

Алгоритм формирования групповой частоты и шкалы атомного времени при использовании данных распределённых стандартов на основе рекуррентного подхода

А. А. Макаров¹, К. К. Зубарев², Ю. Ф. Матасов³

Военно-космическая академии имени А. Ф. Можайского
¹ almakand@mail.ru, ²8834707@mail.ru, ³yfmatasov@yandex.ru

Аннотация. The output signals of frequency and time standards can have different properties of frequency instability at different time intervals. Some input signal may be better than others in one time interval, but worse in another. The existing optimal summation algorithm reduces the instability of the output signal only for a fixed time interval τ . The authors propose an improved algorithm for obtaining a theoretical optimality condition for the entire range of values of τ .

Ключевые слова frequency and time standards; weighted average summation; weight summation; statistical modeling; filtering processes

I. ВВЕДЕНИЕ

Групповой эталон времени и частоты (ГЭ), состоящий из нескольких стандартов, предоставляет возможность реализовать групповую аналитическую шкалу времени. Формируемая аналитическая шкала времени должна обладать следующими свойствами [1–4]:

- характеристики стабильности аналитической шкалы должны быть лучше, чем у каждого из стандартов, входящих в группу, на всех временных интервалах;
- работа в реальном времени и прогнозируемость;
- динамическое определение весовых коэффициентов и других параметров. Автоматическая работа при минимальном вмешательстве обслуживающего персонала.

Однако реализованный в настоящее время алгоритм формирования групповой шкалы времени не удовлетворяет всем вышеперечисленным требованиям. Действующий алгоритм не функционирует автоматически, весовые коэффициенты рассчитываются отдельно. Производится вычисление средневзвешенной групповой частоты, однако неизвестна временная поправка (сдвиг фазы) для каждого стандарта, включая опорный, относительно аналитической шкалы времени. Расчет средневзвешенной разности частот производится по методу наименьших квадратов на конечном интервале предыстории порядка (10-30) суток, используется кусочно-

постоянная модель разностной частоты. Таким образом, нельзя говорить о работе настоящего алгоритма групповой шкалы времени в реальном времени.

Создание новой аналитической шкалы времени, обладающей вышеперечисленными свойствами, позволит не только улучшить точностные характеристики ГЭ, повысить надежность и оперативность анализируемой информации, но и реализовать физическую групповую шкалу времени. Наличие физических высокочастотных сигналов и сигналов шкалы времени, обладающих характеристиками аналитической групповой шкалы времени (ГШВ), позволит вывести на качественно новый уровень решение задач частотно-временных измерений, передачи эталонов единиц времени и частоты, эфемеридно-временного обеспечения. в том числе и ГНСС ГЛОНАСС.

II. АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ ГРУППОВОЙ ЧАСТОТЫ И ШКАЛЫ АТОМНОГО ВРЕМЕНИ

Предположим, что ГЭ может содержать более четырех стандартов. Для того чтобы выходные сигналы формирователя обладали средневзвешенной частотой всех доступных стандартов, можно, во-первых, расширить количество входных каналов формирователя, во-вторых, осуществить взаимные сличения стандартов на внешнем многоканальном компараторе, на основе измеренных значений вести аналитическую шкалу времени на отдельном компьютере, с которого осуществлять управление частотой самого формирователя [5, 6].

Внешнее управление частотой кварцевого генератора (КГ) позволяет качественно повысить характеристики долговременной стабильности выходных сигналов эталона и максимально точно привязать формируемую физическую шкалу времени к UTC(SU).

Стоит отметить, что использование кроме водородных мазеров цезиевых стандартов является крайне желательным, так как для водородных стандартов свойственны дрейф частоты и большой шум случайных блужданий, проявляющиеся на длительных временных интервалах. Использование цезиевых стандартов

позволило бы повысить надежность автономного хранения единиц времени и частоты на длительных временах (больше 10 суток).

Возможность достижения наивысшей стабильности выходного сигнала группового эталона зависит от алгоритма взвешивания сигналов стандартов частоты и времени (СЧВ).

На рис. 1 представлена структурная схема n -канального устройства формирования средневзвешенной частоты (ШВ). Будем предполагать, что с точки зрения шумов оно является идеальным, т.е. не вносит частотных флуктуаций в выходной сигнал.

