

**Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого
Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций**

На правах рукописи

Петров Александр Анатольевич

**Методы улучшения метрологических характеристик квантовых
стандартов частоты с лазерной накачкой**

Направление подготовки 03.06.01 Физика и астрономия

Код и наименование

Направленность 03.06.01_11 Лазерная физика

Код и наименование

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах научно-квалификационной работы
(диссертации)

Автор работы: Петров А.А.

Научный руководитель:
профессор, д.ф.-м.н., Дудкин В.И.

Санкт Петербург – 2018

Научно-квалификационная работа выполнена в Высшей школе прикладной физики и космических технологий на кафедре Института физики, нанотехнологий и телекоммуникаций федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Директор ВШ:



– *Величко Елена Николаевна,*
к.т.н., доцент

Научный руководитель:



– *Дудкин Валентин Иванович,*
д.ф.-м.н., профессор,
СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

Рецензент:



– *Буляница Антон Леонидович,*
д.ф.-м.н., с.н.с.
вед. научн. сотрудник ИАП РАН

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Научно-техническому прогрессу и интегрированной мировой экономике требуется постоянная передача и обобщение результатов различных измерений, полученных в различных точках Земли, в общую систему данных и наоборот, с очень высокой скоростью.

Наибольшей точностью и надежностью среди источников опорных колебаний, используемых для измерения времени, обладают квантовые стандарты частоты (КСЧ).

Используемые в настоящее время КСЧ находят массовое применение в различных телекоммуникационных, спутниковых, информационных системах, играют огромную роль в науке и технике.

В связи с развитием научно технического прогресса к КСЧ начинают предъявляться все более жесткие требования по метрологическим и эксплуатационным характеристикам.

Учитывая высокую значимость КСЧ в жизни общества и их обширное практическое применение – разработка с использованием новых физических принципов, в частности применения лазеров с целью оптической накачки, а также модернизация действующих конструкций КСЧ является одной из важных и актуальных задач.

Цель и задачи исследования

Целью научного исследования является модернизация синтезатора частоты, являющегося одним из основных структурных узлов конструкции КСЧ с лазерной накачкой, проводимой для улучшения метрологических характеристик.

Задачи научного исследования:

- Выбор направления модернизации конструкции синтезатора частоты (СЧ), используемой в КСЧ;
- Определение метода для разработки СЧ с учетом особенностей применения СЧ в составе КСЧ;
- Разработка схемы СЧ, расчет её параметров и моделирование режимов работы;

- Изготовление опытного макета СЧ с учетом результатов расчета и моделирования, исследование режимов работы СЧ в различных температурных и климатических условиях;
- Исследование работы КСЧ с лазерной накачкой с новой конструкцией СЧ и сравнение полученных результатов с полученными ранее;
- Выработка рекомендаций по выбору направлений и методов для дальнейшего совершенствования конструкции КСЧ.

Научная новизна

Научная новизна работы заключается в следующем: проведены экспериментальные исследования режимов работы КСЧ с лазерной накачкой с новой конструкцией СЧ. Получены новые результаты необходимые для дальнейшего совершенствования конструкции КСЧ.

Теоретическая и практическая значимость

Предложен метод расчета параметров синтезатора частоты и предложена методика проверки их достоверности на основе математического моделирования режимов работы СЧ. Результаты моделирования совпали с экспериментальными исследованиями режимов работы СЧ. Использование конструкции разработанного СЧ в составе КСЧ позволило улучшить метрологические и эксплуатационные характеристики стандарта.

Апробация работы

Основные результаты научного исследования докладывались и обсуждались на различных конференциях: Международных молодежных научных форумах «ЛОМОНОСОВ-2015», «ЛОМОНОСОВ-2017», «ЛОМОНОСОВ-2018» (Москва, 2015 г., 2017 г., 2018 г.), 2-ой Международной школе-конференции «The 2st International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures «Saint – Petersburg OPEN 2015» (Санкт-Петербург, 2015 г.), Международной научно-технической и научно-методической конференции «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании «АПИНО-2018» (Санкт-Петербург, 2018 г.), 18-ой международной конференции 18th International Conference on Laser Optics «ICLO 2018» (Санкт-Петербург, 2018 г.), 18-ой международной конференции «The 18th International Conference, NEW2AN 2018 and 11th Conference, ruSmart 2018 «Internet of Things, Smart

Spaces and Next Generation Networks and Systems» (Санкт-Петербург, 2018 г.).

Публикации

Основные результаты научно-квалификационной работы опубликованы в 9 печатных работах, в том числе 3 в журналах, рекомендованных ВАК.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1954 год можно считать годом рождения практической квантовой электроники, когда в СССР Н. Г. Басовым и А. М. Прохоровым и почти одновременно в США Ч. Таунсом, Д. Гордоном, Х. Цайгером были разработаны и испытаны первые квантовые устройства – генераторы на пучках молекул аммиака.

Это открытие положило начало развитию теории квантовых приборов и созданию различных конструкции квантовых стандартов частоты (КСЧ) – устройств, формирующих с наибольшей точностью по сравнению с генераторами других типов физическую единицу измерения времени и частоты.

Физическая единица измерения частоты – герц (Гц) – определяется как частота периодического процесса, период которого равен одной атомной секунде. Атомная секунда определяется в настоящее время как интервал времени, в течение которого совершается 9 192 631 770 колебаний, соответствующих резонансной частоте энергетического перехода между уровнями сверхтонкой структуры основного состояния атома цезия-133, при отсутствии внешних воздействий.

Единицы измерения времени хранятся и воспроизводятся эталонами и образцовыми стандартами времени и частоты. Образцовым называют стандарт частоты, имеющий установленную точность и служащий для практических работ по поверке и градуировке стандартов частоты и частотно-измерительных приборов более низкой точности, официально утвержденный в качестве образцового метрологическими органами.

Наряду с увеличением типов источников высокостабильных колебаний улучшались и их качественные показатели, в частности стабильность частоты. По мере развития отдельных типов высокостабильных источников колебаний они использовались в эталонах частоты и времени в качестве

устройств, формирующих колебательный периодический процесс с типовыми значениями частоты.

