

## Литература

1. **ГОСТ 8.346—2000.** ГСИ. Резервуары стальные горизонтальные цилиндрические. Методика поверки.
2. **ГОСТ 8.380—2000.** ГСИ. Резервуары стальные вертикальные цилиндрические вместимостью 100—50000 м<sup>3</sup>. Методы и средства поверки.
3. **Гаджиев Ч. М., Исаев М. М.** Методы обработки измерений в ИИС определения массы нефтепродуктов в резервуарах. Баку: Элм, 2000.
4. **Гаджиев Ч. М., Исаев М. М., Ахмедов Т. Г., Садыхов Р. А.** Планирование эксперимента в задачах измерения массы нефтепродуктов в резервуарах // Измерительная техника. 1996. № 6. С. 36—38.
5. **Пат. 2327118 РФ.** Способ градуировки резервуаров / В. И. Кабанов, О. В. Молчанов, В. К. Наumenko, М. С. Бобак, С. В. Сорока, С. В. Старый // Изобретение. Полезные модели. 2008. № 17.

6. **Пат. 2329472 РФ.** Способ автоматизированного контроля и учета массы нефтепродуктов на топливных базах при их хранении в вертикальных и горизонтальных резервуарах / Э. Н. Шенкман, С. Н. Наumenko, Л. К. Мартынов // Изобретение. Полезные модели. 2008. № 20.

7. **Мамедов Р. Г., Исаев М. М., Агаев Ф. Г., Мехтизаде Э. К.** Структурно-алгоритмические методы повышения точности измерений // Проблемы нефтегазовой промышленности. 2010. Вып. 8. С. 229—242.

8. **Исаев М. М., Мамедов Р. Г., Мехтизаде Э. К., Гусейнов И. Э.** Повышение точности измерений с помощью комбинированных тестовых алгоритмов // Известия НАН Азербайджана. Серия физико-математических и технических наук. 2009. Т. XXIX. № 6. С. 158—165.

Дата принятия 27.07.2015 г.

## ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ

621.317.76

## Оптимальный алгоритм синхронизации шкалы времени квантовых часов

Г. П. ПАШЕВ

Нижегородский научно-исследовательский приборостроительный институт «Кварц»  
им. А. П. Горшкова, Н. Новгород, Россия, e-mail: kvarz\_asu@kvarz.com

*Предложен алгоритм синхронизации шкалы времени квантовых часов. Алгоритм позволяет исключить систематическую погрешность синхронизации и минимизировать случайную погрешность. Найдены формулы для расчёта оптимального числа измерений и минимальной погрешности.*

**Ключевые слова:** квантовые часы, синхронизация.

*An algorithm for quantum clock time scale synchronization is proposed. The algorithm allows to eliminate the systematic synchronization error and minimize the random error. The formulae to determine the optimal number of measurements and minimum error are obtained.*

**Key words:** quantum clock, synchronization.

Квантовые часы являются одним из основных компонентов вторичных эталонов времени и частоты, систем радионавигации и пассивной радиолокации. В ходе эксплуатации квантовых часов в составе таких систем необходимо синхронизировать или привязать их шкалу времени к шкале времени более точных, например, эталонных часов.

Квантовые часы (рис. 1) содержат опорный квантовый стандарт частоты (КСЧ) и формирователь шкалы времени. Частота сигнала КСЧ подстраивается по сигналу эталонных часов для уменьшения хода квантовых часов [1, 2]. В формирователе высокочастотный сигнал (10 МГц) КСЧ преобразуется в шкалу времени — последовательность импульсов с периодом  $T$  (обычно  $T = 1$  с), положение импульсов на оси времени регулируется двумя ступенями. Грубая регулировка

с дискретностью 100 нс выполняется принудительной установкой в нулевое состояние цифрового делителя частоты в диапазоне 10 МГц—1 Гц. Точная регулировка (до единиц пикосекунд) производится с помощью управляемой линии задержки (микростеппера) [3] или кратковременной отстройки частоты сигнала 10 МГц КСЧ в результате использования специального дополнительного генератора [4—7].

