

О необходимости использования метода медианной фильтрации сигнала для улучшения метрологических характеристик рубидиевого стандарта частоты при обработке и передачи больших массивов данных

А.П. Валов¹, Н.А. Лукашев¹, В.В. Давыдов²

¹Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Большевиков 22, корп.1, Санкт-Петербург, Россия, 193232

²Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого, Политехническая 29, Санкт-Петербург, Россия, 195251

Аннотация. В статье рассмотрена конструкция квантового стандарта частоты на атомах рубидия-87 для спутниковых инфокоммуникационных и навигационных систем различного назначения. Обоснована необходимость улучшения метрологических характеристик квантового стандарта частоты при длительной передаче больших объемов данных. Предложен новый алгоритм обработки данных большого объема данных о сигнале ошибки с использованием метода медианной фильтрации для улучшения кратковременной и долговременной стабильности стандарта частоты. Представлены результаты экспериментальных исследований метрологических характеристик квантового стандарта частоты. Установлено улучшение долговременной стабильности частоты на 7%, что снижает число битовых ошибок при длительной передаче информации минимум на 3%.

1. Введение

В современном мире точное измерение времени и частоты необходимо для решения различных задач [1-6]. Одной из таких задач является обеспечение бесперебойной работы систем связи и навигации, если необходимо передавать информацию по спутниковому каналу связи [3, 6-10]. Особое место среди устройств определения частоты и времени занимают квантовые стандарты частоты [8-13]. В глобальных спутниковых группировках различного назначения для решения задач по передаче информации или навигации в настоящее время используются только квантовые стандарты частоты (атомные часы) [13-17]. Остальные устройства не могут обеспечить необходимую точность определения частоты и долговременную стабильность её номинального значения [17-22]. Незначительный уход частоты от номинального значения приводит к большим ошибкам, особенно при передаче больших потоков данных.

Это связано с тем, что спутниковые каналы связи часто включены через несколько спутников (спутниковая группировка) так зона обзора антенных устройств спутника, который принял информацию не распространяется на зону, где находится получатель данной информации. Поэтому для передачи информации будут задействованы несколько спутников. При таком построении системы передачи информации возникает ряд проблем, одной из которых является рассогласование временных шкал спутников. При передаче больших объемов

информации необходимо синхронизовать временные шкалы спутников до наносекунд и менее [21-24]. Также необходимо отметить, что в настоящее время спутники многофункциональные (их эксплуатация более целесообразна) [21, 22]. Поэтому ряд из них также используется для навигационных систем, так как околоземные орбиты перегружены различными нерабочими устройствами и космическим мусором, который никто не удаляет.

Расширение круга задач для решения которых используются спутниковые системы, в том числе увеличение объемов и скорости передачи информации, постоянно выдвигает новые требования к точности взаимной синхронизации временных шкал спутников. С другой стороны, с развитием научно-технического прогресса изменяется состав используемой радиоэлектронной аппаратуры. Все это требует постоянной модернизации различных спутниковых систем, в том числе и квантовых стандартов частоты (КСЧ).

Разработка и ввод в эксплуатацию новых моделей КСЧ очень длительный и дорогостоящий процесс. На его реализацию в большинстве случаев нет времени и достаточного количества средств. Поэтому в большинстве случаев для решения конкретных задач осуществляется модернизация, находящихся в эксплуатации на спутниковых системах КСЧ на атомах рубидия – 87 и цезия - 133 [9, 13-15, 24, 25].

Процесс модернизации стандартов частоты включает в себя различные направления: изменение веса и габаритов, снижение энергопотребления, улучшение метрологических характеристик, разработка и внедрение новых алгоритмов обработки информации и т.д. В настоящей работе рассматривается одно из таких направлений для улучшения метрологической характеристики квантового стандарта частоты на атомах рубидия – 87, который используется в спутниковой группировке.

2. Алгоритм управления подстройкой частоты квантового стандарта

За период эксплуатации КСЧ на атомах рубидия - 87 структурные схемы различных его моделей КСЧ не претерпели принципиальных изменений [8, 11, 13]. В конструкциях КСЧ на атомах рубидия - 87 в основном изменяются отдельные элементы или блоки, а также системы управления различными параметрами для улучшения метрологических характеристик стандарта. На рисунке 1 представлена структурная схема КСЧ на атомах рубидия – 87.