Не смотря на то, что классические схемы КСЧ на атомах цезия и рубидия в значительной степени приблизились по своим параметрам к предельно достижимым значениям, дальнейшее совершенствование традиционных образцовых мер частоты в плане улучшения их метрологических и эксплуатационных характеристик на сегодняшний день является важной и актуальной задачей.

Кроме этого, в последнее время стало востребованным новое направление квантовой стабилизации частоты, связанное с использованием лазеров для целей оптической накачки и замедления атомных пучков. Ожидается, что использование новых физических принципов позволит удовлетворить новым требованиям, предъявляющимся к КСЧ в связи с бурным развитием научно технического прогресса.

На сегодняшний день существуют различные конструкции КСЧ с использованием лазеров: КСЧ на атомах рубидия-87 с лазерной накачкой, КСЧ на атомах рубидия-87 с импульсной лазерной накачкой, КСЧ на атомах цезия-133 с лазерной накачкой и детектированием и др.

Главным преимуществом использования лазеров является узкий спектр излучения, обеспечивающий более эффективную оптическую накачку.

Более подробно рассмотрим принцип работы КСЧ на атомах цезия с лазерной накачкой и детектированием и отметим принципиальные отличия от схемы КСЧ с магнитной селекцией. На рис.1 представлена структурная схема такого КСЧ.

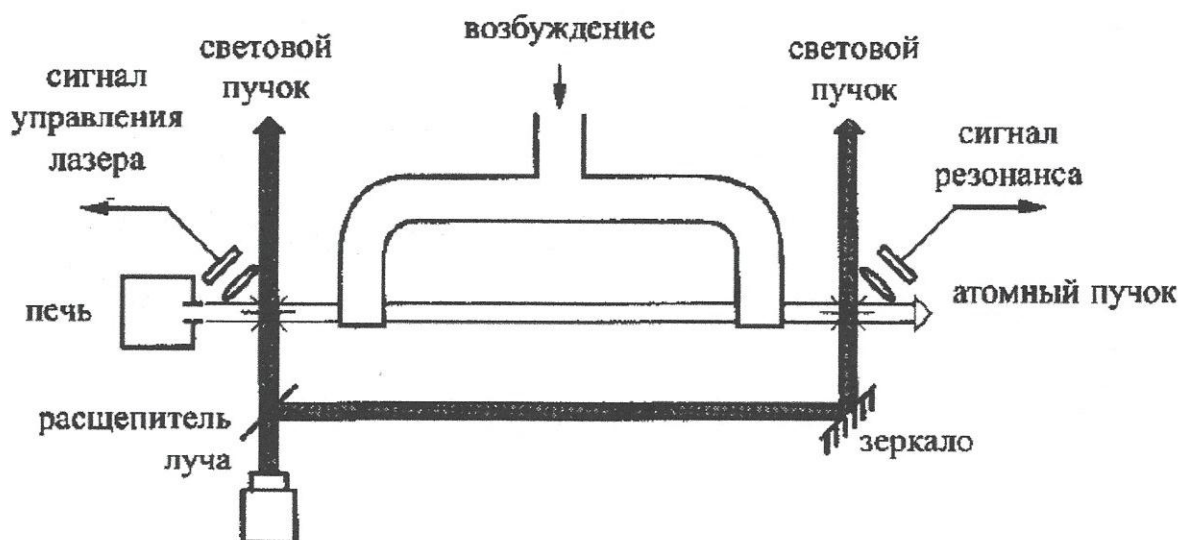


Рис.1. Структурная схема КСЧ на атомах цезия-133 с лазерной накачкой и детектированием.

Как и в классической структурной схеме, здесь присутствует цезиевая печь, которая формирует пучок атомов цезия. Также присутствует резонаторная полость с двумя зонами взаимодействия. Сигнал СВЧ-возбуждения создается методами, аналогичными классической схеме КСЧ, обработка сигнала резонанса и подстройка по нему частоты кварцевого генератора, также производится по известному алгоритму.

Принципиальное отличие от классической схемы КСЧ является отсутствие селектирующих магнитов и наличия лазерного излучения создающего оптическую накачку и детектирование вместо них.

Единственный стабильный изотоп атома цезия-133 имеет квантовое число ядерного спина, равное $I=7/2$. Учитывая, что квантовое число полного момента электронной оболочки составляет $J=1/2$, атом цезия в основном состоянии имеет два сверхтонких подуровня с квантовыми числами $F=I+J=4$ и $F=I-J=3$, которые расщепляются в магнитном поле на 9 ($+4 \leq m_f \leq -4$) и 7 ($+3 \leq m_f \leq -3$) компонентов соответственно, как показано на рис. 2.

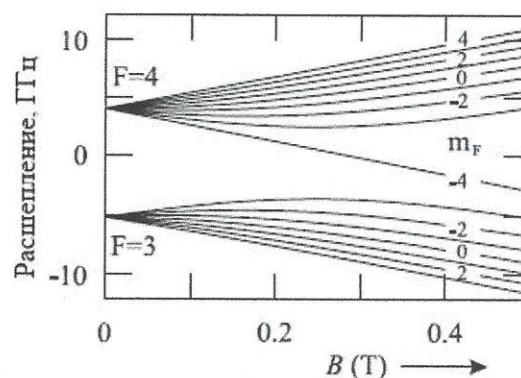


Рис. 2. Энергии магнитных компонентов сверхтонких подуровней с $F=3$ и $F=4$ уровня $6s^2S_{1/2}$ в атоме цезия-133 в зависимости от магнитного поля.

В классической схеме КСЧ, в результате магнитной селекции, в зоне взаимодействия с полем резонатора участвуют лишь атомы, находящиеся в основном состоянии с проекцией полного момента атома $m_F = 0$ сверхтонкого подуровня $F=3$ или атомы, находящиеся в основном состоянии с проекцией полного момента атома $m_F = 0$ сверхтонкого подуровня $F=4$.

