

А. П. Алешкин¹, С. В. Буриков¹, А. А. Макаров¹¹ ВКА им. А. Ф. Можайского

МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ ГРУППОВОЙ ШКАЛЫ ВРЕМЕНИ НА ОСНОВЕ ОБЪЕДИНЕНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ СТАТИСТИЧЕСКИ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ СТАНДАРТОВ ЧАСТОТЫ

В статье рассматривается один из подходов к формированию групповой шкалы времени информационно-управляющих систем на основе объединения в ансамбли однотипных стандартов частоты.

Ключевые слова: стандарт частоты, групповая шкала времени, нестабильность частоты, весовые коэффициенты.

Для обеспечения синхронной работы в единой шкале времени (ШВ) в настоящее время актуальным является вопрос уменьшения погрешности хранения частоты квантовых стандартов системы путем объединения их в ансамбли. Выигрыш по точности можно получить при совместной обработке результатов измерений частот, воспроизводимых отдельным стандартом.

Еще в 2007 году А. М. Финкельштейн [2] заметил: «Одна из основных проблем в России, диктуемая задачами координатно-временного обеспечения, – поддержание и развитие группового распределенного эталона времени и частоты, формирующего единую групповую шкалу времени с возможностью оперативного доступа к ней». Однако до настоящего времени данная задача еще не решена.

Шкала времени представляет собой последовательность временных интервалов определенной длительности, отсчитываемых от некоторого начального момента. Интервалы времени формируются на основе подсчета определенного количества периодов гармонических или импульсных сигналов с частотой f_D (действительное значение частоты некоторой меры, полученное в результате ее сравнения с мерами частоты более высокой точности). Погрешность сличения частот и изменение частот во времени обуславливают отличие действительного значения частоты f_D от номинального значения $f_{ном}$ (значение номинальной частоты меры). Любая мера частоты и времени в этом плане характеризуется относительной погрешностью по частоте [1]:

$$\sigma_{0f} = \frac{f_{ном} - f_D}{f_{ном}}$$

Отклонение частоты от действительного значения характеризуется рядом статистических характеристик, в частности, среднеквадратической относительной случайной вариацией частоты $\sigma(\tau_u, \tau_e)$ и среднеквадратическим относительным отклонением результата измерения $\delta(\tau_u)$, где τ_u – это время измерения, а τ_e – время выборки. Относительная погрешность меры по частоте приводит к тому, что поправки стандартов частоты и времени за интервал хранения шкалы времени (ШВ) t_{xp} в первом приближении изменяются по закону $\Delta t(t_{xp}) = \Delta_{0f} t_{xp}$, что обуславливает погрешность автономного хранения ШВ.

Для реализации потенциальных точностных характеристик средств системы единого времени (СЕВ) и их детальной оценки необходимо рассматривать процесс формирования частоты и ШВ как случайный.

В целом доведение территориально-разнесенным потребителям шкалы времени UTC(SU) единичных интервалов и частоты осуществляется с погрешностями. Уменьшение погрешностей требует определенных, часто существенных материальных затрат на оснащение потребителей средствами СЕВ соответствующего класса точности, а также решения сложных методических вопросов и задач эксплуатации средств.

В практике обработки частотно-временных измерений (ЧВИ) важное место занимают вопросы оценки расхождения ШВ. При этом необходимо решение задачи выбора оптимальных алгоритмов обработки ЧВИ, обеспечивающих минимальное значение погрешности оценки.

В связи со статистической эквивалентностью отдельных стандартов частоты и связанных с ними

ШВ возникает вопрос о рациональном выборе эталонной системы, представляющей собой группу сравнимых по точностным характеристикам стандартов частоты и времени. Групповая шкала времени, выступающая в качестве эталонной, должна обладать наибольшей стабильностью единицы измерения по сравнению с образующими ее шкалами времени. Имеющийся опыт группового эталонирования убедительно показывает правомерность построения эталона с обработкой информации.

Рассмотрим один из подходов к формированию групповой шкалы времени.

