

АЛГОРИТМИЗАЦИЯ И ПРОГРАММИРОВАНИЕ

УДК 004.031.43–44.962

А. С. Кобайло

Белорусский государственный технологический университет

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА СИНТЕЗА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ С ТРЕБУЕМЫМИ СВОЙСТВАМИ НА ПРИМЕРАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ИМИТАЦИИ РАДИОСИГНАЛОВ

Рассмотрены примеры использования метода синтеза математических моделей с требуемыми свойствами при проектировании специализированных вычислительных устройств для имитации радиосигналов. Метод синтеза математических моделей с требуемыми свойствами основан на логико-комбинаторном подходе к синтезу сложных систем, базируется на аппарате характеристических логических функций и предполагает на первом этапе формирование множества векторов параметров математических моделей с заданными характеристиками (требуемыми свойствами), на втором – преобразование графа алгоритма реализации обобщенной исходной математической модели процесса или системы, подлежащей моделированию, с целью формирования графа усеченной модели того же процесса (системы), удовлетворяющей заданным свойствам.

Для иллюстрации возможностей применения данного метода выбрана обобщенная математическая модель радиосигналов по совокупности объектов (целей) и периодов обращения. Для характеристик моделируемого процесса определены классификационные признаки и соответствующие им свойства модели; для каждого из свойств сформированы характеристические логические функции. Синтезирован ряд имитаторов радиосигналов (специализированных вычислительных устройств) для автоматизированных систем испытаний радиотехнических систем. Синтезированные устройства по сравнению с использованием обобщенной математической модели обладают следующими свойствами: простота, низкие себестоимость, энергопотребление, вес, габариты, высокая надежность при обеспечении требуемых свойств моделируемых процессов и эффективных режимов испытаний радиооборудования.

Ключевые слова: синтез, характеристическая логическая функция, алгоритм, граф, булевы переменные, математическая модель, метод.

A. S. Kobaylo

Belarusian State Technological University

THE APPLICATION OF SYNTHETIC MATHEMATICAL MODELS WITH THE DESIRED PROPERTIES ON THE EXAMPLE OF SPECIALIZED COMPUTING DEVICES DESIGN TO SIMULATE RADIO SIGNALS

The examples of the use of the method of synthesis of mathematical models with the required properties for the design of specialized computing devices to simulate the radio signals are investigated. The method of synthesis of mathematical models with the required properties is based on the unit of the characteristic logic functions and assumes the first stage of forming a plurality of vectors of parameters of mathematical models with specified characteristics (desired properties), the second – the transformation of the graph algorithm implementation of the generalized original mathematical model of a process or system to be modeled, in order to create a graph of a truncated model of the same process (system) that satisfies the given properties.

To illustrate the possibilities of this method the generalized mathematical model of radio signals by a set of objects (targets) and the treatment periods is chosen. For the characteristics of the modeled process defined the classification attributes and the corresponding properties of the model; for each of the characteristic properties of the formed logic functions. A series of radio simulators (special purpose computing devices) for automated test systems radio systems is synthesized. Synthesized devices compared with using a generalized mathematical model has the following properties: simplicity, low cost, power consumption, weight, size, high reliability, while providing the desired properties of modeled processes and efficient radio test modes.

Key words: synthesis, the characteristic logic function, algorithm, graph, Boolean variables, the mathematical model, method.

Введение. Метод синтеза математических моделей с требуемыми свойствами (ММТС) предназначен для формирования на основе обобщенной (базовой) математической модели физического процесса или системы (технической, социальной, экономической и т. д.) множества усеченных моделей, обладающих некоторым набором свойств, обеспечивающих достаточную информативность для достижения цели исследований [1].

