

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Новосибирский государственный технический университет»

На правах рукописи



Головин Николай Николаевич

**УПРАВЛЕНИЕ СДВИГОМ ГРЕБЕНКИ ЧАСТОТ И ФАЗОЙ МЕЖДУ
ОГИБАЮЩЕЙ И НЕСУЩЕЙ ИЗЛУЧЕНИЯ ФЕМТОСЕКУНДНОГО
ЛАЗЕРА**

Диссертация на соискание

ученой степени кандидата технических наук

Специальность 2.2.6 – Оптические

и оптико-электронные приборы и комплексы

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук,
профессор
Дмитриев Александр Капитонович

Новосибирск – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1 ОСОБЕННОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРОВ С САМОСИНХРОНИЗАЦИЕЙ МОД	13
ГЛАВА 2 СТАБИЛИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРА	20
2.1 Привязка мод фемтосекундной гребенки к оптическому стандарту.....	20
2.2 Стабилизация сдвига частотной гребенки с помощью f-2f-интерферометра.....	21
2.3 Управление сдвигом гребенки частот фемтосекундного лазера с помощью акустооптического модулятора	22
2.4 Стабилизация сдвига частотной гребенки и частоты повторения фемтосекундного лазера с помощью комбинированного рубидиевого стандарта частоты	25
ГЛАВА 3 УСТРАНЕНИЕ СДВИГА ГРЕБЕНКИ ЧАСТОТ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВНЕШНИХ ИНТЕРФЕРОМЕТРОВ	28
3.1 Устранение сдвига гребенки с помощью интерферометра Майкельсона.....	28
3.2 Устранение сдвига гребенки с помощью интерферометра Фабри-Перо.....	33
ГЛАВА 4 ВЫДЕЛЕНИЕ (СЕЛЕКЦИЯ) ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ИДЕНТИЧНЫХ ИМПУЛЬСОВ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРА С ЗАДАННОЙ ФАЗОЙ МЕЖДУ ОГИБАЮЩЕЙ И НЕСУЩЕЙ.....	38
4.1 Принципы создания последовательности идентичных фемтосекундных импульсов	38
4.2 Схема получения последовательности идентичных фемтосекундных импульсов с помощью акустооптического модулятора.....	42

4.3 Схема получения последовательности идентичных фемтосекундных импульсов с помощью интерферометра Фабри-Перо и электрооптического модулятора.	43
4.4 Схема получения последовательности идентичных фемтосекундных импульсов с помощью электрооптического модулятора.....	49
4.5 Экспериментальные результаты и их обсуждение.....	58
ГЛАВА 5 СНИЖЕНИЕ ДИСКРЕТНОСТИ УСТАНОВКИ ФАЗЫ МЕЖДУ ОГИБАЮЩЕЙ И НЕСУЩЕЙ. СОЗДАНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ УЛЬТРАКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ С ЗАДАННЫМ СКОЛЬЖЕНИЕМ ФАЗЫ МЕЖДУ СОСЕДНИМИ ИМПУЛЬСАМИ.....	64
5.1 Получение последовательностей идентичных импульсов с малым значением дискретности фазы между огибающей и несущей.....	64
5.2 Создание последовательностей ультракоротких импульсов с заданным скольжением фазы между соседними импульсами.....	75
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	77
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	78
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	79
ПРИЛОЖЕНИЕ А СТАБИЛИЗАЦИЯ СДВИГА ЧАСТОТНОЙ ГРЕБЕНКИ И ЧАСТОТЫ ПОВТОРЕНИЯ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРА MENLOSYSTEMS FC1500-250WG.....	92
ПРИЛОЖЕНИЕ Б ОПИСАНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО РУБИДИЕВОГО СТАНДАРТА ЧАСТОТЫ.....	117
ПРИЛОЖЕНИЕ В АКТ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ.....	120

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

В настоящее время во многих стандартах частоты используется фемтосекундный лазер, который в режиме синхронизации мод излучает периодическую последовательность коротких импульсов [1-11]. Поскольку частота следования импульсов задается эталонным СВЧ генератором, то оптические частоты лазера оказываются строго прокалиброванными в единицах этой частоты. Большое число эквидистантных мод лазера позволяет перекрыть диапазон частот от микроволнового до видимого. Это означает, что по существу имеется оптическая линейка для абсолютного измерения частот в указанном диапазоне. Одна из главных проблем при реализации такой линейки - устранение общего для всех частот сдвига, для обозначения которого часто используется аббревиатура CEO (*carrier-envelope offset*). Поэтому для точного задания сетки оптических частот необходимо стабилизировать частоту следования импульсов и исключить частотный сдвиг гребенки CEO.

При создании фемтосекундного стандарта частоты одной из главных задач является фазовая привязка частоты эталонного СВЧ генератора к гребенке частот фемтосекундного лазера. Обычно для этого применяется оптический синтезатор частот (*optical frequency synthesizer*) с использованием f - $2f$ -интерферометра [12-16]. При этом непосредственно стабилизируются два параметра – частота повторения импульсов и сдвиг частотной гребенки CEO (*carrier-envelope offset*). Разработка методов расширения спектра излучения фемтосекундного лазера свыше октавы позволило создать так называемый f - $2f$ интерферометр, что обеспечило возможность измерения сдвига гребенки частот и, следовательно, обеспечить точность измерения оптических частот с погрешностью, не превышающей параметры лучших современных стандартов частоты. Использование $2f$ - $3f$ и $3f$ - $4f$ интерферометров существенно снижает требования к уширению спектральной линии излучения лазера [17]. Если

частота повторения импульсов и сдвиг гребенки привязаны к частоте микроволнового стандарта, то весь ряд значений частотных компонент в излучении фемтосекундного лазера становится заданным, однако при этом имеет место разность фаз между огибающей и несущей для соседних импульсов, определяемая величиной сдвига гребенки. Другой метод управления гребенкой частот основан на использовании внешнего высокочастотного резонатора (external reference cavity) [18-20]. В этом случае частота повторения импульсов и сдвиг *CEO* стабилизируются одновременно. При этом достигается высокая кратковременная стабильность, но не определены абсолютные значения частот лазера. Кроме того, для использования $f-2f$ интерферометра, необходимо чтобы ширина спектра излучения лазера была более октавы. В работах [21-23] разработан метод измерения сдвига частотной гребенки с использованием внешнего высокочастотного интерферометра, где *CEO* регистрируется с помощью интерференционной картины.

Применение лазера-гетеродина позволяет устранить сдвиг частотной гребенки фемтосекундного лазера [24]. Однако для реализации такой схемы необходимо, чтобы частота лазера-гетеродина лежала в низкочастотной области спектра излучения фемтосекундных импульсов, а его вторая гармоника попадала в высокочастотную часть спектра.

Оптические часы на основе гелий-неонового лазера, стабилизированного по метановой ячейке и фемтосекундного титан-сапфирового лазера с применением метода генерации разностных частот показали перспективность их применения в качестве задающего СВЧ-генератора с низким уровнем фазовых шумов [25, 26].

Также перспективны в роли оптических часов волоконные фемтосекундные лазеры [27–31]. Хотя волоконные лазеры имеют более высокий уровень высокочастотного фазового шума по сравнению с лазерами на титан-сапфире [32], они имеют ряд важных преимуществ. Они компактны, имеют высокий КПД, способны поддерживать генерацию в стабильном

фемтосекундном режиме в течение нескольких недель без перезапуска. Таким образом, такие лазеры весьма перспективны для метрологических приложений в непрерывно работающих оптических часах.

Использование комплекса, состоящего из стандарта частоты, фемтосекундного синтезатора и интерферометра, позволяет создать единый стандарт времени, частоты и длины [33, 34].

Помимо сдвига частотной гребенки и частоты повторения для сверхкоротких импульсов важно контролировать и фазу между огибающей и несущей (carrier-envelope phase, CEP). Поскольку при коротких импульсах, когда длительность импульса одного порядка с длиной волны, сдвиг фазы между огибающей и несущей существенно влияет на эффективность преобразования частоты в нелинейных оптических процессах, что чрезвычайно важно, например, для получения аттосекундных импульсов [35-43]. Кроме того, отсутствие сдвига гребенки фемтосекундного лазера упрощает процесс измерения частот, поскольку при этом необходимо определять только частоту повторения импульсов. Получение последовательности идентичных фемтосекундных импульсов с помощью смещения гребенки частот акустооптическим модулятором было продемонстрировано в работе [16].

Степень разработанности темы исследования

В исследованиях, посвященных управлению и стабилизации CEP [44-51] было показано, что когда отношение частоты следования импульсов f к сдвигу частотной гребенки Δ равно целому числу k , каждый k -ый импульс будет иметь одинаковую фазу между несущей и огибающей, так что существуют k различных последовательностей идентичных фемтосекундных импульсов с дискретностью CEP, равной $2\pi/k$. Таким образом, для получения таких последовательностей необходимо выполнение следующих условий:

$$\Phi \cdot k = 2\pi \cdot q \text{ и } k/q = f/\Delta, \quad (1)$$

где $\Phi \cdot k$ - разность фаз между огибающей и несущей для $(i + k)$ -го и i -го импульсов, k и q - целые числа.

Таким образом, если из фемтосекундного лазерного излучения выделить каждый k -й импульс, при соблюдении вышеуказанных условий, то получим периодическую последовательность идентичных импульсов с частотой повторения $F = f/k$, и $\Delta=0$.

В первых экспериментах [45-47] по управлению СЕР сама фаза несущей относительно огибающей не измерялась. Измерялось скольжение фазы в одном импульсе относительно фазы другого, выбранного в качестве опорного из той же последовательности. Измерения проводились либо с помощью автокорреляторов [45, 46], либо с помощью внешнего f - $2f$ -интерферометра [47]. Фаза несущей относительно огибающей была измерена с помощью f - $2f$ -интерферометра после калибровки независимым внешним экспериментом [47], когда результаты численного моделирования генерации гармоник высокого порядка в ионизирующей среде с помощью ультракоротких импульсов с различными СЕР сравнивались с экспериментальными результатами при одновременном измерении скачка фазы. В последнее время появились коммерчески доступные измерители СЕР, реализующие данный метод [49-51]. Была достигнута точность измерения СЕР, равная 360 мрад [49]. Последовательность идентичных импульсов выделялась с помощью селектора импульсов на основе акустооптического модулятора (АОМ), работавшего в поперечной конфигурации и изменявшего частоту проходящего через него излучения за счет эффекта Доплера. Такое изменение частоты напрямую влияет на частоту сдвига частотной гребенки. Для того чтобы обойти этот эффект, в схему управления АОМ вводилась дополнительная цепочка, смещающая гребенку на значение, кратное частоте повторения импульсов, сохраняя, таким образом, исходную частоту СЕО.

Однако все вышеуказанные способы получения последовательностей фемтосекундных импульсов с одинаковой СЕР не обеспечивают достаточно

большого диапазона перестройки фазы несущей относительно огибающей. Максимальная дискретность была достигнута в работе [44] и составила $2\pi/16$.

Целью работы является разработка новых способов управления сдвигом гребенки частот и фазой между огибающей и несущей излучения фемтосекундного лазера.

Для достижения поставленной цели были поставлены **следующие задачи**:

1. Разработать метод контроля сдвига частотной гребенки с помощью интерферометра Майкельсона.

2. Разработать метод получения последовательности фемтосекундных импульсов без сдвига частотной гребенки с селективируемой с большой дискретностью разностью фаз между несущей и огибающей.

3. Разработать схему формирователя импульсов для управления электрооптическим модулятором с целью селекции фемтосекундных импульсов с одинаковой фазой между несущей и огибающей.

4. Модернизировать блок управления фемтосекундным синтезатором MenloSystems FC1500-250WG с целью изменения сдвига частотной гребенки в широком диапазоне частот (10... 100 МГц).

5. Создать селектор импульсов для получения последовательностей фемтосекундных импульсов без сдвига частотной гребенки с селективируемой разностью фаз между несущей и огибающей.

6. Создать экспериментальную установку для получения последовательностей фемтосекундных импульсов без сдвига частотной гребенки с селективируемой разностью фаз между несущей и огибающей.

7. Провести эксперименты по получению последовательностей фемтосекундных импульсов без сдвига частотной гребенки с селективируемой разностью фаз между несущей и огибающей и знакопеременных по напряженности электрического поля последовательностей импульсов.

Научная новизна:

1. Предложены метод и схема контроля сдвига частотной гребенки с произвольной шириной спектра с применением интерферометра Майкельсона.
2. Предложен и экспериментально реализован метод получения последовательности идентичных фемтосекундных импульсов без сдвига частотной гребенки с управляемой разностью фаз между огибающей и несущей с использованием селектора импульсов на основе электрооптического модулятора.
3. Предложен и экспериментально реализован метод получения знакопеременных по напряженности электрического поля последовательностей ультракоротких импульсов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Использование интерферометра Майкельсона позволяет контролировать сдвиг частотной гребенки лазеров с самосинхронизацией мод с шириной спектральной линии менее октавы.
2. Дискретность установления фазы между огибающей и несущей последовательности идентичных фемтосекундных импульсов задается величиной $2\pi/k$, где $k=f\cdot q/\Delta$, а k и q – целые числа. При частоте повторения импульсов фемтосекундного лазера $f = 250$ МГц и сдвиге частотной гребенки $\Delta = 21$ МГц дискретность установления перестройки фазы селектором импульсов составляет $2\pi/250$ при частоте повторения последовательности идентичных фемтосекундных импульсов 1 МГц.
3. Выделение импульсов, отстоящих друг от друга на величину временного интервала $k/(m\cdot f)$ позволяет получить последовательности импульсов со скольжением CEP, равным $2\pi/m$. При $m=2$ реализуется значение скольжения фазы несущей относительно огибающей, равное π .

Методология и методы исследования

Работа включает информационно-аналитические исследования, расчетные работы по оптимизации режима работы формирователя импульсов, экспериментальные исследования по получению последовательностей

фемтосекундных импульсов без сдвига частотной гребенки с селектируемой разностью фаз между несущей и огибающей и знакопеременных по напряженности электрического поля последовательностей импульсов.

Расчеты выполнены с помощью математического пакета Matlab.

Экспериментальные исследования проведены на базе экспериментальных и опытных установок, созданных группой специалистов ЦКП «Оптические и лазерные технологии» и лаборатории квантовой криогенной электроники НГТУ под руководством соискателя.

Практическая значимость работы

Предложенная схема управления сдвигом частотной гребенки с помощью интерферометра Майкельсона пригодна для различных ширин спектра излучения лазера, что позволяет распространить рассмотренный метод создания оптического стандарта частоты на лазеры с самосинхронизацией мод нано- и пикосекундного диапазонов.

Кроме того, предложенный в работе метод получения последовательностей фемтосекундных импульсов без сдвига частотной гребенки с селектируемой разностью фаз между огибающей и несущей имеет практическую значимость для таких приложений нелинейной оптики, как получение аттосекундных импульсов и когерентное сложение импульсов.

Получение последовательности фемтосекундных импульсов без сдвига частотной гребенки при измерении длин интерферометрическими методами с помощью установок на основе фемтосекундных лазеров обеспечивает более точное определение длины за счет совпадения максимумов огибающей и полосы интерференционной картины.

Создание знакопеременных по напряженности электрического поля последовательностей импульсов может представлять интерес, для изучения быстропротекающих процессов при взаимодействии излучения с веществом.

Реализация результатов работы

Результаты диссертационной работы были использованы при выполнении ряда НИР (см. Приложение В).

Метод управления сдвигом частотной гребенки с помощью интерферометра Майкельсона был использован при выполнении научно-исследовательской работы по проекту «Лазерные стандарты частоты и длины», выполняемому в рамках государственного задания (проектная часть) в 2014 – 2016 гг.

Метод получения последовательностей фемтосекундных импульсов без сдвига частотной гребенки с селективируемой с малой дискретностью разностью фаз между огибающей и несущей был использован при выполнении научно-исследовательских работ по следующим проектам:

- «Стабилизация фемтосекундного стандарта частоты с когерентным сложением импульсов» (РФФИ);
- «Фемтосекундная интерферометрия» (государственное задание);
- «Прецизионные методы и средства оптического и СВЧ диапазонов» (государственное задание);
- «Квантовая криогенная электроника» (в рамках выполнения стратегического проекта «Проектирование и производство гибридных микросборок энергопреобразующей аппаратуры для аэрокосмического применения» по программе «Приоритет 2030»).

Достоверность результатов обеспечивается применением современных теоретических представлений и методов обработки при анализе данных. Положения, выносимые на защиту, сформулированные автором, обоснованы теоретически и подтверждены данными экспериментов. Приведенные в диссертации результаты не противоречат данным, опубликованным в отечественной и зарубежной научной литературе.

Личный вклад

Все основные результаты, выводы и научные положения, приведенные в диссертационной работе, получены лично соискателем. Вклад соискателя в проведенных исследованиях и публикациях результатов заключается в изобретении методов достижения результатов и повышения характеристик, руководстве разработкой экспериментальных установок, постановке задач,

разработке частных технических заданий на узлы и экспериментальных установок, проведении экспериментов и испытаний.

Публикации и апробация работы

Автором опубликовано 43 печатных работы. Результаты диссертационного исследования Н.Н. Головина опубликованы в 16 научных работах. Из них работ, опубликованных согласно перечню российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук (перечень ВАК РФ) – 6, из них работ в научных журналах, индексируемых базами Scopus и Web of Science – 4, а также в материалах конференции, индексируемой базами Scopus и Web of Science – 3. Автором получены 2 патента Российской Федерации на изобретение и 2 патента на полезную модель.

Промежуточные результаты работы докладывались и обсуждались на многих научных и научно-технических конференциях:

- Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения», Новосибирск, 2018 – 2020 гг.
- International Conference on lasers and electro-optics Europe & European quantum electronics conference (CLEO/Europe-EQEC), Germany, Munich, 2019 г.
- Международный симпозиум «Современные проблемы лазерной физики», Новосибирск, 2016 – 2018 гг.
- International Conference on Laser Optics (ICLO), Санкт-Петербург, 2018 г.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, трёх приложений. Объем диссертационной работы – 121 страница, в том числе рисунков – 68, таблиц – 1.

ГЛАВА 1 ОСОБЕННОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРОВ С САМОСИНХРОНИЗАЦИЕЙ МОД

Рассмотрим импульс, распространяющийся во времени. Математическое выражение, описывающее импульс может быть записано в виде [1]:

$$E(t') = \text{Re} \left[A(t') \exp(-i\omega_c(t' - t_0)) \right], \quad (2)$$

где $A(t')$ - огибающая импульса; ω_c - несущая частота; t' - текущее время, t_0 - время, соответствующее центру огибающей импульса.

Будем считать, что огибающая импульса имеет гауссову форму (рис.1) и может быть описана выражением:

$$A(t') = E_0 \exp\left(-\frac{(t' - t_0)^2}{\tau^2}\right), \quad (3)$$

где τ - длительность импульса. Величина τ определяется как полуширина импульса на уровне $1/e$.

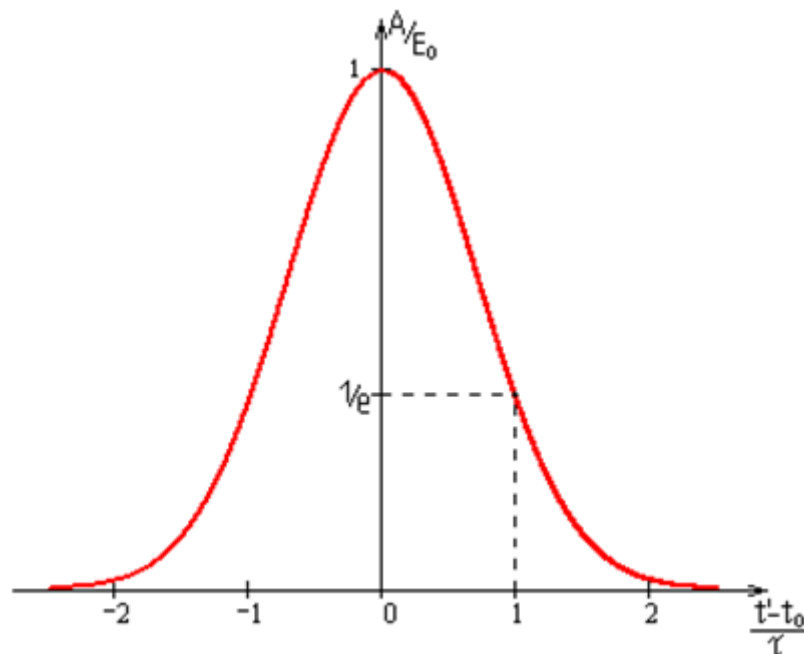


Рисунок 1 – Форма огибающей излучения гауссова импульса

Оптический импульс представляет собой радиоимпульс (рис. 2), частота заполнения которого лежит в диапазоне $\omega_c \sim 10^{15}$ Гц.

