УДК 621.372

В. В. ПОПОВСКИЙ, д-р техн. наук

МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ РЕСТРУКТУРИЗАЦИЕЙ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ

Одной из наиболее важных проблем, влияющих на качество передачи Q_0S, является возможность быстрой реакции телекоммуникационной системы (ТКС) на своевременные изменения трафика [1, 2]. Очевидным адекватным решением, обеспечивающим своевременную обработку этих изменений, является задача динамического, в текущем времени, управления информационными потоками за счет перераспределения ресурсов сети. Данное решение о перераспределении находится на основе выборочной статистики и в общем случае обеспечивается при выполнении последовательности операций: наблюдение (измерение) – оценка – управление. Само воплощение данного решения может быть достаточно разнообразным, соответствующим известным алгоритмам, выбор которых зависит не только от адекватности ситуации, но и от чисто субъективного подхода исследователей. Многообразие критериев, которые можно выбрать при этих решениях, порождает и многообразие оптимальных алгоритмов, синтезируемых по этим критериям [2, 3, 4, 5]. Поиск «более оптимального» решения в этом случае является некорректным.

Вместе с тем, во многих случаях можно выбрать один достаточно общий показатель ТКС, который позволит судить о большей или меньшей эффективности выбранного решения. Таким показателем, лежащим в основе выбираемого критерия, может служить время реакции системы на те или иные изменения, возмущающие данную систему, вызывающие необходимую реакцию со стороны функциональных и (или) структурных особенностей этой системы [4, 5, 6].

Отметим, что функциональные особенности ТКС, как и любой другой системы, определяются динамикой ее состояния [5], приводящей к дифференциальным моделям состояния. Структурные же свойства определяются связностью ее элементов, моделируемых соответствующими графами и матричными представлениями в виде матриц инцидентности, связности, сложности и др. Из теории систем известно, что совместное исследование функциональных и структурных особенностей систем вызывает большие трудности [7].

Получим, на наш взгляд, достаточно общее решение, связывающее функциональные и структурные стороны ТКС, базирующиеся на методах марковской теории фильтрации [5] и методах переменных состояния, позволяющих минимизировать время реакции ТКС на изменение трафика.

Постановка задачи на управление системой

В ряде работ, посвященных задачам управление в ТКС [1, 2, 3], рассматривается трафик в виде графика со случайными изменениями, замираниями, всплесками, выбросами над допустимым уровнем. Очевидно, именно ход этой кривой во времени дает основание к выработке управляющих воздействий $u(x_t, t)$, где x_t – переменные состояния. Управляющие воздействия при этом направлены на изменение маршрутных таблиц, на перераспределение пропускных способностей, полос используемых частот, размерность буферов и другие акции, которые относятся к управлению структурными свойствами ТКС на основании изменения текущих функциональных параметров $\vec{x}^T = (x_1, x_2, ..., x_n)$, $n = \overline{1, n}$. Изложенная процедура является общей для любой технологии и политики управления в ТКС.

Дальше возможны различия в формировании выборочной статистики

$$\vec{y}(t) = H(t)\vec{x}(t) + v(t), \tag{1}$$

где $H(t)$ – масштабирующая матрица, определяющая, насколько усилены (при $H > 1$) или ослаблены (при $H < 1$) измеряемые переменные состояния $\vec{x}(t)$, $\vec{v}(t)$ – шум наблюдения со спектральной плотностью мощности $N_v(t)$. Различия также возможны и в обработке этой статистики, оценке состояния и выборе управления $u(\vec{x}_t, t)$ структурой ТКС, решением задачи реструктуризации.

Рассмотрим некоторые существующие решения и обсудим возможность их модернизации.

