К РАЗВИТИЮ ТЕОРИИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Поповский В.В.
Харьковский национальный университет радиоэлектроники
61166, Харьков, пр.Ленина, каф. телекоммуникационных систем, тел. (057)702-13-20
E-mail: tkc@kture.kharkov.ua; факс (057)702-13-20

It is asserted that mathematical models of complex systems, including telecommunication ones, should be built using multidimensional representations. It is interrelation among the components (elements) of the system that assure its super-integral integrity and emergency properties.

Two types of stochastic systems representations are analyzed: through probabilistic characteristics (of density or of probability distribution function) and through state equations. It is concluded that variable states method is more general and enables to represent all the set of random objects: values, processes and fields.

Общие вопросы

Нынешний этап развития и совершенствования информационных и телекоммуникационных систем осуществляется за счет технологических решений и потребительского спроса на услуги. Телекоммуникации - это едва ли не единственная отрасль, к развитию которой наука имеет лишь опосредствованное отношение и привлекается большей частью при разработке отдельных элементов сетей или фрагментов. Уместная в данном случае наука — теория систем пока что декларируется в концепции ПСП — правилах системной политики и до сих пор не обрела базисного характера.

Причин неактивного использования результатов теории в развитии отрасли несколько. Во-первых, сама теория систем, начиная со второй половины прошлого столетия, притормозила в развитии из-за отсутствия явных запросов со стороны прикладных задач.

Во-вторых, при стремительном расширении телекоммуникационных систем весьма удовлетворительные результаты дают все более новые технологии и острой необходимости в привлечении современной системной науки пока что не было. Наконец, многочисленные разработчики и производители нового сетевого оборудования, а соответственно и технологий, не заинтересованы в системности и унификации разработок. Их основной интерес в том, чтобы «застолбить» ту или иную нишу рынка телекоммуникаций.

Несмотря на все эти объективные и субъективные причины, возникает потребность и необходимость использования системных теорий, в частности кибернетики, в свое время давшей теории систем «второе дыхание». Вместе с тем, в уже существующих технологиях все больше используются различные кибернетические решение, где телекоммуникационная система, или ее часть, рассматривается как динамичная, управляемая система, где реализуются формализованные дифференциальные модели, функционирующие в соответствии с принятыми критериями (в том числе стохастическими), методы преодоления априорной неопределенности, процедуры принятия решений, оценок, экстраполяции, интерполяции и управления.

Мощный аппарат кибернетических решений удачно используется в одномерном варианте. Достаточно детально исследованы различные одномерные методы и процедуры. Вместе с тем, при переходе к многомерным представлениям и моделям возникают определенные сложности, которые часто аккуратно обходятся авторами. Здесь проблема не только в необходимости обоснования марковских свойств многомерной модели, но и в самих алгоритмических решениях, в интерпретации выигрышей или потерь, вызванных наличием и учетом взаимных связей между компонентами многомерной системы. В то же время именно эти взаимные связи систему делают системной, ибо при независимых компонентах она распадается на отдельные элементы, а благодаря этим взаимным связям система приобретает сверхинтегральные свойства, не являющиеся простой суммой свойств отдельных составляющих ее элементов, и обретает характеристики эмерджентности.

Таким образом, с одной стороны, возникает необходимость использования результатов теории систем и кибернетики в существующих инфокоммуникационных технологиях (а в дальнейшем и в том, чтобы в создаваемых на основе строгих математических предпосылок и критериев телекоммуникационных системах, использовать передовые технологии), с другой стороны — при проецировании теории систем на инфокоммуникационные системы возникает необходимость в конкретизации теории применительно к свойствам инфокоммуникаций.

В связи с потребностью теоретического обоснования многих алгоритмов обработки сигналов, управления и адаптации, которые уже внедрены в существующие технологии или ожидается их внедрение. Возникла необходимость включения в учебный план специальност дисциплин «Теория систем» и «Методы управления и адаптации в ТКС». Кроме того, сама инфокоммуникационная система, которая все больше становится похожей на систему управляемых автоматов, уже сейчас требует конструктивной теории, поясняющей работу субсистем управления, являющуюся аналогом нервной системы человека.

