УЛУЧШЕНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК рубидиевого стандарта частоты

А.Валов, аспирант СПбГУТ им. проф. М.А.Бонч-Бруевича / tony.valov2015@yandex.ru,
В.Давыдов, д.ф.-м.н., проф. СПбГУТ им. проф. М.А.Бонч-Бруевича и Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого,
А.Петров, начальник лаборатории АО "Российский институт радионавигации и времени"

УДК 004.032.32, DOI: 10.22184/2070-8963.2022.107.7.72.75

Развитие систем передачи информации, спутниковых навигационных систем, систем метрологической службы ведет к необходимости в постоянной модернизации используемых в настоящее время квантовых стандартов частоты. В работе представлен метод модернизации блока генератора и усилителей выходного сигнала стандарта частоты с целью улучшения кратковременной стабильности стандарта частоты. Экспериментальные исследования метрологических характеристик квантового стандарта частоты на атомах рубидия-87 показали эффективность применения новой разработки.

Введение

В современном мире точное измерение времени и частоты необходимо для проведения различных экспериментов во многих областях науки, например, атомная физика (атомно-фотонные взаимодействия, атомные столкновения и атомные взаимодействия со статическими и динамическими электромагнитными полями), исследование земной поверхности (геодезия) или космического пространства радиоастрономия и пульсарная астрономия [1–4]. Без высокостабильных источников частоты и времени невозможна работа оборудования связи и метрологических служб [2, 3–5].

Особое место среди устройств определения частоты и времени занимают квантовые стандарты частоты (КСЧ). Основным преимуществом КСЧ перед другими устройствами является использование для устойчивой работы систем стабилизации частоты лазерного излучения и оптических элементов [2, 3, 5–8].

Незначительный уход частоты от номинального значения приводит к большим ошибкам, особенно при передаче больших потоков данных. Одной из основных проблем спутниковой системы является взаимная синхронизация временных шкал космических аппаратов до 1 нс и менее [6–10]. Например, ошибка навигационных сигналов, излучаемых

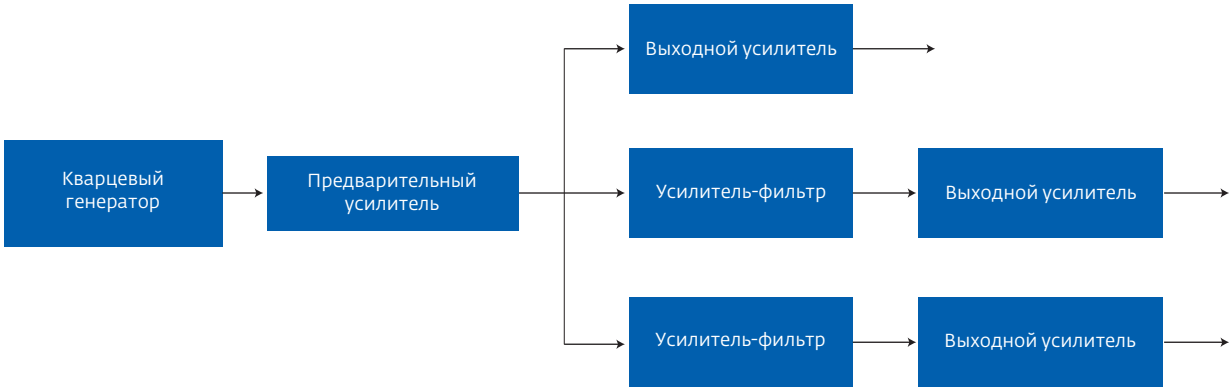

Рис.1. Структурная схема блока генератора и усилителей выходного сигнала

разными спутниками при временном рассогласовании в 10 нс, вызывает дополнительную ошибку при определении местоположения объекта в 10–15 м.

Расширение круга задач, для решения которых используются спутниковые навигационные системы, потребовало повышения точности определения положения объекта до 0,5 м. С другой стороны, с развитием научно-технического прогресса изменяется состав используемой радиоэлектронной аппаратуры. Все это требует постоянной модернизации КСЧ [11–14].