Измерение, сбор и обработка статистики

Реализация задач управления в стохастических системах возможна лишь при условии выполнения условий наблюдаемости всех необходимых параметров этих систем, что является очевидным при выборе структуры по принципу Уатта (по возмущению). Наблюдения могут быть как линейны (1), так и нелинейны. Ограничимся рассмотрением линейного варианта. На основании наблюдений $\vec{y}(t)$ формируется выборочная статистика $\vec{y}(k)$, $k = \overline{1, N}$, подлежащая далее обработке и оценке. Эта выборочная статистика может содержать количественную и качественную информацию об обслуженных вызовах, количестве переданных и принятых пакетов, числе потерянных пакетов, параметрах джиттера и вандера, типе выбранного кодека, задержках и др. Кроме задач архивации, формирования базы данных, создания основы для дифференциации оплаты услуги абонентам в зависимости от Q_0S, эта статистика используется для синтеза управления. Нас, в данном случае, интересуют именно последняя задача, нахождение оптимального управляющего воздействия $\vec{u}(\vec{x}_t, t)$.

Известны решения по нахождению вектора управляющего воздействия $u(x(k), k)$ по результатам обработки статистики $x(k)$. Так, в [1, 2, 3] рекомендуется использовать спектральные свойства трафика. В этих работах рекомендуется определять пересечение некоторого уровня (порога) этой спектральной плотности и считать превышение его управляющим сигналом для реструктуризации сети. Нам представляется, что данное решение можно улучшить, сократив время на обработку статистики (формирование ковариационной матрицы и преобразование к спектральной плотности). Имеющие место временные потери при формировании и обработке статистика неизбежно приводят к задержкам в контуре управления и, соответственно, потере эффективности решения. Кроме того, спектральные характеристики, являясь результатом усреднения статистики на определенном интервале, не позволяют в полной мере учитывать особенности временной структуры. Так скачкообразное изменение состояния (например, при выходе из строя какого-либо сетевого элемента) приводит лишь к расширению спектра и порог не будет преодолен.

Формализация процедуры оценки кусочно-стационарного процесса

Известны другие, столь же эффективные, но обеспечивающие снижение практически до нуля временные потери на обработку и оценку статистики. К таким относится метод переменных состояния, позволяющий в предположении марковости наблюдаемых процессов получать оптимальную в смысле минимума среднего квадрата погрешности оценку $\hat{\vec{x}}(k)$, $k = \overline{1, N}$.

Можно предположить, что в отсутствие резких скачков трафика, при отсутствии технических неисправностей сетевых элементов и линий связи $\vec{y}(t)$, так же как и $\vec{y}(k)$ представляют собой реализации стационарных случайных процессов, математическая модель состояния которых на этих интервалах времени описывается дифференциальным уравнением [5].

$$d\vec{x}(t)/dt = A(t)\vec{x}(t) + B(t)\vec{w}(t)\,,\ t = t_c + \Delta t_i\,, \qquad (2)$$

где $A(t)$ и $B(t)$ матрицы, элементами которых являются величины, связанные соответственно: с коэффициентами сноса и диффузии; $\vec{w}(t)$ – вектор независимых между собой гауссовых белых шумов, порождающих сам процесс $\vec{x}(t)$; Δt_i – i-й интервал стационарности.

Стационарное состояние сохраняется до момента t_c, когда состояние изменяется скачком или это состояние, а не спектральная плотность пересекает ранее выбранный порог, что как раз и является основанием для формирования соответствующего управляющего воздействия $u(\hat{\vec{x}}_t, t)$, направленного на реструктуризацию. В целом же имеет место кусочно–стационарный процесс, состояние которого представим в виде [5]:

$$d\vec{x}(t)/dt = A(t)\vec{x}(t) + B(t)\vec{n}(t) + R(t)\vec{e}(t), \qquad (3)$$

где $R(t)$ – матрица, регламентирующая появление нестационарности $\vec{e}(t)$. Компонентами $R(t)$ могут быть, например, символы Кронекера

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & при \;\; i \geq \tau, \\ 0 & при \;\; t < \tau, \end{cases}$$

τ – момент наступления нестационарности.

