

Новая конструкция системы усиления сигнала в квантовом стандарте частоты на атомах рубидия–87

А. В. Шавшин^{1,*}, В. В. Давыдов^{1,2,3,†}, А. П. Валов^{2,‡}, А. А. Петров^{4,§}

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра. Россия, 195251, Санкт-Петербург, Политехническая улица, д. 29

²Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций имени профессора М. А. Бонч-Бруевича Россия, 193232, Санкт-Петербург, набережная реки Мойки, д. 61

³Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии Россия, Московская область, 143050, Одинцовский район, р.п. Большие Вяземы, ул. Институт, владение 5

⁴Российский институт навигации и времени. Россия, 192012, Санкт-Петербург (Поступила в редакцию 14.05.2022; подписана в печать 29.10.2022)

Обоснована необходимость разработки новой конструкции автоматической регулировки усиления СВЧ–сигнала для обеспечения стабильности выходных параметров квантового стандарта частоты (КСЧ) на атомах рубидия–87 при различных внешних условиях его эксплуатации. Представлена новая схема автоматической регулировки усиления в СВЧ–тракте КСЧ на атомах рубидия–87. Рассмотрен усилитель сигнала, управляющий СВЧ–сигналом возбуждения, проведено математическое моделирование СВЧ–устройств, входящих в СВЧ–тракт. Подтверждена обоснованность разработанной схемы автоматической регулировки усиления для стандарта частоты на атомах рубидия–87.

PACS: 06.20.fb

УДК: 53.043

Ключевые слова: квантовый стандарт частоты, СВЧ–сигнал, автоматическая регулировка усиления, СВЧ–тракт, сигнал ошибки, девиация Аллана.

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире квантовые стандарты частоты являются незаменимыми источниками высокостабильных, спектрально–чистых электрических сигналов для решения различных задач науки и техники [1–6]. Особые требования предъявляются к квантовым стандартам частоты (КСЧ), которые используются в навигационных системах и системах единого времени [7–10]. Одним из таких КСЧ являются стандарты на атомах рубидия–87 [11–13]. С учётом увеличивающихся требований к точности и стабильности формирования выходного сигнала возникает необходимость в проведении модернизации КСЧ или разработке новых типов КСЧ на других физических принципах работы. Для проведения работ по улучшению точностных характеристик КСЧ в некоторых случаях достаточно провести модернизацию функциональных узлов, непосредственным образом влияющих на характеристики выходного сигнала КСЧ. Так в данной работе представлена модернизация тракта формирования СВЧ–сигнала возбуждения атомов рубидия–87, направленная на формирование как самого СВЧ–сигнала, так и параметров выходного сигнала КСЧ.

1. КВАНТОВЫЙ СТАНДАРТ ЧАСТОТЫ НА АТОМАХ РУБИДИЯ–87 И АВТОМАТИЧЕСКАЯ РЕГУЛИРОВКА УСИЛЕНИЯ

На рис. 1 представлена работа КСЧ, основанная на принципе стабилизации частоты кварцевого генератора по частоте перехода атомов рубидия–87.

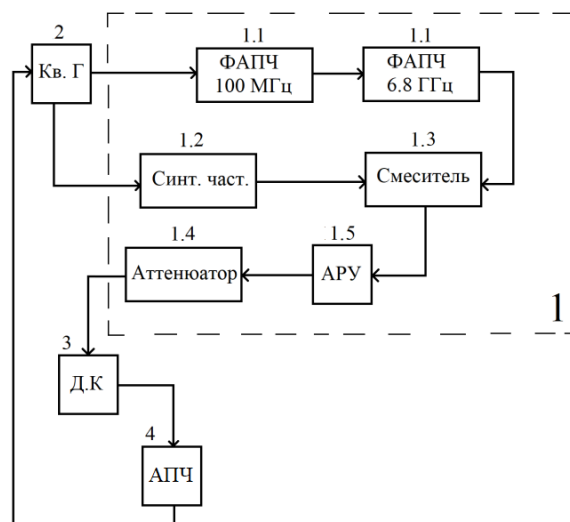


Рис. 1. Структурная схема рубидиевого стандарта частоты: 1 — преобразователь частоты; 1.1 — кольцо фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ); 1.2 — синтезатор частоты; 1.3 — смеситель; 1.4 — аттенюатор; 1.5 — автоматическая регулировка усиления; 2 — кварцевый генератор; 3 — квантовый дискриминатор; 4 — система автоматической подстройки частоты (АПЧ)

