ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

YIK 53.082

свма

офи-

тен-

¥ 5.

M

MV-

an /

oka.

He-

ма-

32

О ВОЗМО КНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ПРЯМОГО ЦИФРОВОГО СИНТЕЗА ПРИ РАЗРАБОТКЕ СИНТЕЗАТОРОВ ЧАСТОТЫ ДЛЯ КВАНТОВЫХ СТАНДАРТОВ ЧАСТОТЫ

© 2018 г. А. А. Петров^{1, 2}, В. В. Давыдов^{2, *}, Н. М. Гребенникова²

¹ Российский институт радионавигации и времени, Российская Федерация, Санкт-Петербург, просп. Обуховской Обороны, 120, корп. Е.Ц ² 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 действуюших 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 КЧС. 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.

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

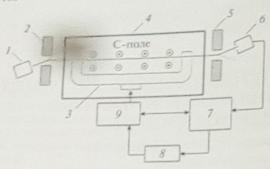


Рис. 1. Структурная схема стандарта частоты на атомах 133Cs: 1 - цезиевая печь; 2 - магнит-поляризатор; 3 – резонатор Рэмси; 4 – магнитный экран; 5 – магнит-анализатор; 6 - фотодетектор, 7 - блок автоматической подстройки частоты; 8 - кварцевый генератор, 9 - преобразователь частоты.

преобразуется в сигнал с частотой 12.6317727 МГи. В УЧ входной сигнал с частотой 5 МГц преобразуется в сигнал с частотой 270 МГц. Сформированные в СЧ и УЧ сигналы поступают на ГГ, выполняющий функцию "умножения" двух сигналов. В результате формируется ряд комбинационных частот, в том числе частота, равная 9.1926317727 ГГц, которая и используется в работе КСЧ. Далее СВЧ-сигнал с частотой 9.1926317727 ГГц по волноводному тракту поступает на волноводный вход АЛТ, в которой он взаимодействует с атомами цезия.

Атомы цезия перед взаимодействием с СВЧполем в АЛТ подготавливаются с помощью магнита поляризатора: они находятся на уровне либо F = 4, $m_f = 0$, либо F = 3, $m_f = 0$. Взаимодействие с СВЧ-полем вызывает их переходы на соответствующий незаселенный уровень. Измеряя населенность этого уровня после взаимодействия, можно определить частоту СВЧ-поля, при которой вероятность перехода оказывается максимальной. Эта частота корректируется с учетом эффектов, приводящих к ее сдвигу относительно частоты невозмущенного перехода.

Сканирование частоты СВЧ-поля вблизи частоты атомного резонанса f_0 приводит к возникновению сигнала на токовом летекторе. Спектральная линия регистрируемого сигнала состоит из интерференционных полос резонанса Рэмси на широком пьедестале Раби [1, 2, 5, 12].

Частота кварцевого генератора стабилизируется относительно максимума центральной полосы, что соответствует частоте атомного перехода При расстройке частоты КГ и, следовательно, частоты сигнала СВЧ-возбуждения относительно значения, соответствующего частоте атомного перехода f_0 , в АЛТ вырабатывается сигнал ошибки, который несет информацию о величине рас-

стройки. Для определения знака расстройки частройки. Для определения относительно сигнала СВЧ-возбуждения относительно стоты сигнала осуществляется частотная модуляция значения f_0 осуществляется частотой 12 6317773 выходного сигнала СЧ частотой 12.6317727 Мг низкочастотным сигналом прямоугольной фор. мы типа меандр. Параметры сигнала ощибки исмы типа ментемой автоматической подстрой. пользуются (АПЧ) для того, чтобы изменять управляющее напряжение на КГ пропорционально уходу частоты от номинального значения

Основная функция СЧ в работе КСЧ - это формирование сигнала с частотой 12.6317727 МГц, необходимого для формирования СВЧ-сигнала с частотой перехода атомов цезия. Кроме того, Су формирует низкочастотные сигналы, используюшиеся в работе системы АПЧ КСЧ.

PAC L CITIZETY P

AND STATE OF THE PARTY OF

I STREET, KEAPLE

AND ANDOTHOCTA

susceed survitie pack

AND STATE PERSONS

west in person raped

and the property lies

of the latter is to passed

SECTION AND THE SEC

CAME OF E CONTROLLED

OF REAL PROPERTY.

WHEN THE PERSON BROTHLY

SECURITY STREET, SHE

ME I STREET N TO MICH

ma such appears. Ito, o

WHEN WHEN WHEN I

DINCOS TAG - BOTH COM

THE RESERVE OF SERVERSE OF

COMPRESENT & B

PER PREVIOUS

STATE OF THE PERSON NAMED IN

act and moreon cours

THE P IS NOTICE.

of their plants

SOLD SECTION STATES

TO SHIP BOOK ANTHON

MONTH STORY STORY

STATE STATE OF THE PARTY OF THE

O SPECIAL MICH

of the second

THE PARTY SACRE

The Part of the Pa

Control of the second

Проведенные нами эксперименты показали что, в частности, без улучшения параметров выходных сигналов СЧ достаточно сложно улучшить точностные характеристики КСЧ.

