

УДК 621.317

Е. И. Гурин, Н. Н. Коннов

(Пенза)

**ПОСТРОЕНИЕ СКОРОСТНЫХ ВЫСОКОТОЧНЫХ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ
СЕРИЙ ИМПУЛЬСНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ**

Предлагается применение принципов параллельной обработки в нониусных преобразователях временных параметров сигналов, повышающих их быстродействие. Дана обобщенная схема многоканального нониусного преобразователя временных интервалов, использующего принцип параллельности. Приводятся аналитические выражения для расчета вероятности безошибочного преобразования, позволяющие задавать требуемые параметры преобразователей.

Во многих областях науки и техники требуется преобразовывать в код с субнаносекундным разрешением временные параметры импульсных последовательностей: мгновенные периоды, длительности импульсов и т. д. [1—4]. Известные преобразователи временных интервалов можно разбить на две группы. Преобразователи первой группы, основанные на методе прямого счета, имеют ограниченную точность. К преобразователям второй группы, использующим косвенные методы, можно отнести нониусные измерители и преобразователи с промежуточным преобразованием в амплитуду. Эти преобразователи позволяют обеспечить требуемую точность, но имеют низкое быстродействие. В то же время в литературе отсутствует описание преобразователей, сочетающих высокую точность и высокое быстродействие. Таким образом, задача создания скоростных высокоточных преобразователей является в настоящее время актуальной.

Методы с промежуточным преобразованием в амплитуду широко используются в ядерно-физическом эксперименте [1, 2]. Они имеют хорошую разрешающую способность, однако практически реализованные преобразователи достаточно сложны, им присуща нелинейность шкалы, которую необходимо учитывать. Поэтому за основу авторами был выбран нониусный метод, позволяющий создавать относительно простые и в то же время достаточно точные преобразователи. Так, например, прибор 5370А фирмы "Hewlett-Packard" [3], реализованный на серийно выпускаемых элементах эмиттерно-связанной логики, которые имеют собственную задержку 1–2 нс, позволяет обеспечить разрешающую способность 20 пс.

В нониусном методе используются два сигнала: основной с периодом T_o и нониусный с периодом $T_v = (K + 1)T_o/K = T_o + T_q$, где K — коэффициент интерполяции (целое число); $T_q = T_o/K$ — разрешение нониусного метода (временной квант). Недостатком нониусного метода является его низкое быстродействие, вызванное, с одной стороны, собственно нониусным методом, а с другой — необходимостью вычисления кодов временных интервалов. Известные способы повышения быстродействия нониусного метода приводят к снижению точности [4].

В настоящей работе для повышения быстродействия предлагается использовать принципы параллельной обработки, широко применяемой при построении вычислительных систем: увеличение числа каналов преобразования с целью одновременного преобразования соседних временных интервалов в раз-

