ПРЕЦИЗИОННЫЙ ЦИФРОВОЙ ЧАСТОТОМЕР С ЧАСТОТНО-ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКОЙ

М.Л. Абрамов, Б.Д. Борисов, В.А. Васильев, Н.А. Кузякин

Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск, Российская Федерация

В Институте лазерной физики СО РАН разработан, запатентован [1] и изготовлен действующий макет быстродействующего прецизионного цифрового частотомера. Устройство позволяет измерять частоту, фазу и характеристики их нестабильности в форме среднеквадратической относительной двухвыборочной вариации [2] (девиации Аллана) и через USB выход платы частотомера регистрировать относительный дрейф фазы и значений частоты – до 15 знаков у высокоточных генераторов, синтезаторов и стандартов частоты. Диапазон входных частот 1–160 МГц и разрешение лучше 10^{-7} Гц ограничены примененной элементной базой и могут быть расширены. Приведены примеры наблюдаемых изменений нестабильности фазы и результаты измерения нестабильности частоты разработанным устройством.

Ключевые слова: частота, фаза, измерение, частотомер, синтезатор, частотно-фазовая автоподстройка, характеристики нестабильности.

THE PRECISION FREQUENCY METER WITH F-PLL

M.L. Abramov, B.D. Borisov, V.A. Vasiliev, N.A. Kuzyakin,

Institute of Laser Physics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

In Institute of laser physic SB RAS the digital high precision frequency meter with frequency-phase lock loop (F-PLL) is designed, patented and manufactured. Device allows to measure the frequency, phase and characteristics of their instability in the form of a mean-square relative two-sample variation [2] (Allan deviation) and to record the relative drift of the phase and frequency values through the USB output of the frequency meter board – up to 15 characters for high-precision generators, synthesizers and frequency standards. The input frequency range of 1–160 MHz and a resolution better than 10^{-7} Hz are limited by the applied elemental base and it can be expanded. Examples of the observed changes in phase instability and the results of measuring the frequency instability by the developed device are given.

Keywords: frequency, phase, measurements, frequency meter, synthesizer, PLL, measure of instability.

Развитие физики и техники формирует тенденцию перехода не только к переопределению основных физических единиц (метр, секунда) через частоту или период высокостабильного колебания, но и к сведению измерений многих физических параметров и величин к частотным измерениям, обеспечивающим более высокую точность в сравнении с другими.

Одним из наиболее распространенных измерительных приборов является частотомер. Его основными параметрами стали точность измерения частоты и время измерения. Можно легко увеличить точность при одновременном увеличении времени измерения. Обычный счетный частотомер позволяет измерять частоту с дискретностью 1 Гц за 1 секунду или соответственно 0,01 Гц за 100 секунд. Используя аналоговую, временную растяжку, на краях измерительных интервалов можно получить улучшение точности в определенных условиях до нескольких порядков, особенно на низких частотах. Примером может служить серийный измерительный частотомер ЧЗ-63, где на порядок увеличена точность измерения на том же интервале времени. Единичное измерение за интервал счета и значительный джиттер такого преобразования приводят к большим погрешностям.

В разработанном устройстве решены задачи по сокращению времени счета, улучшению точности и получению непрерывного результата измерения без «мертвого» времени.

Конструктивно прибор выполнен в виде приставки (платы) к персональному компьютеру и состоит из двух узлов: блока питания, в котором сосредоточены все тепловыделяющие стабилизаторы, и собственно измерительного блока, выполняющего преобразование частоты входного сигнала в цифровой код, который далее поступает на обработку и индикацию текущего значения частоты. Блок-схема измерительного блока приведена на рис. 1.

Рис. 1. Блок-схема прецизионного цифрового частотомера

Принцип работы частотомера основан на методе сравнения двух частот сигналов: одна частота – неизвестная, входная F_x ; вторая F_s – известная, формируется DDS синтезатором [3] на базе микросхемы AD9912 фирмы Analog Device. Дискретность установки частоты синтезатором составляет 4 мГц (при опорной частоте синтезатора 1 ГГц). Сравнение частот осуществляется двумя функциональными узлами – частотным компаратором, выполненным на микросхеме MC100EP140, и фазовым детектором, работающим по схеме «исключающее ИЛИ».

