МОРФОЛОГИЧЕСКАЯ И ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛИ СЕТИ РАДИОСВЯЗИ

А.А. Моисеев, А.В. Чуев, А.А. Киселев

ПАО «Информационные телекоммуникационные технологии»,

Санкт-Петербург, Российская Федерация

Представлены результаты разработки морфологической и функциональной модели сети радиосвязи. Предложенный подход позволяет с единых позиций описать стационарный и динамический режимы функционирования подсистем и уровней сети радиосвязи с представлением ее основных характеристик, учесть воздействие различных дестабилизирующих факторов.

Ключевые слова: сеть радиосвязи, морфологическая модель, функциональная модель, топологическое представление, агрегативная система.

MORPHOLOGICAL AND FUNCTIONAL RADIO NETWORK MODEL

A.A. Moiseev, A.V. Chuev, A.A. Kiselev

PJSC "Information Telecommunication Technologies",

Saint Petersburg, Russian Federation

The results of the development of morphological and functional radio network model are presented. The proposed approach allows describing the stationary and dynamic mode of operation of subsystems and levels of radio network, with a presentation of its main characteristics; considering the effects of various destabilizing factors.

Keywords: radio networks, morphological model, functional model, topological presentation, aggregative system.

Методологические основы исследования различных сложных систем, к числу которых относится и сеть радиосвязи, предполагают прежде всего разработку их морфологических и функциональных моделей [1–3].

Морфологическое описание сети радиосвязи, характеризующее ее структуру, предусматривает рассмотрение указанной сети с точки зрения состава ее отдельных элементов и связей между ними. При этом морфологическое описание сети радиосвязи проведем с помощью ее топологического представления, формализуемого на основе теории графов [4]. Учитывая, что функционирование сети радиосвязи осуществляется в условиях воздействия различных дестабилизирующих факторов, ее морфологическая модель должна отражать взаимодействие сети радиосвязи и внешних воздействий на структурном уровне. С этих позиций и рассмотрим морфологическую модель сети радиосвязи.

Пусть сеть связи, состоящая из S_c радиостанций, соединенных радиоперехватами S_d , имеет в своем составе подсистему управления S_y , подсистему обеспечения S_o , резерв сил и средств S_p , функционирует в условиях воздействия различных дестабилизирующих факторов D . В качестве математической модели сети радиосвязи на уровне ее морфологического описания используем неориентированный взвешенный граф $G(A, B)$, множество A которого с мощностью $|A = S_c + S_y + S_o + S_p + D|$ ($A = \{a_i\}$, $i \in I = \{1, 2, \dots, (S_c + S_y + S_o + S_p + D)\}$) соответствует радиостанциям, элементам подсистем управления, обеспечения, элементам резерва и воздействующим на них дестабилизиру-

щим факторам, а отображение B множества A в A ($Ba_i \in A, i \in I = \{1, 2, \dots, S_n + D\}$) – линиям радиосвязи и воздействиям на них дестабилизирующих факторов.

Представим граф $G(A, B)$ в виде двух частичных графов $G'(A, V)$ и $G''(L, W)$ (рис. 1). При этом $G'(A, V) \subset G(A, B)$, $G''(L, W) \subset G(A, B)$, $\forall a_i \in A, i \in I = \overline{1, (S_c + S_y + S_0 + S_p + D)}$, где множество L с мощностью $|L| = S_c + S_y + S_0 + S_p$ ($L = \overline{1, (S_c + S_y + S_0 + S_p)}$) составляют радиостанции, элементы подсистем управления, обеспечения, элементы резерва, а отображение W множества L в L ($Wl_i \in W, i \in I = \overline{1, S_n}$) – линии радиосвязи, $L \subset A$, $V \cup W = B$.

