

УДК 51.082

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ПРЯМОГО ЦИФРОВОГО
СИНТЕЗА ПРИ РАЗРАБОТКЕ СИНТЕЗАТОРОВ ЧАСТОТЫ
ДЛЯ КВАНТОВЫХ СТАНДАРТОВ ЧАСТОТЫ© 2018 г. А. А. Петров^{1,2}, В. В. Давыдов²*, Н. М. Гребенникова²¹ Российский институт радионавигации и времени,
Российская Федерация, Санкт-Петербург, просп. Обуховской Обороны, 120, корп. Е, Ц² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Российская Федерация, 195251 Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29

*E-mail: Davydov_vadim66@mail.ru

Поступила в редакцию 09.04.2018 г.

Рассмотрен новый метод формирования выходного сигнала синтезатора частоты в квантовых стандартах частоты. Показано, что применение нового метода позволяет улучшить в синтезаторе частоты спектральные характеристики выходного сигнала, расширить диапазон выходных частот и уменьшить шаг перестройки выходной частоты. Зафиксировано улучшение стабильности частоты квантового стандарта на атомах цезия-133 более чем на 10%, а также его температурного коэффициента частоты в 2.4 раза.

DOI: 10.1134/S0033849418110086

ВВЕДЕНИЕ

Разработка новых и модернизация действующих конструкций квантовых стандартов частоты (КСЧ), а также реализация на их основе частотно-временных измерений – одно из актуальных направлений радиотехники и электроники [1–5].

В настоящее время существенно расширилась сфера практических применений КСЧ. Сейчас КСЧ используются для решения различных задач – от фундаментальной науки (прецизионная спектроскопия, фундаментальные физические эксперименты, астрофизика и др.) до обеспечения работы навигационных приборов, систем измерения времени, телекоммуникационного оборудования, компьютерных и сотовых сетей [2, 6–13]. Например, только использование КСЧ в качестве опорных генераторов на спутниках позволило решить одну из сложнейших задач (взаимную синхронизацию спутниковых шкал времени с точностью до миллиардных долей секунды) при создании спутниковой системы, обеспечивающей доступное в любой точке Земли глобальное координатно-временное поле [1–5, 11, 14, 15].

В связи с новыми требованиями, предъявляемыми к навигационным системам, в частности определение координат объекта с точностью менее 1 м, необходима разработка новых моделей КСЧ или совершенствование используемых.

Разработка на основе фундаментальных научных исследований и ввод в эксплуатацию новых

моделей КСЧ, например, в которых для стабилизации частоты используется лазерная оптическая накачка или замедление атомных пучков, является важной и актуальной задачей. Но, несмотря на это, поиск решений по улучшению метрологических характеристик существующих конструкций КСЧ на атомах цезия и рубидия также является важным направлением.

Одно из таких решений представлено в данной работе. Предложено использовать метод прямого цифрового синтеза для формирования выходных сигналов синтезатора частоты (СЧ) квантового стандарта.

1. КВАНТОВЫЙ СТАНДАРТ ЧАСТОТЫ
НА АТОМАХ ЦЕЗИЯ-133

Работа КСЧ на атомах цезия-133 основана на принципе подстройки частоты высокостабильного кварцевого генератора по частоте квантового перехода атомов цезия в атомно-лучевой трубке (АЛТ), в реализации которой одну из ключевых ролей играет СЧ [1–3, 11, 14]. Структурная схема КСЧ на атомах цезия – 133 представлена на рис. 1.

Выходной сигнал кварцевого генератора частотой 5 МГц подается на преобразователь частоты (ПЧ). В состав ПЧ входит синтезатор частоты (СЧ), умножитель частоты (УЧ) и генератор гармоник (ГГ). В СЧ входной сигнал с частотой 5 МГц

