

Усовершенствование характеристик синтезатора частоты в квантовом стандарте частоты на атомах цезия

Е.В. Исупова^{1,*}, А.С. Будников^{1,†}, В.В. Давыдов^{1,2,3,‡}, А.П. Валов², А.А. Петров⁴

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
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 19.05.2022; подписана в печать 29.05.2022)

Квантовый стандарт частоты необходим для точного измерения частоты колебаний или генерирования колебаний со стабильной во времени частотой. Важным функциональным узлом в стандарте частоты на атомах цезия является синтезатор частоты. В работе представлена новая схема синтезатора частоты, основанная на методе прямого цифрового синтеза. Подробно рассмотрены достоинства и недостатки нового метода синтеза сигнала, указаны отличия этого метода от других. Приведено описание основных узлов новой схемы синтезатора. С помощью увеличения разрядности накапливающего сумматора добились уменьшения шага перестройки выходной частоты на несколько порядков. Сделан вывод о том, что данный метод удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к параметрам синтезаторов частоты.

PACS: 06.20.fb

УДК: 53.043

Ключевые слова: квантовый стандарт частоты, синтезатор частоты, прямой цифровой синтез, накапливающий сумматор, перестройка частоты, цезиевые атомные часы.

ВВЕДЕНИЕ

С наибольшей точностью среди всех физических величин может быть определена частота [1–3]. Развитие методов измерения частоты увеличило точность измерения величин, которые могут быть определены через неё. Международная система единиц, используя физические законы и фундаментальные константы, определяет другие единицы измерения в терминах секунды [4–7]. В качестве эталонов измерений часто используются стандарты частоты [1, 2, 8, 9]. Стандарт частоты — это источник электромагнитных импульсов, который генерирует сигнал требуемой частоты с заданной точностью и обеспечивает потребителя реперами частоты из широкого диапазона. Эталон времени — 1 секунда — в мировой науке определён как интервал времени, в течение которого происходит 9 192 631 770 периодов электромагнитного излучения, возникающего при переходе между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома ^{133}Cs . Именно поэтому стандарт частоты на атомах ^{133}Cs стал использоваться как первичный эталон, на основе которого основана международная шкала времени [1, 10, 11].

Квантовый стандарт частоты (КСЧ) на атомах ^{133}Cs в отличие от других стандартов обладает равномерной шкалой времени, что делает его крайне востре-

бованным в различных системах [1, 12–14]. Поэтому происходит постоянная модернизация КСЧ на атомах цезия на основе новых разработок различных блоков и систем. Структурная схема квантового стандарта частоты на атомах ^{133}Cs приведена на рис. 1.

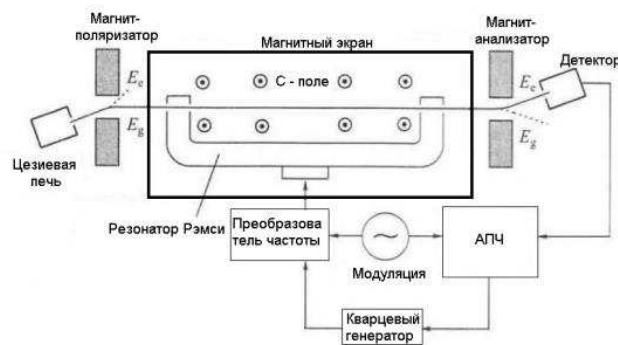


Рис. 1. Схема цезиевых атомных часов

Подробно принцип работы квантового стандарта частоты рассмотрен в [1]. Необходимо только отметить, что КСЧ на атомах ^{133}Cs являются пассивными стандартами, в которых частота колебаний внешнего генератора сравнивается с частотой спектральной линии цезия-133.

Одним из важных функциональных узлов КСЧ на атомах ^{133}Cs является синтезатор частоты. Синтезатор является источником стабильных колебаний в устройствах, в которых требуется настройка на разные частоты в широком диапазоне и высокой стабильно-

* isupova.e24@mail.ru

† budnikov.as@edu.spbstu.ru

‡ davydov_vadim66@mail.ru

стью [15–17]. Необходимо отметить, что точность сгенерированной синтезатором частоты выходного сигнала влияет на точность резонансной частоты перехода и другие характеристики выходного сигнала КСЧ. Поэтому в условиях повышения требований к КСЧ этому вопросу в задачах модернизации стандартов уделяется повышенное внимание. В нашей работе предлагается один из вариантов улучшения характеристик синтезатора частоты с использованием отечественной элементной базы.