Введем обозначение: $t'-t_0=t$ и перепишем выражение (3) в виде

$$E(t) = E_0 \exp\left(-\frac{t^2}{\tau^2}\right) \cos(\omega_c t) \quad (4)$$

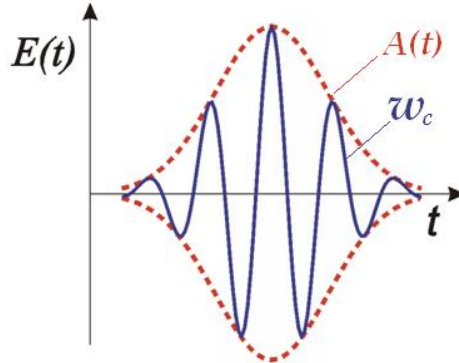


Рисунок 2 – Форма радиоимпульса

Будем считать, что здесь и далее фаза несущей частоты равна 0, появление фазы ведет к сдвигу несущей частоты относительно максимума огибающей.

Обозначим $\frac{1}{\tau^2} = \beta$ и найдем спектральную плотность

$$S(\omega) = S_0 \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-\beta t^2) \cos(\omega_c t) \exp(-i\omega t) dt$$

$$S(\omega) = \frac{S_0}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-\beta t^2) (\exp(i\omega_c t) + \exp(-i\omega_c t)) \exp(-i\omega t) dt$$

$$S_1(\omega) = \frac{S_0}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\beta \left(t^2 + i \frac{(\omega + \omega_c)}{\beta} t - \frac{(\omega + \omega_c)^2}{4\beta^2} + \frac{(\omega + \omega_c)^2}{4\beta^2}\right)\right) dt \quad (5)$$

или в приведенном виде:

$$S_1(\omega) = \frac{S_0}{2} \exp\left(-\frac{(\omega_c + \omega)^2}{4\beta}\right) \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\left(\sqrt{\beta} t + i \frac{(\omega_c + \omega)}{2\sqrt{\beta}}\right)^2\right) dt \quad (6)$$

Выполнив замену переменной $\left[\sqrt{\beta} \cdot t + i \frac{(\omega_c + \omega)}{2\sqrt{\beta}} = u; dt = \frac{du}{\sqrt{\beta}} \right]$,

получим

$$S_1(w) = \frac{S_0}{2\sqrt{\beta}} \exp\left(-\frac{(w_c + w)^2}{4\beta}\right) \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-u^2) du = \frac{S_0}{2} \sqrt{\frac{\pi}{\beta}} \exp\left(-\frac{(w_c + w)^2}{4\beta}\right) \quad (7)$$

Если $\beta = \frac{1}{\tau^2}$, то

$$S_1(w) = \frac{S_0}{2} \tau \sqrt{\pi} \exp\left(-\frac{(w_c + w)^2 \tau^2}{4}\right) \quad (8)$$

Аналогично, интегрируя второе слагаемое, получаем:

$$S_2(w) = \frac{S_0}{2} \tau \sqrt{\pi} \exp\left(-\frac{(-w_c + w)^2 \tau^2}{4}\right)$$

$$S(w) = \frac{S_0}{2} \tau \sqrt{\pi} \left(\exp\left(-\frac{(w_c + w)^2 \tau^2}{4}\right) + \exp\left(-\frac{(-w_c + w)^2 \tau^2}{4}\right) \right) \quad (9)$$

т.е. спектральная плотность одиночного импульса также будет иметь форму Гаусса (рис. 3).

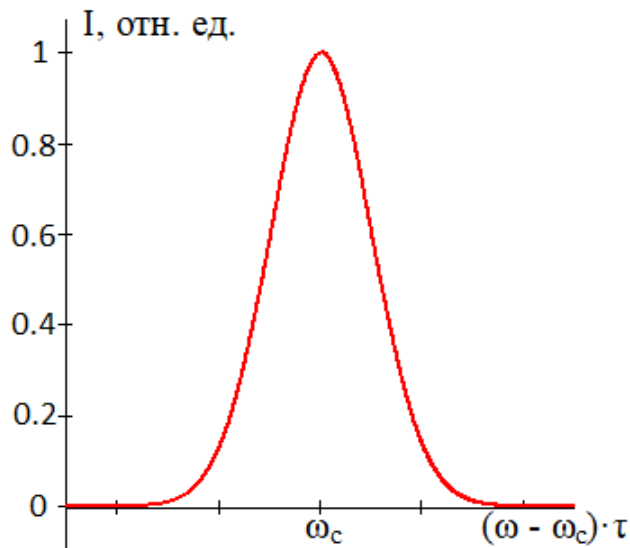


Рисунок 3 – Спектральная плотность одиночного импульса

Спектральную плотность двух гауссовых импульсов можно найти используя теорему смещения. Будем считать, что импульсы симметрично расположены относительно начала координат на временном отрезке $\frac{T_0}{2}$, где T_0 - временной интервал между импульсами.

Для удобства введем круговую частоту повторения импульсов

$$w_r = \frac{2\pi}{T_0}, \text{ тогда:}$$

$$S(w) = \frac{S_0}{2} \tau \sqrt{\pi} \left(\exp\left(-\frac{(w_c + w)^2 \tau^2}{4}\right) + \exp\left(-\frac{(-w_c + w)^2 \tau^2}{4}\right) \right) \left(\exp\left(i(w_c + w) \frac{\pi}{w_r}\right) + \exp\left(-i(w_c + w) \frac{\pi}{w_r}\right) \right)$$

$$S(w) = S_0 \tau \sqrt{\pi} \left(\exp\left(-\frac{(w_c + w)^2 \tau^2}{4}\right) + \exp\left(-\frac{(-w_c + w)^2 \tau^2}{4}\right) \right) \cos\left((w_c + w) \frac{\pi}{w_r}\right) \quad (10)$$

Спектральная плотность четырех симметрично расположенных импульсов будет даваться выражением:

$$S(w) = S_0 \tau \sqrt{\pi} \left(\exp\left(-\frac{(w_c + w)^2 \tau^2}{4}\right) + \exp\left(-\frac{(-w_c + w)^2 \tau^2}{4}\right) \right) \left(\cos\left((w_c + w) \frac{\pi}{w_r}\right) + \cos\left(3(w_c + w) \frac{\pi}{w_r}\right) \right)$$

Спектральная плотность любого количества импульсов может быть записана выражением:

$$S(w) = S_0 \tau \sqrt{\pi} \left(\exp\left(-\frac{(w_c + w)^2 \tau^2}{4}\right) + \exp\left(-\frac{(-w_c + w)^2 \tau^2}{4}\right) \right) \sum_k \cos\left((2k-1)(w_c + w) \frac{\pi}{w_r}\right), \quad (11)$$

где k – любое целое число, равное половине количества импульсов.

Ширина огибающей спектра определяется длительностью импульса: более короткому импульсу соответствует более широкий спектр излучения лазера. Как видно из рис. 6. одиночному импульсу соответствует сплошной спектр. Два импульса дают заполнение, возникает косинусоидальная модуляция огибающей (рис. 7а). Большое число импульсов приводит к сужению компонентов спектра (рис. 7б). Ширина спектральных компонент будет обратно пропорциональна времени между первым и последним импульсом.

Излучение фемтосекундного лазера представляет собой последовательность импульсов. Расстояние между импульсами жестко определено оптической длиной резонатора лазера.

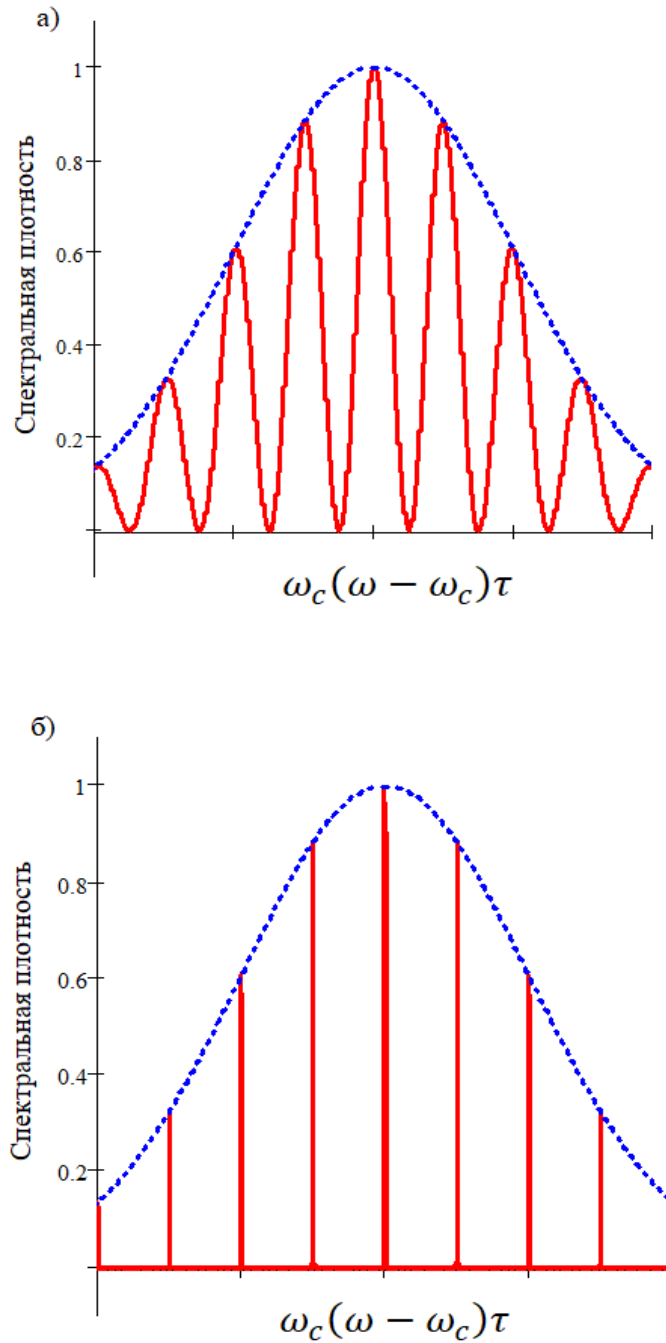


Рисунок 4 – Спектральная плотность последовательности двух (а) и двухсот (б) импульсов

Время между импульсами $T_0 = 2L/v_{gr}$, где L - длина резонатора лазера, а v_{gr} – групповая скорость распространения импульса в резонаторе. Импульсы не являются полностью одинаковыми, т.к. их огибающая распространяется со

скоростью v_{gr} , а несущая волна с частотой ω_c - с фазовой скоростью. В результате, после каждого обхода резонатора несущая волна приобретает фазовый сдвиг $\Delta\phi$ относительно огибающей $A(t)$, т.е. электрическое поле в общем случае не является периодической функцией. Будем, однако, считать, что оптическая длина резонатора лазера – стабильна, при этом огибающая импульса – периодическая функция (рис. 8. а). В этом случае поле излучения лазера записывается в виде:

$$E(t) = \text{Re} \left\{ \sum_n A_n \exp[-i(\omega_0 + n\omega_r)t] \right\}, \quad (12)$$

где A_n - Фурье - компонента $A(t)$; $\omega_r = 2\pi/T_0$ - циклическая частота повторения импульсов; n - целое число, а $\omega_0 < \omega_r$ - частотный сдвиг.

Введя обозначение $\omega_c = n\omega_r + \omega_0$, окончательно получим выражение для поля излучения фемтосекундного лазера:

$$E(t) = \text{Re} \left\{ \sum_n A_n \exp[-i\omega_n t] \right\} \quad (13)$$

Таким образом, спектр излучения фемтосекундного лазера, работающего в режиме самосинхронизации мод, может быть представлен набором эквидистантных частот с интервалом ω_r (рис.8.б). При этом гребенка излучаемых частот (сплошные линии) имеет отстройку ω_0 относительно нулевого значения частоты.

Возникновение ω_0 связано с различием фазовой и групповой скоростей при распространении лазерного импульса в резонаторе. За время обхода резонатора фазовый сдвиг $\Delta\phi = \omega_0 T = 2\pi\omega_0/\omega_r$. С другой стороны, поскольку частота несущей ν_0 совпадает с одной из мод в излучении лазера, то $\nu_0 = m_0 f_{rep} + f_0$, где m_0 - номер моды, соответствующий несущей. Далее можно записать, что $f_0 = (\nu_0 / f_{rep} - m_0) f_{rep}$. Видно, что сдвиг гребенки будет

отсутствовать при кратном отношении частоты несущей ν_0 к частоте повторения импульсов f_{rep} .

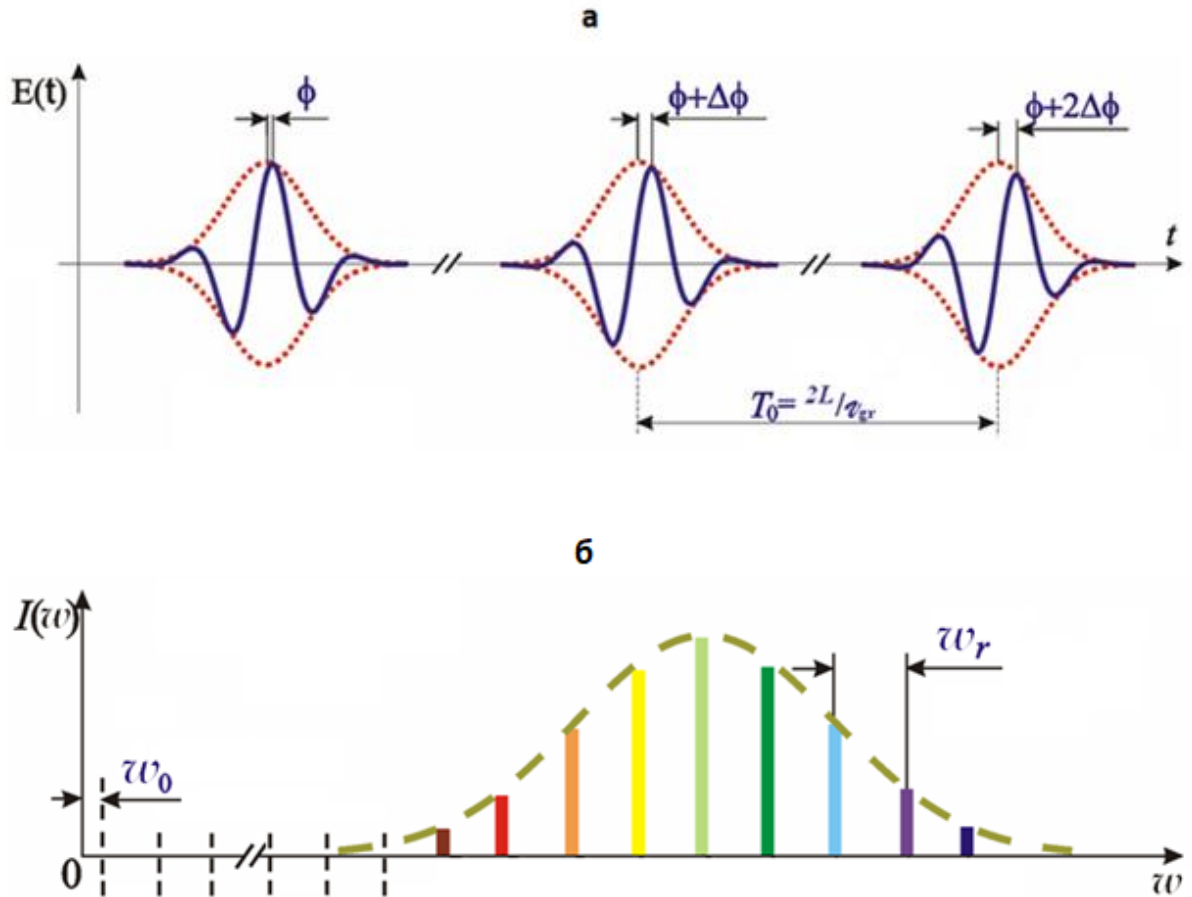


Рисунок 5 – Временное (а) и спектральное (б) представление излучения лазера с самосинхронизацией мод

В пределе при бесконечном числе импульсов отдельная частотная компонента будет иметь вид дельта функции. Однако на практике ширина спектральных компонент, как правило, определяется флуктуациями длины резонатора лазера.

ГЛАВА 2 СТАБИЛИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРА

2.1 Привязка мод фемтосекундной гребенки к оптическому стандарту.

Схема привязки мод фемтосекундной гребенки к оптическому стандарту [26] показана на рисунке 6. Излучение титан-сапфирового фемтосекундного лазера фокусируется в нелинейный кристалл PPLN. Нелинейный процесс генерации разностных частот (ГРЧ) в кристалле «сдвигает» гребенку в средний ИК-диапазон, включающий в себя частоту излучения оптического стандарта. Если моды исходной фемтосекундной гребенки, разница которых была приблизительно равна частоте стандарта ν_{st} , были равны $\nu_m = mf_{rep} + \Delta$ и $\nu_n = nf_{rep} + \Delta$, где m и n – целые числа, а Δ – сдвига частотной гребенки, то в результате ГРЧ в новой гребенке будет присутствовать мода $\nu_k = kf_{rep}$, где $k=m-n$. Излучение преобразованной фемтосекундной гребенки сбивается на фотодетекторе D2 с излучением оптического стандарта частоты и генерируется сигнал ошибки, равный разности частот ν_{st} и ν_k . Сигнал ошибки подают на блок фазовой автоподстройки частоты повторения, который управляет пьезокерамическим преобразователем, установленным на одно из зеркал резонатора лазера, меняя длину резонатора. Это позволяет осуществлять стабилизацию частоты повторения импульсов.

Данный метод нечувствителен к Δ и обеспечивает стабилизацию частоты повторения независимо от стабилизации сдвига частотной гребенки. В то время как другие способы стабилизации фемтосекундных лазеров предполагают, что сначала будет застabilизирован сдвиг гребенки, а затем будет осуществлена стабилизация частоты повторения.

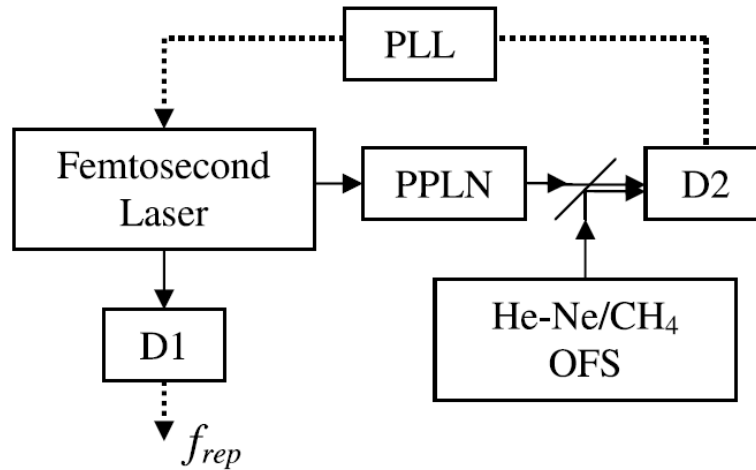


Рисунок 6 – Схема привязки мод фемтосекундной гребенки к оптическому стандарту частоты [26]. PPLN – периодически поляризованный нелинейный кристалл, D1, D2 – фотоприемники, He-Ne/CH₄ OFS – оптический стандарт частоты, на основе гелий-неонового лазера, стабилизированного по метановой ячейке, PLL – блок фазовой автоподстройки частоты

2.2 Стабилизация сдвига частотной гребенки с помощью f-2f-интерферометра

На рисунке 7 приведена схема стабилизации сдвига частотной гребенки фемтосекундного лазера с помощью f-2f интерферометра и одновременной стабилизации частоты повторения с помощью стандарта частоты [12-16, 52-62].

Частота повторения импульсов f , выделяемая на фотодетекторе 3, подается на блок фазовой привязки частоты повторения (ФАПЧ) 4, куда также поступает сигнал на частоте f от синтезатора опорной частоты повторения 5. Выходной сигнал блока ФАПЧ управляет пьезокерамическим преобразователем, установленным на одно из зеркал резонатора лазера 1, меняя длину резонатора. Это позволяет осуществлять стабилизацию частоты повторения импульсов.

Сигнал на частоте сдвига гребенки фемтосекундного лазера Δ , выделяемый с помощью f-2f интерферометра 7 и фотодетектора 8, подается на

один из входов блока фазовой привязки сдвига частотной гребенки 9, на другой вход которого поступает сигнал от синтезатора опорной частоты сдвига гребенки 11. Сигнал с блока ФАПЧ 9 управляет мощностью накачки фемтосекундного лазера 1. Таким образом, это позволяет осуществлять стабилизацию частоты сдвига гребенки.

Отметим, что оба синтезатора синхронизованы с внешним стандартом частоты.

