УДК 621.391

Е. О. ПОПОВСКАЯ;
Н. В. МОСКАЛЕЦ,
Государственный университет телекоммуникаций, Киев

Фрагментация TV-контента в P2P-сетях при помощи процедуры динамического программирования

Предложена процедура оптимизации процесса фрагментации видеоконтента в одноранговых P2P-сетях, базирующаяся на использовании математической авторегрессионной модели. Для отбора фрагментов и минимизаций потерь применен метод динамического программирования с аддитивным критерием.

Ключевые слова: авторегрессионная модель; TV-контент; P2P-сети; оптимизация.

Введение

Доставка TV-контента через интернет при помощи одноранговых P2P-сетей приобретает все большую популярность. При этом живое потоковое видео обладает неоспоримым преимуществом по сравнению с видео по запросу, поскольку предоставляет услугу в реальном времени. Качество услуги зависит от скорости скачивания контента (download) и скорости его загрузки (upload).

Пользователи (пиры) P2P-сетей могут загружать порции данных как от сервера, так и друг от друга. При обмене буферными картами каждый пользователь получает информацию о том, какие порции данных имеются у того или иного пир-пользователя и какие он готов загрузить. Таким образом, одновременно имеется несколько предложений (выборка) для загрузки нужной информации. Количество этих предложений может варьировать, ограничиваясь или соответствующим протоколом планировщика, или числом пиров, образующих тот или иной кластер. Вместе с тем количество предложений не может быть чрезмерно большим, ибо тогда падает пропускная способность сети. Поэтому модуль оверлея ограничивает число возможных соединений, тогда как контрольный модуль выступает в роли менеджера по отношению к планировщику и оверлею, обеспечивая мониторинг обмена видео и сигнальной информацией. Каждый медиапоток в сети разделяется на фрагменты, размеры которых могут быть равными или различными — в зависимости от протокола P2P [1; 2]. При этом динамика процедуры скачивания кроме прочих причин (количества и качества предложенных вариантов, фрагментов, ограничений пропускной способности и др.) определяется тем, насколько четко осуществляется упорядочение самих фрагментов.

Основная часть

Постановка задачи

Скачивание файла является дискретно-непрерывным процессом $X_t^N = (x_1, x_2, \ldots, x_N)$, где x_i — i-й фрагмент, выбранный из m-го класса предложенных фрагментов. Качество и время доставки, а также длительность каждого из фрагментов случайны и различны [3; 4].

Для обеспечения гладкого проигрывания необходимо упорядочить последовательность фрагментов в буфере согласно тому, как они поступают потребителю. Кроме того, между фрагментами не должно быть пауз и они не могут набегать друг на друга.

Очевидно, в качестве математической модели обрабатываемого файла может быть использовано уравнение авторегрессии, коэффициенты φ_i, $i = 0, \ldots, n$, которого пребывают под управлением марковской цепи с m состояниями [4]:

$$x(t) = \varphi_0(h_t) + \sum_{i=1}^{n} \varphi_i(h_t) x_{t-i} + b(h_t)\xi_t, \tag{1}$$

где ξ_t — выборка из гауссова белого шума; $b(h_t)$ — уровень шума; $H_{iN} = h_1, h_2, \ldots, h_N$ — состояния последовательности, управляющей параметрами сдвига и масштаба соответствующих фрагментов.

Пусть $p(h_t / h_{t-1}) = q(h_{t-1}, h_t)$ — условная вероятность перехода из состояния h_{t-1} в состояние h_t, значения которой представляют собой элементы матрицы переходов $Q = \{q(h_{t-1}, h_t)\}$.

Логично поставить задачу нахождения оптимальных значений состояний $\hat{H}_{iN} = \hat{h}_1, \hat{h}_2, \ldots, \hat{h}_N$ упорядочивающих последовательность фрагментов в соответствии с требованиями потребителя. В качестве критерия оптимизации выберем такой набор параметров h_t, при котором на интервале $t \in (1, N)$ будет обеспечиваться минимум функционала

$$\Upsilon\left(H_0^N\right) = d_0(h_0) + \sum_{t=1}^{n} \left[a_t(h_t) + \alpha(h_{t-1}, h_t)\right], \tag{2}$$

где $d_0(h_0)$ — исходное вероятное значение нулевого отсчета принадлежности к данному классу выборки, $h_0 = 1, 2, \ldots, m$,

$$a_t(h_t) = \frac{1}{2b^2(h_t)}\left[x_t - \varphi_0(h_t) - \sum_{t=1}^{n}\varphi_i(h_t)x_{ti}\right]^2 - \mathrm{biq}(h_{t-1}, h_t). \quad (3)$$

При этом

$$\alpha_t(h_{t-1}, h_t) = \ln\frac{q(h_t, h_t)}{q(h_{t-1}, h_t)} = \ln\frac{p(h_t / h_t)}{p(h_t, h_{t-1})}. \quad (4)$$

Очевидно, при $h_{t-1} = h_t$ значение $\alpha(h_{t-1}, h_t) = 0$, а в остальных случаях α имеет смысл штрафной функции, зависящей от степени несовпадения соседних отсчетов фрагментов.