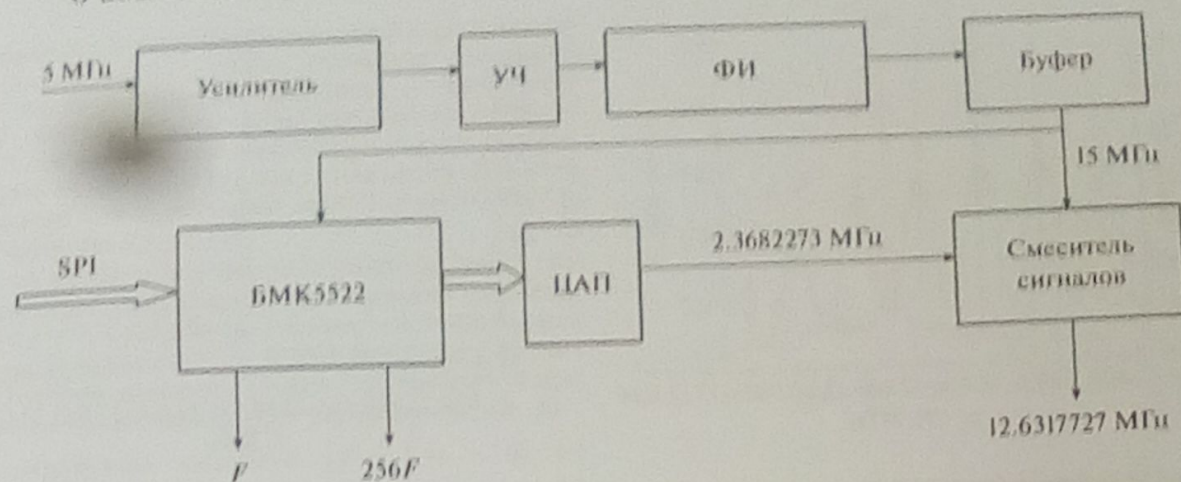


Рис. 2. Структурная схема синтезатора частоты.

Необходимо отметить, что в связи с изменением конструкции СЧ и устранением кварцевого фильтра, имеющего высокую добротность, диапазон перестройки выходной частоты расширен до 1 МГц.

Важной особенностью нового разработанного СЧ является применение алгоритма переадресации входных данных перекодировочной таблицы. Для реализации этого алгоритма в перекодировочной таблице необходимо разместить значения аргумента функции $\sin(x)$ и соответствующие значения функции $\sin(x)$ в интервале $[0; \pi/2]$. Применяя алгоритм переадресации входных данных, мы можем полностью определить значения функции $\sin(x)$ на интервале $[0; 2\pi]$, используя при этом только четвертую часть значений функции $\sin(x)$ для данного аргумента. Это, с одной стороны, позволит уменьшить объем данных, хранящихся в ПЗУ, а с другой – даст возможность увеличить число значений аргумента функции $\sin(x)$, что, в свою очередь, позволит с большей точностью (в четыре раза) определять значения амплитуды функции $\sin(x)$ и, в конечном итоге, сказывается на спектре выходного сигнала СЧ. Нами установлено, что при использовании 12-разрядного кода аргумента функции $\sin(x)$, 10-разрядного ЦАП и применения алгоритма переадресации входных данных достигается наилучшее соотношение спектра выходного сигнала к количеству затраченных ресурсов микросхемы.

По результатам проведенных исследований зафиксировано, что частотное разрешение выходного сигнала СЧ составляет тысячные доли герца при выходной частоте порядка десяти мегагерц [3, 14]. Такое разрешение недостижимо для других методов синтеза частот, которые ранее использовались в КСЧ [1, 2, 4, 7]. В новой разрабо-

танной конструкции шаг перестройки выходной частоты СЧ вычисляется по следующей формуле:

$$\Delta f_{\text{вых}} = f_m / 2^N, \quad (1)$$

где f_m – тактовая частота, N – разрядность аккумулятора фазы.

В случае пересчета $\Delta f_{\text{вых}}$ относительно частоты центрального резонанса атомов цезия f_0 используется следующая формула [1, 2]:

$$\Delta f'_{\text{вых}} = \Delta f_{\text{вых}} / f_0. \quad (2)$$

Для тактовой частоты $f_m = 15$ МГц и разрядности аккумулятора фазы $N = 40$ с использованием (1) и (2) было получено следующее значение $\Delta f'_{\text{вых}} = 1.47 \times 10^{-15}$. Полученный результат в несколько раз меньше по сравнению со значениями, которые получали в ранее используемых конструкциях СЧ.

Необходимо также отметить, что значения параметров сигналов в новой конструкции СЧ были получены при использовании только отечественной элементной базы. Это является в настоящее время одним из основных требований при разработке новых и модернизации действующих конструкций КСЧ.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные нами экспериментальные исследования параметров выходного сигнала новой конструкции СЧ подтвердили полученные ранее данные с использованием моделирования [4, 15], а также показали ее преимущества в работе по сравнению с ранее используемыми СЧ.

