

УДК 53.083.722

## **МНОГОФАЗНЫЙ АЛГОРИТМ ДЛЯ ПРЯМОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ВРЕМЯ–КОД С ВЫСОКОЙ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТЬЮ**

*И.Р.Русанов, И.Х.Атанасов\**

Предложен новый алгоритм для измерения временных интервалов с высокой разрешающей способностью, основанный на применении многофазного счетно-импульсного метода преобразования время—код. Разрешающая способность при этом составляет  $\pm T_e/2M$  для эталонного периода  $T_e$  квантующих тактовых импульсов.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ и Институте ядерных исследований и ядерной энергетики БАН, София.

## **A New Algorithm for the Direct Transformation Method of Time to Digital with the High Time Resolution**

*I.R.Rusanov, I.H.Atanassov*

The new measurement algorithm for the converter of time to digital with the high time resolution is proposed. The time measurement is based on the multiphase direct transformation method. The new algorithm permits one to achieve the time resolution of  $\pm T_e/2M$ , for a clock-period of  $T_e$ .

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR and INRNE BAS, Sofia.

### **1. ВВЕДЕНИЕ**

Для современного физического эксперимента важны исследования, которые разрабатывают методы для статического анализа случайных последовательностей сигналов и создают измерительные системы автоматизированной обработки потоков данных. Создание методов и алгоритмов для определения статистических характеристик потоков сигналов предполагает поиск приемлемых процедур для обработки экспериментальной информации в реальном времени. Эти процедуры должны обеспечить заданную точность и высокую разрешающую способность измерения.

---

\*ИЯИЭ БАН, София

В измерительной технике проблема точности возникает в связи с наличием факторов, которые оказывают влияние на измерительный процесс и являются неучтенными при оценке «рабочей характеристики» исследуемого процесса [1,3]. К влияющим факторам относится управление измерительным процессом и неконтролируемые воздействия [1,6]:

- ограниченное количество экспериментальных данных и продолжительность, доступные для наблюдения исследуемого процесса;
- внешние неконтролируемые воздействия, проявления которых имеют вероятностный характер;
- неточность сопоставления измеряемой величины с дискретной шкалой преобразования;
- крайнее значение и отклонение эталонов от номиналов.

В результате действия этих факторов измеряемая величина оценивается с ошибкой, которая является случайной величиной и вполне характеризуется своим законом распределения [3,6]. Оптимальное сопоставление множества оцениваемых реальных объектов  $\{X_i\}_{i=1}^{\infty}$  с множеством эталонов  $\{nE\}_{n=0}^N$  требует создания модели измерительного процесса, которая:

- учитывает источники измерительной ошибки и их влияние;
- обеспечивает средства и способы, ограничивающие влияние наиболее значительных источников ошибки.

## 2. СЧЕТНО-ИМПУЛЬСНЫЙ МЕТОД. ТОЧНОСТЬ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Задачи, связанные с измерением коротких временных интервалов (ВИ) и с изучением их распределения, возникают во многих физических экспериментах. В статистическом временном анализе определяется интенсивность во времени случайного потока сигналов, «генетически» связанного с заданным управляющим потоком. Для оценки неизвестной функции используется частота появления отдельных импульсов в зависимости от их временного положения относительно начала отсчета, задаваемого импульсами управляющего потока [2,3,4].

Для решения этих задач используются преобразователи время—код (ПВК). Измерения охватывают широкий диапазон от долей наносекунды до сотен микросекунд. При таком большом измерительном диапазоне по техническим и экономическим причинам нецелесообразно использовать универсальные приборы. Поэтому разработаны ПВК, которые предназначены для решения конкретных экспериментальных задач. Реализованные преобразователи время—код счетно-импульсного метода самые распространенные. Это определяется их широким измерительным диапазоном, возможностью преобразования в реальном масштабе времени, высокой надежностью и простотой конструкции, низкой стоимостью и однородностью дискретной шкалы преобразования. Основной ограничивающий фактор приложения этих преобразователей—точность преобразования, определяемая быстродействием существующей элементной базы.

**2.1. Постановка оптимизационной задачи.** Если  $\{T_i\}_{i=1}^{\infty}$ — множество измеряемых временных интервалов, а  $\{nT_e\}_{n=0}^N$ — дискретное множество математических моделей, которые описывают временные интервалы, то для идеального преобразователя время—код выражение [3,6]:

$$\{T_i\}_{i=1}^{\infty} \xrightarrow{U^*} \{nT_e\}_{n=0}^N \quad (1)$$

однозначно преобразует эти два множества с ошибкой

$$-T_e \leq \Delta \leq 0, \quad (2)$$

где  $U^*$  — идеальное управление измерительным процессом, а  $\Delta$  — ошибка квантования,  $T_e$  — эталон.

