

Прецизионный частотомер для фундаментальной метрологии

Жмудь В.А., Гончаренко А.М.
ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет»,
Новосибирск, Россия

Аннотация: Описан прецизионный частотомер для исследования и аттестации лазерных и атомных стандартов частоты. Даны принцип действия и технические характеристики.

Ключевые слова: частотомер, измерения частоты, функция Алена.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность высокоточных измерений частоты за различные интервалы времени является следствием необходимости развития глобальной спутниковой навигационной системы ГЛОНАСС, где для высокоточных измерений расстояний требуются не менее высокоточные эталоны времени или частоты. Имеющиеся эталоны частоты не соответствуют предъявляемым к ним требованиям, поскольку их относительная погрешность составляет единицы 14-го знака, тогда как для указанной системы необходимы эталоны частоты с погрешностью порядка единицы 18-го знака. Поэтому ведущие научные коллективы осуществляют интенсивные поисковые исследования для создания прототипа эталона частоты нового поколения, обеспечивающего требуемую точность. Аттестация таких эталонов требует прецизионных частотомеров. Поскольку по методике аттестации применяются два или более эталона, при этом методом гетеродинного смешивания формируется разностная частота, которая непосредственно при смешивании или иным путем переносится на достаточно стабильную несущую частоту для последующего измерения. Требования к точности указанных частотомеров уже не столь жесткие, а именно: погрешность таких частотомеров не должна быть более единицы 10-го знака, но при этом возникают следующие дополнительные требования.

1. Измерительные интервалы должны изменяться от сверхмалых (менее 0,001 с) до сверхбольших (более 1000 с) величин.

2. Недопустимо «мертвое время» между измерительными интервалами.

3. Желательна возможность одновременного измерения нескольких частот единым устройством (что гарантирует единую базу времени и общие измерительные интервалы).

Обоснование преимуществ метода

целочисленных периодов для решения этой задачи дано в работе [1]. Этот принцип измерения состоит в следующем.

1. Первичные интервалы измерения выбираются достаточно малыми, как правило, 1 мс.

2. Осуществляется подсчет количества импульсов измеряемой частоты на этом интервале, а также измеряется точное время фронта первого импульса, попавшего в данный интервал, а также фронта первого импульса, попавшего в следующий интервал. Разность этих времен дает точную длительность целого числа периодов измеряемой частоты, уложившихся на выбранном измерительном интервале.

3. «Мертвое время» отсутствует, поскольку конец каждого измерительного интервала является началом следующего.

При использовании метода целочисленных периодов увеличение длительности интервала может быть выполнено вычислением по ранее полученным результатам измерений за меньшие интервалы. При этом результат вычислений будет такой же, как если бы использовался указанный интервал непосредственно, поскольку время фронтов промежуточных граничных импульсов не войдет в этот результат. Поэтому если при увеличении времени усреднения с использованием традиционного частотомера (обладающего «мертвым временем»), погрешность будет уменьшаться обратно пропорционально квадратному корню из коэффициента увеличения измерительного интервала, то в частотомере, использующем описанный принцип, эта компонента погрешности будет уменьшаться обратно пропорционально этому коэффициенту без корня.

1. ПРОГРАММНО-АППАРАТНАЯ ЧАСТЬ ЧАСТОТОМЕРА

Аппаратная часть измерителя состоит из двух частей: устройства сбора первичных данных (УСПД) и компьютера для вторичной обработки собранных данных и отображения результата измерений. УСПД реализовано на серийно изготавливаемой «оценочной плате» (Evaluation Board), представляющей собой микроконтроллер со встроенным тактовым генератором, цифровыми и аналоговыми

входами. Такие устройства получили в последнее время широкое распространение: их предназначение состоит в предоставлении разработчику полного инструментария для изучения всех возможностей нового микропроцессорного устройства, предлагаемого к продаже. Такие платы недороги и достаточно универсальны, они легко могут быть приобретены и запрограммированы под заданные функции. Предлагаемое УСПД программируется так, что в итоге оно содержит генератор опорной частоты, счетчики со схемой управления и формирователь счетных импульсов. УСПД осуществляет по трем

каналам непрерывный счет количества передних фронтов входного сигнала и по синхроимпульсу один раз в миллисекунду снимает показание счетчиков, а также измеряет время от начала синхроимпульса до первого после синхроимпульса фронта сигнала (с погрешностью не более 1 нс), данные собираются в пакеты, и передаются программе *FreqAndAllanLabNSTU* через стандартный последовательный порт (*RS-232*). Пакеты дополняются контрольной суммой, если при приеме произошла ошибка, то пакет посылается повторно.