На рис. 3 и 4 в качестве примера представлен спектр выходного сигнала ранее используемой

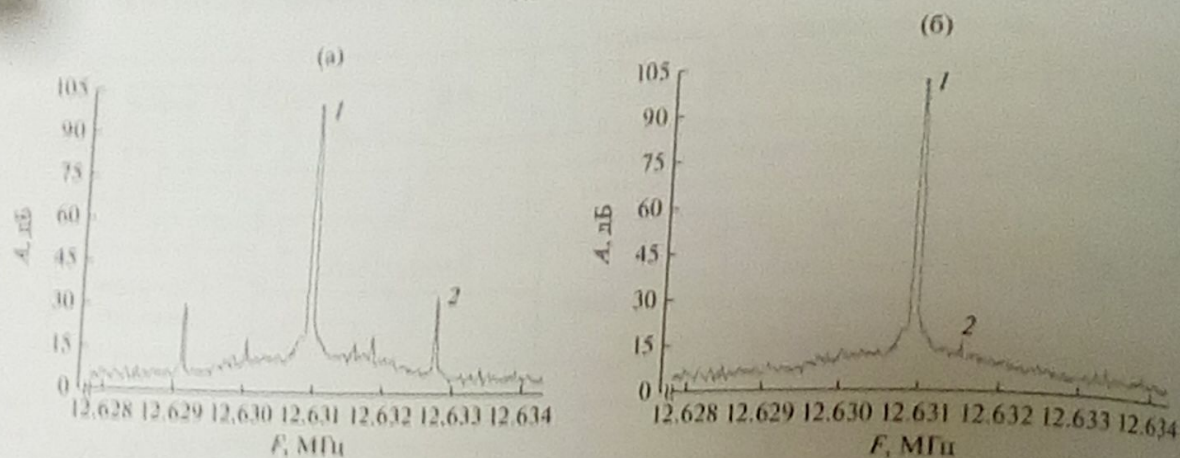


Рис. 3. Спектральные характеристики выходного сигнала синтезатора частоты с подавлением боковых амплитудных составляющих в полосе регистрации 6 кГц для ранее используемой (а) и разработанной нами (б) конструкции СЧ. Отмечены максимумы амплитуд полезного сигнала (1) и боковых составляющих (2).

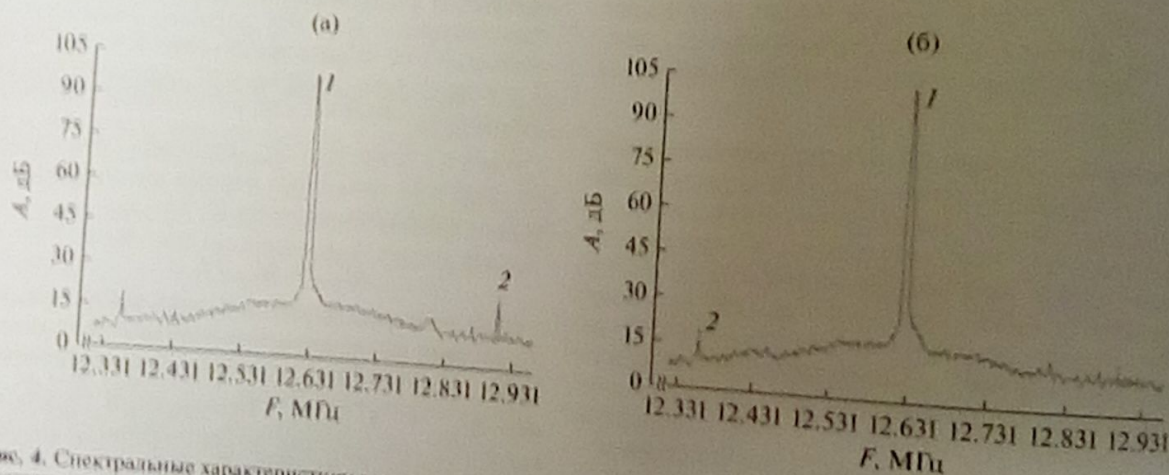


Рис. 4. Спектральные характеристики выходного сигнала синтезатора частоты с подавлением боковых амплитудных составляющих в полосе регистрации 600 кГц для ранее используемой (а) и разработанной нами (б) конструкции СЧ. Отмечены максимумы амплитуд полезного сигнала (1) и боковых составляющих (2).