* shavshin2107@gmail.com

† davydov_vadim66@mail.ru

‡ tony.valov2015@yandex.ru

§ alexandrpetrov.spb@yandex.ru

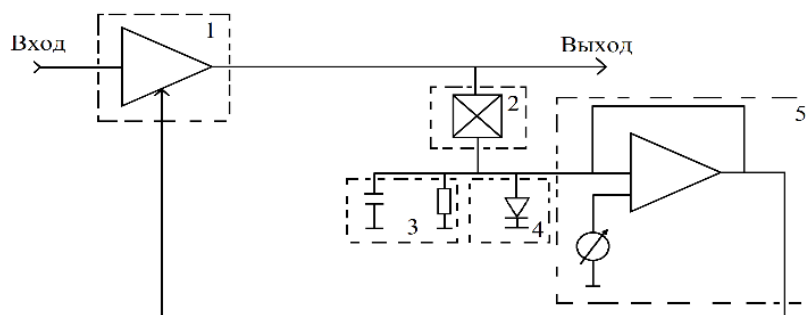


Рис. 2. Схема автоматической регулировки усиления рубидиевого стандарта частоты: 1 — усилитель напряжения СВЧ сигнала на полевом транзисторе; 2 — направленный ответвитель; 3 — фильтр нижних частот; 4 — детекторный диод; 5 — усилитель сигнала «ошибки», для управления питанием полевого транзистора, первого усилителя

КСЧ на атомах рубидия является стандартом частоты пассивного типа. Выходной сигнал кварцевого генератора с частотой 5 МГц используется в тракте формирования СВЧ частоты следующим образом [16, 17]. С кварцевого генератора поступает сигнал 5 МГц на систему фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), состоящую из двух подсистем. С выхода первой подсистемы формируется сигнал с частотой 100 МГц, являющийся опорным для второй подсистемы ФАПЧ. Выходным сигналом второй системы является сигнал с частотой 6.8 ГГц. Также параллельно сигнал с кварцевого генератора подаётся на синтезатор частоты.

Выходным сигналом синтезатора частоты является частотно-модулированный сигнал с частотой 34.5 МГц. Далее эти два сигнала поступают на смеситель, с выхода которого формируется сигнал с частотой 6.834 ГГц. Далее сигнал поступает на систему автоматической регулировки усиления (АРУ), предназначенной для стабилизации уровня мощности СВЧ-сигнала на одном уровне. После прохождения АРУ сигнал поступает на аттенюатор, необходимый для конечной установки уровня СВЧ-сигнала на входе в квантовый дискриминатор, формирующий сигнал ошибки, который необходим для работы системы автоматической подстройки частоты (АПЧ) и стабилизации частоты кварцевого генератора.

Как видно из представленного описания работы КСЧ, система АРУ является одним из наиболее важных функциональных узлов тракта формирования СВЧ и всей конструкции КСЧ. На рис. 2 представлена принципиальная схема разработанной системы АРУ.

На вход системы поступает заведомо ослабленный по мощности сигнал, поэтому его необходимо будет усилить, чтобы на выходе системы итоговая мощность сигнала имела достаточный уровень для работы квантового дискриминатора. Для этого будет использован усилитель на полевом транзисторе (1). Далее для формирования управляющего сигнала «ошибки» часть сигнала проходит через направленный ответвитель (2) в цепь регулировки питания полевым транзистором первого усилителя, а часть сигнала подаётся на выход

системы в квантовый дискриминатор.

Далее управляющий сигнал «ошибки» необходимо продетектировать, для получения постоянной составляющей сигнала. Для этих целей используется детекторный СВЧ-диод (4). После детектирования сигнал в зависимости от внешних условий работы КСЧ может иметь разную амплитуду, поэтому необходимо иметь возможность подстраивать его амплитуду на заранее определённый уровень. Для этого используется усилитель сигнала «ошибки» на операционном усилителе (5).

Для разработки АРУ была выбрана необходимая электронно-компонентная база, а также произведён расчёт направленного ответвителя.

2. РАСЧЁТ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ РЕГУЛИРОВКИ УСИЛЕНИЯ

В простейшем случае направленный ответвитель на связанных микрополосковых линиях представляет собой восьмиполосник, состоящий из двух параллельных микрополосковых линий, электрическая длина которых равна четверти длины волны возбуждающего воздействия, рис. 3.

