \in [0, U_{max}]$ функций

$$\phi(i, u) = u - f(i, u),$$

обладает следующими свойствами:

- на интервалах $[\tau_i, \tau_{i+1})$ управление $U(t)$ монотонно возрастает, или остается постоянным, достигая максимального значения,
- испытывает отрицательные скачки с точках τ_i, где $\Delta N_{\tau_i} = 1$.

Другими словами данное управление обнаруживает качественное сходство с управлениями, принятыми в действующем протоколе TCP/IP.

5. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ

В данном разделе приводятся некоторые алгоритмы и результаты моделирования.

Сначала формируется временная шкала. Поведение параметра $\theta \in \{1, 2\}$ моделируется следующим образом. Задается начальное значение θ. Время, через которое происходит смена состояния, является экспоненциально распределенной случайной величиной с известным параметром, содержащимся в заданной матрице Λ.

Далее моделируется поведение самой цепи. В качестве модельных были выбраны следующие функции

$$f(1,U) = \begin{cases} 0, & U \le 0, \\ U^2/16, & U \le 16, \\ U, U > 16; \end{cases}$$

$$f(2,U) = \begin{cases} 0, & U \le 0, \\ U^2/9, & U \le 9, \\ U, U > 9. \end{cases}$$

При таком выборе функций уравнение (7) имеет аналитическое решение:

$$U(t) = \frac{72.0}{16.0 - 7.0 * P_t^1}. \tag{8}$$

Из формулы (6) следует, что

$$d\bar{\nu}^c(t) = -\sum_{i=1}^{n} P_t^i f(i, U_t) dt,$$

так как $N(t)$ чисто разрывный процесс. Поэтому в пересчете для двух состояний это дает такое уравнение для P_t^1

$$\dot{P}_t^1 = -\lambda P_t^1 + \mu(1 - P_t^1) + P_t^1(1 - P_t^1)\big(f(2, U_t) - f(1, U_t)\big).$$

Это уравнение справедливо на участках непрерывности. В моменты скачков N, то есть при $\Delta N_\tau = 1$, его решение рассчитывается по формуле

$$P_{\tau+}^1 = \frac{P_{\tau-}^1 f(1, U_{\tau-})}{P_{\tau-}^1 f(1, U_{\tau-}) + (1 - P_{\tau-}^1) f(2, U_{\tau-})}.$$

Здесь и выше λ, μ интенсивности переходов для Марковской цепи с состояниями “1-хорошее” и “2 - плохое”, поэтому $f(2, U_t) - f(1, U_t) > 0$ и при отсутствии скачков P_t^1 растет, а вместе с ней растет и скорость U_t.

При заданных начальных условиях эволюция условной вероятности описывается уравнениями (5). На каждом шаге вычисляется значение управления по формуле (8). Затем моделируется "отказ" (значение процесса N_t), зависящий от текущего состояния системы и вычисленного управления. Если отказ произошел, то производится расчет условных вероятностей и заново вычисляется значение управления.

Далее приведены графики, полученные при моделировании. Время $t \in [0, 10]$.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для предложенной модели управления процессом передачи данных по флуктуирующему каналу связи разработана методика оценки состояния скрытого Марковского процесса. На ее основе получены оптимальные в среднем квадратическом оценки состояния канала по наблюдениям процесса потери пакетов. Найдено локально оптимальное управление, демонстрирующее качественное сходство с принятым в протоколе TCP/IP. Приведен модельный пример.

