В. В. ПОПОВСКИЙ, В. Ф. ОЛЕЙНИК

ОБОБЩЕННАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ И СТРУКТУРНЫХ СВОЙСТВ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Телекоммуникационная система рассматривается как система со случайным изменением структуры, приводящим к нестационарности. Получаемые оценки состояния и скорости изменения вероятности перехода в иное стационарное состояние используются для управления структурой сети.

Телекоммуникационная система (ТКС), как и любая другая, характеризуется определенными функциональными и структурными свойствами [1; 4; 6; 16]. Она относится к классу сложных организационно-технических систем, для которых не существует сколько-нибудь ограниченного набора математических моделей, полностью исчерпывающего их отображение [7; 10; 14].

Другая важная характеристика ТКС состоит в том, что она принадлежит к классу стохастически нестационарных систем, это очевидно из рассмотрения ее трафика.

Кроме упомянутых общих характеристик моделей ТКС можно привести и множество других (линейные — нелинейные, дискретные — непрерывные, управляемые — неуправляемые, замкнутые — открытые и др.), которые используют для детализации, когда необходимо дополнительно подчеркнуть те или иные свойства системы. И напротив — при исследованиях данных моделей приходится, как правило, сужать общую нестационарную, нелинейную, стохастическую модель, сводя ее к более простой, удобной для решения той или иной проблемы, рассматривая всю систему или ее часть как детерминированную, линейную [8; 14].

Иная тенденция — альтернативная сужению модели — связана с задачей рассмотрения более сложных моделей с учетом мультипротокольности, мультисервисности, мультиструктурности реальных ТКС, что требует комплексного подхода, однако решение при этом становится громоздким. В данной статье *предлагается математическая модель ТКС, не связанная с технологическими особенностями, но при этом позволяющая синтезировать и анализировать одновременно функциональные и структурные свойства.*

Оценки состояния телекоммуникационных систем

Состояние функциональных свойств исследуемой динамической системы (в том числе ТКС), исходя из предположения о том, что они являются марковскими, определяется соответствующими дифференциальными уравнениями состояния [16; 17], которые в случае линейности зависимостей данных свойств и самого состояния представляются в виде

$$\frac{dx_i(t)}{dt} = -\sum_{k=1}^{n} \alpha_{ik} x_i(t) + \sum_{k=1}^{n} \beta_{ik} n_i(t), \; i = \overline{1,n}, \qquad (1)$$

где α_{ik}, β_{ik} — связанные со сносом и диффузией марковского процесса $\vec{x}^T = (x_1, x_2, \ldots, x_n)$ коэффициенты, отображающие соответственно скорость изменения состояния и уровень этого изменения; $n_i(t)$ — составляющие вектора независимых между собой белых гауссовских порождающих шумов со спектральными плотностями мощностей .

Часто состояние системы $x_i(t)$ оказывается нелинейно зависящим от данной моделируемой системы [16; 17]. Например, скорость изменения состояния α_{ik} функционально связана со значениями самих состояний x_i. Тогда (1) приобретает нелинейный вид:

$$\frac{dx_i(t)}{dt} = f[x_i(t), t] + \sum_{k=1}^{n} \beta_{ik} n_i(t), \; i = \overline{1,n}. \qquad (2)$$

Возможны, очевидно, и более общие, более сложные зависимости [1; 16].

Вместе с тем модели состояний (1) или (2) уже являются достаточно общими для представления процесса и с использованием марковской теории фильтрации [16; 17] позволяют получать рекурсивные оценки $\hat{x}_i(t)$, обеспечивающие оптимальные — в смысле критерия минимума среднего квадрата ошибки $\min(x_i - \hat{x}_i)^2$ — свойства. При одномодовом симметричном распределении априорных вероятностей $f(x_t, t)$ эта оценка совпадает с максимумом отношения правдоподобия.

Уравнение состояния обычно дополняется уравнением наблюдения, что на практике реализуется через измерение параметров $x_i(t)$ данной системы:

$$y_i(t) = H_{ij}(t) x_i(t) + \nu_i(t), \quad i, j = \overline{1,n}, \qquad (3)$$

где $H_{ij}(t)$ — коэффициенты матрицы наблюдения, определяющие усиление или ослабление $x_i(t)$ при производимых измерениях; $\nu_i(t)$ — погрешности измерений (шум в канале наблюдения, шум квантования, ошибки измерения и др.), которые также принято описывать эквивалентным гауссовским белым шумом. Отметим, что шумы $\nu_i(t)$, в отличие от порождающих $n_i(t)$, имеют реальный, а не виртуальный смысл.