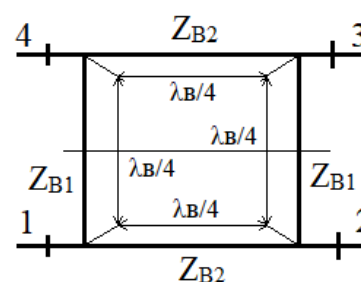


Рис. 3. Микрополосковый шлейфный мост

Такой ответвитель обладает двумя плоскостями симметрии, поэтому расчёт элементов моста и матрицы

рассеяния будет выглядеть следующим образом:

$$1/Z_2^2 - 1/Z_1^2 = 1, s_{ii} = 0, s_{14} = s_{32} = 0, \\ s_{21} = -jZ_{B2}, s_{31} = -Z_{B2}/Z_{B1}.$$

Воспользовавшись следующими известными формулами [14], где при расчётах единичное волновое сопротивление микрополосковой линии Z_0 принимается за 1 Ом, в нашем случае примем за 50 Ом. Далее найдём неизвестные параметры шлейфного моста.

$$|s_{21}| = |s_{31}| \Rightarrow Z_{B2} = \frac{Z_{B2}}{Z_{B1}}$$

Из чего следует, что Z_1 соответствует единичному волновому сопротивлению микрополосковой линии.

$$Z_1 = 50 \text{ Ом}, \quad Z_{Bi} = \frac{Z_{Bi}}{Z_0}, \\ 1/Z_{B2}^2 - 1/Z_{B1}^2 = 1 \Rightarrow 1/Z_{B2}^2 = 2.$$

В нашем случае сопротивление Z_2 примет значение, равное 35.5 Ом.

Составим матрицу рассеяния для направленного ответвителя.

$$S = \frac{1}{\sqrt{2}} * \begin{pmatrix} 0 & 1 & -j & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -j \\ -j & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -j & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Чтобы синтезировать необходимый направленный ответвитель, нужно выполнить расчёт его размеров для сигнала конкретной частоты. В нашем случае направленный ответвитель будет синтезирован под частоту 6.834 ГГц. На рис. 4 изображена топология микрополоскового направленного ответвителя. Для создания, направленного ответвителя был использован математический пакет «MicrowaveOffice», в котором с помощью элемента «MLIN» имитировалась микрополосковая линия, а элемент «МТЕЕ» имитировал реализацию разделения микрополосковых линий в два направления.

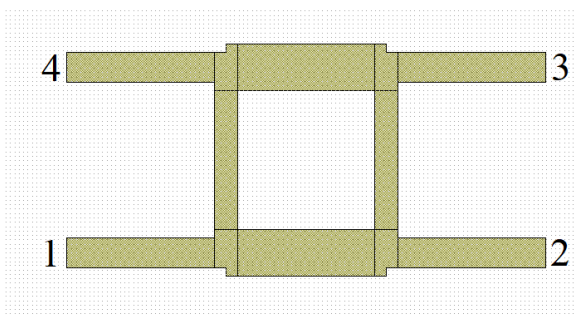


Рис. 4. Топология микрополоскового направленного ответвителя

Далее на рис. 5 и 6 представлены принципиальная электрическая схема и итоговые параметры микрополоскового направленного ответвителя.

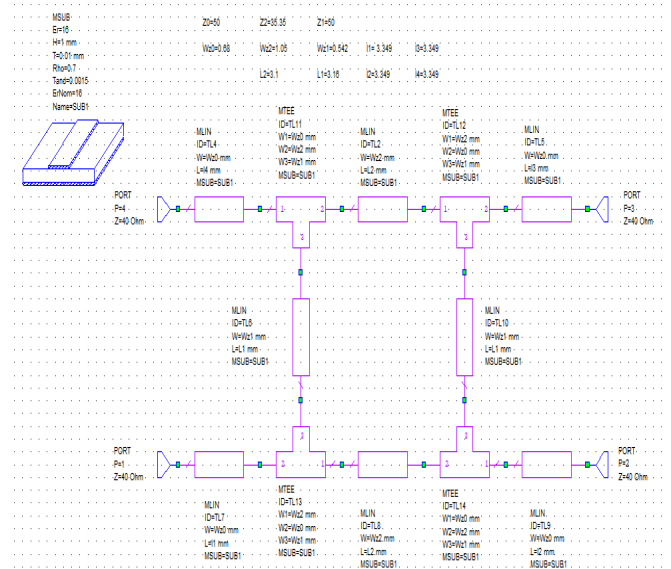


Рис. 5. Принципиальная электрическая схема микрополоскового направленного ответвителя

Как можно убедиться по графикам, направленный ответвитель успешно синтезирован по уровню -3 дБ на частоте 6.834 ГГц. На рис. 6 изображён график фазо-частотной характеристики направленного ответвителя. Полученные результаты настройки направленного ответвителя и его фазо-частотная характеристика полностью удовлетворяют поставленным требованиям. На графике фазо-частотной характеристики можем пронаблюдать, что фаза между 3 и 2 выходом отличается на 90° (с учётом допустимой погрешности), что говорит о корректной настройке направленного ответвителя.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК КВАНТОВОГО СТАНДАРТА ЧАСТОТЫ

В качестве примера в работе приведены результаты исследования характеристик КСЧ в диапазоне изменения температур от -20°C до 35°C .

