

И. И. КРИВАЛЬ, А. И. СКРИПНЮК, В. А. ПРОЦЕНКО,
А. В. МАРЬЕНКО

Украина, г. Киев, ОАО «Меридиан» им. С. П. Королёва
E-mail: Feedback@meridian.kiev.ua

Дата поступления в редакцию
31.03 2010 г.

Оппонент к. т. н. Э. Н. ГЛУШЕЧЕНКО
(НПП «Сатурн», г. Киев)

МАЛОГАБАРИТНЫЙ ЦИФРОВОЙ ЧАСТОТОМЕР С ВЫСОКОЙ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТЬЮ

Рассмотрены методы измерения частоты и времени, принцип действия, области применения, краткие технические и метрологические характеристики частотомера UA ЧЗ-64/2.

Развитие ряда направлений науки и техники определяется точностью измерения временных и частотных параметров. Среди эталонов основных физических величин самыми точными являются эталоны времени и его производной — частоты. Поэтому и измерения частоты и ее обратной величины — периода являются самыми точными.

Область применения частотно-измерительной аппаратуры непрерывно расширяется. Поэтому в последнее время в таких областях науки и техники как связь, радиолокация, радионавигация, метрология и др. большим спросом пользуются частотомеры, которые измеряют не только частоту синусоидальных сигналов и несущую частоту радиоимпульсных сигналов, но и временные интервалы прохождения этих сигналов с высокой разрешающей способностью.

Еще в 80-е годы 20 века в Украине был разработан и серийно выпускался на заводе «Радиоприбор» им. С. П. Королёва вычислительный частотомер ЧЗ-64/1, который частично решал эти задачи. В настоящее время этот прибор морально устарел и снят с производства.

В ОАО «Меридиан» им. С. П. Королёва, право-наследнике завода «Радиоприбор», которое является ведущим предприятием в области различной частотно-измерительной аппаратуры не только в Украине, но и на всем постсоветском пространстве, выполнена разработка малогабаритного цифрового частотомера с высокой разрешающей способностью UA ЧЗ-64/2. В настоящее время на предприятии ведется подготовка производства к его серийному выпуску.

Так как частотомер UA ЧЗ-64/2, кроме частотных параметров сигналов, измеряет интервалы времени с высокой разрешающей способностью, а также имеет интерфейсы канала общего пользования (КОП) и RS-232, его можно отнести к категории высокоточных измерительных приборов, которые могут работать как в автономном режиме, так и в составе сложных метрологических комплексов. Частотомер относится к разряду образцовых средств измерения [1], т. е. к тем, что переносят точность рабочих эталонов

на результат измерений, тем самым обеспечивая единство измерений на основе Закона «О метрологии и метрологической деятельности» в самых разных областях — от нанотехнологий до технологий навигации, телефонной связи и радиосвязи.

Методы измерения частоты и времени

Из всех существующих методов измерения частоты и времени прохождения сигнала оптимальным является метод дискретного счета, который заключается в подсчете электронным счетчиком числа импульсов, являющегося функцией измеряемой величины за образцовый интервал времени.

В свою очередь, частотомеры, построенные по дискретному методу, разделяются на частотомеры «прямого счета» и частотомеры «обратного счета».

Принцип прямого счета характеризуется подсчетом числа периодов M измеряемой частоты за известный образцовый интервал времени t_0 . Результат измерения M определяется как

$$M = t_0 / t_x = t_0 f_x,$$

где t_x — период измеряемой частоты;
 f_x — измеряемая частота.

Относительная погрешность измерения из-за дискретности счета $\delta_{\text{дс}}$ на низких частотах может достигать значительных величин. Она определяется выражением [2]

$$\delta_{\text{дс}} = \pm 1/M = \pm 1/(t_0 f_x). \quad (1)$$

Значительно меньшей погрешностью из-за дискретности счета обладают частотомеры обратного счета, суть работы которых заключается в измерении периода t_x или суммы периодов исследуемого сигнала с последующим вычислением значения частоты f_x как $f_x = 1/t_x$. Измерение периода t_x происходит путем заполнения его импульсами известной образцовой частоты f_0 . В этих частотомерах относительная погрешность из-за дискретности счета определяется выражением [2]

$$\delta_{\text{дс}} = \pm 1/(k t_x f_0) \quad (2)$$

где k — целое число периодов t_x .