Уравнение наблюдения (3) также может оказаться нелинейным в случаях, когда, например, функции $H_{ij}(t)$ зависят от состояний $x_i(t)$ (как происходит в реальных устройствах и усилителях):

$$y_i(t) = h_{ij}(t)[x_i(t), t] + \nu_i(t), \quad i, j = \overline{1,n}. \qquad (4)$$

Эта нелинейность проявляется в виде ограничения динамического диапазона, гистерезисной зависимости и др.

Здесь мы (учитывая, что цели данной статьи иные) ограничимся рассмотрением линейных систем; проблематика нелинейных является предметом самостоятельных исследований [4; 6; 8; 11; 16; 17].

Согласно методологии [16; 18], представим уравнение оценки стационарного марковского процесса $\hat{x}_i(t)$ в виде

$$d\hat{x}_i(t)/dt = -\alpha_i(t)\hat{x}_i(t) + \sum_{j=1}^{n} K_{ij}(t) F_j'(\hat{\vec{x}}_t, t), \qquad (5)$$

где K_{ij} — матрица апостериорных вторых центральных моментов, компоненты которой находятся из уравнения Риккати:

$$dK_{ij}(t)/dt = B(t) N_n B^T(t) -$$
$$- \sum_{i=1}^{n} K_{ij}(t)\alpha_i - \sum_{j=1}^{n} K_{ij}(t)\alpha_j + \sum_{i=1}^{n} K_{ij}(t) \sum_{j=1}^{n} K_{ij} J(t); \qquad (6)$$

$A(t)$, $B(t)$ — матрица элементов соответственно α_{ij} и β_{ij}; N_n — матрица спектральных плотностей $n(t)$ мощностей порождающих шумов; $J(t)$ — якобиан от функции $F_j'(\hat{x}_t, t)$, представимый в виде матрицы; $F_j'(\hat{\vec{x}}_t, t)$ — производная по времени наблюдения от логарифма функции правдоподобия

$$L(t) = \exp\left\{\int_0^T \hat{S}(t)\vec{y}(t)dt - \frac{1}{2}\int_0^T \hat{S}^2(t)dt\right\},$$
$$F_j'(\hat{\vec{x}}_t, t) = N_\nu^{-1}\left[2\vec{y}(t)S(\hat{\vec{x}}_t, t) - S^2(\hat{\vec{x}}_t, t)\right], \qquad (7)$$

N_ν — матрица спектральных плотностей $\nu(t)$ мощностей шумов наблюдения; $S(\hat{\vec{x}}_t, t)$ — измеряемый сигнал, $S(\hat{\vec{x}}_t, t) = H^T(t)\vec{x}(t)$.

Можно показать [4; 11], что решение уравнений (5)–(7) приводит к выражению, эквивалентному известной процедуре Калмана — Бьюси [12; 15].

Таким образом, используя результаты измерений (4), можно получить в реальном масштабе времени оптимальную оценку состояния $\hat{x}_i(t)$ того или иного параметра сети или соответствующего сетевого элемента ТКС. Данные оценки $\hat{x}_i(t)$ могут иметь самостоятельное значение. По ним лицо, принимающее решения, может прийти к соответствующему выводу о состоянии ТКС или принять адекватное решение [5; 10]. Кроме того, такие оценки играют важную роль в решении задач оптимального управления сетевыми элементами, всей сетью, соответствующими процессами на всех уровнях пятиэтажной модели, определяемой технологией TMN или TINA [9; 14].

В этом случае обычно используется теорема о разделении [12; 13; 15], в соответствии с которой для линейных моделей и гауссовские состояния само управление $u(t)$ может быть представлено в виде детерминированной функции

$$\vec{u}(t) = Y[\vec{x}_i(t)]. \qquad (8)$$

Имеется также ряд рекомендаций [7; 13; 18] о возможности использования данной теоремы и при иных, более общих ограничениях.

Однако рассмотренная процедура оценки (5) эффективна лишь при решении задач управления режимами и состояниями сетевых элементов, а также при резервировании сетевых ресурсов под нужды отдельных потоков. Для непосредственного решения задач управления соединениями она не подходит, прежде всего из-за того, что эти процессы носят явно нестационарный характер. С другой стороны, само управление соединениями представляет собой, по сути, действие, требующее того или иного изменения структуры сети — ее реструктуризации. Поэтому модель ТКС для отображения реальных процессов при реструктуризации должна, очевидно, быть сугубо нестационарной.

