

УДК 681.325

ГЕНЕРИРОВАНИЕ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ СЛУЧАЙНЫХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ МАКРООПЕРАТОРОВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СЛУЧАЙНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ПОТОКОВ

Э.А. БАКАНОВИЧ, Н.А. ВОЛОРОВА, Т.М. КРИВОНОСОВА, УСАМА САЛЕМ АЛЬ-СИД

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 23 марта 2007

В статье рассматривается комплекс вопросов, связанных с созданием специализированных вычислительных устройств, предназначенных для формирования импульсных и непрерывных случайных процессов, представляющих собой последовательности сигналов сложных (программируемых) форм. Параметры формируемых сигналов могут быть либо детерминированными, либо случайными величинами, подчиняющимися произвольным требуемым программно-управляемым функциям распределения вероятностей. Рассматриваются математическая модель формируемого процесса, принципы организации специализированных вычислительных устройств для генерирования сигналов, алгоритм имитационного моделирования рекуррентного вероятностного преобразователя.

Ключевые слова: спектральная плотность мощности, вероятностный преобразователь, мощность сигнала.

Введение

Основным структурным компонентом любого стохастического вычислительного или моделирующего устройства являются управляемые и программно-управляемые вероятностные преобразователи. В значительной степени удовлетворяют условиям применения в автоматизированных системах управления испытаниями и моделированием рекуррентные вероятностные преобразователи [1–3], которые обеспечивают возможность программного управления воспроизводимыми функциями распределения, многообразии форм представления формируемых случайных величин и достаточно высокую точность работы.

Опыт разработки и использования стохастических вычислительных и моделирующих устройств показывает, что наиболее эффективно их применение в автоматизированных системах управления испытаниями изделий на различные воздействия (вибрации, удары, транспортная тряска, электрические и другие помехи и т.п.). В таких системах удается рационально разделить функции между специализированными устройствами и традиционными ЭВМ и тем самым существенно повысить эффективность использования вычислительной техники.

Из множества типов случайных процессов, пригодных для имитации внешних воздействующих факторов, следует выделить импульсные случайные процессы, причем степень адекватности реальных воздействий и имитирующих их процессов может быть достаточно высокой, если обеспечена возможность управления значительным числом параметров сигналов (форма отдельных импульсов, функции распределения вероятностей параметров, например, амплитуд, длительностей оснований сигналов, интервалов между соседними импульсами, полярностей). Поэтому одной из актуальных задач построения систем управления испытаниями

где p_k — вероятность появления импульса с длительностью основания; равной τ_k ; L — число интервалов квантования функции распределения вероятностей $F(\tau)$.

Величины τ_k можно выразить через минимальную длительность импульса τ_1 в последовательности $u(t)$: $\tau_k = a_k \tau_1$ ($a_{k+1} > a_k$). Используя теорему масштаба для преобразования Фурье, выражение для спектральной плотности мощности процесса $u(t)$ представим так:

$$S(\omega) = \frac{M[A^2]}{M[T]} \cdot \sum_{k=1}^L a_k^2 |g(a_k \omega, \tau_1)|^2 p_k. \quad (2)$$

Дискретное представление сигнала позволяет рассматривать спектральную плотность импульсного процесса как композицию конечного числа функций определенного вида с масштабируемыми аргументами, причем каждая функция имеет вес, определяемый вероятностями p_k появления импульса с длительностью основания τ_k .

Выражение (2) использовано для разработки метода определения вероятностей p_k , обеспечивающих воспроизведение последовательности импульсов $u(t)$ с требуемой спектральной плотностью и заданной формой сигнала $a(t)$. Пусть $S(\omega)$ — требуемая функция спектральной плотности мощности воспроизводимого процесса $u(t)$ и ω_e — ее верхняя граница. Допустим, что форма сигнала $a(t)$ и функция $|g_1(\omega', 1)|^2$ квадрата модуля спектра сигнала с единичной длительностью основания известны; функция $|g_1(\omega', 1)|^2$ задана в области частот ω' ; ω'_e — верхняя граница спектра сигнала единичной длительности. На основании теоремы масштаба для преобразования Фурье спектральная плотность мощности процесса $u(t)$ определяется через известную функцию квадрата модуля спектра сигнала формы $a(t)$ с длительностью основания, равной единице:

$$S(\omega) = \frac{M[A^2]}{M[T]} \sum_{k=1}^L (a_k \tau_1)^2 |g_1(a_k \tau_1 \omega', 1)|^2 \cdot p_k. \quad (3)$$

