

Метод увеличения быстродействия процесса обработки результатов измерений параметров квантового стандарта частоты для повышения скорости передачи информации в спутниковых системах связи

А.С. Гревцева¹, В.В. Давыдов¹

¹Высшая школа прикладной физики и космических технологий, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Политехническая 29, Санкт-Петербург, Россия, 195251

Аннотация. В статье рассмотрен новый метод расчета частотных характеристик квантового стандарта частоты на атомах рубидия - 87. Представлена реализация этого метода в разработанном программном обеспечении. Проведена обработка экспериментальных результатов с использованием разработанного программного обеспечения. Предложенный метод позволяет реализовать подстройку частоты стандарта при её отклонении за более короткий промежуток времени чем ранее. За этот интервал времени скорость передачи информации не ухудшается.

1. Введение

В настоящее время одной из актуальных задач в современных системах связи является повышение точности синхронизации шкал времени между различными устройствами [1-7]. В зависимости от требуемой точности синхронизации временных шкал в системах используются различные модели частотных стандартов. Наиболее оптимальным решением этой задачи является использование квантовых стандартов частоты (КСЧ). Среди квантовых стандартов в спутниковых системах связи наибольшее применение получили рубидиевые КСЧ, так как они имеют небольшие размеры и низкую стоимость по сравнению с другими типами стандартов. Эти ключевые преимущества позволили использовать рубидиевые стандарты в составе малогабаритных рубидиевых часов, которые широко применяются на базовых станциях мобильной связи и на борту спутников связи [5-12]. Такие системы должны работать автономно на протяжении длительного времени, поэтому одной из важнейших характеристик любого стандарта является стабильность его работы. По этой характеристике определяют его качество [13-15]. Для выпуска качественных рубидиевых стандартов частоты (РСЧ) опытные образцы стандарта подвергаются различным испытаниям. При проведении данных испытаний необходимо в режиме реального времени отслеживать изменение частотных характеристик исследуемого образца, с целью выявления нестабильностей в его работе [15-21]. А также совершенствовать системы подстройки частоты, так как уход частоты в спутниковой системе связи окажет негативное влияние на качество и скорость передачи информации [16-18, 20].

Отслеживание результатов в режиме реального времени требует увеличения скорости процесса обработки данных. Увеличение быстродействия процесса обработки большого массива экспериментальных данных одна из актуальных задач в данной области. Одно из возможных решений этой задачи представлено в данной работе.

2. Частотные характеристики стандарта и метод их расчета

Для оценки стабильности стандартов частоты применяются следующие частотные характеристики: вычисление среднеквадратического отклонения частоты (классической дисперсии) и расчет девиации Аллана [1, 16-18]. Среднеквадратическое отклонение (СКО) S группы, содержащей N результатов измерений, вычисляют по формуле:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}}, \quad (1)$$

где x_i – i – й результат измерений частоты, $\bar{x}$ – среднее арифметическое значение результатов измерения;

Использование данной характеристики может быть затруднено, если между флуктуирующими величинами существует корреляция. Кроме того, в результате проведенных исследований, учеными было доказано, что при наличии большого количества измерений использование среднеквадратического отклонения становится неэффективным для оценки стабильности стандартов частоты. Поэтому Алланом было предложено оригинальное решение, суть которого заключалась в следующем: при вычислении дисперсии необходимо использовать разность двух соседних измерений частоты, а не измерение отклонения частоты от среднего значения, как в классическом случае. Такой метод получил название девиации Аллана:

$$\sigma_y(\tau) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N-1} \delta_{0i}^2}{2(N-1)}} \quad (2)$$

где δ_{0i} – относительная вариация частоты при i -ом измерении:

$$\delta_{0i} = \frac{f_{i+1} - f_i}{f_{\text{ном}}} \quad (3)$$

f_i – значение меры частоты при i -ом измерении, $f_{\text{ном}} = 5$ МГц – номинальное значение частоты, N – число измерений.

В настоящее время девиация Аллана является наиболее распространенной мерой стабильности частоты во временной области. Ее аналогом в российских стандартах служит средняя квадратическая относительная случайная вариация σ (СКСВ), которая отличается от девиации Аллана на константу $\sigma_y(\tau) = \frac{\sigma}{\sqrt{2}}$.