конструкции синтезатора (а) и разработанной нами (б). Спектр измерен в полосе регистрации 6 и 600 кГц.

Полученные экспериментальные результаты показывают, что подавление комбинационных составляющих в спектре сигнала СВЧ-возбуждения в полосе регистрации 6 кГц улучшено на 18 дБ, а в полосе регистрации 600 кГц — на 3 дБ.

Одним из отличий разработанной нами конструкции СЧ от используемой ранее является отсутствие в ней кварцевого фильтра. Кварцевый фильтр при хорошей частотной избирательности имеет высокую температурную зависимость выходной частоты. При его отсутствии уровень подавления комбинационных составляющих незна-

чительно улучшился, а температурно-зависимых элементов стало меньше.

Проведенные исследования работы КСЧ с новой конструкцией СЧ на основе метода прямого цифрового синтеза показали улучшение температурного коэффициента частоты (ТКЧ) КСЧ в 2,4 раза по сравнению с ранее используемыми конструкциями КСЧ. Полученное значение ТКЧ составило $3,440 \times 10^{-14} 1/^\circ\text{C}$.

По результатам экспериментальных исследований было установлено, что дисперсия Аллана выходного сигнала КСЧ с СЧ на основе метода прямого цифрового синтеза улучшена на 10% по сравнению с ранее полученным значением дисперсии Аллана выходного сигнала КСЧ с СЧ предыдущей конструкции.

Кроме того, использование новой конструкции синтезатора частоты также позволяет устранить один из влияющих факторов — частотный сдвиг, связанный с нестабильностью магнитного поля (или С-поля), необходимого для расщепления сверхтонкой структуры атома цезия. Данный частотный сдвиг ухудшает долговременную стабильность частоты КСЧ.

Атом цезия в основном состоянии имеет два сверхтонких подуровня с квантовыми числами $F=4$ и $F=3$, которые расщепляются в магнитном поле на 16 компонентов. В соответствии с правилами отбора возможны семь переходов между компонентами сверхтонких подуровней (рис. 5).

Центральный резонанс $|F=3, m_f=0\rangle \leftrightarrow |F=4, m_f=0\rangle$, возникающий из-за эффекта Зеемана, испытывает квадратичный сдвиг частоты. Для значения магнитного поля, равного $B = 6 \times 10^{-6}$ Тл, частотный сдвиг составляет $\Delta f_B = 1.5388$ Гц или в относительном выражении $\Delta f_B/f = 1.67 \times 10^{-10}$.

Необходимо отметить, что частотный сдвиг испытывает не только центральный резонанс, но и все остальные шесть переходов $(3, m_f) \leftrightarrow (4, m_f)$, для которых $\Delta m_f = 0$. Эти сдвиги влияют на точность выходного сигнала стандарта частоты, ухудшая его метрологические характеристики.

В теории данные сдвиги частот можно учесть при расчете функциональной зависимости изменения энергии атомов в основном состоянии E от значения магнитного поля и атомных констант с помощью уравнения Брайта–Раби [6]:

$$E(F, m_f) = -\frac{h\nu}{2(2I+1)} - g_I \mu_B B m_f + \epsilon \frac{h\nu}{2} \left(1 + \frac{4m_f}{2I+1} x + x^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

где I — квантовое число ядерного спина; g_I — фактор Ланде для электрона; μ_B — магнетон Бора; B — величина магнитного поля; m_f — магнитные квантовые числа; $x = \frac{(g_I + g_J) \mu_B B}{h\nu}$.

Однако на практике при любых изменениях магнитного поля происходят сдвиги частот резонансов, значения которых в (3) учесть заранее невозможно.