Как видно из вышесказанного, в цезиевых атомно-лучевых стандартах, использующих классическую схему селекции вклад в наблюдаемый сигнал вносит лишь 1/16 часть атомного пучка (около 6 %), поскольку все магнитные подуровни, энергетический зазор между которыми лежит в области сантиметрового диапазона длин волн, заселены при комнатных температурах практически одинаково.

Применение лазерной оптической накачки позволяет существенно увеличить населенность одного из двух основных состояний.

Лазерный пучок, в схеме, представленной на рис.1, разделяется на две части с помощью полупрозрачного зеркала. Полученные таким образом пучки лазерного излучения пересекают пучок атомов цезия-133 с каждой стороны резонаторной полости. В зоне их пересечения создается магнитное поле, которое способствует расщеплению сверхтонкой структуры атомов цезия-133.

Селекция состояний происходит в первой зоне оптического взаимодействия. В результате такого взаимодействия атомы цезия переводятся с одного уровня сверхтонкой структуры основного состояния, т.е. $F=3$ или $F=4$, на другой.

В случае, изображенном на рис.3а, лазерное излучение с длиной волны $\lambda=852,355$ нм возбуждает переходы между подуровнями сверхтонкой структуры основного и возбужденного состояний с $F=4$ и $F'=3$ соответственно.

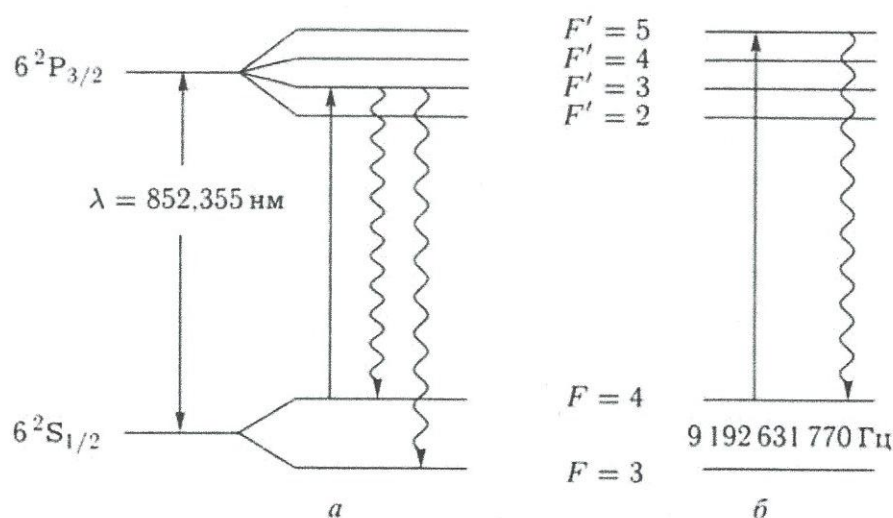


Рис.3. Одна из схем оптической накачки атома цезия-133.

Атомы, возбужденные в состояние с $F'=3$, имеющее время жизни около 30 нс, спонтанно распадаются на сверхтонкие подуровни основного состояния с $F=3$ и $F=4$. Через несколько циклов возбуждения-излучения вся населенность окажется перекачана с уровня $F=4$ на уровень с $F=3$, который не взаимодействует с излучением накачки. В таком случае разность населенностей между уровнями $F=3$ и $F=4$ равна 13% от числа всех атомов, выпущенных изначально из цезиевой печи.

После пролета через микроволновый резонатор, часть атомов оказывается в состоянии с $F=4$. Для определения числа таких атомов, необходимо зарегистрировать фотоны люминесценции, используя лазерное излучение, настроенное на переход $F=4 \rightarrow F'=5$, рис. 3б. Переход $F=4 \rightarrow$

$F'=5$ является циклическим, поскольку атомы, возбужденные в состояние $F'=5$, могут распадаться только на сверхтонкий компонент основного состояния с $F=4$. Таким образом, процесс возбуждения и испускания фотонов происходит многократно и каждый атом испускает большое количество фотонов (пропорционально интенсивности падающего излучения и продолжительности взаимодействия), что позволяет наблюдать достаточно большой сигнал радиооптического резонанса.

Как уже говорилось ранее, алгоритм обработки полученного сигнала, как и процесс формирования СВЧ-сигнала возбуждения мало отличается от тех, которые применяются в классических схемах.

В целом, работа КСЧ на атомах цезия с лазерной накачкой и детектированием основана на принципе подстройки частоты высокостабильного кварцевого генератора по частоте квантового перехода атомов цезия.

При рассмотрении физических процессов, проходящих в цезиевой трубке с оптической накачкой, необходимо обратить внимание на зависимость частоты СВЧ - резонансов от приложенного магнитного поля, в котором и происходит расщепление двух сверхтонких подуровней с квантовыми числами $F=4$ и $F=3$ на 16 компонент. В соответствии с правилами отбора возможны 7 переходов между компонентами сверхтонких подуровней, которые представлены на рис.4. Данная зависимость может привести к непрогнозируемому сдвигу частоты центрального резонанса (в зависимости от приложенного магнитного поля), ухудшив тем самым метрологические характеристики КСЧ. Поэтому данному явлению необходимо уделить пристальное внимание.

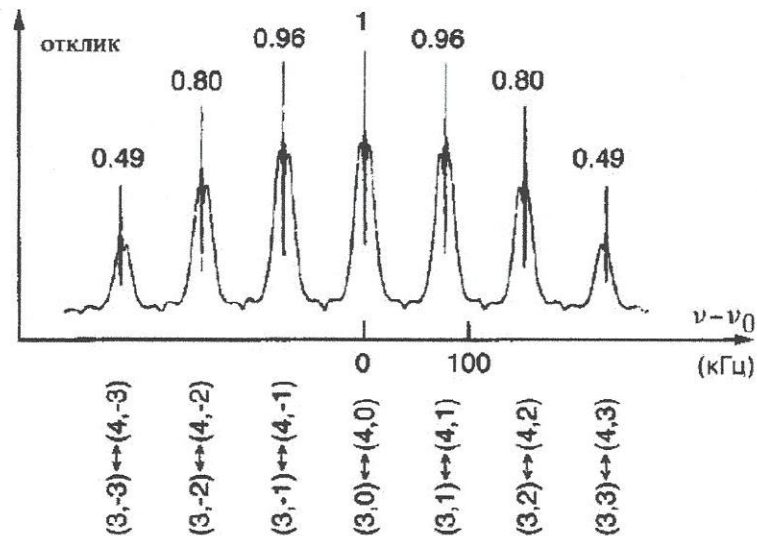


Рис.4. СВЧ-резонансы в цезиевой трубке с оптической накачкой.