Величина $a_t(h_t)$ имеет смысл несогласованности значений параметров фрагмента на участке $t - n \le s \le t$ с прогнозируемыми.

Решение задачи

Данную оптимизационную задачу будем решать методом динамического программирования.

В предположении гауссовости закона распределения коэффициентов авторегрессии условная априорная вероятность появления комбинации $H_t^N = (h_1, h_2, \ldots, h_N)$ определяется переходными вероятностями марковской цепи

$$f\left(\chi_1^n / \chi_{-n+1}^0, H_1^N\right) = \prod_{t=1}^{N} f(x_t / x_{t-1}, h_t) = \prod_{t=1}^{N}\frac{1}{b(h_t)\sqrt{2\pi}}\exp\left\{-\frac{1}{2b^2(h_t)}\left[x_t - \varphi_0(h_t) - \sum_{i=1}^{n}\varphi_i(h_t)x_{t-i}\right]^2\right\}. \quad (5)$$

Логично предположить гауссовский характер плотности вероятности начального значения $d_0(h_0)$, которое можем представить в виде $d_0(h_0) = -\ln p(h_0)$, где $p(h_0)$ — априорная вероятность возможных исходных состояний марковской цепи. В этом случае минимум функционала $Y(H_0^N)$ соответствует максимуму апостериорной вероятности комбинаций фрагментов для данной реализации [5]

$$\hat{H}_0^N = \arg\min_{H_0^N} Y\left(H_0^N\right) = \arg\min_{H_0^N} \ln p\left(H_0^N / \chi_1^n\right) = \arg\max_{H_0^N}\left[\ln p(h_0) + \ln p\left(H_1^N / h_0\right) = \ln f\left(\chi_1^n / \chi_{n+1}, H_1^N\right)\right]. \quad (6)$$

Здесь $p\left(H_1^N / h_0\right) = \prod_{t=1}^{N} q(h_{t-1}, h_t)$ — условная априорная вероятность появления комбинации фрагментов $X_i^N = (x_1, x_2, \ldots, x_n)$, составленных из m предлагаемых различными пирами вариантов.

Построение оптимальной фрагментации. Определим последовательность функций с учетом временного дискретного аргумента:

$$d_t(h_t) = \min_{H_0^{t-1}}\left\{d_0(h_0) + \sum_{s=1}^{t-1} a_s(h_s) + \alpha(h_{s-1}, h_s) + a_t(h_t) + \alpha(h_{t-1}, h_t)\right\}, \quad t = 1, 2, \ldots, N. \quad (7)$$

Данная величина $d_t(h_t)$ показывает, какое минимальное значение критерия $Y(H_0^N)$ может быть достигнуто на последовательности фрагментов до $(t-1)$-го включительно, если зафиксировать состояние h_t последнего фрагмента. Очевидно, что минимум последнего значения $d_N(h_N)$, $h_N = 1{,}2$, совпадает с минимальным значением критерия $Y(H_0^N)$:

$$\min d_N(h_N) = \min Y(H_0^N). \quad (8)$$

Если H_0^N — последний фрагмент оптимальной последовательности, то

$$\hat{h}_N = \arg\min d_N(h_N). \quad (9)$$

Вычислим последовательно векторы значений $d_{t+1}(h_{t+1})$ для соответствующих моментов времени $t = 0, 1, \ldots, N-1$, начиная с $d_0(h_0)$, по правилу:

$$d_{t+1}(h_{t+1}) = \min_{h_t}\left[d_t(h_t) + a_t(u_t) + \alpha(h_t, h_{t+1})\right]. \quad (10)$$

При этом целочисленные величины

$$K_{t+1}(h_{t+1}) = \arg\min\left\{d_t(h_t) + a_t(u_t) + \alpha(h_t, h_{t+1})\right\} \quad (11)$$

образуют прямоугольную матрицу K_t^N, в которой на N столбцах размещаются упорядоченные по времени значения $\hat{H}_0^N = \left(\hat{h}_0, \hat{h}_1, \ldots, \hat{h}_N\right)$. Количество строк соответствует значениям m, представленным для выбора на каждом шаге фрагментации.

