

Реализация алгоритмов оптимального управления шкалой времени эталона с использованием данных внешних сличений

**© С. Д. Подогова, Н. С. Архипов, В. А. Лысенко,
К. Г. Мишагин**

ЗАО «Время-Ч», г. Нижний Новгород, Россия

Реализовано программное обеспечение, позволяющее осуществлять коррекцию фазы и частоты сигнала, формируемого в группе квантовых стандартов частоты, с целью минимизировать отклонение относительно внешней (опорной) шкалы времени. Реализована возможность подстройки относительно шкалы UTC по данным, публикуемым ВРМ в Циркулярах T и Rapid UTC, относительно шкалы UTC, передаваемой различными ГНСС (ГЛОНАСС, GPS, Galileo), относительно шкалы времени удаленного эталона с помощью дифференциальных методов сличений: Common View, All in View, TWSTFT. В основе реализованной автоподстройки лежат два алгоритма: минимизации энергии управления и линейно-квадратического гауссовского управления (LQG).

Ключевые слова: стандарт частоты и времени, подстройка шкалы времени, алгоритмы управления частотой, нестабильность частоты, вариация Аллана.

Введение

При практическом использовании сигналов квантовых стандартов частоты и времени предъявляются требования как к статистическим характеристикам таких сигналов, так и к величинам их отклонения по частоте и фазе относительно UTC.

Современные методы сравнения шкал времени территориально разнесенных эталонов обладают достаточно высокой точностью, позволяющей использовать их для автоподстройки частоты и фазы сигналов квантовых стандартов. К таким методам относятся: передача частоты и времени с помощью дуплексных сличений через геостацио-

нарный спутник (TWSTFT); сличения с использованием сигналов глобальных навигационных спутниковых систем, включая методы Common view и All in view. Кроме того, системная шкала времени навигационных систем как правило поддерживается в близком соответствии с международной шкалой UTC и может быть использована для автоподстройки. Измерения по данным каналам сличений как правило производятся в постоянном автоматизированном режиме, таким образом, существует возможность реализации автоматической цепи управления, которая будет обеспечивать минимизацию отклонений формируемой шкалы от опорной. В данном докладе представлено описание реализованного программного обеспечения, выполняющего указанные функции.

Реализованные алгоритмы

В качестве основных методов автоподстройки были выбраны два алгоритма управления: алгоритм минимизации энергии управления [1] и линейно-квадратическое гауссовское управление (Linear quadratic Gaussian Control – LQG) [2, 3].

Алгоритм минимизации энергии управления направлен на плавную компенсацию заранее известных отклонений по фазе и частоте. Алгоритм определяется следующим выражением:

$$\sum_{k=0}^{N-1} u^2(k) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $u(k)$ – изменение частоты подстраиваемого сигнала на k -ом шаге управления, N – число управлений.

Рассмотрим стандартную линейную модель управления частотой и фазой сигнала:

$$\begin{aligned} X_{t+\tau} &= \Phi X_t + B u_t \\ X &= \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}, \Phi = \begin{bmatrix} 1 & \tau \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \tau \\ 1 \end{bmatrix}, u = -g_x x - g_y y, \end{aligned} \quad (2)$$

где x – отклонение фазы сигнала от целевого значения, y – отклонение частоты сигнала от целевого значения, Φ – матрица процесса эволюции фазы, B – матрица управления, g_x, g_y – коэффициенты управления, τ – интервал управления.

С учетом модели (2), требование (1) выполняется для следующего решения [1]:

$$u(k) = \frac{6}{N(N+1)} \left[\frac{1}{\tau} \left(1 - \frac{2k}{N-1} \right) x(0) + \left(\frac{2N-1}{3} - k \right) y(0) \right], k, \quad (3)$$

$\in [0, N-1]$

где $x(0)$, $y(0)$ — отклонение фазы и частоты сигнала, которые должны быть скомпенсированы за N шагов управления.

Второй алгоритм, линейно-квадратическое гауссовское управление (LQG), в отличие от первого алгоритма, реализует автоподстройку с обратной связью, которая требует информацию о текущем отклонении фазы и частоты на каждый момент управления. Алгоритм LQG предполагает минимизацию следующего функционала:

$$J = \left\langle \sum_k X_k^T W_Q X_k + u_k^T W_R u_k \right\rangle \rightarrow \min, \quad (4)$$

где W_Q , W_R — матрицы весовых коэффициентов для вектора ошибки и вектора управления.