Опытный образец АРУ был включен в состав конструкции КСЧ, у которого были измерены выходные характеристики. После обработки полученных данных были построены графики зависимости значений дисперсии Аллана $\sigma^2(\tau)$ от времени τ для модернизированной и предыдущей конструкции КСЧ (рис. 7).

Дисперсия является количественной мерой стабильности частоты различных устройств, в особенности атомных часов и генераторов. Полученные результаты показывают улучшение дисперсии Аллана $\sigma^2(\tau)$ на 12%.

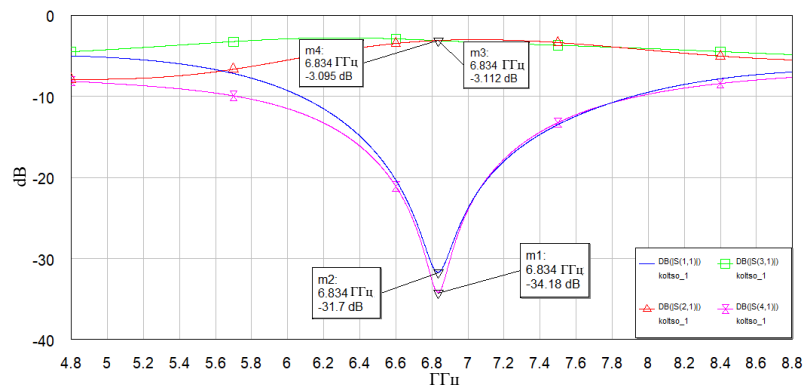


Рис. 6. Итоговые параметры микрополоскового направленного ответвителя

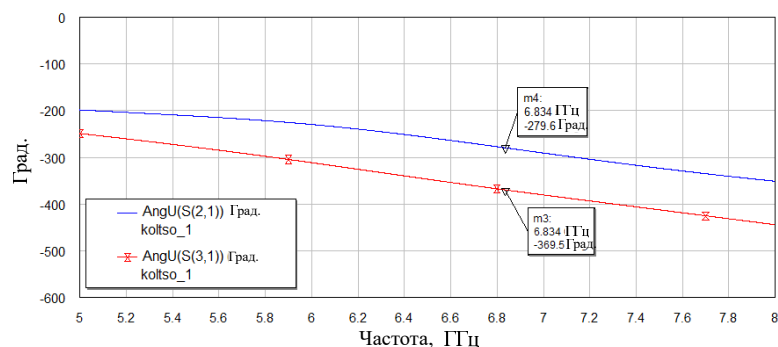


Рис. 7. Фазо-частотная характеристика направленного ответвителя

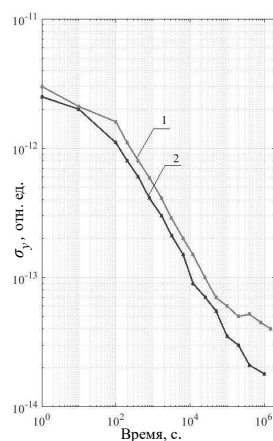


Рис. 8. График зависимости значений дисперсии Аллана от времени с использованием новой системы АРУ (график 2) и ранее используемой (график 1) в КСЧ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы была реализована система АРУ СВЧ-тракта КСЧ на атомах рубидия-87. Синтезирован направленный ответвитель для частоты 6.834 ГГц, получены его параметры и фазо-частотная характеристика, удовлетворяющие требованиям, необходимым для использования в КСЧ.

Результаты анализа работы опытного образца КСЧ с разработанной системой АРУ показали, что выбранное схематическое решение работает корректно и его использование улучшает выходные характеристики КСЧ. Применение разработанной системы АРУ позволило уменьшить значения дисперсии Аллана на 12%.

Результаты работы докладывались на Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2022».

