

Многофункциональные устройства для обработки случайных потоков импульсов

П. П. Драбич, О. П. Драбич

Физико-механический институт им. Г. В. Карпенко НАН Украины
Украина, 79601 Львов, ул. Научная, 5

Статья поступила в редакцию 14 января 2000 г.

Описаны структурные схемы цифровых устройств, синтезированных на основе рекуррентных соотношений в виде неоднородных линейных дифференциальных уравнений первого порядка, обеспечивающих измерение интенсивности, разности интенсивностей и отношение разностей интенсивностей случайных потоков импульсов. Проанализированы их динамические и статистические характеристики. Получены математические выражения для инженерного расчета.

Описано структурні схеми цифрових пристроїв, що синтезовані на основі рекуррентних співвідношень у вигляді неоднорідних лінійних диференціальних рівнянь першого порядку і забезпечують вимірювання інтенсивності, різниці інтенсивностей і відношення різниць інтенсивностей випадкових імпульсних потоків. Проаналізовано їх динамічні і статистичні характеристики. Одержано математичні вирази для інженерного розрахунку.

При научных и производственных исследованиях сред, объектов и материалов с помощью ядерных, рентгеновских и световых излучений, полезная информация содержится в амплитудных значениях h_i регистрируемых последовательностей коротких импульсов, а также в величинах временных интервалов τ_i между ними. Поэтому при обработке сигналов используют математическую модель в виде случайных дискретных процессов типа $\{h_i, i \in Z\}$, $\{\tau_i, i \in Z\}$, ($Z = 0, 1, 2, 3, \dots$ – множество натуральных чисел), которые могут рассматриваться независимо друг от друга [1]. При этом одним из информативных и широко используемых в практике исследований параметров является интенсивность излучателя m – величина обратно пропорциональная среднему значению интервалов τ_i между смежными импульсами:

$$\bar{\tau} = \frac{1}{M_0} \sum_{i=1}^{M_0} \tau_i \quad (1)$$

обратно пропорциональная среднему значению интервалов τ_i между смежными импульсами.

При проведении исследований полезный сигнал искажен помехами аддитивного и мультипликативного характера. Так, например, при изучении физических характеристик веществ методами оптической спектроскопии [2], а также при исследовании небесных тел и верхних слоев атмосферы [3], аддитивными помехами

являются: световой фон оптического канала электрофотометрической аппаратуры, высокоэнергетические шумы фотоумножителя, фон неба и т. п. Примером мультипликативной помехи может быть нестабильность интенсивности источника оптического либо ядерного излучения [1].

Поэтому при построении электрофотометрической аппаратуры, а также аппаратуры для радиометрии либо ядерной спектроскопии измерительный канал представляет собой многофункциональный блок [1], реализующий, в общем случае, функцию

$$F(m_1, m_2, m_3, m_4) = \frac{\bar{m}_1 - \bar{m}_2}{m_3 - m_4}, \quad (2)$$

где $\bar{m}_1 = \frac{1}{\tau_1}$ и $\bar{m}_3 = \frac{1}{\tau_3}$ – интенсивности импульсных потоков $\xi_1(t)$ и $\xi_3(t)$ в измерительных каналах, а $\bar{m}_2 = \frac{1}{\tau_2}$ и $\bar{m}_4 = \frac{1}{\tau_4}$ – интенсивности $\xi_2(t)$ и $\xi_4(t)$ импульсов фона.

Описанный в [1] аналоговый блок характеризуется существенной инструментальной составляющей погрешности измерения, обусловленной температурной нестабильностью емкостей конденсаторов и параметров ключевых диодов. В [1] также в общих чертах указаны возможные пути построения цифрового аналога описанного устройства, однако отсутствуют структурные схемы конкретных технических решений, описание их принципа действия

и анализ динамических и статистических характеристик, что затрудняет практическое использование предложенных рекомендаций специалистами в области ядерных и оптических методов исследования сред, объектов и материалов.