С учетом модели (2) минимизация функционала (4) достигается при следующих коэффициентах управления g_x и g_y :

$$G = (g_x, g_y) = (B^T \Gamma B + W_R)^{-1} B^T \Gamma F, \quad (5)$$

где Γ является решением алгебраического уравнения Риккати:

$$\Gamma = F^T \Gamma F + W_Q - F^T \Gamma B (B^T \Gamma B + W_R)^{-1} B^T \Gamma F. \quad (6)$$

Параметры W_Q и W_R задаются вручную. Особенности выбора параметров W_Q и W_R обсуждаются в [3].

Разработанная программа TS Steering

ЗАО «Время-Ч» была разработана программа TS Steering, осуществляющая автоматическое управление частотой прецизионного сигнала согласно описанным выше алгоритмам, обеспечивающее подстройку относительно выбранной шкалы времени в течение заданного периода с указанным интервалом управления. Результаты внешних сличений для осуществления управления должны загружаться в специальную базу данных. Интерфейс главного окна программы управления TS Steering показан на рис. 1.

Программа обеспечивает три режима работы: автоматическое управление, ручное управление и полуавтоматическое управление. Для каждого режима работы можно выбрать интервал управления (15 минут, 1 час, 1 сутки, 5 суток и 30 суток), а также время переходного процесса управления (1 час, 1 день, 5 дней, 30 дней, 60 дней, 90 дней или 120 дней), учитывая, что управление не может быть завершено за 1 шаг (то есть допустимые значения времени переходного процесса всегда больше выбранного интервала управления). При любом режиме

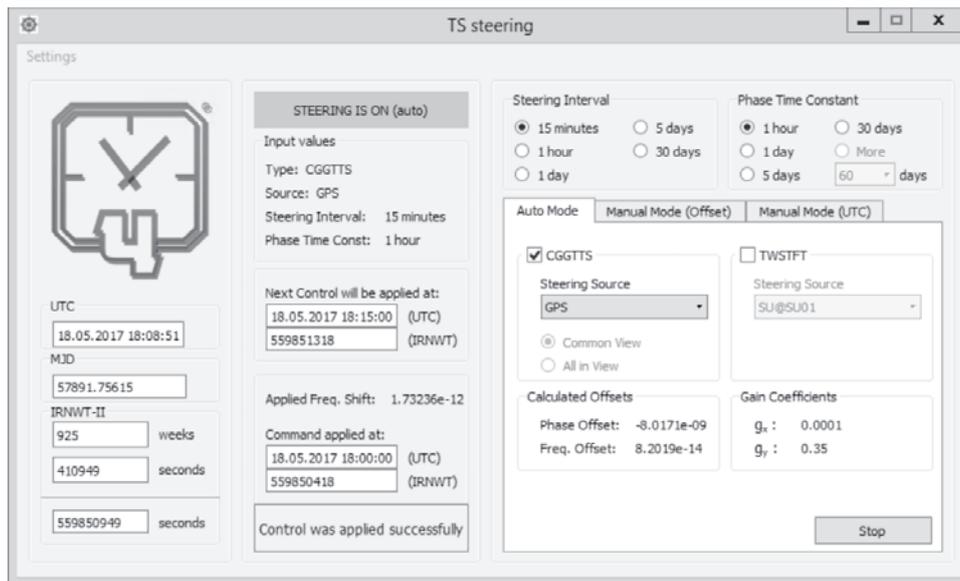


Рис. 1. Главное окно программы TS Steering, автоматический режим управления

работы коррекции согласно международным рекомендациям [4] вводятся в следующие моменты времени:

- 15-минутные коррекции вводятся в чч:00, чч:15, чч:30 или чч:45;
- часовые коррекции вводятся ровно в начале каждого часа;
- ежесуточные коррекции вводятся в 12:00 UTC;
- 5-суточные и 30-суточные коррекции вводятся в 12:00 UTC в даты xxxx1 MJD и xxxx6 MJD.

Автоматический режим управления позволяет осуществлять автоматическую подстройку относительно шкалы времени удаленной лаборатории с использованием методов сличений TWSTFT [5], Common view или All in view [6–7], а также осуществлять подстройку под системную шкалу времени одной из ГНСС (ГЛОНАСС, GPS или Galileo) или их средневзвешенной шкалы.

Подстройка в автоматическом режиме как правило ведется по алгоритму LQG, однако для малых (по сравнению с временем поступления новых данных измерений) значений времени переходного процесса используется алгоритм минимизации энергии управления. Коэффициенты g_x , g_y рассчитаны численно, оптимальным образом для каждой пары интервалов, а текущие отклонения фазы и частоты сигнала относительно опорной шкалы оцениваются с помощью фильтра Калмана.



Рис. 2. Интерфейс настроек управления программы TS Steering в ручном режиме (слева) и в полуавтоматическом режиме (справа)

В ручном режиме управления (см. рис. 2 слева) программа позволяет ввести текущее отклонение фазы и частоты, которые должны быть скомпенсированы. Перед запуском управления в специальном поле пользователю будет показан план коррекций частоты подстраиваемого сигнала, рассчитанный в соответствии с алгоритмом минимальной энергии управления.