В присутствии постоянного магнитного поля, частотный сдвиг испытывает не только центральный резонанс, но и все остальные 6 переходов $(3, m_f) \leftrightarrow (4, m_f)$, для которых $\Delta m_f = 0$. Чтобы выразить эти сдвиги в функциональной зависимости от величины магнитной индукции - B и от атомных констант, необходимо воспользоваться уравнением Брайта-Раби:

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

где $E(F, m_F)$ – значение энергии атомов в основном состоянии; ν – частота невозмущенного перехода, I – квантовое число ядерного спина; g_I – фактор Ландэ для электрона; μ_B – магнетон Бора; B – величина индукции магнитного поля; m_F – магнитное квантовое число; $x = \frac{(g_J + g_I) \mu_B B}{h\nu}$.

Но на практике при любых изменениях магнитного поля происходят сдвиги частот вышеуказанных резонансов. Разработка системы стабилизации магнитного поля позволит обеспечить автоматически поддерживаемое на заданном уровне значение магнитного поля, исключая его дрейф, что приведет к улучшению одной из главных метрологических

характеристик цезиевых атомных часов - долговременной стабильности частоты.

Для реализации такой системы в составе рассматриваемого КСЧ на атомах цезия, в первую очередь необходимо провести модернизацию синтезатора частоты.

Проведенный мною анализ показал, что данная модернизация позволит улучшить характеристики выходного сигнала не только самого СЧ, но и КСЧ в целом.

СЧ является одним из важных узлов конструкции КСЧ. СЧ принимает участие в формировании СВЧ - частоты резонансного излучения атомов цезия. Поэтому характеристики выходного сигнала СЧ непосредственным образом влияют на характеристики выходного сигнала КСЧ.

Возможные ухудшения метрологических характеристик КСЧ связаны с спектральной чистотой выходного сигнала ГСС, точностью генерируемой частоты выходного сигнала ГСС, а также шумовыми характеристиками.

Среди основных методов формирования синусоидальных сигналов были рассмотрены следующие основные методы:

- **прямой аналоговый синтез** (Direct Analog Synthesis), реализованный с использованием таких основных элементов как: делитель, смеситель, фильтр. Формирование выходного сигнала происходит из сигнала опорного генератора в результате различных комбинаций использования вышеуказанных элементов.

- **косвенный (indirect)**, в котором выходной сигнал формируется с помощью опорного генератора управляемого напряжением и охваченного петлей фазовой автоподстройки;

- **прямой цифровой синтез** (Direct Digital Synthesis), в котором выходной сигнал формируется цифровыми подходами;

- **гибридный синтез**, представляющий комбинацию из нескольких методов, описанных выше.

Каждый из представленных методов имеет как преимущества, так и недостатки, характерные для конкретной области применения. Учитывая область применения разрабатываемого ГСС, среди характеристик выходного сигнала ГСС наиболее пристальное внимание было уделено следующим: чистота спектра выходного сигнала, диапазон перестройки, скорость перестройки, частотное разрешение, количество разных генерируемых частот, возможность осуществления различных видов модуляции.

Основные подходы в формировании выходного синусоидального сигнала каждого из упомянутых выше методов представлены на рис. 5, 6 и 7.

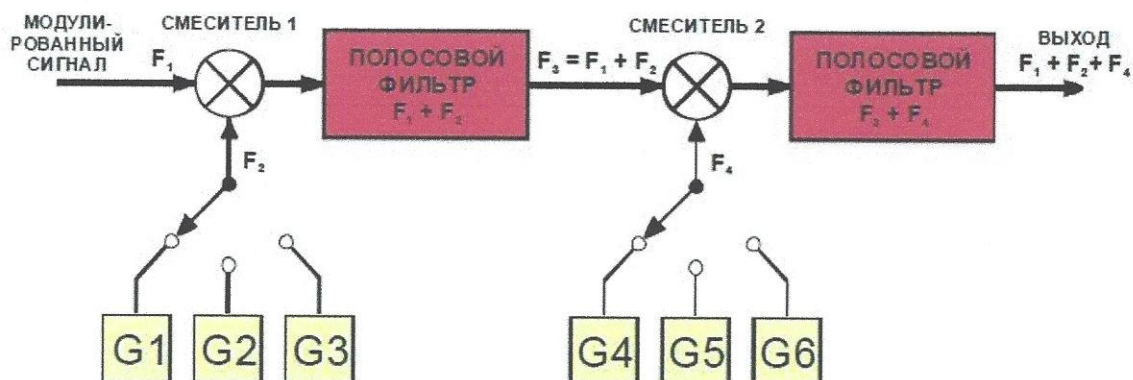


Рис. 5. Прямой аналоговый синтез.

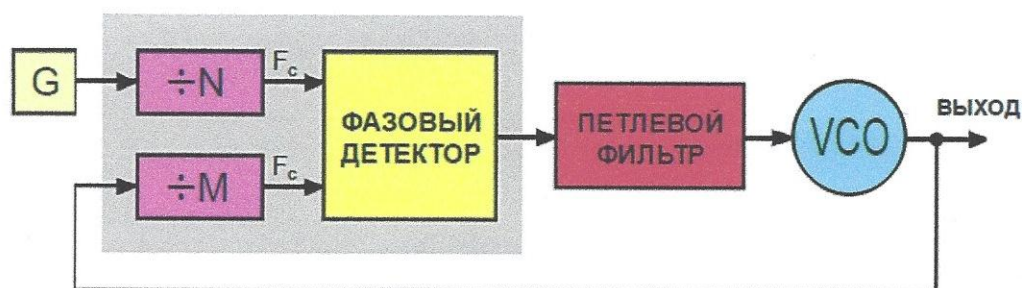


Рис. 6. Косвенный синтез.