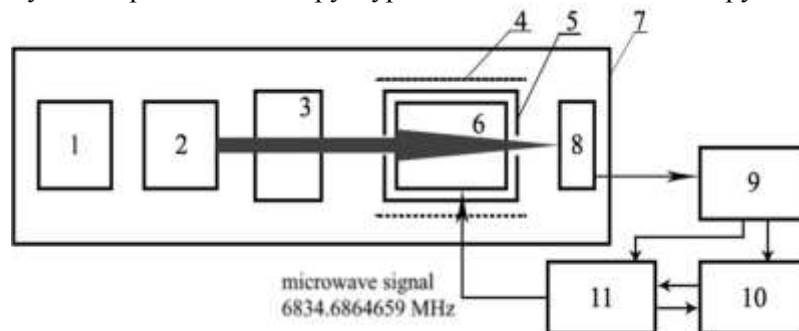


Рисунок 1. Структурная схема КСЧ на атомах рубидия – 87: 1 – рефлектор; 2 – лампа с парами рубидия – 87; 3 – ячейка – фильтр; 4 – соленоид С – поля; 5 – радиочастотный резонатор; 6 – ячейка с буферным газом; 8 – фотодетектор; 9 – система автоподстройки частоты; 10 – высокостабильный кварцевый генератор; 11 – синтезатор частоты.

Работа КСЧ на атомах рубидия – 87 базируется на принципе настройки высокостабильного управляемого напряжением кварцевого генератора 10 на квантово-частотный переход атомов рубидия – 87 [8, 11, 13, 24]. Для реализации отмеченной подстройки частоты кварцевого генератора на вакуумную ячейки 6, заполненную атомами рубидия – 87 и буферным газом подается СВЧ сигнал из синтезатора частоты (СЧ) 11. При совпадении частоты СВЧ сигнала с частотой квантового перехода возбужденных атомов рубидия – 87, регистрируемый фотодетектором сигнал имеет максимальное значение отношение сигнал/шум (S/N). В случае ухода значения частоты СВЧ сигнала f_{mw} от значения частоты резонансного перехода отношение S/N уменьшается и электронной схемой 9 формируется сигнал ошибки. По этому

сигналу осуществляется подстройка частоты кварцевого генератора 10. Поэтому одним из ключевых моментов работы КСЧ на атомах рубидия – 87, является формирование сигнала СВЧ с учетом различных его особенностей. Процесс формирования СВЧ-сигнала осуществляется в СЧ 11. Необходимо, чтобы на выходе СЧ была обеспечена высокая точность выходной частоты, высокое подавление боковых амплитудных составляющих в спектре выходного сигнала, низкая зависимость изменения частоты и амплитуды выходного сигнала от температуры.

Метод формирования СВЧ сигнала в синтезаторе частоты подробно рассмотренный в [8, 9, 21] имеет один существенный недостаток. В спектре выходного сигнала с частотой 5.3125 МГц, которая получается на выходе одного из балансных смесителей СЧ 11, содержатся боковые амплитудные составляющие. Если одна из боковых составляющих совпадет с частотой какого-либо Зеемановского перехода, то это приведет к переходам атомов на этих уровнях и возникновению погрешности в установлении действительного значения частоты выходного сигнала КСЧ. Для подавления боковых составляющих используется кварцевый фильтр, который обладает высокой температурной зависимостью. Для надежной работы кварцевого фильтра требуется высокая температурная стабилизация. Это обеспечить крайне сложно, особенно в условиях длительного полета спутника.

Необходимо также отметить, что необходимая для работы КСЧ частота СВЧ сигнала, которая соответствует разнице по частоте между двумя сверхтонкими подуровнями $F=2$ и $F=1$ [8], формируется на выходе балансного смесителя СЧ 11. Работу БС можно описать уравнением:

$$U_{\text{вых}} = \cos\omega_1 t * \cos\omega_2 t = \frac{1}{2} \cos(\omega_1 - \omega_2)t + \frac{1}{2} \cos(\omega_1 + \omega_2)t, \quad (1)$$

где $\cos(\omega_1 - \omega_2)t$ - разностная и $\cos(\omega_1 + \omega_2)t$ – суммарная частота соответственно.