Рис. 1. Морфологическое представление сети радиосвязи в условиях воздействия дестабилизирующих факторов (вариант)

Сопоставим каждой вершине $a_i \in A$, $A = \{a_i | i = \overline{1, (S_c + S_y + S_0 + S_p + D)}\}$ графа $G(A, B)$ вес Θ_i из множества весов $\Theta = \{\Theta_i | i = \overline{1, (S_c + S_y + S_0 + S_p + D)}\}$. В результате получим множество взвешенных вершин $\{a_i, \Theta_i | i = \overline{1, (S_c + S_y + S_0 + S_p + D)}\}$. Каждому элементу множества $B = \{b_i\}$, $i = \overline{1, m}$, где m – общее количество ребер графа $G(A, B)$, поставим в соответствие вес ω_i из множества весов $\Omega = \{\omega_i | i = \overline{1, m}\}$. В результате получим множество

взвешенных ребер $\{b_i, \omega_i | i = \overline{1, m}\}$. Данные множества взвешенных узлов и ребер графа $G(A, B)$ определяют в совокупности характеристики сети радиосвязи в виде функций $G(\{A, \Theta\}, \{B, \Omega\})$, определенных на узлах и ребрах графа. При этом веса вершин зададим матрицей:

$$\Theta(G) = \left\| \Theta_1 \ \Theta_2 \ \dots \ \Theta_{S_c+S_y+S_0+S_p} \ \dots \ \Theta_{S_c+S_y+S_0+S_p+D} \right\|^T, \quad (1)$$

а веса ребер – квадратной матрицы порядка $(S_n + D)$:

$$\Omega(G) = \left\| \omega_{ij} \right\| \ (\omega_{ii} = 0 ; i, j = \overline{1, S_n + D}). \quad (2)$$

Элементы $\Theta_1, \dots, \Theta_{S_c+S_y+S_0+S_p}$ матрицы (1) соответствуют характеристикам радиостанций, элементов подсистем управления, обеспечения, элементов резерва, а элементы $\Theta_{S_c+S_y+S_0+S_p+1}, \dots, \Theta_{S_c+S_y+S_0+S_p+D}$ – характеристикам дестабилизирующих воздействий. Аналогичным образом представим элементы матрицы (2), характеризующие радиолинию связи (элементы ω_{ij} , $i, j = \overline{1, S_n}$), и воздействующие на них дестабилизирующие факторы (элементы ω_{ij} , $i = \overline{1, S_n}$; $j = S_n + 1, \dots, S_n + D$ и ω_{ij} , $i = \overline{S_n + 1, S_n + D}$; $j = \overline{1, S_n}$). При этом значения ω_{ij} ($i = \overline{1, S_n}$; $j = \overline{S_n + 1, S_n + D}$) отражают характеристики разведзащищенности радиолинии связи, а элементы ω_{ij} ($i = \overline{S_n + 1, S_n + D}$, $j = \overline{1, S_n}$) характеристики дестабилизирующих воздействий.

Основными характеристиками сети радиосвязи, определяемыми матрицами типа (1) и (2) графа $G(A, B)$, являются:

– матрица координат местоположения радиостанций, элементов подсистем управления, обеспечения, элементов резерва и источников дестабилизирующих воздействий:

$$K(G) = \left\| k_1 \ k_2 \ \dots \ k_{S_c+S_y+S_0+S_p} \ \dots \ k_{S_c+S_y+S_0+S_p+D} \right\|^T; \quad (3)$$

– матрица ресурсов радиостанций, элементов подсистем управления, обеспечения, элементов резерва и источников дестабилизирующих воздействий:

$$K(G) = \left\| k_1 \ k_2 \ \dots \ k_{S_c+S_y+S_0+S_p} \ \dots \ k_{S_c+S_y+S_0+S_p+D} \right\|^T; \quad (4)$$

– матрица взаимного удаления между радиостанциями, элементами подсистем управления, обеспечения, элементами резерва и между радиостанциями, элементами подсистем управления, обеспечения, элементами резерва и источниками дестабилизирующих воздействий:

$$F(G) = \left\| f_{ij} \right\| \ (f_{ij} = 0 ; j = \overline{1, S_c + S_y + S_0 + S_p + D}); \quad (5)$$

– матрица связности узлов графа;

$$O(G) = \left\| o_{ij} \right\| \ (o_{ij} = 0 ; i, j = \overline{1, S_c + S_y + S_0 + S_p + D}); \quad (6)$$

– матрица вероятностей связи с требуемой достоверностью

$$Q(G) = \left\| q_{ij}^{(\xi)} \right\| \ (i, j = \overline{1, S_c + S_y + S_0 + S_p + D} ; \xi = \overline{1, D}). \quad (7)$$

Аналогично определяются матрицы, характеризующие параметры подграфов $G'(A, V)$ и $G''(L, W)$. Так, одной из важнейших характеристик подграфа $G''(L, W)$ является матрица пропускных способностей между радиостанциями:

$$H(G) = \left\| \eta_{ij} \right\| \ (i, j = \overline{1, S_c}). \quad (8)$$

Представленная морфологическая модель сети радиосвязи в полном объеме описывает ее структуру и взаимные связи ее элементов, при функционировании в условиях слож-

ной помеховой обстановки, что позволяет производить на этой основе структурный анализ и синтез конкретной сети радиосвязи.

