УДК 621.391

О. Ю. ЕВСЕЕВА, канд. техн. наук

МУЛЬТИСТРУКТУРНАЯ МОДЕЛЬ И МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ В САМООРГАНИЗУЮЩЕЙСЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ

Введение

В условиях постоянного роста требований к сетевым технологиям и отдельным протоколам в стратегии функционирования и развития телекоммуникационных сетей (ТКС должны быть внесены элементы самоорганизации [1]. Самоорганизующиеся ТКС (СТКС представляют собой достаточно широкий класс сетей с динамической топологией, без фиксированной инфраструктуры, с обеспечением распределенной координации функций между узлами. Класс самоорганизующихся сетей образуют сенсорные сети, ad hoc сети, самоорганизующиеся сети общего пользования, а также так называемые комбинированные mesh сети, в которых узлы не обязательно обладают мобильностью.

Реализация функций самоорганизации накладывает дополнительный отпечаток на состав и функции систем (технологий) сетевого управления и отдельных управляющих механизмов и протоколов. Процесс управления должен носить непрерывный характер, основываясь на постоянном и максимально полном мониторинге и непрерывной обработке информации о состоянии сети (ее структуре, загруженности и т.д.), и осуществляться преимущественно в реальном масштабе времени. В условиях отсутствия постоянной топологии сети управление должно сводиться не только к параметрической оптимизации, но и обязательно затрагивать аспекты структурной адаптации. Выработка управляющего сигнала должна быть адекватной реакцией системы управления на любое (случайное или детерминированное) изменение как в самой сети, так и внешних условиях ее функционирования. Учитывая перечисленные выше особенности построения самоорганизующихся ТКС к основным требованиям, предъявляемым к перспективным моделям и методам управления, можно отнести следующие:

1) обеспечение системности принимаемых решений; 2) учет динамического и стохастического характера изменений как топологии сети, так и процессов информационного обмена протекающих в ней; 3) расширение (по сравнению с существующими моделями и методами перечня управляемых параметров и характеристик с целью более полной реализации преимуществ совместной параметрической и структурной адаптации.

Специфика проектирования и эксплуатации самоорганизующихся сетей порождает ряд проблем. Например, учитывая территориальную распределенность, разнородность (мультипротокольность) современных ТКС и стохастичность динамики изменения ее структурно функциональных параметров, осуществить комплексное решение перечисленных задач основываясь на использовании современного инструментария управления, не всегда представляется возможным. В большинстве случаев задача управления сводится к решению отдельных сетевых задач, относящихся к различным уровням эталонной модели взаимодействия открытых систем (ЭМВОС): отдельно решаются задачи и разрабатываются соответствующие протоколы уровня доступа, сетевого уровня (задача маршрутизации в беспроводных сетях), транспортного уровня (задача повышения производительности протокола TCP). В общем случае можно говорить об отсутствии либо системности решений, либо учета особенностей самоорганизующихся ТКС. В этой связи, в основу перспективных технологических средств управления должны быть положены принципиально новые математические модели и методы, способные осуществлять автоматическое перераспределение доступных сетевых ресурсов, в том числе и в условиях априорной неопределенности состояния ТКС, обусловленной стохастическим изменением ее параметров и структуры.

Математическая модель динамического управления в самоорганизующихся ТКС

Специфика самоорганизующихся ТКС приводит к необходимости их рассмотрения как сложной динамической стохастической системы с нестационарной структурной и параметри ческой неопределенностью. Скачкообразное изменение параметров и структуры самоорганизующейся ТКС позволяет говорить о ней как о системе со случайной сменой структуры в процессе функционирования, то есть мультиструктурной системе [2,3]. Здесь под изменением структуры понимается не только непосредственно изменение топологии сети, но и скачкообразное изменение параметров ТКС. На практике в качестве основных причин, приводящих к изменению морфологической или функциональной структуры ТКС, могут выступать:

- отказы в телекоммуникационном оборудовании, ведущие к снижению производительности или выходу из строя отдельных узлов, трактов или участков сети в целом;
- скачкообразное изменение величины внешней нагрузки, поступающей от сетей доступа;
- переполнение буферных устройств и связанные с этим перегрузки сетевых элементов и сети в целом;
- изменения в конфигурации сети, связанные с перераспределением внешней нагрузки и/или со сменой порядка подключения сетей доступа к приграничным узлам ТКС;
- пересмотр статического плана распределения информации (смена маршрутных таблиц);
- ошибки в контуре управления, связанные как со сбоями в сборе информации о состоянии ТКС, так и с ее обработкой и выработкой управляющего решения.

Такой подход к моделированию самоорганизующейся ТКС предполагает существование конечного множества структур, описывающих функционирование сети на неперекрывающихся временных отрезках, моменты смены между которыми случайны. На самих же неперекрывающихся интервалах времени структура предполагается либо неизменной, либо изменяющейся по прогнозируемому закону. Эти временные отрезки можно рассматривать как интервалы локальной стационарности, на протяжении которых вырабатываются и сохраняются некие оптимальные режимы функционирования как отдельных сетевых элементов, так и сети в целом. Смена структуры ТКС означает переход на другой интервал локальной стационарности и определяет необходимость коррекции режимов функционирования и перераспределения сетевых ресурсов.

Полностью состояние мультиструктурной системы характеризуется вектором состояния $\vec{x}(t)$ (вектор фазовых координат) и дискретно изменяющейся величиной $s(t)$ – номером структуры. Вектор $\vec{x}(t)$ представляет собой случайный процесс (непрерывный или дискретный в зависимости от принятого рассмотрения СТКС), а $s(t)$ – случайный дискретный скалярный процесс, $s(t) = \overline{1, n_s}$. Физически вектор $\vec{x}(t)$ представляет собой вектор загрузки буферных устройств на узлах сети в момент времени t. Размерность n_x вектора $\vec{x}(t)$ в общем случае может изменяться при переходе от одной структуры к другой и определяется числом узлов в сети n: $n_x = n(n-1)$.

В качестве математической модели динамических систем со случайной сменой структуры используется система дифференциально-разностных уравнений состояния, дополненная уравнениями наблюдения, которые записываются для каждого состояния системы s отдельно [2, 3]:

$$d\vec{x}(t)/dt = A_s(t)\vec{x}(t) + B_s(t)\vec{u}(t) + G_s(t)\vec{w}(t), \tag{1}$$

$$\vec{y}(t) = H_s^T(t)\vec{x}(t) + \vec{v}(t), \tag{2}$$

где $A_S(t)$ – матрица, элементы которой определяют статическую стратегию управления сетевыми ресурсами на протяжении интервала локальной стационарности s, размерность $n_x \times n_x$; $\vec{u}(k)$ – n_u-мерный вектор, который характеризует динамическую стратегию распределения сетевых ресурсов ($n_u = n(n-1)^2$); $B_S(t)$ – матрица, характеризующая особенности структурного построения, а также пропускные способности ее трактов передачи в момент времени t, размерность $n_x \times n_u$; $G_S(t)$ – матрица, компоненты которой обуславливают порядок подключения и предварительного распределения абонентской нагрузки по приграничных ным узлам СТКС на протяжении интервала локальной стационарности s, размерность $n_x \times n_w$; $\vec{w}(t)$ – n_w-мерный вектор абонентской нагрузки, поступающей на узлы ТКС; $H_s(t)$ – масштабирующая матрица, определяющая, насколько усилены (при $H > 1$) или ослаблены (при $H < 1$) измеряемые переменные состояния, так как в процессе функционирования ТКС наблюдению подвергаются, как правило, линейные (аддитивные) функции загрузки сетевых ресурсов; $\vec{v}(t)$ – вектор шумов измерений.

