

16. **Khlebtsov N. G.** T-matrix method in plasmonics – An overview // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. 2013 V. 123. P. 184–217.

17. **Somerville W. R. C., Auguie B., Le Ru E. C.** User-friendly codes for fast and accurate calculations of light scattering by spheroids //

J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. 2016. V. 174 P. 39–55.

18. **Johnson P., Christy R.** Optical constants of noble metals // Phys. Rev. B. 1972. V. 6. No. 12. P. 4370–4379.

Дата принятия: 22.05.2018.

ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ

Двадцать пять лет на острие технологии частотно-временных измерений

10 сентября 2018 г. празднует 25-летие Нижегородская компания «Время-Ч», известная инновационными разработками аппаратуры хранения и воспроизведения единиц измерения времени и частоты: квантовых водородных стандартов и рубидиевых реперов; прецизионных частотных и фазовых компараторов; систем формирования и передачи эталонных сигналов и шкал времени; аппаратуры тактовой сетевой синхронизации связи. За время существования компания, образованная несколькими энтузиастами – молодыми инженерами и учёными, превратилась в сильное научно-производственное предприятие с собственной мощной производственной базой. В настоящее время ЗАО «Время-Ч» выполняет важнейшие опытно-конструкторские работы в целях обеспечения государственных программ по развитию эталонной базы Российской Федерации.

Компания «Время-Ч» разработала и выпускает лучшие в мире по точностным характеристикам стандарты частоты и времени. Количество производимых стандартов времени и частоты значительно превышает выпуск аналогичной аппаратуры в зарубежных странах, включая, в первую очередь, США, Германию, Францию. Водородные стандарты частоты ЗАО «Время-Ч» составляют основу Государственной службы времени и частоты России. Рубидиевый репер фонтанного типа, созданный совместно с учёными из ВНИИФТРИ, позволил в три раза повысить точность воспроизведения единиц времени и частоты на Государственном эталоне времени и частоты.

С 2003 г. ЗАО «Время-Ч» активно участвует в космических программах Российской Федерации. Впервые в мире водородный стандарт частоты, разработанный компанией «Время-Ч», был установлен на космическом радиотелескопе «Радио-Астрон», где успешно отработал семь лет и обеспечил получение уникальных результатов радиоастрономических наблюдений.

С 2007 г. предприятие активно участвует в новейших разработках в рамках Федеральной целевой программы «Поддержка, развитие и использование космической навигационной системы ГЛОНАСС». Инженерами ЗАО «Время-Ч» подготовлены к лётной квалификации образцы водородного стандарта частоты для бортового синхронизирующего устройства с лучшими в мире характеристиками. Ведётся разработка комплекса наземных средств формирования шкалы времени с относительной нестабильностью частоты не более $3 \cdot 10^{-16}$ за сутки и погрешностью хранения шкалы времени не более $\pm 0,2$ нс в сутки.

Приборы компании «Время-Ч» пользуются большим спросом не только в России, но и за рубежом. Ежегодно компания экспортирует до 50 единиц высокотехнологичного оборудования в страны ЕС, Австралию, Китай, Индию, Канаду и др.

На страницах журнала предлагаем вниманию читателей ряд статей, посвящённых перспективным разработкам компании в области частотно-временных измерений.

А. А. Беляев, к.т.н., генеральный директор ЗАО «Время-Ч»

Задачи резервирования и управления в эталонах времени и частоты на основе водородных стандартов

К. Г. МИШАГИН, А. А. БЕЛЯЕВ, Н. С. АРХИПОВ, В. А. ЛЫСЕНКО, С. Ю. МЕДВЕДЕВ

ЗАО «Время-Ч», Н. Новгород, Россия, e-mail: mishagin@vremya-ch.com, arhipov@vremya-ch.com, lysenko.v@vremya-ch.com, medvedev@vremya-ch.com

Рассмотрены задачи формирования выходных сигналов группового эталона времени и частоты и плавного управления шкалой времени. Предложены специальные алгоритмы для решения поставленных задач, позволяющие повысить устойчивость выходных сигналов к возможным скачкам частоты опорных сигналов. Работа алгоритмов продемонстрирована с помощью численного моделирования.

Ключевые слова: водородный стандарт времени и частоты, эталон времени и частоты, шкала времени, нестабильность частоты.