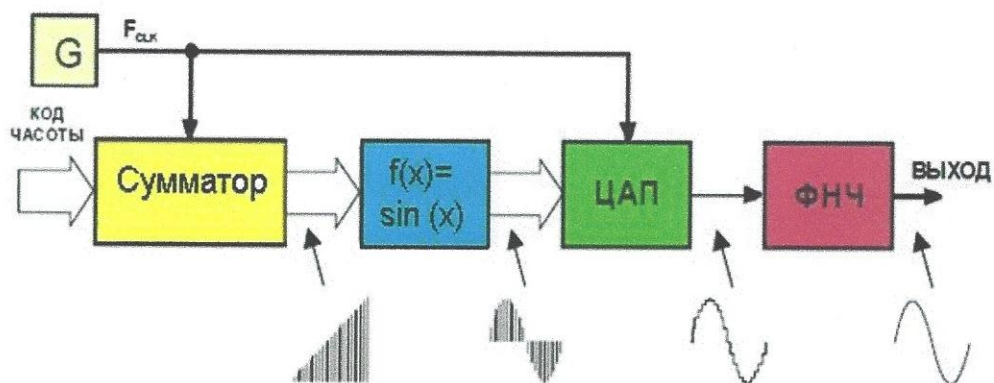


Рис. 7. Цифровой синтез.

Проведя анализ преимуществ и недостатков рассматриваемых методов, был сделан вывод, что цифровой метод является наиболее подходящим, поскольку отвечает всем необходимым требованиям, предъявляемых к СЧ.

Применение данного метода позволит сформировать выходной сигнал СЧ с точностью, свойственной цифровым системам, высокими спектральными характеристиками, цифровым управлением, широким диапазоном формируемых частот.

Особое внимание при разработке СЧ было уделено формированию таблицы значений аргумента функции $\sin(x)$ и соответствующих ему значений функции $\sin(x)$. Принцип формирования таблицы значений представлен на рис. 8.

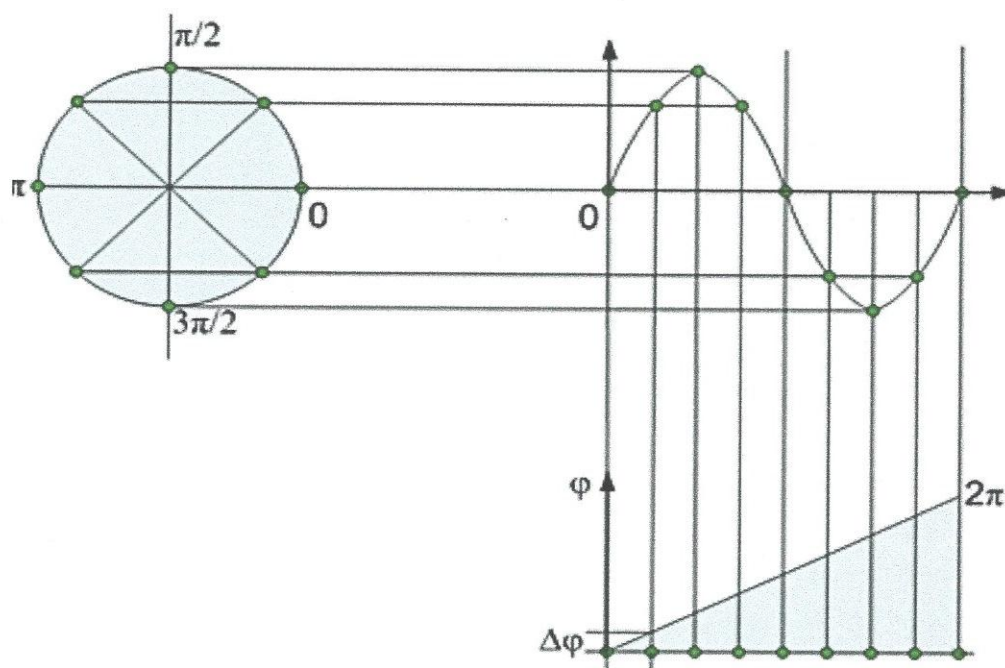


Рис. 8. Принцип формирования таблицы синусов

Для формирования таблицы 1 значений синусоидального сигнала воспользуемся формулой:

$$\text{Sin}(x) = A * \sin\left(\frac{2\pi * x_i}{1024}\right), \quad (1)$$

где A – амплитуда; x_i – значение фазы.

Тогда в таблице 1 параметры, полученные с использованием (1), будут иметь следующие значения.

Таблица 1 значений синусоидального сигнала.

Таблица синуса, период $[0..2\pi]$, 1024 точки					
Точка	$(2\pi * \text{точка})/1024$	$\text{SIN}((2 * 3,14 * \text{точка}) / 1024)$	$511 * \text{SIN}((2 * 3,14 * \text{точка}) / 1024) + 511,5$	К, округл (J)	Перевод в N_2
0	0	0	511,5	512	1000000000
1	0,006133	0,006133	514,6369	515	1000000010

2	0,012266	0,012265	517,7737	518	1000000110
3	0,018398	0,018397	520,9103	521	1000001000
4	0,024531	0,024529	524,0465	524	1000001100
5	0,030664	0,030659	527,1822	527	1000001110
6	0,036797	0,036789	530,3174	530	1000010010
7	0,04293	0,042917	533,4518	533	1000010100

.....