Все боковые составляющие, если они появятся в спектрах сигналов с частотами ω_1 и ω_2 (например, по причине температурного дрейфа в кварцевом фильтре), преобразуются в сигналы с комбинационными частотами. Эти сигналы создадут дополнительные погрешности. Поэтому, во время каждого сеанса связи спутника с наземной станцией при сличении временных шкал в КСЧ на атомах рубидия – 87 подстраивают частоту. Если по каким-то причинам сеанс связи не состоялся, то работа спутника в спутниковой группировке может быть приостановлена. И передаваемые по каналам связи данные потеряны или искажены.

Поэтому крайне важно разработать метод, который обеспечивал высокую точность выходной частоты с подстройкой её в автономном режиме независимо от связи с наземной станцией.

Перестройка частоты кварцевого генератора управляется системой АПЧ 9, в состав которой входит устройство управления кварцевым генератором (УУКГ) и блок управления, преобразующим сигнал, поступающий с квантового дискриминатора, и вычисляющий код подстройки для дальнейшей отправки его на УУКГ.

В предыдущей версиях программного обеспечения для устройства управления КСЧ использовалось простое накопление всех полученных данных на разных частотах с дальнейшим вычислением значения сигнала ошибки СВЧ сигнала. Так эксплуатация квантового стандарта частоты имеет продолжительный характер, то объем накапливаемых данных получается громадным (Big Data). Обработать его становится в процессе эксплуатации крайне сложно. Поэтому нами предлагается при вычислении ошибок сигнала в алгоритме подстройки частоты использовать метод медианной фильтрации данных.

Метод медианной фильтрации использует упорядочивание нескольких элементов, поступивших на вход блока управления, и последующий выбор значения, равноотстоящего от начала и конца упорядоченного ряда элементов. Это позволяет не накапливать большие массивы данных, а работать с локальными данными, что существенно уменьшает спектральную плотность шумов, которая компенсируется обработкой.

3. Результаты экспериментальных исследований

При использовании оптических световых сигналов для регистрации условий резонанса на

фотоприемных устройствах важной характеристикой является спектральная плотность S_{ϕ} [8]. Значение S_{ϕ} оказывает существенное влияние на отношение S/N , а следовательно, и на точность определения сигнала ошибки. На рис. 2 представлены зависимости спектральной плотности шума для двух различных алгоритмов обработки данных

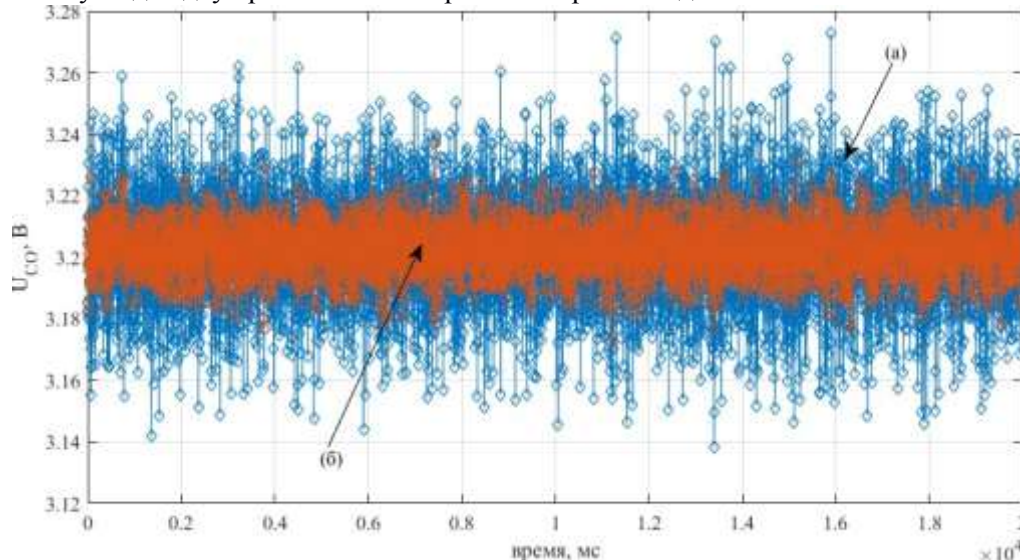


Рисунок 2. Спектральная плотность шума S_{ϕ} . График (а) соответствует ранее значению сигнала ошибки с простым накоплением, график (б) – сигналу ошибки с медианной фильтрацией.