1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Наиболее распространенными на сегодняшний день являются следующие методы синтеза частот:

а: Прямой аналоговый синтез. Данный метод называется так, потому что в нем нет этапа коррекции ошибки. Из-за этого точность синтеза сигнала на выходе синтезатора зависит от качества входного тактового сигнала. Для быстрого перехода устройства на другую частоту применяют несколько опорных генераторов. Необходимость синтеза сигнала из широкого диапазона частот заставляет конструкторов использовать большое число опорных генераторов. Устройства, основанные на методе прямого синтеза, являются громоздкими и дорогими.

б: Косвенный синтез. Данный метод базируется на фазовой автоматической подстройке частоты. Частота на выходе формируется благодаря дополнительному генератору, который охвачен петлей фазовой автоматической подстройки частоты. Наличие фазового детектора в конструкции синтезатора вызывает фазовые шумы. Чтобы уменьшить шаг перестройки частоты, необходимо проводить работу на низкой частоте сравнения, что вынуждает уменьшить частоту среза петлевого фильтра. Также это негативно влияет на фазовые шумы устройства. Конструкция такого синтезатора частоты не позволяет получить высокую скорость перестройки частоты.

в: Прямой цифровой синтез. Это относительно новый метод синтеза частоты, появившийся в начале 1970-х годов. Все описанные методы синтеза доступны для разработчиков уже достаточно долгое время, но только в последнее время методу прямого цифрового синтеза уделяется пристальное внимание. Данный метод особенный, потому что генерируемый сигнал синтезируется со свойственной цифровым системам точностью.

г: Гибридный синтез. Метод синтеза, при котором происходит комбинация нескольких описанных ранее методов.

В новой конструкции цифрового синтезатора частоты мы предлагаем использовать метод прямого цифрового синтеза. Такое решение обусловлено некоторыми достоинствами по сравнению с остальными методами синтеза частоты. Цифровые системы синтезируют сигнал с точными заданными характеристиками. Такие параметры выходного сигнала, как частота, амплитуда и фаза, точно известны и постоянно управляются системой. Высокое разрешение по частоте и по фазе, быстрый переход на другую частоту и высокая скорость перестройки в отсутствие выбросов или других искажений, которые могут возникнуть из-за времени установления, широкий диапазон генерируемых частот — также являются достоинствами этого метода.

Схема синтезатора, основанного на этом методе, включает в себя только один нестабильный элемент — цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП). Данная нестабильность характерна для всех аналоговых схем. По этой причине нашей конструкции синтезатора адресный счетчик ПЗУ был заменен на накапливающий сумматор. Накапливающий сумматор есть регистр, на каждом такте работы которого происходит перезагрузка устройства. Также, на каждый такт работы устройства происходит суммирование значения, полученного ранее, и постоянного слагаемого — суммирование с накоплением. Итоговая схема синтезатора изображена на рис. 2.

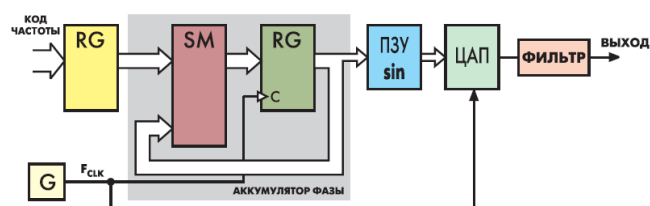


Рис. 2. Схема цифрового синтезатора

Значение, содержащееся внутри регистра, постоянно возрастает с течением времени, величина добавки зависит от постоянного слагаемого. На выходе накапливающего сумматора получается код, который соответствует фазе сигнала на выходе в текущий момент времени. Добавочное слагаемое, которое используется при работе устройства, соответствует возрастанию фазы сигнала за один такт работы. Величина частоты синтезируемого сигнала прямо пропорциональна скорости изменения фазы сигнала во времени. Таким образом, величина увеличения фазы соответствует двоичному коду частоты на выходе регистра.

Накапливающий сумматор, также именуемый аккумулятором фазы, синтезирует последовательность двоичных кодов линейно меняющейся фазы сигнала. Частота переполнения аккумулятора фазы соответствует частоте сигнала на выходе. Выходная частота определяется формулой:

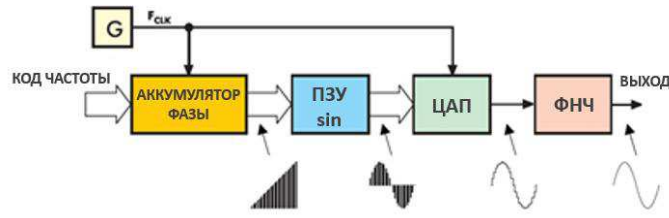


Рис. 3. Принцип работы синтезатора

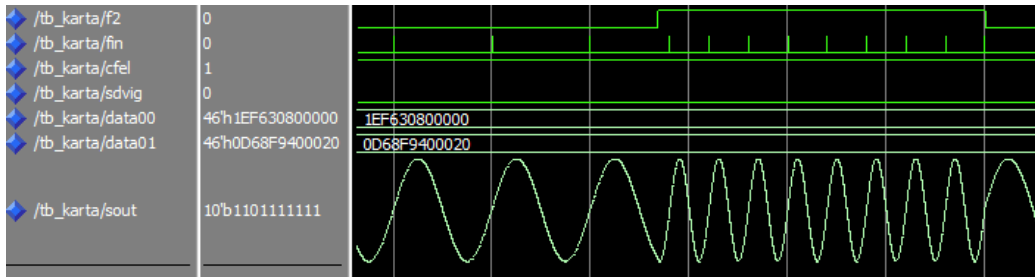


Рис. 4. Результат моделирования

$$F_{out} = \frac{M \cdot F_{clk}}{2^N},$$

где F_{out} — частота на выходе, F_{clk} — тактовая частота, M — двоичный код частоты, N — разрядность накапливающего сумматора.

Частота, представленная в виде двоичного кода, определяет скорость, с которой будет происходить изменение фазы сигнала. Возрастающая фаза превращается в значения сигнала на выходе, из которых ЦАП генерирует сигнал синусоидальной формы, состоящий из «ступенек». Фильтр нижних частот сглаживает «ступеньки», и таким образом формируется выходной сигнал синусоидальной формы (рис. 3).

Сигнал на выходе устройства создается из отдельных отсчетов. Не всегда в период синуса помещается целое число отсчетов. Чаще всего в разных периодах отсчеты располагаются по-разному, отличаясь от предыдущих и последующих периодов. В некоторых случаях возможно, что расположение отсчетов может повторяться с определенным периодом, но этот период повторения сильно различается на протяжении всего сигнала. Такой период определяется множеством факторов, таких как код частоты, разрядность сумматора и разрядность кода фазы. Таким образом, из последовательности отсчетов может быть сформирована синусоидальный сигнал.

Несмотря на то, что шумы урезаются при делении частоты, главная причина возникновения в схеме фазовых шумов — это наличие источника тактового сигнала. В теории фазовый шум тактового сигнала больше, чем шум сигнала на выходе. Необходимо отметить, что

на уменьшение величины шума накладывается ограничение шумовым порогом используемых схем, а уменьшение выходных фазовых шумов ограничивается величиной шумов тактового сигнала. Остаточный фазовый шум — величина шума, ниже которого опустить выходные шумы не получится.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ КОНСТРУКЦИИ СЧ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе исследования было выполнено моделирование в специализированном средстве разработки Quartus II, которое ориентировано на работу с ПЛИС фирмы Altera. Был написан программный код, реализующий прямой цифровой синтез частот на языке VHDL. Загрузка данных происходила с микроконтроллера с помощью периферийного интерфейса передачи данных SPI (Serial Peripheral Interface). На рис. 4 представлены результаты моделирования.

В более ранней версии синтезатора частоты применялся 32-разрядный аккумулятор фазы. Повышение количества разрядов устройства до 40 позволило понизить величину шага перестройки частоты. Созданная схема при работе на частоте 15 МГц имеет шаг перестройки выходной частоты:

$$\Delta F_{out} = \frac{F_{clk}}{2^N} = \frac{15 \cdot 10^6}{2^{40}} = 1,36 \cdot 10^{-5} F.$$

При работе на частоте 25 МГц шаг перестройки будет составлять:

$$\Delta F_{out} = \frac{F_{clk}}{2^N} = \frac{25 \cdot 10^6}{2^{40}} = 2,27 \cdot 10^{-5} F,$$

где ΔF_{out} — шаг перестройки выходной частоты, F_{clk} — тактовая частота, N — разрядность накапливающего сумматора.

Полученные значения шага перестройки частоты синтезатора ΔF_{out} на порядок меньше, чем значение ΔF_{out} , которое использовалось в предыдущих конструкциях синтезаторов частоты в квантовых стандартах на атомах ^{133}Cs .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты по перестройке частоты выходного сигнала синтезатора позволили улучшить в несколько раз точность формирования частоты сигнала СВЧ возбуждения, соответствующего резонансному переходу в атомной структуре.

Параметры разработанного синтезатора частоты на

основе метода DDS («direct digital synthesis») на отечественной элементной базе соответствуют большинству новых технических требований, предъявляемых к сигналам в КСЧ. Кроме того, большинство параметров разработанного синтезатора частоты контролируются программой.

Проведенные измерения показали, что новая конструкция синтезатора частоты обладает меньшим потреблением электрической энергии на 16-18 %, чем ранее разработанные конструкции. Это крайне важно при применении КСЧ на атомах ^{133}Cs в подвижных объектах.