Использование новой конструкции СЧ в отличие от ранее используемой позволяет осуществлять подстройку величины магнитного поля по соседнему резонансному переходу $|F=3, m_f=1\rangle \leftrightarrow |F=4, m_f=1\rangle$. Использование этой дополнительной подстройки в комбинации с основной по центральному максимуму позволяет поддерживать заданное значение магнитного поля внутри

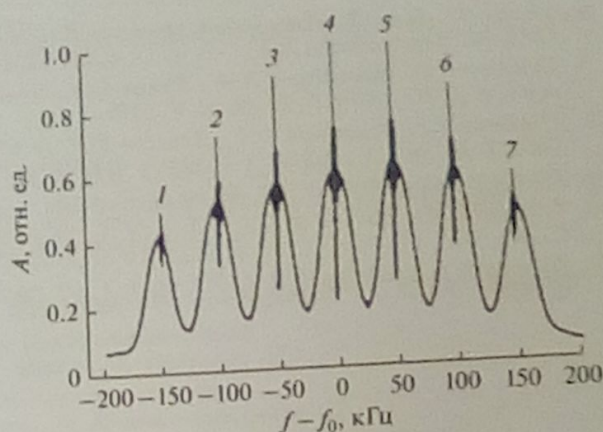


Рис. 5. СВЧ-резонансы в цезиевой атомно-лучевой трубке. Максимум (пик) 1 соответствует переходу $(F=3, m_f=-3) \leftrightarrow (F=4, m_f=-3)$; максимум 2 — $(F=3, m_f=-2) \leftrightarrow (F=4, m_f=-2)$; максимум 3 — $(F=3, m_f=-1) \leftrightarrow (F=4, m_f=-1)$; максимум 4 — $(F=3, m_f=0) \leftrightarrow (F=4, m_f=0)$; максимум 5 — $(F=3, m_f=1) \leftrightarrow (F=4, m_f=1)$; максимум 6 — $(F=3, m_f=2) \leftrightarrow (F=4, m_f=2)$; максимум 7 — $(F=3, m_f=3) \leftrightarrow (F=4, m_f=3)$.

АЛТ постоянным. В ранее используемых конструкциях КСЧ алгоритм подстройки магнитного поля отсутствовал.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты исследований показали, что новая конструкция СЧ в КСЧ улучшает ТКЧ КСЧ в 2.4 раза, а дисперсию Аллана выходного сигнала КСЧ более чем на 10% по сравнению с ранее используемыми конструкциями.

Расширение диапазона получаемых частот выходного сигнала с использованием новой конструкции СЧ позволяет реализовать алгоритм подстройки среднего поля КСЧ для улучшения его долговременной стабильности частоты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дудкин В.И., Пахомов Л.Н. Квантовая электроника. СПб: Изд-во Политех. ун-та, 2012.
2. Рале Ф. Стандарты частоты. Принципы и применения. М.: Физматлит, 2009.
3. Petrov A.A., Davydov V.V., Myazin N.S., Kaganovskiy V.E. // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 2017. V. 10531 LNCS. P. 561.
4. Petrov A.A., Davydov V.V. // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 2015. V. 9247. P. 739.
5. Барышев В.Н., Купалов Д.С., Новоселов А.В. и др. // Измерит. техника. 2016. № 12. С. 33.

6. Одуан К., Гино Б. Измерение времени. Основы GPS. М.: Техносфера, 2002.
7. Семенов В.В., Никифоров Н.Ф., Ермак С.В., Давыдов В.В. // РЭ. 1990. Т. 35. № 10. С. 2179.
8. Павельев А.Г., Матюгов С.С., Яковлев А.И. // РЭ. 2008. Т. 53. № 9. С. 1081.
9. Пахомов А.А. // РЭ. 2007. Т. 52. № 10. С. 1209.
10. Горгадзе С.Ф., Бойков В.В. // РЭ. 2014. Т. 59. № 3. С. 264.
11. Петров А.А., Давыдов В.В. // РЭ. 2017. Т. 62. № 3. С. 300.
12. Karaulanov T.S., Graf M.T., English D.P. et al. // Phys.Rev. A. 2009. V. 79. № 1. P. 012902.
13. Соколов С.В., Каменский В.В., Ковалев С.М., Тищенко Е.Н. // Измерит. техника. 2017. № 1. С. 19.
14. Petrov A.A., Davydov V.V. // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. V. 769. № 1. P. 012065.
15. Petrov A.A., Vologdin V.A., Davydov V.V., Zalyotov D.V. // J. Phys.: Conf. Ser. 2015. V. 643. № 1. P. 012087.
16. Рудико Л.И. // Компоненты и технологии. 2001. № 7. С. 76.