Нестационарность модели ТКС можно отобразить и иным способом [4, 5], через изменение, уравнения наблюдения:

$$\vec{y}(t) = H^T(t)\vec{x}(t) + D(t)\vec{d}(t) + \vec{v}(t), \qquad (4)$$

где $D(t)\vec{d}(t)$ – аддитивная добавка, которая может быть обусловлена наступлением начала нестационарности $\vec{d}(t)$, изменением уровня невязки $\gamma(t) = H^T(t)\hat{x}(t) - y(t)$ и др. Матрица $D(t)$, так же как и $R(t)$, может носить регламентирующий смысл, а $\vec{d}(t)$ описывает наступление той или иной нестационарности. В частности, когда нас интересует только факт наступления нестационарности, то в уравнении (4) можно даже положить член $H^T(t)\hat{x}(t) = 0$.

Возможно, очевидно, и более обобщенное представление состояния и структуры модели ТКС в виде тензора состояния, что позволит еще больше расширить рамки обсуждаемой проблемы. Перспективным и конструктивным математическим аппаратом, позволяющим получать высокую точность такой дискретно-непрерывной, кусочно-стационарной модели, может служить теория сплайнов, с помощью которой допускается рассмотрение достаточно общих, разрывных нестационарных процессов.

Общее уравнение оценки для кусочно-стационарной ситуации представим в виде процедуры Калмана-Бьюси [7]:

$$d\hat{\vec{x}}(t)/dt = A(t)\hat{\vec{x}}(t) + R(t)e(t) + K(t)\left[y(t) - D(t)dt - H^T(t)\hat{\vec{x}}(t)\right], \qquad (5)$$

где $K(t) = V(t)H^T(t)N_v^{-1}(t)$ – коэффициент усиления перед невязкой, представленной в квадратных скобках;

$$dV(t)/dt = A(t)V(t) + V(t)A(t) + BN_nB^T - K(t)N_vK^T(t), \qquad (6)$$

апостериорная дисперсия ошибки оценки.

Ограничимся наличием индикатора нестационарности $D(t)\vec{d}t$ лишь в уравнении наблюдения (4), что для практики как раз и характерно, ибо уравнение состояния (3) строится на основе априорных данных, которых в распоряжении исследователя может и не оказаться.

В соответствии с методологией [5] оценка состояния для i-й компоненты:

$$d\hat{x}_i(t)/dt = -\alpha_i\hat{x}_i(t) + \sum_{i=1}^{n}\left[P(d_i(t)/\hat{x}_i(t), y(t))\sum_{j=1}^{n} K_{ij}\frac{\partial F_j'(\hat{x}_i, t)}{\partial \hat{x}_j(t)}\right], \qquad (7)$$

где

$$P(d_i(t)/\hat{x}_i(t),y(t))=\sum_{i=1}^{r}\left\{\alpha_{ij}P(d_i(t)/\hat{x}_i(t),y(t))+P(d_j(t)/\hat{x}_j(t),y(t))\right\}+$$
$$+\sum_{i=1}^{r}\left\{P(d_i(t)/\hat{x}_i(t),y(t))\right\}\left\{F(\hat{x}_t,d_j(t)-F(\hat{x}_t,d_i(t)\right\}+ \qquad (8)$$
$$+\frac{1}{2}\sum_{m=1}^{n}K_{ml}\frac{\partial^2}{\partial x_m\partial x_e}\left[F(\hat{x}_t),d_j(t)-F(\hat{x}_t,t,d_i(t)\right]-$$

условная апостериорная вероятность состояния нестационарности $d_i(t)$, когда оценка состояния $\hat{x}_i(t)$, r – число возможных состояний, a_{ij} – элемент матрицы интенсивности переходов для вероятностей состояния:

$$dP_j(t)/dt=\sum_{i=1}^{r}\alpha_{ij}(t)P_i(t),\ \sum_{i=1}^{r}\alpha_{ij}=0.$$

Случайную структуру системы можно характеризовать соответствующим номером $\sigma(t)=\overline{1,n_\sigma}$, а ее функция состояния n_x – мерным вектором состояния $\vec{x}(t)$.