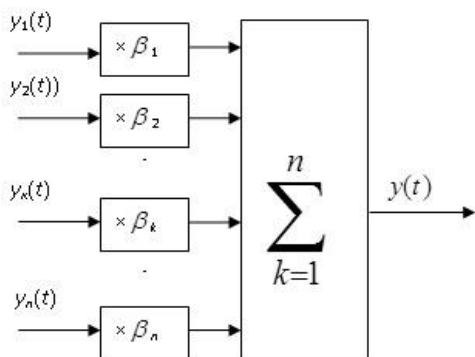


Рис. 1. Схема формирователя средневзвешенной частоты (ШВ)

На вход формирователя подаются заранее измеренные разности частот или ШВ (предположим, что они могут быть точно определены). Для простоты дальнейших рассуждений рассмотрим относительные отклонения частот сигналов на входе системы от некоторой номинальной частоты, которая считается постоянной величиной:

$$y_k(t) = \frac{f_k(t) - f_0}{f_0}$$

Тогда относительное отклонение частоты выходного сигнала от номинального значения имеет вид

$$y(t) = \sum_k \beta_k y_k(t) \tag{1}$$

При этом для весовых коэффициентов β_k должно выполняться условие нормировки:

$$\sum_k \beta_k = 1.$$

Задача состоит в определении значений весовых коэффициентов β_k , обеспечивающих наилучшую стабильность выходного сигнала.

В качестве критерия нестабильности частоты используем двухвыборочную вариацию Аллана на интервале времени измерения τ :

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2} \langle (y(t_i + \tau) - y(t_i))^2 \rangle = \langle \sigma_i^2 \rangle, \tag{2}$$

где i – текущий номер измерения среднего на интервале τ относительного отклонения частоты выходного сигнала от номинального значения;

$\langle \rangle$ – означает усреднение по статистическому ансамблю.

Подставляя (1) в (2), получим:

$$\sigma_y^2(\tau) = \left\langle \sum_k \beta_k^2 \sigma_{k,i}^2 \right\rangle + 2 \left\langle \sum_{k>l} \beta_k \beta_l \sigma_{k,i} \sigma_{l,i} \right\rangle.$$

Это выражение можно записать в виде:

$$\sigma_y^2(\tau) = \sum_k \beta_k^2 \sigma_k^2(\tau) + 2 \sum_{k>l} \beta_k \beta_l R_{kl}(\tau),$$

где $\sigma_k^2(\tau)$ – вариация Аллана k -го сигнала (предполагаем, что эти значения нам с достаточной точностью известны с предварительного исследования сигналов);

$R_{kl}(\tau)$ – коэффициент взаимной корреляции вариаций частоты на интервале τ для сигналов с номерами k и l .

Если СЧВ эксплуатируются в надлежащих условиях (достаточно ослаблено воздействие внешних факторов: температуры, давления, влажности, магнитных и электрических полей и т.д.), то можно считать вариации их сигналов некоррелированными $R_{kl}(\tau) = 0$. Тогда справедливо:

$$\sigma_y^2(\tau) = \sum_k \beta_k^2 \sigma_k^2(\tau) \tag{3}$$

Очевидно, что для наиболее простого случая идентичных по стабильности частоты СЧВ ($\sigma_k(\tau) = \sigma(\tau)$) оптимальным является равное взвешивание сигналов ($\beta_k = 1/n$). В таком случае нестабильность выходного сигнала формирователя будет в корень из n раз меньше нестабильности частоты сигналов на входе:

$$\sigma_y(\tau) = \frac{\sigma(\tau)}{\sqrt{n}} \tag{4}$$

Это соотношение выполняется независимо от интервала времени измерений τ .