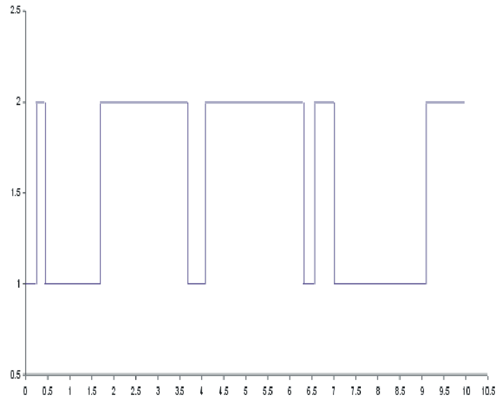

Рис. 1. Значение параметра θ

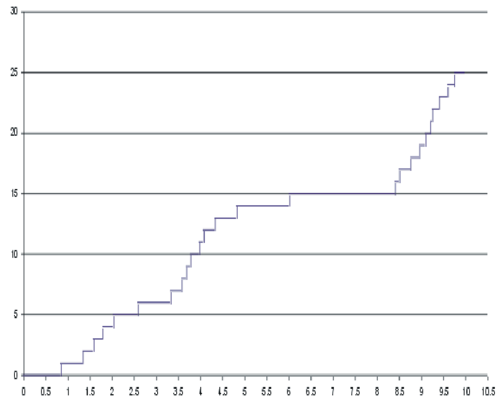

Рис. 2. График количества отказов

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. E.N. Gilbert Capacity of a burst-noise channel. *Bell Systems Technical Journal,* 1960, vol. 39, pp. 1253–1266.
2. S.H. Low, F. Paganini and J.C. Doyle. Internet Congestion Control. *IEEE Control Systems Magazine,* 2002, vol. 22, no. 1, pp. 28–43.
3. E. Altman, K. Avrachenkov and C. Barakat TCP in presence of bursty losses. *Performance evaluation,* 2000, vol. 42, pp. 129–147.
4. C. Barakat TCP/IP modeling and validation, *IEEE Network,* 2001, May/June, pp. 38–47.
5. C. Barakat and E. Altman Bandwidth tradeoff between TCP/IP and link-level FEC. *Computer Network,* 2002, vol. 39, pp. 133–150.
6. R.Sh. Liptser, A.N. Shiryayev *Statistics of Random Processes*, Berlin: Springer-Verlag, 1978.
7. G.B. Di Masi and P.I. Kitsul Backward representation for nonstationary Markov processes with finite state space. *Systems and Control Lett.* 1994, vol. 22, pp. 445–450.
8. R.J. Elliott, L.Aggoun and J.B. Moore *Hidden Markov Models. Estimation and Control.* New York: Springer Verlag, 1995.
9. P.M. Brémaud *Point Processes and Queues.* Berlin: Springer Verlag, 1981.
10. T. Fleming, D. Harrington *Counting Processes and Survival Analysis.* New York: John Wiley & Sons, Inc., 1991.

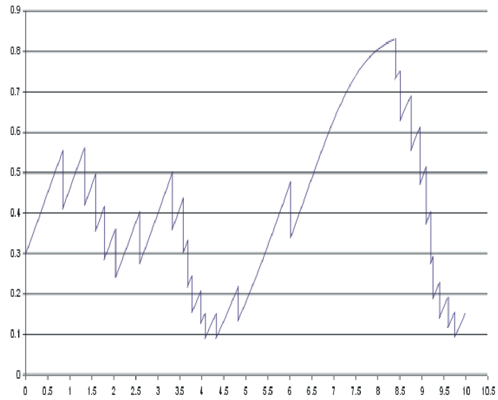

Рис. 3. Вероятность состояния "хороший"

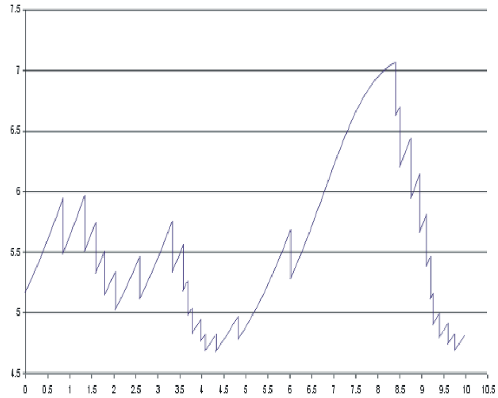

Рис. 4. Управление U

11. B.M. Miller and W.J. Runggaldier Optimization of observations: a stocahstic control approach, *SIAM J. Control Optim.*, 1997, vol. 35, no. 3, pp. 1030–1052.

12. B.M. Miller and W.J. Runggaldier Kalman filtering for linear systems with coefficients driven by a hidden Markov jump process, *Systems* & *Control Letters*, 1997, vol. 31, pp. 93–102.

13. E. Wang and B. Hajek, *Stochastic Processes in Engineering Systems*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New-York, 1985.

14. M.H.A. Davis *Markov Models and Optimization*, London: Chapman & Hall, 1993.