Рассматриваемая задача имеет вполне определенный физический смысл, который накладывает ограничения на область допустимых значений введенных переменных. Так согласно определению переменной состояния ввиду ограниченности емкости буферных устройств на узлах ТКС на элементы вектора $\vec{x}(t)$ накладываются ограничения вида

$$0 \le x_{i,j}(t) \le x_{i,j}^{\max}, \qquad (3)$$

где $x_{i,j}(t)$ – объем данных, находящихся на i-м узле и предназначенных для передачи j-му узлу (элемент вектора состояния $\vec{x}(t)$), $x_{i,j}^{\max}$ – емкость буфера, выделенная для его хранения данных $x_{i,j}(t)$.

Ограничения на переменные динамического управления сетевыми ресурсами связаны с ограниченностью пропускной способности трактов передачи:

$$0 \le u_{i,l}^{j}(t) \le u_{i,l}^{j(\max)} \le 1; \qquad (4)$$

$$\sum_{\substack{j=1,\\ j\ne i}}^{n} u_{i,l}^{j}(t) \le \varepsilon_{i,l} \le 1, \qquad (5)$$

где $u_{i,l}^{j}(t)$ и $u_{i,l}^{j(\max)}$ – элемент вектора динамического управления, определяющий долю пропускной способности тракта передачи (i,l), выделенную для передачи трафика от узла i к узлу j, и максимальный предел выделяемой доли пропускной способности соответственно; $\varepsilon_{i,l}$ – доля пропускной способности тракта (i,l), выделенная для реализации динамической стратегии управления сетевыми ресурсами.

Кроме того элементы матриц $A_s(t)$ и $G_s(t)$ так же подчиняются условиям, связанным с их физическим смыслом:

$$0 \le a_{i,l}^{j}; \ \sum_{\substack{l=1,\\ l\ne i}}^{n} a_{i,l}^{j} \le 1, \qquad (6)$$

$$\sum_{\substack{i=1,\\ j\ne i}}^{n} g_{k,i}^{j} \le 1, \qquad (7)$$

где $a_{i,l}^{j}$ – доля передаваемых данных из буфера очереди (i,j) к узлу j через узел l (статическая маршрутная переменная, элемент матрицы $A_s(t)$); $g_{k,i}^{j}$ – доля трафика, поступающего от k-го абонента на i-й приграничный маршрутизатор с адресатом j (элемент матрицы $G_s(t)$).

Для дальнейшего успешного решения поставленной задачи необходимо определить характеристики случайных процессов $\vec{w}(t)$ в уравнении состояния (1) и $\vec{v}(t)$ в уравнении наблюдения (2). Случайный процесс $\vec{w}(t)$ представляет собой процесс поступления внешней нагрузки от сетей доступа на приграничные узлы СТКС. Как показали исследования [5], с достаточно высокой степенью достоверности может быть принята гипотеза о нормальности процесса $\vec{w}(t)$ с известным средним $\overline{w}(t)$ и спектральной плотностью мощности $N_w(t)$. Это обусловлено высокой степенью агрегированности данного потока, получаемого наложением множества информационных потоков отдельных абонентов. Процесс $\vec{v}(t)$ в уравнении (2) представляет собой шум измерений и является гауссовским центрированным белым шумом с матрицей интенсивностей $N_v(t)$.

Трактовка самоорганизующейся ТКС как мультиструктурной системы предполагает рассмотрение процесса функционирования как смешанного разрывного (в моменты смены структуры) случайного процесса $\left[\vec{x}(t), s(t)\right]^T$, состоящего из отрезков векторных марковских процессов $\vec{x}(t)$ одинаковой или различной размерности, представленных в виде (1). Дискретный процесс переключения $s(t) = \overline{1, n_s}$ может быть марковским или условно марковским. Полной вероятностной характеристикой расширенного вектора состояний $\left[\vec{x}(t), s(t)\right]^T$ являются априорные, а при наличие измерений $\lambda(t_0, t)$ апостериорные функции [2,3]:

- первая функция плотности вероятности $f(\vec{x}_t, s, t)$;

- функция плотности вероятности перехода при фиксированном номере структуры s $f(\vec{x}_t, s, t \mid \vec{x}'_t, s, t')$;

- вероятность состояния структур $P_s(t)$, $s(t) = \overline{1, n_s}$.