Рассмотрим случай неравных по стабильности сигналов. Используя необходимое условие экстремума функции многих переменных (функция (3) с учетом (4)), находим значения весовых коэффициентов, при которых значение дисперсии суммарного сигнала является минимальным:

$$\sigma_{y,\min}^2(\tau) = \frac{1}{\sum_k \frac{1}{\sigma_k^2(\tau)}} \tag{5}$$

$$\beta_k^* = \frac{\sigma_{y,\min}^2(\tau)}{\sigma_k^2(\tau)}$$

Подчеркнем, что минимальное значение нестабильности частоты суммарного сигнала достигается только для конкретного значения времени усреднения τ . Оптимальные значения весовых коэффициентов могут

существенно отличаться для разных значений τ . Выражение для оптимальных весовых коэффициентов (5) интуитивно понятно, оно означает, что сигнал с номером k имеет вес обратно пропорциональный своей нестабильности ($\beta_k = 1/\sigma_k^2(\tau)$). Величина $\sigma_{y\ min}^2(\tau)$ в (5) играет роль нормировочного коэффициента.

III. ФОРМИРОВАНИЯ ГРУППОВОЙ ЧАСТОТЫ И ШКАЛЫ АТОМНОГО ВРЕМЕНИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДАННЫХ РАЗНЕСЁННЫХ СТАНДАРТОВ

В настоящее время накоплен достаточно большой опыт по формированию аналитической ШВ в ансамблях стандартов частоты. Существующие алгоритмы позволяют получать отсчеты времени, обладающие лучшей стабильностью, чем у лучшего стандарта из группы, а присутствие в группе стандарта с плохой стабильностью благодаря динамическому подбору весовых коэффициентов практически не ухудшает характеристики групповой шкалы времени [7, 8].

Далее используются следующие символичные обозначения:

t – момент времени обновления ШВ; H_i – идентификатор СЧВ с номером i ;

$h_i(t)$ – значение времени стандарта H_i в момент t (данная величина не может быть измерена в эксперименте);

$x_i(t) = TA - h_i(t)$ – отстройка значения времени формируемой аналитической групповой шкалы TA от значения времени стандарта H_i в момент t (данная величина вычисляется и позволяет физически реализовать ГШВ на основе сигнала стандарта H_i);

$x_{ij}(t) = h_j(t) - h_i(t) = x_i(t) - x_j(t)$ – измеряемое значение расстройки ШВ между стандартами $H_j(t)$ и $H_i(t)$ в момент t ;

p_i – нормированный весовой коэффициент, присвоенный стандарту H_i ;

τ – интервал времени между последовательными измерениями; N – количество используемых стандартов.

Величины, которые требуется определить, используя алгоритм ГШВ, есть $x_i(t)$ – величины временной отстройки групповой шкалы времени относительно стандарта с номером i . Данные величины определяются основным уравнением шкалы времени:

$$x_i(t) = \sum_{j=1}^N p_j [\hat{x}_j(t) - x_{ij}(t)], \quad (6)$$

где предсказываемые значения отстройки вычисляются согласно формуле:

$$\hat{x}_N = a_1 x_1 + \dots + a_N x_N = \sum_{i=1}^N p_i x_i. \quad (7)$$

Весовые коэффициенты p_i удовлетворяют условию нормировки:

$$\sum_{i=1}^N p_i = 1 \quad (8)$$

В (6) и (7) знак « $\hat{}$ » означает, что соответствующая величина является оцениваемой по результатам предыдущих измерений. Для вычисления поправок x_i в каждый момент времени необходимо подобрать весовые коэффициенты и оценить частотную отстройку, используемую в (7).

Частотные поправки будем вычислять как парные разности соседних временных отсчетов с последующим усреднением экспоненциальным фильтром:

$$y_i(t) = \frac{1}{m+1} [y_i(t-\tau) + m \cdot \hat{y}_i(t)],$$

$$\hat{y}_i(t) = \frac{x_i(t) - x_i(t-\tau)}{\tau}. \quad (9)$$

Результат моделирования выборок фазы для пяти стандартов представлены на рисунке 2. При моделировании учитывались только шумовые компоненты, соответствующие белому фазовому и белому частотному шуму [9]. Предполагалось, что стандарты имеют дополнительные фиксированные частотные расстройки, которые подчиняются нормальному закону распределения с нулевым средним.