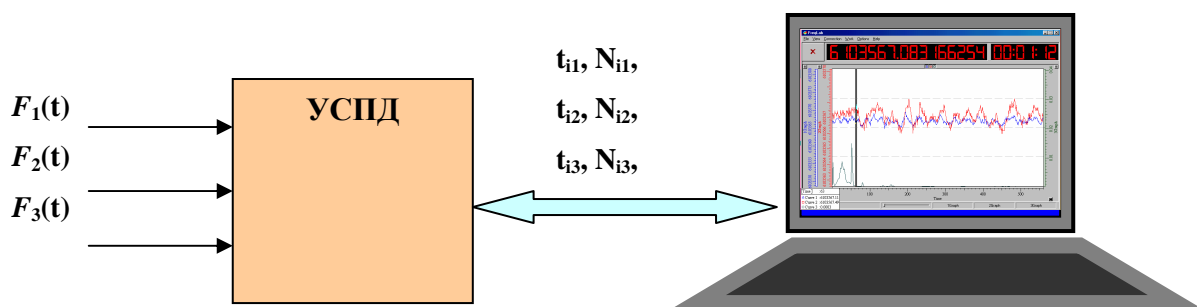


Рис. 1. Упрощенная схема аппаратной части частотомера

Программная часть реализована программой *FreqAndAllanLabNSTU* [2]. Эта программа осуществляет сбор и обработку данных от УСПД, включая вычисление статистических параметров (среднее арифметическое, среднеквадратическое отклонение, двухвыборочная дисперсия Аллана). Указанная программа развивает принципы, реализованные в программе, описанной в статье [3].

Из получаемых данных возможно вычисление частоты на любом интервале времени измерения с дискретностью в 1 мс . Характерное для цифровых частотомеров «мертвое время» (время, когда частотомер перезапускается) полностью отсутствует. Программа в режиме реального времени одновременно для разных интервалов измерения вычисляет статистические параметры сигналов и осуществляет их отображение на экране монитора по мере накопления информации. Короткие интервалы содержат 600 точек от 1 мс до 600 мс с дискретностью 1 мс , средние - 600 точек от 50 мс до 30 мс с дискретностью 50 мс , длинные - 600 точек от $2,5 \text{ с}$ до 1500 с и с дискретностью $2,5 \text{ с}$. Логарифмический масштаб интервалов измерения - 600 точек, начало и конец определяется пользователем. Реализованы режимы измерения частоты, периода, разности фаз, функция передачи вычисленных статистических параметров в *Microsoft Excel* с отображением данных на графиках.

Программа осуществляет запись полученных

данных в файл, таким образом, реализована возможность осуществлять постобработку и анализ данных из файла, сравнение с полученными ранее данными. Время сбора информации и непрерывного мониторинга не ограничивается (определяется размером дискового пространства ПЭВМ, скорость потока данных составляет 6 Кб в секунду, или $518,4 \text{ Мб}$ в сутки). В режиме прореживания информации объем данных для записи в файл существенно уменьшается, например, при записи данных один раз в секунду объем записываемой в файл информации составляет $518,4 \text{ Кб}$ в сутки. Тип ЭВМ: IBM PC-совместимый ПК. Язык программирования C++, среда разработки "Microsoft Visual Studio 2008". Операционная система: Windows XP. Объем программы: 174 Кб .

2. УПРОЩЕННОЕ ОПИСАНИЕ ПРИНЦИПА ДЕЙСТВИЯ УСТРОЙСТВА

В измерителе повышена точность и устранено мертвое время за счет непрерывного счета счетчиков, осуществляющих подсчет количества импульсов. Данное устройство развивает идеи и принципы, описанные в публикациях [2–11]. Хотя устройство содержит три измерительных канала, принцип его действия можно рассмотреть на примере работы одного канала. В одном канале имеется три счетчика, при этом один из них является общим для всех каналов, так что для добавления двух каналов добавляется еще две пары счетчиков.

Таким образом, в этом устройстве один счетчик осуществляет непрерывное измерение времени, подсчитывая количество импульсов образцовой частоты, другой счетчик подсчитывает количество импульсов измеряемой частоты, третий счетчик осуществляет измерения длительностей поправочных импульсов, сформированных специальной схемой и растянутых во времени в 1000 раз с высокой точностью. В многоканальном счетчике время измеряется общим счетчиком, а остальные счетчики для каждого канала индивидуальны.

Счетчики времени и счетчики количества импульсов работают без остановки, чтение их показаний осуществляется без остановки счета, что обеспечено специальной схемой синхронизации счетных импульсов, а также соответствующим выбором малой разрядности этих счетчиков. Малая разрядность обеспечивает быструю установку окончательного значения кода за счет короткого пути схемы переноса разрядов. Как правило, малая разрядность в традиционных схемах нежелательна, поскольку эта малость ограничивает длительность интервала усреднения частоты. В использованном техническом решении старшие разряды счетчика восстанавливаются программно. Действительно, достаточно выбрать такое время между считываниями показаний короткого счетчика, чтобы за это время переполнение этого счетчика могло бы происходить не более чем один раз, и чтобы в случае его переполнения новый код не стал больше, чем был до переполнения. Это условие, например, будет выполнено, если максимально высокая частота из всех возможных за заданное наперед время счета может заполнить счетчик менее чем на 100%, например, на 90%. Тогда если очередное показание счетчика больше предыдущего, то переполнения не было, следовательно, приращение кода может быть вычислено вычитанием старого показания из нового. Если же очередное показание меньше предыдущего, следовательно, переполнение имело место, и к новому коду следует добавить емкость счетчика, после чего вычислить приращение путем вычитания старого показания из полученного значения.