Для каждой из структур уравнения состояния (3) и уравнения наблюдения имеет соответствующие индексы $\sigma: A_\sigma, B_\sigma, H_\sigma$.

Между состоянием $x(t)$ и структурой σ_n может существовать статистическая или функциональная связь. При наличии лишь статистической связи такие системы носят название систем с распределенными переходами. Если же эта связь функциональна, то есть смена структуры происходит в те моменты, когда процесс $x(t)$ достигает определенных границ, то такие системы называются системами с сосредоточенными переходами. Те и другие называют системами с условной случайной структурой [5]. Альтернативные системы с независимыми между собой процессами $x(t)$ и σ_n носят название систем с независимой структурой.

Совместное описание процессов $\vec{x}(t)$ и σ_n приводит к разрывным (в момент смены структуры) кусочно-непрерывным или непрерывно-значным процессам $\vec{x}(t)=\left[\vec{x}(t),\sigma_n\right]^T$, состоящим из отрезков векторных марковских процессов $\vec{x}(t)$ одинаковой или различной размерности с заданными вероятностными характеристиками, представимых в виде (1). Дискретный процесс переключения σ_n может быть марковским или условно марковским [5].

Можно предположить наличие априорной информации о распределении $f(\vec{x}_t,\sigma,t)$ и условном распределении $f(\vec{x}_t,\sigma,t|\vec{x}'_t,\sigma',t')$. Тогда, с учетом плотности вероятности нахождения системы в рамках одной из структур $P(\sigma_n)=\overline{1,n}$, получим:

$$\begin{cases}\sum_{\sigma=1}^{n_\sigma}\int_{-\infty}^{\infty}f(\vec{x}_t,\sigma,t|\vec{x}'_t,\sigma',t')d\vec{x}=1,\\ \sum_{\sigma=1}^{n_\sigma}\int_{-\infty}^{\infty}f(\vec{x}_t,\sigma,t)d\vec{x}=1,\\ f(\vec{x}_t,\sigma,t)=P_\sigma(t)f_\sigma(x_t,t),\\ \sum_{\sigma=1}^{n_\sigma}P_\sigma(t)=1.\end{cases} \qquad (9)$$

Очевидно, что и апостериорные плотности вероятностей $\hat{f}(\vec{x}_t,\sigma,t)$ $\hat{f}(\vec{x}_t,\sigma,t|\vec{x}'_t,\sigma',t')$ и $P_\sigma(t)$ обладают той же нормировкой (9). Отметим, что апостериорные плотности распределений определяются по результатам наблюдений или измерений (2). Для указанного перечня априорных плотностей может быть записано уравнение Стратоновича.

Для процесса смены случайной структуры системы, в предположении пуассоновского потока моментов перехода и интенсивности перехода, когда $v_{rs}(\vec{x}_t,t)=v_{rs}(t)$, дифференциальное уравнение, определяющее скорость изменения вероятностей:

$$dP_\sigma^{(s)}(t)/dt=-P_\sigma^{(s)}(t)\sum_{\substack{r=1\\(r\neq\delta)}}^{n_\delta} v_{rs}(t)+\sum_{\substack{r=1\\(r\neq\delta)}}^{n_\delta} P_\sigma^{(s)}(t)v_{rs}(t)_t. \tag{10}$$

Данные уравнения полностью характеризуют особенности динамики дискретно-непрерывных процессов для систем со случайной структурой. Однако более интересными и с менее громоздкими математическими преобразования, чем решения уравнений ФПК и Стратоновича, являются частные характеристики: условные средние $\hat{\vec{x}}_t(t/y)$, $\vec{P}_\sigma(t/y)$ и условные апостериорные дисперсии $V_x(t/y)$ и $V_\sigma(t/y)$ как на этапе установления переходного режима в контуре управления при $t\ll\tau_{кор}$ так и после его наступления при $t\gg\tau_{кор}$, где $\tau_{кор}$ – интервал корреляции случайных процессов, происходящих в данной системе.