Во время измерения в реальных условиях, в результате действия случайных внешних и внутренних факторов, формируется оценка измеряемого временного интервала с измерительной ошибкой. Из-за этой ошибки сформированная оценка может отличаться от оценки идеального ПВК. Разница между ними называется «добавленной ошибкой». На рис. 1 представлена временная диаграмма сопоставления измеряемого ВИ с дискретной шкалой. Оценка измеряемого временного интервала определяется из соотношения [3,6]:

$$\bar{T} = NT_e, \quad (3)$$

где  $N$  — количество целых периодов эталонной тактовой серии, заполнивших измеряемый интервал;  $T_e$  — среднее значение эталонного периода тактовых импульсов.

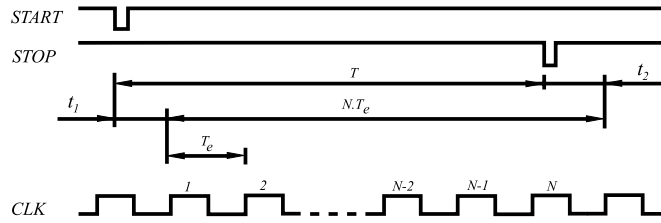


Рис. 1. Временная диаграмма сопоставления временного интервала с дискретной шкалой.  $T$  — измеряемый временной интервал,  $NT_e$  — оценка,  $t_1$  и  $t_2$  — соответственно неучтенная и добавленная части временного интервала,  $T_e$  — эталон

Измерительная ошибка в этом случае определяется из соотношения

$$\Delta = \bar{T} - T = NT_e - (NT_e + t_1 - t_2) = t_1 - t_2, \quad (4)$$

где  $t_1$ ,  $t_2$  — соответственно неучтенная и добавленная части временного интервала. Так как для этих частей измеряемого интервала всегда выполняется условие  $0 \leq t_1, t_2 \leq T_e$ , то для измерительной ошибки получается

$$-T_e \leq \Delta \leq T_e. \quad (5)$$

Следовательно, оценке  $NT_e$  соответствует каждый временной интервал, который является элементом следующего множества временных интервалов:

$$\Delta T_1 = [(N - 1) T_e; (N + 1) T_e] \xrightarrow{U} NT_e. \quad (6)$$

Для оценки  $(N + 1) T_e$  также равносильно выражение

$$\Delta T_2 = [NT_e; (N + 2) T_e] \xrightarrow{U} (N + 1) T_e. \quad (7)$$

Общая часть этих двух множеств  $\Delta T_1$  и  $\Delta T_2$  можно представить в виде

$$\Delta T = \Delta T_1 \cap \Delta T_2 = [NT_e; (N + 1)t_e] . \quad (8)$$

Последнее выражение показывает, что счетно-импульсное преобразование время — код оценивает каждый временной интервал двузачно:

$$T \xrightarrow{U} \bar{T} = \begin{cases} NT_e, \\ (N + 1)T_e. \end{cases} \quad (9)$$

Это происходит из-за случайного характера сопоставления измеряемого временного интервала с дискретной шкалой преобразования [3,6]. Следовательно, нужно управление измерительным процессом, которое обеспечивает минимальное влияние этого фактора. Чтобы довести измерительную ошибку до ошибки квантования, необходимо решить оптимизационную задачу:

$$U_{\text{opt}} = \arg \left\{ \min \left[ \{\Delta_i(u_i)\}_{i=1}^K \right] \right\} , \quad (10)$$

где  $\Delta_i$  — измерительная ошибка,  $\{u_i\}_{i=1}^K$  — множество допустимых вариантов управления,  $U_{\text{opt}}$  — оптимальное управление измерительным процессом.

**2.2. Многофазное счетно-импульсное преобразование.** Измерительный процесс предполагает неизвестность измеряемого параметра. Конец измерения связан с формированием оценки с ошибкой, которая попадает в предварительно заданный диапазон. Основным источником измерительной ошибки счетно-импульсного метода преобразования время — код с несфазированной по началу ВИ эталонной импульсной серией является неточность сопоставления временного интервала с дискретной шкалой. Анализ процесса преобразования время — код показывает, что есть возможность уменьшить измерительную ошибку и довести ее до ошибки квантования, если [2,3]:

- к повторяющемуся временному интервалу во время каждого его измерения добавляется ВИ с изменяемой длительностью —  $0 \leq t \leq T_e$ ;
- формируется множество оценок;
- в качестве оценки временного интервала выбирается та, которая имеет подавляющую частоту появления во множестве оценок.