Исследование сети радиосвязи, как сложной иерархической системы, предполагает построение не только ее морфологической, но и функциональной модели, позволяющей проанализировать процесс ее поведения при воздействии различных дестабилизирующих факторов.

При создании функциональной модели сети радиосвязи важное место отводится выбору математического аппарата ее построения, являющейся связующим звеном от концептуального к формальному описанию процесса функционирования сети радиосвязи в условиях сложной помеховой обстановки.

Рассматривая сети радиосвязи с позиций эталонной модели взаимодействия открытых систем (ЭМВОС) [5] как сложную иерархическую систему, заметим, что в настоящее время отсутствует единое математическое описание процесса функционирования сети радиосвязи на различных уровнях иерархии (от физического до транспортного).

Так, например, при описании процессов изменения уровней сигналов и помех в линиях радиосвязи на физическом уровне в качестве основного математического аппарата используются стохастические дифференциальные и конечно-разностные уравнения. При описании рассматриваемых на канальном уровне процессов вхождения в связь и восстановления связи в линиях радиосвязи в качестве математического аппарата широко используются дискретно-стохастические модели в виде вероятностных автоматов. На сетевом уровне при описании процессов передачи сообщений в качестве типовых математических схем используются непрерывно-стохастические модели систем массового обслуживания (СМО), а также стохастические разностные уравнения динамики очередей [6].

Вместе с тем отсутствие единого формального описания элементов иерархической сложной системы, какой является сеть радиосвязи, существенно затрудняет создание общих методов ее исследования, а также определение единого подхода к анализу и синтезу сети радиосвязи. Кроме того, математическая модель сети радиосвязи должна позволять сочетать как аналитические, так и имитационные методы моделирования. Указанные обстоятельства должны найти отражение при выборе математического аппарата описания процесса функционирования сети радиосвязи. Формирование унифицированного математического аппарата, позволяющего описывать все уровни и элементы сети радиосвязи с единых позиций, является одной из основных проблем при построении ее функциональной модели.

В настоящее время наиболее универсальным подходом к формальному представлению сложных систем, элементы которых описываются различным математическим аппаратом, является подход, основанный на понятии агрегативной системы, представляющей формальную схему общего вида [7; 8]. При этом агрегативные системы позволяют с единых позиций описать процессы функционирования объектов (систем) с различной сложной структурой. При этом сложная система декомпозируется на конечное число подсистем с сохранением всех связей, обеспечивающих взаимодействие этих подсистем, а процесс декомпозиции продолжается до тех пор, пока не образуются подсистемы, удобные для математического описания с необходимой степенью их детализации. В результате такой декомпозиции исследуемый объект представляется в виде многоуровневой системы взаимосвязанных элементов.

Важным достоинством агрегативного подхода при его применении к построению функциональной модели сети радиосвязи является возможность использования на различных уровнях иерархии сочетания методов аналитического и имитационного моделирования в рамках единой обобщенной функциональной модели сети радиосвязи. При этом в качестве элементов агрегативной схемы выступают агрегаты A_i , взаимодействующие между собой по определенным правилам, определяемым операторами сопряжения агрегатов R .

В соответствии с этим подходом представим функциональную модель сети радиосвязи обобщенной агрегативной схемой (рис. 2). На рисунке модель сети связи представлена в виде совокупности агрегатов, отражающих ее уровни с позиций ЭМВОС.