2. КОНСТРУКЦИЯ СИНТЕЗАТОРА частоты на основе метола прямого цифрового синтеза

Среди существующих методов синтеза частог метод прямого цифрового синтеза (Direct Digital Synthesis, DDS) имеет существенные преимущества Так как генерируемый им сигнал синтезируется со свойственной шифровым системам точностью, то частота, амплитуда и фаза сигнала в любой момент времени точно известны и подконтрольны. Особенно необходимо отметить, что DDS практически не подвержены температурному дрейфу и старению (подробнее см. [16]).

На рис. 2 представлена структурная схема новой конструкции синтезатора частоты, разработанной с использованием метода прямого цифрового синтеза. Входной сигнал частотой 5 МГп от кварцевого генератора поступает через усилитель на умножитель частоты (УЧ), в котором преобразуется в сигнал с частотой 15 МГц. Далее в блоках формирователя импульсов (ФИ) и буфера из этого синусоидального сигнала происходит формирование меандра той же частоты. Этот сигнал является тактовым сигналом для базового-матричного кристалла (БМК) и цифро-аналогового преобразователя (ЦАП). По последовательному интерфейсу передачи данных (SPI) в БМК загружается код необходимой нам частоты. В результате преобразований этого кода частоты в соответствии с [16] на выходе БМК формируется цифровая последовательность отсчетов амплитуды функции sin(x). которая поступает на ЦАП. С выхода ЦАП синусоидальный сигнал через фильтр нижних частот, поступает на вход смесителя сигналов, а с его выхода преобразованный сигнал с частогой 12.6317727 МГц поступает на вход ПЧ (см. рис. I).

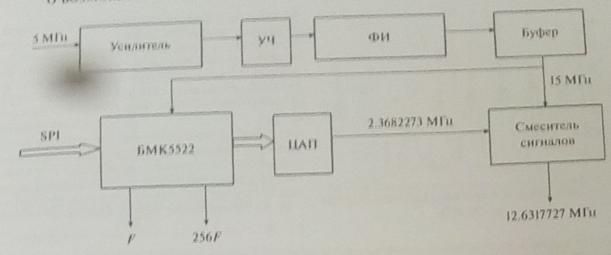


Рис. 2. Структурная схема синтезатора частоты.

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

11 110

Ablig

лица МГа фор.

DON.

HHILL

A/III

bop. He.

C4

BLI.

144-

TOT

gital

TBa.

SI CO

, TO

CHT

)co-

14C-

у и

HO-

160-

po-

I OT

сль

ipa-

Kax

гого

ова-

ется

ри-

DBH"

HCY

кол

opa-

[16]

SHO-

 $\eta(x)$.

IHY-

TOT.

ero

oron

Важной особенностью нового разработанного СЧ является применение алгоритма переадресаши 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; 2π], используя при этом только четвертую часть значений функшии sin(x) для данного аргумента. Это, с одной стороны, позволит уменьшить объем данных, храняшихся 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 кола аргумента функции sin(x), 10-разрядного ЦАП и применения алгоритма переалресации 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 лесяти мегатерц [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:

$$\Delta f_{\text{mix}} = f_m / 2^N \,, \tag{1}$$

где f_{τ} — тактовая частота, N — разрядность аккумулятора фазы.

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

$$\Delta f'_{\text{max}} = \Delta f_{\text{max}} / f_{\text{p}}. \tag{2}$$

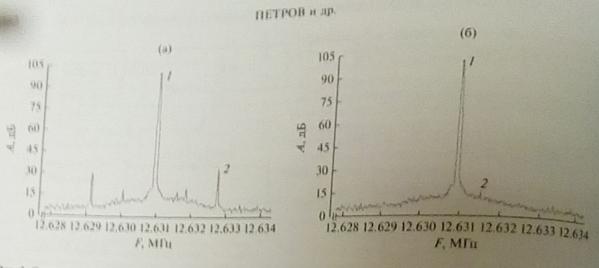
Для тактовой частоты $f_{\gamma} = 15$ МГц и разрядности аккумулятора фазы N = 40 с использованием (1) и (2) было получено следующее значение $\Delta f_{\text{вых}} = 1.47 \times 10^{-15}$. Полученный результат в несколько раз меньше по сравнению со значениями, которые получали в ранее используемых конструкциях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

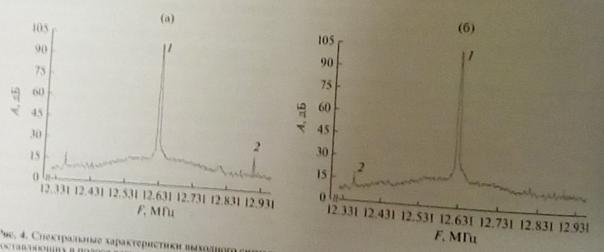
3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

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 синтемтора частоты с подавлением боковых амилитулных составляющих в полосе регистрации 6 кГц для ранее используемой (а) и разработанной нами (б) конструкции СЧ. Отмочены макенмумы ампентул полезного сигнала (1) и боковых составляющих (2).