Рассмотрим возможность и эффективность использования данного метода на примере проектирования специализированных вычислительных устройств (СВУ) для моделирования радиосигналов. СВУ указанного класса применяются в качестве структурных компонентов в составе тренажеров радиооператоров, а также в составе автоматизированных вычислительных систем испытаний радиотехнических (в частности, радиолокационных) систем (РТС) для формирования внешних воздействий на исследуемую РТС с целью проверки ее на соответствие заданным эксплуатационным характеристикам и параметрам качества.

Основная часть. В качестве исходной математической модели выберем обобщенную модель радиосигналов по совокупности объектов наблюдения и периодов обращения, приведенную к виду, удобному для представления алгоритма вычислений в соответствии с данной моделью и, следовательно, алгоритма вычислительного процесса, реализуемого проектируемым СВУ, в виде его графа – графа вычислительного алгоритма (ГВА), используя специальные функции для временных преобразований параметров сигналов [2].

В соответствии с методом синтеза ММТС для формирования характеристических логических функций (ХЛФ), связывающих булевы переменные, отождествленные с физическими параметрами модели, выделим следующие основные классификационные признаки: P_1 – частотный диапазон сигналов; P_2 – область существования параметров сигналов; P_3 – тип сигналов; P_4 – информативная характеристика параметров; P_5 – метод описания траектории движения объекта; P_6 – форма импульсов. К ограниченному (количественным) классификационным признакам отнесем: $P_0(1)$ – количество объектов на одном направлении поиска; $P_0(2)$ – максимальное количество пачек импульсов на одном цикле; $P_0(3)$ – характеристика радиальной протяженности объекта.

Каждый основной признак P_i ($i = 1, \dots, 6$) определяется вектором $\vec{P}_{(i)}$ свойств с координатами: p_1^1, p_1^2 – сигналы на видео и высокой частотах соответственно; $p_2^1, p_2^2, p_2^3, p_2^4$ – временная, частотно-амплитудная, амплитудно-

временная и амплитудно-частотно-временная области соответственно; p_3^1, p_3^2 – детерминированные и случайные сигналы соответственно; p_4^1 – координаты объекта; p_4^2 – физические параметры; p_4^3 – координаты и физические параметры; p_5^1 – описание движения объекта сменой координат; p_5^2 – эффект Доплера; p_5^3 – эффект Доплера при изменяющихся координатах; p_5^4 – изменение мощности; p_5^5 – изменение мощности и координат; p_5^6 – эффект Доплера при изменяющихся координатах и мощности; p_6^1, p_6^2 – соответственно прямоугольная и непрямоугольная форма импульсов.

В качестве ограничительных признаков используются: $p_0(1)^1$ – не более одного объекта на одном направлении; $p_0(1)^2$ – до двух объектов на одном направлении; $p_0(1)^3$ – более двух объектов на одном направлении; $p_0(2)^1$ – пачка импульсов; $p_0(2)^2$ – N пачек импульсов на цикле; $p_0(3)^1, p_0(3)^2$ – точечные и протяженные объекты соответственно.

В табл. 1 приведены характеристические логические функции свойств для основных классификационных признаков, в табл. 2 – ограничения, соответствующие рассмотренным ограничительным свойствам.

Переменные в табл. 1 представляют собой булевы переменные, отождествленные с соответствующими параметрами математической модели; $F_{3P}(\cdot), F_3(\cdot)$ в табл. 2 – специальные функции.

Поставим задачу синтеза СВУ для моделирования радиосигналов от нескольких точечных объектов на видеочастоте с основными свойствами:

$$\vec{P} = (p_1^1, p_2^1, p_3^1, p_4^1, p_5^1, p_6^2) \quad (1)$$

и вектором ограничительных свойств:

$$\vec{P}_0 = (p_0(1)^2, p_0(2)^2, p_0(3)^2) \quad (2)$$

или при $J_k = 2$.