Для вычисления данных частотных характеристик был использован следующий метод: общий поток данных, поступающих с измерительного устройства, делится на временные ряды, после чего происходит расчет соответствующих характеристик. Под временным (динамическим) рядом подразумевается последовательность наблюдений некоторого параметра в последовательные равноотстоящие моменты времени t . Отдельные наблюдения составляют уровень ряда и обозначаются x_t , где $t = 1, \dots, n$. При исследовании временного ряда выделяются несколько составляющих:

$$x_t = u_t + y_t + c_t + e_t, t = 1, \dots, n, \quad (4)$$

где u_t – плавно меняющаяся компонента, описывающая чистое влияние долговременных факторов (например, линейного дрейфа частоты со временем); y_t – сезонная компонента, отражающая повторяемость процессов в течение не очень длительного периода (дня, недели, месяца и т.д.); c_t – циклическая компонента, отражающая повторяемость процессов в течение длительных периодов времени свыше одного года; e_t – случайная компонента, отражающая влияние не поддающихся учету и регистрации случайных факторов (например, влияние внешних шумов).

Первые три компоненты представляют собой детерминированные составляющие. Случайная составляющая образована в результате суперпозиции большого числа внешних факторов, оказывающих каждый в отдельности незначительное влияние на изменение значений исследуемого параметра.

Анализ и исследование временного ряда позволяют строить модели для прогнозирования значений параметра на будущее время, если известна последовательность наблюдений в прошлом. В настоящее время временные ряды представляют собой наиболее интенсивно развивающееся направление математической статистики. Используя такой подход, можно сократить время проведения эксперимента и предсказать поведение частотных характеристик стандарта на основе анализа полученных данных. В данной работе при обработке результатов измерений использовался рекомендованный государственным стандартом временной ряд: 1, 2, 5, 10, 100... с. Значение характеристики в каждой точке временного ряда обновляется и заполняется по мере поступления данных с измерительного устройства в режиме реального времени. Таким образом по полученным данным можно исследовать стабильность стандарта и предсказать его дальнейшую работу.

3. Проведение эксперимента и обработка результатов измерения

Для оценки стабильности и качества стандарта была использована экспериментальная установка. Её структурная схема представлена на рис. 1.

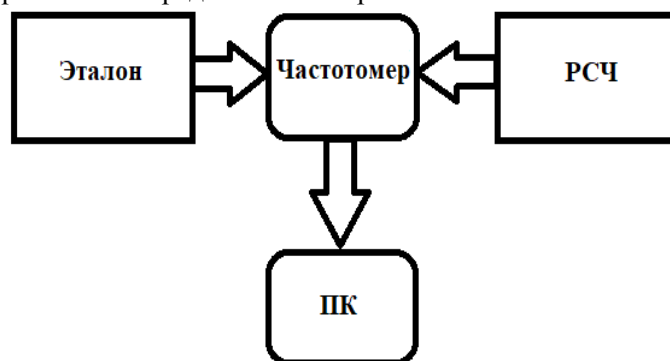


Рисунок 1. Схема эксперимента.

Один из выходов опытного образца рубидиевого стандарта частоты подключается к измерительному прибору, в качестве которого используется частотомер Pendulum CNT-91. Одновременно с ним на частотомер подается сигнал с эталона. В качестве эталона в эксперименте используется водородный стандарт компании «Время-Ч». Частотомер в данном случае выступает в роли компаратора, сравнивая сигнал исследуемого стандарта с более стабильным сигналом эталона. Полученные данные с частотомера поступают на компьютер, где происходит их анализ и дальнейшая обработка.

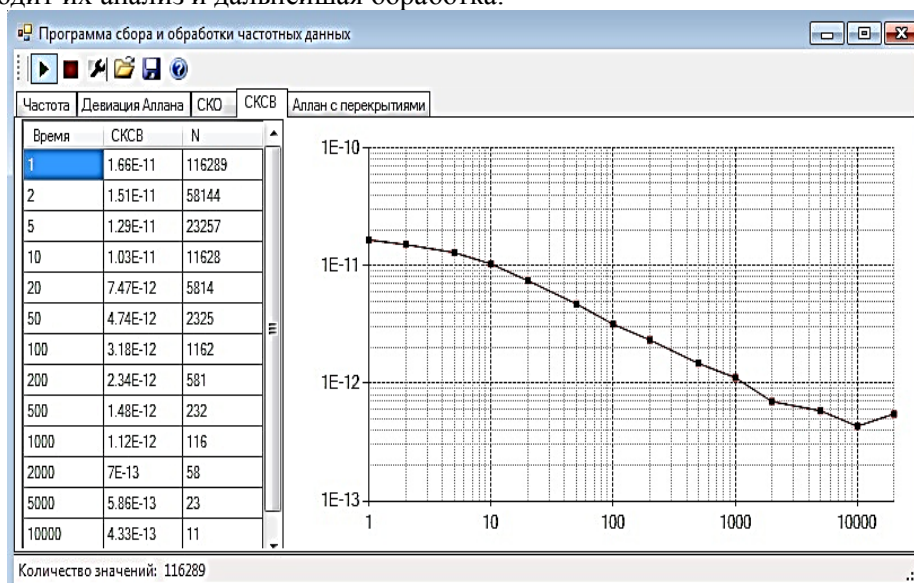


Рисунок 2. Расчет СКВ в программе.