В данной статье описаны и проанализированы структурные схемы простых цифровых вычислителей функций типа (2), которые представлены на рис. 1 и рис. 2. Эти устройства, так же как и аналоговое устройство в [1], синтезированы на основе рекуррентных соотношений, описываемых неоднородными линейными дифференциальными и разностными уравнениями первого порядка [1,4], которые обеспечивают одновременное вычисление и функциональное

преобразование оценок параметров стохастических сигналов.

Устройство на рис. 1 состоит из вычитателей частот 1 и 2, делителей частоты 3 и 5, генератора тактовых импульсов 4, элементов синхронизации 6 и 7, преобразователя код-частота 8 и реверсивного счетчика 9.

Структурные схемы и принцип действия вычитателя частот, элемента синхронизации и преобразователя код-частота описаны в [5].

Предлагаемое устройство производит вычисление отношения разностей интенсивностей, т. е. реализует уравнение (2) и работает следующим образом.

Пусть на входы вычитателя частот 1 поступают импульсные потоки $\xi_1(t)$ и $\xi_2(t)$ с интенсивностями m_1 и m_2 , а на входы вычитателя 2 –

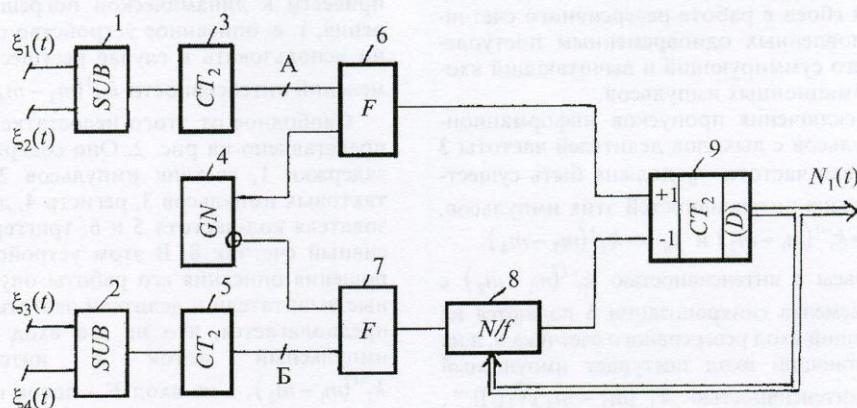


Рис. 1. Структурная схема вычислительного устройства с переменной инерционностью

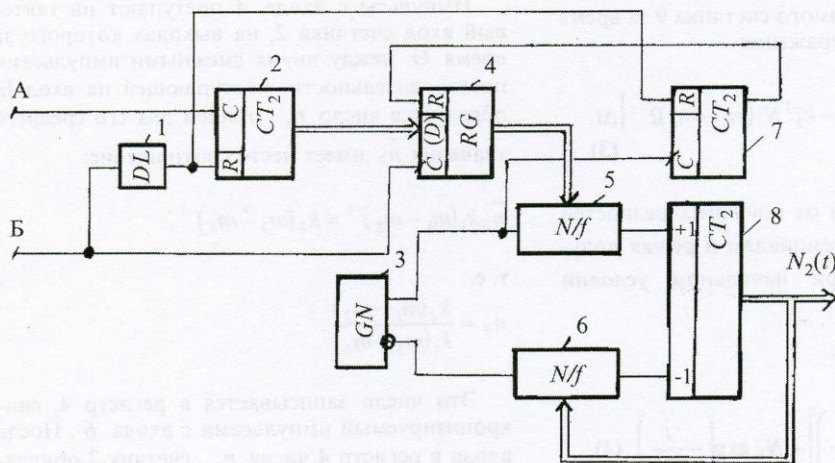


Рис. 2. Структурная схема вычислительного устройства с постоянной инерционностью

потоки $\xi_3(t)$ и $\xi_4(t)$ с интенсивностями m_3 и m_4 . Выходными сигналами вычитателей 1 и 2 являются импульсные потоки с интенсивностями $m_1 - m_2$ и $m_3 - m_4$, которые с помощью делителей частоты 3 и 5 преобразуются в импульсные потоки с интенсивностями $k_1^{-1}(m_1 - m_2)$ и $k_2^{-1}(m_3 - m_4)$ (k_1 и k_2 – коэффициенты деления частоты делителями 3 и 5).