На вход прибора подается неизвестная частота F_x , значение которой необходимо измерить. В исходном состоянии частота на выходе синтезатора F_s устанавливается в середину рабочего диапазона входных частот. После запуска процесса измерения частоты начинает работать частотный компаратор. На его выходе две линии формируют три состояния: частота синтезатора больше входной частоты, частота синтезатора меньше входной частоты и состояние ожидания результата сравнения частот. Алгоритм работы микроконтроллера аналогичен процессу измерения напряжения с АЦП, работающему по методу «последовательных приближений».

Сигналы сравнения с выхода частотного компаратора определяют, в какой половине рабочего диапазона частот находится входной сигнал. Если поступил сигнал F_x больше F_s , исключается из рассмотрения нижняя половина диапазона, и поиск продолжается уже в верхней, суженной вдвое зоне поиска. Далее синтезатор устанавливается в середину верхней половины зоны и определяется, в какой теперь уже четверти зоны находится частота входного сигнала. Если поступил сигнал F_x меньше F_s , исключается из рассмотрения верхняя половина оставшегося диапазона сравнения и продолжается поиск уже в нижней, суженной вдвое зоне.

Вновь и вновь, определяя в какой уменьшенной в очередной раз вдвое зоне поиска, оставшейся после очередного сравнения, остался входной сигнал, частотно-фазовая автоподстройка (ЧФАП) делает постоянные приближения частоты синтезатора к частоте входного сигнала, тем самым в пределе сравнивает частоты с высокой точностью. Некомпенсированная величина равна в среднем половине дискретности установки частот синтезатором и уровнем фазовых шумов.

Оба выхода частотного компаратора соединены с входами прерывания микроконтроллера, и последний, используя результат сравнения, постоянно и более точно приближает частоту синтезатора к неизвестной входной частоте.

Принципиально используя указанный алгоритм, уже достаточно, чтобы определить частоту входного сигнала. Однако недостатком этого алгоритма является низкое быстродействие, так как частота импульсов сравнения в среднем кратна разности частот. При получении точности в 1 Гц время приближений может составить секунду. Соответственно, для получения высокой точности, например в 0,1 Гц, надо потратить около 10 секунд, а для выхода на уровень единиц мкГц потребуется около миллиона секунд, что, конечно, неприемлемо.

Для повышения быстродействия предприняты дополнительные схемные решения.

А. Подаем на вход таймеров микроконтроллера эталонную частоту, импульсы сравнения частот поступают на входы прерывания. По фронтам этих импульсов запускаем и считываем таймеры, превращая, тем самым, их в измерители интервалов времени между импульсами сравнения. Преобразуем интервал между импульсами в разницу частот между входным сигналом и частотой на выходе синтезатора. Теперь можно сделать однократное, гораздо более точное приближение за одну процедуру. Эта процедура начинает выполняться на разнице частот, как правило, менее мегагерца. Однако и она начинает «тормозить процесс измерения» при частотах менее килогерца.

Б. Добавляем в схему сравнения еще два элемента. Фазовый детектор, выполненный по схеме «исключающее ИЛИ», и аналого-цифровой преобразователь. На выходе фазового детектора формируется пилообразное напряжение с частотой, равной разнице частот между входной частотой и частотой на выходе синтезатора. Крутизна пилообразного напряжения прямо пропорциональна удвоенной разнице частот между входным сигналом и частотой на выходе синтезатора, необходимо только знать коэффициент пересчета.

Измерение. Процесс измерения выполняется последовательно в несколько этапов. В начале процесса измерения частоты разность между частотами F_x и F_s составляет несколько мегагерц, и микроконтроллер работает по прерываниям, реагируя только на работу частотного компаратора, формирующего знак разности сравниваемых частот. После нескольких шагов последовательного приближения частоты синтезатора к частоте F_x , импульсы сравнения частот становятся достаточно редкими. Начинают существенно заполняться таймеры микроконтроллера в промежутке между импульсами сравнения. Становится возможным более точно вычислить интервал между ними, а следовательно, и саму величину разности частот. Можно сразу, а не последовательно существенно сократить разницу в частотах.