Two problems for atomic clock ensemble output signal generation are considered: generation of robust output signal, stable to frequency jumps in the reference clock, and smooth steering of time scale. Special algorithms are proposed to solve both problems. The work of the algorithms is demonstrated by numerical modeling.

Key words: hydrogen maser, ensemble of atomic clocks, time scale, frequency stability.

Водородные стандарты частоты являются неотъемлемой частью Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1–2012 и составляют основу вторичных и рабочих эталонов единиц времени и частоты в Российской Федерации [1–3]. За рубежом водородные стандарты также широко используются в эталонных комплексах [4]. Необходимо отметить перспективное и проверенное на практике применение водородных генераторов при освоении космоса [5, 6]. Несмотря на успехи в разработке новых поколений квантовых стандартов частоты, таких как цезиевые и рубидиевые фонтаны и стандарты с оптическими переходами охлаждённых атомов или ионов, водородные стандарты, имеющие высокую стабильность частоты, технологичность, надёжность и низкий уровень фазового шума, остаются незаменимыми инструментами в области прецизионных частотно-временных измерений [7, 8].

Принцип формирования сигнала эталона времени и частоты. В состав эталонов времени и частоты, как правило, входит не один, а целая группа водородных стандартов. Сравнив три или более водородных стандарта и применив метод трёх генераторов, можно определить характеристики нестабильности частоты отдельных стандартов [9]. Однако желательно, чтобы в группе было не три, а хотя бы четыре стандарта. Тогда один из них можно вывести из группы для регулировки или настройки, при этом всё равно сохранится возможность оценки нестабильности частоты оставшихся в эталоне стандартов. Кроме того, большое число стандартов позволяет понизить долговременную нестабильность частоты всего эталона и дисперсию оценки нестабильности частоты отдельных сигналов [3, 10, 11].

Ранее выходным сигналом эталона времени и частоты был сигнал одного из водородных стандартов группы с наилучшими характеристиками нестабильности частоты. Для выбранного стандарта вычислялись поправки относительно

но расчётной шкалы времени, которые затем учитывались потребителями сигналов эталона. В настоящее время для формирования выходных сигналов широко используются специальные вспомогательные генераторы или фазовые микростепперы. В таких формирователях частота встроенного кварцевого генератора стабилизируется относительно сигнала опорного водородного стандарта с помощью цифровой петли частотной автоподстройки, что позволяет программно вводить сдвиги фазы, частоты, а также дрейфа частоты относительно опорного сигнала.

Формирование выходного сигнала посредством стабилизации кварцевого генератора относительно опорного водородного стандарта позволяет решить следующие важные задачи.

Во-первых, измерив в реальном времени выходной сигнал относительно нескольких стандартов группы, можно продетектировать пропадание или скачок частоты в опорном сигнале, а также переключиться на резервный водородный стандарт для дальнейшей синхронизации частоты кварцевого генератора. При переключении на резервный стандарт необходимо стремиться к минимизации сдвигов фазы и частоты в выходном сигнале.

Во-вторых, с помощью специального управления кварцевым генератором на выходе эталона можно реализовать сигналы, обладающие характеристиками нестабильности частоты расчётной шкалы времени и подстроенные относительно национальной шкалы времени Российской Федерации UTC (SU). Для этого нужно применить результаты внешних сличений. При этом необходимо стремиться к оптимальному управлению подстраиваемым генератором, в результате которого нестабильность частоты должна стать минимальной при известных (оцениваемых) характеристиках нестабильности частоты управляемого генератора и опорного сигнала.

Настоящая работа направлена на решение данных задач.

В качестве примера устройства формирования выходных сигналов эталона времени и частоты рассмотрим формирователь эталонных частот резервируемый Ч7-317, разработанный в ЗАО «Время-Ч» (Россия). В этом приборе выходной сигнал формируется кварцевым генератором, который подстраивается по частоте относительно одного из сигналов, подаваемых на вход прибора. В представленной на рис. 1 схеме высокочастотные сигналы стандартов частоты и времени $СЧВ1... СЧВN$ (5, 10 или 100 МГц) сравниваются на частотном компараторе с сигналом кварцевого генератора $ГУН$ (5 или 10 МГц). Затем цифровые отсчёты разностей частот поступают в процессор, который использует их для подстройки кварцевого генератора относительно выбранного опорного сигнала, а также для анализа качества всех входных сигналов.