Полуавтоматический режим управления дает возможность подстройки под всемирную шкалу координированного времени UTC. Для этого в базу данных предварительно должны быть загружены файлы Circular T или Rapid UTC, а также данные сличений CGGTTS CV или TWSTFT с некоторой опорной лабораторией (см. рис. 2 справа), для которой в данных циркулярах публикуются поправки относительно шкалы UTC.

В полуавтоматическом режиме программа рассчитывает план управлений по алгоритму минимальной энергии управления, а после завершения цикла управления просматривает базу данных в поиске новой загруженной информации. Если доступны новые данные сличений и новые значения отстройки опорной лаборатории относительно шкалы UTC, программа автоматически начнет новый цикл управлений.

Анализ неустойчивости частоты подстраиваемого сигнала

В процессе разработки программы был проведен ряд численных исследований неустойчивости частоты сигнала, управляемого с помощью выбранных алгоритмов (плавное управление). Для сравнения использовалась неустойчивость частоты сигнала при одномоментной коррекции частоты. В численных экспериментах фаза сигнала корректировалась на 10 нс в течение 10 суток.

Результаты численных экспериментов показаны на рис. 3 (алгоритм минимальной энергии управления) и 4 (алгоритм LQG). Плавное управление позволяет существенно улучшить характеристики неустойчивости частоты во время переходного процесса.

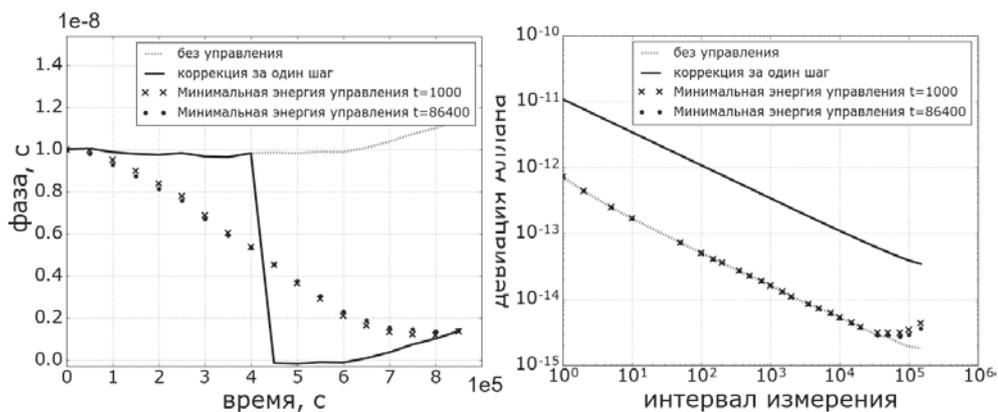


Рис. 3. Результаты моделирования. Алгоритм минимальной энергии управления: фаза (слева) и девиация Аллана (справа)

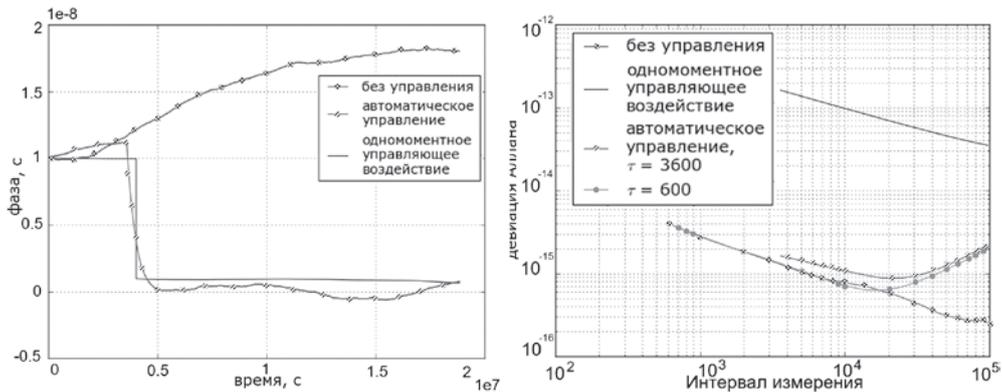


Рис. 4. Результаты моделирования. Алгоритм LQG: фаза (слева) и девиация Аллана (справа)