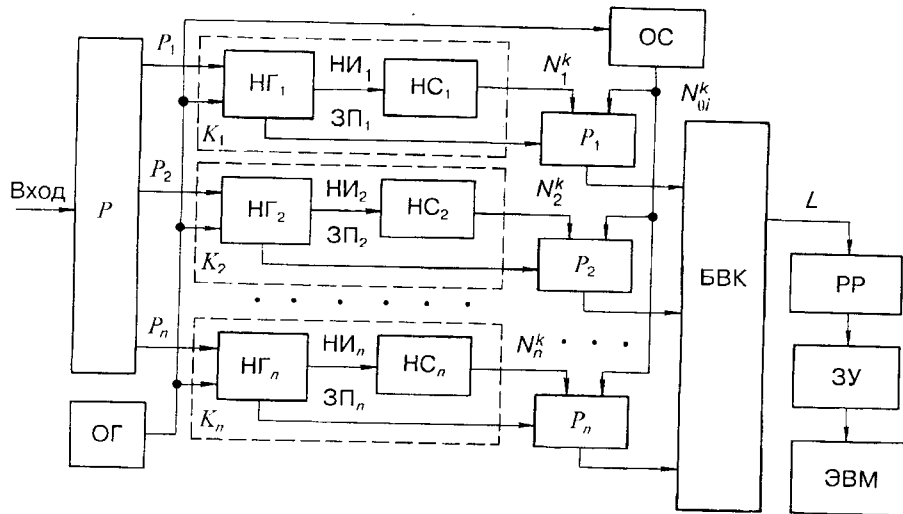


Рис. 1

ных нониусных генераторах при многократном их использовании [5, 6], а также конвейеризацию — вычисление кодов ранее поступивших временных интервалов с одновременным преобразованием интервалов, пришедших позднее. Это позволяет повысить быстродействие нониусных преобразователей при сохранении высокой точности нониусного метода.

На рис. 1 приведена обобщенная схема многоканального нониусного преобразователя временных интервалов, использующего принцип параллельности. В его состав входят: распределитель (P); опорный генератор (ОГ) с периодом T_n ; n каналов преобразования (K_1, K_2, \dots, K_n), включающих нониусные генераторы ($НГ_1, НГ_2, \dots, НГ_n$) и нониусные счетчики ($НС_1, НС_2, \dots, НС_n$); основной счетчик (ОС); регистры фиксации кодов (P_1, P_2, \dots, P_n); блок вычисления кодов (БВК); регистр результата (РР); запоминающее устройство (ЗУ) для фиксации кодов временных интервалов; ЭВМ.

Измеряемые интервалы t_i ограничиваются передними фронтами импульсов, причем m -й ($m = 2, 3, \dots$) импульс служит границей между $(m - 1)$ -м и m -м интервалами. Входные импульсы, отмечающие границы временных интервалов, поочередно распределяются по $НГ_1, НГ_2, \dots, НГ_n$. Первый импульс измеряемой серии запускает первый нониусный генератор, второй импульс — второй нониусный генератор и т. д. В первый генератор поступают импульсы с номерами 1, $n + 1, 2n + 1$ и т. д., во второй — 2, $n + 2, 2n + 2$ и т. д. Таким образом обеспечивается одновременное преобразование соседних временных интервалов в разных каналах преобразования. При этом возможно распределение импульсов по каналам преобразования не только в порядке очередности, но и с учетом занятости генераторов [6].

При поступлении запускающего импульса в i -й генератор на его выходе генерируются импульсы $НИ_i$ с периодом T , от момента запуска до совпадения передних фронтов опорного и нониусного сигналов, которые подсчитываются на нониусном счетчике. В момент окончания преобразования на управляющем выходе нониусного генератора вырабатывается импульс $ЗП_i$, по которому содержимое основного N_{oi}^k и нониусного N_i^k счетчиков записывается в регистр P_i .

После записи кода с выхода $НС_i$ в P_i i -й генератор освобождается для следующего запуска. Вычисление кода m -го временного интервала производится после записи $m + 1$ -й границы в соответствующий регистр. При этом преобразование очередных временных интервалов совмещается во времени с вычислением кодов ранее поступивших интервалов. Конвейеризация может использоваться также и в процессе вычисления кодов в БВК, а также при записи информации в ЗУ. Таким образом, одновременно могут выполняться

преобразование, вычисление кодов и фиксация в ЗУ ранее поступивших временных интервалов.

Вычисление кодов L_m временных интервалов в нониусных преобразователях может осуществляться различными способами. Для устранения погрешности грубого отсчета используется способ, в котором подсчитывается количество импульсов основного сигнала между моментами окончания преобразования [3]. Для многоканального измерителя формула для вычисления L_m имеет следующий вид:

$$L_m = K(N_{0j}^l - N_{0i}^k) + (K + 1)(N_i^k - N_j^l), \quad (1)$$

где i и j — номера каналов, запускаемых начальной и конечной границами m -го интервала, при этом $j = i + 1$ при $i < n$ и $j = 1$ при $i = n$; k и l — номера запуска i -го и j -го каналов, при этом $l = k$, если $i < n$, и $l = k + 1$, если $i = n$.