Алгоритм формирования сигналов эталонных частот, устойчивых к выбросам в опорных генераторах. Для систем формирования выходных сигналов подобного типа авторы предлагают новый алгоритм, позволяющий повысить устойчивость выходных сигналов к возможным скачкам частоты опорных сигналов.

Пусть максимально допустимое отклонение фазы выходного сигнала при произвольном скачке частоты опорного сигнала ограничено, например, 100 пс. В разработанном алгоритме мгновенные абсолютные значения вариации частоты $\sigma(t_n)$ рассчитаем для различных интервалов τ времени измерения и сравним с пороговым значением $\sigma_{\max}(\tau)$, установленным для каждого интервала времени:

$$\begin{aligned} |y^\tau(t_n) - y^\tau(t_n - \tau)| &< \sqrt{2}\sigma_{\max}(\tau); \\ y^\tau(t_n) &= \tau^{-1}[x(t_n) - x(t_n - \tau)], \end{aligned} \quad (1)$$

где $y^\tau(t_n)$ – средняя относительная разность частот опорного сигнала и одного из резервных сигналов на интервале τ в n -й момент времени t_n ; $x(t_n)$ – разность фаз опорного сигнала и одного из резервных сигналов, вычисленная при измерениях на компараторе устройства формирования выходных сигналов в момент времени t_n .

В рассматриваемом приборе применена цифровая система частотной автоподстройки частоты с интервалом между управлениями или коррекциями частоты $\Delta t = 10$ мс и постоянной времени $T \approx 100$ мс. Опираясь на данные значения, подберём следующие временные интервалы измерения частоты: $\tau = 10^{-2}$; 1; 100 с. Предположим, что уход фазы опорного сигнала линейный и оценим пороговые значения, при которых выходной сигнал не успеет отклониться по фазе более чем на 100 пс. Для выбранных интервалов τ получим следующие пороговые значения отклонения частоты: $\sigma_{\max} = 10^{-8}$; 10^{-10} ; 10^{-12} . Проанализировав характеристики нестабильности частоты современного водородного стандарта частоты Ч1-1003М, и приняв во внимание погрешность формирователя эталонных частот резервируемого стандарта Ч7-317, оценим среднее квадратическое отклонение (СКО) разности частот $\sigma_{\text{СКО}}(\tau)$ для указанных интервалов τ . Установлено, что пороговые значения откло-

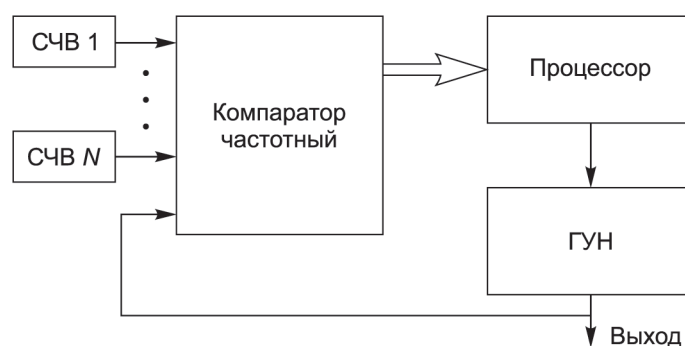


Рис. 1. Упрощённая схема формирователя эталонных частот резервируемого Ч7-317:
СЧВ – стандарт частоты и времени; ГУН – генератор, управляемый напряжением

нения частоты можно уменьшить в 10 раз, при этом полученные значения $\sigma_{\max}$ превысят $\sigma_{\text{СКО}}(\tau)$ в шесть раз, т. е. вероятность случайного превышения порога будет крайне малой. При численном моделировании алгоритма авторы настоящей статьи использовали следующие значения: $\sigma_{\max} = 10^{-9}$; 10^{-11} ; 10^{-13} .

Если условие (1) не выполняется для двух или более резервных сигналов хотя бы на одном из выбранных интервалов τ , то принимается решение, что в опорном сигнале присутствует скачок частоты. В этом случае осуществляется переход на резервный вход, т. е. кварцевый генератор подстраивается относительно одного из резервных входных сигналов.