Например, емкость счетчика составляет $Q = 128$. Если, допустим, предыдущее показание было равно $M_K = 37$, а новое показание равно $M_{K+1} = 86$, то количество поступивших импульсов равно $\Delta M_K = M_{K+1} - M_K = 86 - 37 = 49$. Если же, например, предыдущее показание было равно $M_K = 37$, а новое показание равно $M_{K+1} = 26$, то количество поступивших импульсов равно $\Delta M_K = Q + M_{K+1} - M_K = 128 + 26 - 37 = 117$.

Другим техническим решением, позволяющим считывать показания счетчиков

«на лету», является синхронизация выполнения команды считывания, например, передним фронтом тактовых импульсов при том условии, что срабатывание счетчиков осуществляется по задним фронтам тех же импульсов. Таким образом, между временем счета счетчиков и временем их считывания проходит фиксированное время, равное половине периода тактовых импульсов. Так как тактовая частота наперед задана, и время срабатывания счетчиков также известно, можно легко рассчитать количество разрядов счетчика, при котором считывание будет корректным. Например, если время установления одноразрядного счетчика составляет t_0 , а количество разрядов в счетчике составляет m , то расчетное время установления на выходе счетчика стабильного кода составляет $t_m = m \cdot t_0$. Если половина периода тактовой частоты больше этой величины, по крайней мере, на 10%, можно быть уверенным, что считывание счетчиков «на лету» будет осуществлено корректно.

Таким образом, от каждого счетного импульса схема синхронизации формирует новый импульс, задержанный до времени прихода очередного переднего фронта импульсов образцовой частоты, поэтому момент изменения кода счетчиков всегда совпадает с моментом поступления одного из этих фронтов. Чтение кодов счетчиков в регистр («зашелкивание») синхронизовано с задними фронтами этих же импульсов. Поэтому «зашелкивание» и счет разнесены во времени, а чтение в компьютер осуществляется из регистра и не требует остановки счета.

Дополнительным преимуществом такой схемы измерения является однозначное отнесение каждого импульса измеряемой частоты только к одному из двух соседних измерительных интервалов. Границы измерительных интервалов синхронизованы с задними фронтами образцовых импульсов, а счетные импульсы – с передними фронтами. Поэтому даже если фронт исходного импульса совпадет с границей измерительных интервалов, синхронизованный импульс будет отнесен строго к следующему интервалу, а не к предыдущему, он не будет потерян и не будет сосчитан дважды. Возникающее запаздывание этих импульсов не меняет количества этих импульсов в заданном интервале. Потери или искажения информации не происходит, задержанный импульс используется только для счета количества целых периодов измеряемой частоты в измерительном интервале, а уточнение дробной части осуществляется по исходному импульсу. Это обеспечивает наряду с устранением «мертвого времени» снижение погрешности измерения.

Уточнение ошибки дискретности достигнуто благодаря дополнительному каналу оценивания длительности между передним фронтом

импульсов, управляющих считыванием, и ближайшим фронтом импульсов измеряемой частоты [7–8]. Измерение этих временных интервалов осуществляется применением схемы растяжки импульса и дополнительным счетным измерителем интервала [8]. Таким образом, наряду с формированием заданной длительности измерительного интервала τ_i и подсчетом количества N_i счетных импульсов, попавших в этот интервал, дополнительный канал измеряет поправку $\Delta\tau_i$ – длительность от начала измерительного интервала до ближайшего следующего фронта измеряемой частоты. Поскольку измерительные интервалы следуют строго один за другим, без перерыва, очередная поправка для начала i -го интервала является одновременно поправкой для конца ($i-1$)-го интервала. Полученное целое количество импульсов измеряемой частоты F_x относится, таким образом, не к образцовому интервалу τ_i , а к уточненному интервалу $\tau_i^* = \tau_i - \Delta\tau_i + \Delta\tau_{i+1}$.

Из получаемых программой данных от прибора формируются переменные:

1) количество передних фронтов сигнала с момента начала измерений,

2) точное время последнего фронта с момента начала измерений,

3) порядковый номер измерения.

Используя полученные данные, программа в режиме реального времени вычисляет статистические свойства сигнала, функцию Аллана, среднеквадратическое отклонение одновременно по 600 разным временам осреднения и полученные результат выводит на экран монитора. Основным параметром прибора является разрешающая способность 50 ns . Прибор выполнен на *FPGA Cyclone IVE* фирмы *Altera*. Для измерения интервалов времени используется 128-разрядный сумматор. При суммировании двух чисел в сумматоре происходит перенос из младшего в старший разряд, время переноса составляет около 50 ns . Таким образом, за $6,4 \text{ ns}$ происходит полное суммирование двух 128-разрядных бинарных чисел. По переднему фронту импульса запускается суммирование двух чисел, а по заднему фронту импульса результат незаконченного суммирования “защелкивается” в 128 разрядный регистр. Числа для суммирования подобраны таким образом, что “бегущая волна” появляется на выходе сумматора в процессе измерения. На *рис. 2* показана бегущая волна на выходе сумматора.