Из выражения (2) следует, что в данном случае погрешность из-за дискретности счета обратно пропорциональна эталонной частоте f_0 . С целью уменьшения погрешности эталонную частоту f_0 выбирают максимально большой с учетом элементной базы, позволяющей реализовать схемные решения.

Принцип действия измерителя частоты и времени

Для построения частотомера, измеряющего временные интервалы с высокой разрешающей способностью, оптимальным является принцип обратного счета. Он наиболее органично позволяет использовать метод интерполяции временных интервалов, что в свою очередь позволяет значительно уменьшить составляющую погрешности, связанную с квантованием сигнала.

Рассмотрим это более подробно.

Допустим, необходимо измерить некий интервал времени $\tau_{изм}$ (рис. 1), который состоит из определенных отрезков:

$$\tau_{изм} = \tau_0 + \tau_1 - \tau_2, \quad (3)$$

где τ_0 — интервал времени между вторым после начала измеряемого интервала $\tau_{изм}$ и вторым после конца измеряемого интервала тактовыми импульсами опорной частоты 100 МГц;

τ_1 — интервал времени между началом измеряемого интервала и вторым тактовым импульсом, который следует за ним;

τ_2 — интервал времени между концом измеряемого интервала $\tau_{изм}$ и вторым, следующим за ним тактовым импульсом частоты 100 МГц.

Из рис. 1 видно, что измеряемый интервал $\tau_{изм}$ равен целому числу периодов N частоты 100 МГц плюс ΔT_1 и ΔT_2 . Если измерить точно величину временных интервалов ΔT_1 и ΔT_2 , то в результате будет значительно увеличена точность измерения за счет уменьшения погрешности квантования.

Для облегчения аппаратной обработки к временным интервалам ΔT_1 и ΔT_2 добавляется по периоду опорной частоты T , и в дальнейшем, при формировании измеряемого интервала, учитывают τ_1 и τ_2 , т. е.

$$\begin{aligned} \tau_1 &= \Delta T_1 + T, \\ \tau_2 &= \Delta T_2 + T. \end{aligned} \quad (4)$$

В частотомере интервалы τ_1 и τ_2 расширяются в M_1 и M_2 раз, соответственно ($M_1 \approx M_2 \approx 128$), и измеряются точно так же, как и τ_0 — счетно-импульсным методом (суммированием целого числа периодов опорной частоты 100 МГц).

По результатам измерений вычисляются следующие величины:

$$N_0 = \tau_0 / T; \quad N_1 = (M_1 \tau_1) / T; \quad N_2 = (M_2 \tau_2) / T, \quad (5)$$

где N_0 — количество целого числа периодов тактовой частоты 100 МГц за время τ_0 ;

N_1 — количество целого числа периодов тактовой частоты 100 МГц за время $\tau_1 M_1$ (расширенный интервал ΔT_1);

N_2 — количество целого числа периодов тактовой частоты 100 МГц за время $\tau_2 M_2$ (расширенный интервал ΔT_2).

Тогда длительность одиночного измеряемого интервала $\tau_{изм}$ будет определяться как

$$\tau_{изм} = 10(N_0 + N_1/M_1 - N_2/M_2 - \Delta N_{рас}), \quad (6)$$

где $\tau_{изм}$ — выражается в наносекундах, разрешающая способность — 100 пс;

$\Delta N_{рас}$ — коэффициент, учитывающий взаимное рассогласование интерполяторов.

Если необходимо измерить временной интервал, который повторяется, то происходит процесс усреднения. При этом дополнительно подсчитывается число усредненных за время измерения (время счета) интервалов N_E . Результат измерения вычисляется следующим образом:

$$\tau_{изм} = 10(N_0 + N_1/M_1 + N_2/M_2 - N_E \Delta N_{рас}) / N_E. \quad (7)$$

В режиме измерения периода число N_E есть количество усредняемых периодов, и тогда период будет определяться как

$$T_{изм} = 1/f_{изм} = 10(N_0 + N_1/M_1 - N_2/M_2 - \Delta N_{рас}) / N_E. \quad (8)$$

Значение частоты, которая измеряется, определяется как величина, обратная периоду, т. е. $f_{изм} = 1/T_{изм}$.