Для формируемого процесса $u(t)$ верхняя граница ω_e спектральной плотности мощности определяется минимальной длительностью основания импульса в случайной последовательности, т.е. верхние границы спектральной плотности мощности процесса $u(t)$ и спектра сигнала $a(t)$ с длительностью основания τ_1 должны совпадать:

$$\tau_1 = \omega'_e / \omega_e. \quad (4)$$

Поэтому значение верхней границы спектра $S(\omega)$ воспроизводимого процесса при ограничении на форму сигнала в последовательности однозначно определяет величину основания импульса минимальной длительности.

Для определения функции распределения вероятностей параметра τ введем весовой коэффициент $\alpha_k = M[A^2] p_k / M[T]$. Тогда (3) принимает вид

$$S(\omega) = \sum_{k=1}^L \alpha_k (a_k \tau_1)^2 |g_1(a_k \omega', 1)|^2. \quad (5)$$

Поскольку функции $S(\omega)$ и $|g_1(\omega', 1)|^2$ при значениях аргументов $\omega > \omega_e$ и $\omega' > \omega'_e$ могут считаться равными нулю, то (5) справедливо при $\omega < \omega_e$ и $\omega' < \omega'_e$. Для использования машинно-ориентированного метода расчета функцию $S(\omega)$ можно представить в виде ряда N значений спектральной плотности в полосе частот $\Delta\omega_j = \omega_j - \omega_{j-1}$ следующим образом:

$$S(\omega) \rightarrow S(\omega_j^*) \Delta\omega; \quad \Delta\omega = \frac{\omega_b}{N}, \quad \omega_j^* = \frac{(2j-1)}{2} \Delta\omega.$$

Мощность сигнала длительностью τ в полосе частот $\Delta\omega_j$ определяется выражением

$$G_{\tau_1}(\Delta\omega_j) = \int_{\omega_{j-1}}^{\omega_j} |g(\omega, \tau)|^2 d\omega.$$

С учетом (4) и линейного преобразования аргументов ω и ω' выражение для спектральной мощности принимает вид

$$G_{\tau_1}(\Delta\omega_j) = \int_{\omega^{j-1}}^{\omega^j} \tau_1 |g_1(\omega', 1)|^2 d\omega'.$$

Соотношения (4) и (5) позволяют определить мощность сигнала длительностью τ_k в полосе частот $\Delta\omega_j$:

$$G_{\tau_k}(\Delta\omega_j) = \int_{\alpha_k \omega^{j-1}}^{\alpha_k \omega^j} \alpha_k \tau_k |g_1(\alpha_k \omega', 1)|^2 d\alpha_k \omega', \quad (6)$$

а значение спектральной мощности процесса в полосе частот

$$S(\omega_j^*) \Delta\omega = \sum_{k=1}^L \alpha_k G_{\tau_k}(\Delta\omega_j). \quad (7)$$

Анализ соотношений (6) и (7) показывает, что число составляющих, участвующих в формировании значений $S(\omega)$, уменьшается с увеличением аргумента ω . Учитывая дискретность задания параметра τ , можно найти интервал, на котором значения функции $S(\omega)$ определяются только квадратом модуля спектра сигнала длительностью τ_1 . Для сигнала длительностью $\tau_2 = a_2 \tau_1$ область задания функции $|g(\omega, \tau_2)|^2$ будет находиться в интервале от 0 до (ω_e / a_2) . При $\omega > (\omega_e / a_2)$ спектральная плотность мощности процесса $u(t)$ определяется только значениями функции $|g(\omega, \tau_1)|^2$. Если аргументы функции $S(\omega)$ изменяются в интервале от (ω_e / a_{k+1}) до (ω_e / a_k) , то спектральная плотность мощности процесса $u(t)$ будет определяться значениями квадратов модулей спектров сигналов с длительностями оснований τ_1, \dots, τ_k .

Таким образом, предложенная математическая модель случайного импульсного процесса учитывает дискретность в формировании параметров импульсов и позволяет разработать эффективный алгоритм расчета весовых коэффициентов α . Ограниченный объем данной статьи не позволяет привести детальное описание алгоритма, однако кратко алгоритм может быть представлен следующим образом.