Введенные функции плотности вероятности удовлетворяют условиям нормировки

$$\sum_{s=1}^{n_s} \int_0^{x_{\max}} f(\vec{x}_t, s, t \mid \vec{x}'_t, s, t') d\vec{x} = 1 \text{ и } \sum_{s=1}^{n_s} \int_0^{x_{\max}} f(\vec{x}_t, s, t) d\vec{x} = 1. \tag{8}$$

Здесь интегрирование осуществляется по области существования процесса $\vec{x}(t)$, то есть в соответствии с ограничением (3). При фиксированном s функции плотности вероятности не нормированы.

Для вероятности нахождения процесса в состоянии s (структура s) справедливо выражение

$$\sum_{s=1}^{n_s} P_s(t) = 1. \tag{9}$$

Введенные функции связаны между собой соотношением $f(\vec{x}_t, s, t) = P_s(t) f_s(\vec{x}_t, t)$.

Априорные функции плотности вероятности на практике зачастую не известны и при анализе систем со случайной структурой используют апостериорные функции $\hat{f}(\vec{x}_t, s, t)$, $\hat{f}(\vec{x}_t, s, t \mid \vec{x}'_t, s, t')$ и вероятность состояния структур $\hat{P}_s(t)$, которые также удовлетворяют условиям (8) и (9). Апостериорные функции плотности вероятности и вероятность состояния структур могут быть определены при условии наличия результатов измерений $\lambda(t_0, t)$, полученных на интервале (t_0, t). При этом функция $\hat{f}_s(\vec{x}_0, t_0) = \hat{f}_s(\vec{x}_0)$ и вероятность $\hat{P}_s(t_0)$, $s = \overline{1, n_s}$ в начальный момент времени t_0 предполагаются известными. Апостериорная функция плотности вероятности $\hat{f}(\vec{x}_t, s, t) = \hat{P}_s(t) \hat{f}_s(\vec{x}_t, t)$ является полной характеристикой процесса $\left[\vec{x}(t), s(t)\right]^T$.

Рассматриваемые случайные процессы $\vec{x}(t)$ и $s(t)$ в общем случае могут быть как функционально связаны между собой (системы с зависимой структурой), так и не связаны (системы с независимой структурой). Для систем с зависимой структурой характерна зависимость $s(t)$ от $\vec{x}(t)$, то есть структура является условно случайной. Причем характер этой зависимости может быть различным: смена структуры может происходить при достижении процессом $\vec{x}(t)$ определенной границы (система с сосредоточенными переходами) либо зависит от нее случайным образом (система с распределенными переходами) [2]. Как показывает анализ поведения самоорганизующихся ТКС, в подобных системах могут наблюдаться переходы всех рассмотренных типов в зависимости от факторов, обуславливающих смену структуры. Учитывая, что в качестве переменных состояния были выбраны величины текущей загрузки буферных устройств на узлах сети, их переполнение (достижение верхней допустимой границы в (3)) и переход системы в состояние перегрузки может быть рассмотрено как сосредоточенная смена структуры, а отказ какого-либо сетевого элемента позволяет говорить о независимой смене структуры. Характер зависимости между процессами $\vec{x}(t)$ и $s(t)$ определяет вид функции интенсивности переходов: $p_{rs}(\vec{x},t)$ для систем с зависимой структурой и $p_{rs}(t)$ для систем с независимой структурой. Во втором случае выражения для вероятностных моментов и скорости изменения вероятностей $dP_s(t)/dt$ значительно упрощаются. Например, предположив процесс смены структуры пуассоновским ($p_{rs}(\vec{x},t)=p_{rs}(t)$), имеем скорость изменения вероятностей

$$dP_s(t)/dt = -P_s \sum_{\substack{r=1 \\ (r\neq s)}}^{n_s} p_{sr}(t) + \sum_{\substack{r=1 \\ (r\neq s)}}^{n_s} P_r\, p_{rs}(t)\,,\; P_s(t_0) = P_{s_0} \;\; (s=\overline{1,n_s}). \tag{10}$$