По полученным выборкам фаз стандартов проведен расчет аналитической ШВ согласно выражениям (6)–(9). При моделировании использовался коэффициент $m=1$. На рис. 2 отмечена аналитическая ШВ, которая получена из отсчетов фаз пяти стандартов путем вычитания поправки $x_i(t)$. Как видно, применение базового уравнения шкалы времени (6) позволяет усреднить и существенно уменьшить шумы фазовых измерений и частотные флуктуации в результирующей аналитической ШВ [10].

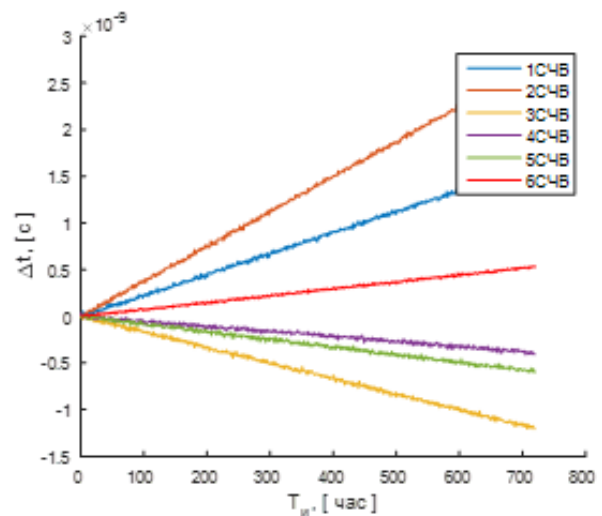


Рис. 2. Результат моделирования групповой шкалы времени

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, разработанный алгоритм формирования групповой частоты и шкалы атомного времени при использовании данных распределённых стандартов предусматривает:

- предварительную оценку отстройки времени;
- уточнение оценки времени;
- оценку отстройки частоты;
- усреднение оценки отстройки частоты;
- определение постоянной времени экспоненциального фильтра;
- оценку вариации;
- усреднение оценки вариации;
- определение групповой вариации;
- определение весовых коэффициентов;
- определение смещения оценки вариации.

Небольшое смещение оценки вариации частоты возникает в результате того, что каждый стандарт дает свой вклад в групповую вариацию пропорционально своему весу. Чем больше весовой коэффициент для стандарта, тем больше значение соответствующего сдвига.

Алгоритм формирования шкалы времени использует калмановский подход для фильтрации оценки частоты и позволяет максимально автоматизировать процесс вычисления шкалы времени, включая автоматическое детектирование скачков частоты стандартов, вызванных внешним управлением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] ВIRM [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.bipm.org>. – Дата доступа: 19.12.2017.
- [2] Донченко С., Крошкин А. Новый подход к формированию групповой частоты и шкалы атомного времени на ансамбле хранителей // Измерительная техника. 1989. № 7. С. 3–7.
- [3] Шестая всероссийская конференция «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО-2015): тезисы докладов. СПб.: ИПА РАН, 2015. 200 с.
- [4] Weis M., Allan D., Pepler T. A Study of the NBS Time Scale Algorithm // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 1989. Vol. 38, no. 2. Pp. 631–635.
- [5] 50 лет Российскому институту радионавигации и времени. Санкт-Петербург: Российский институт радионавигации и времени (РИРВ), 2007. 240 с.
- [6] Jacques C., Boulanger J. S. Time scale algorithms for an inhomogeneous group of atomic clocks // Proceedings of the 24th Annual Precise Time and Time.
- [7] Сейдж Э.П. Теория оценивания и ее применение в связи и управления. М.: Связь, 1976. 496 с.
- [8] Толстиков А. Алгоритм формирования шкалы группового хранителя времени // Научный вестник НГТУ. 2010. Т. 38, № 1. С. 190–194.
- [9] Алешкин А.П., Буриков С.В., Макаров А.А. Метод формирования групповой шкалы времени на основе объединения отдельных статистически эквивалентных стандартов частоты // Радиопромышленность. 2016. № 2. С. 36–40.
- [10] Алешкин А.П., Макаров А.А., Мысливцев Т.О. Предложения по созданию единой шкалы времени на основе данных пространственно-распределенных стандартов частоты различной точности // Труды Института прикладной астрономии РАН. Вып.37. СПб.: ИПА РАН, 2016. Выпуск 37. С. 19–22