Агрегаты $A_{\Phi(2)}$ являются элементами физического уровня сети радиосвязи и моделируют процессы приема (передачи) первичных электрических сигналов через среду распространения радиоволн при воздействии различных дестабилизирующих факторов. Агрегаты $A_{K(2)}$ отражают второй (канальный) уровень сети радиосвязи и моделируют процессы образования канала между корреспондентами. Агрегаты $A_{Ц(2)}$ и $A_{C(2)}$ моделируют процессы, протекающие на сетевом уровне сети радиосвязи. Агрегаты $A_{T(2)}$ обеспечивают моделирование процессов транспортного уровня сети связи.

Рис. 2. Обобщенная функциональная модель сети радиосвязи в виде агрегативной схемы

Воздействие на сеть связи внешней среды, представляющей совокупность подсистем системы внешних воздействий (случайные, преднамеренные помехи, различные ионосферные возмущения и изменения и т.п.), моделируется с помощью агрегата внешних воздействий A_{BB} , оказывающего влияние на процесс функционирования сети радиосвязи через агрегат физического уровня $A_{\Phi 1}$. Агрегаты $A_{y(2)}$ моделируют процессы управления сетью радиосвязи на различных уровнях иерархии.

В свою очередь, каждый из представленных агрегатов также является сложной системой и рассматривается как совокупность агрегатов более низкого уровня. Так, например, агрегат $A_{Ц 1}$ представлен совокупностью агрегатов, описывающих процессы обслуживания сообщений на радиостанциях и их передачу по каналу радиосвязи (рис. 3). При этом агрегат $A_0^{(1)}$ моделирует процессы формирования очереди поступающих на радиостанции заявок, агрегаты $A_1^{(1)}$ – процессы обслуживания заявок на радиостанциях, а агрегаты $A_{ПЕР}^{(1)}$ – процессы передачи сообщений по каналу. Агрегат $A_y^{(1)}$ моделирует процессы управления радиостанцией.

Рис. 3. Обобщенная функциональная модель радиостанции в виде агрегативной схемы

Используя предложенный в [8] агрегативный подход к построению функциональной модели сети радиосвязи и ее элементов, определим каждый агрегат множествами T , U , Y , X , Z и случайными операторами переходов κ и выходов ζ , где $T = (t_i)$ – множество рассматриваемых моментов времени; $U = (u_i)$ – управляющее множество; $Y = (y_i)$ – выходное множество; $X = (x_i)$ – входное множество; $Z = (z_i)$ – множество состояний.

Для описания динамического процесса функционирования сети радиосвязи, модель которой представлена агрегативной системой, введем пространство параметров сети радиосвязи $B = (\beta_i)$. При этом переход агрегата из состояния в состояние определяется его параметрами $\beta(t) \in B$, а также выходными сигналами $x(t) \in X$ и сигналами управления $u(t) \in U$. Случайный оператор κ реализует динамику переходов агрегативной системы из одного состояния в другое, а случайный оператор ζ – динамику выходных сигналов.

Пусть $\Omega = (\omega_i)$ – пространство элементарных случайных событий с вероятностной мерой $p(\omega_i)$, где ω_i – элементарное случайное событие. Тогда динамика переходов агрегативной системы из состояния в состояние определяется зависимостью:

$$Z(t) = \kappa \left\{ t_0, t, Z(t_0, \omega_0), B(t_0, \omega_1), (t, x_L)_{t_0}^t, \omega_2, (t, u_F)_{t_0}^t, \omega_3 \right\}, \quad (9)$$

где $Z(t_0, \omega_0)$ – начальное состояние системы; $B(t_0, \omega_1)$ – параметры системы в момент t_0 ; $(t, x_L)_{t_0}^t$ – возможный участок входного процесса $X = L(t)$, соответствующий интервалу $[t_0, t]$; $(t, u_F)_{t_0}^t$ – участок процесса управления $U = \zeta(t)$, соответствующий интервалу $[t_0, t]$; $\omega_0, \dots, \omega_3$ – элементарные случайные события, выбираемые из Ω в соответствии с вероятностными мерами $p(\omega_0), \dots, p(\omega_3)$. Это означает, что случайный оператор κ переводит прямое произведение множеств $(U \times B \times X)$ в множество Z , зависящее от $\omega \in \Omega$, а каждому $\omega \in \Omega$ ставится в соответствие некоторый конкретный оператор κ , реализующий отображение $(U \times B \times X) \rightarrow Z$. При этом оператор κ удовлетворяет следующим условиям [8]:

1. $\forall t_0 \in T, Z(t_0, \omega_0) \in Z, B(t_0, \omega_1) \in B, (t, x_L)_T \in \{(t, x_L)_T\}, (t, u_F)_T \in \{(t, u_F)_T\}$, (где $\{(t, x_L)_T\}$ и $\{(t, u_F)_T\}$ – множества возможных участков входного процесса и процесса управления соответственно) при $t = t_0$ справедливо равенство:

$$\kappa \left\{ t_0, t_0, Z(t_0, \omega_0), B(t_0, \omega_1), (t, x_L)_{t_0}^{t_0}, \omega_2, (t, u_F)_{t_0}^{t_0}, \omega_3 \right\} = Z(t_0). \quad (10)$$

2. $\forall (t, x_{L1})_T, (t, x_{L2})_T, (t, u_{F1})_T, (t, u_{F2})_T, : (t, x_{L1}]_{t_0}^t = (t, x_{L2}]_{t_0}^t, (t, x_{F1}]_{t_0}^t = (t, x_{F2}]_{t_0}^t$ при равенстве $\omega_0, \dots, \omega_3$ процессов $X_1(t)$ и $X_2(t)$, $U_1(t)$ и $U_2(t)$ выполняется условие:

$$\begin{aligned} \kappa \{t_0, t, Z(t_0, \omega_0), B(t_0, \omega_1), (t, x_{L1}]_{t_0}^t, \omega_2, (t, u_{F1}]_{t_0}^t, \omega_3\} = \\ = \kappa \{t_0, t, Z(t_0, \omega_0), B(t_0, \omega_1), (t, x_{L2}]_{t_0}^t, \omega_2, (t, u_{F2}]_{t_0}^t, \omega_3\}. \end{aligned} \quad (11)$$

3. $\forall t_0, t_1, t_2 \in T : t_0 \leq t_1 \leq t_2$ справедливо равенство:

$$\begin{aligned} \kappa \{t_0, t_2, Z(t_0, \omega_0), B(t_0, \omega_1), (t, x_L]_{t_0}^{t_2}, \omega_2, (t, u_F]_{t_0}^{t_2}, \omega_3\} = \\ = \kappa \{t_1, t_2, Z(t_1, \omega_0), B(t_1, \omega_1), (t, x_L]_{t_1}^{t_2}, \omega_2, (t, u_F]_{t_1}^{t_2}, \omega_3\}, \end{aligned} \quad (12)$$

где $(t, x_L]_{t_0}^{t_2}$ – результат объединения участков $(t, x_L]_{t_0}^{t_1}$ и $(t, x_L]_{t_1}^{t_2}$.

С учетом того, что

$$\kappa \{t_0, t_1, Z(t_0, \omega_0), B(t_0, \omega_1), (t, x_L]_{t_0}^{t_1}, \omega_2, (t, u_F]_{t_0}^{t_1}, \omega_3\} = Z(t_1), \quad (13)$$

равенство (12) примет вид:

$$\begin{aligned} \kappa \{t_0, t_2, Z(t_0, \omega_0), B(t_0, \omega_1), (t, x_L]_{t_0}^{t_2}, \omega_2, (t, u_F]_{t_0}^{t_2}, \omega_3\} = \\ = \kappa \{t_1, t_2, \kappa \{t_0, t_1, Z(t_0, \omega_0), B(t_0, \omega_1), (t, x_L]_{t_0}^{t_1}, \omega_2, (t, u_F]_{t_0}^{t_1}, \omega_3\}, \\ B(t_1, \omega_1), (t, x_L]_{t_1}^{t_2}, \omega_2, (t, u_F]_{t_1}^{t_2}, \omega_3\} \}. \end{aligned} \quad (14)$$

При этом выражения (13) и (14) позволяют представить процессы $X(t)$, $U(t)$, $t \in [t_0, t_2]$ совокупностью процессов $X(t')$, $U(t')$ и $X(t'')$, $U(t'')$, $t' \in [t_0, t_1]$, $t'' \in [t_1, t_2]$. Это дает возможность анализировать функционирование сети радиосвязи отдельно на участках $t \in [t_0, t_1]$ и $t \in [t_1, t_2]$ с их последующим объединением, что существенно упрощает описание сложных динамических процессов, протекающих при моделировании сети радиосвязи.