Величина коэффициента α_1 определяется из условия минимизации ошибки воспроизведения спектральной плотности мощности $S(\omega)$ процесса $u(t)$ в интервале частот от (ω_e / a_2) , до ω_e . Все последующие значения α_k определяются из условия минимизации ошибки воспроизведения спектральной плотности мощности на "своем" интервале и с учетом уже найденных величин $\alpha_i (i < k)$. Величина α_L , соответствующая импульсу максимальной длительности, определяется из условия минимизации ошибки на интервале ω от 0 до (ω_e / a_L) .

При определении весовых коэффициентов необходимо учитывать, что α_k может принимать только неотрицательные значения. Получение отрицательной величины α_k означает, что композицией функций $|g(\omega, \tau)|^2$ нельзя воспроизвести требуемый вид $S(\omega)$. В этом случае следует определить вид $|g^*(\omega, \tau)|^2$ — квадрата модуля спектра сигнала $a^*(t)$, способного воспроизвести заданную функцию $S(\omega)$, и определить соответствующую ей форму сигнала $a^*(t)$.

На основе рассмотренной математической модели выбраны основные управляемые параметры случайных импульсов, определяющие спектральную плотность процесса - форма сигнала и закон распределения длительностей оснований импульсов, и предложен способ формирования случайного импульсного процесса $u(t)$ с требуемой спектральной плотностью $S(\omega)$, который сводится к генерированию последовательности импульсных сигналов определенной формы $a(t)$ со случайными значениями параметров A, τ, T . Предложенный способ формирования случайного импульсного процесса реализован в специализированном стохастическом вычислительном устройстве.

Функциональные возможности

Широкие функциональные возможности имитаторов многопараметрических случайных импульсных процессов обеспечиваются их способностью формировать потоки сигналов любых требуемых программируемых форм с параметрами, являющимися детерминированными или случайными величинами, которые подчиняются произвольным функциям распределения вероятностей, управляемым программно или вручную.

Порядок чередования сигналов разных форм в последовательности случаен. Вероятность появления сигнала требуемой формы — произвольная, регулируемая. Число интервалов квантования по аргументу функции распределения вероятностей управляется программно.

Во всех режимах работы имитаторов обеспечиваются следующие возможности:

любой параметр сигнала может быть как случайным, так и регулярным;

формирование потоков однополярных или разнополярных сигналов, а также потоков, каждый сигнал в котором имеет как положительные, так и отрицательные части;

формирование последовательностей примыкающих друг к другу импульсов без пауз между соседними сигналами;

временные параметры процесса (длительности импульса и паузы) могут представлять собой сумму случайного и постоянного отрезков времени, т.е. иметь постоянные составляющие;

формирование нестационарных и кусочно-стационарных процессов.

Следует отметить, что с помощью рассматриваемого имитатора могут быть сформированы и полностью детерминированные импульсные процессы с сигналами произвольных программируемых форм и с требуемыми детерминированными параметрами. Выходной случайный процесс может быть представлен либо в аналоговой форме, либо в виде последовательности кодов. Имитатор может быть использован как многоканальный программно-управляемый датчик случайных чисел, формирующий потоки чисел с заданными законами распределения вероятностей. Число каналов может быть равно трем, четырем или шести в зависимости от требуемой точности воспроизведения заданных функций распределения вероятностей.

Работа имитатора случайных процессов

Характерной особенностью применения рассматриваемого устройства является использование управляемого случайного процесса, имеющего функцию распределения мгновенных значений и спектральную плотность мощности, совпадающие с аналогичными характеристиками имитируемого процесса.

Укрупненная структурная схема имитатора приведена на рис. 2. В приборе используются цифровые методы формирования выходного процесса. Формы сигналов, функции распределения вероятностей параметров и их числовые характеристики, а также режимы его работы определяются кодами, поступающими во внутреннее запоминающее устройство (БП) с пульта управления (ПУ), от ЭВМ или других источников информации (ДИ). Путем замены этих кодов организуется программное управление имитатором. Принцип его работы заключается в преобразовании случайных кодов, вырабатываемых датчиком случайных чисел, в параметры сигналов. Формирование импульса сложной формы с требуемой длительностью τ осуществляется путем считывания из блока памяти (БП) значений ординат "единичного" сигнала (рис. 3) с частотой, обратно пропорциональной τ . Последовательности адресов считывания вырабатывают блоки функциональных преобразователей (ФП1 и ФП2), которые осуществляют также преобразование считанных из БП ординат сигнала в аналоговый процесс в соответствии с текущим значением амплитуды импульса.