В общем случае эта зависимость имеет вид [3]

$$dP_s(t)/dt = -P_s \sum_{\substack{r=1 \\ (r\neq s)}}^{n_s} \int_0^{x_{\max}} p_{sr}(\vec{x},t) f_s(\vec{x},t) d\vec{x} + \sum_{\substack{r=1 \\ (r\neq s)}}^{n_s} P_r \int_0^{x_{\max}} p_{rs}(\vec{x},t) f_r(\vec{x},t) d\vec{x}\,,\; s=\overline{1,n_s}\,. \tag{11}$$

В рамках описанной математической модели самоорганизующейся ТКС задача управления представляет собой задачу расчета вектора оптимального управления $\vec{u}(\vec{x},t)$, минимизирующего целевой функционал $\vec{u}(\vec{x},t) = \arg\min M\{J(\vec{x},\vec{u},s,t)\}$, где $M\{\bullet\}$ – математическое ожидание случайной величины.

Вид целевого функционала, с одной стороны, должен быть согласован с физикой решаемой задачи, с другой – определяет характер решения. Для решения поставленной задачи оптимального управления выберем распространенный квадратичный стоимостный функционал

$$J = M\left\{ \int_0^{t_N} \left[\vec{x}^T(t) Q_x \vec{x}(t) + \vec{u}^T(t) Q_u \vec{u}(t) \right] dt \right\} \tag{12}$$

где Q_x – диагональная положительно определенная весовая матрица, обусловленная приоритетностью очередей на узлах сети; Q_u – диагональная положительно определенная весовая матрица, координаты которой характеризуют важность (стоимость) использования трактов передачи данных в ТКС.

Использование для математического описания самоорганизующейся ТКС предложенной математической модели (1)–(7) требует, в первую очередь, определения количества возможных структур системы n_s. Здесь определяющим фактором будет физический смысл, вкладываемый в понятие структуры системы и перехода из одной структуры в другую. Например, в процессе функционирования ТКС можно выделить периоды низкой активности абонентов (соответственно низкая величина внешней нагрузки), средней активности (средняя величина внешней нагрузки) и высокой активности (высокая внешняя нагрузка), а также ввести пороговые значения переходов между этими периодами. Например, в случае, когда суммарная внешняя нагрузка, поступающая от сетей доступа на приграничные узлы, не превышает 30 % от пропускной способности сети, считаем эту активность абонентов низкой. При превышении внешней нагрузкой порога, равного 60–70 % от пропускной способности сети, считаем активность абонентов высокой, а нагрузку – приближающейся к предельно допустимому значению. Таким образом, в процессе функционирования ТКС выделяются три состояния (структуры): первая соответствует случаю низкой загруженности сети, вторая – средней и третья – высокой (или предельной) в соответствии с введенными порогами. Каждый из этих режимов функционирования имеет свои особенности и может быть описан своим дифференциальным уравнением состояния. В первом случае отсутствует задача динамического распределения ресурсов: реализации только статического плана распределения информации, например, в соответствии с алгоритмом кратчайшего пути, будет достаточно, а следовательно, в уравнении (1) будет отсутствовать компонент $B_1(t)\,\vec{u}(t)$. Во втором случае, для области средних нагрузок только статической маршрутизации оказывается недостаточно и возникает необходимость в задействовании динамических алгоритмов, однако объем доступных ресурсов позволяет использовать приближенные алгоритмы и опираться при этом на детерминированную модель. Для третьей структуры характерна нехватка ресурсов, что выражается в повышении требований к допустимой величине погрешностей как процесса измерений, так и процесса принятия решений. В результате используемая в третьем состоянии модель должна обеспечивать учет стохастичности процесса функционирования в виде стационарной неопределенности [6]. В итоге система дифференциальных уравнений состояния самоорганизующейся ТКС принимает вид:

$$d\vec{x}(t)/dt = A_1(t)\vec{x}(t) + G_1(t)\vec{w}(t), \quad d\vec{x}(t)/dt = A_2(t)\vec{x}(t) + B_2(t)\vec{u}(t) + G_2(t)\vec{w}(t),$$

$$d\vec{x}(t)/dt = A_3(t,\theta^{(a)})\vec{x}(t) + B_3(t,\theta^{(b)})\vec{u}(t) + G_3(t,\theta^{(g)})\vec{w}(t).$$

Уравнения наблюдения для веденных структур

$$\vec{y}(t) = H_1^T(t)\vec{x}(t) + \vec{v}(t), \quad \vec{y}(t) = H_2^T(t)\vec{x}(t) + \vec{v}(t), \quad \vec{y}(t) = H_3^T(t,\theta^{(h)})\vec{x}(t) + \vec{v}(t).$$

Здесь $\theta^{(a)}$, $\theta^{(b)}$, $\theta^{(g)}$, $\theta^{(h)}$ – параметры, моделирующие стационарную неопределенность различной природы.

Для каждой из трех описанных структур ($s = \overline{1,3}$) может быть введен свой целевой функционал. Учитывая, что при выборе целевого функционала одним из требований является его соответствие физике решаемой задачи, то для структуры $s = 3$, когда в сеть поступают предельно допустимые или даже превышающие допустимые значения объемы внешнего трафика, стоимостный функционал вида (12) утрачивает физический смысл и на первый план выходит другая цель – предотвратить перегрузку и не допустить блокировку как отдельных сетевых элементов, так и сети в целом. Возможный вид целевого функционала в этом случае

$$J_3 = M\left\{\int_0^{t_N} \vec{x}^T(t) Q_x \vec{x}(t)\, dt\right\}.$$

Таким образом, представление СТКС как мультиструктурной системы и использование для ее математического описания дифференциальных уравнений вида (1) дает возможность реализовать в системе управления различные уровни адаптации [7]:

- параметрическая адаптация осуществляется за счет изменения параметров модели;

- структурная адаптация происходит путем перехода от одной модели (s) к другой (r), отображающего смену структуры;

- адаптация объекта управления (его расширение) также реализуется за счет смены модели, например описанные дифференциальные уравнения для $s=1$ и $s=2$ содержат различные объекты управления;

- адаптация целей управления отражается в смене целевого функционала, например для случая предельно высоких нагрузок в рассмотренном примере.

Метод управления в самоорганизующейся ТКС

В рамках изложенной математической модели задача управления в СТКС представляет собой стохастическую оптимизационную задачу по минимизации целевого функционала (12) при наличии ряда ограничений: динамических ограничений (1) и ограничений, связанных с физическим смыслом введенных переменных (3)–(5). Однако наличие в системе случайных переходов между различными ее структурами требует определения в процессе оптимизации оценки текущей структуры. В качестве основной задачи оптимизации остается поиск оптимального управления в присутствии помех при заданной информации об объекте управления в виде уравнений (1)–(2) [2].

Таким образом решение исходной задачи управления в рамках мультиструктурной модели представляет собой последовательное решение двух задач. Первая состоит в отыскании наивероятнейшей структуры (по максимальному значению $\hat{P}_s(t)$), а вторая заключается в формировании вектора $\vec{u}(\vec{x},t)$ в рамках определенной структуры при наличии результатов измерений $\lambda(t_0,t)$.