Необходимо отметить, что разработанную нами конструкцию синтезатора частоты можно успешно использовать, внося небольшие изменения, в других типах КСЧ (например, на атомах рубидия-87 и т.д.).

-
- [1] Риле Ф. Стандарты частоты. Принципы и приложения. М., 2009.
 - [2] Дудкин В.И., Пахомов Л.Н. Квантовая электроника. Приборы и их применение. М.: Техносфера, 2006.
 - [3] Davydov R.V., Dudkin V.I., Nikolaev D.I., Makeev S.S., Moroz A.V. // J. of Commun. Tech. and Electronics. 2021. **66**(5). P. 632.
 - [4] Mihov E.D., Nepomnyashchiy O.V. // Journal of Siberian Federal University: Mathematics and Physics. 2016. **9**(4). P. 473.
 - [5] Davydov R., Antonov V., Moroz A. // In: IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech). Russia. Saint-Petersburg. 2019. 8906791. P. 295.
 - [6] Pashev G. P. // Measurement Techniques. 2016. **59**(6). P. 1005.
 - [7] Burt E.A., Prestage J.D., Tjoelker R.L., Enzer D.G., Kuang D., Murphy D.W., Robison D.E., Seubert J.M., Wang R.T., Ely T.A. // Nature. 2021. **595**(7865). P. 43.
 - [8] Liu H., Yang Y., He Y., Li H., Yang Z., Chen Y., She L., Li J. // Lecture Notes in Electrical Engineering. 2013. P. 335.
 - [9] Grevtseva A., Rud V. // CEUR Workshop Proceedings. 2020. **2667**. P. 15.
 - [10] Schmeissner, R., Douahi, A., Barberau, I. et al. // Eur. Freq. Time Forum. 2016. P. 3.
 - [11] Петров А.А., Залетов Д.В., Давыдов В.В., Шаповалов Д.В. // Радиотехника и электроника. 2021. **66**(3). P. 285.
 - [12] Ryzhenko I.N., Lutsenko A.E., Varygin O.G., Nepomnyashchiy O.V. // International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2019. Proceedings. 2019. 8729665.
 - [13] Petrov A.A. // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 2015. **9247**. P. 739.
 - [14] Vanier J., Audoin C. // Metrologia. 2005. **42**(3).
 - [15] Petrov A.A., Davydov V.V., Shapovalov D.V. // Journal of Physics: Conference Series. 2019. **1400**(4). 044008.
 - [16] Bauch A. // Meas. Sci. Technol. 2003. **14**. P. 1159.
 - [17] Huang G., Cui B., Zhang Q. et al. // Adv. Sp. Res. 2019. **63**. P. 1681.

Improvement of the characteristics of the frequency synthesizer in the quantum frequency standard on cesium atoms

E.V. Isupova^{1,a}, A.S. Budnikov^{1,b}, V.V. Davydov^{1,2,3,c}, A.P. Valov², A.A. Petrov⁴

¹Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University. Saint Petersburg 195251, Russia

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

³All-Russian Research Institute of Phytopathology. Moscow Region 143050, Russia

⁴Russian Institute of Radionavigation and Time, Saint Petersburg 192012, Russia

E-mail: ^aisupova.e24@mail.ru, ^bbudnikov.as@edu.spbstu.ru, ^cdavydov_vadim66@mail.ru

A quantum frequency standard is necessary to accurately measure the frequency of oscillations or generate oscillations with a time-stable frequency. An important functional node in the cesium atom frequency standard is the frequency synthesizer. The paper presents a new frequency synthesizer circuit based on the direct digital synthesis method. The advantages and disadvantages of the new signal synthesis method are considered in detail, the differences between this method and others are indicated. The description of the main nodes of the new synthesizer circuit is given. By increasing the bit depth of the accumulating adder, we achieved a

reduction in the step of tuning the output frequency by several orders of magnitude. It is concluded that this method satisfies all the requirements for the parameters of frequency synthesizers.

PACS: 06.20.fb.

Keywords: quantum frequency standard, frequency synthesizer, direct digital synthesis, accumulating adder, frequency tuning, cesium atomic clocks.

Received 19 May 2022.

Сведения об авторах

1. Давыдов Вадим Владимирович — доктор физ.-мат. наук, доцент, профессор; тел.: (812) 494-44-14, e-mail: davydov_vadim66@mail.ru.
 2. Исупова Екатерина Васильевна — студентка; тел.: e-mail: isupova.e24@mail.ru.
 3. Будников Андрей Сергеевич — студент; e-mail: budnikov.as@edu.spbstu.ru.
 4. Александр Анатольевич Петров — инженер-программист; e-mail: alexandrpetrov.spb@yandex.ru.
 5. Антон Петрович Валов — аспирант; e-mail: tony.valov2015@yandex.ru.
-