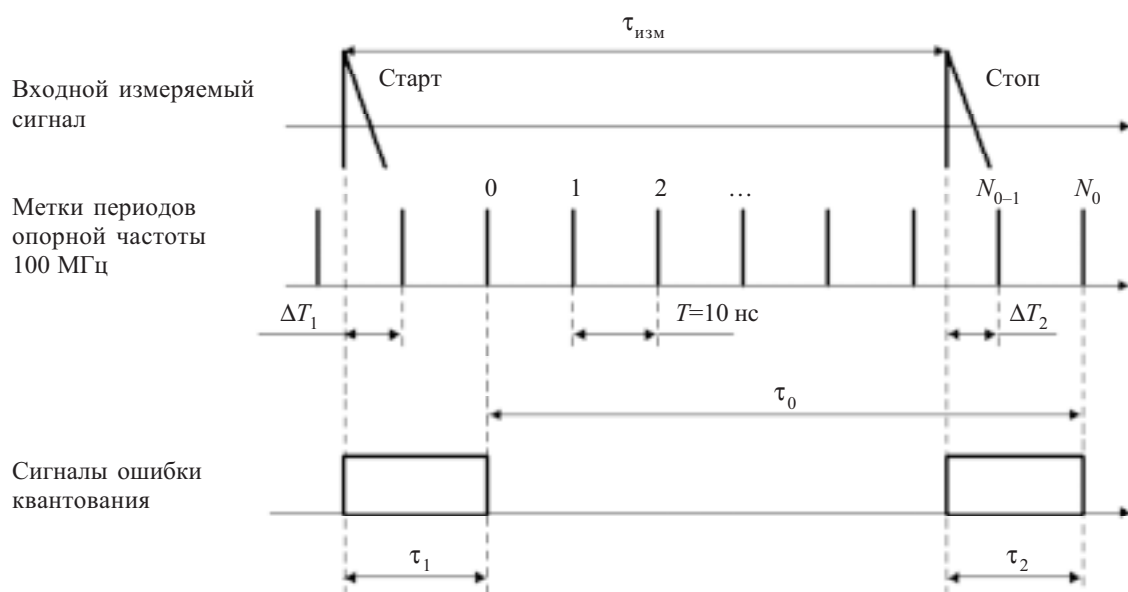


Рис. 1. Формирование измеряемого интервала времени

При измерении несущей частоты импульсно-модулированных колебаний происходит процесс измерения и формирования интервалов времени, которые лежат внутри огибающей отнормированного входного радиоимпульса. Эти интервалы равны длительности целого числа периодов несущей частоты.

За установленное время счета частотомера происходит определение суммарного числа периодов N_0 сигнала опорной частоты 100 МГц, суммарного числа периодов опорной частоты 100 МГц интерполяторов N_1 и N_2 , суммарного числа периодов сигнала несущей частоты N_E , числа радиоимпульсов $N_{и}$, коэффициента деления частоты входного делителя K_d . Результат измерения $f_{нес}$ определяется как

$$f_{нес} = (K_d N_E) / 10(N_0 + N_1/M_1 - N_2/M_2 - N_{и} \Delta N_{рас}). \quad (9)$$

Практическая реализация измерителя частоты и временных интервалов

Частотомер, работающий по описанному принципу действия, реализован по структурной схеме, приведенной на рис. 2.

Усилители-формирователи каналов *A* и *B* предназначены для усиления и формирования входных сигналов. В делителе частоты происходит деление входной частоты на 8. Линия задержки служит для задержки радиоимпульса на 50 нс с целью его нормирования по длительности для исключения переходных процессов в начале и конце радиоимпульса.

Селектор предназначен:

— для формирования импульсов длительностью τ_1 и τ_2 ;

— для формирования из входного сигнала строба *E* (измеряемый интервал времени) и из сигнала опорной частоты 100 МГц строба *Ж* (эталонного временного интервала, равного измеряемому интервалу с точностью до периода опорной частоты). Длительность строба *Ж* фактически равна времени счета частотомера $\tau_{сч}$;

— для подсчета числа колебаний входного сигнала за время прохождения строба *E* и сигнала опорной частоты за время прохождения строба *Ж*.