Оставив пока в стороне такие важные вопросы, как влияние задержек в контуре управления, влияние неточностей задания модели и др., обратимся к проблеме реструктуризации и попытаемся объединить в одной общей процедуре управления функциональные и структурные свойства ТКС. Как известно из теории систем, именно при поиске решения этой задачи исследователи сталкиваются с наиболее серьезными трудностями [2; 7; 9].

Реструктуризация телекоммуникационных систем

Будем считать, что ТКС функционирует исправно и все сетевые элементы (как и сеть в целом) отрабатывают свои функции при данном трафике. Очевидно, что такое функционирование представляется явно стационарной моделью. Необходимость реструктуризации появляется при возникновении тех или иных изменений (увеличение или уменьшение трафика, переполнение буферов и т. д.), требующих изменения структуры сети. Такое состояние носит название кусочно-стационарного [16; 17], а модель состояния (1), (2) требует дополнения аддитивным членом:

$$d\vec{x}(t)/dt = A(t)\vec{x}(t) + B(t)\vec{n}(t) + R(t)\vec{e}(t)\,, \qquad (9)$$

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

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

где τ — момент наступления нестационарности.

Нестационарность модели ТКС можно отобразить и иным способом [16; 17] — через измерение. При этом уравнение наблюдения имеет вид:

$$, \qquad (10)$$

где — аддитивная добавка, которая может быть обусловлена, например, наступлением начала нестационарности , изменением уровня невязки $\gamma(t) = H^T(t)x(t) - y(t)$. Матрица $D(t)$, также как и $R(t)$, может иметь регламентирующий смысл, а описывает наступление той или иной нестационарности. В частности, если нас интересует только факт наступления нестационарности, то в (10) можно даже положить

Возможно и более обобщенное представление состояния и структуры модели ТКС в виде тензора состояния согласно [10], что позволит еще больше расширить рамки обсуждаемой проблемы. Перспективным и конструктивным математическим аппаратом, дающим возможность обеспечить высокую точность такой дискретно-непрерывной, кусочно-стационарной модели, является теория сплайнов [10], с помощью которой можно рассматривать достаточно общие, разрывные нестационарные процессы.

Следуя методологии [11–13], общее уравнение оценки для кусочно-стационарной ситуации представим в виде процедуры Калмана — Бьюси:

$$d\hat{\vec{x}}(t)/dt = A(t)\hat{\vec{x}}(t) + R(t)e(t) + $$
$$+ K(t)\left[y(t) - D(t)dt - H^T(t)\hat{\vec{x}}(t)\right], \qquad (11)$$

где $K(t)$ — коэффициент усиления перед невязкой, $K(t) = V(t)H^T(t)N_\nu^{-1}(t)$.

Апостериорная дисперсия ошибки оценки

$$dV(t)/dt = A(t)V(t) + V(t)A(t) +$$
$$+ B(t)N_n B^T(t) - K(t)N_\nu K^T(t). \qquad (12)$$

Ограничимся наличием индикатора нестационарности лишь в уравнении наблюдения (10), что для практики как раз характерно, ибо уравнение состояния (9) строится на основе априорных данных, которых в распоряжении исследователя может и не оказаться.

В соответствии с методологией [11; 16; 18] имеем оценку состояния для i-й компоненты:

$$d\hat{x}(t)/dt = -\alpha_i \hat{x}_i(t) +$$
$$+ \sum_{i=1}^{n} \left[P\big(d_i(t)/\hat{x}_i(t), y(t)\big) \sum_{j=1}^{n} K_{ij} \frac{\partial F_j'(\hat{x}_t, t)}{\partial \hat{x}_j(t)} \right], \qquad (13)$$

где $P(d_i(t)/\hat{x}_i(t), y(t))$ — условная апостериорная вероятность состояния нестационарности $d_i(t)$,

$$P(d_i(t)/\hat{x}_i(t), y(t)) =$$
$$= \sum_{i=1}^{r} \left\{ \alpha_{ij} P(d_i(t)/\hat{x}_i(t), y(t)) + P(d_j(t)/\hat{x}_j(t), y(t)) \right\} +$$
$$+ \sum_{i=1}^{r} \left\{ P\big(d_i(t)/\hat{x}_i(t), y(t)\big) \right\} \left\{ F\big(\hat{x}_t, d_j(t)\big) - F\big(\hat{x}_t, t, d_i(t)\big) \right\} +$$
$$+ \frac{1}{2} \sum_{m=1}^{n} K_{ml} \frac{\partial^2}{\partial x_m \partial x_e} \left[F\big(\hat{x}_t, d_j(t)\big) - F\big(\hat{x}_t, t, d_i(t)\big) \right] \qquad (14)$$

при оценке состояния $x_i(t)$ и числе возможных состояний r; α_{ij} — элемент матрицы интенсивности переходов для вероятностей состояния

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

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

Каждая из структур уравнения состояния (9) и уравнения наблюдения (10) имеет соответствующие индексы σ: A_σ, B_σ, H_σ.