Между опорным и резервными сигналами всегда существует некоторая разность частот, которую необходимо учитывать при переходе от одного сигнала к другому, чтобы исключить скачок частоты выходного сигнала. Для этого на каждом такте работы системы рассчитываются усреднённые значения взаимных разностей частот сигналов. Если скачок в опорном сигнале одиночный, а затем в течение некоторого заданного интервала времени скачки не наблюдаются, то по истечении этого времени можно выполнить автоподстройку относительно прежнего опорного сигнала.

За время, которое необходимо для детектирования скачка во входном сигнале, фаза выходного сигнала может отклониться на некоторую величину Δ . Хотя значение Δ не должно превышать заданные 100 пс, тем не менее, сдвиг фазы выходного сигнала можно уменьшить. Для этого после детектирования скачка и последующего за ним переключения на резервный сигнал нужно осуществить возврат фазы к значению, установленному до предполагаемого момента скачка частоты. С этой целью применим алгоритм минимизации энергии управления, позволяющий плавно изменить фазу сигнала. Алгоритм предполагает минимизацию суммы квадратов коррекций частоты выходного сигнала:

$$\sum_k u_k^2 \rightarrow \min. \quad (2)$$

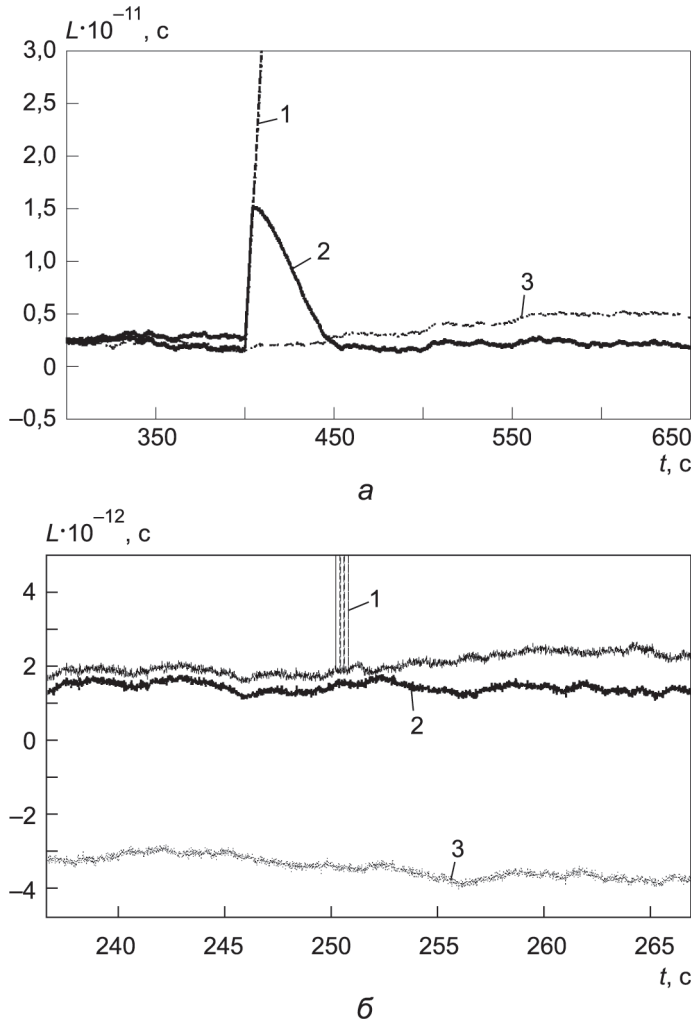


Рис. 2. Моделирование детектирования скачков частоты (а) и скачков фазы (б) в опорном сигнале:
1, 2, 3 – опорный, выходной, резервный сигналы системы, соответственно

Условию минимизации (2) удовлетворяет выражение для управляющего воздействия u в k -й момент времени, имеющее вид

$$u_k = -\frac{6}{N(N+1)} \left[\left(1 - \frac{2k}{N-1}\right) \Delta t^{-1} x_0 + \left(\frac{2N-1}{3} - k\right) y_0 \right],$$

где N – количество управлений; x_0 – фазовый сдвиг; y_0 – смещение частоты.