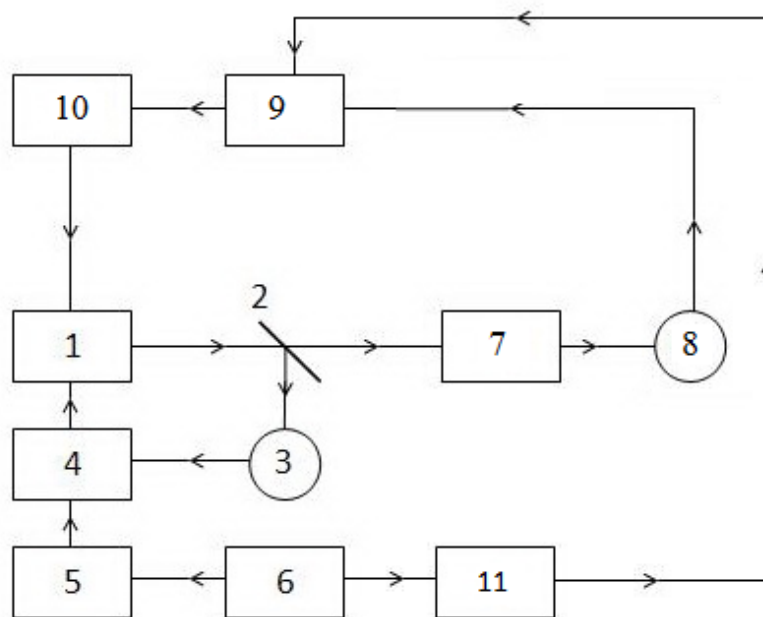


Рисунок 7 – Стабилизация частоты повторения и сдвига частотной гребенки фемтосекундного лазера. 1- фемтосекундный лазер, 2 - делительное зеркало, 3,

8 - фотодетекторы, 4 - блок фазовой привязки частоты повторения, 5 - синтезатор опорной частоты повторения, 6 - СВЧ-стандарт частоты, 7 – $f-2f$ интерферометр, 9 - блок фазовой привязки сдвига частотной гребенки, 10 - блок питания лазера, 11 - синтезатор опорной частоты сдвига гребенки

2.3 Управление сдвигом гребенки частот фемтосекундного лазера с помощью акустооптического модулятора

На рисунке 8 представлена схема управления сдвигом гребенки частот фемтосекундного лазера с помощью акустооптического модулятора, предложенная в [44].

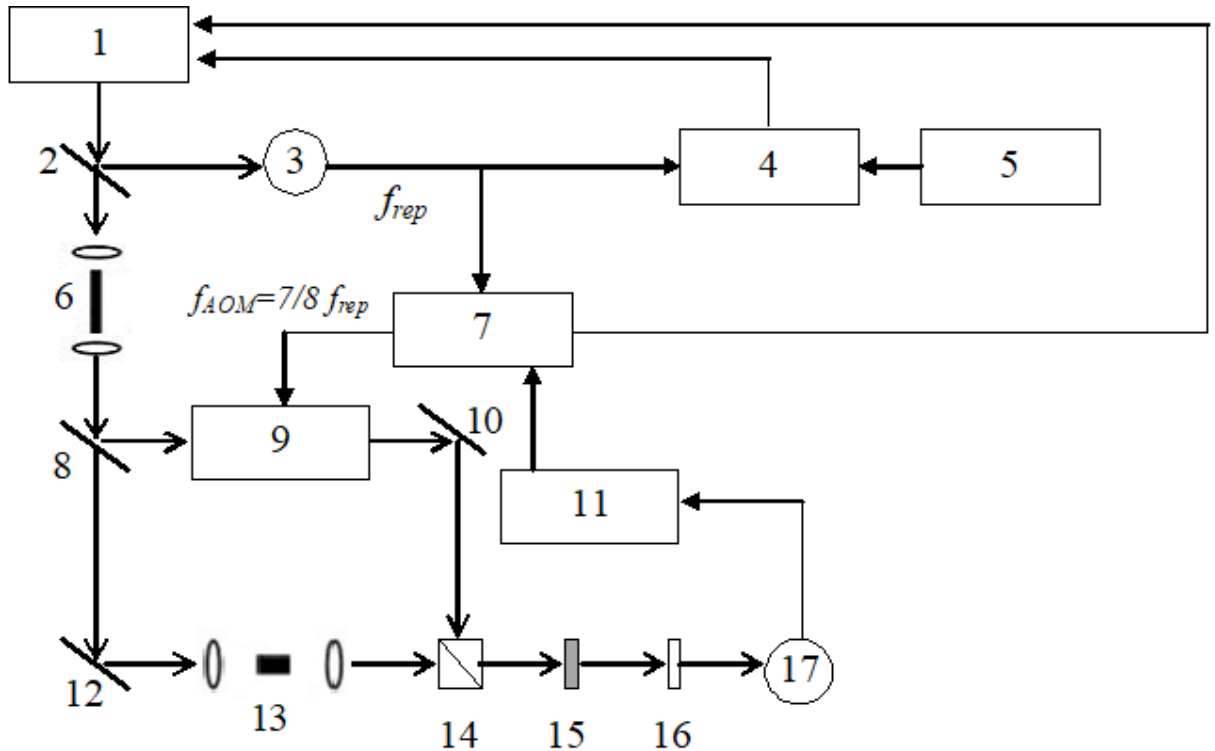


Рисунок 8 – Схема управления сдвигом гребенки частот фемтосекундного лазера с помощью акустооптического модулятора.

1 – фемтосекундный лазер; 2, 14 – делительные зеркала; 3, 17 – фотодетекторы; 4 – блок автоподстройки частоты повторения; 5 – синтезатор частот; 6 – микроструктурированное оптическое волокно, 7 – блок фазовой автоподстройки сдвига частотной гребенки; 8 – дихроичное зеркало 9 – акустооптический модулятор; 10, 12 – поворотные зеркала; 11 – следящий генератор; 13 – генератор второй гармоники; 15 – оптический фильтр; 16 – поляризатор

Схема работает следующим образом. Излучение фемтосекундного лазера с помощью делительного зеркала 2 делится на две части. Отраженное излучение детектируется с помощью фотодетектора 3, на котором выделяется сигнал с частотой повторения импульсов фемтосекундного лазера f_{rep} . Этот сигнал поступает на блок фазовой автоподстройки частоты повторения 4 (ФАПЧ), куда также с синтезатора частот 5 подается опорный сигнал на частоте f_{rep} . Сигнал с выхода ФАПЧ управляет сервоприводом одного из

зеркал лазерного резонатора, меняя длину резонатора и стабилизируя частоту повторения.

Спектр прошедшего через делительное зеркало 2 уширяется с помощью микроструктурированного волокна 6 до ширины более чем октава, и подается на вход f - $2f$ -интерферометра, образованного дихроичным зеркалом 8, поворотными зеркалами 10 и 12, генератором второй гармоники 11, делительным зеркалом 14, оптический фильтр 15, и поляризатором 16. В длинноволновое плечо f - $2f$ -интерферометра внедрен акустооптический модулятор (АОМ). Коротковолновая часть уширенного спектра (от 500 до 900 нм, содержащая f_{2n}) направляется через одно плечо интерферометра, содержащее акустооптический модулятор (АОМ). Длинноволновая часть спектра (от 900 до 1100 нм, содержащая f_n) направляется в другое плечо интерферометра, проходя через кристалл бетабората бария 14 толщиной 4 мм, удваивающий частоту. Кристалл настроен под углом для эффективного удвоения при 1040 нм. Затем лучи от двух плеч согласовываются. Комбинированный луч фильтруется интерференционным фильтром 15 с полосой пропускания 10 нм с центром на 520 нм и фокусируется на фотодиоде 17. Частота сигнала биений равна $\pm(\Delta f_{АОМ})$, где $f_{АОМ}$ – частота сигнала, управляющего АОМ, которая равна $7/8 f_{rep}$. Затем сигнал биений подается на следящий генератор 11, который синхронизирует по фазе генератор, управляемый напряжением, с биением, чтобы улучшить отношение сигнал/шум за счет существенного уменьшения ширины полосы шумов. С выхода следящего генератора сигнал ошибки, который программируется как $(m/16)f_{rep}$, где m – целое число, подается на блок фазовой автоподстройки сдвига частотной гребенки 7. Выходной сигнал с блока ФАПЧ 7 управляет углом наклона зеркала с насыщающимся поглотителем, изменяя дисперсию резонатора лазера, что позволяет нам стабилизировать сдвиг частотной гребенки, который равен $(m/16)f_{rep}$. Кроме того, эта схема обеспечивает перестройку фазы несущей относительно огибающей от 0 до 2π с дискретностью $\pi/8$.

2.4 Стабилизация сдвига частотной гребенки и частоты повторения фемтосекундного лазера с помощью комбинированного рубидиевого стандарта частоты

На рисунке 9 показана схема стабилизации сдвига частотной гребенки и частоты повторения фемтосекундного лазера с помощью комбинированного рубидиевого стандарта частоты (в оптическом и СВЧ диапазонах), разрабатываемого при участии соискателя в центре коллективного пользования «Оптические и лазерные технологии» и лаборатории квантовой криогенной электроники НГТУ [63-80]. По сравнению со схемой, приведенной на рис. 7, в нее включено быстрое кольцо регулирования частоты повторения с привязкой к узкому оптическому резонансу рубидиевого стандарта. Поскольку относительная ширина оптического резонанса гораздо меньше ширины СВЧ резонанса, это позволяет обрабатывать быстрые изменения частоты

Схема работает следующим образом. Излучение фемтосекундного лазера 2 с помощью делительного зеркала 3 делится на две части. Отраженное излучение детектируется с помощью фотодетектора 8, на котором выделяется сигнал с частотой повторения импульсов фемтосекундного лазера f_{rep} . Этот сигнал поступает на блок медленной фазовой автоподстройки частоты повторения 7 (ФАПЧ), куда также с синтезатора частот 10 подается опорный сигнал на частоте f_{rep} . Сигнал с выхода медленной ФАПЧ управляет сервоприводом одного из зеркал лазерного резонатора, меняя длину резонатора и стабилизируя частоту повторения.

Излучение, прошедшее через делительное зеркало 3, снова делится на зеркале 4. Оптический спектр отраженного излучения удваивается по частоте с помощью генератора второй гармоники 9. Затем из спектра с помощью оптического полосового фильтра 11 выделяется полоса вблизи длины волны 795 нм, соответствующая длине волны оптической части рубидиевого

стандарта частоты. Прошедшее через фильтр излучение на фотодетекторе 14 сбивается с излучением рубидиевого стандарта. Сигнал биений фильтруется с помощью РЧ фильтра 13 и подается на блок быстрой фазовой привязки частоты повторения. Сигнал с выхода быстрой ФАПЧ управляет электрооптическим модулятором фемтосекундного лазера, обеспечивая быструю отработку изменений частоты повторения.

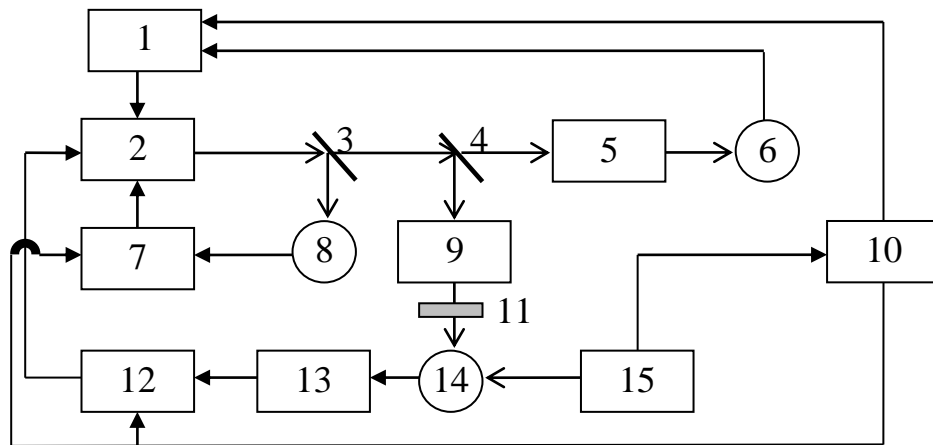


Рисунок 9 – Стабилизация частоты повторения и сдвига частотной гребенки фемтосекундного лазера с помощью комбинированного рубидиевого стандарта частоты. 1– блок фазовой привязки сдвига частотной гребенки; 2 – фемтосекундный лазер; 3, 4 – делительные зеркала; 5 – f - $2f$ интерферометр; 6, 8, 14 – фотодетекторы; 7 – блок фазовой привязки частоты повторения (медленное кольцо); 9 – генератор второй гармоники, 10 – синтезатор частот; 11 – полосовой оптический фильтр; 12 – блок фазовой привязки частоты повторения (быстрое кольцо); 13 – полосовой РЧ фильтр; 15 – комбинированный рубидиевый стандарт частоты.

Спектр прошедшего через делительное зеркало 4 уширяется с помощью микроструктурированного волокна до ширины более чем октава, и подается на вход f - $2f$ -интерферометра 5, с помощью которого на фотодетекторе 6 выделяется сигнал с частотой, равной сдвигу частотной гребенки фемтосекундного лазера Δ . Этот сигнал подается на один из входов блока фазовой привязки сдвига частотной гребенки куда также с синтезатора частот

10 подается опорный сигнал на частоте Δ . Сигнал с выхода ФАПЧ управляет мощностью диодов накачки фемтосекундного лазера, стабилизируя сдвиг частотной гребенки.

Опорным сигналом для синтезатора частот служит сигнал с СВЧ-выхода (10 МГц) комбинированного рубидиевого стандарта частоты.

Основное преимущество данной схемы заключается в объединении быстродействующего электрооптического модулятора для быстрого управления частотой повторения в ограниченном диапазоне изменения с медленным пьезоприводом, который обеспечивает гораздо больший диапазон фазовой привязки частоты повторения.

Схема разрабатываемого комбинированного рубидиевого стандарта частоты и описание его работы приведены в Приложении 2.

ГЛАВА 3 УСТРАНЕНИЕ СДВИГА ГРЕБЕНКИ ЧАСТОТ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВНЕШНИХ ИНТЕРФЕРОМЕТРОВ

3.1 Устранение сдвига гребенки с помощью интерферометра

Майкельсона

Излучение оптического стандарта частоты на основе фемтосекундного лазера представляет собой периодическую последовательность импульсов, спектр которой состоит из набора частот

$$\omega_m = mf + \Delta, \quad (14)$$

где m - целые положительные числа; f_{rep} - межмодовая частота, которая стабилизируется с помощью СВЧ эталона, Δ – сдвиг частотной гребенки. Возникновение сдвига СЕО связано с тем, что фазовая и групповая скорости импульса при обходе резонатора лазера различны. Групповая скорость определяется частотой следования импульсов f_{rep} , а фазовая - дисперсионными элементами в резонаторе лазера. Поэтому в общем случае периодические импульсы излучения лазера отличаются друг от друга, т. е. поле излучения не является строго периодической функцией. Если нумеровать последовательность излучаемых импульсов индексом i , то форма каждого импульса сохранится, а несущая частота приобретет фазовый сдвиг φ_i относительно вершины импульса, пропорциональный Δ . При измерении сигнала от интерференции двух импульсов с помощью интерферометра Майкельсона на детекторе возникает сигнал, пропорциональный

$$U_{\Phi Д} \sim \cos(2\pi\nu_0 t + \delta + \delta_M) \exp\left(-\frac{\Delta t^2}{\tau^2}\right) \quad (15)$$

где τ - длительность импульса; $\delta = \varphi_i - \varphi_k$ - разность фаз импульсов; δ_M – сдвиг, вызванный дисперсией в интерферометре Майкельсона; Δt - временная задержка между импульсами, которая определяется интерферометром; для простоты форма импульсов выбрана гауссовой. Для регистрации сигнала можно использовать схему, аналогичную схеме детектора Хэнша-Койлауда

[81], которая широко применяется в поляризационных методах стабилизации частоты лазеров, обладающих очень высокой чувствительностью [22].

Отметим, что при $\Delta = 0$ все импульсы одинаковы, а, следовательно, $\delta = 0$. Поэтому устранение СЕО производится следующим образом. Сначала интерферометр настраивают на максимум сигнала, при котором $\Delta t = 0$. Затем управляют дисперсией в резонаторе лазера, чтобы изменить фазовую скорость импульсов и получить $\delta = 0$. Обычно это делают с помощью тока накачки лазера.

Рассмотрим оптический стандарт частоты, в котором сдвиг СЕО устраняется с помощью изложенного выше метода. На рис. 10 представлена упрощенная схема установки [82-83]. Схема включает в себя два кольца регулирования. Первое кольцо является быстрым и поддерживает частоту следования импульсов фемтосекундного лазера постоянной. Оно работает следующим образом. Излучение фемтосекундного лазера 1, отражаясь от полупрозрачного зеркала 2, поступает на высокочастотный фотодетектор 3, где выделяются межмодовые биения лазера, а затем идет на один из входов блока фазовой привязки частоты (ФАПЧ) 4. На другой вход этого блока поступает сигнал от синтезатора 5, частота которого привязана к СВЧ стандарту 6. Сигнал ошибки с выхода ФАПЧ подается на пьезокерамику лазера 1, которая управляет длиной его резонатора, а значит, и частотой следования импульсов лазера.

Второе кольцо регулирования является медленным по сравнению с первым, оно устраняет СЕО. Часть излучения проходит через делительное зеркало 2 на интерферометр Майкельсона 7, разность плеч которого сканируется вблизи заданного значения на величину порядка длины волны с помощью генератора пилообразного напряжения 8. Сигнал биений интерферометра регистрируется фотодетектором 9, а затем обрабатывается на компьютере 10. Кольцо обратной связи замыкается цифро-аналоговым преобразователем 11 и блоком питания 12, который управляет дисперсией резонатора лазера и, следовательно, Δ .

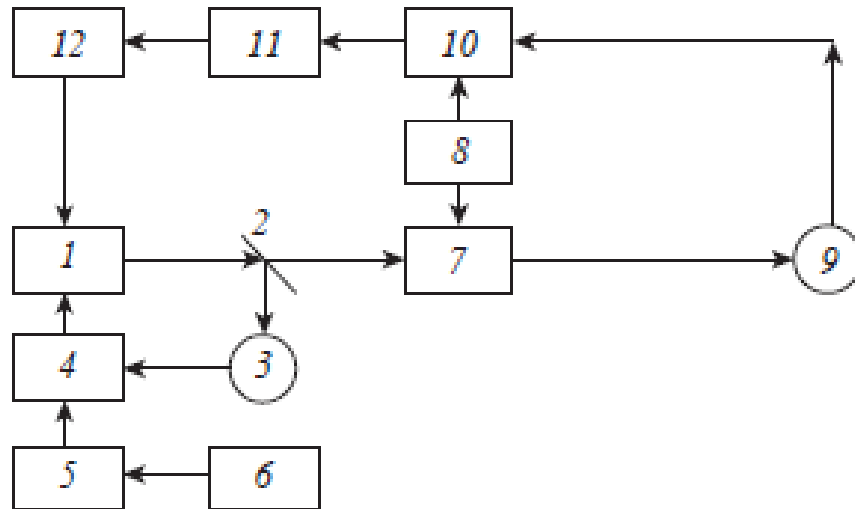


Рисунок 10 – Схема стабилизации гребенки частот фемтосекундного лазера:

1- фемтосекундный лазер; 2 - делительное зеркало; 3 - широкополосный фотодетектор; 4 - блок фазовой привязки частоты; 5 - синтезатор частоты; 6 - СВЧ стандарт частоты; 7 - интерферометр Майкельсона; 8 - генератор пилообразного напряжения; 9 - фотодетектор; 10 - компьютер; 11 - цифро-аналоговый преобразователь; 12 - блок питания лазера

На рисунке 11 показаны интерференционная картина, получающаяся при прохождении излучения фемтосекундного лазера через интерферометр Майкельсона (верхний рисунок) в зависимости от перестройки длины измерительного плеча и её область вблизи максимума огибающей (нижний рисунок). Сдвиг интерференционной картины будет определяться соотношением $2\pi \frac{\Delta}{f_{rep}} + \delta_M$. Из него можно вычислить сдвиг частотной гребенки Δ .

Сдвиг, вызванный дисперсией в интерферометре Майкельсона, можно вычислить, если прокалибровать интерферометр с помощью фемтосекундного лазера с двумя разными сдвигами частотной гребенки. Интерференционная картина, показанная на рисунке 11, записана при частоте повторения 250 МГц и сдвиге частотной гребенки 20 МГц. При этом сдвиг максимума

интерференционной картины относительно максимума огибающей составил 0.2 (в числах полувольт).