Режим работы устройства задается кодом, записанным в регистре режима (РгР), состояние которого управляет работой всех блоков. Подключение адресных и информационных последовательностей к требуемому блоку прибора осуществляется коммутаторами КМ-1 и КМ-2 и определяется состоянием регистра режима.

Отличительной особенностью рассматриваемого имитатора является наличие двух способов записи информации: с помощью команд первоначальной загрузки и с помощью команд коррекции. Команда первоначальной загрузки предназначена для ввода в память устройства всего объема настроечной информации, при этом генерация процесса начинается после окончания операции загрузки. Наличие команды коррекции позволяет использовать прибор в контуре с объектом управления и ЭВМ, а также формировать нестационарные процессы. При выполнении команды коррекции в запоминающее устройство прибора вводится часть информации, определяющая функции распределения одного из параметров, форму сигнала или режим работы устройства. Запись информации в этом режиме происходит без прерывания генериро-

вания процесса, т.е. в те моменты времени, когда требуемая область памяти не участвует в формировании выходной последовательности.

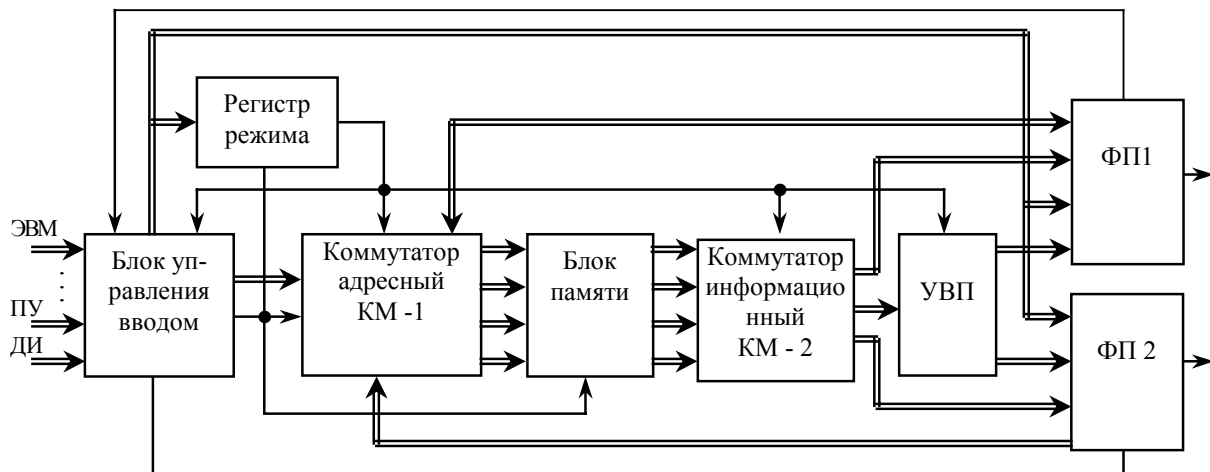


Рис. 2. Структурная схема прибора: УВП — управляемый вероятностный преобразователь; ФП — функциональный преобразователь

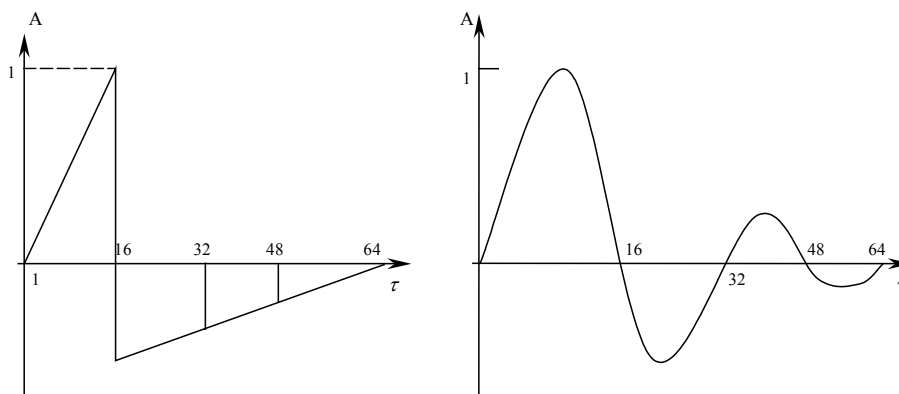


Рис. 3. Примеры "единичных" сигналов

Программное обеспечение

Программное обеспечение имитатора случайных импульсных процессов, ориентированное на работу в реальном масштабе времени, построено по модульному принципу и в общем виде состоит из управляющей программы и набора вызываемых модулей. Прикладные программы осуществляют оперативное управление работой имитатора, связь его с управляющей ЭВМ и программный контроль достоверности функционирования прибора.