Для синхронизации квантовых и эталонных часов применяют цифровой измеритель временных интервалов (ИВИ). В измерителе формируются счётные импульсы из высокочастотного выходного сигнала эталонных или квантовых часов. На вход «СТАРТ» ИВИ подаются сигнал 1 Гц шкалы времени квантовых часов, а на вход «СТОП» — такой же сигнал эталонных часов. Сигналы шкал передаются по следующим

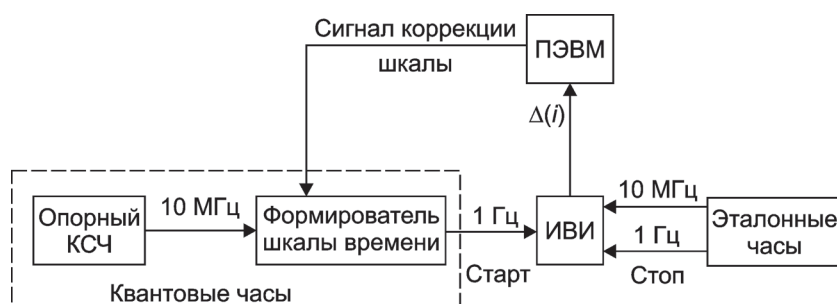


Рис. 1. Схема синхронизации шкалы времени квантовых часов:

КСЧ — квантовый стандарт частоты; ИВИ — измеритель временных интервалов; ПЭВМ — персональный компьютер

каналам связи: коаксиальному кабелю, волоконно-оптической линии связи или радиоканалу. Результат измерений ИВИ соответствует разности шкал времени. Единичные результаты измерений имеют погрешность, обусловленную задержками в каналах связи и собственной погрешностью ИВИ. Для снижения погрешности результаты измерений математически обрабатывают в ПЭВМ. Полученные данные используют для коррекции шкалы времени квантовых часов (т. е. для синхронизации). Результат обработки учитывается как поправка к шкале квантовых часов, при этом образуется привязанная аналитическая шкала времени.

Цель настоящей статьи — поиск алгоритма обработки результатов сравнения шкал, позволяющего произвести синхронизацию или привязку с минимальной погрешностью.

Последовательность  $\Delta(i)$  результатов измерений в момент времени  $iT$  имеет две составляющие:

$$\Delta(i) = \Delta_{КСЧ}(i) + \Delta_{ИВИ}(i), \quad (1)$$

где  $i = 0; \pm 1; \pm 2; \pm 3, \dots$  — номер измерения;  $T$  — период импульсной последовательности;  $\Delta_{КСЧ}(i)$  — разность шкал времени квантовых и эталонных часов;  $\Delta_{ИВИ}(i)$  — составляющая, учитывающая погрешность ИВИ и задержки в каналах связи.

Для синхронизации в момент  $iT = 0$  можно скорректировать шкалу времени квантовых часов на  $\Delta(0)$ . При этом погрешность синхронизации

$$\varepsilon_1 = \Delta_{КСЧ}(0) - \Delta(0) = -\Delta_{ИВИ}(0).$$

При привязке шкалы времени учитывается поправка  $\Delta_{ИВИ}(0)$ . Следовательно, погрешность привязки математической шкалы также будет равна  $\varepsilon_1$ . В дальнейшем анализ выполняется для синхронной (физической) шкалы, при этом результаты анализа будут справедливы и для погрешности привязки аналитической шкалы.

На  $\varepsilon_1$  существенно влияет случайная составляющая  $\Delta_{ИВИ}(0)$ , для уменьшения которой можно использовать среднее значение

$$\Delta_1 = \frac{1}{2N} \sum_{i=-2N+1}^0 \Delta(i), \quad (2)$$

где  $N$  — число измерений.

При этом погрешность синхронизации

$$\varepsilon_2 = \Delta_{КСЧ}(0) - \Delta_1.$$

На результат усреднения (2) влияет поведение обеих составляющих результатов измерений (1) на интервале времени  $[(-2N+1)T; 0]$ .

Последовательность  $\Delta_{ИВИ}(i)$  можно представить в виде

$$\Delta_{ИВИ}(i) = t_0 + \delta(i),$$

где  $t_0$  — постоянная задержка в каналах связи и электронных трактах ИВИ;  $\delta(i)$  — последовательность некоррелированных случайных величин с

дисперсией  $\sigma_\delta^2$ , обусловленная шумами широкополосных каналов связи, шумами в электронных трактах ИВИ и дискретностью счёта ИВИ.