Представим протяженный объект совокупностью его отражающих точек, сигналы от каждой из которых являются одиночными импульсами, в результате получим:

$$K_p = 1. \quad (3)$$

В качестве исходной модели будем использовать базовую модель радиосигналов из [2], преобразованную с учетом (2) и (3). Сформировав согласно методике синтеза ММТС множество векторов параметров модели, удовлетворяющих свойствам (1), и выбрав один из полученных векторов, преобразуем граф реализации исходной модели согласно методике, изложенной в [1], в результате получим искомую модель радиосигналов:

$$\begin{aligned}
 Y(t - \tau_3) = & \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^{N_m} \left\{ F_3 \left[\chi_p(F_{cp}(\alpha^{(m,n)}, \right. \right. \\
 & \left. \left. \alpha_a(t_0, x(t)), T_{пов}) \cdot x(t), \chi_3(\tau_3(1)^{(m,n)}) \right] + \right. \\
 & \left. + F_3 \left[\chi_p(F_{cp}(\alpha^{(m,n)}, \alpha_a(t_0, x(t)), T_{пов}) \times \right. \right. \\
 & \left. \left. \times x(t), \chi_3(\tau_3(1)^{(m,n)}) \right] \right\}. \quad (4)
 \end{aligned}$$

$$\text{Здесь } F_{cp}(\varphi_1, \varphi_2) = \begin{cases} 1, & \text{если } \varphi_1 = \varphi_2; \\ 0, & \text{если } \varphi_1 \neq \varphi_2; \end{cases}$$

χ_p, χ_3 – функции временных преобразований.
 Специализированное вычислительное устройство, построенное на основе модели (4), отличается следующими показателями: широкие функциональные возможности и диапазон исследований, обеспечиваемый данным СВУ.