Измерительный процесс при этих условиях для статистического временного анализа в экспериментальной физике можно реализовать при помощи счетно-импульсного преобразования с многофазным генератором [5]. В этом случае эталонные импульсные серии, которые формируют дискретную шкалу преобразования, имеют одинаковый эталонный период повторения  $T_e$  и импульсные серии, сдвинутые друг относительно друга по правилу

$$\phi_{i,j} = (i - j) \frac{T_e}{M} , \quad (11)$$

где  $i, j$  — количество импульсных серий ( $i, j = [1 \dots M]$ ).

При сопоставлении каждого временного интервала с дискретными шкалами преобразования для его длительности формируется множество оценок  $\{\bar{T}_i\}_{i=1}^M$ . Из выражения (9) следует, что для каждого члена этого множества в силу выражения

$$T \xrightarrow{U} \bar{T} = NT_e \quad (12)$$

или

$$T \xrightarrow{U} \bar{T} = (N + 1) T_e. \quad (13)$$

Множество оценок составлено из двух подмножеств. Каждое подмножество имеет одинаковые элементы:

$$\{\bar{T}\}_{i=1}^N = \{\bar{T}_p = N T_e\}_{p=1}^K \cup \{\bar{T}_q = (N + 1) T_e\}_{q=M-K}^M. \quad (14)$$

Кроме этого, для каждой оценки измеряемого интервала и его длительности равносильны выражения:

$$T = N T_e + \Delta_1, \quad (15)$$

и

$$T = (N + 1) T_e - \Delta_2, \quad (16)$$

где  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  — измерительные ошибки. Из-за аддитивного характера измерительной ошибки оптимальную оценку  $\bar{T}_{\text{opt}}$  ВИ определяют по правилу

$$\bar{T}_{\text{opt}} = \left[ \frac{\sum_{i=1}^M \bar{T}_i}{M} \right], \quad (17)$$

где  $[x]$  обозначена целая часть  $x$ . В этом случае для измерительной ошибки получается

$$-T_e \leq \Delta \leq 0. \quad (18)$$

Если  $P = [T_e(M - K)] / M$  — дробная часть выражения (17) и при выборе  $\bar{T}_{\text{opt}}$  следуют правилу

$$\bar{T}_{\text{opt}} = \begin{cases} \left[ \frac{\sum_{i=1}^M \bar{T}_i}{M} \right], & \text{если } P \leq 0,5; \\ \left[ \frac{\sum_{i=1}^M \bar{T}_i}{M} \right] + 1, & \text{если } P > 0,5; \end{cases} \quad (19)$$

то измерительная ошибка уменьшается до

$$\frac{T_e}{2} \leq \Delta \leq \frac{T_e}{2}. \quad (20)$$

В преобразователях время — код очень трудна реализация этих алгоритмов выбора оптимальной оценки. Осуществление операции сложения и деления требует больших аппаратных средств. Кроме этого, увеличивается время измерения временного интервала. С другой стороны, сохранение всех оценок и их передача в ЭВМ не всегда целесообразна и осуществима. Поэтому для эффективного приложения многофазного метода преобразования время — код необходим быстрый алгоритм для выбора оптимальной оценки.

Правую сторону выражения (17) можно представить в виде

$$\frac{\sum_{i=1}^M \bar{T}_i}{M} = NT_e + \frac{M-k}{M}T_e, \quad (21)$$

где  $k$  — количество оценок  $NT_e$ ,  $(M-k)$  — количество оценок  $(N+1)T_e$ ,  $NT_e$  — целая часть,  $[T_e(M-k)]/M$  — дробная часть.

Следовательно:

1. Вместо сложения и деления, чтобы реализовать оценки по выражению (17), необходимо выделить маленькую оценку и использовать ее как окончательную.
2. Оценку с подавляющим количеством можно определить из выражения

$$\bar{T}_{\text{opt}} = \begin{cases} NT_e, & \text{если } k \geq M-k, \\ (N+1)T_e, & \text{если } k < M-k. \end{cases} \quad (22)$$

В этом случае необходимо нечетное число каналов измерения.

Реализация подобных алгоритмов осуществляется при помощи сортировки элементов множества оценок. Для оптимальной оценки принимаются следующие элементы сортированного множества:

1. Элемент с порядковым номером  $i = 1$ ; соответствует наименьшей из двух оценок.
2. Медиана множества, или член с порядковым номером

$$l = \frac{M}{2} + 0,5, \quad \text{если } M = 2l + 1, \quad (23)$$

имеющий подавляющее количество во множестве оценок.