В проведённом численном эксперименте авторы использовали следующую модель изменения фазы и частоты подстраиваемого кварцевого генератора:

$$z_n = x_n^q + \varepsilon_n^q,$$

$$x_{n+1}^q = x_n^q + y_n \Delta t + u_n \Delta t + \xi_n^q,$$

$$y_{n+1}^q = y_n^q + u_n + \eta_n^q,$$

$$u_n = K_p [E(n) - E(n-1)] + K_i T E(n);$$

$$E(n) = [x_{qk}(n) - x_{qk}(n-1)] / \tau,$$

где z_n – фаза сигнала; x_n, y_n – фазовые переменные; $E(n)$ – рассогласование сигналов; $x_{qk}(n)$ – разность фаз k -го сигнала и сигнала управляемого кварцевого генератора; ε, ξ, η – белые фазовый и частотный шумы, шум случайных блужданий частоты, соответственно; K_p, K_i – соответственно пропорциональный и интегральный коэффициенты, отвечающие за характеристики петли управления.

Аналогичную модель шума применяли при моделировании сигнала стандарта частоты.

На рис. 2, а представлен результат моделирования сигнала кварцевого генератора со скачком частоты, равным $3 \cdot 10^{-12}$. Так как вариация частоты, рассчитанная на интервале 100 с, превысила пороговое значение, был продетектирован скачок частоты. После детектирования производился автоматический возврат фазы. На рис. 2, б приведён результат моделирования скачков фазы. Так как скачки повторяются в течение некоторого заданного интервала времени, то кварцевый генератор работает в режиме автоподстройки относительно резервного сигнала. Таким образом, численное моделирование подтвердило адекватность разработанного алгоритма детектирования скачков частоты.

Алгоритм расчёта параметров линейно-квадратичного гауссового регулятора. В настоящее время одним из широко распространённых методов автоматического управления является линейно-квадратичное гауссово управление (ЛКГ) [12, 13]. Рассмотрим следующую модель измерений разности фаз подстраиваемого генератора относительно опорного:

$$z_n = H X_n + v_n;$$

$$X_n = \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \end{bmatrix};$$

$$H = [1 \ 0],$$

где H – матрица связи; X_n – вектор состояния системы; v_n – белый гауссов шум измерений; x_n, y_n – соответственно разность фаз и относительная разность частот подстраиваемого и опорного генераторов.

Изменение состояния системы во времени описывается рекуррентным соотношением

$$X_{n+1} = F X_n + B u_n + w_n,$$

где F, B – матрицы перехода и управления, соответственно; w_n – вектор шумов, описывающий белый частотный шум и шум случайных блужданий результирующего случайного процесса разности фаз.

Матрицу перехода (матрицу эволюции процесса) и матрицу управления запишем как

$$F = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} \Delta t \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Управление осуществляется с помощью оптимального линейно-квадратичного регулятора, минимизирующего функционал

$$J = \left\langle \sum_n (\mathbf{x}_n^T W_Q \mathbf{x}_n + u_n^T W_R u_n) \right\rangle, \quad (3)$$

где $W_R = [r]$ – матрица весовых коэффициентов для вектора

ошибок; $W_Q = q \begin{bmatrix} p & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ – матрица весовых коэффициентов для

вектора управления.

При использовании оптимального регулятора вычислим управляющее воздействие следующим образом:

$$u_n = -G \mathbf{x}_n;$$

$$G = (B^T \Gamma B + W_R)^{-1} B^T \Gamma F;$$

$$\Gamma = F^T \Gamma F + W_Q - F^T \Gamma B (B^T \Gamma B + W_R)^{-1} B^T \Gamma F,$$

где Γ – решение алгебраического уравнения Риккати.

В известных авторам работах [13–15] по применению метода ЛКГ-управления в области эталонов времени и частоты связь между параметрами W_R , W_Q и характеристиками процесса автоподстройки детально не исследовалась, а подбор значений W_R , W_Q осуществлялся вручную с помощью численного моделирования. В настоящей работе представлена приближённая аналитическая зависимость между весовыми коэффициентами функционала (3) и постоянной времени системы автоподстройки. Данная зависимость выведена при аппроксимации результатов численного решения для ЛКГ-регулятора и имеет вид

$$r/(pq) = 0,25T^4 \Delta t^{-2}, \quad (4)$$

где r , p , q – коэффициенты матриц W_R , W_Q .