При интервале порядка миллисекунды становится возможным измерение крутизны пилообразного напряжения. Теперь можно реагировать не только на импульсы сравнения частот, поступающие на входы прерывания, но и дополнительно ускорить уже замедлившийся процесс. Это достигается изменением частоты синтезатора в небольших пределах и последующим измерением крутизны пилообразного напряжения. Если крутизна пилообразного напряжения на выходе фазового детектора увеличилась, мы сделали шаг в противоположную от измеряемой частоты сторону. И наоборот. Эта процедура дает информацию о той половине оставшегося интервала, в которой следует продолжать последовательное приближение.

При оценке изменения крутизны пилообразного напряжения необходимо знание временного интервала между измерениями – для этого используются таймеры микроконтроллера.

лера. По результату сравнения крутизны пилообразного напряжения делается очередной шаг приближения частоты синтезатора к измеряемой частоте.

Кроме того, дополнительного эффекта по сокращению числа шагов можно достигнуть, проведя измерения скорости изменения фазы на выходе фазового детектора. Для этого необходимо произвести калибровку фазового детектора. Используя формулы $d\psi/dt = \Delta\omega$, где $d\psi/dt$ – измеряемая АЦП крутизна пилообразного изменения фазы (напряжения) на выходе фазового детектора. Таймеры микроконтроллера привязывают измерения фазы к временной оси измерений. В данном случае удобнее считать, что АЦП выдает нам сразу двоичный код фазы. $\Delta\omega$ – изменение круговой частоты, единица измерения рад/сек. Она рассчитывается по формуле $\Delta\omega = 2\pi * \Delta F$, где ΔF – разница частот F_x и F_s .

Калибровку можно выполнить двумя способами. В первом случае необходимо подать известную частоту F_x , рассчитать ΔF , откуда получить $d\psi/dt = 2\pi * \Delta F$. Во втором можно в ходе работы по последовательному приближению попутно произвести калибровку крутизны фазового детектора. Для этого надо измерить крутизну на выходе фазового детектора при одном значении частоты синтезатора, затем в ходе последовательного приближения установить следующее значение частоты синтезатора и произвести второе измерение крутизны на выходе фазового детектора. Для вычисления ΔF используем разницу частот синтезатора, а для расчета крутизны фазового детектора подставляем в формулу разницу величин измеренных значений крутизны на этих двух частотах синтезатора. Естественно, при втором способе погрешность измеренной крутизны пилообразного изменения фазы составит большую величину, но будет сэкономлено время измерения.

Рис. 2. Характеристика нестабильности частоты DDS синтезатора в собственной базе

Воспользовавшись той же формулой, зная крутизну передачи фазового детектора, определяем абсолютное значение разности измеряемой частоты и синтезатора. Направление изменения частоты синтезатора – в сторону с наименьшей крутизной из двух последовательно измеренных.

Надо иметь в виду, что если во время измерений пилообразного напряжения появился импульс или напряжение на выходе частотного компаратора, то мы работаем за границей или на границе линейного участка фазового детектора. Необходимо вернуться в линейную область. Для этого можно изменить фазу выходного напряжения синтезатора на 90° или кратковременно изменить частоту на выходе синтезатора. Крайне желательно при выше описанных измерениях работать в середине рабочей области фазового детектора (более линейной его части) на одном линейном участке (скате) работы фазового детектора. В качестве синтезатора возможно применение как PLL синтезатора, так и DDS.

На рис. 2 и 3 приведена часть результатов экспериментальной проверки. На рис. 2 представлена характеристика нестабильности частоты DDS синтезатора, измеренная в «собственной» временной базе. Используя классификационные свойства дисперсии Аллана по её наклону, можно заключить, что на интервалах до 1 с превалируют белый и фликкер фазовые шумы внутреннего синтезатора со спектральной плотностью $S(\omega) = \omega^{+1,+2}$. На рис. 3 представлен процесс дрейфа фазы на интервале 720 секунд с шагом 1 мс.

Рис. 3. Характеристика дрейфа фазы

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прецизионный цифровой частотомер: пат. 2617172 Рос. Федерация / Абрамов М.Л., Кузякин Н.А. Заявл. 29.12.2015; опубл. 21.04.2017, Бюл. №21. 2 с.
2. ГОСТ 8.567-2014. Измерения времени и частоты. Термины и определения.
3. Абрамов М.Л., Борисов Б.Д., Кузякин Н.А. 4-канальный DDS-синтезатор сигналов на базе AD 9959 // Приборы и техника эксперимента. 2019. № 1. С. 139–140.