Проведенные эксперименты показали, что использование медианной фильтрации позволяет также уменьшить спектральные плотности фазовых шумов. На рис. 3 представлены спектральные плотности фазовых шумов ранее используемой конструкции КСЧ и новой с медианной фильтрацией.

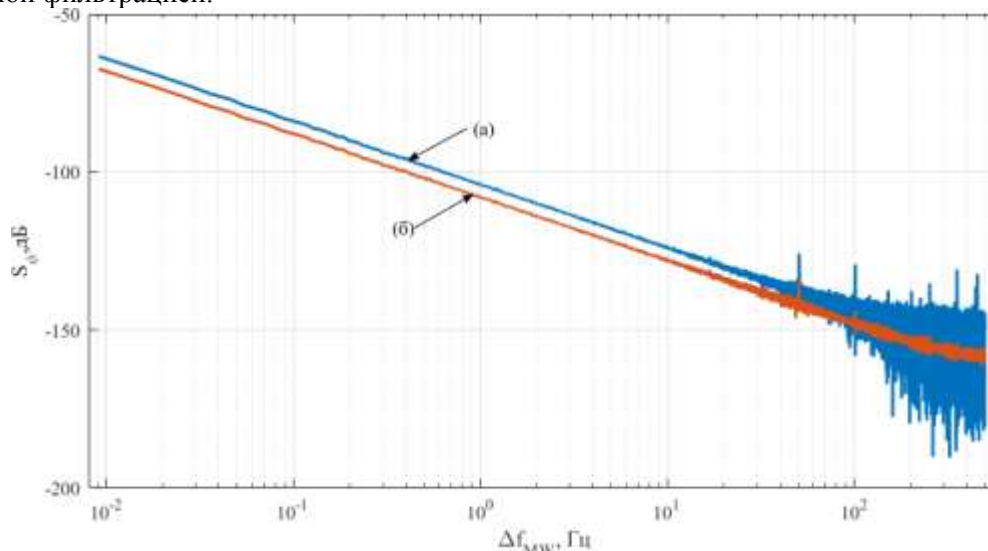


Рисунок 3. Спектральная плотность шума S_{ϕ} . График (а) соответствует ранее используемой конструкции КСЧ, график (б) – конструкции КСЧ с разработанным нами алгоритмом.

Анализ полученных на рисунке 3 результатов экспериментальных исследований показывает уменьшение мощности фазовых шумов в несколько раз, в выходном спектре сигнала.

Все это позволило улучшить кратковременную стабильность частоты – девиацию Аланна, а также долговременную стабильность частоты. Последняя крайне важна для передачи большого объема данных при длительной эксплуатации стандарта. На рис. 4 в качестве примера представлены результаты исследования девиации Аланна.