Формирователь опорных сигналов (**ФОС**) предназначен для формирования из частоты кварцевого генератора 10 МГц опорных сигналов с частотами 5 и 100 МГц.

Интерполятор содержит два одинаковых канала и служит для расширения импульсов сигнала ошибки квантования τ_1 и τ_2 в 128 раз с последующим их измерением методом счета числа колебаний сигнала опорной частоты 100 МГц.

Счетчик предназначен для подсчитывания числа колебаний опорной частоты при проведении измерений, обмена информацией с микропроцессорным контроллером (**МПК**) посредством шины данных (**ШД**).

МПК служит для управления алгоритмом работы частотомера, обеспечения функционирования каналов общего пользования (**КОП**) и RS-232 через ШД, шину адреса (**ША**) и шину управления (**ШУ**).

Блок индикации отображает результаты измерения. Блок питания предназначен для выработки стабилизированных напряжений +12, -12, +5 В.

Рассмотрим алгоритм работы прибора при измерении частоты и периода по каналу *A*.

Усиленный и отнормированный входной сигнал с выхода усилителя поступает на селектор, где происходит формирование стробов *E* и строба *Ж*.

После прихода с МПК команды «Пуск» формирователь строба *E* срабатывает в момент поступления первого после сигнала «Пуск» импульса входного сигнала. А после поступления второго после начала строба *E* импульса сигналов опорной частоты срабатывает формирователь строба *Ж*.

В момент переполнения счетчика сигнал «Пуск» заканчивается, и формирователь строба *E* возвращается в исходное состояние в момент поступления второго после окончания строба *E* импульса опорной

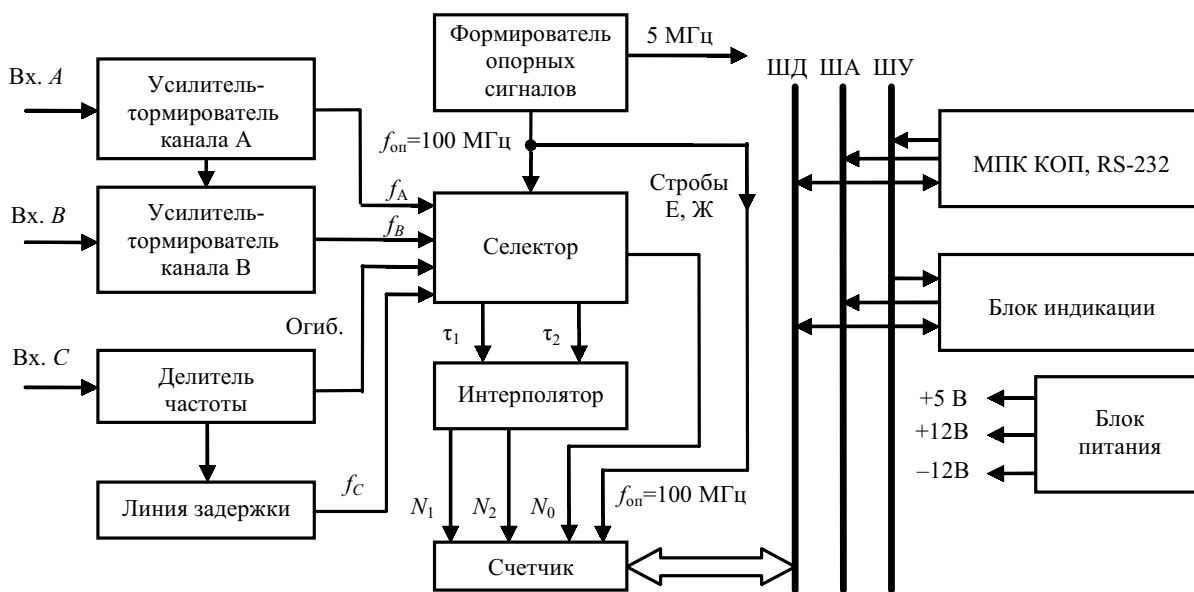


Рис. 2. Структурная схема частотомера UA ЧЗ-64/2

частоты. Таким образом, длительность строба Е равна целому числу периодов входного сигнала, а длительность строба Ж — целому числу периодов сигнала опорной частоты.

