

ТОЧНОЕ СРАВНЕНИЕ БЛИЗКИХ ЧАСТОТ ПРИ ПОМОЩИ ПЕРЕСЧЕТНЫХ СХЕМ

М. Е. Жаботинский, Д. Н. Клышко, Е. И. Сверчков

Рассмотрены погрешности сравнения частоты и их зависимость от системы сравнения. Дано описание устройства для сравнения частоты, использующее типовые пересчетные системы и позволяющее измерять изменения частоты с точностью 10^{-10} при длительности измерения порядка секунд.

Задача точного сравнения частоты возникает при исследовании стабильности генераторов, при их проверке и калибровке, при конструировании схем автоподстройки и в целом ряде физических и технических устройств, связанных с измерением одной из взаимозависимых величин: частоты, фазы или времени.

Стабильность частоты современных кварцевых генераторов и источников колебаний, использующих резонансные свойства молекул и атомов (молекулярные генераторы, „атомные часы“), достигает величины 10^9 ; кратковременная стабильность еще выше. Следовательно, измерительная аппаратура, применяемая для их исследования и регулировки, должна иметь погрешность не больше 10^{-10} .

Точность сравнения периодических величин применением интерференционных методов может быть сделана практически сколь угодно высокой.

Однако повышение точности связано с увеличением длительности измерения. Часто представляет интерес точное измерение частоты за небольшие промежутки времени; однако это налагает определенные ограничения на метод и аппаратуру сравнения.

Описываемое ниже устройство было разработано для исследования кратковременной стабильности частоты генераторов и позволяет измерять относительные изменения частоты порядка 10^{-10} при длительности измерения порядка секунд.

1. ПОГРЕШНОСТИ СРАВНЕНИЯ ЧАСТОТЫ МЕТОДОМ БИЕНИЙ

Зависимость погрешности от частоты биений. Метод биений заключается в измерении длительности n периодов T разностной частоты F , образующейся при сложении сравниваемых синусоидальных сигналов. При этом значение измеряемой частоты f определяется так

$$f = f_1 \pm F,$$

где f_1 — частота одного из исследуемых генераторов, которую будем считать эталонной *; знак при F определится дополнительным измерением. Тогда относительная погрешность измерения частоты

$$\delta f = \frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta F}{f} = \frac{F}{f} \frac{\Delta T}{T} = \frac{F}{f} \delta t, \quad (1)$$

* Если сравниваются два одинаковых независимых генератора, то получаемые этим методом результаты могут быть отнесены к любому из них с фактором $2^{-\frac{1}{2}}$.

где $t = nT$ — время измерения и δt — относительная ошибка отсчета времени при измерении длительности n периодов биений. Таким образом, относительная погрешность измерения частоты методом биений при заданных измеряемой частоте и ошибке отсчета времени пропорциональна частоте биений, и для уменьшения δf следует сравнивать возможно более близкие частоты. При этом необходимо учитывать, что при измерении частоты методом биений неизбежно усреднение частоты за время nT . Обычно измеряется не менее одного периода биений ($n \geq 1$). Как отмечалось выше, часто необходимо регистрировать кратковременные изменения частоты; поэтому, если принять наибольшее время измерения $t = 2$ сек, то нижняя граница частоты биений будет $F = 0,5$ гц.

При конструировании описываемого прибора был использован следующий способ увеличения крутизны огибающей биений. Синусоидальные сигналы сравниваемых генераторов преобразуются в возможно более короткие импульсы (в нашем приборе около 0,15 мксек) той же частоты повторения. Две полученные таким образом последовательности импульсов при сложении образуют „импульсы биений“, огибающая которых представляет собой импульсы, повторяющиеся с частотой F .

Погрешности отсчета времени. Рассмотрим относительную ошибку δt измерения интервала времени nT , которая по (1) определяет точность измерения частоты при заданном отношении F/f . В погрешности δt можно различать три составляющие:

а) точность „часов“, которыми в данном приборе является вспомогательный генератор „ f_0 “ и электронная пересчетная система, считающая число колебаний этого генератора за время nT . Погрешность частоты опорного генератора δf_0 приводит к следующей ошибке в измерении частоты методом биений

$$\delta f = F \delta f_0 / f,$$

и если взять $F = 1$ гц, $f_0 = 10^5$ гц, $\delta f_0 = 10^{-6}$ (погрешность обычного кварцевого генератора), то $\delta f = 10^{-11}$, что на порядок лучше заданной и легко может быть еще более улучшено;

б) разрешающая способность „часов“, которая равна одному периоду колебаний вспомогательного генератора, $\tau_0 = 1/f_0$, поэтому

$$\delta f = \frac{F}{f} \frac{\tau_0}{nT} = \frac{1}{n} \frac{F^2}{f f_0},$$

и если $F = 1$ гц, $f = f_0 = 10^5$ гц, то, чтобы $\delta f \leq 10^{-10}$, должно быть: $n \geq 1$ и время измерения $t = n/F \geq 1$ сек;

в) погрешность δt между временем счета и действительной длительностью „ n “ периодов биений, вносимая схемой управления частотами. В случае определения длительности периода биений по фигурам Лиссажу или по осциллографу с круговой разверткой погрешность управления δt зависит от геометрических свойств изображения, от скорости изменения конфигураций и от реакции наблюдателя. В этом случае δt трудно сделать меньше 0,1 сек; того же порядка разрешающая сила обычных секундомеров, и если взять $F = 1$ гц, $f = 10^5$ гц, $n = 1$, то мы получим ошибку $\delta f = 10^{-6}$.