Между состоянием $x(t)$ и структурой σ_n может существовать статистическая или функциональная связь. При наличии только статистической связи говорят о системах с распределенными переходами, а в случае функциональной связи (смена структуры происходит в те моменты, когда процесс $x(t)$ достигает определенных границ) — о системах с сосредоточенными переходами. По отношению к обоим типам используют термин «системы с условной случайной структурой» [4; 12], тогда как альтернативные системы с независимыми между собой процессами $x(t)$ и σ_n называют системами с независимой структурой.

Совместное описание процессов $\vec{x}(t)$ и σ_n приводит к разрывным (в момент смены структуры) кусочно-непрерывным или непрерывнозначным процессам , состоящим из отрезков векторных марковских процессов одинаковой или различной размерности с заданными вероятностными характеристиками, представимых в виде (1). Дискретный процесс переключения σ_n может быть марковским или условно марковским [16; 17].

Можно предположить наличие априорной информации о распределении и условном распределении Тогда, с учетом плотности вероятности нахождения системы в рамках одной из структур , получим:

$$\begin{cases} \sum\limits_{\sigma=1}^{n_\sigma} \int\limits_{-\infty}^{\infty} f(\vec{x}_t,\sigma,t \,|\, \vec{x}'_t,\sigma',t')d\vec{x}=1; \\ \sum\limits_{\sigma=1}^{n_\sigma} \int\limits_{-\infty}^{\infty} f(\vec{x}_t,\sigma,t)d\vec{x}=1; \\ f(\vec{x}_t,\sigma,t)=P_\sigma(t)f_\sigma(x_t,t); \\ \sum\limits_{\sigma=1}^{n_\sigma} P_\sigma(t)=1. \end{cases} \tag{15}$$

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 $P_\sigma(t)$ характеризуются тем же принципом нормирования (15). Отметим, что апостериорные плотности распределений определяются по результатам наблюдений или измерений (3). Для указанного перечня априорных плотностей может быть записано уравнение Стратоновича [4; 16].

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

$$dP_\sigma^{(s)}(t)/dt=-P_\sigma^{(s)}(t)\sum_{\substack{r=1\\(r\neq\delta)}}^{n_\delta}\nu_{rs}(t)+\sum_{\substack{r=1\\(r\neq\delta)}}^{n_\delta}P_\sigma^{(s)}(t)\nu_{rs}(t)_t. \tag{16}$$

Уравнения (16) полностью характеризуют особенности динамики дискретно-непрерывных процессов для систем со случайной структурой. Однако более интересен и связан с менее громоздкими математическими преобразованиями (по сравнению с решением, например, уравнений Стратоновича) подход, использующий 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, при $t \ll \tau_{кор}$ (где $\tau_{кор}$ — интервал корреляции случайных процессов, происходящих в данной системе), так и после его наступления, при $t \gg \tau_{кор}$.

Для рассматриваемых в данной статье линейных моделей структур управляемых систем при гауссовских внешних воздействиях для $\hat{\vec{x}}_\sigma(t)$ и дифференциальные уравнения, обобщающие процедуры Калмана — Бьюси, принимают вид [16; 18]:

$$\begin{aligned} d\hat{\vec{x}}_\sigma(t)/dt &= A_\sigma(t)\hat{\vec{x}}_\sigma(t)+U_\sigma(t)\vec{u}(t)- \\ &-\sum_{\substack{r=1\\(r\neq\delta)}}^{n_\delta}\Bigg\{\nu^{(\sigma r)}(t)\frac{\hat{P}^{(r)}(t)}{\hat{P}^{(s)}(t)}(\hat{x}_\sigma-\hat{x}_r)+V^{(\sigma)}(t)H_\sigma^T(t)N_{\nu(\sigma)}^{-1}(\vec{y}(t)- \\ &-H_\sigma(t)\hat{\vec{x}}_\sigma(t)\Bigg\}, \end{aligned} \tag{17}$$

где — вектор управления в системе с коэффициентом $U_\sigma(t)$, зависящим от текущей оценки состояния и параметров самой системы.