В селекторе также происходит формирование импульсов длительностью τ_1 и τ_2 . Величина τ_1 равна задержке начала строба Ж относительно начала строба Е, а величина τ_2 — задержке конца строба Ж относительно конца строба Е.

После расширения в интерполяторе импульсов длительностью τ_1 и τ_2 в 128 раз происходит подсчитывание N_1 и N_2 .

По окончании прохождения стробов Е и Ж прекращается процесс измерения, и МПК переходит к приему информации со счетчика с последующим вычислением измерительного периода T_A по формуле (6).

Измеряемая частота f_A вычисляется как функция, обратная периоду T_A , т. е. $f_A = 1/T_A$.

Алгоритм измерения частоты по входу С следующий.

Входной сигнал поступает на вход делителя частоты, где происходит его усиление и деление его частоты на 8. Здесь же дополнительно формируется огибающая радиоимпульса.

Строб Е будет представлять собой серию строб-импульсов, длительность каждого импульса равна целому числу периодов входного сигнала и приблизительно равна длительности огибающей радиоимпульса. Формируется строб так же, как и при измерении частоты или периода по каналу А.

Интерполяционные импульсы τ_1 и τ_2 вырабатываются на каждый строб-импульс. Вычисление определяемой частоты f_C производится по формуле (7).

При измерении интервала времени сигнал «Старт» подается на вход А, а сигнал «Стоп» — на вход В частотомера.

При измерении длительности импульсов t_a измеряемый сигнал подается на вход А, затем в усилитель-формирователе канала А он ответвляется также на усилитель-формирователь канала В. Далее измерение происходит аналогично измерению временного интервала.

Разработанный частотомер многофункционален и позволяет выполнять:

- автоматическое измерение частоты и периода синусоидальных и импульсных сигналов;
- измерение несущей частоты импульсно-модулированных сигналов;
- измерение отношения частот двух электрических сигналов;
- счет числа колебаний электрических сигналов;
- измерение интервалов времени;
- измерение длительности импульсов.

Применение метода обратного счета совместно с интерполяцией позволило создать средство измерений с высокими техническими и метрологическими характеристиками (см. таблицу), получить высокую разрешающую способность при измерении временных интервалов (<100 пс), значительно уменьшить погрешность измерения как частоты синусоидальных

Краткие технические характеристики частотомера



Наименование характеристики	Значение
Диапазон измерения: — частоты синусоидальных сигналов — частоты и периода сигналов импульсной формы — несущей частоты (с абсолютной погрешностью измерения $\leq 0,5$ МГц)	0,1 Гц — 1500 МГц 0,1 Гц — 150 МГц 100 — 1500 МГц
Уровни входных сигналов в диапазоне частот: — 0,1 Гц — 150 МГц — 100—1000 МГц — 1000—1500 МГц	50 мВ — 10 В 10 мВ — 1 В 200 мкВт — 10 мВт
Диапазон измерения длительности: — импульсов — интервала времени	10 нс — $2 \cdot 10^4$ с 0 — $2 \cdot 10^4$ с
Разрешающая способность измерения	100 пс
Номинальная частота опорного кварцевого генератора	10 МГц
Стабильность частоты опорного кварцевого генератора за 12 мес.	$\pm 10^{-7}$
Питание прибора	220 \pm 22 В, 50 \pm 0,5 Гц; 115 \pm 6 В, 110 В, 400 Гц
Потребляемая мощность	≤ 50 В·А
Рабочий диапазон температуры	От -10 до +50 $^{\circ}$ С
Средняя наработка на отказ	≥ 8000 ч
Габаритные размеры	307 \times 115 \times 112 мм
Масса	6 кг
Интерт ейс	КОП, RS-232

сигналов, так и несущей частоты радиоимпульсных сигналов.

По сравнению с частотомером ЧЗ-64/1 в несколько раз уменьшены массогабаритные характеристики прибора, более чем в три раза уменьшено его энергопотребление, существенно повышена точность измерения.

Частотомер выполнен на современной элементной базе, что способствует достижению высоких точностных характеристик и параметров надежности. Прибор малогабаритен, прост в управлении и удобен в работе.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. ДСТУ 2705-96. Частотомери електронні цифрові. Технічні вимоги та методи випробовувань.
2. Аппаратура для частотных и временных измерений / Под ред. А. П. Горшкова. — М.: Сов. радио, 1971.