При рассмотрении ансамбля из $N+1$ часов одни из них выбираются в качестве опорных. Каждым часам присписывается индекс $i = 0, 1, \dots, N$. Опорным часам присписывается индекс 0. Используемые для обработки временные измерения производятся посредством подачи секундного импульса от одних часов – на запуск измерителя интервалов времени и секундного импульса от других часов – на остановку такого измерителя. Разница между шкалами часов с индексами i и k , измеряемая в момент времени t , обозначается $\Delta T_{i-k}(t)$.

Положительная величина $\Delta T_{i-k}(t)$ соответствует случаю, когда i -е часы опережают часы с индексом k во времени.

Считается, что $\Delta T_{i-\Gamma}^*(t)$ – это оценка в момент времени t разницы между шкалой часов i и групповой шкалой времени (Γ) [3].

В случае формирования групповой шкалы времени как арифметического среднего шкал ансамбля часов оценка положения шкалы опорных часов относительно среднегруппового времени определяется по формуле

$$\Delta T_{0-\Gamma}^* = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta T_{0-i}(t). \quad (1)$$

Приведенное соотношение является достаточным для формирования групповой шкалы времени, если все часы, входящие в группу, имеют одинаковые точностные характеристики, а также если часы из группы не исключаются и новые часы не добавляются.

При добавлении и исключении часов возникают две проблемы, обусловленные:

- разницей между шкалами времени часов и новой шкалой времени;
- различием частот.

Для решения первой проблемы формула (1) модифицируется таким образом, что используются не разницы между шкалами, а их приращения:

$$\Delta T_{0-\Gamma}^*(t) = \Delta T_{0-\Gamma}^*(t-1) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\Delta T_{0-i}(t) - \Delta T_{0-i}(t-1)]. \quad (2)$$

В то же время выражение в формуле (2), заключенное в квадратные скобки, представляет собой среднее относительное отклонение частоты часов с индексом i , определенное относительно опорных часов на интервале выборки длиной τ между моментами $t-1$ и t , взятое с обратным знаком, умноженное на длину этого интервала:

$$\Delta T_{0-i}(t) - \Delta T_{0-i}(t-1) = -[y_i(t-1, \tau)]\tau. \quad (3)$$

Вторая проблема, касающаяся различия по частоте между часами, обуславливает необходимость введения в расчеты корректирующих поправок по частотам. Для этого вводится понятие первичной средней частоты группы:

$$\bar{v} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_{0i} = v_0 \left[1 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_{0i} \right], \quad (4)$$

$$v_{0i} = v_0 [1 + y_{0i}]. \quad (5)$$

Для первоначального набора часов выполняется условие

$$\sum_{i=1}^N \left(\frac{v_{0i} - \bar{v}}{v_0} \right) = 0, \quad (6)$$

но как только новые часы включаются в группу или какие-либо часы исключаются из нее, это условие перестает выполняться, если значение \bar{v} фиксируется, и ставится задача сохранить его прежнее значение.

С учетом приведенных замечаний и соображений уравнение (1) преобразуется к виду

$$\begin{aligned} \Delta T_{0-\Gamma}^*(t) &= \Delta T_{0-\Gamma}^*(t-1) - \frac{\tau}{N} \sum_{i=1}^N [\bar{y}_i(t-1, \tau)] + \frac{\tau}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{v_i(t) - \bar{v}}{v_0} \right) = \\ &= \Delta T_{0-\Gamma}^*(t-1) + \frac{\tau}{N} \left\{ \sum_{i=1}^N \left[\frac{\Delta v_{i-\Gamma}(t)}{v_0} - \bar{y}_i(t-1, \tau) \right] \right\}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $\frac{\Delta v_{i-\Gamma}(t)}{v_0}$ – корректирующая поправка на частоту, равная значению величины $\frac{v_i(t) - \bar{v}}{v_0}$ смещения частоты с учетом дрейфа.