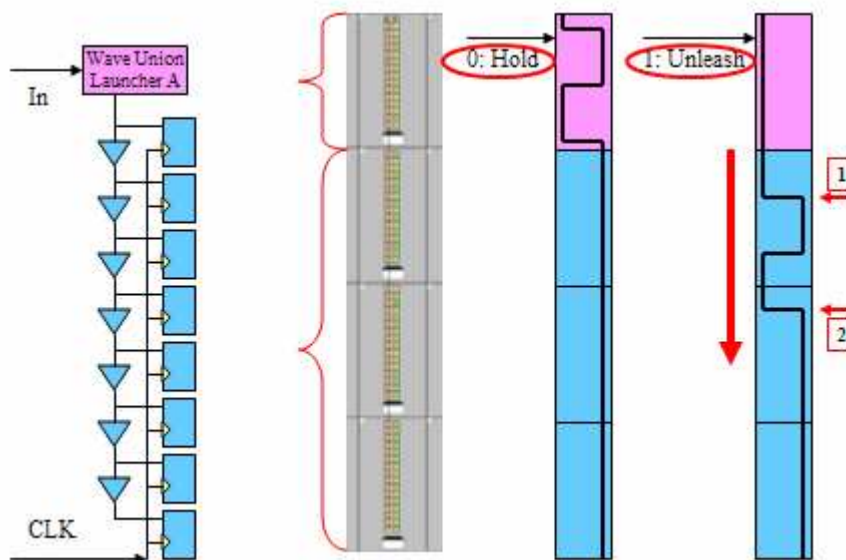


Рис. 2. Бегущая волна на выходе сумматора

Результат на выходе сумматора декодируется, декодер определяет местоположение фронтов волны, и выдает восьмиразрядное число, соответствующее времени измеряемого импульса.

Модуль *Encoder*, проект для программирования которого показан на *рис. 3*, выполняет функцию измерения коротких интервалов.

Входные сигналы модуля *Encoder*:

CLK250 – опорная частота 250 МГц .

Z[127..0] – 128 разрядная переменная, все разряды которой равны нулю.

V[0..127] – 128 разрядная переменная, все разряды которой равны единице.

Z[127..0] и *V[0..127]* используются для формирования чисел в результате суммирования которых, возникает “бегущая волна” переносов.

START – по переднему фронту импульса начинается измерение.

STOP – по переднему импульсу заканчивается измерение.

Выход *DATAOUT[7..0]* – восьмиразрядный результат измерения

Модуль написан на языке описания аппаратуры *VERILOG*.

Такая методика преобразования длительности импульса в цифровой код имеет существенный недостаток, заключающийся в том, что временная задержка одной ячейки

зависит от температуры и напряжения питания. Поэтому применяется автоматическая калибровка. Структура для применения этой калибровки показана на рис. 4.