Формула (1) приведена для случая, когда $T_v > T_o$, однако возможны и другие варианты формул в случаях, если $T_v < T_o$ и подсчет импульсов основного сигнала осуществляется между границами временного интервала.

Схема на рис. 1 позволяет измерять временные интервалы между фронтами импульсов одной импульсной последовательности. Такая задача возникает при контроле фазовых искажений сигналов в каналах накопителей на магнитных дисках и в системах передачи информации. Если требуется измерять временные интервалы, поступающие от нескольких источников, то распределитель P должен иметь несколько входов и обеспечивать распределение импульсов по каналам преобразования в соответствии с требованиями эксперимента. Здесь возможны различные варианты распределения импульсов, которые определяются практическими требованиями. При случайном поступлении входных импульсов от нескольких источников может потребоваться запоминание последовательности номеров источников.

Рассмотрим работу многоканального преобразователя, в котором запуск нониусных генераторов производится в порядке очередности. Длительность преобразования T_c в нониусном генераторе зависит от момента T , поступления сигнала запуска внутри периода T_o . Если очередной импульс приходит в отрезок времени $0, \dots, T_q$ ($0 \leq T_r < T_q$), то длительность преобразования равна KT_v , если в отрезок времени $T_q, \dots, 2T_q$, то длительность преобразования равна $(K - 1)T_v$ и т. д. В общем случае, если $(i - 1)T_q \leq T_r < iT_q$ ($i = 1, 2, \dots, K$), то $T_c = (K - i + 1)T_v$.

Если следующий запускающий импульс поступает в канал преобразования до окончания текущего преобразования, то текущее преобразование прерывается и будет зафиксирована ошибка. Таким образом, можно утверждать, что для безошибочного преобразования необходимо выполнение условия

$T_n > T_c$, где $T_n = \sum_{i=1}^n \tau_i$ — время прихода в данный канал следующего запускающего импульса.

На плоскости $0t_n t_r$ (рис. 2) показаны области безошибочного преобразования, область прерывания текущего преобразования и зависимость $T_c = \varphi(t_r)$ (здесь и в дальнейшем T_n и T_r обозначают соответствующие величины; t_n и t_r — аргументы функций распределения). В общем случае возникновение ошибки зависит от двух случайных величин T_n и T_r , имеющих двумерную плотность $f_2(t_n, t_r)$. Вероятность одного безошибочного преобразования определяется двойным интегралом по области S_0 :

$$P_1 = \int_0^{KT_q} \int_{T_c=\varphi(t_r)}^{\infty} f_2(t_n, t_r) dt_n dt_r = \int_0^{\infty} \int_{t_r=\varphi_0(t_n)}^{KT_q} f_2(t_n, t_r) dt_r dt_n.$$

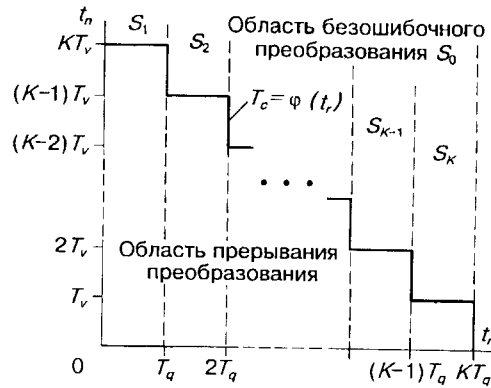


Рис. 2

Будем считать, что момент T_n прихода следующего импульса не зависит от длительности T_c текущего преобразования и соответственно от переменной T_r , которая равномерно распределена на интервале $0, \dots, T_o = KT_q$. Тогда

$$f_2(t_n, t_r) = \frac{1}{KT_q} f_n(t_n),$$

где $f_n(t_n) = \frac{dF_n(t_n)}{dt_n}$ — плотность распределения T_n ($F_n(t_n) = \int_{-\infty}^{t_n} f_n(t) dt$ — вероятность того, что суммарная длительность n временных интервалов меньше t_n).