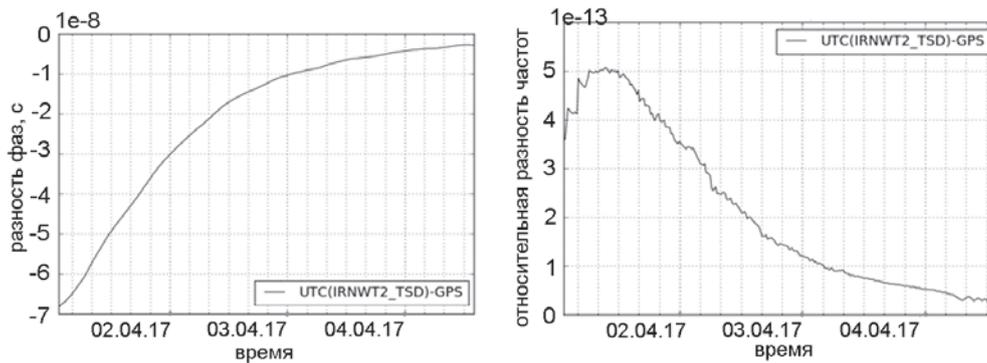


Рис. 5. Результаты измерений реального сигнала под управлением LQG

На рис. 5 представлены результаты реальных измерений. Измерялся выходной сигнал формирователя эталонных частот резервируемого Ч7-317 (ЗАО «Время-Ч»), синхронизированного водородным стандартом частоты и времени Ч1-1003 М (ЗАО «Время-Ч»), управление сигналом производилось с интервалом 1 час и постоянной времени 5 суток, в качестве опорной шкалы принималась системная шкала времени глобальной навигационной спутниковой системы GPS. Измерения производились с помощью приемника сигналов времени и частоты ГНСС GTR-51 («Mesit», Чехия), использовалась безионосферная комбинация L1C и L2C.

Заключение

В работе рассмотрены два алгоритма плавного управления фазой и частотой прецизионного сигнала: алгоритм минимальной энергии управления и линейно-квадратическое гауссовское управление (LQG). На модельном примере продемонстрировано преимущество плавного управления сигналом шкалы времени по сравнению со скачкообразной коррекцией за один шаг. Выбранные алгоритмы реализованы в виде конечного программного продукта TS Steering полностью готового к использованию в составе эталонных комплексов, в которых применяются приемник GTR-51 и формирователь Ч7-317.

Литература

1. Koppang P., Scinner J., Johns D. USNO Master Clock Design Enhancements // Proceedings of the Precise Time and Time Interval (PTTI) Systems and Applications Meeting, 2006. — Vol. 38. — P. 185.

2. *Koppang P., Leland R.* Linear quadratic stochastic control of atomic hydrogen masers // *Ultrasonics, Ferrielectricsm and Frequency Control*, IEEE Transactions on. — 1999. — Т. 46, № 3. — С. 517–522.

3. *Мишагин К. Г.* Синхронизация атомных часов: учебно-методическое пособие. — Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2016. — 26 с.

4. *Erickson T., Ramakrishnan V., Stein S.* Symmetricom time-scale system // *Proceedings of 18th IMEKO TC4 Symposium on Measurement of Electrical Quantities 2011*. — P. 51–56.

5. *Bauch A., Piester D., Fujieda M., Lewandowski W.* Directive for operational use and data handling in two-way satellite time and frequency transfer (TWSTFT) // *Rapport BIPM-2011/01 BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES*, 2011.

6. *Jiang Z., Petit G.* Time transfer with GPS satellites All-in-View // *Proc. ATF2004 236 2004*.

7. *Allan D., Weiss M.* Accurate time and Frequency Transfer during Common-View of a GPS Satellite // *Proc. 34th Ann. Symp. on Frequency Control*. — 1980. — P. 334–346.

Realization of Timescale Steering Algorithms Using External Measurement Results

S. D. Podogova, N. S. Arkhipov, V. A. Lysenko, K. G. Mishagin

The developed software allows for steering the phase and the frequency of the signal produced by the ensemble of atomic clocks. The software includes the following options: steering to the UTS timescale using the data published in the Circular T and the Rapid UTC by BIPM; steering to the UTC timescale transferred by the global navigational satellite systems (GLONASS, GPS, Galileo); steering to the timescales realized in remote ensembles using the GNSS CV/AV or TWSTFT comparison methods; and a simple steering mode allowing to compensate pre-calculated offsets of phase and frequency.

Two algorithms of optimal frequency control are used: the minimal control energy algorithm and the Linear Quadratic Gaussian control (LQG). The steering interval (the interval between frequency corrections) may be configured in the range from 15 minutes to 30 days. The phase time constant (transient time length) may be configured in the range from 1 hour to 120 days.

The simulation results and real measurement results are presented. The frequency instability of the controlled signal is analysed.

Keywords: time and frequency standard, timescale steering, algorithm of frequency control, frequency instability, Allan deviation.