В данном приборе управление „часами“ (т. е. включение и выключение счета числа колебаний генератора „ f_0 “) производится автоматически манипулятором, управляемым в свою очередь импульсами биений.

В этом случае погрешность δt зависит от следующих факторов: а) единственной причиной существенной систематической ошибки может быть неидентичность процессов отпирания и запираания ма-

нипулятора. Для уменьшения ее следует максимально увеличивать крутизну управляющих импульсов; б) изменение $\delta\varphi$ фазового угла тракта за время измерения из-за нестабильности элементов схемы приводит к ошибке в отсчете времени $\delta t = \delta\varphi/\omega$; в) различные помехи (например, тепловые и дробовые шумы, фон переменного тока, паразитная амплитудная модуляция сравниваемых сигналов, замирания при приеме радиосигналов и т. п.) приводят к паразитной частотной модуляции полезного сигнала в нелинейных элементах схемы (ограничители, смеситель, манипулятор). Такие нелинейные, амплитудно-фазовые искажения подробно рассмотрены в [1].

2. ПРИБОР ДЛЯ ТОЧНОГО СРАВНЕНИЯ ЧАСТОТЫ

Блок-схема. Покаскадная блок-схема устройства представлена на рис. 1. Синусоидальные сигналы двух генераторов преобразуются в импульсные двумя идентичными каналами, содержащими каждый: реостатный каскад усиления (L_1 —6Ж4), формирующий каскад (L_2 —6Ж4) и широкополосный усилитель импульсов (L_3 —6Ж4).

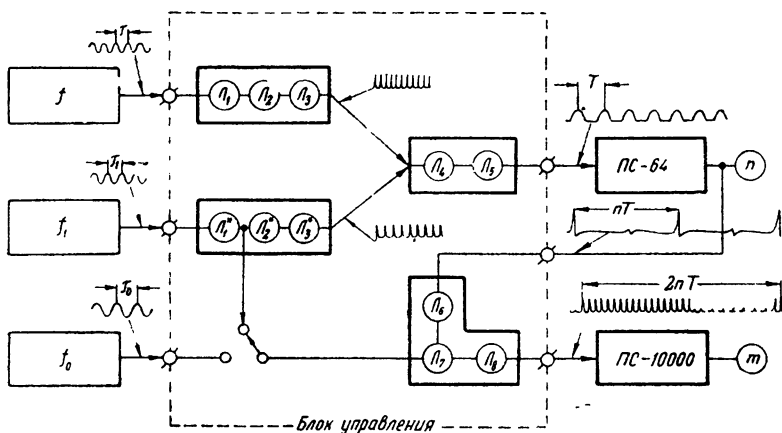


Рис 1.

Нагрузками ламп L_2 являются колебательные контуры, возбуждаемые фронтами положительных импульсов анодного тока этих ламп. Для подавления на контурах импульсов нежелательной полярности контуры шунтированы кристаллическими диодами. (Дифференцирование прямоугольных сигналов RC-цепочкой с малой постоянной времени дает примерно такие же результаты, как и примененный здесь „звенящий“ контур [2].) Полученные таким образом две последовательности импульсов преобразуются смесителем-детектором совпадений на лампе L_4 (6Ж4), которая заперта большим отрицательным смещением и открывается лишь при совпадении во времени смешиваемых импульсов. Нагрузкой смесителя является интегрирующая RC-цепочка, назначение которой—выделение огибающей „импульсов биений“. Величина произведения RC, определяющая вместе с внутренним сопротивлением смесителя инерционность управляющего устройства, выбрана достаточно большой для уменьшения влияния на точность сравнения кратковременных (по сравнению с временем измерения) отклонений фазы и амплитуды импульсов.

После усиления и ограничения (L_5 —6Ж8) низкочастотная огибающая подается на вспомогательную пересчетную систему „ПС-64“, которая делит частоту повторения импульсов на число

$n = 2, 8$ или 32 по выбору, в зависимости от желательной точности, времени измерения и частоты биений.

Выходные импульсы от „ПС-64“ опрокидывают несимметричный триггер с анодно-катодной связью L_6 (6Н8). Напряжение прямоугольной формы с катода выходного триода триггера, которое меняется скачком на 200 в за время около 20 мксек, подается на экранную сетку манипулятора L_7 (6Ж4) и при этом меняет его усиление примерно на 30 дб. На управляющую сетку манипулятора поступают импульсы от вспомогательного генератора „ f_0 “.

Таким образом, манипулятор в течение nT секунд пропускает импульсы частоты f_0 на основную пересчетную систему типа „ПС-10000“, после чего он в течение следующих nT секунд заперт; в это время производится запись показаний пересчетной системы и сброс ее в исходное состояние.