Разобьем область безошибочного преобразования на прямоугольные области S_1, S_2, \dots, S_K . Каждая из этих областей S_i соответствует отрезку моментов поступления очередного импульса $(i-1)T_q, \dots, iT_q$ и длительности текущего измерения $(K-i+1)T_v$. Вероятность безошибочного преобразования P_1 в этом случае определится суммой

$$P_1 = \sum_{i=1}^K I_i,$$

где I_i — интеграл по участку S_i :

$$I_i = \int_{(K+1-i)T_v}^{\infty} \int_{(i-1)T_q}^{iT_q} \frac{1}{KT_q} f_n(t_n) dt_r dt_n = \frac{1}{K} \int_{(K+1-i)T_v}^{\infty} f_n(t_n) dt_n.$$

Окончательно для P_1 получим

$$\begin{aligned} P_1 &= \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \int_{(K+1-i)T_v}^{\infty} f_n(t_n) dt_n = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \left\{ 1 - \int_{-\infty}^{(K+1-i)T_v} f_n(t_n) dt_n \right\} = \\ &= \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \{ 1 - F_n[(K+1-i)T_v] \}. \end{aligned} \quad (2)$$

Пусть длительность преобразуемых временных интервалов τ_i распределена по нормальному закону с математическим ожиданием m_i и среднеквадратическим отклонением σ . Тогда суммарная длительность n временных интервалов распределяется в соответствии с формулой

$$F_n(t) = P \left\{ \sum_{i=1}^n \tau_i < t \right\} = \frac{1}{\sigma_n \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{(t - \sum_{i=1}^n m_i)^2}{2\sigma_n^2}} dt,$$

где $\sigma_n = \sqrt{n}\sigma$.

Подставляя $f_n(t) = \frac{dF_n(t)}{dt} = \frac{1}{\sigma_n\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t - nm_t)^2}{2\sigma_n^2}}$ в (2), после несложных преобразований получим

$$P_1 = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \left\{ 1 - 0,5 \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{J_i T_v - nm_t}{\sigma\sqrt{2\pi}} \right) \right] \right\},$$

где $J_i = (K + 1 - i)$.

На рис. 3 представлены зависимости P_1 при $m_t = 6T_o$ и $\sigma = T_o$. Если преобразуется серия из $(m - 1)$ интервалов (m границ), то вероятность безошибочного преобразования всей серии с учетом того, что последние n преобразований не прерываются, равна $P = P_1^{m-n}$. На практике в зависимости от конкретной ситуации могут использоваться следующие варианты задания параметров преобразователей:

1) выбирается число каналов исходя из того, чтобы исключить прерывания в текущих измерениях;

2) задается допустимая вероятность возникновения прерывания в серии, и, если прерывание возникает, то измерение повторяется.

Так, например, для серии из 19 временных интервалов ($m = 20$) при $n = 3$ и $K = 16$ получаем $P_1 = 0,97$, $P = 0,62$. Если установить данные параметры, то при измерении примерно каждой третьей серии будет возникать прерывание. Если по условиям эксперимента это недопустимо, то можно уменьшить K , например, до величины 14, при которой $P_1 = 0,996$, $P = 0,938$. Полученные результаты позволяют выбрать параметры преобразователя для заданной интенсивности поступления временных интервалов.

Несмотря на то что принцип распараллеливания позволяет повысить быстродействие нониусных преобразователей, это повышение имеет свои пределы: текущее преобразование должно завершиться к моменту поступления очередного импульса в канал. Максимальное быстродействие достигается в преобразователе, в котором нониусные шкалы генерируются непрерывно [7].