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: изменение веса и габаритов, снижение энергопотребления, улучшение метрологических характеристик, находящихся в эксплуатации КСЧ на атомах рубидия-87 и цезия-133. Для КСЧ характерен тот факт, что может проводиться модернизация не всей его конструкции, а только отдельных узлов или блоков [12–14].

Одним из важных функциональных устройств является блок генератора и усилителей выходного сигнала (БГУВ), который также является источником опорного сигнала КСЧ. Модернизация этого устройства позволяет улучшить метрологические характеристики всего КСЧ, так как сигнал, поступающий с этого блока, используется в других функциональных устройствах КСЧ, в том числе в преобразователе частоты и синтезаторе частоты, формирующем СВЧ-сигнал для квантового дискриминатора. Характеристики данного сигнала напрямую влияют на метрологические характеристики КСЧ.

Блок генератора и усилителей выходного сигнала

Основная функция БГУВ в работе рубидиевого стандарта частоты – это формирование, размножение и поддержание определенного уровня амплитуды сигнала частотой 5 МГц с использованием управляемого напряжением кварцевого генератора (КГ). Структурная схема данного устройства представлена на рис.1.

Сигнал с КГ поступает на предварительный усилитель, где он усиливается разделяется на три канала. Далее сигнал поступает на усилитель-фильтр, где происходит дополнительное усиление и фильтрация боковых составляющих КГ. Затем сигнал поступает на выходной усилитель, где происходит окончательное усиление выходного сигнала.

Полученный сигнал поступает далее на преобразователь частоты и синтезатор частоты, в которых генерируются высокочастотные сигналы частотой 60 и 5,313 МГц, используемые для дальнейшего усиления до частоты квантового перехода атомов рубидия-87 в квантовом дискриминаторе. Исходя из этого, к блоку усилителей выхода предъявляются высокие требования по характеристикам выходных сигналов.

Важно, чтобы БГУВ обеспечивал высокую точность выходной частоты, имел высокое подавление боковых амплитудных составляющих в спектре сигнала с частотой 5 МГц, низкие зависимость изменения частоты и амплитуды выходного сигнала от температуры и уровень фазовых шумов спектральной характеристики сигнала; имел

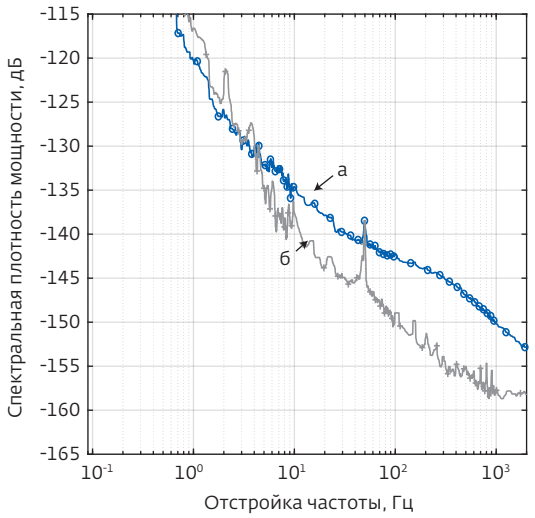

Рис.2. Спектральная плотность мощности фазовых шумов: а – сигнал БГУВ; б – КГ

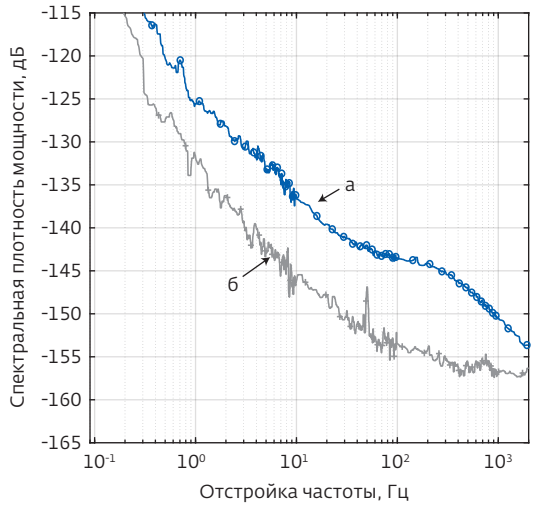

Рис.3. Спектральная плотность мощности фазовых шумов: а – сигнал БГУВ; б – малошумящий кварцевый генератор