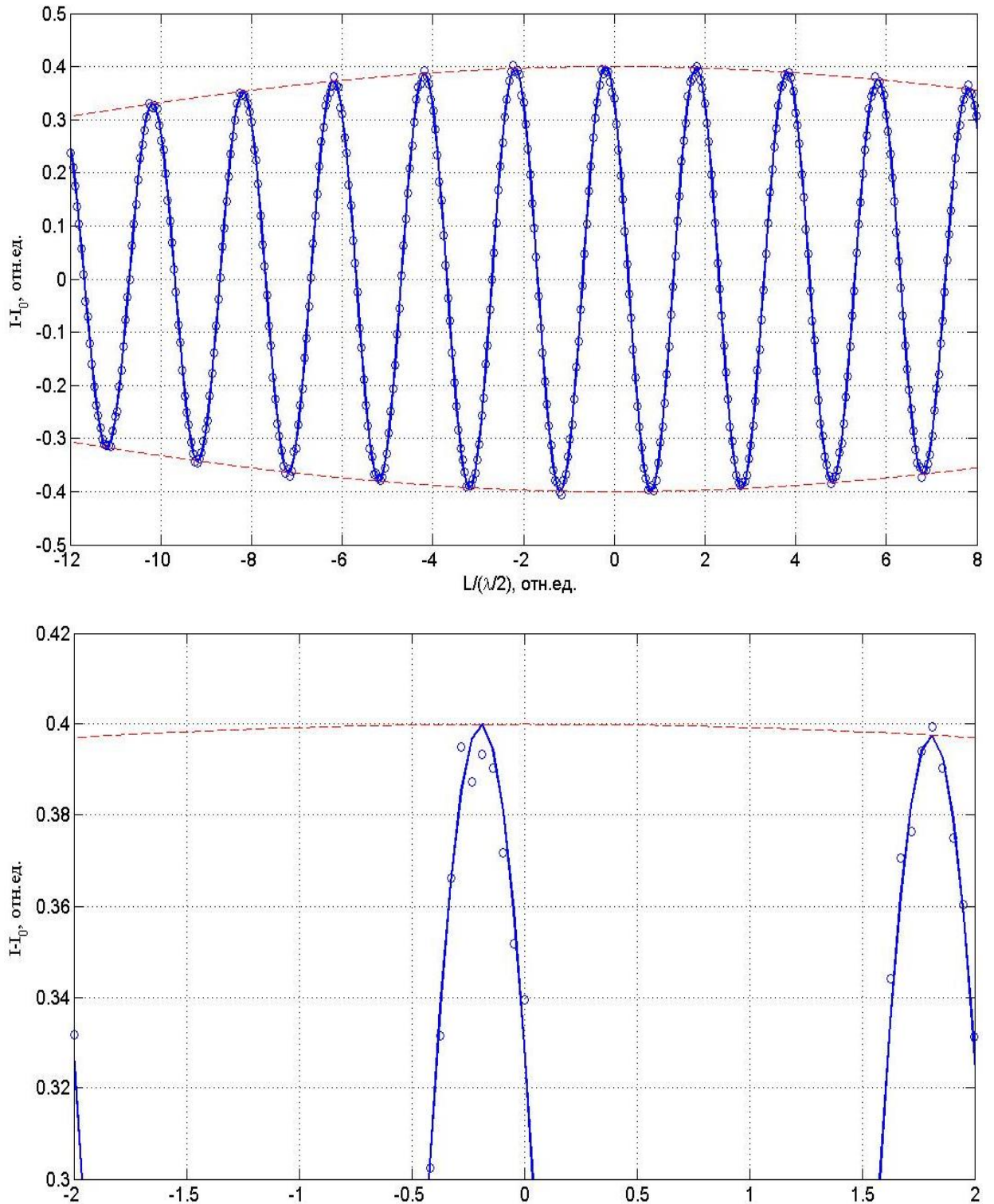


Рисунок 11 – Интерференционная картина при прохождении излучения фемтосекундного лазера через интерферометр Майкельсона. Точки – экспериментальные данные, сини линии – аппроксимация, красные линии – огибающая интерференционной картины

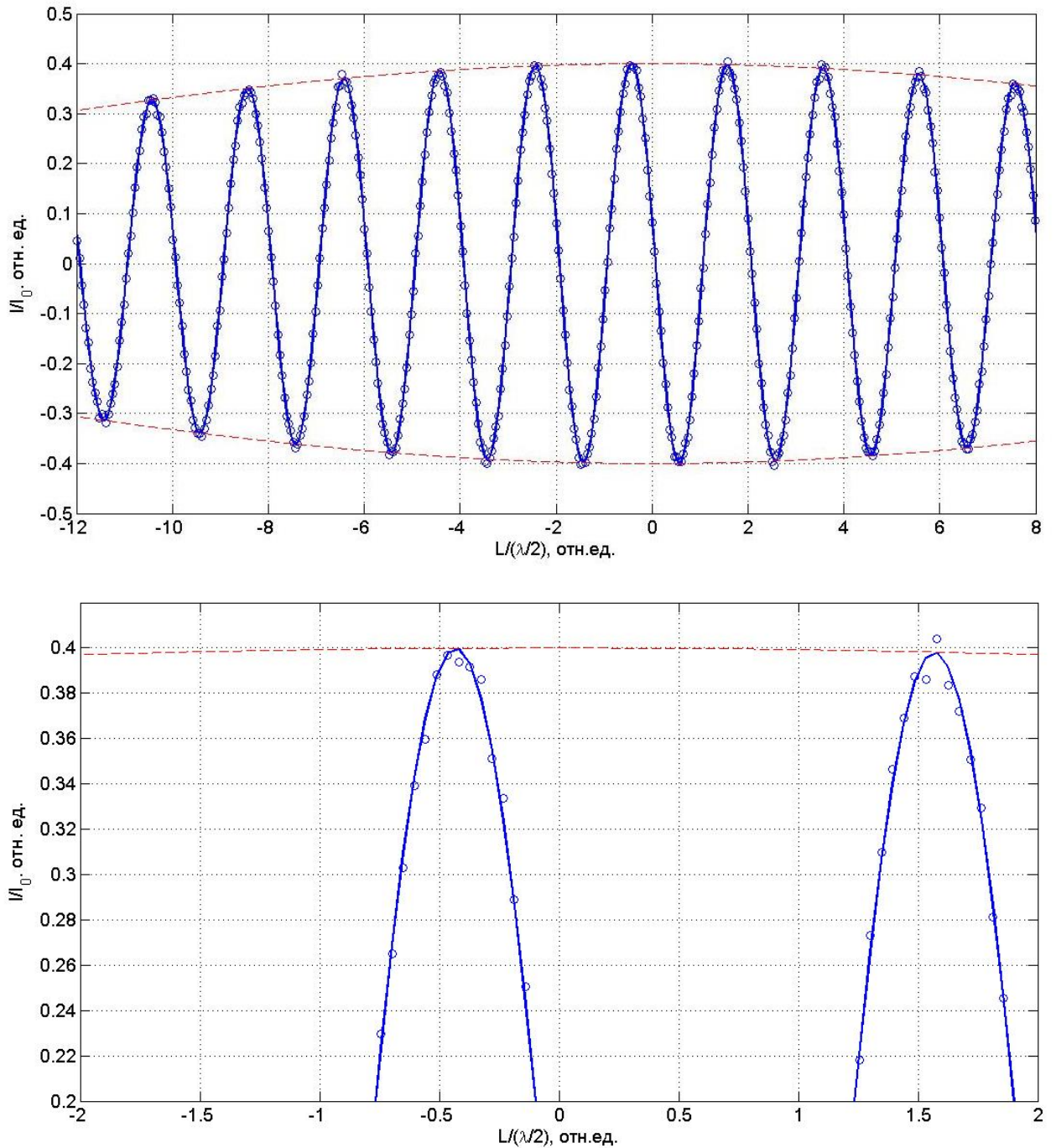


Рисунок 12 – Интерференционная картина при прохождении излучения фемтосекундного лазера через интерферометр Майкельсона. Точки – экспериментальные данные, сини линии – аппроксимация, красные линии – огибающая интерференционной картины

Интерференционная картина, показанная на рисунке 12, записана при частоте повторения 250 МГц и сдвиге частотной гребенки 50 МГц. При этом сдвиг максимума интерференционной картины относительно максимума

огибающей составил 0.45 (в числах полувольт). Соответственно, сумма двух сдвигов будет равна $0.65 = 2\pi \frac{(\Delta_{20} + \Delta_{50})}{f_{rep}} + 2\delta_M$. Откуда $\delta_M = -0,55$.

Предложенная простая схема оптического стандарта частоты пригодна для различных ширин спектра излучения лазера, что позволяет распространить рассмотренный метод на лазеры с самосинхронизацией мод нано- и пикосекундного диапазонов.

3.2 Устранение сдвига гребенки с помощью интерферометра Фабри-Перо

Рассмотрим прохождение излучения фемтосекундного лазера через интерферометр Фабри-Перо. Излучение лазера представляет собой периодическую последовательность импульсов, спектр которой состоит из набора частот:

$$\omega_m = m\Omega + CEO \quad (16)$$

где m - целые положительные числа, $\Omega = 2\pi c/L$ - частота повторений импульсов, где L - длина полного обхода резонатора лазера. Частоты полос пропускания интерферометра равны:

$$\nu_n = n\Omega_i + \Delta. \quad (17)$$

где n - номер моды, $\Omega_i = 2\pi c/l$ - межмодовая частота, l - длина полного обхода резонатора интерферометра, Δ - сдвиг частоты каждой из его полос пропускания, обусловленный дисперсией интерферометра [22].

Ширина каждой спектральной компоненты лазера считается много уже полосы пропускания интерферометра, а поэтому интенсивность прошедшего через интерферометр излучения равна

$$I_{int} = \sum_m k_m I_m \quad (18)$$

где I_m - интенсивность спектральной компоненты лазера, k_m - коэффициент пропускания интерферометра для этой компоненты:

$$k_m = \{1 + p \sin^2[\pi(m + q)z]\}^{-1}, \quad (19)$$

параметр $p = 4R/(1 - R)^2$ определяется только коэффициентом отражения зеркал R ,

$$q = CEO/\Omega - \Delta/\Omega_i, \quad (20)$$

$z = l/L$ - длина интерферометра в единицах L . Из (18, 19) видно, при $z = 1$ и $q = 0$ имеем $k_m = 1$, то есть интерферометр прозрачен для излучения лазера.

Для прямоугольного распределения спектра излучения $I_m = I_{las}/N$, где I_{las} - полная интенсивность лазера, N - число его спектральных компонент. В этом случае

$$I_{int} = kI_{las}, \quad (21)$$

$$k = \frac{1}{N} \sum_m k_m. \quad (22)$$

В работе [22] по формулам (17, 18) была рассчитана интенсивность прошедшего излучения I_{int} от параметра z . Один из графиков, полученных в [81], приведен на рис 13. Величина z представлена в виде $z = 1 + \lambda\delta/L$, где λ - средняя длина волны излучения лазера, $\delta = (l - L)/\lambda$ - относительное изменение длины интерферометра в единицах λ .

В отсутствие дисперсии зеркал интерферометра ($\Delta_i = 0$) из (19) имеем $q = CEO/\Omega$, а поэтому по измерению сдвига q относительно максимума огибающей определяем CEO :

$$CEO = \Omega q. \quad (23)$$

В работе [3] распределение спектра фемтосекундного лазера, близкое к прямоугольному, реализовывалась с помощью монохроматора, когда на фотодетектор поступала только выделенная часть спектра. Чувствительность фотодетектора в заданном узком спектральном диапазоне можно считать постоянной, что обеспечивает постоянство коэффициента преобразования интенсивности излучения в ток фотодетектора.

В работе [22] была получена погрешность измерения q меньше 10^{-2} . Коэффициент отражения зеркал интерферометра был порядка 0,5. Малость коэффициента отражения связана с несогласованностью кривизны зеркал с кривизной фазового фронта излучения лазера. Уменьшение потерь на зеркалах до 10^{-5} позволит уменьшить q до величины 10^{-7} . Таким образом, при частоте повторений импульсов $\Omega = 10^8$ Гц погрешность измерения смещения гребенки

частот $CEO = \Omega q$ будет 10 Гц. Точность измерения какой либо частоты гребенки ω будет равна $CEO/\omega = \Omega q/\omega$. Для оптической частоты $\omega = 10^{15}$ Гц точность измерения будет 10^{-14} .

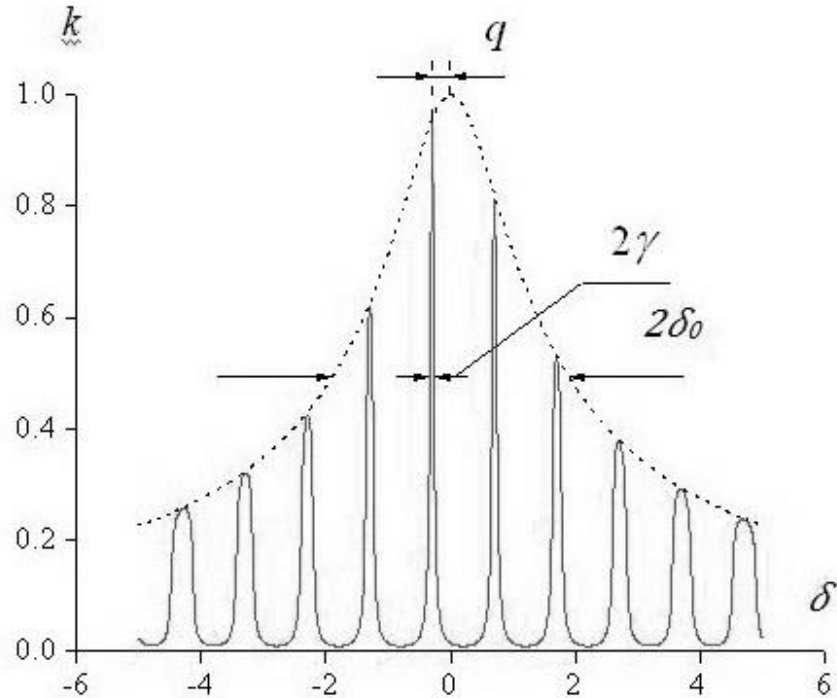


Рисунок 13 – Зависимость коэффициента пропускания интерферометра k от величины δ . Интервал между соседними полосами пропускания равен единице, что соответствует длине волны λ ; $q=0.3$, $p=100$, $\gamma = \frac{1}{\pi p^{1/2}} = 0.033$ – полуширина полосы пропускания, расположенной вблизи центра огибающей; штрихами показана огибающая гребенки полос пропускания, δ_0 – полуширина огибающей

Рассмотрим оптический стандарт частоты, в котором сдвиг CEO устраняется с помощью метода, изложенного в предыдущем параграфе. На рис. 14 показана упрощенная схема установки. Схема включает два кольца регулирования. Первое кольцо является быстрым и поддерживает постоянное значение частоты повторений импульсов фемтосекундного лазера. Оно работает следующим образом. Излучение фемтосекундного лазера 1, отражаясь от полупрозрачного зеркала 2, поступает на высокочастотный

фотодетектор 3, где выделяются межмодовые биения лазера. Далее этот сигнал поступает на один из входов блока фазовой привязки частоты (ФАП) 4. На другой вход этого блока поступает сигнал от синтезатора 5, частота которого привязана к СВЧ-стандарту 6. Сигнал ошибки с выхода ФАП подается на пьезокерамику лазера, которая управляет длиной его резонатора, а, следовательно, и частотой повторения импульсов лазера.

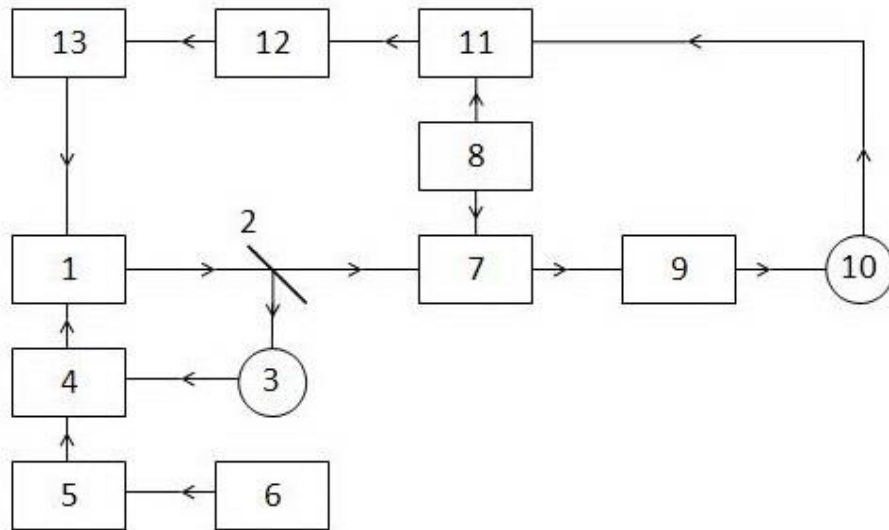


Рисунок 14 – Схема стабилизации гребенки частот фемтосекундного лазера с помощью интерферометра Фабри-Перо. 1- фемтосекундный лазер, 2 - делительное зеркало, 3- широкополосный фотодетектор, 4 - блок фазовой привязки частоты, 5 - синтезатор частоты, 6 -СВЧ - стандарт частоты, 7 - высокочастотный интерферометр Фабри-Перо, 8 - генератор пилообразного напряжения, 9 - монохроматор, 10 - фотодетектор, 11 - компьютер, 12 - цифро-аналоговый преобразователь, 13 - блок питания лазера

Второе кольцо регулирования является медленным по сравнению с первым, и оно устраняет сдвиг гребенки СЕО. Часть излучения проходит через делительное зеркало 2 на интерферометр Фабри-Перо 8, длина которого l устанавливается равной длине резонатора фемтосекундного лазера L . Для получения интерференционной картины длина интерферометра сканируется вблизи заданного значения на величину порядка длины волны с помощью

генератора пилообразного напряжения 8. Монохроматор 9 выделяет заданную спектральную полосу. Фотодетектор 10 регистрирует интенсивность прошедшего через интерферометр излучения, а интерференционная картина обрабатывается на компьютере 11. Кольцо обратной связи замыкается цифро-аналоговым преобразователем 12 и блоком питания 13, который управляет дисперсией резонатора лазера и, следовательно, сдвигом СЕО.

Как видно из выражения (5) наличие дисперсии интерферометра приводит к дополнительному смещению гребенки полос пропускания относительно огибающей и, следовательно, к появлению ошибки при определении СЕО. Эта погрешность может быть легко устранена при калибровке интерферометра фемтосекундным синтезатором с использованием $f-2f$ интерферометра.

В настоящее время для прецизионного измерения частот используется фемтосекундный лазер с $f-2f$ интерферометром. Однако для работы этого интерферометра необходимо иметь ширину спектра более октавы. Вместе с тем существует много коммерческих наносекундных и пикосекундных лазеров с самосинхронизацией мод, которые из-за малой ширины спектра не могут использовать $f-2f$ интерферометр. Предложенная простая схема оптического стандарта частоты пригодна для различных ширин спектра излучения лазера. Это позволяет распространить рассмотренный метод на лазеры с самосинхронизацией мод наносекундного и пикосекундного диапазонов.

ГЛАВА 4 ВЫДЕЛЕНИЕ (СЕЛЕКЦИЯ) ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ИДЕНТИЧНЫХ ИМПУЛЬСОВ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРА С ЗАДАННОЙ ФАЗОЙ МЕЖДУ ОГИБАЮЩЕЙ И НЕСУЩЕЙ

4.1 Принципы создания последовательности идентичных фемтосекундных импульсов

Излучение лазера с самосинхронизацией мод представляет собой электромагнитное колебание на частоте ν_0 вблизи максимума линии усиления с амплитудной модуляцией, период которой равен времени обхода импульсом резонатора лазера T , при этом частота повторения импульсов $f=1/T$, а напряженность поля:

$$E = \sum_{i=1}^{\infty} E_0 \exp\left(-\left[\frac{t-(t_0+iT)}{\tau}\right]^2\right) \cos(2\pi\nu_0 t + \varphi_0). \quad (24)$$

Здесь t - текущее время, t_0 - точка отсчета на временной шкале, φ_0 - фаза несущей при $t=t_0$, i - номер импульса.

На рис. 15 представлена временная последовательность фемтосекундных импульсов при сдвиге частотной гребенки $\Delta=f/3$. Длительность импульсов τ ограничена спектральной шириной фемтосекундного излучения ω , а число оптических колебаний в импульсе определяется отношением длительности импульсов τ к периоду световых колебаний $1/\nu_0$. В пространственном представлении расстояние между импульсами в вакууме и в отсутствие дифракционной расходимости равно оптической длине полного обхода резонатора лазера L , откуда возникает другое представление частоты повторения импульсов: $f=c/L$, где c – групповая скорость света. В общем случае между огибающей и несущей имеется некоторый фазовый сдвиг φ . Скольжение разности фаз между несущей и огибающей φ для соседних $(i+1)$ -ого и i -ого импульсов будет равно

$$\Phi = \varphi_{i+1} - \varphi_i = 2\pi\Delta/f. \quad (25)$$

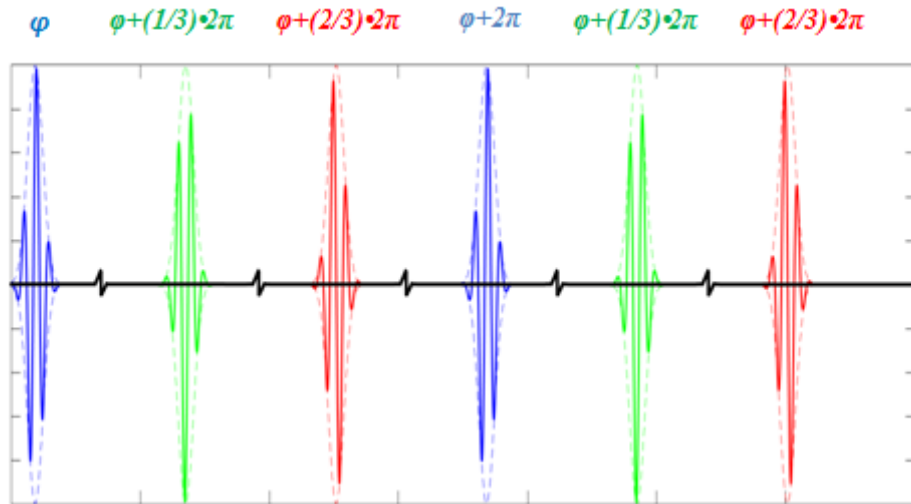


Рисунок 15 – Периодическая последовательность фемтосекундных импульсов

Спектр излучения такого лазера представляет собой набор эквидистантно расположенных частот, интервал между которыми равен частоте повторения импульсов f при сдвиге частотной гребенки лазера Δ (рис.16).