Значение  $t_0$  определяют, измеряя задержки в каналах связи. Для этого на оба входа ИВИ подают сигнал шкалы времени 1 Гц от одних и тех же часов и выполняют многократные измерения перед синхронизацией, чтобы исключить влияние медленных изменений задержки. Результаты

измерений усредняют так, чтобы дисперсия среднего  $\sigma_{\delta_{ср}}^2$

была много меньше  $\sigma_\delta^2$ . Результат усреднения вычитают из результатов измерений  $\Delta(i)$ . При этом задержка  $t_0$  исключается, значение  $\sigma_{\delta_{ср}}^2$  нужно учитывать при расчёте погрешности синхронизации.

Последовательность  $\Delta_{КСЧ}(i)$  аппроксимируется формулой

$$\Delta_{КСЧ}(i) = \alpha + \beta i + \xi(i), \quad (3)$$

где  $\alpha$  — постоянная разность шкал времени;  $\beta$  — линейное изменение разности шкал времени за период  $T$  (отношение  $\beta/T$  равно постоянному относительному отклонению частоты КСЧ);  $\xi(i)$  — случайный набег разности шкал времени на интервале времени  $[0, iT]$ , вызванный шумом частоты сигнала КСЧ и имеющий нулевое среднее значение.

Синхронизацию нужно выполнить достаточно быстро, поэтому сравнение шкал времени проводится обычно на интервале времени менее  $1 \cdot 10^3$  с. На таких интервалах основное влияние на случайный набег разности шкал имеет белый шум частоты сигнала КСЧ квантовых часов. Поэтому  $\xi(i)$  как интеграл от частоты соответствует диффузионному процессу — случайным блужданиям:

$$\xi(i) = \int_0^{iT} y(t) dt = x(i) - x(0),$$

где  $y(t)$  — шум частоты сигнала КСЧ, нормированный к номинальной частоте сигнала;  $x(i)$  — флуктуации фазы сигнала КСЧ во временном масштабе в момент времени  $iT$ .

Дисперсия  $\sigma_\xi^2(i)$  величины  $\xi(i)$  может быть выражена через общепринятую характеристику нестабильности частоты

ты — вариацию Аллана (определение этой характеристики дано в [8]):

$$\sigma_y^2(T) = 0,5 \left\langle [\bar{y}(i+1) - \bar{y}(i)]^2 \right\rangle,$$

где  $\bar{y}(i) = \frac{1}{T} \int_{iT}^{(i+1)T} y(t) dt$ ;  $\langle \rangle$  — знак статистического усреднения.

Пользуясь представлениями для  $\sigma_\xi^2(i)$ ,  $\sigma_y^2(T)$  в частотной области, находим

$$\sigma_\xi^2(i) = T^2 \sigma_y^2(T) \cdot |i|.$$

Корректирующее воздействие (2) в соответствии с (3) будет содержать детерминированную составляющую  $\alpha - (N - 0,5)\beta$ . Следовательно, при коррекции постоянная разность шкал времени будет полностью скомпенсирована, а линейное изменение разности вызовет постоянную погрешность синхронизации  $(N - 0,5)\beta$ . Эта погрешность нарастает при увеличении числа усредняемых измерений и интервала времени между соседними измерениями. Исключить эту погрешность можно, вычислив по результатам измерений несмещённую оценку  $\beta$ , вычитая линейное изменение из результатов измерений:

$$\bar{\beta} = \frac{1}{N} \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=-N+1}^0 \Delta(i) - \frac{1}{N} \sum_{i=-2N+1}^{-N} \Delta(i) \right]. \quad (4)$$

При этом погрешность синхронизации примет вид

$$\varepsilon_3 = \Delta(0) - \frac{1}{2N} \sum_{i=-2N+1}^0 [\Delta(i) - \bar{\beta} \cdot i]. \quad (5)$$

Величина  $\varepsilon_3$  является случайной с нулевым средним

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_{\text{ИВИ}} + \varepsilon_{\text{КСЧ}},$$

где  $\varepsilon_{\text{ИВИ}}$  — значение, зависящее от случайной задержки в каналах связи и случайной погрешности ИВИ;  $\varepsilon_{\text{КСЧ}}$  — значение, обусловленное случайным отклонением частоты КСЧ квантовых часов.