Если все $\frac{\Delta v_{i-\Gamma}(t)}{v_0}$ являются достаточно точными оценками поправок частот часов, то

$$\left[\frac{\Delta v_{j-\Gamma}(t)}{v_0} - \bar{y}_j(t-1, \tau) \right] \approx \left[\frac{\Delta v_{k-\Gamma}(t)}{v_0} - \bar{y}_k(t-1, \tau) \right], \quad 1 \leq j, k < N.$$

Следствием достаточной строгости данного приближения будет тот факт, что добавление или исключение из группы часов будет оказывать лишь незначительное воздействие на частоту моделируемых групповых часов.

При включении в группу новых часов их поправка должна определяться с учетом существующей

шкалы времени. Перед исключением из группы j -х часов система поправок также должна быть пересчитана, чтобы обеспечить достаточно строгое равенство:

$$\left[\frac{\Delta v_{j-G}(t)}{v_0} - \bar{y}_j(t-1, \tau) \right] \approx \frac{1}{N-1} \sum_{i \neq j}^N \left[\frac{\Delta v_{i-G}(t)}{v_0} - \bar{y}_i(t-1, \tau) \right].$$

На групповую шкалу времени, формируемую по формуле (7), не будут оказывать существенного неблагоприятного воздействия как добавляемые, так и исключаемые из группы часы за счет соответствующего регулирования и своевременного корректирования поправок $\frac{\Delta v_{i-G}(t)}{v_0}$. Однако уравнение (7) предусматривает равные веса $1/N$ для всех часов, включенных в группу. Для шкал времени, строящихся из часов с заметно различающимися стабильными характеристиками, могут потребоваться различные весовые схемы. Учет возможности неравных весов $v_i(t)$ приводит к основному уравнению шкалы времени:

$$\Delta T_{0-G}^*(t) = \Delta T_{0-G}^*(t-1) + \tau \sum_{i=1}^N \left\{ v_i(t) \left[\frac{\Delta v_{i-G}(t)}{v_0} - \bar{y}_i(t-1, \tau) \right] \right\}, \quad (8)$$

где $\sum_{i=1}^N v_i(t) = 1$ и $0 \leq v_i(t) \leq 1$.

В этом случае $\bar{v} = \sum_{i=1}^N v_i(t) v_{i0}$.

Формируемая таким образом групповая шкала времени будет средневзвешенной шкалой часов ансамбля. Уравнение (8) позволяет рассматривать положение шкалы времени опорных часов относительно любого эталона, например, Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени (ГЭТ 1–2012), ΔT_{0-G}^* , если получена достаточно точная оценка величины частотных поправок:

$$\frac{\Delta v_{G-G\Delta}^*}{v_0} = \frac{\Delta \bar{v} - v_{G\Delta}}{v_0},$$

где $v_{G\Delta}$ – частота, хранимая ГЭТ 1–2012, и произведена начальная установка ΔT_{0-G}^* (например, с помощью перевозимых квантовых часов).

Уравнение (8) в этом случае примет вид

$$\Delta T_{0-G\Delta}^*(t) = \Delta T_{0-G\Delta}^*(t-1) + \tau \sum_{i=1}^N \left\{ v_i(t) \left[\frac{\Delta v_{i-G}(t)}{v_0} - \bar{y}_i(t-1, \tau) + \frac{\Delta v_{G-G\Delta}^*}{v_0} \right] \right\}. \quad (9)$$

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 8.567-2014 Измерения времени и частоты. Термины и определения.
2. Финкельштейн, А.М. Фундаментальное координатно-временное обеспечение // Вестник Российской академии наук. – 2007. – Т. 77. – № 7. – С. 608–617.

До тех пор, пока значение $\frac{\Delta v_{G-G\Delta}^*}{v_0}$ является достаточно точной оценкой, часы, корректируемые по опорным в соответствии с (9), будут хранить шкалу времени, привязанную к Государственному эталону времени и частоты.

Самостоятельной является задача определения весовых функций $v_i(t)$ и их значений в конкретные моменты времени. Они вычисляются в результате статистической обработки временных рядов, получаемых по результатам внутренних и внешних сличений шкал времени и частот часов, входящих в ансамбль. Совокупность правил, в соответствии с которыми определяются значения весовых функций, оценка частотных поправок и их прогнозируемых значений составляют алгоритм ведения групповой шкалы времени. Существует множество способов разработки таких алгоритмов, но исследования в этой области продолжают.