С помощью элементов синхронизации 6 и 7 осуществляется привязка импульсов с выходов делителей 3 и 5 к тактовой последовательности импульсов генератора 4. Для этого импульсные последовательности с выходов делителей частоты поступают на первые входы элементов синхронизации 6 и 7, а на их вторые входы подаются тактовые импульсы с частотой f_0 с прямого и инверсного выходов генератора 4. Указанная привязка производится с целью исключения сбоев в работе реверсивного счетчика, обусловленных одновременным поступлением на его суммирующий и вычитающий входы информационных импульсов.

Для исключения пропусков информационных импульсов с выходов делителей частоты 3 и 5 тактовая частота f_0 должна быть существенно больше интенсивностей этих импульсов, т. е. $f_0 \gg k_1^{-1}(m_1 - m_2)$ и $f_0 \gg k_2^{-1}(m_3 - m_4)$.

Импульсы с интенсивностью $k_1^{-1}(m_1 - m_2)$ с выхода элемента синхронизации 6 подаются на суммирующий вход реверсивного счетчика 9, а на его вычитающий вход поступает импульсный поток с интенсивностью $k_2^{-1}(m_3 - m_4)\bar{N}_1(t)2^{-s}$, где $\bar{N}_1(t)$ – среднее значение двоичного числа (выходного параметра) на выходе реверсивного счетчика 9, а s – количество его выходных разрядов.

Изменение содержимого счетчика 9 за время Δt определяется из выражения

$$\Delta \bar{N}_1(\Delta t) = \left[k_1^{-1}(m_1 - m_2) - k_2^{-1} \bar{N}_1(m_3 - m_4) 2^{-s} \right] \Delta t. \quad (3)$$

Переходя в (3) от конечных разностей $\Delta \bar{N}_1(t)$ и Δt к дифференциалам и решая полученное уравнение при начальном условии $N(0) = N_0$, находим:

$$\bar{N}_1(t) = K_{01} \times \frac{m_1 - m_2}{m_3 - m_4} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\Theta_1}\right) \right] + N_0 \exp\left(-\frac{t}{\Theta_1}\right). \quad (4)$$

Здесь $K_{01} = 2^s \frac{k_2}{k_1}$ – масштабный коэффициент

вычисления функции (2), Θ_1 – параметр переходного процесса, определяющий инерционность данного устройства, причем $\Theta_1 = 2^s k_2 (m_3 - m_4)^{-1}$.

В установившемся режиме

$$\bar{N}_1(\infty) = K_{01} \frac{m_1 - m_2}{m_3 - m_4}, \quad (5)$$

т. е. данное устройство реализует функцию (2).

Как следует из выражения для Θ_1 , инерционность устройства, изображенного на рис. 1, так же как и в [1], является функцией от интенсивности $k_2^{-1}(m_3 - m_4)$, что при большом динамическом диапазоне ее изменения может привести к динамической погрешности измерения, т. е. описанное устройство целесообразно использовать в случае несущественных изменений интенсивности $k_2^{-1}(m_3 - m_4)$.

Свободное от этого недостатка устройство представлено на рис. 2. Оно содержит элемент задержки 1, счетчик импульсов 2, генератор тактовых импульсов 3, регистр 4, два преобразователя код-частота 5 и 6, триггер 7 и реверсивный счетчик 8. В этом устройстве для упрощения описания его работы опущены входные вычитатели и делители частоты. При этом предполагается, что на его вход A подается импульсный поток с интенсивностью $k_1^{-1}(m_1 - m_2)$, а на вход B – поток импульсов с интенсивностью $k_2^{-1}(m_3 - m_4)$.

Это устройство производит вычисление функции (2) с постоянной инерционностью и работает следующим образом.

Импульсы с входа A поступают на тактовый вход счетчика 2, на выходах которого за время Θ между двумя смежными импульсами последовательности, поступающей на вход B , образуется число n_x , причем для его среднего значения \bar{n}_x имеет место соотношение:

$$\bar{n}_x k_1 (m_1 - m_2)^{-1} = k_2 (m_3 - m_4)^{-1},$$

т. е.

$$\bar{n}_x = \frac{k_2 (m_1 - m_2)}{k_1 (m_3 - m_4)}.$$

Это число записывается в регистр 4, синхронизируемый импульсами с входа B . После ввода в регистр 4 числа n_x , счетчик 2 обнуляется задержанным импульсом с входа B .