Таблица 1

ХЛФ основных свойств радиосигналов

Классификационный признак	Свойство	Характеристические логические функции
P_1	P_1^1	$\tau_n^B \& \omega_0^B \& \Phi^B$
	P_1^2	$\omega_0^B \& (\psi^B \vee \Phi^B \vee \Delta\omega^B) \& \tau_n^B$
P_2	P_2^1	$\tau_n^B \& (\tau_3^B \vee (\tau_3' \& \tau_3) \vee K_d^B \vee \tau_n^B \vee \Delta T^B \vee t_n^B) \& \omega_0^B \& \Delta\omega^B \& \bar{\varphi}^B \& \& \Delta\bar{\alpha}^B \& \Delta\bar{\beta}^B \& \Delta\bar{\alpha}'^B \& \Delta\bar{\beta}'^B \& \bar{E}_0^B \& \bar{Z}_\phi^B \& \bar{K}_E^B \& \bar{U}^B \& \bar{F}_{DN}^B$
	P_2^2	$\tau_n^B \& (\tau_3^B \vee (\tau_3' \& \tau_3) \vee K_d^B \vee \tau_n^B \vee \Delta T^B \vee t_n^B) \& \omega_0^B \& (\psi^B \vee \Phi^B \& \psi^B) \vee \varphi^B \Delta\alpha^B \& \Delta\beta^B \& \Delta\alpha'^B \& \Delta\beta'^B \& E_0^B \& Z_\phi^B \& K_E^B \& U^B \& F_{DN}^B$
	P_2^3	$\tau_n^B \& (\tau_3^B \vee (\tau_3' \& \tau_3) \vee K_d^B \vee \tau_n^B \vee \Delta T^B \vee t_n^B) \& (\Delta\alpha^B \vee \Delta\beta^B \vee \Delta\alpha'^B \vee \Delta\beta'^B) \& \& (E_0^B \vee Z_\phi^B \vee K_E^B \vee U^B \vee F_{DN}^B) \& \bar{\omega}_0^B$
	P_2^4	$\tau_n^B \& (\tau_3^B \vee (\tau_3' \& \tau_3) \vee K_d^B \vee \tau_n^B \vee \Delta T^B \vee t_n^B) \& (\Delta\alpha^B \vee \Delta\beta^B \vee \Delta\alpha'^B \vee \Delta\beta'^B) \& \& (E_0^B \vee Z_\phi^B \vee K_E^B \vee U^B \vee F_{DN}^B) \& (\psi^B \vee \Phi^B \vee \varphi^B \vee \Delta\omega^B)$
P_3	P_3^1	$\bar{\tau}_3^B \& \bar{\varphi}^B \& \bar{Z}_\phi^B$
	P_3^2	$\tau_3'^B \vee \varphi^B \vee Z_\phi^B$
P_4	P_4^1	$(\tau_3^B \vee \tau_n^B \vee \Delta T^B \vee \Delta\alpha^B \vee \Delta\beta^B \vee \Delta\alpha'^B \vee \Delta\beta'^B \vee (\tau_3' \& \tau_3) \vee K_d^B) \& \bar{E}_0^B \& \bar{Z}_\phi^B \& \& \bar{K}_E^B \& \bar{\omega}_0^B \& \bar{\varphi}^B \& \bar{U}^B \& \bar{\Phi}^B \& \bar{\psi}^B \& \Delta\bar{\omega}^B \& \bar{F}_{DN}^B$
	P_4^2	$(E_0^B \vee Z_\phi^B \vee K_E^B \vee \omega_0^B \vee \varphi^B \vee U^B \vee \Phi^B \vee \psi^B \vee \Delta\omega^B \vee F_{DN}^B) \& \bar{\tau}_3^B \& \bar{\tau}_n^B \& \& \Delta\bar{\alpha}^B \& \Delta\bar{\beta}^B \& \Delta\bar{\alpha}'^B \& \Delta\bar{\beta}'^B$
	P_4^3	$(\tau_3^B \vee \tau_n^B \vee \Delta T^B \vee \Delta\alpha^B \vee \Delta\beta^B \vee \Delta\alpha'^B \vee \Delta\beta'^B \vee (\tau_3' \& \tau_3) \vee K_d^B) \& \& (E_0^B \vee Z_\phi^B \vee K_E^B \vee \omega_0^B \vee \varphi^B \vee U^B \vee \Phi^B \vee \psi^B \vee \Delta\omega^B \vee F_{DN}^B)$
P_5	P_5^1	$(\tau_3^B \vee (\tau_3'^B \& \tau_3^B) \vee \Delta\alpha^B \vee \Delta\beta^B \vee \Delta\alpha'^B \vee \Delta\beta'^B \vee K_d^B \vee \tau_n^B \vee \Delta T^B) \& \Delta\bar{\omega}^B$
	P_5^2	$\Delta\omega^B$
	P_5^3	$\Delta\omega^B \& (\tau_3^B \vee (\tau_3'^B \& \tau_3^B) \vee \Delta\alpha^B \vee \Delta\beta^B \vee \Delta\alpha'^B \vee \Delta\beta'^B \vee K_d^B \vee \tau_n^B \vee \Delta T^B)$
	P_5^4	$(E_0^B \& K_E^B) \& \Delta\bar{\omega}^B$
	P_5^5	$(\tau_3^B \vee (\tau_3'^B \& \tau_3^B) \vee \Delta\alpha^B \vee \Delta\beta^B \vee \Delta\alpha'^B \vee \Delta\beta'^B \vee K_d^B \vee \tau_n^B \vee \Delta T^B) \& (E_0^B \& K_E^B)$
	P_5^6	$(\tau_3^B \vee (\tau_3'^B \& \tau_3^B) \vee \Delta\alpha^B \vee \Delta\beta^B \vee \Delta\alpha'^B \vee \Delta\beta'^B \vee K_d^B \vee \tau_n^B \vee \Delta T^B) \& (E_0^B \& K_E^B)$
P_6	P_6^1	\bar{U}^B
	P_6^2	U^B