Безусловная апостериорная оценка вектора состояния системы [3] определяется как

$$\hat{\vec{x}}(t|t_0,t) = \sum_{s=1}^{n_s} \hat{P}_s(t)\hat{\vec{x}}_s(t|t_0,t). \tag{13}$$

Таким образом, необходимо определить апостериорные оптимальные оценки $\hat{P}_s(t)$ и $\hat{\vec{x}}_s(t|t_0,t)$. Оценка вероятности в предположении распределенных независимых пуассоновских смен структур может быть получена из выражения [3]

$$d\hat{P}_s(t)/dt = -\hat{P}_s \sum_{\substack{r=1\\(r\neq s)}}^{n_s} p_{sr}(t) + \sum_{\substack{r=1\\(r\neq s)}}^{n_s} \hat{P}_r p_{rs}(t) - \frac{1}{2}\hat{P}_s\left[\hat{\gamma}_s(\vec{y},t) - \sum_{\substack{r=1,\\r\neq s}}^{n_s} \hat{P}_r\hat{\gamma}_r(\vec{y},t)\right],\ s=\overline{1,n_s}, \tag{14}$$

где $\hat{\gamma}_s(\vec{y},t) = \int_0^{x_{\max}} \gamma(\vec{x},\vec{y},s,t)\hat{f}_s(\vec{x},t)d\vec{x}$, $\gamma(\vec{x},\vec{y},s,t) = \left(\vec{y}(t) - H_s(t)\vec{x}(t)\right)N_v^{-1}\left(\vec{y}(t) - H_s(t)\vec{x}(t)\right)^T$.

Оптимальной оценкой $\hat{\vec{x}}_s(t|t_0,t)$ при квадратичной форме целевого функционала является математическое ожидание $\hat{\vec{x}}_s(t|t_0,t) = M\left\{\vec{x}(t)|\lambda(t_0,t),s\right\}$ и ковариационная матрица ошибки оценки $V_s(t|t_0,t) = M\left\{\left(\hat{\vec{x}}_s(t|t_0,t) - \vec{x}(t)\right)\left(\hat{\vec{x}}_s(t|t_0,t) - \vec{x}(t)\right)^T \middle| \lambda(t_0,t),s\right\}$.

Для уравнений вида (1)–(2) и в предположении пуассоновского потока моментов смены структуры для получения вектора оценки состояния может быть использован обобщенный фильтр Калмана-Бьюси в виде [3]:

$$d\hat{\vec{x}}_s(t)/dt = A_s(t)\hat{\vec{x}}_s(t) + B_s(t)\vec{u}_s(t) - \sum_{\substack{r=1\\(r\neq s)}}^{n_s}\left\{p_{rs}(t)\frac{\hat{P}_r(t)}{\hat{P}_s(t)}(\hat{x}_r - \hat{x}_s) + V_s(t)H_s(t)(t)N_{v(s)}^{-1}(\vec{y}_s(t) - H_s^T(t)\hat{\vec{x}}_s(t))\right\} \tag{15}$$

$$V_s(t)/dt = A_s(t)V_s(t) + V_s(t)A_s^T(t) - \sum_{\substack{r=1\\r\neq s}}^{n_s}\left\{p_{sr}(t)\frac{\hat{P}_{(r)}(t)}{\hat{P}_{(s)}(t)}\Big(V_s(t) - V_r(t) -\right.$$

$$\left.-\left[\vec{x}_r(t) - \vec{x}_s(t)\right]\times\left[\vec{x}_r(t) - \vec{x}_s(t)\right]^T \Big)\right\} - V_s(t)H_s(t)N_{v(s)}^{-1}H_s^T(t)V_s(t) + G_s(t)N_{w(s)}(t)G_s^T(t),\left(s=\overline{1,n_s}\right). \tag{16}$$

Таким образом, используя обобщенный фильтр Калмана-Бьюси (14)–(16) может быть получена безусловная оценка текущего состояния (13), которая в дальнейшем используется в формировании управляющего вектора $\vec{u}(\hat{\vec{x}},t)$.