1017	6,23707	-0,0461	487,9205	488	0111101000
1018	6,243203	-0,03997	491,0546	491	0111101011
1019	6,249336	-0,03384	494,1894	494	0111101110
1020	6,255469	-0,02771	497,3248	497	0111110001
1021	6,261602	-0,02158	500,4608	500	0111110100
1022	6,267734	-0,01545	503,5972	504	0111111000
1023	6,273867	-0,00932	506,7339	507	0111111011

Данная таблица размещается в памяти программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС). Выходным сигналом ПЛИС является десятиразрядный цифровой код синуса. Далее этот код подается на цифроаналоговый преобразователь (ЦАП), который формирует аналоговый синусоидальный сигнал.

Для обеспечения высокой точности выходной частоты разрядность накапливающего сумматора была увеличена до 40 разрядов. Это позволило при работе на тактовой частоте 15 МГц, достичь шага перестройки частоты, равной $\Delta F_{\text{out}} = 0,000018$ Гц, что на два порядка превзошло предыдущий результат.

Уровень подавления побочных комбинационных составляющих в спектре выходного сигнала напрямую зависит от разрядности ЦАП. В данной схеме применяется 10 разрядный ЦАП ($N=10$), поэтому для уровня наибольших побочных составляющих степень подавления составляет:

$$D = -20 \lg N = -60 \text{ дБ} \quad (2)$$

Для удовлетворения требований по спектральной чистоте выходных сигналов квантовых мер синтезаторы должны обеспечивать значения $D = - (40 \div 100)$ дБ, которое может быть оценено с помощью (2).

После теоретических расчетов характеристик выходного сигнала ГСС, таких как: шаг перестройки частоты, времени перестройки частоты, подавление побочных комбинационных составляющих, было произведено программирование ПЛИС, в соответствии с принципами работы DDS.

На рис. 9 представлен результат моделирования работы ПЛИС, а именно частотная модуляция синусоидального сигнала, меняющего свою частоту при изменении управляющего сигнала.

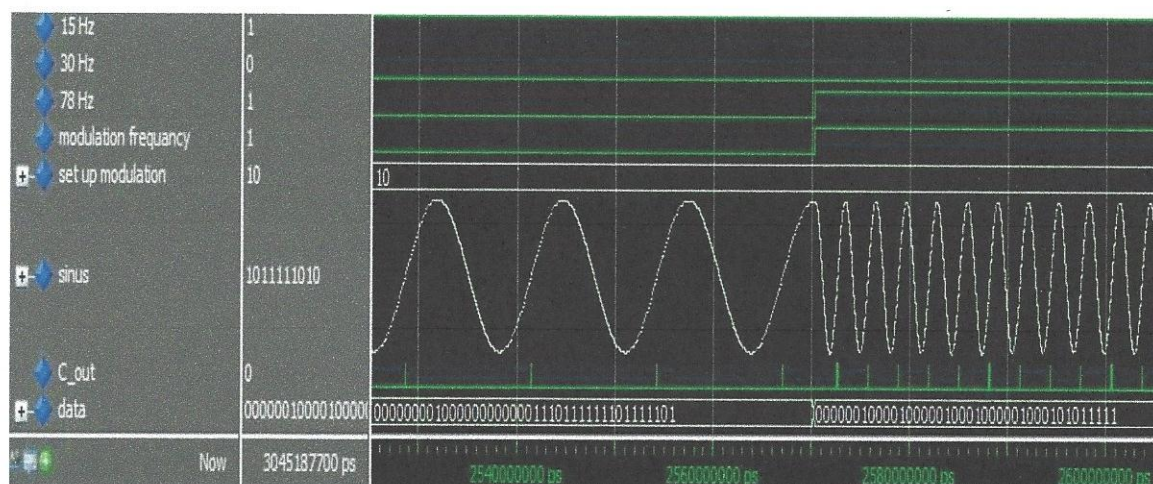


Рис. 9. Результат моделирования работы ПЛИС.

Для проверки спектральных характеристик выходного сигнала было произведено моделирование в программе MatLab. Используя библиотеку данных Simulink, была собрана схема, повторяющая алгоритм работы прямого цифрового синтеза. Она представлена на рис. 10.

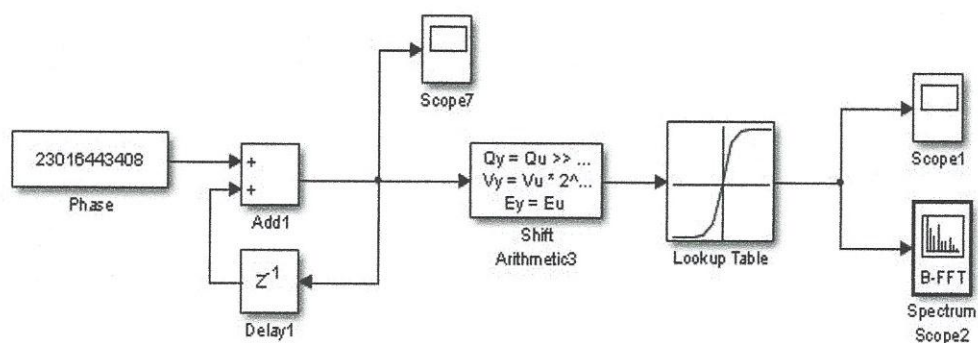


Рис. 10. Схема в программе MatLab

На рис. 11 представлен спектр выходного сигнала с частотой 314 кГц в полосе 200 кГц.