Для обработки значений частоты было разработано специальное программное обеспечение, в котором были реализованы методы расчета: СКО, девиация Аллана и СКСВ. При проведении вычислений использовалось взаимодействие 2 потоков данных: первый поток применялся для получения первичных значений частоты из прибора, а во втором потоке осуществлялся непосредственный расчет искомых величин. Такой подход при реализации методов (формулы 1, 2, 3) в программе позволил проводить оценку стабильности стандартов в режиме реального времени и значительно ускорил обработку экспериментальных результатов. На рис. 2 представлен расчет СКСВ в программе при проведении эксперимента в течение двух суток.

Проведем анализ полученных данных, для этого сравним экспериментальные результаты с требованиями, предъявляемыми к стабильности рубидиевого стандарта (таблица 1).

Таблица 1. Сравнение экспериментальных данных с техническими требованиями для исследуемой модели стандарта.

Время измерения, τ , с	СКСВ (эксперимент)	СКСВ (технические требования), не более чем	Стабильность
1	$1,66 \cdot 10^{-11}$	$1,5 \cdot 10^{-11}$	Удовлетворительно
100	$3,18 \cdot 10^{-12}$	$1,0 \cdot 10^{-11}$	Удовлетворительно
1000	$1,12 \cdot 10^{-12}$	$5,0 \cdot 10^{-12}$	Удовлетворительно

Сравнивая значения СКСВ, рассчитанные в ходе эксперимента, с допустимыми значениями в технических требованиях, можно сделать вывод об успешном испытании опытного образца рубидиевого стандарта и соответствии его стабильности требуемому качеству. Применение метода деления данных на временные ряды позволило обеспечить необходимую скорость обработки результатов для проведения параллельных вычислений СКО, девиация Аллана и СКСВ. Небольшое отклонение значения СКСВ при $\tau = 1$ с можно объяснить влиянием случайной компоненты (внешний шум). Из анализа временного ряда видно снижение стабильности при $\tau > 1000$ с, это можно объяснить влиянием долговременных факторов, таких как линейный дрейф частоты стандарта, световые сдвиги и температуры.

4. Заключение

Результаты экспериментальных исследований показали, что опытный образец стандарта частоты достигает максимальной стабильности при времени измерения $\tau \approx 1000$ с. Использование предложенного нами метода и разработанного для его реализации программного обеспечения позволило увеличить быстродействие процесса обработки результатов измерений в несколько раз. Это дает возможность уменьшить время подстройки частоты при её отклонении от номинала и сохранить качество и скорость передачи информации.

Кроме того, использование методики деления данных на временные ряды позволило проанализировать изменение характеристик стандарта в долговременной области, что крайне важно при его работе в спутниковых системах передачи информации.

5. Литература

- [1] Риле, Ф. Стандарты частоты. Принципы и применения / Ф. Риле – М.: Физматлит, 2009 – 511 с.
- [2] Ефимов, А.И. Интенсивность флуктуаций частоты радиосигналов космических аппаратов в окосолнечной плазме / А.И. Ефимов, Л.А. Луканина, Л.Н. Самознаев, И.В. Чашей, М.К. Бред // РЭ. – 2010. – Т. 55, № 11. – С. 1343-1347.
- [3] Соколов, С.В. Использование межспутниковых измерений для высокоточной оценки навигационных параметров объекта / С.В. Соколов, В.В. Каменский, С.М. Ковалев, Е.Н. Тищенко // Измерительная техника. – 2017. – № 1. – С. 19-23.