Отраслевая наука — теория телекоммуникационных систем, очевидно, должна излагаться на основе статистического, вероятностного подхода. На наш взгляд, это принципиально важно, поскольку в отличие от детерминистского подхода, где задача приводит к конкретному решению, решение вероятностных задач обычно охватывает целый класс ситуаций. Это, помимо общности, приводит к более устойчивым решениям в условиях случайных и нестационарных процессов, трафика, сигналов и помех.

Необходимость разработки теории телекоммуникационных систем состоит также и в том что до сих пор отсутствуют методики построения адекватных многомерных математических динамических моделей и разработки набора математических приемов и методов анализа и синтеза, в необходимости создания методологии системных исследований, позволяющих проектировать и эксплуатировать данные системы с принципами самоорганизации и самовосстановления, устойчивые на микро и макроуровнях к зависаниям и катастрофическим исходам. Уже сегодня потребности практики актуализируют разработку теории телекоммуникационных систем.

Математические модели телекоммуникационных систем

В любой теории одним из главных положений является выбор математических моделей, определяющих данную предметную область. Вариант комплекта математических моделей, необходимый для построения указанной теории, можно представить в виде таблицы №1. В верхней части таблицы сосредоточены общие характеристики систем. Сосредоточимся на нижней более конкретной части.

В общем случае любой физический объект можно рассматривать как случайный. При этом случайная часть может быть сосредоточена как в самом объекте, так и в тех инструментах, с помощью которых отображают данный объект и формируют наблюдения об этом объекте.

Поскольку любая модель лишь приближенно соответствует моделируемому объекту, то часто допустимыми считаются отклонения параметров модели до 20%. Поэтому, если объект характеризуется незначительным уровнем случайной компоненты, то модель такого объекта часто считают детерминированной, что облегчает решение задачи.

В тех случаях, когда не удается задачу свести к чисто детерминированной приходится ее решать как стохастическую. Имеется два основных приема решений, каждый из которых основывается на своих математических моделях.

1. Метод моделирования и решений стохастических задач с использованием результатов теории вероятностей. В данном методе рассматривается не сам случайный объект ξ, а его вероятностные характеристики: функция распределения вероятностей $F(x) = P\{\xi \le x\}$, где x - неслучайная переменная величина, определяющая вероятность непревышения ее случайной величиной ξ.

Таблица 1. Типы математических моделей систем

<table>
<tr><td colspan="6">Простые
одна модель</td><td colspan="6">Сложные
множество моделей</td></tr>
<tr><td colspan="12">Свойства систем</td></tr>
<tr><td colspan="4">Структурные
(состав, связность,
сложность, иерархичность)

- теория графов
- теория симплексов</td><td colspan="4">Общесистемные
(целостность, устойчивость,
инвариантность,
открытость, надежность)
- теория тензоров
- теория устойчивости
- теория автоматов
- теория систем</td><td colspan="4">Функциональные
(инерционность,
производительность,
точность, результативность)
- дифференциальные уравнения
- разностные уравнения</td></tr>
<tr><td colspan="6">Локальные</td><td colspan="6">Распределенные
- по времени
- по пространству</td></tr>
<tr><td colspan="6">Линейные
$y = A(t)x(t)$</td><td colspan="6">Нелинейные
$y = A(x, t)$</td></tr>
<tr><td colspan="12">Область представлений параметров
- частотная
- временная
- пространственная
- общая</td></tr>
<tr><td colspan="12">Стохастические = детерминистские + случайные</td></tr>
<tr><td colspan="3">Случайные события

$P(A)$</td><td colspan="3">Случайные величины
$p(x)$</td><td colspan="3">Случайные процессы

$p(x_n, t_n)$</td><td colspan="3">Случайные поля

$p(\vec{x}_n, \vec{t}_n)$</td></tr>
<tr><td colspan="6">Статические</td><td colspan="6">Динамические</td></tr>
</table>