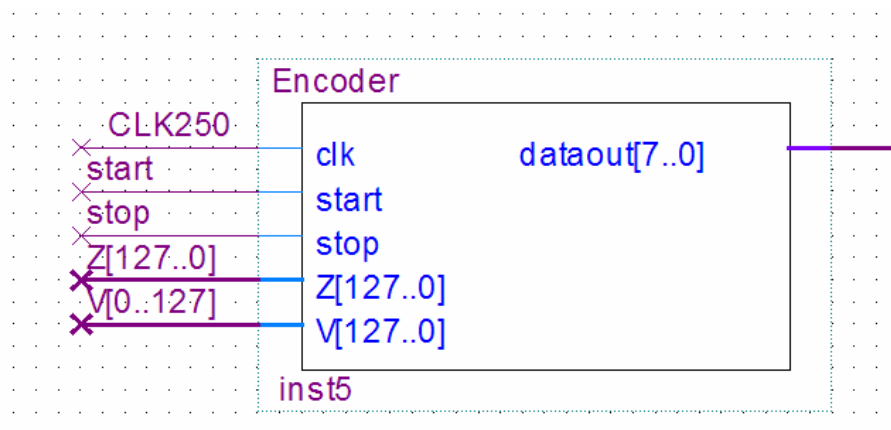


Рис. 3. Проект модуля Encoder

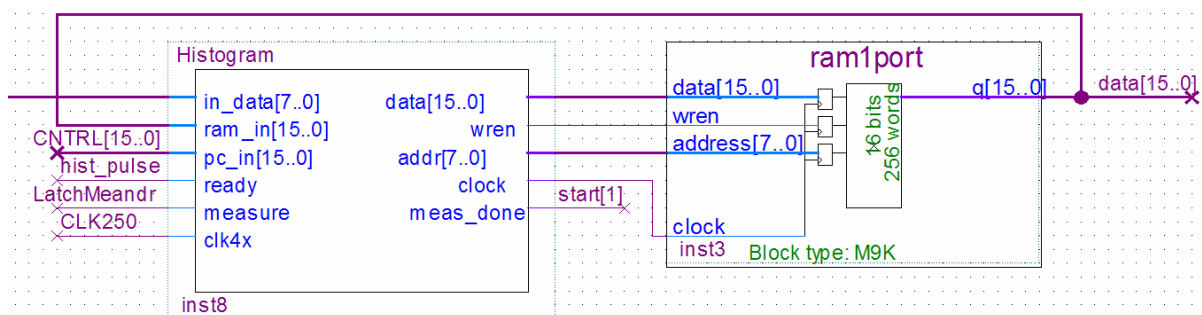


Рис. 4. Структура для применения автоматической калибровки

По переднему фронту сигнала *LatchMeandr* – меандр с частотой 1 КГц, определяет частоту измерений, запускается очередное измерение, а по заднему фронту сигнала *LatchMeandr* запускается процесс калибровки. Таким образом калибровка осуществляется постоянно.

После прохождения заднего фронта сигнала *LatchMeandr* производятся 1024 измерения сигнала калибровки *CALIBR* с частотой равной $(CLK250 \times 64) / 1023 = 15,64 \text{ МГц}$. По переднему фронту *CALIBR* запускается *START* модуля *Encoder*, по переднему фронту сигнала опорной частоты *CLK250* снимаются показания модуля *Encoder*.

Частоты 250 МГц и $(CLK250 \times 64) / 1023$ подобраны таким образом, чтобы за 1024 измерения проходили все фазовые соотношения между сигналами и время между стартом и стопом занимали равномерно все возможные значения. Далее программа строит гистограмму.

Модуль памяти *ram1port* состоящий из 256 шестнадцатитибитных ячеек памяти собирает информацию о частоте появления того или иного кода на входе *in_data[7..0]* модуля *Histogram* (получающего информацию с выхода модуля *Encoder*).

Длительность $delay[i]$ временной задержки переноса *i*-го разряда сумматора

пропорциональна числу накопленному в *i*-ой ячейке памяти *ram1port*.

После накопления гистограммы модуль *Histogram* вырабатывает сигнал *meas_done* по которому при помощи процессорного модуля *FreqLab_SOPC* (порты ввода-вывода *CNTRL[15..0]* и *data[31..0]*, подсоединенные соответственно к входу модуля *Histogram* *CNTRL[15..0]* и выходу *data[15..0]* модуля *ram1port*), происходит считывание памяти и передача информации в персональный компьютер.

Программа *FreqAndAllanLabNSTU* на персональном компьютере пересчитывает гистограмму (массив чисел) *Histogram[256]* полученную от процессора *FreqLab_SOPC* таким образом, чтобы общая длительность задержки соответствовала числу полученному на выходе *Encoder*.

Измеренное время в терминах периода опорной частоты при получении от модуля *Encoder* значения *EncoderData* вычисляется следующим образом:

$$IntervalTime = (1/2048) \times Histogram[EncoderData].$$

Соответственно, чтобы получить время в секундах, необходимо разделить *IntervalTime* на частоту опорного сигнала.

Модуль *Histogram* накапливает данные в

памяти в течении 512 циклов по 1024 измерений после каждого заднего фронта сигнала *LatchMeandr*, в результате в модуле памяти *ram1port* накапливаются $512 \times 1024 = 524288$ результатов калибровки для составления гистограммы за время 512 мс.

Число 2048 в знаменателе для формулы *IntervalTime* получается из соображений 524288 результатов калибровки разделить на 256 ячеек гистограммы ($524288 / 256 = 2048$).

Структура модуля *FreqLab_SOPC* показана на рис. 5.