Приведенная на рис. 1 схема является универсальной. В зависимости от конкретного случая возможны модификации данной структуры. Так, например, может отсутствовать БВК; коды с выходов ОС, НС₁, НС₂, ..., НС_{*n*} во время измерения фиксируются в буферном ЗУ, обладающем высоким быстродействием, а затем передаются в ЭВМ для вычисления кодов L_m по формуле (1). В этом случае принцип конвейерной обработки не используется, а быстродействие повышается только за счет одновременного преобразования соседних временных интервалов [8]. Если в такой схеме предусмотреть дополнительные разряды в буферном ЗУ для фиксации совместно с кодами нониусных счетчиков N_i^k кода номера источника, то окажется возможным ее использование для

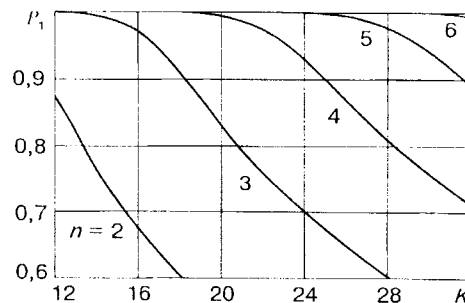


Рис. 3

измерения случайных интервалов, поступающих от нескольких источников. Временные интервалы в этом случае могут определяться между любой парой импульсов.

Частным случаем схемы, приведенной на рис. 1, является измеритель временных интервалов с двумя каналами преобразования, в котором применяется аппаратное вычисление кодов L_m [10]. При этом в формуле (1) индекс m может быть опущен, начальное значение $N_{01}^1 = 0$, в результате получается известная формула [3]

$$L = KN_0 + (K + 1)(N_1 - N_2).$$

В этом случае используется конвейерная обработка, когда i -й интервал фиксируется в ЗУ, одновременно $i + 1$ -й интервал обрабатывается в БВК и $i + 2$ -й интервал преобразуется в нониусных генераторах.

Применение принципа распараллеливания позволяет использовать множество одинаковых каналов. Это дает возможность реализовать отдельные каналы на современной элементной базе, например, с применением базовых матричных кристаллов или программируемых логических интегральных схем, что существенно снижает аппаратные затраты.

На основе предлагаемого принципа распараллеливания преобразования был разработан ряд преобразователей с разрешением 0,5—0,9 нс и быстродействием 10^6 — 10^7 преобразований в с. Длительная эксплуатация разработанных устройств в автоматизированных системах контроля накопителей на магнитных дисках показала высокую эффективность предлагаемого принципа создания преобразователей, сочетающих высокое быстродействие и высокую точность [8—10].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беспалько В. А. Интерполятор для прецизионных измерителей времени // Измер. техника. 1993. № 4. С. 20.
2. Мерзляков С. И., Стрекаловский О. В., Цурин И. П. Четырехканальный субнаносекундный преобразователь время—код // ПТЭ. 1995. № 5. С. 102.
3. Chu D., Allen M., Foster A. Universal counter resolves picoseconds in time interval measurements // Hewlett-Packard Journ. 1978. 29, N 12. P. 2, 10.
4. Богородицкий А. А., Рыжевский А. Г. Нониусные аналого-цифровые преобразователи. М.: Энергия, 1975.
5. А. с. 930213 СССР. Измеритель серии временных интервалов /Н. П. Вашкевич, Е. И. Гурин, Н. Н. Коннов. Опубл. 23.05.82, Бюл. № 19.
6. А. с. 1004954 СССР. Измеритель серии временных интервалов /Н. П. Вашкевич, Е. И. Гурин, Г. И. Князев, Н. Н. Коннов. Опубл. 15.03.83, Бюл. № 10.
7. А. с. 913328 СССР. Измеритель серии временных интервалов /Н. П. Вашкевич, Е. И. Гурин, Н. Н. Коннов. Опубл. 15.03.82, Бюл. № 10.
8. Гурин Е. И. Трехканальный нониусный преобразователь время—код // ПТЭ. 1997. № 3. С. 99.
9. Гильдеев Н. А., Гурин Е. И., Коннов Н. Н. и др. Тестер-анализатор временных и фазовых искажений сигналов информации в НМД // Технический прогресс в атомной промышленности. Сер. Организация производства и прогрессивные технологии в приборостроении. 1991. Вып. 6. С. 34.
10. Гурин Е. И., Коннов Н. Н., Механов В. Б., Попов К. В. Быстродействующий нониусный измеритель временных интервалов // ПТЭ. 1997. № 3. С. 102.

Поступила в редакцию 19 июля 1997 г.