Задача нахождения вектора оптимального управления в соответствии с целевым функционалом (12) и при наличии ограничений (1), (3)–(5) представляет собой достаточно сложную задачу, не имеющую аналитического решения и требующую применения численных методов. Учитывая, что самоорганизующаяся ТКС является сложной распределенной системой, представляется целесообразным для решения поставленной задачи использовать декомпозиционные методы, например предсказания взаимодействия, целевой координации или их комбинации [8]. Использование декомпозиционных методов или их комбинации позволяет реализовать в ТКС принципы иерархического управления, которое сочетает в себе преимущества централизованного и распределенного управлений. В [9-12] предлагаются различные методы иерархическо-координационного управления и показана эффективность их применения.

Выводы

Таким образом, специфика самоорганизующихся ТКС, что проявляется в необходимости не только параметрической, но и структурной адаптации в процессе функционирования, приводит к необходимости ее рассмотрения как сложной стохастической динамической системы в условиях нестационарной неопределенности. Нестационарный характер – наличие скачкообразных изменений в состоянии системы, обусловленных факторами различной природы, позволяет говорить о самоорганизующейся ТКС как о мультиструктурной системе и применить соответствующий математический аппарат. Подобный подход при организации управления позволит рассматривать весь период функционирования ТКС как совокупность интервалов локальной стационарности, на протяжении которых необходимо сформировать и затем только поддерживать оптимальный режим функционирования. Остается лишь задача отслеживания и своевременного принятия решения о смене структуры и перехода в новый интервал локальной стационарности. В целом представляется целесообразной иерархическая структура системы управления и соответственно использование в качестве вычислительной основы вектора управления иерархическо-координационных методов.

Список литературы: 1. *Молчанов Д.А.* Самоорганизхующиеся сети и проблемы их построения // Электросвязь. 2006. №6. С.24–28. 2. *Казаков И.Е., Артемьев В.М.* Оптимизация динамических систем случайной структуры. М.: Наука, 1980. 384 с. 3. *Казаков И.Е.* Стохастические системы со случайной сменой структуры // Изв. АН СССР. Техн. кибернетика. 1989. №1. С. 58-78. 4. *Поповский В. В., Олейник В. Ф.* Обобщенная модель управления параметрами функциональных и структурных свойств телекоммуникационных систем // Зв'язок. 2004. №3. С. 29-33. 5. *Лемешко А.В., Прозоров А.М., Чепелюк С.А.* Характеризация функциональной модели глобальной компьютерной сети // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: Сб. науч. тр. ХАИ. Вып. №3. Х.: ХАИ, 1999. С. 110-114. 6. *Лемешко А.В., Евсеева О.Ю., Копейка О.В., Беленков А.Г.* Реструктуризация телекоммуникационной системы в условиях неопределенности ее стационарного состояния // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2007. Вып. 148. С. 15-27. 7. *Растригин Л. А.* Адаптация сложных систем. Рига: Зинатне, 1981. 375 с. 8. *Сингх М., Титли А.* Системы: декомпозиция, оптимизация и управление. М.: Машиностроение, 1986. 494 с. 9. *Лемешко А.В.* Алгоритм иерархическо-координационного управления информационным обменом в сети передачи данных // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: Сб. науч. тр. ХАИ. Вып. №1. Х.: ХАИ, 1998. С.323-328. 10. *Лемешко А.В., Беленков А.Г.* Двухуровневый алгоритм оптимизации процессов маршрутизации и управления доступом в телекоммуникационных сетях магистрального уровня // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2003. Вып. 135. С. 113-118. 11. *Евсеева О.Ю.* Решение задачи иерархическо-координационной маршрутизации в телекоммуникационных сетях методом предсказания взаимодействия // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. Харьков: НАКУ «ХАИ», 2003. Вып. 21. С. 102-111. 12. *Беленков А.Г., Евсеева О.Ю., Лемешко А.В.* Метод распределения нагрузки в иерархических телекоммуникационных сетях на базе декомпозиционных принципов предсказания взаимодействий и целевой координации // Праці УНДІРТ. 2005. №2(42). С. 11-16.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 17.10.2007