Постоянную времени T системы автоподстройки рассчитаем по формуле

$$T = -\Delta t / \lg \max |z_{1,2}|,$$

где $z_{1,2}$ – полюсы передаточной функции петли управления.

Алгоритм вычисления параметров петли автоподстройки $G = (g_x, g_y)$ состоит из следующих шагов.

1. Определение времени измерений τ_x , соответствующего пересечению графиков нестабильности частоты σ_A (версия Аллана) подстраиваемого генератора и опорного сигнала (рис. 3, кривые 1, 2).

2. Расчёт постоянной времени $T = \alpha \tau_x$ для найденного значения τ_x . Выбор коэффициента α требует отдельного изучения и обоснования (при численном моделировании принимали $\alpha = 0,3$).

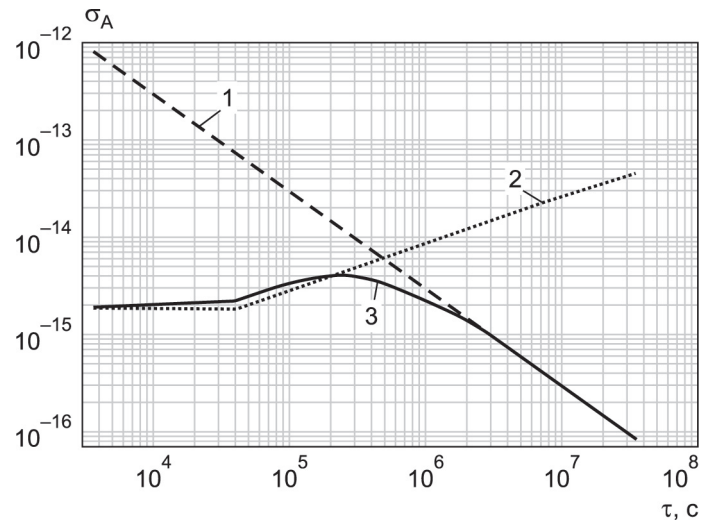


Рис. 3. Моделирование автоподстройки частоты сигнала водородного стандарта относительно шкалы времени, передаваемой глобальными навигационными системами:

1, 2, 3 – опорный, подстраиваемый, выходной сигнал системы, соответственно

3. Вычисление значения r по формуле (4) при фиксированном параметре $p=1$. Без ограничения общности $q=0,001$.

4. Решение уравнения Риккати для заданных r , p , q .

5. Нахождение коэффициентов g_x , g_y .

С помощью описанного выше алгоритма вычислены коэффициенты системы автоподстройки для модельных характеристик нестабильности частоты опорного сигнала – шкалы времени, передаваемой с помощью сигналов глобальных навигационных систем, и подстраиваемого генератора – кварцевого генератора, стабилизированного относительно водородного стандарта частоты пассивного типа. Результат моделирования (см. рис. 3) свидетельствует о том, что при рассчитанных по предложенному алгоритму параметрах петли автоподстройки будет наблюдаться нестабильность частоты сигнала управляемого генератора на коротких временных интервалах и нестабильность частоты опорного сигнала на длительных временных интервалах. При этом ухудшение нестабильности частоты выходного сигнала, обусловленное работой системы автоподстройки, является незначительным.

Заключение. Разработаны алгоритмы для детектирования скачков частоты сигнала опорного водородного стандарта эталона времени и частоты на нескольких временных интервалах, а также для плавной коррекции фазы выходного сигнала после переключения автоподстройки на резервный сигнал. Данные алгоритмы позволяют минимизировать изменения частоты и фазы выходного сигнала при различных скачках частоты опорного сигнала. Предложенный метод расчёта параметров системы автоподстройки фазы и частоты позволяет упростить реализацию оптимального управления и минимизировать негативное влияние автоподстройки на характеристику нестабильности частоты выходных сигналов эталона. Метод применим как для задач формирования сиг-

налов эталона времени и частоты в соответствии с аналитической шкалой времени, так и для автоподстройки этих сигналов относительно национальной шкалы времени UTC (SU) с использованием глобальной навигационной спутниковой системы и других методов внешних сравнений, имеющих существенно большую погрешность по сравнению с внутренними сравнениями сигналов эталона.