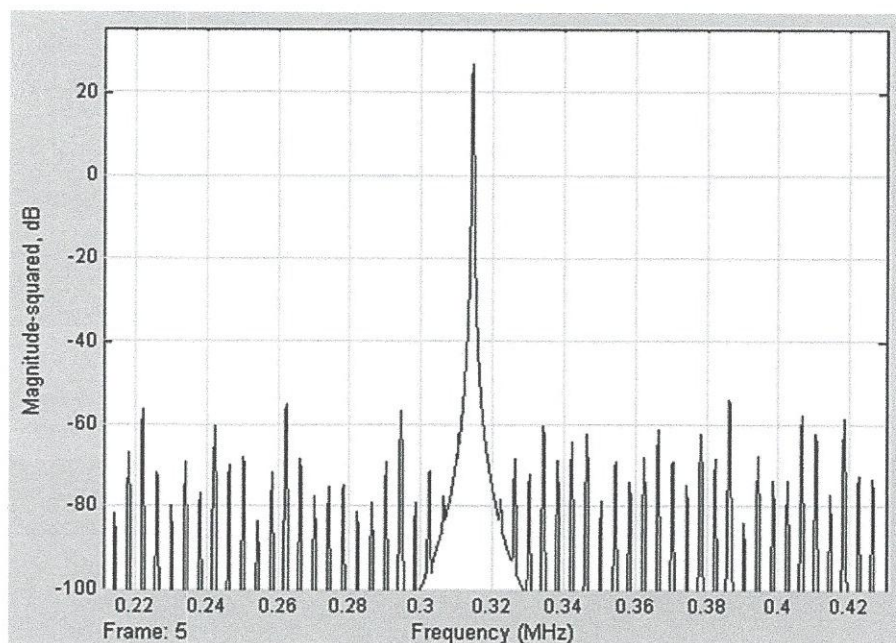


Рис. 11. Спектр выходного сигнала в полосе 200 кГц.

Из рисунка, видно, что подавление боковых амплитудных составляющих составляет -85дБ.

Отсутствие боковых спектральных составляющих в спектре выходного сигнала СЧ очень важно для работы КСЧ. Наличие таких боковых спектральных составляющих приводит к сдвигу действительного значения частоты КСЧ, и ухудшает его метрологические характеристики.

Экспериментальные исследования характеристик выходного сигнала разработанного СЧ показали преимущества по сравнению с ранее используемыми конструкциями.

На рис. 12 и 13 в качестве примера представлен спектр выходного сигнала ранее используемой конструкции СЧ (а) и разработанной (б), измеренный в полосе 6 кГц и 600 кГц соответственно.

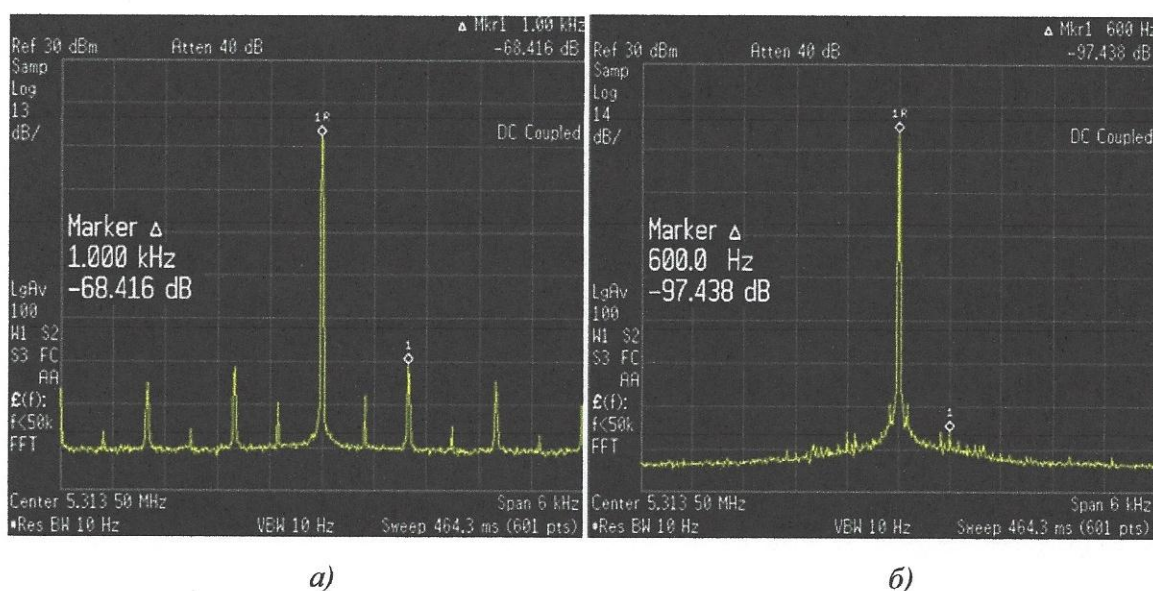


Рис. 12. Подавление амплитуды боковых составляющих в полосе 6 кГц.

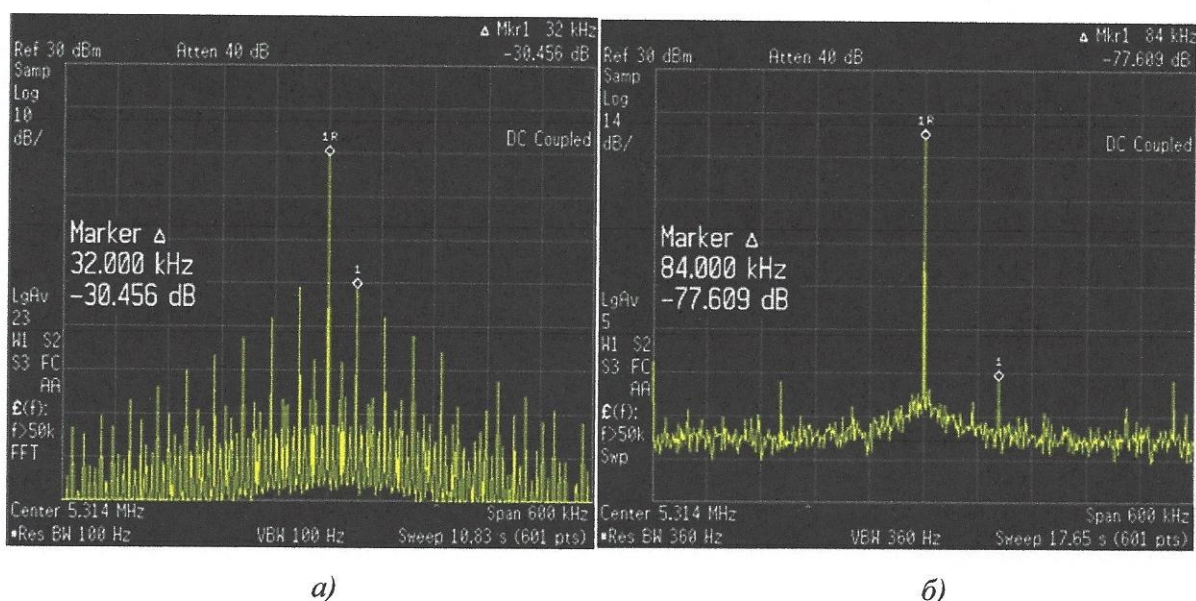


Рис. 13. Подавление амплитуды боковых составляющих в полосе 600 кГц.