Числа n_x поступают на вход управления первого преобразователя код-частота 5, на тактовый вход которого поступает последовательность импульсов с прямого выхода генератора 3 с частотой f_0 .

В результате на выходе преобразователя 5 образуется последовательность импульсов с интенсивностью

$$\lambda_1 = \bar{n}_x f_0 2^{-p},$$

где p – число разрядов на входе управления преобразователя 5.

Поток импульсов интенсивностью λ_1 поступает на суммирующий вход реверсивного счетчика 8, на вычитающий вход которого подается второй импульсный поток с интенсивностью

$$\lambda_2 = f_0 \bar{N}_2(t) 2^{-l}, \quad (7)$$

где $\bar{N}_2(t)$ – среднее значение содержимого счетчика, l – число разрядов на его входе управления.

Изменение содержимого реверсивного счетчика 8 за время Δt определяется выражением:

$$\Delta \bar{N}_2(\Delta t) = (\lambda_1 - \lambda_2) \Delta t. \quad (8)$$

Переходя в (8) от конечных разностей к дифференциалам и решая его при начальном условии $N(0) = N_0$, находим:

$$\bar{N}_2(t) = K_{02} \frac{m_1 - m_2}{m_3 - m_4} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\Theta_2}\right) \right] + N_0 \exp\left(-\frac{t}{\Theta_2}\right), \quad (9)$$

где $K_{02} = \frac{k_2}{k_1} 2^{l-p}$ – масштабный коэффициент,

$\Theta_2 = 2^l f_0^{-1}$ – постоянная времени, характеризующая инерционность устройства на рис. 2.

При $l = p$ коэффициент $K_{02} = \frac{k_2}{k_1}$.

В установившемся режиме

$$\bar{N}_2(\infty) = K_{02} \frac{m_1 - m_2}{m_3 - m_4}. \quad (10)$$

Поскольку Θ_2 определяется лишь значениями l и f_0 (константами), то устройство на рис. 2 производит измерение отношения разностей интенсивностей с постоянной инерционностью, не зависящей от параметров входных потоков импульсов.

При наличии импульсных потоков на входных шинах A и B счетчик импульсов 7 производит регистрацию тактовых импульсов в интервале времени Θ между двумя смежными импульсами, поступающими на вход B , и обнуляется каждым информационным импульсом этой последовательности. Емкость счетчика 7 выбирается такой, чтобы он не переполнился за время максимального интервала Θ_{\max} . При малом значении интенсивности $k_2^{-1}(m_3 - m_4)$ емкость счетчика 7 должна быть большой, за счет чего увеличивается время сброса регистра 4 и время зануления значения $\bar{N}_2(t)$. Таким образом, время сброса выходного кода устройства находится в обратной зависимости от максимального значения интенсивности импульсов на шине B .

При отсутствии входных потоков на выходе счетчика 7 появляется импульс переполнения, сбрасывающий регистр 4 в ноль. За счет этого осуществляется автоматическая установка нуля на выходе устройства.

Из формул (5) и (10) видно, что масштабные коэффициенты K_{01} и K_{02} функции (2) задаются постоянными коэффициентами k_1 и k_2 деления частоты делителями 3 и 5 (рис. 1). Поэтому использование предложенных устройств в ядерной спектрометрической либо электрофотометрической аппаратуре вместо аналогового блока обработки информации, описанного в [1], позволит исключить аддитивную и мультипликативную составляющие погрешности вычисления, которые обусловлены неидентичностью и нестабильностью емкостей конденсаторов и могут составлять величину более одного процента

Значения m_1, m_2, m_3 и m_4 входных информационных потоков являются случайными величинами. Поэтому выходные параметры $\bar{N}_1(\infty)$ и $\bar{N}_2(\infty)$ – тоже случайные величины. Для определения погрешности, с точностью до которой по значениям $\bar{N}_1(\infty)$ и $\bar{N}_2(\infty)$ можно судить об истинном значении отношения математических ожиданий разностей интенсивностей, определим дисперсии выходных параметров $\bar{N}_1(\infty)$ и $\bar{N}_2(\infty)$.