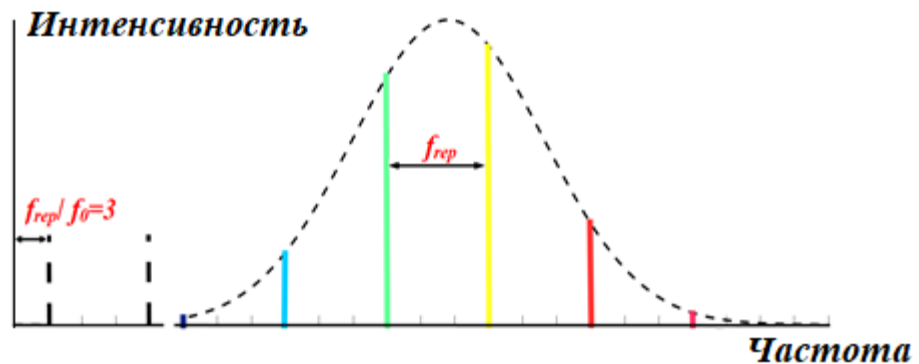


Рисунок 16 – Спектр периодической последовательности фемтосекундных импульсов

Обычно сдвиг гребенки объясняется различием групповой и фазовой скоростей. С другой стороны, этот сдвиг можно объяснить тем, что отношение частоты несущей ν_0 и частоты повторения импульсов f в общем случае отлично от целого числа, что приводит к изменению разности между фазами несущей относительно огибающей для соседних импульсов.

Отметим, что в отсутствие сдвига гребенки частот в общем случае будет иметь место произвольный сдвиг фазы несущей относительно огибающей, при этом он будет одинаковым для всех импульсов.

Разность фаз между огибающей и несущей между $(i+k)$ -ым и i -ым импульсами будет равна величине

$$\Phi_k = 2\pi\Delta k / f. \quad (26)$$

В случае, если эта разность фаз удовлетворяет условию

$$\Phi_k = 2\pi q, \quad (27)$$

где k и q – целые числа, разности фаз между огибающей и несущей между $(i+k)$ -ым и i -ым импульсами будут кратны величине 2π , т.е. эти импульсы будут идентичны. При использовании соотношений (25) и (26) получим необходимые требования для создания фемтосекундных импульсов без скольжения фазы несущей относительно огибающей от импульса к импульсу:

$$k / q = f / \Delta \quad (28)$$

Таким образом, при выделении из излучения фемтосекундного лазера каждого k -ого импульса при соблюдении соотношения (27) получается периодическая последовательность идентичных импульсов на частоте повторения

$$F = f/k. \quad (29)$$

При этом сдвиг синтезированной гребенки будет равен нулю, так что спектр излучения представляет набор частот

$$\nu_p = jF, \quad (30)$$

где j – целое положительное число, а число составляющих спектра в k раз больше по сравнению с излучением на выходе фемтосекундного лазера при неизменной ширине спектра.

Из всех возможных последовательностей импульсов сдвиг фазы несущей относительно огибающей φ можно устанавливать с дискретностью $2\pi/k$.

Минимальные значения временного а также пространственного интервала между импульсами в синтезированной последовательности реализуется при $k=3$, когда $\delta = \pm 1/3$. На рис. 17 представлена последовательность таких

фемтосекундных импульсов. По сравнению с излучением фемтосекундного лазера (рис.17) в синтезированном излучении интервал между импульсами возрастает в три раза, в то время как частотный интервал между спектральными составляющими становится в 3 раза меньше, а разность фаз между огибающей и несущей для каждого импульса становится неизменной, что приводит к ситуации, когда сдвиг гребенки частот отсутствует (рис. 18). Отметим, что при неизменной интенсивности отдельных импульсов средняя мощность излучения будет падать.

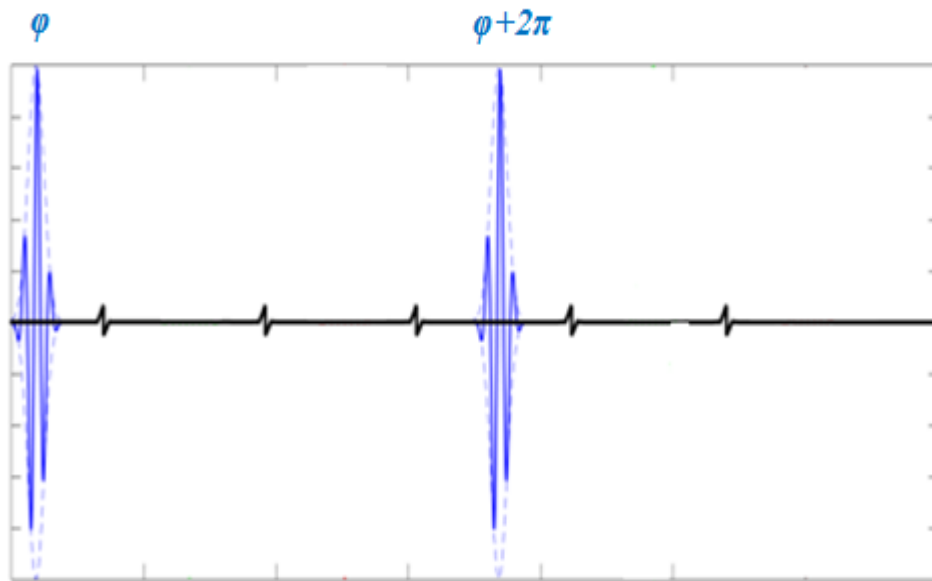


Рисунок 17 – Периодическая последовательность синтезированных фемтосекундных импульсов

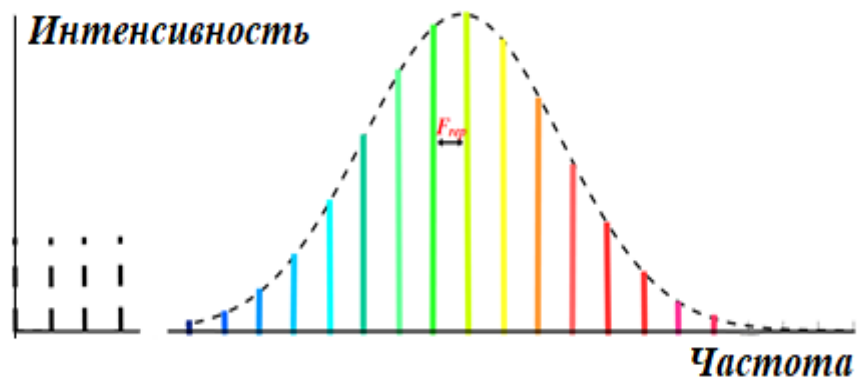


Рисунок 18 – Спектр периодической последовательности синтезированных фемтосекундных импульсов

4.2 Схема получения последовательности идентичных фемтосекундных импульсов с помощью акустооптического модулятора

Схема получения последовательности идентичных фемтосекундных импульсов с помощью акустооптического модулятора аналогична схеме управления сдвигом гребенки частот фемтосекундного лазера с помощью акустооптического модулятора, описанной в главе 2 (см. рис. 8) [44], заключающийся в том, что последовательность идентичных фемтосекундных импульсов получают с помощью акустооптического модулятора, включенного в коротковолновое плечо f - $2f$ -интерферометра. Устройство, реализующее описанный в аналоге способ получения стабильной последовательности фемтосекундных импульсов, содержит фемтосекундный лазер, задающий синтезатор, микроструктурированное оптическое волокно, синтезатор опорной частоты повторения импульсов фемтосекундного лазера, фотодетектор, блок фазовой привязки частоты повторения импульсов фемтосекундного лазера, делительные зеркала, дихроичное зеркало, f - $2f$ -интерферометр, акустооптический модулятор, блок фазовой привязки сдвига частотной гребенки излучения фемтосекундного лазера. Излучение фемтосекундного лазера делится зеркалом на две части. Одна часть поступает на фотодетектор, где выделяется сигнал с частотой повторения импульсов ω . Этот сигнал смешивается с сигналом синтезатора опорной частоты повторения импульсов фемтосекундного лазера, стабилизированного по задающему синтезатору, и поступает на блок фазовой привязки частоты повторения импульсов фемтосекундного лазера. Вторая часть излучения вводится в микроструктурированное волокно для того чтобы уширить спектр излучения до ширины более чем октава. Далее излучение с уширенным спектром поступает на f - $2f$ -интерферометр, в коротковолновое плечо которого включен акустооптический модулятор, работающий на частоте $f_{AOM} = 7/8f_{rep}$. Выходной сигнал f - $2f$ -интерферометра с частотой, равной $\pm(\Delta - f_{AOM})$ поступает на управляемый генератор блока фазовой привязки сдвига частотной гребенки излучения фемтосекундного лазера. Сигнал ошибки, генерируемый

управляемым генератором имеет частоту, равную $(m/16)f_{rep}$ (m – целое число), позволяет менять фазу несущей относительно огибающей фемтосекундных импульсов с шагом $\pi/8$.

Однако в указанном способе реализуется режим генерации последовательности идентичных импульсов с произвольным значением разности фаз между огибающей и несущей, что не позволяет добиться совпадения их максимумов, при котором эффективность преобразования частоты в нелинейных процессах будет максимальной.

4.3 Схема получения последовательности идентичных фемтосекундных импульсов с помощью интерферометра Фабри-Перо и электрооптического модулятора.

Схема получения последовательности идентичных фемтосекундных импульсов с помощью интерферометра Фабри-Перо и электрооптического модулятора показана на рис 19 [84]. Излучение фемтосекундного лазера делят зеркалом на две части, одна из которых поступает на фотодетектор, где выделяют сигнал с частотой повторения импульсов ω , который смешивают с сигналом синтезатора опорной частоты повторения импульсов фемтосекундного лазера, стабилизированного по задающему синтезатору, и подают на блок фазовой привязки частоты повторения импульсов фемтосекундного лазера, который стабилизирует частоту повторения импульсов, так что $\omega = \omega_0$. Прошедшее через первое зеркало излучение делят вторым зеркалом на две части, одну из которых подают на оптический вход модулятора интенсивности, управляемого формирователем импульсов, задающим сигналом для которого служит поступающий через фазовращатель сигнал синтезатора опорной частоты модулятора интенсивности, синхронизованный с задающим синтезатором. При этом сдвиг гребенки частот Δ и частота повторения импульсов фемтосекундного лазера ω связаны соотношением:

$$\omega / \Delta = k/q, \quad (31)$$

где k и q – целые числа.

Излучение фемтосекундного лазера проходит через модулятор интенсивности, частоту которого задают с помощью управляемого формирователя импульсов на частоте

$$F_0 = \omega/k \quad (32)$$

так, что через модулятор интенсивности проходит каждый k -ый импульс, у которых разность фаз между огибающей и несущей будет постоянной, а сдвиг вновь созданной гребенки с частотой повторения $F = F_0$ будет равен нулю, так что спектр излучения на выходе модулятора представляет набор частот

$$\nu_p = pF_0, \quad (33)$$

где p – целое положительное число.

При этом из всех возможных последовательностей идентичных импульсов селекционируются последовательности с дискретностью сдвига фазы несущей относительно огибающей, равной $2\pi/k$. При этом в устройство, реализующее способ включены интерферометр Фабри-Перо, генератор пилообразного напряжения, полосовой оптический фильтр, фотодетектор и блок сбора и обработки информации, таким образом, что излучение, прошедшее через второе зеркало, пропускают через интерферометр Фабри-Перо, длину которого устанавливают равной длине резонатора фемтосекундного лазера. Для получения интерференционной картины длину интерферометра сканируют вблизи заданного значения на величину порядка длины волны с помощью генератора пилообразного напряжения, синхронизованного с задающим синтезатором. Излучение, прошедшее через интерферометр Фабри-Перо, пропускают через полосовой оптический фильтр, выделяющий заданную спектральную полосу, и подают на фотодетектор, сигнал с которого поступает на один из входов блока сбора и обработки данных, на второй вход которого подают сигнал с низковольтного выхода генератора пилообразного напряжения. Блок сбора и обработки данных обрабатывает

интерференционную картину и формирует сигнал с частотой, равной сдвигу гребенки частот Δ , который определяется из следующего соотношения:

$$\Delta = \omega \cdot (q + \delta) / \Omega \quad (33)$$

где q – сдвиг фемтосекундной гребенки частот относительно максимума частоты полосы пропускания интерферометра Фабри-Перо;

Ω – область свободной дисперсии интерферометра Фабри-Перо;

δ – сдвиг полос пропускания интерферометра Фабри-Перо вследствие его дисперсии, который определяется путем предварительной калибровки интерферометра.

С выхода блока сбора и обработки данных сигнал подают на один из входов блока фазовой привязки сдвига гребенки частот, на другой вход которого подают сигнал на частоте Δ_0 от синтезатора опорной частоты сдвига гребенки, опорный сигнал для которого поступает от задающего синтезатора. Таким образом, осуществляют фазовую привязку частотного сдвига Δ к частоте Δ_0 , так что $\Delta = \Delta_0$. При этом частоты синтезаторов частоты повторения импульсов фемтосекундного лазера ω , опорной частоты сдвига гребенки Δ и опорной частоты модулятора интенсивности F_0 синхронизованы между собой по фазе.

На рисунке 19 приведена функциональная схема устройства, реализующего предлагаемый способ.

Устройство содержит: 1 - синтезатор опорной частоты модулятора интенсивности F_0 ; 2 - фазовращатель; 3 - управляемый формирователь импульсов; 4 - синтезатор опорной частоты повторения импульсов фемтосекундного лазера ω_0 ; 5 - блок фазовой привязки частоты повторения импульсов фемтосекундного лазера; 6 – фотодетектор для выделения частоты повторения импульсов фемтосекундного лазера ω_0 ; 7 - задающий синтезатор; 8 - фемтосекундный лазер; 9, 10 - делительные зеркала; 11 - модулятор интенсивности; 12 - синтезатор опорной частоты сдвига гребенки Δ_0 ; 13 - блок фазовой привязки сдвига частотной гребенки излучения фемтосекундного лазера, 14 - блок сбора и обработки информации; 15 -

интерферометр Фабри-Перо; 16 - генератор пилообразного напряжения; и 17 - полосовой оптический фильтр; 18 – фотодетектор для выделения сдвига гребенки Δ .

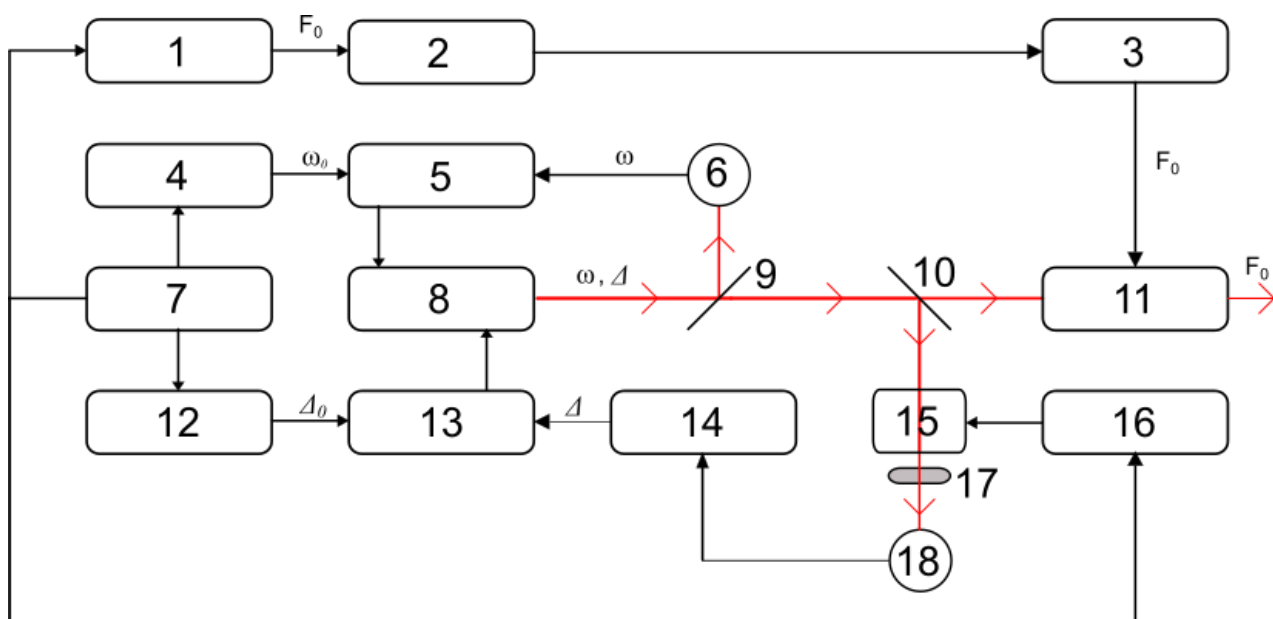


Рисунок 19 – Схема получения последовательности идентичных фемтосекундных импульсов с помощью интерферометра Фабри-Перо и электрооптического модулятора

Фемтосекундный лазер 8 по оптическому каналу связан с делительным зеркалом 9, а кабельной связью – с блоком фазовой привязки сдвига частотной гребенки излучения фемтосекундного лазера 13 и блоком фазовой привязки частоты повторения импульсов фемтосекундного лазера 5; задающий синтезатор 7 имеет кабельную связь с синтезатором опорной частоты модулятора интенсивности 1, с синтезатором опорной частоты повторения импульсов фемтосекундного лазера 4, с синтезатором опорной частоты сдвига гребенки 12 и с генератором пилообразного напряжения 16; синтезатор опорной частоты повторения импульсов фемтосекундного лазера 4 имеет кабельную связь с задающим синтезатором 7 и блоком фазовой привязки частоты повторения импульсов фемтосекундного лазера 5; синтезатор опорной частоты сдвига гребенки 12 имеет кабельную связь с задающим синтезатором 7 и блоком фазовой привязки сдвига частотной гребенки

излучения фемтосекундного лазера 13; синтезатор опорной частоты модулятора интенсивности 1 имеет кабельную связь с задающим синтезатором 7 и фазовращателем 2; делительное зеркало 9 по оптическим каналам связано с фемтосекундным лазером 8, с делительным зеркалом 10 и фотоприемником 6; делительное зеркало 10 по оптическим каналам связано с делительным зеркалом 9, с интерферометром Фабри-Перо 15 и с модулятором интенсивности 11, интерферометр Фабри-Перо 15 по оптическому каналу связан полосовым оптическим фильтром 17, а по кабельному каналу – с генератором пилообразного напряжения 16, имеющим кабельную связь с задающим синтезатором 7; полосовой оптический фильтр 17 по оптическому каналу связан с фотодетектором 18; фотодетектор 18 также имеет кабельную связь с блоком сбора и обработки информации 14, имеющем кабельную связь с блоком фазовой привязки сдвига частотной гребенки излучения фемтосекундного лазера 13, который также имеет кабельные связи с фемтосекундным лазером 8 и синтезатором опорной частоты сдвига гребенки 12; фотоприемник 6 по оптическому каналу связан с делительным зеркалом 9, а кабельной связью – с блоком фазовой привязки частоты повторения импульсов фемтосекундного лазера 5, также имеющим кабельную связь с фемтосекундным лазером 8 и с синтезатором опорной частоты повторения импульсов фемтосекундного лазера 4; фазовращатель 2 имеет кабельную связь с синтезатором опорной частоты модулятора интенсивности 1 и с управляемым формирователем импульсов 3, который имеет кабельную связь с модулятором интенсивности 11, связанным по оптическому каналу с делительным зеркалом 10.

Способ осуществляется следующим образом. Излучение фемтосекундного лазера 8 поступает от делительного зеркала 9 на фотодетектор 6, где выделяется сигнал на частоте повторения импульсов ω , который далее подается на блок фазовой привязки частоты повторения импульсов 5, куда поступает также сигнал на частоте ω_0 от синтезатора 4, для которого в качестве опорной используется частота с задающего синтезатора 7.