Процедуры управления и оценки

Для синтеза управления $\vec{u}(\hat{\vec{x}}(k))$ можно воспользоваться теоремой о разделении. Возможно также и совместное более общее нахождение управления и оценки.

Для рассматриваемых в данной работе линейных моделей структур управляемых систем при гауссовских внешних воздействиях для $\hat{\vec{x}}_\sigma(t)$ и $\vec{V}_x(t)$ дифференциальные уравнения, обобщающие процедуры Калмана-Бьюси, принимают вид:

$$\begin{aligned}d\hat{\vec{x}}_\sigma(t)/dt&=A_\sigma(t)\hat{\vec{x}}_\sigma(t)+U_\sigma(t)\vec{u}(t)-\sum_{\substack{r=1\\(r\neq\delta)}}^{n_\delta}\left\{v^{(\sigma r)}(t)\frac{\hat{P}^{(r)}(t)}{\hat{P}^{(s)}(t)}(\hat{x}_\sigma-\hat{x}_r)+\right.\\&\left.+V^{(\sigma)}(t)H_\sigma^T(t)N_{v(\sigma)}^{-1}(\vec{y}(t)-H_\sigma(t)\hat{\vec{x}}_\sigma(t)\right\},\end{aligned} \tag{11}$$

где $\vec{u}(t)$ – вектор управлений в системе с коэффициентом $U_\sigma(t)$, зависящим от текущей оценки состояния $\hat{\vec{x}}_\sigma(t)$ и параметров самой системы.

Апостериорная дисперсия ошибки оценки для конкретного номера структуры σ_n приобретает вид [5]:

$$\begin{aligned}V_\sigma(t)/dt&=A_\sigma(t)H_\sigma(t)+H_\sigma(t)A_\sigma^T(t)-\sum_{\substack{r=1\\r\neq s}}^{n_\delta}\left\{\ v^{(sr)}\frac{P_{(s)}(t)}{P_{(r)}(t)}\left[V_\sigma(t)-V_r(t)-(x_r(t)-x_\sigma(t))\right]\times\right.\\&\left.\times\left[y_r(t)-x_\sigma(t)\right]\ \right\}-V_{(\sigma)}(t)H_\sigma^T(t)N_{v(\sigma)}^{-1}H_\sigma(t)V_\sigma(t)+B_\sigma N_n B_\sigma^T.\end{aligned} \tag{12}$$

Уравнение для оценки вероятности перехода:

$$d\hat{P}_\sigma(t)/dt=-\hat{P}_\sigma(t)\sum_{\substack{r=1\\(r\neq s)}}^{n_\sigma} v_{(rs)}(t)+\sum_{\substack{r=1\\(r\neq s)}}^{n_\sigma}\hat{P}_\sigma(t)v_{(sr)}(t)-\frac{1}{2}\hat{P}_\sigma(t)\left[\hat{\gamma}_\sigma(\vec{y},t)-\sum_{\substack{r=1\\(r\neq\sigma)}}^{n_\sigma}\hat{P}_\sigma^{(r)}(\vec{y},t)\right], \tag{13}$$

где

$$\hat{\gamma}_\sigma(\vec{y}(t),t)=\int_{-\infty}^{\infty}\gamma(\vec{x}_t,\vec{y}_t,\sigma,t)\hat{f}_\sigma(\vec{x}_t,t)dx \qquad (14)$$

взвешенная со спектральной плотностью мощности шума наблюдения невязка, входящая в уравнение Стратоновича.

Полученные оценки функциональной характеристики, определяемые как $\hat{\vec{x}}_\sigma(t)$, при конкретной, пронумерованной σ_n случайной структуре системы и оценка скорости изменения вероятностей этой структуры $\dot{P}_\sigma(t)$ могут быть использованы далее для управления как функциональной, так и структурной сторонами системы.