Для этого левую и правую части уравнения (3) разделим на $(m_3 - m_4)\Delta t$, а уравнения (8) – на $f_0\Delta t$. Тогда получим:

$$\frac{\Delta \bar{N}_1(i)}{\Delta i} = k_1^{-1} \frac{m_1 - m_2}{m_3 - m_4} - k_2^{-1} \bar{N}_1(i-1)2^{-s}, \quad (11)$$

$$\frac{\Delta \bar{N}_2(j)}{\Delta j} = \frac{k_2}{k_1} \frac{m_1 - m_2}{m_3 - m_4} 2^{-p} - k_2^{-1} \bar{N}_2(j-1)2^{-l}. \quad (12)$$

В (11) и (12) $\Delta i = (m_3 - m_4)\Delta t$, а $\Delta j = f_0\Delta t$, т. е. $i = Ent[(m_3 - m_4)\Delta t]$, а $j = Ent[f_0\Delta t]$, где $Ent(\cdot)$ – целые части чисел $(m_3 - m_4)\Delta t$ и $f_0\Delta t$. Из (11) следует, что за один интервал Θ_i (т. е. когда $\Delta i = 1$) изменение содержимого счетчика для устройства на рис. 1 составляет

$$\Delta \bar{N}_1(i) = k_1^{-1} \frac{m_1 - m_2}{m_3 - m_4} - k_2 \bar{N}_1(i-1)2^{-s}, \quad (13)$$

а для устройства на рис. 2 за один период тактовой частоты:

$$\Delta \bar{N}_2(j) = \frac{k_2}{k_1} \frac{m_1 - m_2}{m_3 - m_4} 2^{-p} - \bar{N}_2(j-1)2^{-l}. \quad (14)$$

Решения уравнений (13) и (14) при начальном условии $N(0) = N_0$ имеют вид:

$$\bar{N}_1(i) = K_{01} \frac{m_1 - m_2}{m_3 - m_4} [1 - W_1(i)] + N_0 W_1(i), \quad (15)$$

$$\bar{N}_2(j) = K_{02} \frac{m_1 - m_2}{m_3 - m_4} [1 - W_2(j)] + N_0 W_2(j), \quad (16)$$

где

$$W_1(i) = (1 - k_2 2^{-s})^i \text{ и } W_2(j) = (1 - 2^{-l})^j \quad (17)$$

весовые функции, характеризующие инерционность устройств в координатах $\{N_1(i), i\}$ и $\{N_2(j), j\}$.

Дисперсии выходных параметров:

$$D(N_1) = \sum_{i=1}^{\infty} D_{\Delta N_1} W_1^2(i) \text{ и } D(N_2) = \sum_{j=1}^{\infty} D_{\Delta N_2} W_2^2(j)$$

или

$$D(N_1) = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{k_1^2} D \left(\frac{m_1 - m_2}{m_3 - m_4} \right) (1 - k_2 2^{-s})^{2i} = \frac{1}{k_1^2 k_2} D \left(\frac{m_1 - m_2}{m_3 - m_4} \right) 2^{s-1}$$

и

$$D(N_2) = \sum_{i=1}^{\infty} 2^{-2p} \left(\frac{k_2}{k_1} \right) D \left(\frac{m_1 - m_2}{m_3 - m_4} \right) (1 - 2^{-l})^{2j} = \frac{k_2^2}{k_1^2} D \left(\frac{m_1 - m_2}{m_3 - m_4} \right) 2^{l-2p-1}.$$

Относительные статистические погрешности

$$\delta_{ст.1} = \frac{\sqrt{D(N_1)}}{N_1(\infty)} \cdot 100\% \text{ и } \delta_{ст.2} = \frac{\sqrt{D(N_2)}}{N_2(\infty)} \cdot 100\%. \quad (18)$$