Другая часто используемая вероятностная характеристика – распределение вероятностей этой переменной

$$p(x) = \frac{dF(x)}{dx}, \text{ где } F(x) = \int_{-\infty}^{x} p(x)dx. \quad (1)$$

Данный метод моделирования нашел широкое применение в практике, в том числе в радиотехнике и связи, где задачи сводятся к получению параметров различных объектов, обеспечивающих желаемое значение вероятности. Важным достоинством данного метода является то, что все преобразования переменной x и ее вероятностей $p(x)$ могут осуществляться с помощью обычных интегро-дифференциальных операторов.

Метод отлично зарекомендовал себя в тех задачах, где случайные объекты обладают свойствами случайных величин. Поэтому при использовании обсуждаемого метода моделирования важно априори определить к какому типу относится анализируемый случайный объект: событию, величине, процессу или случайному полю. Если же возникает необходимость отображения динамических свойств случайных объектов, то модель случайных величин уже не работает. Необходимый при этом переход к вероятностям случайных процессов и полей при представлениях $F(\vec{x})$ и $p(\vec{x})$ оказывается громоздким n-мерным, где n-число сечений, в которых представлены эти процессы или поля.

Случайный процесс $x(t)$ - это математический объект, представляющий собой множество случайных функций времени и (или) пространства, в каждом сечении которых определена плотность распределения вероятностей:

$$p(x_1,x_2,..,x_n;t_1,t_2,..,t_n) = \frac{\partial^n F(x_n,t_n)}{\partial^n x_n}, \qquad (2)$$

где $F(x_n,t_n)$ - функция распределения процесса $x(t)$ в n - сечениях.

С представлениями (2), в силу громоздкости, работать достаточно сложно, поэтому существует ряд частных представлений, среди которых: предположение о диффузности процесса $x(t)$, о стационарности и эргодичности. Существует также ряд аппроксимаций известными функциями.

Использование предположения об эргодичности процессов имеет ограниченное практическое применение в силу невозможности решений динамических и нестационарных задач, являющихся основными в телекоммуникациях. Вместе с тем, следует отметить, что несмотря на свою ограниченность данный метод продолжает широко использоваться в теории связи и других прикладных науках.

2. Метод моделирования и решения стохастических задач, использующий представления о самих случайных объектах: случайных величинах, случайных процессах или случайных полях. Среди наиболее конструктивных таких моделей являются модели диффузионного типа, в частности модели марковских процессов. Такой процесс, включающий случайную и детерминированную компоненты, представим в виде:

$$x(t) = x(0) + \int_T \theta(t)dt + \int_T \Phi(t)dW(t), \qquad (3)$$

где $x(0)$ - регулярная постоянная составляющая,

$\int_T \theta(t)dt$ - регулярно изменяемая компонента, описываемая обычным интегралом Лебега,

$\int_T \Phi(t)dW(t)$ - случайно изменяемая компонента, порожденная винеровским процессом $W(t)$, описываемая интегралами Ито или Стратоновича.

Кроме такого интегрального, часто используется и представление дифференциальным управлением состояния:

$$dx(t)/dt = F(t)x(t) + G(t)\xi(t), \qquad (4)$$

где $F(t) = \alpha$ - коэффициент состояния процесса $x(t)$ численно равный обратной величине интервала корреляции этого процесса $\alpha = \tau^{-1}_{кор}(x)$;

$G(t)$- коэффициент генерации, $G(t) = \sigma^2_x / 2\alpha$, определяющий уровень случайно изменяющейся компоненты;

$\xi(t)$ - гауссов белый шум (порождающий процесс).

Для случайного поля состояние $x(t)$ становится вектором, а коэффициенты $F(t)$ и $G(t)$ - матрицами, недиагональные элементы которых определяют уровни взаимных связей между компонентами системы $x_i(t)$.