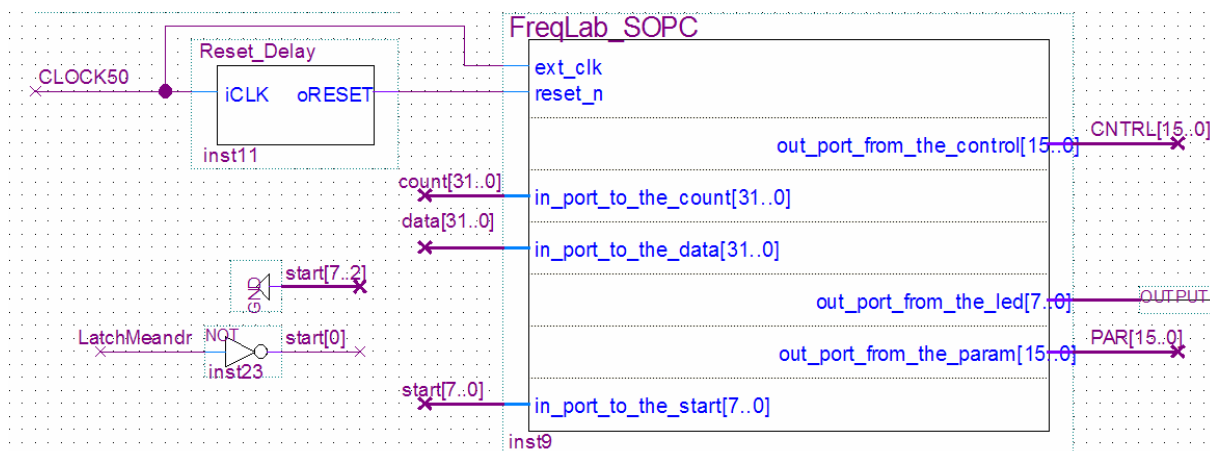


Рис. 5. Структура модуля *FreqLab_SOPC*

Модуль *FreqLab_SOPC* использует прерывания (вход *start[0]*) по заднему фронту сигнала *LatchMeandr* для считывания результатов измерений (данные от счетчиков измеряемых сигналов, данные от модуля *Encoder*, и данные от модуля счетчика опорной частоты).

По переднему фронту сигнала *meas_done* от модуля *Histogram* осуществляется прерывание для считывания гистограммы (вход *start[1]*).

Программа для модуля *FreqLab_SOPC* буферизирует и по запросу пересылает данные в компьютер. Размер буфера соответствует 1280 измерений, эквивалентно 1,28 с вполне достаточно для “*Windows* измерений”. Данные пересылаются пакетами размером 2048 б через порт *USB*, пакет состоит из 128 измерений и текущей гистограммы.

Модуль счетчика *FreqCount* количества импульсов измеряемого сигнала, прошедших от начала старта измерений написан на языке описания аппаратуры *VERILOG*.

Модуль *IntervalCount* непрерывно считает количество импульсов сигнала опорной частоты, и выдает точное время прохождения прохождения переднего фронта импульса *LatchPulse*

```
module IntervalCount(input LatchPulse , input clk,
output reg [31:0] count);
reg [31:0] cnt;
always @ (posedge clk)
    cnt <= cnt + 1;
always @ (posedge LatchPulse)
    count <= cnt;
```

endmodule

Процессор *FreqLab_SOPC*, по по заднему фронту *LatchMeandr* считывает данные со всех регистров посредством мультиплексора *CountValue*, задавая адрес счетчика *CNTRL[11..10]*, и читая данные с выхода мультиплексора *data[31..0]*.

Модуль *LatchPulse* вырабатывает одноименный сигнал *LatchPulse*. Этот сигнал играет решающую роль в измерении. Сигнал с частотой 1 *КГц* от *LatchMeandr* синхронизируется с выбранным сигналом *Signal[i]*, выбор осуществляется процессором посредством мультиплексора *Gate123*, и порта *CNTRL*, получается сигнал *LatchChoice*.

По сути измеряется время положительного фронта сигнала *LatchChoice* с разрешением 50 пикосекунд, и количество импульсов *Signal[i]* соответствующее *LatchChoice* с момента начала измерений. Такая схема позволяет легко наращивать количество одновременно непрерывно измеряемых каналов.

Сигнал *LatchChoice* в модуле *LatchPulse* синхронизируется сигналом опорной частоты *CLK250* двукратно, сначала по положительному фронту *CLK250*, а затем по отрицательному фронту *CLK250*, в результате получается сигнал *LatchPulse*, по которому “защелкиваются” показания всех счетчиков в соответствующие регистры.

Время задержки между сигналами *LatchChoice* и *LatchPulse*, измеряется модулем *Encoder* с разрешением 50 нс.