Л и т е р а т у р а

1. **Blinov I., Domnin Yu., Donchenko S., Goncharov A., Koshelyaevsky N., Kostromin V., Noretz I., Smirnov Yu.** Progress at the State Time and Frequency Standard of Russia // Proc. 45th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Systems and Applications Meeting. Bellevue, December 2–5, 2013.

2. **Бойко А. И., Купалова О. В.** Ансамбль водородных генераторов ГЭВЧ как «виртуальный фонтан» // Метрология времени и пространства: Материалы VII Междунар. симпозиума. Менделеево: ВНИИФТРИ, 2014. С. 53–54.

3. **Беляев А. А., Демидов Н. А., Медведев С. Ю., Пастухов А. В., Сахоров Б. А., Блинов И. Ю.** Аппаратура водородных хранителей эталонов единиц времени и частоты // Вестник метролога. 2015. № 2. С. 14–23.

4. **Stephen M.** USNO report to the CGSIC Timing Subcommittee. 54th Meeting of the civil GPS Service Interface Committee. Washington, 8–9 September, 2014. [Электрон. ресурс]: <http://www.gps.gov/cgsic/meetings/2014/mitchell.pdf> (дата обращения: 02.07.2018).

5. **Кардашев Н. С. и др.** «РадиоАстрон» – телескоп размером 300 000 км: основные параметры и первые результаты наблюдений // Астрономический журнал. 2013. Т. 90. № 3. С. 179–222. DOI: 10.7868/S000462991303002X.

6. **Droz F., Mosset P., Wang Q., Rochat P., Belloni M., Gioia M., Resti A., Waller P.** Space passive hydrogen Maser – performances and lifetime data // Proc. Joint 2009 European Frequency and Time Forum & 2009. IEEE Frequency Control Symposium. Besançon, France, 20–24 April, 2009. P. 393–398.

DOI: 10.1109/FREQ.2009.5168208.

7. **Guéna J., Abgrall M., Rovera D., Laurent Ph., Chupin B., Lours M., Santarelli G., Rosenbusch P., Tobar M. E., Li R., Gibble K., Clairon A., Bize S.** Progress in atomic fountains at LNE-SYRTE // IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics, Frequency Control. 2012. V. 59. No. 3. P. 391–420. DOI: 10.1109/TUFFC.2012.2208.

8. **Le Targat R. e. a.** Experimental realization of an optical second with strontium lattice clocks // Nature communications. 2013. V. 4. No. 2109. P. 1–9. DOI: 10.1038/ncomms3109.

9. **Чернышев И. Н., Беляев А. А., Мишагин К. Г.** Погрешность измерения нестабильности частоты методом трех генераторов // Измерительная техника. 2012. Т. 7. С. 37–41.

10. **Мишагин К. Г., Подогова С. Д., Чернышёв И. Н., Медвелев С. Ю.** Алгоритм формирования выходного сигнала группового эталона частоты // Измерительная техника. 2013. № 8. С. 34–38.

11. **Чернышев И. Н., Мишагин К. Г.** Оптимальное измерение нестабильности частоты в многоканальном компараторе // Измерительная техника. 2009. Т. 9. С. 13–17.

12. **Athans M.** The Role and Use of the Stochastic Linear-Quadratic-Gaussian Problem in Control System Design // Transaction on Automatic Control AC-16. 1971. V. 16. P. 529–552. DOI: 10.1109/TAC.1971.1099818.

13. **Koppang P., Leland R.** Linear quadratic stochastic control of atomic hydrogen masers // IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics, Frequency Control. 1999. V. 46. No. 3. P. 517–522. DOI: 10.1109/58.764838.

14. **Koppang P. A.** State space control of frequency standards // Metrologia. 2016. V. 53. No. 3. P. R60. DOI: 10.1088/0026-1394/53/3/R60.

15. **Farina M., Galleani M., Tavella P.** A control theory approach to clock steering techniques // IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics, Frequency Control. 2010. V. 57. No. 10. P. 2257–2270. DOI: 10.1109/TUFFC.2010.1687.

Дата принятия: 02.07.2018.