- [1] Huang G., Cui B., Zhang Q. // Adv. Sp. Res. 2019. **63**. P. 1681.
 [2] Ryzhenko I.N., Lutsenko A.E., Varygin O.G., Nepomnyashchiy O.V. / International Siberian Conference on Control and Communications. 2019. 8729665.

- [3] Liu H., Yang Y., He Y., Li H., Yang Z., Chen Y., She L., Li J. // Lecture Notes in Electrical Engineering. 2013. **245**, LNEE. P. 335.
 [4] Lukashov N.A., Davydov R.V., Glinushkin A.P., Rud' V.Yu. // Journal of Physics: Conference Series. 2009.

- 1326**(1). 012046.
- [5] *Mihov E.D., Nepomnyashchiy O.V.* // Journal of Siberian Federal University: Mathematics and Physics. 2016. **9**(4). P. 473.
- [6] *Ryzhenko I.N., Lutsenko A.E., Varygin O.G., Nepomnyashchiy O.V.* // International Siberian Conference on Control and Communications. Proceedings. 2019. 8729665.
- [7] *Davydov R., Antonov V., Moroz A.* // IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech). 2019. **8906791**. P. 295.
- [8] *Lukashev N.A., Moroz A.V.* // Journal of Physics: Conference Series. 2019. **1236**(1). 012068.
- [9] *Hein. G.W.* // Satellite Navigation. 2020. **1**. P. 22.
- [10] *Semenov V.V., Nikiforov N.F., Ermak S.V.* // Soviet journal of Communications Technology and Electronics. 1991. **36**(4). P. 59.
- [11] *Петров А.А.* // Радиотехника и электроника. 2018. **63**, № 11. С. 1159.
- [12] *Grevtseva A., Rud V.* // CEUR Workshop Proceedings. 2020. **2667**. P. 15.
- [13] *Arpesi P., Belfi J., Gioia* // Jt. Conf. IEEEInt. Freq. Control Symp. Eur. Freq. TimeForum, Proc. 2019. **2**, P. 1.
- [14] *Сазонов Д.М.* Антенны и устройства СВЧ. М., 1988.
- [15] *Valov A.P., Arinushkina K.G., Davydov V.V.* // Journal of Physics: Conference Series. 2021. **2086**(1). 012070.
- [16] *Петров А.А., Залетов Д.В., Давыдов В.В., Шаповалов Д.В.* // Радиотехника и электроника. 2021. **66**, № 3. С. 285.
- [17] *Campano J.* // Phys. Today. 2007. **60**. P. 33.

New design of the signal amplification system in the atomic frequency standard based on rubidium-87 atoms

A. V. Shavshin^{1,a}, V. V. Davydov^{1,2,3,b}, A. P. Valov^{2,c}, A. A. Petrov^{4,d}

¹*St.-Petersburg polytechnical university of Peter the Great. St.-Petersburg, 195251, Russia*

²*The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications. St.-Petersburg, 193232, Russia*

³*All-Russian Research Institute of Phytopathology. Moscow Region, Russia*

⁴*Russian Institute of Navigation and Time. St.-Petersburg, 192012, Russia*

E-mail: ^ashavshin2107@gmail.com, ^bdavydov_vadim66@mail.ru, ^ctony.valov2015@yandex.ru, ^dalexandrpetrov.spb@yandex.ru

The necessity of developing a new design for automatic control of the microwave signal gain to ensure the stability of the output parameters of the atomic frequency standard (AFS) based on rubidium-87 atoms under various external conditions of its operation is substantiated. A new scheme for automatic gain control in the microwave path of the AFS based on rubidium-87 atoms is presented. A signal amplifier that controls the microwave excitation signal is considered, and mathematical modeling of microwave devices included in the microwave path is carried out. The validity of the developed automatic gain control scheme for the atomic frequency standard is confirmed. rubidium-87.

PACS: 06.20.fb.

Keywords: quantum frequency standard, microwave signal, automatic gain control, microwave path, error signal, Allan deviation.

Received 14 May 2022.

Сведения об авторах

1. Шавшин Артём Владимирович — студент СПбПУ им. Петра Великого; e-mail: Shavshin2107@gmail.com.
2. Давыдов Вадим Владимирович — доктор физ.-мат. наук, профессор; тел.: (812) 494-44-14, e-mail: davydov_vadim66@mail.ru.
3. Валов Антон Петрович — аспирант СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича; e-mail: tony.valov2015@yandex.ru.
4. Петров Александр Анатольевич — канд. физ.-мат. наук, нач. лаборатории; e-mail: alexandrpetrov.spb@yandex.ru.