- [4] Барышев, В.Н. Малогабаритный квантовый стандарт частоты на рубидиевой газовой ячейке с импульсной оптической накачкой и микроволновым возбуждением по схеме Рэмси / В.Н. Барышев, Д.С. Купалов, А.В. Новоселов, М.С. Алейников, А.И. Бойко, В.Г. Пальчиков, И.Ю. Блинов // Измерительная техника. – 2016. – № 12. – С. 33-35.
- [5] Petrov, A.A. New scheme of the microwave signal formation for quantum frequency standard on the atoms of caesium-133 / A.A. Petrov // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – Vol. 769(1). – P. 012065.
- [6] Назаров, Л.Е. Посимвольный прием сигналов, соответствующих высокоскоростным сверхточным кодам и турбокодам на их основе / Л.Е. Назаров, И.В. Головкин // РЭ. – 2007. – Т. 52, № 10. – С. 1220-1227.
- [7] Павельев, А.Г. Спутниковый глобальный мониторинг атмосферы и ионосферы. / А.Г. Павельев, С.С. Матюгов, А.И. Яковлев // РЭ. – 2008. – Т. 53, № 9. – С. 1081-1086.
- [8] Пахомов, А.А. Быстрая цифровая обработка изображений искусственных спутников Земли / А.А. Пахомов // РЭ. – 2007. – Т. 52, № 10. – С. 1209-1213.
- [9] Семенов, В.В. Расчет стационарного сигнала магнитного резонанса в оптически ориентированных атомах, индуцированного последовательностью радиоимпульсов / В.В. Семенов, Н.Ф. Никифоров, С.В. Ермак // РЭ. – 1990. – Т. 35, № 10. – С. 2179.
- [10] Фокин, Г.А. Позиционирование подвижных источников радиоизлучения разностно-дальномерным методом / Г.А. Фокин, Ф.Х. Аль-Одхари // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2017. – Т. 11, № 4. – С. 41-46.
- [11] Фокин, Г.А. Управление самоорганизующимися пакетными радиосетями на основе радиостанций с направленными антеннами / Г.А. Фокин // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук – Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. М.А. Бонч-Бруевича, 2009.
- [12] Пашев, Г.П. Оптимальный алгоритм синхронизации шкалы времени квантовых часов / Г.П. Пашев // Измерительная техника. – 2016. – № 6. – С. 51-54.
- [13] Васильев, В.И. Исследование предельной кратковременной нестабильности частоты выходного сигнала пассивного водородного стандарта частоты / В.И. Васильев // Измерительная техника. – 2016. – № 9. – С. 25-29.
- [14] Донченко, С.И. Текущее состояние и перспективы развития средств фундаментального и метрологического обеспечения системы глонасс / С.И. Донченко, А.Н. Щипунов, О.В. Денисенко, И.Ю. Блинов, В.Н. Федотов, И.С. Сильвестров // Измерительная техника. – 2018. – № 1. – С. 3-8.
- [15] Petrov, A.A. Improvement frequency stability of caesium atomic clock for satellite communication system / A.A. Petrov, V.V. Davydov // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). – 2015. – Vol. 9247. – P. 739-744.
- [16] Максименко, С.Г. Совершенствование методики расчёта относительной погрешности меры частоты / С.Г. Максименко // Измерительная техника. – 2018. – № 1. – С. 15-17.
- [17] Lukashev, N.A. Improving performance of quantum frequency standard with laser pumping / N.A. Lukashev, A.A. Petrov, N.M. Grebenikova, A.P. Valov // International Conference Laser Optics (ICLO) Proceedings. – 2018. – С. 271.
- [18] Колмогоров, О.В. Система передачи эталонных сигналов частоты и времени измерительным средствам наземного комплекса глонасс по оптическому кабелю / О.В. Колмогоров, А.Н. Щипунов, Д.В. Прохоров, С.С. Донченко, С.Г. Буев, А.Н. Малимон, Р.И. Балаев, Д.М. Федорова // Измерительная техника. – 2017. – № 9. – С. 29-32.
- [19] Petrov, A.A. Dependence of microwave – excitation signal parameters on frequency stability caesium atomic clock. / A.A. Petrov, V.A. Vologdin, D.V. Zalyotov // Journal of Physics: Conference Series – 2015. – Vol. 643(1). – P. 012087.
- [20] Petrov, A.A. Some Directions of Quantum Frequency Standard Modernization for Telecommunication Systems / A.A. Petrov, N.M. Grebenikova // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). – 2018. – 11118 LNCS. – P. 641-648.

- [21] Petrov, A.A. Features of magnetic field stabilization in caesium atomic clock for satellite navigation system / A.A. Petrov, N.M. Grebenikova, N.A. Lukashev, N.V. Ivanova, N.S. Rodygina, A.V. Moroz // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1038 (1). – P. 012032.

A method for increasing the speed of processing the results of measurements of the parameters of a quantum frequency standard to increase the speed of information transfer in satellite communication systems

A.S. Grevtseva¹, V.V. Davydov¹

¹Higher School of applied physics and space technologies, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Polytechnicheskaya street 29, Saint Petersburg, Russia, 195251

Abstract. The article considers a new method for calculating the frequency characteristics of a quantum standard of frequency for rubidium atoms - 87. The implementation of this method in the developed software is presented. The experimental results were processed using the developed software. The proposed method allows you to adjust the frequency of the standard when it deviates in a shorter period than before. During this time interval, the information transfer rate does not deteriorate.