Таблица 2

**Ограничения, налагаемые ограничительными свойствами
на модель радиосигналов**

Классификационный признак	Ограничительный признак	Ограничения
$P_0(1)$	$P_0(1)^1$	$J_k = 1$
	$P_0(1)^2$	$J_k = 2$
	$P_0(1)^3$	$J_k > 2$
$P_0(2)$	$P_0(2)^1$	$N = 1$
	$P_0(2)^2$	$N > 1$
$P_0(3)$	$P_0(3)^1$	$K_d = 1, F_{3P}(\cdot) = F_3(\cdot)$
	$P_0(3)^2$	$K_d > 1$

С целью синтеза СВУ для моделирования детерминированных радиотехнических сигналов с переменным коэффициентом затухания, зависимым от дальности, может быть использован следующий вектор основных свойств:

$$\vec{P} = (p_1^1, p_2^3, p_3^1, p_4^3, p_5^1, p_6^1)$$

и ограничительный вектор:

$$\vec{P}_0 = (p_0(1)^2, p_0(2)^2, p_0(3)^2).$$

Тогда математическая модель радиосигналов с требуемыми свойствами будет иметь вид

$$y(t - \tau_3) = E'_0 \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^{N_m} \left(\frac{1}{\tau_3^{(m,n)}} \right)^4 F_3 \left\{ \left[\chi_p(F_{cp}(\alpha^{(m,n)}, \alpha_a(t_0, x(t))), T_{пов}), \chi_3(\tau_3^{(m,n)}) \right] \right\},$$

где $E'_0 = \frac{2E_0}{c}$; F_{cp} – функция сравнения; c – скорость распространения электромагнитных волн.

Управление динамикой формируемых СВУ процессов может осуществляться с использованием программных средств, создаваемых на основе известных методик моделирования радиолокационной обстановки [3].

Заключение. Применение методики синтеза математических моделей с требуемыми свойствами при синтезе специализированных вычислительных устройств для формирования радиосигналов позволяет создавать СВУ, отличающиеся простотой, более низкими стоимостью разработки, изготовления и эксплуатации, потребляемой мощностью, весом, габаритами, высокой надежностью, технологичностью, обусловленной возможностью реализации всех структурных составляющих на типовых узлах цифровой вычислительной техники.

Литература

1. Кобайло А. С., Жилияк Н. А. Методика синтеза математических моделей с требуемыми свойствами // Труды БГТУ. 2015. № 6: Физ.-мат. науки и информатика. С. 190–194.
2. Кобайло А. С. Применение теории синтеза вычислительных систем реального времени для моделирования физических процессов на примере радиосигналов // Труды БГТУ. 2014. № 6: Физ.-мат. науки и информатика. С. 135–137.
3. Дятко А. А., Костромицкий С. М., Шумский П. Н. Математическая модель сигнала, отраженного от земной поверхности, при сопровождении РЛС низколетящей цели // Доклады БГУИР. 2015. № 8. С. 17–23.

References

1. Kobaylo A. S., Zhilyak N. A. Methods of synthesis of mathematical models with the desired properties. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2015, no. 6: Physical-mathematical sciences and informatics, pp. 190–194 (In Russian).
2. Kobaylo A. S. Theory of computing systems for real-time simulation of physical processes on the example of radio signals. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2014, no. 6: Physical-mathematical sciences and informatics, pp. 135–137 (In Russian).
3. Dyatko A. A., Kostromitskiy S. M., Shumskiy P. N. Mathematical model of the signal reflected from the ground during radar accompanying low-flying targets. *Doklady BGUIR* [Reports of BSUIR], 2015, no. 8, pp. 17–23 (In Russian).

Информация об авторе

Кобайло Александр Серафимович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационных систем и технологий. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: kac_53@mail.ru

Information about the author

Kobaylo Aleksandr Serafimovich – PhD (Engineering), Assistant Professor, Assistant Professor, the Department of Information Systems and Technologies. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kac_53@mail.ru.

Поступила 15.03.2016