Подставив в выражения для $\delta_{ст.1}$ и $\delta_{ст.2}$ значения $D(N_1)$, $N_1(\infty)$ и $D(N_2)$, $N_2(\infty)$, получим:

$$\delta_{ст.1} = \left[E \left(\frac{m_1 - m_2}{m_3 - m_4} \right) \right]^{-1} \sqrt{\frac{D \left(\frac{m_1 - m_2}{m_3 - m_4} \right)}{k_2 2^{s+1}}}, \quad (19)$$

$$\delta_{ст.2} = \left[E \left(\frac{m_1 - m_2}{m_3 - m_4} \right) \right]^{-1} \sqrt{\frac{D \left(\frac{m_1 - m_2}{m_3 - m_4} \right)}{k_2 2^{l+1}}}, \quad (20)$$

где $E(\cdot)$ – оператор математического ожидания.

Как следует из (19), (20), заданная статистическая погрешность вычисления функции (2) обеспечивается количеством выходных разрядов s и l реверсивных счетчиков.

Так, например, если в конкретной технической реализации использовать 12-разрядный реверсивный счетчик, то относительная статистическая погрешность вычисления функции (2) с помощью предложенных устройств, реализующих весовое усреднение, уменьшится примерно на два порядка по сравнению с вычислением по случайным дискретным значениям $\tau_{1i}, \dots, \tau_{4i}$.

Описанные устройства являются многофункциональными, поскольку, кроме реализации

функции (2), могут измерять интенсивность одного импульсного потока, отношение интенсивностей двух импульсных потоков, отношение интенсивности одного потока к разности интенсивностей двух других, отношение разности интенсивностей двух потоков импульсов к интенсивности третьего, среднее значение интервалов времени между смежными импульсами, отношение интервалов времени и т. п.

Для лабораторных испытаний и метрологической аттестации описанных и им подобных устройств в настоящее время разрабатывается специализированный генератор случайных сигналов, вырабатывающий на выходе четыре случайных потока импульсов с заданными на определенном интервале стационарности числовыми характеристиками, в частности, заданными математическим ожиданием и дисперсией.

В заключение интересно отметить, что в описанных устройствах вместо преобразователей код-частота могут использоваться преобразователи код-вероятность [6-12], но их использование увеличивает дисперсию выходного параметра, обусловленную стохастической структурой последних.

Литература

1. Р. Ф. Федорив. Статистична радіометрія. Київ, Наук. думка, 1979, 263 с.
2. В. М. Лукьянец, Р. Ф. Федорив. Отбор и передача информации. Киев, Наук. думка, 1974, вып. 39, с. 92-94.
3. Е. Б. Вовчик, И. И. Вовчик, В. М. Лукьянец, Р. Ф. Федорив. Циркуляр Львовской астрономической

обсерватории. Львов, ГУ им. И. Франко, 1974, вып. 49, с. 28-31.

4. П. П. Драбич. Радиофизика и радиоастрономия. 1997, 2, №1, с. 73-77.
5. В. С. Гутников. Интегральная электроника в измерительных устройствах. Ленинград, Энергоатомиздат, 1988, 304 с.
6. В. В. Яковлев, Р. Ф. Федорив. Стохастические вычислительные машины. Ленинград, Машиностроение, 1974, 344 с.
7. А. с. 1580270 (СССР). О. П. Бухало, П. П. Драбич. Оpubл. в БИ, 1990, №27.
8. А. с. 1598130 (СССР). О. П. Бухало, П. П. Драбич. Оpubл. в БИ, 1990, №37.
9. А. с. 1599787 (СССР). П. П. Драбич. Оpubл. в БИ, 1990, №38.
10. А. с. 1684915 (СССР). П. П. Драбич. Оpubл. в БИ, 1991, №38.
11. А. с. 1758843 (СССР). П. П. Драбич. Оpubл. в БИ, 1992, №32.
12. А. с. 1833861 (СССР). П. П. Драбич. Оpubл. в БИ, 1993, №30.

Multifunctional Devices for Processing Pulse Random Flows

P. Drabich, O. Drabich

Structural schemes of digital devices synthesized on the basis of recurrence first-order heterogeneous linear difference equations are described. These devices ensure the measuring of intensity, intensity differences, and ratio of intensity differences of pulse random flows. Dynamical and statistical characteristics of these devices are analyzed. Mathematical expressions for engineering calculations are given.