Раскрыв (5) с учётом (4), получим

$$\varepsilon_{\text{ИВИ}} = -\frac{1}{2N} \sum_{i=-2N+1}^0 \left\{ \delta(i) - \frac{i}{N} \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=-N+1}^0 \delta(i) - \frac{1}{N} \sum_{i=-2N+1}^{-N} \delta(i) \right] \right\}, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\text{КСЧ}} &= x(0) - \frac{1}{2N} \times \\ &\times \sum_{i=-2N+1}^0 \left\{ x(i) - \frac{i}{N} \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=-N+1}^0 x(i) - \frac{1}{N} \sum_{i=-2N+1}^{-N} x(i) \right] \right\}. \end{aligned} \quad (7)$$

Для определения дисперсии величин  $\varepsilon_{\text{ИВИ}}$ ,  $\varepsilon_{\text{КСЧ}}$  выражения (6), (7) возводят в квадрат и выполняют статистическое усреднение результатов. При этом образуются квадратичные формы, элементы которых пропорциональны

$\sigma_\delta^2, \sigma_\xi^2(|i-j|)$ , соответственно. Вычислив полученные квадратичные формы, найдём

$$\sigma_{\varepsilon_{\text{ИВИ}}}^2 = \left[ (5N^2 - 4N + 1) / (2N^3) \right] \sigma_\delta^2, \quad (8)$$

$$\sigma_{\varepsilon_{\text{КСЧ}}}^2 = \left[ (4N^2 - 1) / (6N) \right] T^2 \sigma_y^2(T, T). \quad (9)$$

Погрешности  $\varepsilon_{\text{ИВИ}}$ ,  $\varepsilon_{\text{КСЧ}}$  имеют различную физическую природу и статистически независимы, поэтому их дисперсия

$$\sigma_{\varepsilon_3}^2 = \sigma_{\varepsilon_{\text{ИВИ}}}^2 + \sigma_{\varepsilon_{\text{КСЧ}}}^2.$$

При увеличении  $N$  дисперсия (8) уменьшается, а дисперсия (9) нарастает. Следовательно, можно найти такое количество измерений  $N_0$ , при котором погрешность синхронизации шкалы времени будет иметь минимальное значение  $\sigma_{\varepsilon_0}$ . При  $2N \gg 1$  формулы (8), (9) можно упростить:

$$\sigma_{\varepsilon_{\text{ИВИ}}}^2 = 5\sigma_\delta^2 / (2N); \quad \sigma_{\varepsilon_{\text{КСЧ}}}^2 = 2T^2 \sigma_y^2(T) N / 3,$$

при этом  $N_0 = 2\sigma_\delta / T\sigma_y(T)$ ;  $\sigma_{\varepsilon_0} = 1,6 [T\sigma_\delta \sigma_y(T)]^{0,5}$ .

Дисперсия погрешности синхронизации с учётом погрешности определения задержки в каналах связи:

$$\sigma_\pi^2 = \sigma_{\varepsilon_3}^2 + \sigma_{\delta_{\text{ср}}}^2.$$

В таблице приведены результаты расчёта  $N_0$ ,  $\sigma_{\varepsilon_0}$  оптимизированной погрешности  $\sigma_\pi = \sigma_{\pi 0}$  для случая, когда сигнал 1 Гц от эталонных часов передается по короткому (до 100 м) коаксиальному кабелю. При этом кратковременные случайные изменения задержки в кабеле составляют единицы пикосекунд [9] и значение  $\sigma_\delta^2$  определяется в основном случайной погрешностью ИВИ И4-11  $\sigma_\delta = 25$  пс [10]. Для измерений задержки в ИВИ устанавливают режим усреднения по 100 результатам, что позволяет определить задержку со средней квадратической погрешностью 2,5 пс. Расчёт выполнен для трёх видов КСЧ: рубидиевого, водородного пассивного и водородного активного.

Погрешность синхронизации шкалы времени

| Вид КСЧ              | $\sigma_y(T)$        | $N_0$ | $\sigma_{\varepsilon_0}$ , пс | $\sigma_{\pi 0}$ , пс |
|----------------------|----------------------|-------|-------------------------------|-----------------------|
| Рубидиевый           | $1 \cdot 10^{-11}$   | 4     | 24,1                          | 24,2                  |
| Водородный пассивный | $1,5 \cdot 10^{-12}$ | 33    | 9,8                           | 10,1                  |
| Водородный активный  | $2 \cdot 10^{-13}$   | 250   | 3,5                           | 4,3                   |

Значения  $N_0 = 4$ ,

$\sigma_{\varepsilon_0} = 24,1$  для рубидиевого КСЧ рассчитаны по точным формулам (8), (9). Из таблицы следует, что синхронизацию шкалы времени квантовых часов можно выполнить тем точнее, чем меньше нестабильность частоты сигнала КСЧ. При синхро-

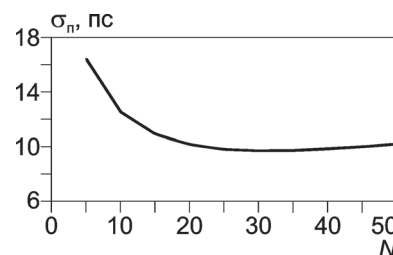


Рис. 2. Погрешность синхронизации шкалы времени квантовых часов с пассивным водородным КСЧ

низации водородного активного КСЧ заметно влияние погрешности определения задержки.