Экспериментальные результаты показывали более чем двукратное улучшение подавления боковых амплитудных составляющих в спектре выходного сигнала СЧ в полосе 600 кГц и улучшение на 40% в полосе 6 кГц по сравнению с предыдущей конструкцией.

Сдвиг вершины линии резонанса атомного перехода Δf , возникающий из – за наличия боковых составляющих в спектре сигнала СВЧ-возбуждения определяется следующим выражением:

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{A}{I} \frac{(\delta f)^2}{f(f - f_s)}, \quad (3)$$

где A -амплитуда боковых составляющих, I - амплитуда несущей, δf - ширина спектральной линии, $(f - f_s)$ - расстройка боковых составляющих относительно вершины спектральной линии.

В разработанной конструкции синтезатора частоты при подавлении боковых амплитудных составляющих не менее чем -97 дБ, ширине спектральной линии 300 Гц и отстройке боковых составляющих на 1 кГц относительный сдвиг частоты атомного перехода, рассчитанный по

формуле (3), составляет $\frac{\Delta f}{f} = 1,81 \cdot 10^{-13}$. Результаты, полученные ранее, составляли $\frac{\Delta f}{f} = 5,24 \cdot 10^{-12}$ Гц.

В результате уменьшения сдвига частоты центрального резонанса Δf происходит более точная настройка на центр резонансной линии. Это приводит к более точному установлению значения номинала частоты выходного сигнала КСЧ и, как следствие, улучшению стабильности частоты.

Кроме этого, в связи с новыми возможностями СЧ, а именно, возможностью получения различных частот выходного сигнала СЧ в широком диапазоне, появляется возможность реализации алгоритма подстройки магнитного поля, используя метод, аналогичный подстройке частоты по центральному резонансу.

Экспериментальное исследование характеристик выходного сигнала КСЧ, в составе которого был применен вновь разработанный СЧ, показало улучшение метрологических характеристик КСЧ, а именно стабильности частоты на 15%.

Результаты и их обсуждение

В результате выполнения научной квалификационной работы были получены следующие результаты, непосредственно связанные с физическими и техническими основами КСЧ с лазерной накачкой:

1. Разработана новая конструкция СЧ для КСЧ с лазерной накачкой;
2. Предложена методика расчета параметров выходного сигнала СЧ;
3. Разработана программа для моделирования различных режимов работы СЧ;
4. Изготовлен опытный образец СЧ, исследованы режимы его работы в различных климатических условиях;
5. Полученные экспериментальные результаты показали улучшение выходных характеристик СЧ;

6. Проведено сопоставление экспериментальных исследований выходных характеристик СЧ с теоретическими расчетами, которое показало обоснованность предложенной методики расчета параметров выходного сигнала СЧ;
7. В результате применения СЧ в составе КСЧ с лазерной накачкой появляется возможность реализации алгоритма подстройки магнитного поля;
8. Проведено экспериментальное исследование выходных характеристик КСЧ с новой конструкцией СЧ. Зафиксировано улучшение стабильности частоты выходного сигнала КСЧ с лазерной накачкой на 15%.

Список работ, опубликованных по теме научно-квалификационной работы (диссертации)

Публикации в изданиях, рецензируемых ВАК

1. 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, Проблемы передачи и обработки информации, НТВ-ИТУ/2013 #6(186), стр. 45-52, 2013 г.
2. Lukashev N.A., Petrov A.A., Grebenikova N.M., Valov A.P. Improving performance of quantum frequency standard with laser pumping // IEEE Explore Digital Library, Proceedings of 18th International conference of Laser Optics (ICLO-2018), Saint-Petersburg, Russia, 4-8 June 2018, IEEE Catalog number: CFP1836X-ART, p. 271.
3. Petrov A. A., Davydov V. V., Grebenikova N.M. Some directions of quantum frequency standard modernizations for telecommunication systems // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 2018. Volume 9367. p. 729-733.

Публикации в других изданиях

1. Петров А.А. «Новый метод формирования СВЧ-сигнала возбуждения в цезиевых атомных часах», Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2015». – Москва: Изд-во МГУ имени М.В. Ломоносова, 13.04. – 17.04. 2015, с. 33 – 35.
2. Петров А.А. «Особенности применения метода прямого цифрового синтеза в микроволновом стандарте частоты на атомах цезия - 133», Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2017». – Москва: Изд-во МГУ имени М.В. Ломоносова, 10.04. – 14.04. 2017, с. 520-522.
3. Петров А.А., Валов А.П. «Некоторые направления модернизации квантового стандарта частоты на атомах цезия - 133», Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2018». – Москва: Изд-во МГУ имени М.В. Ломоносова, 9.04. – 13.04. 2018, с. 660-661
4. А.А. Петров, А.П. Валов, Н.М. Гребенникова, В.В. Давыдов, «Улучшение метрологических характеристик квантового стандарта частоты на атомах цезия-133», Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании «АПИНО-2018», 28.02-01.03.2018, Материалы конференции, Санкт-Петербург, Россия, с. 156-159.
5. А.А. Петров, «Цифровой синтезатор частоты для атомных часов на парах ^{133}Cs », Сборник трудов Санкт-Петербургской ассамблеи молодых ученых и специалистов 2014 г., Санкт-Петербург, Россия, с. 151.
6. А.А. Петров, «Преобразователь частоты для цезиевых атомных часов» Сборник трудов Санкт-Петербургской ассамблеи молодых ученых и специалистов 2015 г., Санкт-Петербург, Россия, с. 356.

Аспирант



Петров А.А.