Рыс, 4. Снектральные характеристики выходного сигнала синтезатора частоты с подавлением боковых амплитудных Гис. 4. Спектральные зарактеры пака подоставля общей выпоставление подавлением осковых амплитурального ставляющих в полосе регистрации 600 кГ и для ранее используемой (а) и разработанной нами (б) конструкции СЧ. Отмечены максимумы амплитул полезного сигнала (1) и боковых составляющих (2).

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

Полученные экспериментальные результаты показывают, что подавление комбинационных составляющих в спектре сигнала СВЧ-возбуждения в полосе регистрации 6 кГи 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 незначительно улучшился, а температурно-зависимых элементов стало меньше.

1721

True !

ax Is

RITER

S stopes 3

A TONI WITH

Talle.

DI-WEST

a particular

COS WIE

CONTROLL OF

Per u da

Section (SEE 14)

NA PROPERTY

Now You are see

Проведенные исследования работы КСЧ с новой конструкцией СЧ на основе метода прямого инфрового синтеза показали улучшение температурного коэффициента частоты (ТКЧ) КСЧ в 2.4 раза по сравнению с ранее используемыми конструкция с тку конструкциями КСЧ. Полученное значение ТКЧ составило 3.440 × 10⁻¹⁴ 1/°С.

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

Кроме того, использование новой конструкции синтемпор тоты также позволяет устранить ающих факторов — частотный сдвиг, связанный с нестабильностью магнитного поля (или С-поля), необходимого для расщепления сверхтонкой структуры атома цезия. Данный частотный сдвиг ухудщает 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 едвиг частоты. Для значения магнитного поля, равного $B=6\times 10^{-6}$ Тл, частотный едвиг составляет $\Delta f_{g^2}=1.5388$ Гц или в относительном выражении $\Delta f_{g^2}/f=1.67\times 10^{-10}$.

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]:

$$E(F, m_F) = -\frac{hv}{2(2I+1)} - \frac{hv}{2(2I+1)} - g_I \mu_B B m_F + \varepsilon \frac{hv}{2} \left(1 + \frac{4m_F}{2I+1} x + x^2\right)^{\frac{1}{2}},$$
(3)

где I — квантовое число ядерного спина; g_I — фактор Ландэ для электрона; μ_B — магнетон Бора; B — величина магнитного поля; m_F — магнитные

величина магнитного полк, му квантовые числа;
$$x = \frac{(g_j + g_I)\mu_B B}{hv}$$
. Однако на практике при любь

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 резонаисному 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

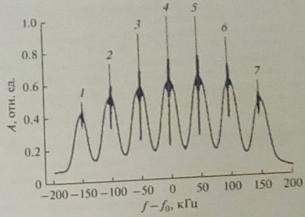


Рис. 5. СВЧ-резонансы в цезиевой атомно-лучевой трубке. Максимум (пик) I соответствует переходу $(F=3;m_f=-3) \leftrightarrow (F=4;m_f=-3);$ максимум $2-(F=3,m_f=-2) \leftrightarrow (F=4;m_f=-2);$ максимум $3-(F=3,m_f=-1) \leftrightarrow (F=4;m_f=-1);$ максимум $4-(F=3;m_f=0) \leftrightarrow (F=4;m_f=0);$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

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.
- Риле Ф. Стандарты частоты. Принципы и применения. М.: Физматлит, 2009.
- 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.
- 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.
- Барышев В.Н., Купалов Д.С., Новоселов А.В. и др. // Измерит. техника. 2016. № 12. С. 33.

33 12.634

лиулод и СЧ. От.

11 12.931

литудных кции СЧ.

зависимы

КСЧ с нода прямого де темпера-Ч) КСЧ в пьзуемыми чение ТКЧ

и исслеановия Аллана ове метова и на 10% по ением лиский ССЧ с С

11 2018

- 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. No 1. P. 012902.
- Соколов С.В., Каменский В.В., Ковалев С.М., Тищенко Е.Н. // Измерит. техника. 2017. № 1. С. 19.
- Petrov A.A., Davydov V.V // J. Phys.: Conf. Ser. 2016.
 V. 769. № 1. P. 012065.
- Petrov A.A., Vologdin V.A., Davydov V.V., Zalyotov D.V. // J. Phys.: Conf. Ser 2015. V. 643. № 1. P. 012087.
- Ридико Л.И. // Компоненты и технологии. 2001. № 7. С. 76.