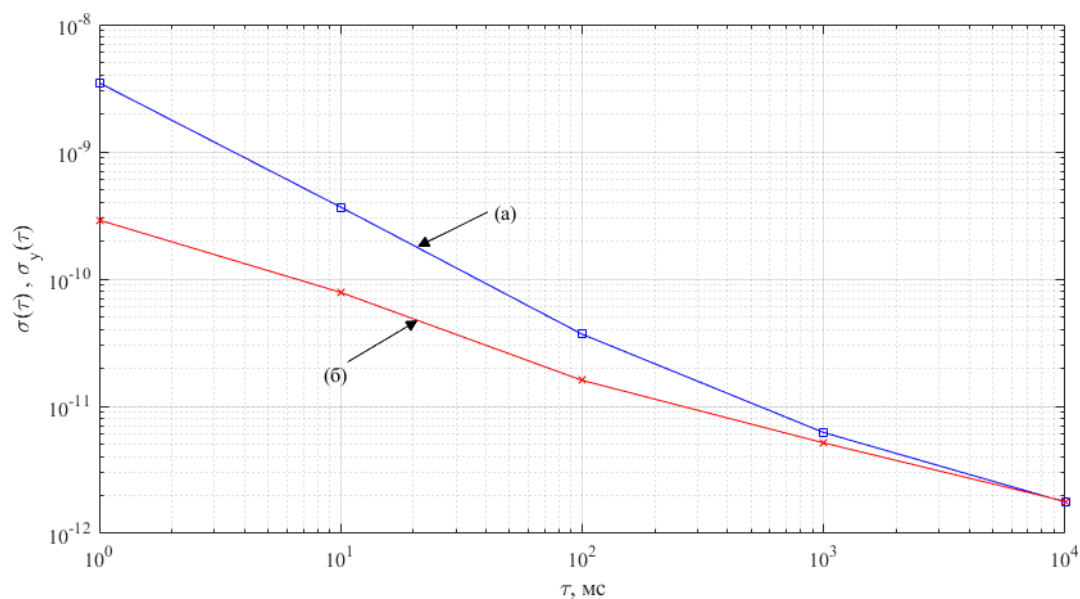


Рисунок 4. Девиация Аллана: (а) соответствует ранее используемой конструкции стандарта, (б) – конструкции стандарта частоты с использованием разработанного нами алгоритма.

Анализ полученных результатов показывает, что использование разработанного нами алгоритма подстройки частоты позволило улучшить девиацию Аллана на 10 %.

4. Заключение

Проведенные исследования показали, что использование метода медианной фильтрации данных в кольце автоматической подстройки частоты сигнала СВЧ возбуждения позволяет уменьшить один из важнейших возмущающих факторов - плотность спектральных шумов. Это позволило улучшить долговременную стабильность частоты на 7 %. Полученные улучшения кратковременной и долговременной стабильности частоты позволяет повысить степень надежности работы спутниковых инфокоммуникационных систем. Кроме того, проведенные эксперименты с новыми конструкциями стандартов частоты показали, что улучшение долговременной стабильности частоты на 7 % позволяет минимум на 3 % уменьшить при длительной передаче больших объемов информации число битовых ошибок.

5. Литература

- [1] Mashkov, G. A positioning accuracy experimental evaluation in SDR-based MLAT with joint processing on range measurement / G. Mashkov, E. Borisov, G. Fokin // Proceedings - International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications, ICRAMET. – 2016. – Vol. 7849572. – P. 7-12.
- [2] Fokin, G. TDOA positioning accuracy performance evaluation for arc sensor configuration / G. Fokin, A. Kireev, A.H.A. Al-Odliari // Proceedings Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications – Moscow, 2018. – P. 1-5.
- [3] Koucheryavy, A. State of the art and research challenges for public flying ubiquitous sensor network. / A. Koucheryavy, A. Vladyko, R. Kirichek // Lecture Notes in Computer Science. – 2015. – Vol. 9247. – P. 299-308.
- [4] Yastrebova, A. Future Networks 2030: Architecture Requirements / A. Yastrebova, R. Kirichek, Y. Koucheryavy, A. Borodin, A. Koucheryavy // 10th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), 2018. – P. 8631208.
- [5] Makolkina, M. Transmission of Augmented Reality Contents Based on BLE 5.0 Mesh Network / M. Makolkina, V.D. Pham, T.D. Dinh, A. Ryzhkov, R. Kirichek // Lecture Notes in Computer Science. – 2018. – Vol. 11118 LNCS. – P. 394-404.
- [6] Ефимов, А.И. Интенсивность флуктуаций частоты радиосигналов космических аппаратов