Блок фазовой привязки частоты 5 стабилизирует частоту повторения импульсов, так что $\omega = \omega_0$.

Излучение фемтосекундного лазера, прошедшее через делительное зеркало 9, падает на делительное зеркало 10, отражаясь от которого проходит через интерферометр Фабри-Перо 15 и полосовой оптический фильтр 17, выделяющий заданную спектральную полосу, и поступает на фотодетектор 18, сигнал с которого поступает на один из входов блока сбора и обработки данных 14, на второй вход которого поступает сигнал с низковольтного выхода генератора пилообразного напряжения 16. Блок сбора и обработки данных 14 обрабатывает интерференционную картину и, согласно выражению (3), формирует на выходе сигнал с частотой, равной сдвигу гребенки частот Δ , который подается на один из входов блока фазовой привязки частоты 13, на другой вход которого поступает сигнал на частоте Δ_0 от синтезатора частоты сдвига гребенки 12, опорный сигнал для которого поступает от задающего синтезатора 7. Таким образом, осуществляется фазовая привязка частотного сдвига Δ к частоте Δ_0 , так что $\Delta = \Delta_0$. При этом указанная схема выделения частотного сдвига Δ не требует ширины спектра излучения равной октаве или более.

Синтезатор опорной частоты модулятора интенсивности 1 с опорной частотой, задаваемой задающим синтезатором 7, вырабатывает сигнал на частоте F_0 , который удовлетворяет условиям, представленным в выражениях (1) и (2). Этот сигнал через фазовращатель 2 подается на управляемый формирователь импульсов 3 и далее на модулятор интенсивности 11, излучение фемтосекундного лазера на который поступает через делительное зеркало 10. Фазовращатель 2 устанавливает сдвиг фазы несущей относительно огибающей, так что из всех возможных последовательностей идентичных импульсов можно селектировать различные последовательности с дискретностью сдвига фазы несущей относительно огибающей, равной $2\pi/k$.

Техническим результатом предлагаемого изобретения является получение последовательности идентичных импульсов с возможностью

селекции заданной разности фаз между несущей и огибающей для фемтосекундного излучения с произвольной шириной спектра.

4.4 Схема получения последовательности идентичных фемтосекундных импульсов с помощью электрооптического модулятора

Функциональная схема формирователя излучения без сдвига частотной гребенки [52-62] представлена рис. 20. Для стабилизации параметров фемтосекундного лазера и синтезированной последовательности импульсов используются синтезаторы опорной частоты повторения импульсов f_{rep} , сдвига гребенки f_0 фемтосекундного лазера и частоты повторения синтезированной последовательности импульсов F_{rep} . В качестве опорной для всех синтезаторов используется частота стандарта. Излучение фемтосекундного лазера поступает от делительного зеркала на фотодетектор, где выделяется сигнал на частоте повторения импульсов f_{rep} , который далее подается на блок фазовой привязки частоты, куда поступает также сигнал на частоте f_{rep} от синтезатора. Блок фазовой привязки частоты стабилизирует частоту повторения импульсов.

Излучение фемтосекундного лазера, прошедшее через делительное зеркало, падает на делительное зеркало, отражаясь от которого поступает на f - $2f$ -интерферометр, откуда выделяемый сигнал на частоте сдвига гребенки фемтосекундного лазера f_0 подается на один из входов блока фазовой привязки частоты, а на другой вход поступает сигнал от синтезатора частоты. Таким образом, осуществляется фазовая привязка частотного сдвига.

Синтезатор вырабатывает сигнал на частоте F_{rep} . Этот сигнал через фазовращатель подается на формирователь импульсов и далее на модулятор интенсивности, излучение фемтосекундного лазера на который поступает через делительное зеркало. Фазовращатель устанавливает фазу на максимум прошедшего через модулятор интенсивности излучения фемтосекундного лазера.

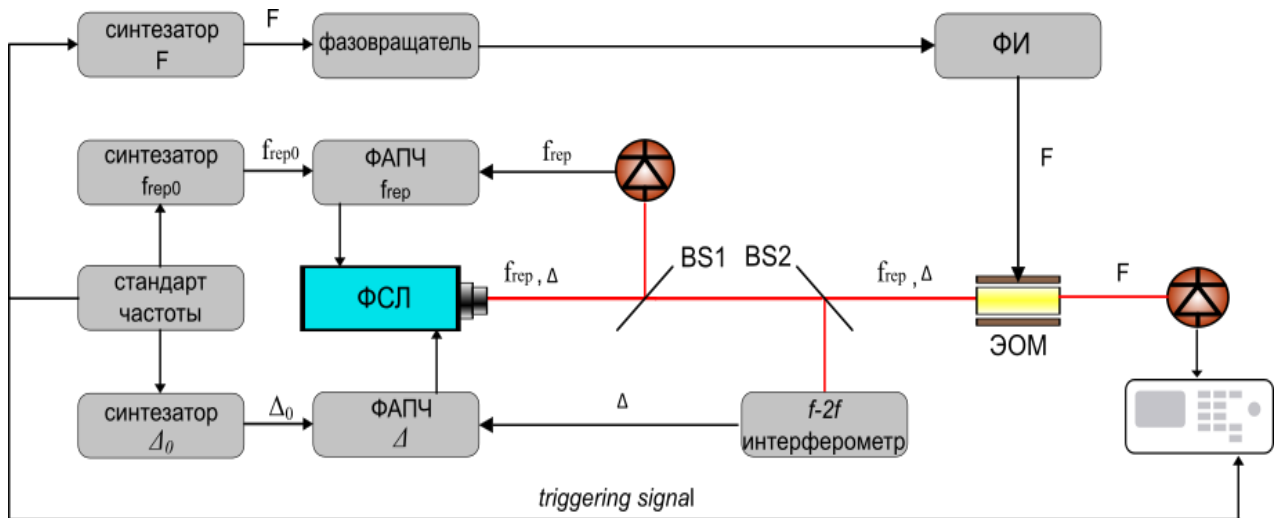


Рисунок 20 – Схема генерации излучения с управляемой CEP.

ФСЛ - фемтосекундный лазер, ФАПЧ – блок фазовой автоподстройки частоты, ФИ – формирователь управляющих импульсов, BS - светоделители, ЭОМ - электрооптический модулятор Маха-Цендера

Далее опишем работу основных блоков схемы: стабилизации частоты повторения и сдвига частотной гребенки фемтосекундного лазера, формирователя управляющих импульсов, электрооптического модулятора, а также селектора идентичных фемтосекундных импульсов, состоящего из синтезатора опорной частоты F , фазовращателя, формирователя управляющих импульсов и электрооптического модулятора.

Стабилизация частоты повторения фемтосекундного лазера осуществлялась следующим образом (см. рис 21). Сигнал четвертой гармоники частоты повторения смешивался с сигналом на частоте 980 МГц, подаваемом с выхода модуля фиксированного синтезатора частот DRO, для получения частоты 20 МГц. Промежуточная частота измерялась с помощью частотомера. Также сигнал на промежуточной частоте поступал на один из входов фазового детектора RFC, на другой вход которого подавался сигнал с низкочастотного перестраиваемого синтезатора DDS120. Сигнал ошибки с выхода фазового детектора подавался на ПИД-регулятор, выходной сигнал которого, усиленный с помощью усилителя HVA150 управлял

пьезокерамическим преобразователем, установленным на зеркало лазерного резонатора, меняя длину резонатора, а, следовательно, и частоту повторения.

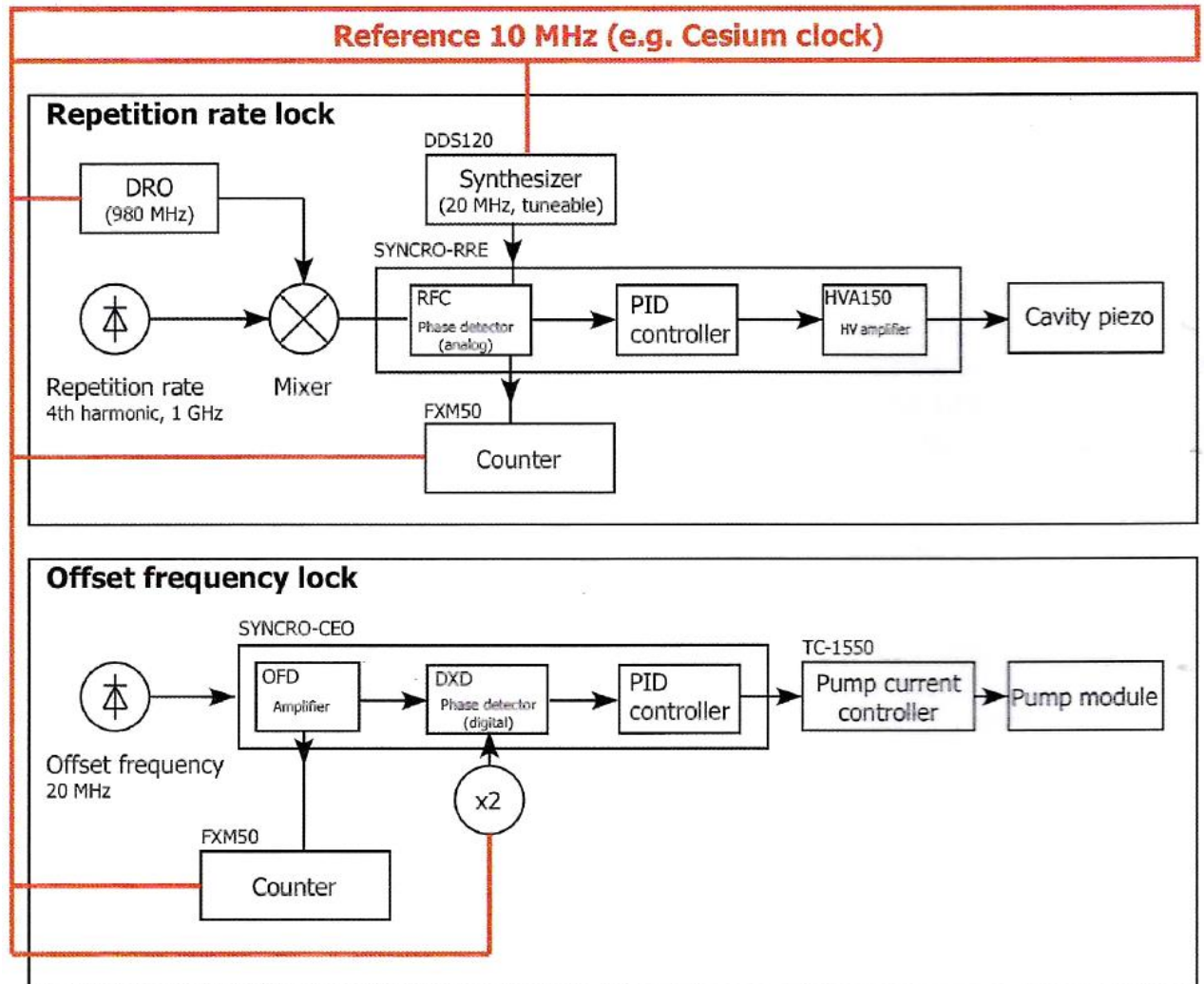


Рисунок 21 – Стабилизация частоты повторения и сдвига частотной гребенки фемтосекундного лазера MenloSystems FC1500-250WG [86]

Стабилизация сдвига частотной гребенки фемтосекундного лазера осуществлялась следующим образом (см. рис 21). Сигнал с выхода фотодетектора на частоте, равной сдвигу частотной гребенки лазера, усиливался, измерялся на частотомере, и подавался на вход фазового детектора DXD, на другой вход которого поступал опорный сигнал с синтезатора эталонной частоты сдвига частотной гребенки. Сигнал ошибки с выхода фазового детектора подавался на ПИД-регулятор, выходной сигнал

которого управлял мощностью накачки фемтосекундного лазера и сдвигом частотной гребенки.

Даная схема обеспечивает стабилизацию только $\Delta=20$ МГц. Для выполнения условий получения идентичных фемтосекундных импульсов (выражение 27), необходимо чтобы блок SYNCRO-CEO обеспечивал стабилизацию частот сдвига, кратных частоте повторения (250 МГц). Поэтому блок был оптимизирован. Во-первых, узкополосный фильтр (с максимумом на частоте 20 МГц) в блоке OFD был заменен на широкополосный, с полосой 1...100 МГц). Во-вторых, удвоитель частоты внешнего стандарта, сигнал с выхода которого питал один из входов фазового детектора DXD, был заменен на синтезатор частот. Это позволило нам стабилизировать сдвиг частотной гребенки в диапазоне 1...100 МГц.

Функциональная схема разработанного по моему техническому заданию формирователя импульсов управляющих модулятором приведена на рис. 22. На рис. 23. Приведены временные диаграммы, описывающие работу устройства.

Входной сигнал, поступает на буферный усилитель, на выходе которого формируется импульсный сигнал КМОП уровня. На выходе инвертора наблюдаем инверсную копию входного сигнала. С помощью линии задержки сигнал запаздывает на величину dt . по сравнению с выходным сигналом инвертора. Конечным пунктом является конъюнкция, с помощью которой происходит операция логического умножения запаздывающего сигнала с его инверсной копией. Мгновенное значение напряжения электрического сигнала, соответствующее высокому уровню КМОП, будет совпадать на обоих входах логического «И» во временной промежуток, равный dt . В результате логического умножения на выходе устройства получаем импульсный электрический сигнал необходимой длительности.

На рисунке 24 показана полученная характеристика пропускания модулятора интенсивности в зависимости от напряжения смещения. Отметим, что конструкция модулятора предусматривала возможность тонкой

подстройки характеристики с помощью дополнительно прикладываемого напряжения смещения, что обеспечивало лучший контраст.

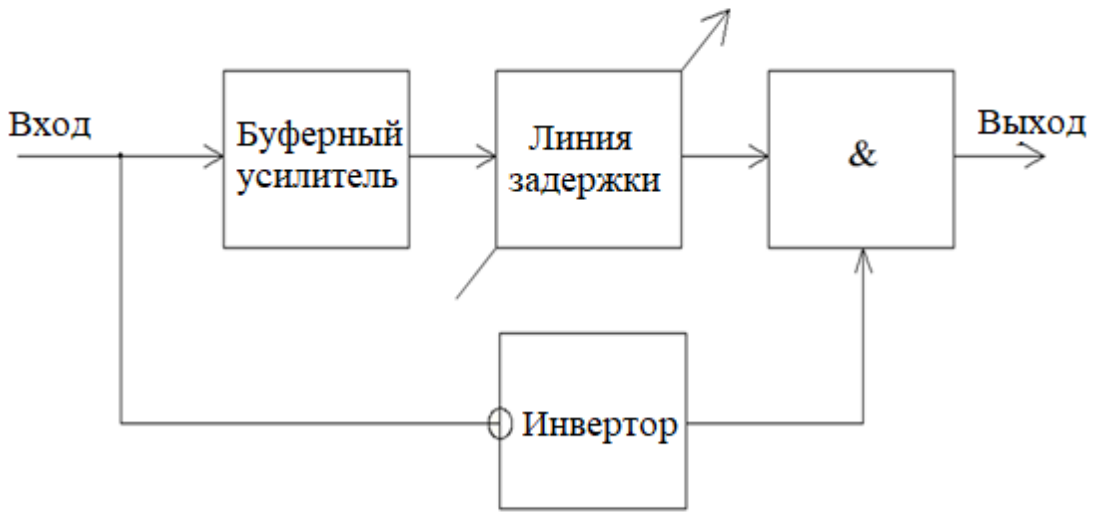


Рисунок 22 – Функциональная схема формирователя импульсов

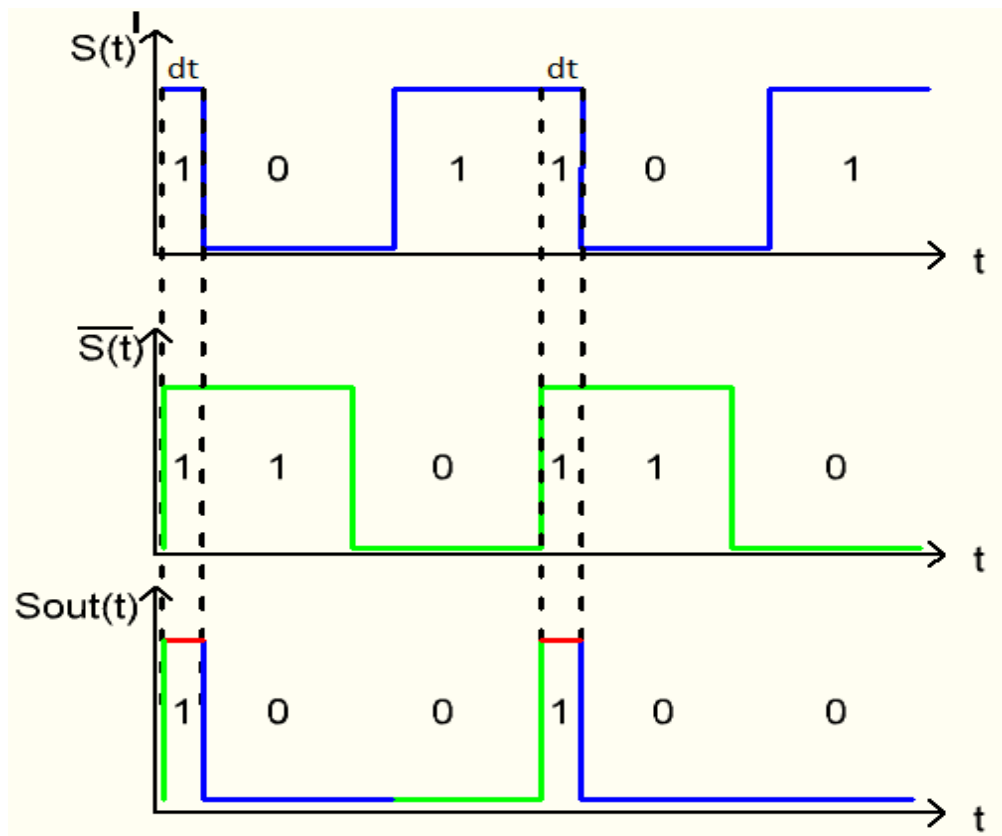


Рисунок 23 – Временные диаграммы формирователя импульсов.

$S(t)$ – входной сигнал с задержкой dt ; $\overline{S(t)}$ – инвертированный входной сигнал; $S_{out}(t)$ – выходной сигнал

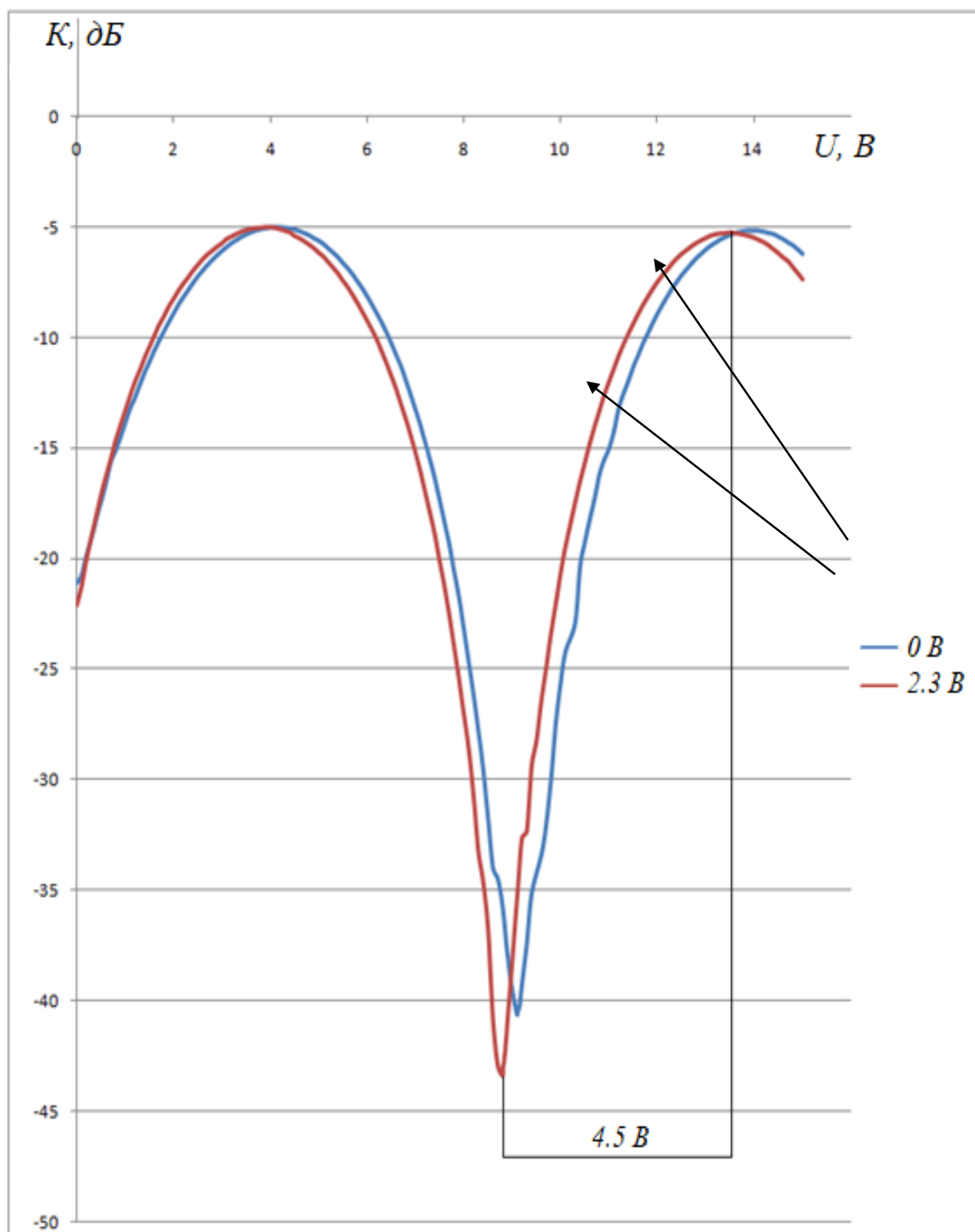


Рисунок 24 – Рабочая характеристика модулятора интенсивности

В первых экспериментах формирователь импульсов, управляющий модулятором должен генерировать такой сигнал, при котором модулятор будет пропускать только один из пяти импульсов фемтосекундного лазера.