Использование полученных результатов в современных ТКС

1) Изложенная теория совместных оценок вектора состояния $\vec{x}(t)$ и вероятности изменения структуры системы, по нашему мнению, является одной из немногих решений, в рамках которых одновременно отображаются как структурные, так функциональные свойства конкретной системы. К функциональным свойствам ТКС могут быть отнесены текущие параметры трафика, загрузка ресурсов, размеры резервов, отклонение рабочих параметров сетевых элементов. К структурным – относится существующая конфигурация сети ТКС, которую следует реструктуризировать в соответствии с изменением состояния функциональных свойств. Среди известных из теории систем трех методов обеспечения высокой устойчивости: энтропийных, гомеостатических и морфогенетических в данном случае реализуется морфогенетический.
2) Политика реструктуризации в ТКС может осуществляться различными способами. При прямом способе по полученным оценкам функциональных характеристик в реальном времени осуществляется то или иное изменение структуры: создаются обходные пути при возникновении неисправностей, при изменении трафика перераспределяются наличные ресурсы, создаются необходимые маршруты, корректируется маршрутная карта и др. При косвенном методе создается адекватная математическая модель ТКС и непрерывно, по получаемым оценкам, осуществляется ее идентификация. Сама модель ТКС и ее структура описываются тензором состояния, графоаналитическими методами, матрицами инциденций и др. При изменении состояния ТКС с привлечением тех или иных методов оптимизации (Форда-Фалкерсона, Беллмана-Форда и др.) производится реструктуризация.
3) Переходные состояния структуры P_σ, $\sigma=\overline{1,n}$ могут принимать различные счетные значения. В простейшем бинарном варианте (0,1) значения P_σ образуют обычную матрицу инциденций. Увеличение числа $n_\sigma>2$ дает возможность дискретно оценивать загрузку того или иного направления связи. С учетом стандартизации скоростей цифровых потоков выбор n_σ можно соответственно согласовать с данными стандартами, что позволит достаточно точно осуществлять перераспределение нагрузки и др.
4) Важнейшим параметром ТКС является величина задержки в контуре управления. Как показывает анализ [4, 7], процедура управления достигает цели, если циклы этого управления Δt_u существенно меньше периода между возможными изменениями состояния сети, требующими реструктуризации.

5) Рассмотренная методология управления ТКС является достаточно общей, позволяющей эффективно решать задачи изменения структуры сетей, в том числе для гибридных и мультипротокольных, поскольку сами процедуры управлений практически свободны от особенностей той или иной технологии.

Список литературы: 1. *Линец Г.И., Фомин Л.А., Будко П.А., Ватага А.И.* Учет влияния спектральных свойств трафика на параметры сети с технологией АТМ // Электросвязь. 2001. №11. С. 21 – 24. 2. *Турко С.А., Фомин Л.А., Будко П.А. и др.* Об оптимальном использовании сглаживающего влияния буферов на параметры трафика Ш–ЦСИС // Электросвязь. 2002. №10. С. 26 – 29. 3. *Пашкин П.В.* Устойчивость дискретных схем со случайной структурой при постоянно действующих возмущениях // Автоматика и телемеханика, 1986. 16. С. 142 – 152. 4. *Стеклов В.К., Кильчицкий Е.В.* Основи управління мережами та послугами телекомунікацій. К.: Техніка, 2002. 432 с. 5. *Тихонов В.И.* Статистическая радиотехника. М.: Радио и связь, 1982. 623 с. 6. *Родимов А.П., Поповский В.В.* Статистическая теория поляризационно-временной обработки сигналов в линиях связи. М.: Радио и связь, 1984. 320 с. 7. *Олійник В.Ф.* Основи теорії систем зв'язку. К.: Техніка. 2000. 152 с. 8. *Сейдж Э., Мелс Дж.* Теория оценивания и ее применения в связи и управлении. М.: Связь, 1976. 496 с.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 05.05.2004