Учитывая особую роль, которую играют управляемые вероятностные преобразователи при создании стохастической аппаратуры, разработаны программы имитационного моделирования вероятностных преобразователей различных типов [2]. Имитационное моделирование позволяет существенно сократить объем работ по экспериментальному исследованию стохастических устройств аппаратных моделей сложных систем; кроме того, появляется возможность оценить достоверность математической модели УВП, выбрать режимы работы управляемого вероятностного преобразователя и его элементов.

Следует особо отметить, что разработанный алгоритм и программа моделирования вероятностного преобразователя могут использоваться самостоятельно для формирования потоков случайных величин, подчиняющихся любым требуемым функциям распределения вероятностей.

При проведении имитационного моделирования рекуррентного УВП может быть оценено влияние следующих основных параметров преобразователя и его математической модели на точность воспроизведения заданной функции распределения:

влияние точности задания и стабильности интенсивностей λ_i первичных пуассоновских случайных импульсных потоков $\varphi_i(\vartheta)$, формируемых датчиками потоков случайных импульсов (ДПСИ);

влияние вида функции распределения интервалов между соседними сигналами в первичных потоках $\varphi_i(\vartheta)$ на точность работы УВП при фиксированных математическом ожидании и дисперсии случайных временных интервалов;

зависимость точности воспроизведения заданной функции распределения $F(t)$ от числа интервалов квантования n ($n=8, 10, 16$ и т.д.);

использование синхронного или асинхронного вариантов построения УВП;

стабильности и точности задания частоты работы генераторов тактовых импульсов и т.д.

Заключение

Во всех случаях при совместной работе с ЭВМ имитатор освобождает управляющую ЭВМ от непроизводительных затрат времени на формирование программными средствами случайных процессов, обеспечивает более высокое "качество" формируемых случайных процессов и тем самым способствует повышению эффективности использования средств вычислительной техники, оперативному и качественному решению задач, возлагаемых на вычислительно-моделирующие средства.

GENERATING MULTI-PARAMETRIC RANDOM SIGNALS BASED ON MACRO-OPERATOR FOR CONVERSION OF RANDOM PULSE FLOWS

E.A. BAKANOVICH, N.A. VOLOROVA, T.M. KRIVONOSOVA, USAMA SALEM AL SAID

Abstract

The article discusses a set of issues related to creation of specialized computing devices, intended to generate pulsed and continuous processes, that represent sequences of signals of complex (programmable) shapes. The parameters of the generated signals may be either determined or random, subject to the required arbitrary program-driven probability distribution functions. The article discusses a mathematical model of the generated process, organization principles of the specialized computing and signal generating devices, the simulation algorithm for the recurrent probabilistic converter.

Литература

1. Баканович Э.А., Аль-Сид Усама Салим, Кривоносова Т.М. Рекуррентные управляемые вероятностные преобразователи (вариант детерминированного квантования). Ч. 1. Минск, 2005. Деп. в БелИСА 25.01.2005, № Д20052.
2. Баканович Э.А., Аль-Сид Усама Салим, Кривоносова Т.М. Алгоритм имитационного моделирования рекуррентного вероятностного преобразователя. Ч. 2. Минск, 2006. Деп. в БелИСА 07.04.2006, № Д00619.
3. Аль-Сид Усама Салим, Баканович Э.А., Кривоносова Т.М. // Докл. БГУИР. 2006. Т. 4, № 4. С. 64–71.
4. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М., 1974.
5. Френкс Л. Теория сигналов. М., 1974.
6. Горяинов В.Т., Журавлев А.Г., Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. Примеры и задачи. М., 1980.
7. Кащеев В.М. // Вибротехника. 1972. № 4. С. 71–77.