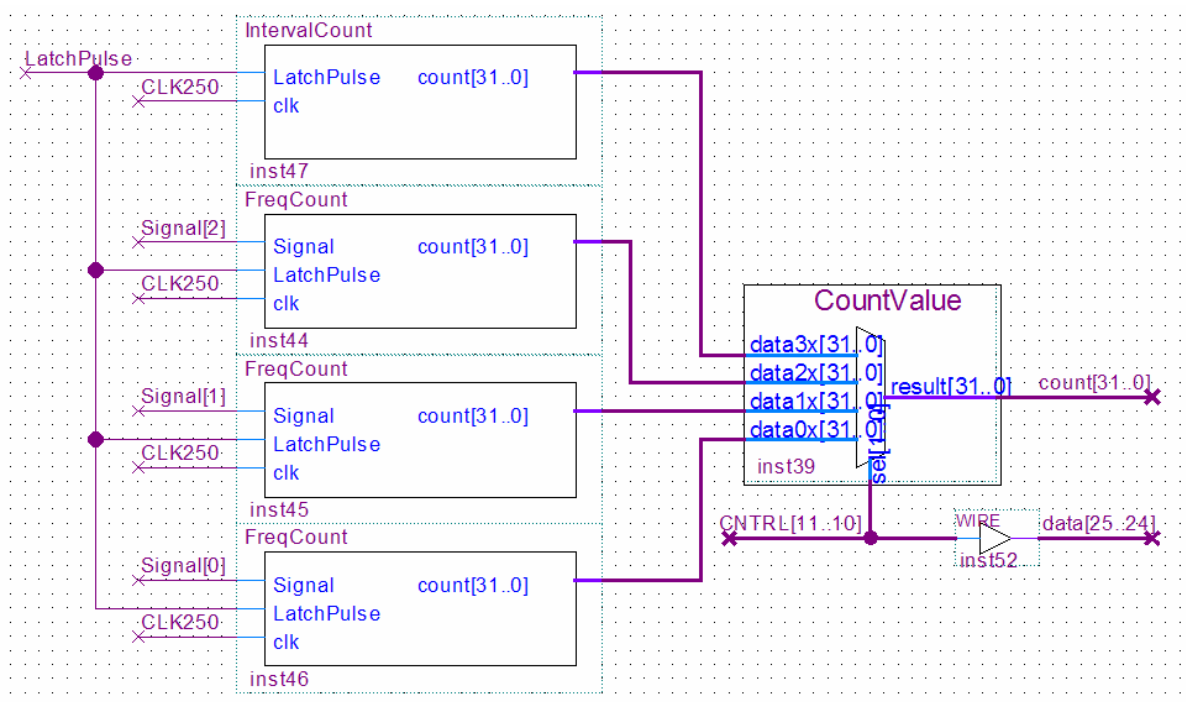


Рис. 6. Структура модуля счетчика FreqCount

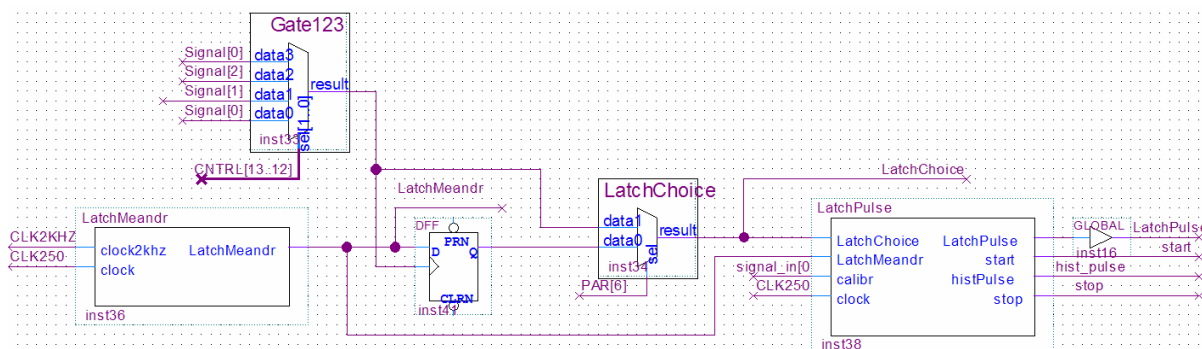


Рис. 7. Структура модуля IntervalCount

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧАСТОТОМЕРА

Технические характеристики частотомера определены расчетно-модельным путем.

Разрешающая способность по времени $\Delta t = 47 \text{ ns}$, расчет сделан по функции Алана [10], при времени осреднения $\tau = 1 \text{ ms}$.

Измерение частоты $F = 250 \times 64 / 1023 = 15,64 \text{ МГц}$ дает $\Delta F = 0,73 \text{ Гц}$ в функции Алана, что составляет $\Delta F / F = 0,73 / 15640000 = 0,00000004667$, переходя в временную часть это означает, что временное разрешение равно $\Delta t = 46,7 \text{ ns}$.

Также следует упомянуть обеспечение уникальной возможности при относительно высокой частоте получения новых данных измерения (например, если новое измерение осуществляется через каждые $T = 1 \text{ ms}$, частота взятия отсчетов составляет $f = 1 \text{ КГц}$) время осреднения частоты может быть любым.

Мало того: достигнуто получение результатов измерений со всем спектром значений времени измерения, например, $0,001 \text{ c}$;

$0,01 \text{ c}$; $0,1 \text{ c}$; 1 c ; 10 c ; 100 c и так далее.

Указанные значения могут браться с шагом дискретности T . То есть доступны значения средней частоты (а также функции Алана) со значениями 1 ms ; 2 ms ; ... 1000 ms ; 1001 ms ; 1002 ms ; ... и так далее.

Другим важным свойством является возможность отображения результата измерения, включая полученные характеристики (функции Алана) в реальном времени на экране компьютера. Вследствие высокой точности прибора (десять порядков) даже при экспериментах, связанных с исследованием или аттестацией лазерных или атомных стандартов частоты, в ходе функционирования таких стандартов на графике заметны даже крайне малые изменения частоты.