Простейший метод «взвешивания» показаний часов ансамбля заключается в присвоении им веса $v_i(t)$, равного 0 или 1, однако проблема выработки критерия, согласно которому можно определить, какие часы исключить из ансамбля, приписав им нулевой вес, решается в каждом случае с учетом конкретных условий.

Примером алгоритма, использующего неравные веса, является алгоритм Algos, разработанный в Международном бюро мер и весов. В соответствии с ним значение весовой функции $v_i(t)$ выбирается обратно пропорциональным величине дисперсии $\sigma_{\bar{y}}(\tau)$ средней частоты, оцениваемой по двухмесячным ее выборкам. Чтобы избежать преобладания в группе нескольких часов, случайно показавших исключительно высокие характеристики, максимальное значение веса ограничивается величиной, равной удвоенному среднему весу.

Реализация на практике приведенного выше метода формирования групповой шкалы времени позволяет с высокой точностью интерполировать и экстраполировать шкалы реальных часов. Этот метод используется, как правило, на наиболее ответственных в метрологическом отношении объектах.

Подобной же групповой обработке могут подвергаться и пространственно разнесенные шкалы времени как с целью формирования региональных групповых шкал, так и для повышения точности доступа к эталонным времени и частоте.

3. Атаманюк, В.А., Максименко, М.И. Математические методы прогнозирования хода шкал времени // Сб. трудов молодых ученых академии. – СПб.: ВИКА им. А.Ф. Можайского, 1998. – С. 100–103.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Алешкин Андрей Петрович, д.т.н., профессор, профессор кафедры, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13, e-mail: a_aleshkin@mail.ru.

Буриков Сергей Владимирович, к.т.н., заместитель начальника факультета, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13, e-mail: Burikov77@mail.ru.

Макаров Андрей Александрович, к.т.н., доцент, докторант кафедры, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13, e-mail: almakand@mail.ru.

For citation: Radiopromyshlennost. – 2016. – № 2. – P. 36–39.
A.P. Aleshkin, S.V. Burikov, A.A. Makarov

A METHOD OF FORMING A GROUP TIME SCALE BASED ON COMBINING SEPARATE STATISTICALLY EQUIVALENT FREQUENCY STANDARDS

The article describes one of the approaches to the formation of a group timeline information management systems by combining in ensembles of similar frequency standards.

Keywords: standard frequency group time scale, frequency instability, weights.

REFERENCES

1. GOST 8.567-2014 Izmereniya vremeni i chastoty. Terminy i opredeleniya.
2. Finkel'shtein, A.M. Fundamental'noe koordinatno-vremennoe obespechenie // Vestnik Rossiiskoi Akademii Nauk. – 2007. – Т. 77. – № 7. – С. 608–617.
3. Atamanyuk, V.A., Maksimenko, M.I. Matematicheskie metody prognozirovaniya hoda shkal vremeni // Sbornik trudov molodyh uchenyh akademii. – SPb.: VIKА im. A.F. Mozhaiskogo, 1998. – С. 100–103.

AUTHORS

Aleshkin Andrey, Dr. Sc. in Technical Sciences, Prof., Professor of the Chair, Mozhaisky Military Space Academy, Russian Federation, 197198, Saint-Petersburg, Zhdanovskaya st., 13, e-mail: a_aleshkin@mail.ru.

Burikov Sergey, Ph.D. Sc. in Technical Sciences, Deputy Chief Faculty, Mozhaisky Military Space Academy, Russian Federation, 197198, Saint-Petersburg, Zhdanovskaya st., 13, e-mail: e-mail: Burikov77@mail.ru.

Makarov Andrey, Ph.D. Sc. in Technical Sciences, Associate Professor, Candidate Doctor of Science, Mozhaisky Military Space Academy, Russian Federation, 197198, Saint-Petersburg, Zhdanovskaya st., 13, e-mail: almakand@mail.ru.