Апостериорная дисперсия ошибки оценки для конкретного номера структуры σ_n приобретает вид [16; 17]:

$$\begin{aligned} V_\sigma(t)/dt &= A_\sigma(t)H_\sigma(t)+H_\sigma(t)A_\sigma^T(t)- \\ &-\sum_{\substack{r=1\\r\neq s}}^{n_\delta}\Bigg\{\nu^{(sr)}\frac{P_{(s)}(t)}{P_{(r)}(t)}\big[V_\sigma(t)-V_r(t)-(x_r(t)-x_\sigma(t))\big]\times \\ &\times\big[y_r(t)-x_\sigma(t)\big]\Bigg\}-V_{(\sigma)}(t)H_\sigma^T(t)N_{\nu(\sigma)}^{-1}H_\sigma(t)V_\sigma(t)+ \\ &+B_\sigma(t)N_nB_\sigma^T(t). \end{aligned} \tag{18}$$

Уравнение для оценки вероятности перехода:

$$\begin{aligned} d\hat{P}_\sigma(t)/dt &= -\hat{P}_\sigma(t)\sum_{\substack{r=1\\(r\neq s)}}^{n_\sigma}\nu_{(rs)}(t)+\sum_{\substack{r=1\\(r\neq s)}}^{n_\sigma}\hat{P}_\sigma(t)\nu_{(sr)}(t)- \\ &-\frac{1}{2}\hat{P}_\sigma(t)\left[\hat{\gamma}_\sigma(\vec{y}(t),t)-\sum_{\substack{r=1\\(r\neq\sigma)}}^{n_\sigma}\hat{P}_\sigma^{(r)}(\vec{y},t)\right], \end{aligned} \tag{19}$$

где $\hat{\gamma}_\sigma(\vec{y}(t),t)$ — взвешенная со спектральной плотностью мощности шума наблюдения невязка, входящая в уравнение Стратоновича [16; 17],

$$\hat{\gamma}_\sigma(\vec{y}(t),t)=\int_{-\infty}^{\infty}\gamma(\vec{x}_t,\vec{y}_t,\sigma,t)\hat{f}_\sigma(\vec{x}_t,t)dx. \tag{20}$$

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 $\hat{P}_\sigma(t)$ могут быть использованы далее для управления как функциональной, так и структурной компонентами системы.

* * *

▶ Изложенная теория совместных оценок вектора состояния и вероятности изменения структуры системы является, по нашему мнению, одним из немногих решений, в рамках которых одновременно отображаются как структурные, так и функциональные свойства конкретной ТКС. К функциональным свойствам ТКС могут быть отнесены текущие параметры трафика, загрузка ресурсов, размеры резервов, отклонение рабочих параметров сетевых элементов, к структурным — существующая конфигурация сети ТКС, которую следует реструктуризовать в соответствии с изменением состояния функциональных свойств. Из трех известных из теории систем методов обеспечения высокой устойчивости (энтропийный, гомеостатический и морфогенетический) в данном случае реализуется морфогенетический.

▶ Для реструктуризации в ТКС могут использоваться различные методы. При прямом методе исходя из полученных оценок функциональных характеристик в реальном времени осуществляется то или иное изменение структуры: так, при возникновении неисправностей создаются обходные пути, при изменении трафика перераспределяются наличные ресурсы, создаются необходимые маршруты, корректируется маршрутная карта. При косвенном методе создается адекватная математическая модель ТКС и непрерывно осуществляется ее идентификация по получаемым оценкам.

Сама модель ТКС и ее структура описываются тензором состояния, графоаналитическими методами, матрицами инциденций. При изменении состояния ТКС производится реструктуризация с применением тех или иных методов оптимизации (например, Форда — Фалкерсона, Беллмана — Форда).

▶ 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. При $n_\sigma > 2$ появляется 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.

▶ Важнейший параметр ТКС — время задержки в контуре управления. Как следует из [9; 11], процедура управления достигает цели, если его циклы $\Delta t_ц$ существенно меньше промежутка времени между возможными изменениями состояния сети, требующими реструктуризации.

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

Литература

1. Багатоканальний зв'язок та телекомунікаційні технології: Підручник для вузів / За ред. В. В. Поповського.— Харків: Сміт, 2003.— 512 с.