В частности, при исследовании лазерного стандарта частоты наблюдалась реакция этого стандарта на вибрацию. Также можно увидеть зависимость частоты от пульсации напряжения питания, а также возбуждение систем фазовой автоподстройки частоты, применяемых в таких стандартах. Таким

образом, разработанный частотомер является ценным инструментарием для исследования и сертификации лазерных и атомных стандартов частоты. Отметим, что относительная погрешность на уровне единиц десятого порядка следует относить к разностной частоте двух или более стандартов, согласно традиционной методике испытаний [10]. При смешении двух близких высокостабильных частот (например, смешивание двух лазерных пучков света на общем фотоприемнике) нестабильности их складываются статистически (то есть итоговая дисперсия равна сумме дисперсий, стандартное отклонение равно корню из суммы стандартных отклонений), а среднее значение получаемой частоты равно разнице между смешиваемыми частотами, то есть оно значительно меньше самой исследуемой частоты. Для удобства измерений это значение без потери точности переносится на некоторую несущую частоту, удобную для измерения. Например, частота стандарта равна $F_S = 10^{14}$ Гц, нестабильность в 18-м знаке соответствует приращению частоты порядка $\Delta F = 10^{-4}$ Гц. Если разностная частота перенесена на частоту $F_0 = 10^5$ Гц, то для измерения этой нестабильности в идеале достаточна погрешностью частотомера $\sigma F = 10^{-5}$ Гц или меньше. В этом случае измеряемая величина будет по крайней мере на порядок больше погрешности измерителя. Именно такой погрешностью и обладает описываемый частотомер.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] В.А. Жмудь. Прецизионные измерения частоты для аттестации частотных стандартов. (Новосибирск, НГТУ, Россия). Автоматика и программная инженерия. 2014. 1(7). С. 104–119.
- [2] Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2013611160 FreqAndAllanLabNSTU. Правообладатель: ФГБОУ ВПО НГТУ. Россия. Авторы: Гончаренко А.М., Жмудь В.А. Заявка № 2012660915 от 11 декабря 2012 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 9 января 2013 г.
- [3] С.В. Бугров, А.М. Гончаренко, В.А. Жмудь, А.А. Воевода. Программное обеспечение и функциональные возможности многоканального прецизионного быстродействующего частотомера. Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. - 2006. - N 3(24). с.171-178.
- [4] А.М. Гончаренко, В.А. Жмудь, А.А. Воевода, С.А. Авилов. Микропроцессорный прецизионный трехканальный высокоскоростной частотомер без «мертвого времени». Приборы и техника эксперимента. 2007. N2. с. 78-83.
- [5] В.А. Жмудь, А.А. Воевода, А.М. Гончаренко. Многоканальный прецизионный быстродействующий частотомер. Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2005. N 1(19). С. 73 – 82.
- [6] А.М. Гончаренко, А.А. Воевода, В.А. Жмудь. Аттестация трехканального прецизионного быстродействующего частотомера. Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2005. N 2. с. 175–178.
- [7] Патент РФ N 2210785 (приоритет от 13.07.01.) Цифровой частотомер. В.А. Васильев, В.А. Жмудь, А.М. Гончаренко. Опул.: Гос. реестр изобретений РФ. Бюлл. N23, 20.08.03. G01 R25/00, H03 D13/00
- [8] А.М. Гончаренко, В.А. Жмудь. Цифровой частотомер. Патент РФ на изобретение N2278390. G01R 23/02. Опул. Бюлл. N17, от 20.06.06.
- [9] Патент РФ N 2210783 (приоритет от 20.08.01.) Преобразователь масштаба времени. В.А. Васильев, В.А. Жмудь, А.М. Гончаренко. Опул.: Гос. реестр изобретений РФ. Бюлл. N23, 20.08.03. G01 R23/00
- [10] Борисов Б.Д., Васильев В.А., Гончаренко А.М., Жмудь В.А. Методика оценки стабильности стандартов частоты. // Автотриметрия, 2002, №3, с.104 – 112.
- [11] В.А. Жмудь. Частотные измерения в прецизионных лазерных системах. Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2002. N 2(13). с.127-136.
- [12] Язык VERLOG. Официальный сайт разработчика. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AF%D0%B7%D1%8B%D0%BA_%D0%BE%D0%BF%D0%B8%D1%81%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D1%8F%D0%B0%D0%BF%D0%BF%D0%B0%D1%80%D0%B0%D1%82%D1%83%D1%80%D1%8B



Вадим Аркадьевич Жмудь – заведующий кафедрой Автоматики НГТУ, профессор, доктор технических наук, автор более 200 научных статей, включая 10 патентов и 6 учебных пособий. Область научных интересов и компетенций – теория автоматического управления, электроника, лазерные системы, оптимизация, измерительная техника.
E-mail: oao_nips@bk.ru



Гончаренко Анатолий Михайлович – ведущий программист Института лазерной физики СО РАН, автор более 40 научных статей, 6 патентов и 4 программных продуктов. Область научных интересов: программное обеспечение, измерения частот и фаз, лазерная физика.

Precision Frequency Meter for Basic Metrology

V.A. ZHMUD, A.M. GONCHARENKO

Abstract: The paper describes precision frequency meter for investigation and testing of laser and atomic frequency standards. Action bases and technical parameters are given.

Key words: Frequency meter, measuring of frequencies, Allen function.