В рассматриваемом втором методе, называемом методом переменных состояния, не исключается, наоборот - широко используются также результаты теории вероятностей и математической статистики. Так, два состояния марковского процесса $x(t_1)$ и $x(t_2)$ связаны между собой переходной вероятностью:

$$x(t_2) = p(t_2/t_1) \cdot x(t_1),$$

где $p(t_2/t_1) = \exp\{-\Delta t/\tau_{кор}\}$ - вероятность перехода из состояния в момент времени t_1, в состояние момента t_2, $\Delta t = t_2 - t_1$.

В соответствии с теоремой Дуба случайный процесс, представимый уравнением состояния (4), относится к классу марковских. Часто уравнение (4) называют уравнением формирующего фильтра.

Важным достоинством марковских моделей (3) и (4) является возможность получения адекватных моделей для динамических, в том числе нестационарных, случайных объектов. Достаточно хорошо разработанная прикладная математика для марковских процессов позволяет получать оптимальные оценки $\hat{x}(t)$, используя фильтры Калмана или Стратоновича, находить оптимальные алгоритмы управления, используя принцип двойственности с алгоритмами оценки и теорему о разделении алгоритмов стохастического управления, синтезировать различные процедуры обработки случайных сигналов, аппроксимируемых широким спектром моделей: случайных величин, процессов или полей. Так, для случайной величины x уравнение состояния (4) вырождается:

$$dx(t)/dt = 0. \tag{5}$$

Очевидно состояние системы, определяемой уравнением (5) постоянно во времени. Случайность такой системы состоит в неизвестном значении самого состояния и наличии шумов наблюдения (измерения) $v(t)$, входящих в уравнение наблюдения:

$$y(t) = H(t)x(t) + v(t), \tag{6}$$

где $H(t)$ - матричный коэффициент, элементы которого h_{kl} определяют величину сдвига и масштаба наблюдаемой величины $x(t)$.

Уравнение наблюдения (6) можно интерпретировать как самостоятельную модель типа «вход/выход» или «черный ящик». Что же касается модели состояния (4), то она уже не укладывается в рамки черного ящика из-за конкретизации внутренней структуры, возможной нелинейности, нестационарности, распределенности. Алгоритм оценки системы (4), построенные по методу Калмана-Бьюси преобразовывается в процедуру стохастической аппроксимации или процедуру Роббинса-Монро [5]. Следует заметить, что адекватной моделью ТКС может быть только n-мерное случайное поле $\vec{x}(t)$, где взаимные связи, определяют главные свойства (целостность, эмерджентность) этой сложной организационно-технической системы. При этом указанные взаимные связи в этой системе могут носить как вероятностный (за счет корреляции), так и регулярный, функциональный характер. Взаимная связь между компонентами x_i и x_j может образоваться в силу зависимых измерений, например при наличии переходных влияний, которые учитываются недиагональными элементами h_{kl}.

Выводы

1. Математические модели сложных систем, в том числе телекоммуникационных, должны быть построены с использованием многомерных представлений. Именно взаимные связи между компонентами (элементами) системы обеспечивают ей сверхитегральные свойства целостности и эмерджентности.

2. Учитывая то, что ТКС представляет собой сложную организационно-техническую систему, для нее не удается подобрать какой-либо одной общей математической модели. Множество моделей отображает различные функциональные свойства на уровне элементов, сети, предоставления услуг, бизнес-процессов. Целенаправленность ТКС определяется управлениями на каждом из уровней в соответствии с принятыми критериями оптимальности или же критериями достижимости (например, достижимости уровня качества обслуживания).

3. На практике редко когда встречаются чисто детерминированные или чисто случайные системы. В зависимости от соотношения этих составляющих используют детерминированные или стохастические модели систем. Детерминированные модели весьма удобные для анализа и синтеза: здесь широко разработанный и относительно простой математический аппарат, имеется возможность представлений во временной области и в частотной для линейных моделей. При использовании стохастических моделей – иная процедура дифференциальных и интегральных преобразований, кроме