Лампа L_8 (6Н8) осуществляет усиление и ограничение полученных импульсов частоты f_0 .

Конструкция блока управления. Блок управления, конструктивно оформленный на отдельном шасси, осуществляет усиление, преобразование и формирование различных сигналов, необходимые для возможно более точной синхронизации участвующих в процессе сравнения пересчетных систем с исследуемыми генераторами.

Факторы, влияющие на точность синхронизации, и их относительная значимость были в известной степени оценены выше. Ввиду сложности точной количественной оценки этих факторов при конструировании блока управления был принят ряд доступных мер по их уменьшению, а именно:

а) напряжение питания стабилизировано, накал—ферромагнитная стабилизация (2%); анодное питание — ферромагнитная плюс электронная стабилизация (0,1%); б) в развязывающих цепях применены большие значения RC-фильтров для уменьшения фона и паразитных связей; в) цепи накала заземлена средняя точка; г) отдельные узлы блока экранированы; д) лампы и элементы схемы работают в нефорсированных режимах; созданы условия достаточной теплоотдачи.

При расчете отдельных каскадов также учитывались условия, обеспечивающие точную синхронизацию: необходимая крутизна импульсов, амплитуда их, линейность режима усилительных ламп и т. д.

Испытания прибора показали, что принятые меры достаточны для обеспечения нужной точности измерения. Возможно, что при необходимости улучшить эту точность потребуется более подробная оценка фазовых шумов схемы и усложнение блока управления.

Применение устройства. При определении частоты f по известной частоте f_1 вычисление производится по формуле

$$f = f_1 \pm F = f_1 \pm n f_0 / m$$

или, при использовании генератора „ f_1 “ одновременно для отсчета времени (верхнее положение переключателя на рис. 1), по формуле

$$f = f_1 (1 \pm n/m),$$

где n —коэффициент деления вспомогательной пересчетной системы и m —показание основной пересчетной системы.

При сравнении генераторов, близких по стабильности частоты, можно считать „быстрые“ отклонения их частоты независимыми, и поэтому изменения разностной частоты со временем с большой вероятностью характеризуют кратковременную стабильность каждого генератора. В этом случае при расчете удобно принимать

частоту одного из генераторов (f_1) неизменной, а изменения разностной частоты ΔF , деленные на $\sqrt{2}$, считать изменениями частоты генератора f . При таком применении прибора записывается последовательная серия показаний m в течение желательного времени при определенном коэффициенте n и нестабильность генераторов определяется по формуле

$$\delta f = \frac{n \Delta m}{\sqrt{2} m^2},$$

где Δm —максимальное отклонение m от среднего за время наблюдения.

При помощи данного устройства удобно исследовать температурный ход собственной частоты кварцевых резонаторов, влияния режимов ламп, времени пролета электронов и другие слабые эффекты, приводящие к изменениям значения частоты в $9 \div 10$ знака.

Проверка и технические характеристики прибора. Для опытной проверки разрешающей способности устройства необходимо было получить два сигнала, отличающихся по частоте приблизительно на 1 гц, со стабильностью, лучшей, чем 10^{-5} гц, в течение нескольких циклов измерений (равных $2nT$ сек), что даже для промежутков времени в несколько секунд оказалось непростой задачей. При проверке на вход прибора подавались два возможно более стабильно отличающихся по частоте сигнала и подсчитанная по (4) величина δf , где Δm определялось за время $5 \div 10$ циклов измерений, принималась за возможную погрешность устройства. Испытания повторялись при различных значениях f , F и n .

Были проведены измерения с двумя кварцевыми генераторами частоты 136,4 кгц, собранными по схеме Пирса с автоматической регулировкой амплитуды. После амортизации и термостатирования ($\Delta T < 0,01^\circ \text{C}$) кварцев наблюдаемые в течение нескольких секунд флюктуации показаний m соответствовали $\delta f = 10^{-10}$, что с большой вероятностью показывает, что погрешности прибора меньше этой величины. К сожалению, из-за отсутствия источников колебания достаточно стабильной частоты не была определена фактическая погрешность, вносимая блоком управления. Предполагается сделать это впоследствии при помощи молекулярных генераторов.

В результате испытаний получены следующие основные технические характеристики устройства: диапазон сравниваемых частот $f \approx f_1 = 10 \div 3000$ кгц (при $f, f_1 > 1$ мгц необходим вспомогательный генератор с частотой $f_0 < 1$ мгц; указанный диапазон может быть расширен гетеродинированием); диапазон разностной частоты $F = 0,5 \div 30$ гц; минимальное время измерения $t_{\text{мин}} = 1$ сек; погрешность измерения δf не больше 10^{-10} при выполнении условия $n \geq F^2/f_0 f 10^{-10}$ (или $1/t \leq f_0 10^{-10}$).

Работу по улучшению характеристик прибора, по упрощению его конструкции и введению автоматической записи результатов измерений предполагается провести впоследствии.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. М. Бонч-Бруевич и В. И. Широков, ЖТФ, 25, 1825 (1955).
2. Л. А. Меерович, Л. Г. Зеличенко, Импульсная техника, изд. Сов. радио, М., 1954.