### 3. ПРОГРАММНАЯ МОДЕЛЬ. РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ. ТОЧНОСТЬ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

На рис. 2 представлена временная диаграмма работы многофазного счетно-импульсного метода преобразования время — код. Для определения разрешающей способности и точности преобразования мы создали компьютерную программу на языке «С». При помощи этой программы мы провели моделирование измерительного процесса по предложенному алгоритму. В качестве входных данных использовались:

- программно генерированный временный интервал;
- эталонный период тактовых импульсов —  $T_e$ ;
- количество каналов параллельной оценки генерированных ВИ —  $M$ ;
- шаг сдвига эталонных серий друг относительно друга —  $\phi$ .

На выходе программы получались минимальная и максимальная ошибка преобразования время — код. Кроме этого, в программе есть возможность для формирования и запоминания в виде массива всех ошибок измерения временных интервалов.

В приводимой таблице имеются результаты проведенных тестов. Анализ результатов показывает, что:

- а) Измерительная ошибка сведена до следующих границ:

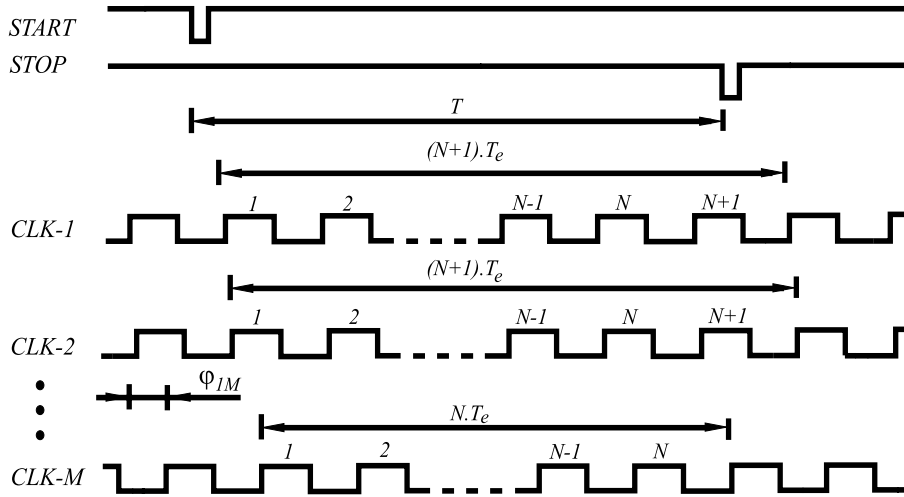


Рис. 2. Временная диаграмма сопоставления временного интервала с многофазной дискретной шкалой.  $T$  — измеряемый временной интервал,  $N T_e$  и  $(N + 1) T_e$  — оценки,  $\phi_{1M}$  — сдвиг между шкалами

Таблица 1. Ошибка преобразования в зависимости от выбора оценки

Количество шкалы для измерения временного интервала	Ошибка преобразования	
	Наименьшая из полученных оценок	Медианная оценка
1	$T_e \leq \Delta \leq T_e$	*
2	$-T_e \leq \Delta \leq 0,5T_e$	*
3	$-T_e \leq \Delta \leq 0,33T_e$	$\pm 0,66T_e$
4	$-T_e \leq \Delta \leq 0,25T_e$	*
5	$-T_e \leq \Delta \leq 0,2T_e$	$\pm 0,6T_e$
6	$-T_e \leq \Delta \leq 0,16T_e$	*
7	$-T_e \leq \Delta \leq 0,14T_e$	$\pm 0,57T_e$
8	$-T_e \leq \Delta \leq 0,125T_e$	*
9	$-T_e \leq \Delta \leq 0,11T_e$	$\pm 0,55T_e$

— если для оценки временного интервала принимается наименьшая из полученных оценок, то:

$$-T_e \leq \Delta \leq \frac{T_e}{M}; \quad (24)$$

— при выборе оценки, которая имеет подавляющую частоту повторения во множестве оценок, измерительная ошибка определяется из выражения

$$-\frac{M+1}{2M}T_e \leq \Delta \leq \frac{M+1}{2M}T_e, \quad (25)$$





### Литература

1. Розенберг В.Я. — Введение в теорию точности измерительных систем. М.: Советское радио, 1975.
2. Цитович А.П. — Ядерная электроника. М.: Энергоатомиздат, 1984.
3. Данилевич В.В., Чернявский А.Ф. — Временные измерения в физическом эксперименте. М.: Энергоатомиздат, 1984.
4. Мелешко Е.А. — Наносекундная электроника в экспериментальной физике. М.: Энергоатомиздат, 1987.
5. Никитюк Н.М. — Лекции для молодых ученых. Вып.42. Р1-87-909. Дубна, 1987.
6. Музыченко О.Н. — Измерительная техника. 1990, No.4, с.52.
7. Русанов И.Р., Атанасов И.Х. — Краткие сообщения ОИЯИ, 1998, No.6[92], с.55.

Рукопись поступила 7 февраля 2000 года.