Поскольку частота повторения импульсов фемтосекундного лазера составляла 250 МГц, то длительность управляющего импульса должна была быть короче 4 нс. На рисунке 25 показаны временные зависимости выходного сигнала формирователя импульсов (верхний график) и соответствующего ему коэффициента пропускания модулятора (нижний график). Вертикальными оранжевыми линиями обозначены импульсы фемтосекундного лазера, длительность которых (60 фс) много меньше длительности управляющего сигнала.

Из рисунка видно, что в формирователе импульсов присутствует переходной процесс. Из-за этого временная зависимость коэффициента пропускания модулятора интенсивности имеет дополнительный локальный максимум. Если подстроить фазу управляющего сигнала так, чтобы один из импульсов лазера попадал в максимум пропускания модулятора, то следующий за ним импульс будет попадать на задний фронт переходного процесса, где пропускание модулятора составляет примерно 18% от максимума. Из-за этого не будет происходить «чистого» выделения требуемой последовательности импульсов.

Однако нами было замечено, что, если увеличивать длительность сигнала формирователя, то можно получить режим, при котором второй фемтосекундный импульс будет приходиться на ноль управляющего модулятором сигнала, а локальный экстремум коэффициента пропускания будет попадать между вторым и третьим импульсами лазера (рис. 26).

Длительность импульса управляющего сигнала менялась путем изменения напряжения смещения сигнала синтезатора опорной частоты повторения полученной последовательности F (рис. 20). Видно, что при напряжении смещения 1.2 В достигается необходимый нам режим. На рис. 27 приведена соответствующая ему временная зависимость коэффициента пропускания модулятора.

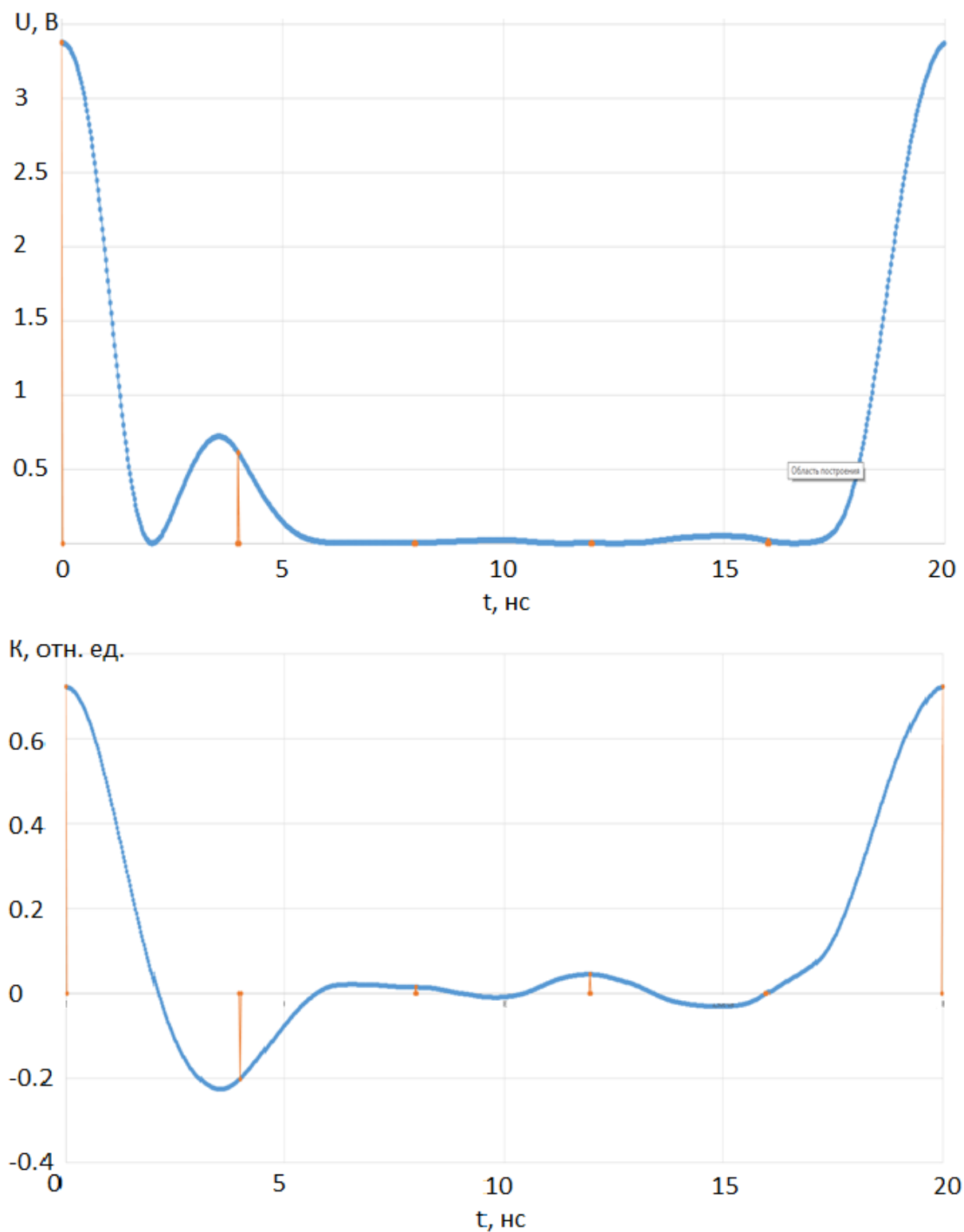


Рисунок 25 – Временные зависимости выходного сигнала формирователя импульсов (верхний график) и соответствующего ему коэффициента пропускания модулятора (нижний график)

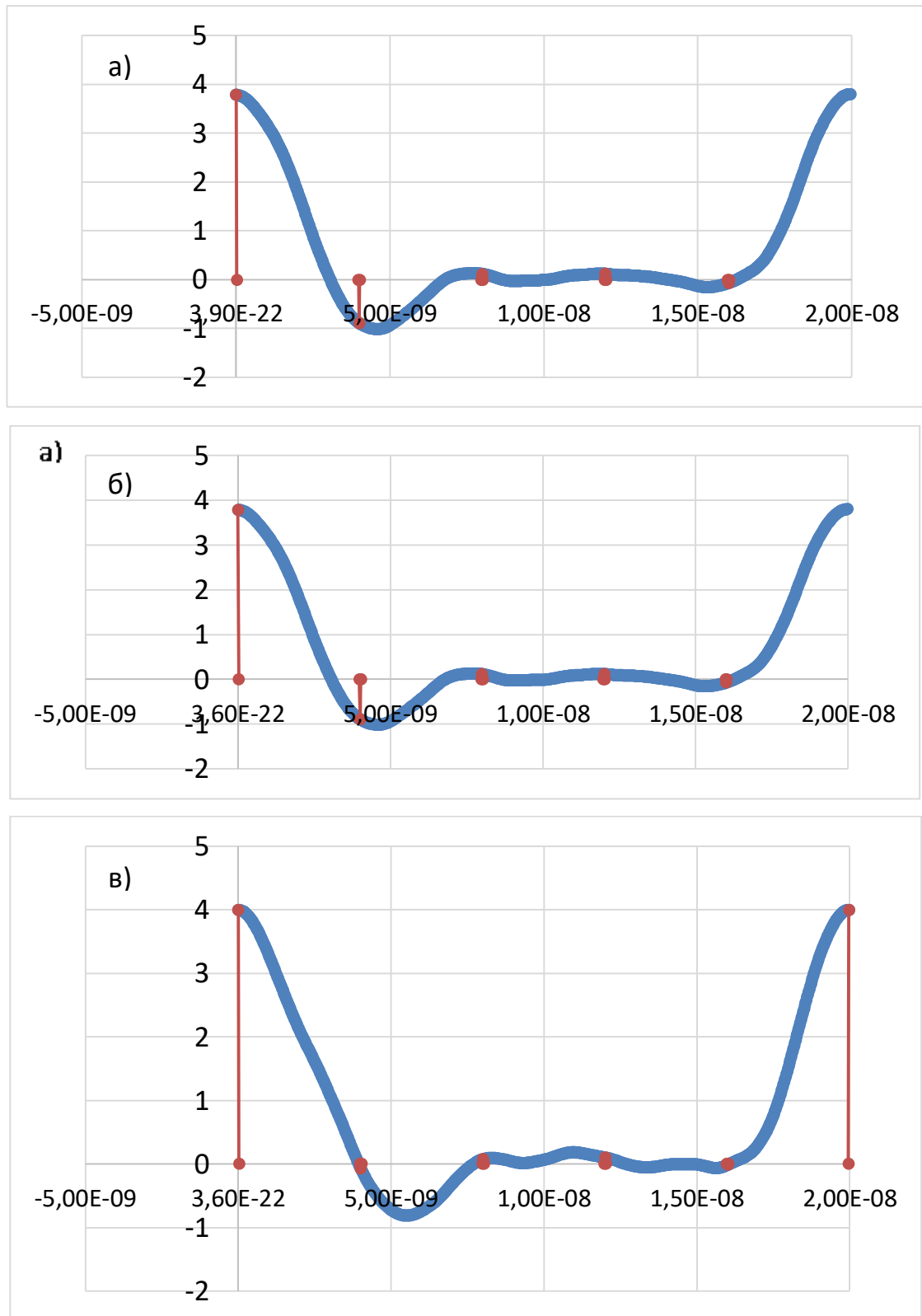


Рисунок 26 – Выходной сигнал формирователя импульсов при различных значениях напряжения смещения сигнала задающего генератора: 1 В (а), 1.1 В (б), 1.2 В (в). По оси абсцисс отложено время (в секундах), по оси ординат – напряжение (в вольтах)

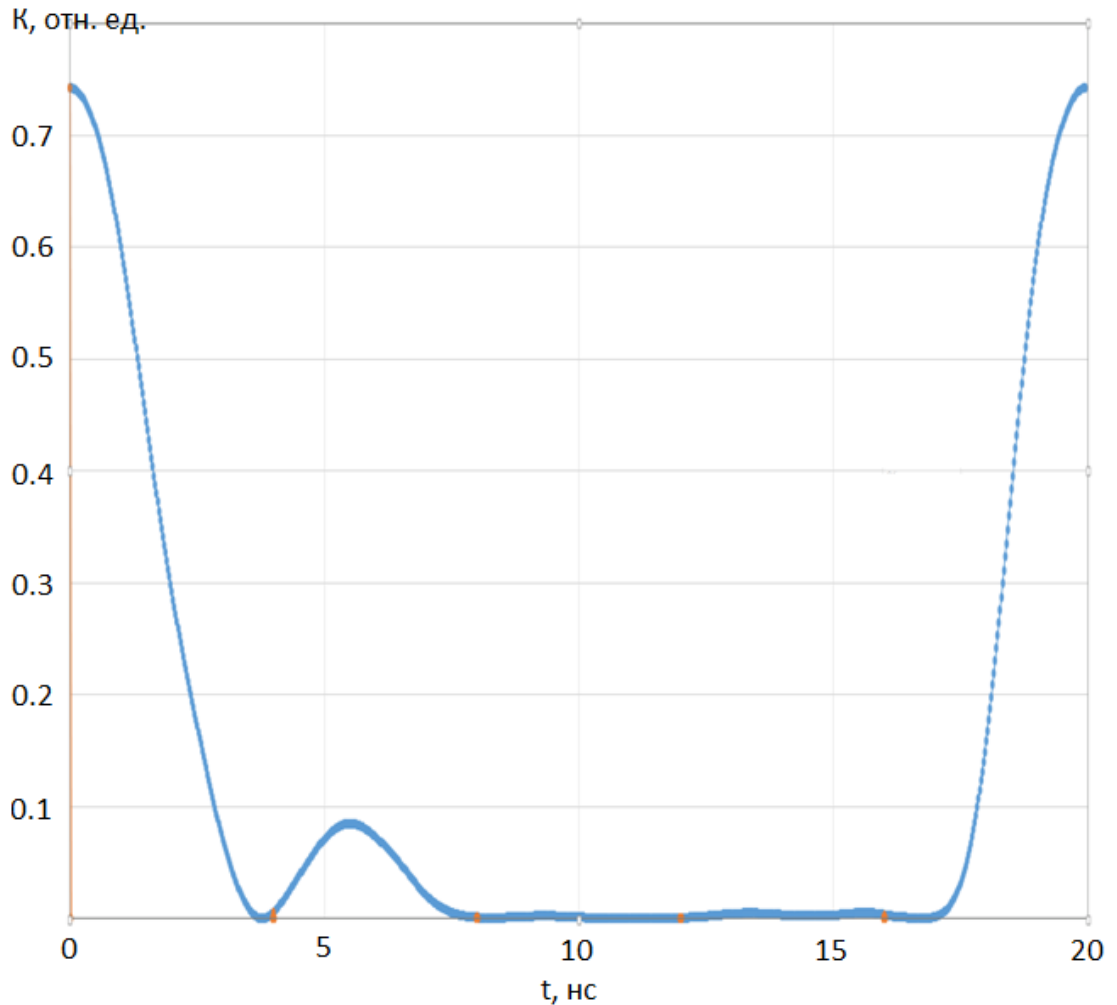


Рисунок 27 – Временная зависимость коэффициента пропускания модулятора при $U_{см}=1.2$ В

4.5 Экспериментальные результаты и их обсуждение

Эксперименты проводились на волоконном фемтосекундном лазере MenloSystemsFC1500-250WG с частотой следования импульсов $f_{rep} = 250$ МГц и измененным сдвигом частотной гребенки $\Delta=50$ МГц. Частота следования импульсов была привязана к частоте 10 МГц прецизионного генератора Stanford SG384 с внутренним стандартом частоты. Этот генератор также задавал смещение гребенки Δ и частоту повторения импульсов F_{rep} синтезированной последовательности импульсов. Синтезатор эталонной частоты повторения синтезированной последовательности импульсов и фазовращатель были объединены в цифровом генераторе сигналов, который

также был привязан к стандарту частоты. Сигнал на частоте F_{rep} поступил на генератор импульсов, управляющий модулятором интенсивности, на выходе которого синтезировалась последовательность идентичных фемтосекундных импульсов с частотой повторения F_{rep} . Фазовращатель, управляющий модулятором позволял выделять последовательность импульсов с заранее определенной разностью фаз между несущей и огибающей. Перестройка фазы на 360 градусов соответствовала временному сдвигу 20 нс.

Для получения графика временной характеристики коэффициента пропускания селектора импульсов мы сняли временные зависимости синтезированных последовательностей с шагом перестройки фазы VCO 1 градус. На рисунке 28 приведен фрагмент этой записи. Отметим, что мы следили за амплитудой импульса, соответствующего конкретной временной отсечке относительно фазы генератора VCO (в нашем случае она составляла 24 нс). Фаза VCO и шаг, показанные на рисунке выбраны для того, чтобы проиллюстрировать момент «перехода» на новую последовательность с фазой, увеличенной на $2\pi/5$. При фазах $57^0 \leq \varphi \leq 93^0$ амплитуда выбранного импульса резко падала. Также из этого рисунка видно, что диапазон тонкой подстройки фазы VCO, когда все ещё выделяется «чистая» последовательность импульсов, составляет 28 градусов.

На рисунке 29 приведена временная зависимость коэффициента пропускания селектора импульсов, состоящего из фазовращателя, генератора, управляемого напряжением и модулятора интенсивности. Форма коэффициента пропускания определяется сигналом VCO. Из рисунка видно, что его ширина по нулевому уровню составляет порядка 7.8нс, что превышает расстояние между импульсами фемтосекундного лазера (4 нс). Однако такая ширина позволяет получать на выходе модулятора «чистую» последовательность фемтосекундных импульсов (когда из исходной последовательности выделяется каждый пятый импульс) в достаточно большом диапазоне перестройки фазы управляющего сигнала.

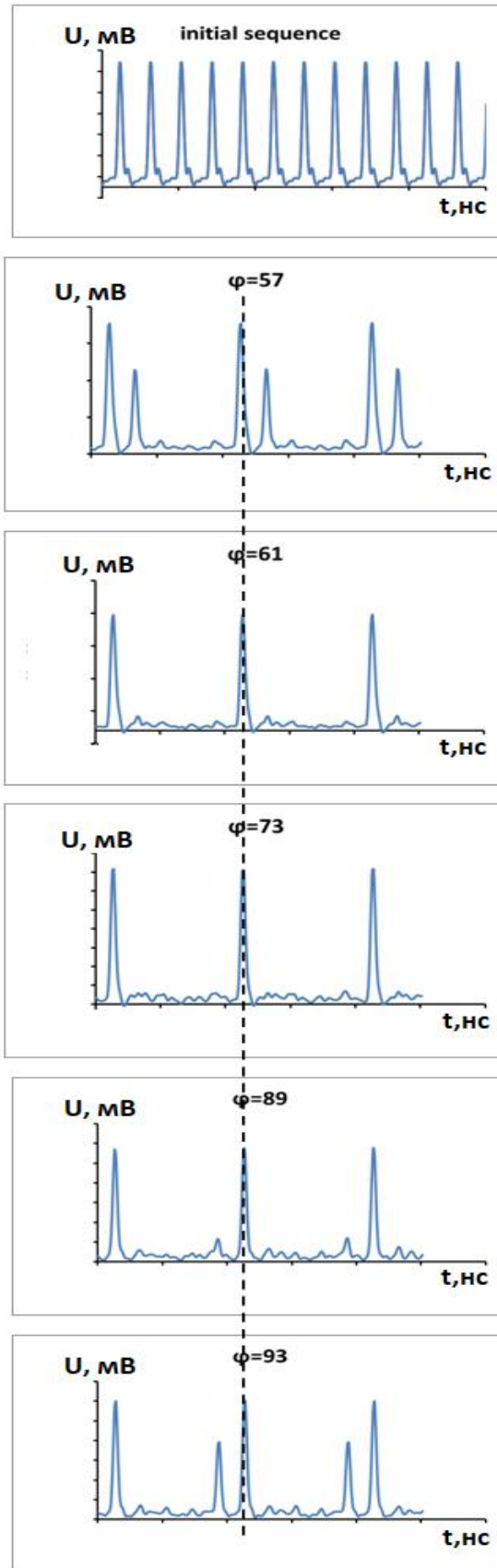


Рисунок 28 – Выходной сигнал модулятора при перестройке его фазы. Цена деления: по оси абсцисс – 10 нс., по оси ординат – 5 мВ

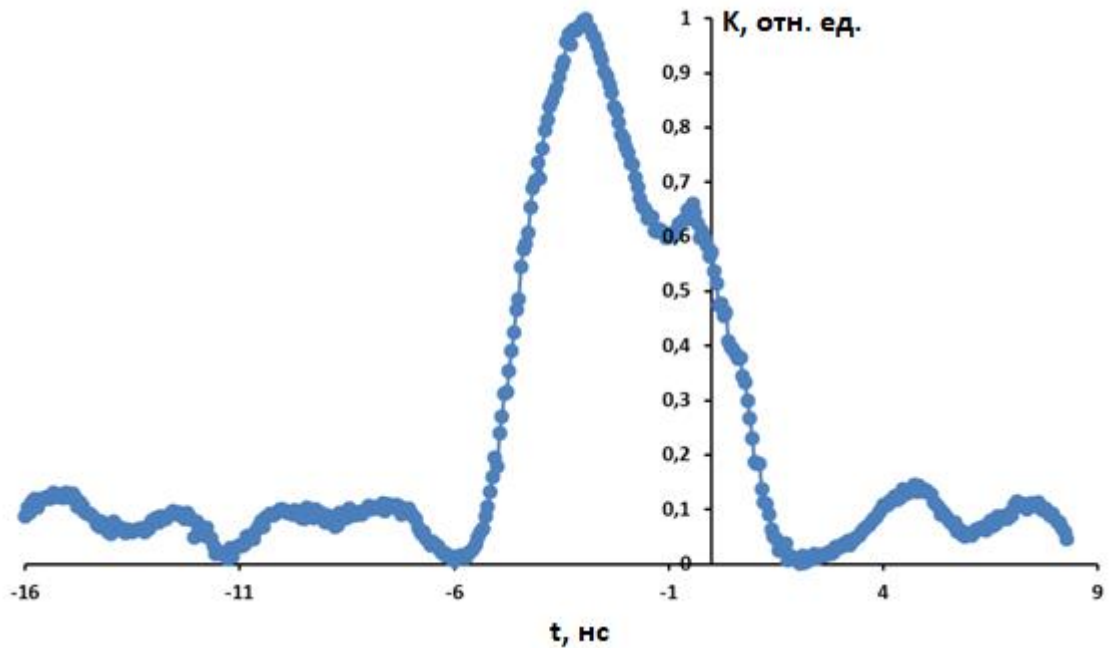


Рисунок 29 – Временная зависимость коэффициента пропускания селектора импульсов

В идеальном случае, если бы он имел П-образную форму, то ширина этого диапазона составила бы $72^{\circ}/2=36^{\circ}$. В нашем же случае этот диапазон составил 28° .