Случайный оператор выходов агрегативной системы ζ представим в виде:

$$Y(t) = \zeta \{t_0, t_1, Z(t_0, \omega_0), B(t_0, \omega_1), (t, x_L]_{t_0}^{t_1}, \omega_2, (t, u_F]_{t_0}^{t_1}, \omega_3\}. \quad (15)$$

При этом области операторов ζ и κ совпадают:

$$\zeta : \{(t_0, t)\} \times Z \times B \times \{t, x_L\}_T \times \{t, u_F\}_T \rightarrow Y, \quad (16)$$

$$\kappa : \{(t_0, t)\} \times Z \times B \times \{t, x_L\}_T \times \{t, u_F\}_T \rightarrow Z, \quad (17)$$

а области их значений различны.

Так, если отображение (17), реализуемое оператором переходов κ , имеет место при каждом значении $t > t_0$, $t \in T$ (т.е. сеть радиосвязи в каждый момент времени находится в одном из возможных состояний), то отображение (16), реализуемое оператором выходов ζ , может иметь место не в каждый момент времени.

В прямом произведении множеств $Y \times Z$ выберем произвольную точку (y, z) . Так как операторы ζ и κ имеют одинаковые области определения $\{(t_0, t)\} \times Z \times B \times \{t, x_L\}_T \times \{t, u_F\}_T$, введем оператор H^* .

$$(y, z, t) = H^* \{t_0, t_1, Z(t_0, \omega_0), B(t_0, \omega_1), (t, x_L]_{t_0}^{t_1}, \omega_2, (t, u_F]_{t_0}^{t_1}, \omega_3\}, \quad (18)$$

реализуемый отображением:

$$\{(t_0, t)\} \times Z \times B \times \{t, x_L\}_T \times \{t, u_F\}_T \rightarrow Y \times Z, \quad (19)$$

и интерпретируемый как оператор переходов с расширенным множеством состояний $Y \times Z$. При этом оператор H^* является оператором функционирования сети радиосвязи и описывает динамику изменения состояний сети при представлении ее функциональной модели агрегативной системой. Процесс функционирования сети радиосвязи в условиях сложной помеховой обстановки при воздействии всего комплекса дестабилизирующих факторов представляется в этом случае отображением $(y, z) = H^*(t)$, реализуемым оператором H^* при фиксированных значениях $t_0, Z(t_0), B(t_0), (t, x_L)_T, (t, u_F)_T; (y, z) \in Y \times Z$.

Предложенная функциональная модель сети радиосвязи в виде агрегативной системы позволяет с единых позиций описать динамику функционирования подсистем и уровней сети радиосвязи, использовать сочетание методов аналитического и имитационного моделирования при анализе и синтезе сети радиосвязи, анализировать процесс функционирования сети радиосвязи в нестационарных условиях. Представленная модель может быть положена в основу для разработки математических моделей сети радиосвязи на различных иерархических уровнях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коннов А. Л., Ушаков Ю. А. Методы расчета показателей производительности сетей ЭВМ с неоднородным трафиком: монография. Оренбург: ОГУ, 2013. 139 с.
2. Губко М. В. Математические модели оптимизации иерархических структур. М.: ЛЕНАД, 2006. 264 с.
3. Петухов Г. Б., Якунин В. И. Методологические основы внешнего проектирования целенаправленных процессов и целеустремленных систем. М.: АСТ, 2006. 504 с.
4. Берзин Е. А. Элементарные решения неэлементарных задач на графах / под ред. А. Н. Кудинова. Тверь: ТГТУ, 2005. 136 с.
5. ГОСТ Р ИСО/МЭК 7498-99. Взаимосвязь открытых систем. Базовая эталонная модель.
6. Мышкис А. Д. Элементы теории математических моделей. М.: КомКнига, 2007. 192 с.
7. Теоретические основы системного анализа / В. И. Новосельцев [и др.]; под ред. В. И. Новосельцева. М.: Майор, 2006. 592 с.
8. Колесников А. А. Последовательная оптимизация нелинейных агрегированных систем управления. М.: Энергоатомиздат, 1987. 160 с.