- в околосолнечной плазме / А.И. Ефимов, Л.А. Луканина, Л.Н. Самознаев, И.В. Чашей, М.К. Бред // РЭ. – 2010. – Т. 55, № 11. – С. 1343-1347.
- [7] 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.
- [8] Риле, Ф. Стандарты частоты. Принципы и применения – М.: Физматлит, 2009. – 511 с.
- [9] Petrov, A.A. New scheme of the microwave signal formation for quantum frequency standard on the atoms of caesium-133 / A.A. Petrov, V.V. Davydov // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – Vol. 769(1). – P. 012065.
- [10] Семенов, В.В. Расчет стационарного сигнала магнитного резонанса в оптически ориентированных атомах, индуцированного последовательностью радиоимпульсов / В.В. Семенов, Н.Ф. Никифоров, С.В. Ермак, В.В. Давыдов // РЭ. – 1990. – Т. 35, № 10. – С. 2179.
- [11] 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. – Т. 12. – С. 33-35.
- [12] 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. – 2015. – Vol. 9247. – P. 739-744.
- [13] Lukashchev, N.A. Improving performance of quantum frequency standard with laser pumping / N.A. Lukashchev, A.A. Petrov, V.V. Davydov, N.M. Grebenikova, A.P. Valov // International Conference Laser Optics Proceedings, 2018. – P. 271.
- [14] Petrov, A.A. Features of magnetic field stabilization in caesium atomic clock for satellite navigation system. / A.A. Petrov, N.M. Grebenikova, N.A. Lukashchev, V.V. Davydov, N.V. Ivanova, N. S. Rodygina, A.V. Moroz // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1038(1). – P. 012032.
- [15] Petrov, A.A. Dependence of microwave – excitation signal parameters on frequency stability caesium atomic clock / A.A. Petrov, V.A. Vologdin, V.V. Davydov, D.V. Zalyotov // Journal of Physics: Conference Series. – 2015. – Vol. 643(1). – P. 012087.
- [16] Горгадзе, С.Ф. Измерительные сигналы с многопозиционными поднесущими для спутниковых радионавигационных систем / С.Ф. Горгадзе, В.В. Бойков // РЭ. – 2014. – Т. 59, № 3. – С. 264-301.
- [17] 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.
- [18] Фокин, Г.А. Управление самоорганизующимися пакетными радиосетями на основе радиостанций с направленными антеннами // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук – Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. М.А. Бонч-Бруевича, 2009.
- [19] Lenets, V.A. New method for testing of antenna phased array in X frequency range / V.A. Lenets, M.Yu. Tarasenko, V.V. Davydov, N.S. Rodygina, A.V. Moroz // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1038(1). – P. 012037.
- [20] Максименко, С.Г. Совершенствование методики расчёта относительной погрешности меры частоты // Измерительная техника. – 2018. – Т. 1. – С. 15-17.
- [21] Petrov, A.A. Dependence of microwave – excitation signal parameters on frequency stability caesium atomic clock / A.A. Petrov, V.A. Vologdin, V.V. Davydov, D.V. Zalyotov // Journal of Physics: Conference Series. – 2015. – Vol. 643(1). – P. 012087.
- [22] Petrov, A.A. Some Directions of Quantum Frequency Standard Modernization for Telecommunication Systems / A.A. Petrov, V.V. Davydov, N.M. Grebenikova // Lecture Notes in Computer Science. – 2018. – Vol. 11118 LNCS. – P. 641-648.
- [23] 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. – Т. 9. – С. 29-32.
- [24] Пашев, Г.П. Оптимальный алгоритм синхронизации шкалы времени квантовых часов // Измерительная техника. – 2016. – Т. 6. – С. 51-54.
- [25] Васильев, В.И. Исследование предельной кратковременной нестабильности частоты выходного сигнала пассивного водородного стандарта частоты // Измерительная техника. – 2016. – Т. 9. – С. 25-29.

On the need to use the median signal filtering method to improve the metrological characteristics of the rubidium frequency standard when processing and transmitting large data arrays

A.P. Valov¹, N.S. Lukashev¹, V.V. Davydov²

¹The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications, Bolshevikov avenue 22/1, Saint Petersburg, Russia, 193232

²Higher School of applied physics and space technologies, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Polytechnic street 29, Saint Petersburg, Russia, 195251

Abstract. The article describes the construction of the rubidium – 87 quantum frequency standard for satellite infocommunication and navigation systems for various purposes. The necessity of improving the metrological characteristics of the quantum frequency standard for long-term transmission of large amounts of data is substantiated. A new algorithm is proposed for processing data of a large amount of data about the error signal using the median filtering method to improve the short-term and long-term stability of the frequency standard. The results of experimental studies of the metrological characteristics of the quantum frequency standard are presented. The improvement in long-term frequency stability was found to be 7%, which reduces the number of bit errors during long-term transmission of information by at least 3%.