унифицированную конструкцию для применения в различных моделях КСЧ. И, конечно, немаловажно, чтобы он был реализован на отечественной электронной компонентной базе.

Учитывая все эти требования, необходимые для улучшения метрологических характеристик КСЧ, авторами была проведена модернизация блока генератора и усилителей выходного сигнала.

Новая конструкция блока генератора и усилителей выхода частоты была разработана на основе транзисторов биполярного типа с малыми характеристиками фазового шума.

Экспериментальные исследования

Предварительно было произведено исследование с целью оценки нахождения возможного минимального уровня фазовых шумов в предыдущей конструкции.

Спектральная характеристика фазовых шумов предыдущей конструкции частично совпадала с характеристикой входящего в конструкцию кварцевого генератора (рис.2).

После проведения замены кварцевого генератора на генератор с более низкой спектральной характеристикой фазовых шумов было установлено, что уровень фазовых шумов этого блока усилителей ниже уровня, определяемого собственными шумами транзисторов, не улучшается (рис.3).

В связи с этим было произведено изготовление опытного образца БГУВ. Проведенные исследования показывают, что новая конструкция позволяет уменьшить спектральную плотность фазовых шумов до уровня, сравнимого с уровнем фазовых шумов кварцевого генератора с лучшими спектральными характеристиками (рис.3).

Уменьшение спектральной плотности фазовых шумов позволяет также уменьшить влияние фазовых шумов на дальнейших устройствах в стандарте частоты, что позволяет улучшить кратковременную стабильность частоты.

Измерение среднего квадратического двухвыборочного отклонения (СКДО) при времени измерения 1 с скользящим окном на времени наблюдения 20 ч выходного сигнала КСЧ с модернизированным блоком генератора и усилителей выхода (рис.5) показало уменьшение данного значения в сравнении со старой конструкцией.

Уменьшение СКДО говорит об улучшении кратковременной стабильности частоты стандарта частоты.

Заключение

Полученные результаты исследований работы новой конструкции блока генератора и усилителей выходного сигнала показали целесообразность применения данного решения в составе квантового стандарта частоты.

По результатам проведенных испытаний блока генератора и усилителей выходного сигнала в составе КСЧ зафиксировано уменьшение уровня

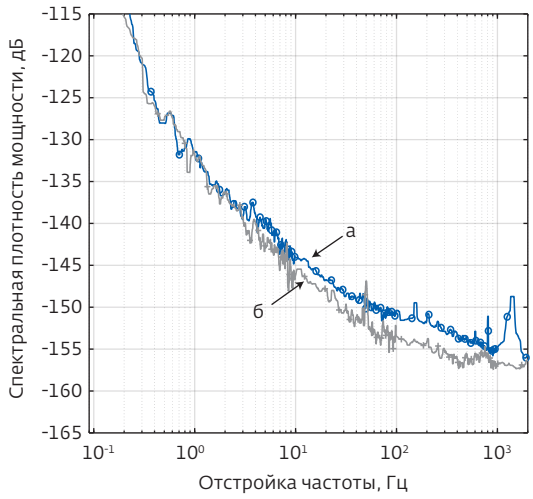

Рис.4. Спектральная плотность мощности фазовых шумов: а – сигнал новой конструкции БГУВ; б – малошумящий кварцевый генератор