2. Гилмор Р. Прикладная теория катастроф: В 2 кн.— М.: Мир, 1984.— Кн. 1.— 304 с.; Кн. 2.— 284 с.

3. Давыдов Э. Г. Исследование операций.— М.: Высш. шк., 1989.— 380 с.

4. Козаков И. Е. Стохастические системы со случайной сменой структуры // Изв. АН СССР. Техн. кибернетика.— 1989.— № 1.— С. 58–78.

5. Назин А. В., Позняк А. С. Адаптивный выбор вариантов.— М.: Наука, 1986.— 288 с.

6. Обнаружение изменения свойств сигналов в динамических системах: Пер. с англ./ Под ред. М. Бассвиль.— М.: Мир, 1989.— 278 с.

7. Олійник В. Ф. Основи теорії систем зв'язку. Математичні моделі телекомунікаційних систем.— К.: Техніка, 2000.— 152 с.

8. Пашкин П. В. Устойчивость дискретных систем со случайной структурой при постоянно действующих возмущениях // Автоматика и телемеханика.— 1983.— № 6.— С. 142–152.

9. Поповский В. В., Григорьева Т. И. Перспективы теории и практики телекоммуникаций // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб.— 2002.— Вып. 128.— С. 4–10.

10. Поповский В. В., Лемешко А. В. Тензорный анализ в задачах системного исследования телекоммуникационных систем // Радиотехника : Всеукр. межвед. науч.-техн. сб.— 2002.— Вып. 125.— С. 156–165.

11. Родимов А. П., Поповский В. В. Статистическая теория поляризационно-временной обработки сигналов в линиях связи.— М.: Радио и связь, 1984.— 272 с.

12. Сейдж Э., Мелс Дж. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении.— М.: Связь, 1976.— 496 с.

А. О. ЛУНТОВСКИЙ

НОВЫЕ ПОКОЛЕНИЯ СИСТЕМ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ

Рассматриваются новые стандарты мобильных и беспроводных сетей. Проводится сравнительный анализ основных характеристик систем мобильной связи 3-го и 4-го поколений.

Анализ современного этапа развития и классификация поколений систем мобильной связи

Внедрение систем UMTS/IMT2000 мобильной связи 3-го поколения (3G), намеченное на 2000–2005 гг., осуществляется медленно. Имеются лишь отдельные примеры ввода в эксплуатацию 3G-систем. Так, в целях развития инфраструктуры 3G в Европе с 2002 г. предусмотрены тестовые испытания, а также осуществляется проект British Telecom на острове Мэн (2003 г.). Запланированный ввод указанных систем в США откладывается до 2005 г. в связи с успехами в развитии беспроводного Интернета на базе сетей IEEE 802.11/16. Только в Японии 3G-системы вводятся уже с 2000 г. усилиями NTT DoCoMo и других корпораций.

Интероперабельность 3G-систем обеспечивается на основе имеющейся инфраструктуры мобильных, стационарных и спутниковых сетей, включая проект ICO RTT (Radio Transmission Technology), и на базе интеграции с беспроводными сетями в рамках сотовых архитектур доступа HSA (Hot Spot Architectures). Данная тенденция повышает конкурентоспособность проекта UMTS/IMT2000 в целом. Архитектура HSA и 3G-системы совместно обеспечивают высокое качество обслуживания и быстрый беспроводный доступ в Интернет для большинства популярных сегодня мобильных приложений.

Ближайшее будущее мобильной связи (2007–2010 гг.) связано с системами 4-го поколения (4G).

Классификация поколений систем мобильной связи, существующих в настоящее время, и их основные характеристики приведены в табл. 1.

Безусловно, шансы систем мобильной связи новых поколений на успешное продвижение на рынке зависят прежде всего от коренного улучшения их основных характеристик:

✧ быстродействия (требуется повысить, как правило, на порядок);

✧ интеграции с имеющейся инфраструктурой поколений 2–3G;

✧ снижения требуемой мощности передачи и уменьшения интерференции;

✧ эффективности канальных протоколов (OFDM, CDMA Rel. C, D);

✧ интероперабельности сотовых архитектур (Hotspots);

✧ безопасности данных (WEP — Wired Equivalent Privacy, WiFi — Wireless Fidelity, WPA — WiFi Protected Access, 802.11i, IPsec, VPN);

✧ эффективности протоколов Интернета (IPv6, RSVP), возможности скоростного доступа с помощью мобильных устройств.