Соответствующие значения $\hat{h}_t$ находятся из рекурсивной формулы

$$\hat{h}_t = K_{t+1}\left(\hat{h}_{t+1}\right)$$

с начальным условием (9).

Таким образом, оценка оптимальных значений $\hat{h}_t$ принимается в обратном порядке: $t = N, N{-}1, \ldots, 1{,}0$ после вычисления в прямом порядке элементов — столбцов матрицы K_i^N, которые содержат mN целых чисел — медиафрагментов.

О числе возможных вариантов из теории известно [4], что задача оптимальной фрагментации чрезвычайно громоздка и с увеличением числа предлагаемых вариантов m выбора проблематично решение ее в реальном времени. Вполне доступными оказываются решения при $m = 1;2;3$. Из теории автовыбора также известно [5], что переход от однократного выбора к двухкратному позволяет уменьшить вероятность $P_{\text{ош}}$ ошибки с $P_{\text{ош}} = 10^{-2}$ до $P_{\text{ош}} = 10^{-4}$. Дальнейшее увеличение кратности привносит все меньший рост эффективности в принятии решений. Поэтому выбор $m = 2$ для задач фрагментации вполне приемлем.

С учетом $m = 2$ остается уточнить в выражении функционала (2) значение функций под знаком суммы, куда будут входить лишь два аргумента.

Выводы

1. Дискретно-непрерывная математическая авторегрессионная модель фрагментации файлов, считываемых потребителем в P2P-сети потокового часового видео, адекватно отображает процесс скачивания.

2. В качестве процедуры оптимизации решения задачи фрагментации предлагается метод динамического программирования, где как критерий использована аддитивная штрафная функция, минимизирующая потери на стыках фрагментов и осуществляющая выбор лучшего из предложенных фрагментов.

3. В силу громоздкости вычислительных процедур предлагается ограничить численность выбора одного из двух, что одновременно позволит экономить ресурсы сети.

Список использованной литературы

*1. **IETF REC 6972:** Problem Statement and Requirements of the Peer-To-Peer Streaming Protocol (PPSP). [Электронный ресурс].— Режим доступа:*
http://datatracker.ietf.org/doc/zfc6972/

*2. **IETF** Survey of P2P Streaming Applications [Электронный ресурс].— Режим доступа:*
https://datatracker.ietf.org/doc/draft-ietf-PPSP-survey/

*3. **Гайдамака, Ю. В.** Модель буферизации данных в потоковых P2P-сетях / Ю. В. Гайдамака, А. К. Самуйлов // ВСПУ-2014.— М., 2014.— С. 8656–8666.*

*4. **Коган, И. А.** Оптимальная сегментация структурных экспериментальных кривых на основе метода динамического программирования / И. А. Коган // АиТ.—1988.— №7.— С. 146–156.*

*5. **Popovskij, V.** Control and Adaptation in Telecommunication Systems / V. Popovskij, A. Barkalov, L. Titarenko.— Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011.— P. 173.*

*6. **Москалец, Н. В.** Оптимизация суммарного взвешенного времени обслуживания в пиринговой сети / Н. В. Москалец, Е. О. Поповская.*

Рецензент: доктор техн. наук, ст. науч. сотрудник **М. Н. Степанов**, Государственный университет телекоммуникаций, Киев.

О. О. Поповська, М. В. Москалець

ФРАГМЕНТУВАННЯ TV-КОНТЕНТУ В P2P-МЕРЕЖАХ ЗА ДОПОМОГОЮ ПРОЦЕДУРИ МАТЕМАТИЧНОГО ПРОГРАМУВАННЯ

Запропоновано процедуру оптимізації фрагментування відеоконтенту в однорангових P2P-мережах, яка базується на використанні математичної авторегресійної моделі. Для добору фрагментів і мінімізації втрат застосовано метод динамічного програмування з адитивним критерієм.

Ключові слова: авторегресійна модель; TV-контент; P2P-мережі; оптимізація.

E. O. Popovskaya, M. V. Moskalets

TV CONTENT FRAGMENTATION IN P2P NETWORKS WITH THE HELP OF THE MATHEMATICAL PROGRAMMING PROCEDURE

The TV content fragmentation optimization procedure in one-rank networks based on the autoregression mathematical model is proposed.

Keywords: autoregression model; TV content; P2P networks; optimization.