На рис. 2 показана погрешность синхронизации для квантовых часов с опорным пассивным водородным КСЧ в зависимости от числа измерений. Минимум погрешности выражен слабо, что позволяет на практике использовать любое наиболее удобное значение  $N$ , близкое к  $N_0$ .

**Заключение.** Предложенный алгоритм синхронизации и привязки шкалы времени квантовых часов позволяет исключить систематические компоненты разности шкал времени и минимизировать случайную погрешность синхронизации.

#### Л и т е р а т у р а

1. Пашев Г. П. Анализ дискретных алгоритмов синхронизации группы квантовых стандартов частоты // Измерительная техника. 2009. № 9. С. 56—61.
2. Пашев Г. П. Хранение единицы частоты и шкалы времени высокостабильным генератором при его синхронизации по радиосигналу космических навигационных систем // Измерительная техника. 2012. № 12. С. 26—31.
3. Rovera C., Abgrell M., Siccardif M. Characterization of an Auxiliary offset Generator for setting H-masers // Proc. European Frequency and Time Forum, April 2012, Gothenberg, Sweden, 2012. P. 14—15.

4. Matsacis D. Time and Frequency activities at the Naval Observatory // Proc. 2009 Joint Meeting of the European Frequency and Time Forum and the IEEE International Frequency Control Symposium, 20—24 April 2009, Besancon, France, P. 653—658.

5. Чернышов И. Н., Соловьев В. Ю., Писарев И. А. Формирователь интервалов времени. Метрология времени и пространства // Материалы 7-го междунар. симпозиума. Суздаль. 2014. С. 235—236.

6. Здериглазова А. В., Курышева Л. Н. Акулов В. М. Исследование возможных методов формирования рабочих шкал, физически реализующих шкалу координированного времени локального эталона // Метрология времени и пространства: Материалы 7-го междунар. симпозиума. Суздаль. 2014. С. 231—234.

7. Пушкин С. Б., Пальчиков В. Г. Государственная служба времени, частоты и определения параметров вращения Земли. Монография. М.: ВНИИФТРИ, 2013.

8. Characterization of sources and time scales formation. Recommendation ITU-R TF.583-3. Measures for random instabilities in frequency and time (phase).

9. Kodet J., Prochazka I., Blazej J. Two Way Time Transfer with Picoseconds Precision and Accuracy // European Frequency and Time Forum, (EFTF 2012). P. 483—487.

Дата принятия 22.09.2015 г.

## МЕХАНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

53.089.68

### Методы ввода поправки на влажность воздуха при определении метрологических характеристик критических сопел

И. А. ИСАЕВ, А. И. ГОРЧЕВ

Всероссийский научно-исследовательский институт расходомерии, Казань, Россия,  
e-mail: nio13@vniir.org

*Рассмотрены различные практические методы ввода поправок на влажность при калибровке и применении критических сопел на воздухе при атмосферном давлении.*

**Ключевые слова:** воздух, влажность, критическое сопло, функция критического расхода влажного воздуха.

*The article discusses different practices of input of amendments on the humidity for calibration and practical use of critical nozzles for the ambient air*

**Key words:** air, humidity, critical nozzle, critical flow function for moist air.

Государственная поверочная схема для средств измерений объёмного и массового расходов газа регламентирована в [1]. Её возглавляет Государственный первичный эталон единиц объёмного и массового расходов газа ГЭТ 118—2013, содержащий исходную гравиметрическую установку для калибровки критических сопел [2]. Метрологические характеристики критических сопел, полученные на этой установке,

используют, в том числе, и на соподчинённых эталонных установках из состава ГЭТ 118—2013. Калибровку критических сопел на исходной установке проводят в строго контролируемых условиях, регламентированных в правилах содержания и применения эталона. Конкретные измерительные операции описаны в методике калибровки. Тем не менее, характеристика калиброванного сопла привязана к одно-