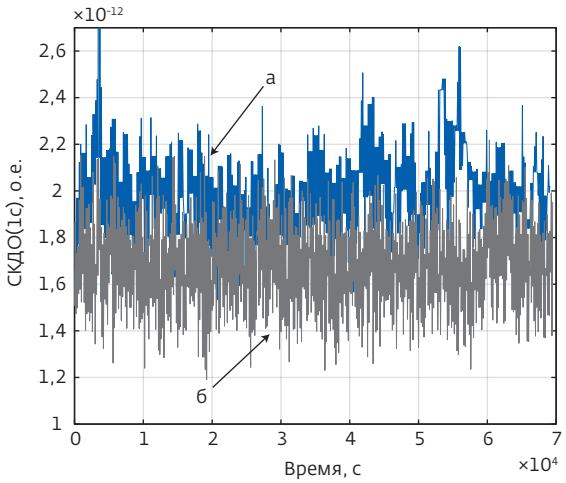

Рис.5. СКДО при времени измерения 1 с скользящим окном: а – характеристика КСЧ старой конструкции; б – характеристика КСЧ с модернизированным БГУВ

спектральной характеристики фазовых шумов на 6% на частотах отстройки 10–100 Гц и позволило улучшить кратковременную стабильность частоты на 13,5%.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Дудкин В.И., Пахомов Л.Н.** Квантовая электроника. СПб: Изд-во Политехнического ун-та, 2012. 387 с.
2. **Риле Ф.** Стандарты частоты. Принципы и применения. М.: Физматлит, 2009. 511 с.
3. **Донченко С.И., Щипунов А.Н., Динисенко О.В., Блинов О.Ю., Фетодотов В.Н., Сильвестров В.С.** Текущее состояние и перспективы развития средств фундаментального и метрологического обеспечения системы ГЛОНАСС // Измерительная техника. 2018. № 1. С. 3–8.
4. **Петров А.А., Давыдов В.В., Шабанов В.Е., Залетов Д.В.** Цифровой синтезатор частоты для квантового стандарта частоты на атомах цезия-133 // НТВ СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление, НТВ-ИТУ. 2013. № 186. С. 45–52.
5. **Максименко С.Г.** Совершенствование методики расчета относительной погрешности меры частоты // Измерительная техника. 2018. № 1. С. 15–17.
6. **Xie J., Wang H., Li P., Meng Y.** Overview of Navigation Satellite Systems // In: Satellite Navigation Systems and Technologies. Space Science and Technologies. Singapore: Springer, 2021.
7. **Соколов С.В., Каменский В.В., Ковалев С.М., Тищенко Е.Н.** Использование межспутниковых измерений для высокоточной оценки навигационных параметров объекта // Измерительная техника. 2017. № 1. С. 19–23.
8. **Карауш Е.А., Печерица Д.С.** Исследование межчастотных задержек сигналов на борту навигационных космических аппаратов ГЛОНАСС // Измерительная техника. 2020. № 3. С. 42–48.
9. **Petrov A.A., Vologdin V.A., Davydov V.V., Zalyotov D.V.** Dependence of microwave – excitation signal parameters on frequency stability caesium atomic clock // Journal of Physics: Conference Series. 2015. Vol. 643. No 1. P. 012087.
10. **Пашев Г.П.** Оптимальный алгоритм синхронизации шкалы времени квантовых часов // Измерительная техника. 2016. № 6. С. 51–54.
11. **Formichella V., Camparo J.,Tavella P.** Influence of the ac-Stark shift on GPS atomic clock timekeeping // Applied Physics Letters. 2017. Vol. 110. No 4. P. 043506.
12. **Yang Y., Gao W., Guo S., Mao Y., Yang Y.** Introduction to BeiDou-3 navigation satellite system // NAVIGATION. 2019. Vol. 66. PP. 7–18.
13. **Белов Л.А.** Современные синтезаторы стабильных частот и сигналов // Радиотехника. 2007. № 3. С. 21–25.
14. **Петров А.А., Давыдов В.В.** Цифровой синтезатор частоты для атомных часов на парах ^{133}Cs // Радиотехника и электроника. 2017. Т. 62. № 3. С. 300–306.