Наличие низкоамплитудных боковых компонент объясняется, во-первых, формой выходного сигнала VCO, а, во-вторых, недостаточно низким контрастом модулятора. Однако даже такая форма коэффициента пропускания

В эксперименте $k=f_{rep}/F_{rep} = 5$, что позволило нам синтезировать пять разных последовательностей с СЕР, отличающимися друг от друга на 72 градуса. На рисунке 30 показаны эти последовательности, записанные на цифровом осциллографе с полосой пропускания 1 ГГц. Также для сравнения приведена запись исходной последовательности. Разрешение было ограничено полосой пропускания регистрирующей системы.

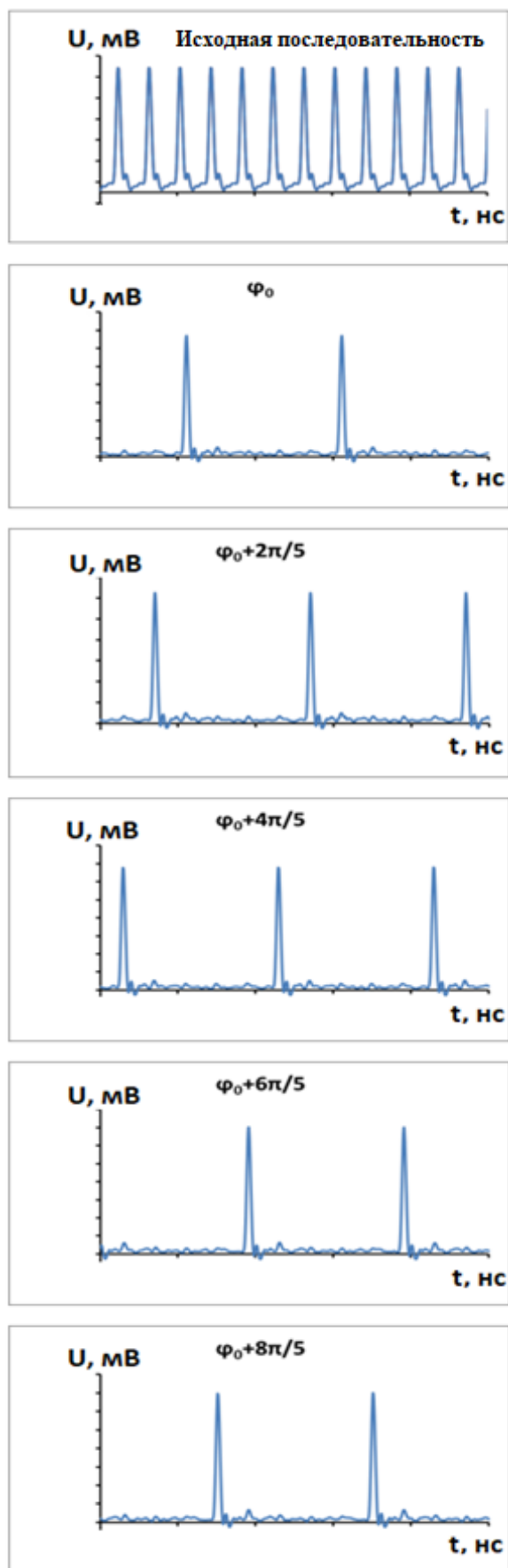


Рисунок 30 – Синтезированные последовательности идентичных импульсов.

Цена деления: по оси абсцисс – 10 нс., по оси ординат – 5 мВ

Модулятор выделяет каждый пятый импульс из исходной последовательности фемтосекундных импульсов. Наличие низкоамплитудных (не более 10% от амплитуды основных импульсов) «промежуточных» импульсов объясняется видом временной характеристики формирователя импульсов, управляющего модулятором, и частотной характеристикой фотоприемника.

ГЛАВА 5 СНИЖЕНИЕ ДИСКРЕТНОСТИ УСТАНОВКИ ФАЗЫ МЕЖДУ ОГИБАЮЩЕЙ И НЕСУЩЕЙ. СОЗДАНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ УЛЬТРАКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ С ЗАДАННЫМ СКОЛЬЖЕНИЕМ ФАЗЫ МЕЖДУ СОСЕДНИМИ ИМПУЛЬСАМИ.

5.1 Получение последовательностей идентичных импульсов с малым значением дискретности фазы между огибающей и несущей.

Наиболее очевидный путь создания последовательностей идентичных фемтосекундных импульсов при управлении СЕР с малой величиной дискретности связан с уменьшением отношения Δ/f [44, 47, 60]. При этом Δ должно существенно превышать величину флуктуаций скольжения СЕР в режиме свободной генерации. В этом случае можно выбирать различные частоты повторения импульсов синтезированной последовательности:

$$F=f/(k \cdot g). \quad (34)$$

Здесь g (как и k) может принимать любые целые значения. Величина F может быть уменьшена до сколь угодно малой величины, а ее максимальное значение достигается при $g=1$.

Однако при таком подходе нельзя достичь малой дискретности СЕР (больших значений k), поскольку возможность варьирования частоты повторения и сдвига гребенки достаточно ограничена. С одной стороны, величина f связана с длиной резонатора и в коммерчески доступных фемтосекундных лазерах частота повторения не превышает величину порядка 1 ГГц. С другой стороны, при уменьшении сдвига частотной гребенки ухудшается его стабильность как показано на рисунке 31, где приведены зависимости среднеквадратичного отклонения частоты повторения импульсов и сдвига гребенки от величины CEO, полученные для модифицированного фемтосекундного синтезатора MenloSystems FC1500-250WG. CEO и частота

повторения импульсов измерялись с помощью фотодетекторов и частотомера, входящих в комплект синтезатора. В стандартной модификации он генерировал импульсы с частотой повторения $f=250$ МГц и СЕО, равным 20 МГц, которые задавались внутренним синтезатором. Замена узкополосного фильтра в блоке фазовой привязки СЕО, работавшего на частоте 20 МГц, на широкополосный, позволила устанавливать СЕО с помощью внешнего генератора в достаточно широком диапазоне.

Очевидно, что невозможно стабилизировать СЕО вблизи значений $\Delta=n\cdot f/2$, где n — любое целое число. Видно, что σ_f и σ_Δ достигают минимального значения при СЕО=20 МГц. При этом σ_Δ уже при частоте сдвига 10 МГц увеличивается на порядок. Кроме того, при СЕО \approx 10 МГц интервал времени, в течение которого Δ и f оставались стабильными, был значительно короче, чем при других значениях СЕО (десятки минут против десятков часов).

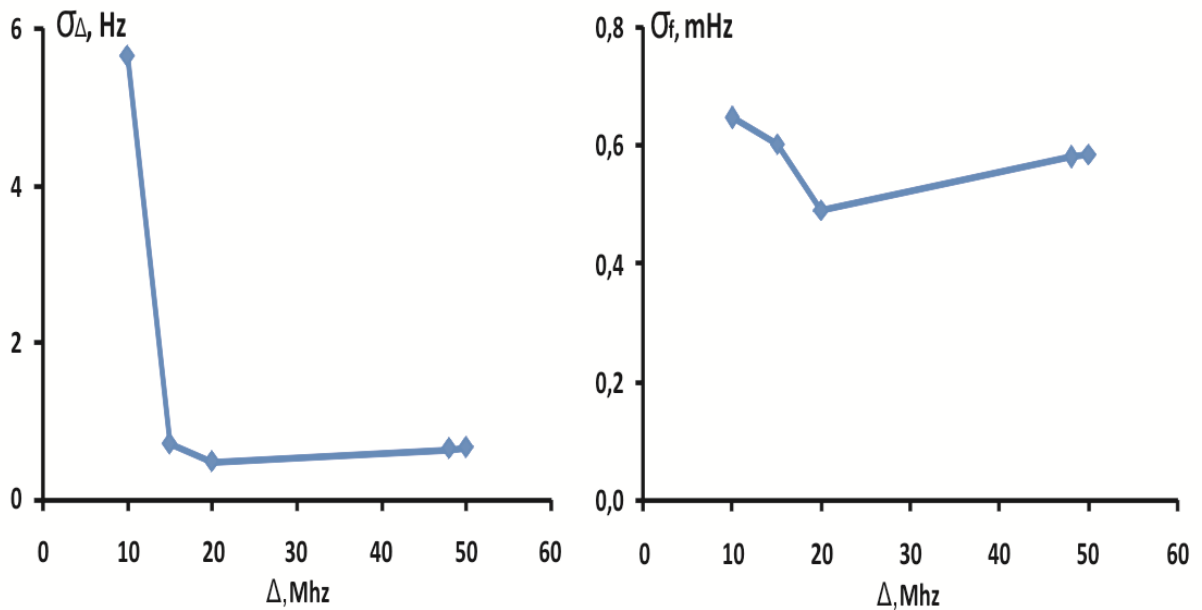


Рисунок 31 – Зависимости среднеквадратичного отклонения частоты повторения σ_f (а) и сдвига гребенки σ_Δ (б) от величины СЕО.

Радикальный путь увеличения дискретности перестройки СЕР связан с использованием отношения Δ/f , равного простой дроби. В этом случае дискретность установления фазы $2\pi/k$ будет задаваться величиной $2\pi\Delta/(f\cdot q)$ [6], где q - целое число, а ее величина будет равна

$$k=f \cdot q / \Delta \quad (35)$$

В то же время возможные частоты повторения синтезированных импульсов F будут по-прежнему определяться соотношением (1).

Схема получения последовательностей идентичных фемтосекундных импульсов с малой дискретностью перестройки фазы несущей относительно огибающей аналогична схеме, описанной в главе 4 (рис. 15), за исключением того, что в ней генератор, управляемый напряжением, работавший на частоте 50 МГц был заменен на формирователь импульсов, работающий в диапазоне частот 0,5...100 МГц.

Эксперименты проводились на волоконном фемтосекундном лазере MenloSystems FC1500-250WG с частотой следования импульсов $f = 250$ МГц и сдвигом частотной гребенки в области его максимальной стабильности (рис.31а), равным 21 МГц. Частота следования импульсов была привязана к частоте 10 МГц интегрированного стандарта. Этот стандарт также задавал смещение гребенки Δ и частоту повторения импульсов F синтезированной последовательности импульсов. Сигнал на частоте F поступал на формирователь импульсов, управляющий модулятором интенсивности, на выходе которого синтезировалась последовательность идентичных фемтосекундных импульсов с частотой повторения F . Фазовращатель, управляющий модулятором, позволял выделять последовательность импульсов с определенной разностью фаз между несущей и огибающей.

В эксперименте частота повторения лазерных импульсов составляла 250 МГц и, как следует из выражения (2), при выбранном значении сдвига частотной гребенки 48 МГц и величине $k = 125$, максимальное значение F равно 2 МГц [85].

На рисунке 32 приведены примеры синтезированных последовательностей фемтосекундных импульсов, записанных при перестройке фазы селектора импульсов с шагом $0,1^{\circ}$. Данные записи использовались для получения фазовой характеристики селектора (зависимости пропускания от фазы). При её построении, фиксировалась амплитуда импульсом, соответствующих

определенной временной отсечке (-62 нс на рис. 3). Фаза и шаг, показанные на рисунке, выбраны, чтобы показать, в каком диапазоне перестройки фазы селектора будет синтезирована одна и та же последовательность. Из этого рисунка также видно, что диапазон точной перестройки фазы, когда все еще имеет место «чистая» последовательность импульсов, составляет 1,3 градуса, что соответствует длительности управляющего импульса порядка 2 нс. Это перекрывает 45% от полного диапазона перестройки в 2,88 градуса, когда происходит «перескок» к последовательности с СЕР, отличающейся на $2\pi/125$.

На рисунке 33 показана зависимость коэффициента пропускания селектора импульсов, состоящего из синтезатора опорной частоты повторения синтезированной последовательности импульсов, фазовращателя, генератора, управляемого напряжением, и модулятора интенсивности, от фазы, установленной фазовращателем. Зависимость нормирована на максимальное пропускание. Видно, что фазовая характеристика является практически П-образной, что определяет резкую границу выделения соседних последовательностей импульсов.

Как упоминалось выше, селектор импульсов позволяет получить на выходе модулятора «чистую» последовательность идентичных фемтосекундных импульсов (когда из исходной последовательности каждый селектируется каждый 125-й импульс) в достаточно широком диапазоне перестройки фазы управляющего сигнала. Этот диапазон составляет $1,3^\circ$ (45% от возможных $2,88^\circ$).

Отношение частот исходной и синтезированной последовательностей импульсов равно 125. Это дает возможность синтезировать 125 различных последовательностей с шагом перестройки фазы несущей относительно огибающей $2,88^\circ$. На рисунке 34 приведены примеры таких последовательностей. Также наблюдаются "следы" импульсов исходной последовательности с интервалом между ними, равным 4 нс.

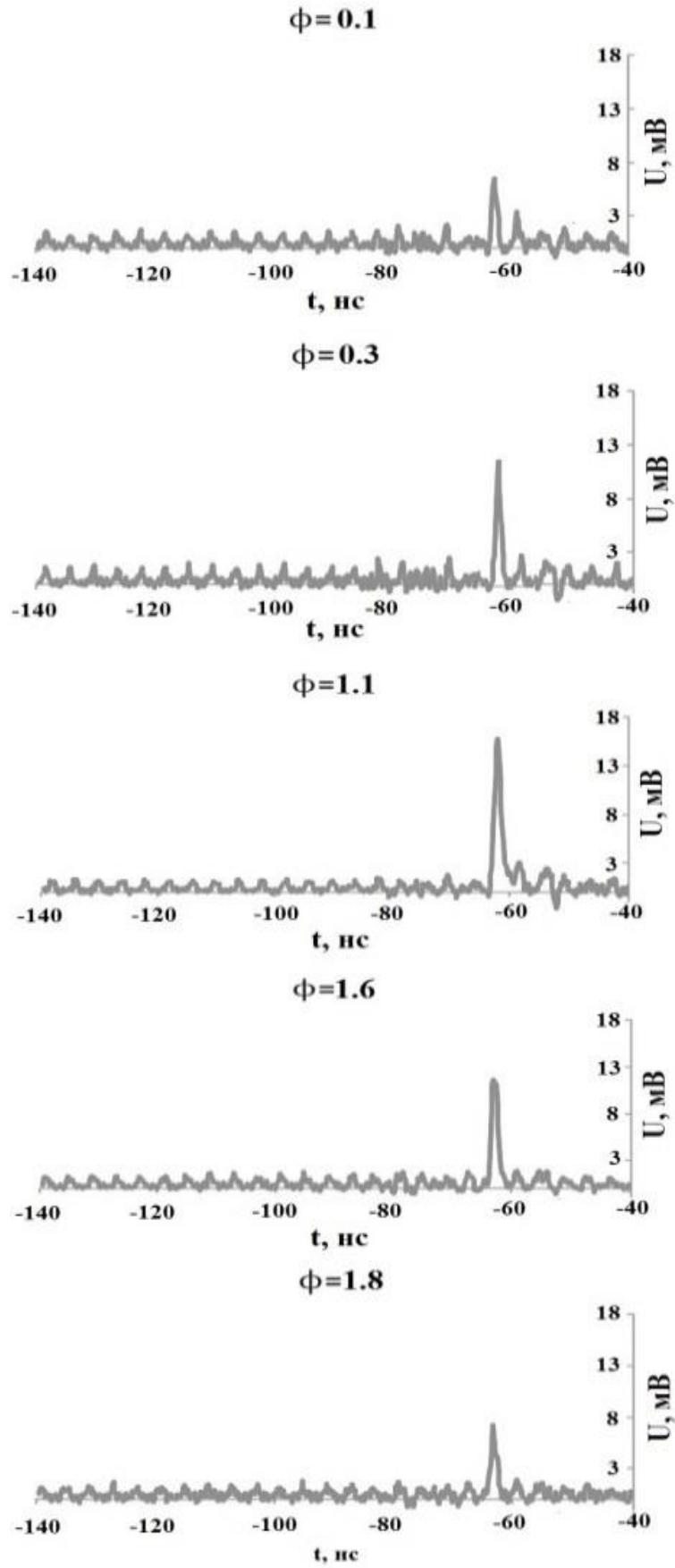


Рисунок 32 – Пропускание селектора импульсов при различных фазах управляющего сигнала

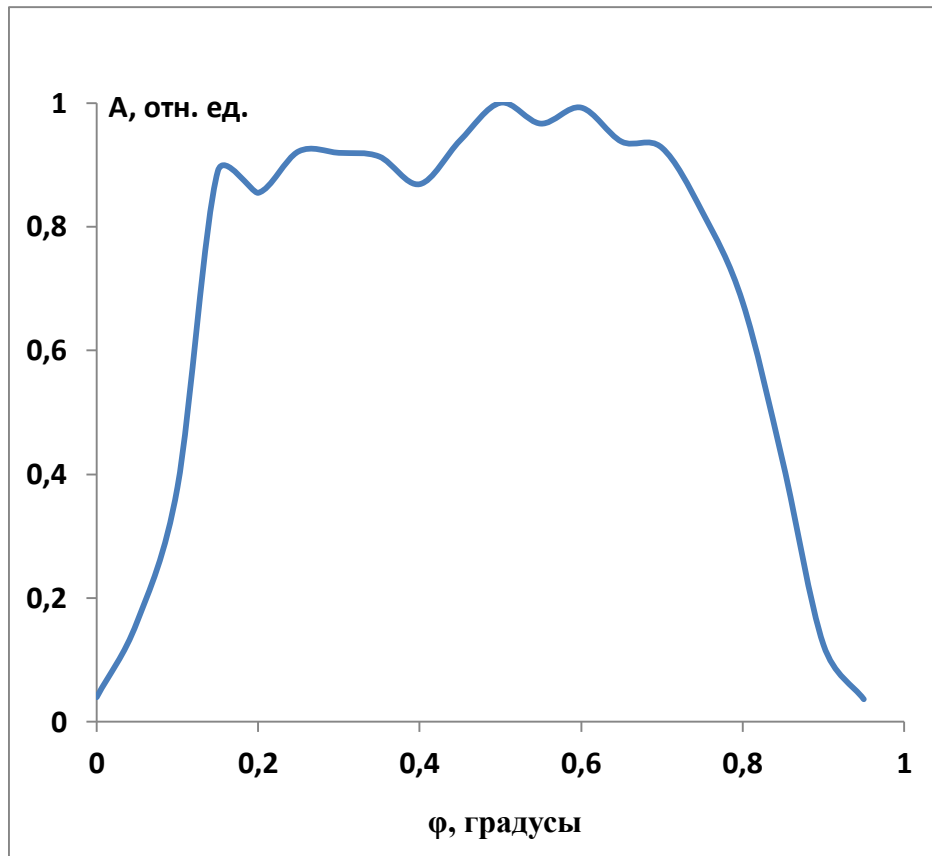


Рисунок 33 – Нормированный коэффициент пропускания селектора импульсов от фазы управляющего сигнала

Их наличие объясняется типом временной характеристики формирователя импульсов, управляющего модулятором, а также тем, что модулятор имеет конечное ослабление порядка 20 дБ.

На рисунке 35 приведены спектры последовательностей при различных фазах селектора импульсов. Фаза 1.1 градуса соответствует максимуму фазовой характеристики (рис. 33), когда синтезируется «чистая» последовательность, а фаза, равная 0.1 градуса – минимуму фазовой характеристики, когда управляющий сигнал отсутствует, а модулятор выставлен на минимальное пропускание. Видно, что относительная разница между этими спектрами составляет всего 12.5 %. Это объясняется тем, что хотя амплитуда "промежуточных" импульсов (рис.34), соответствующих закрытому модулятору, составляет всего 10% от амплитуды основных

импульсов, количество этих импульсов в 125 раз больше. Вследствие этого их суммарный спектр будет иметь достаточно большую интенсивность.

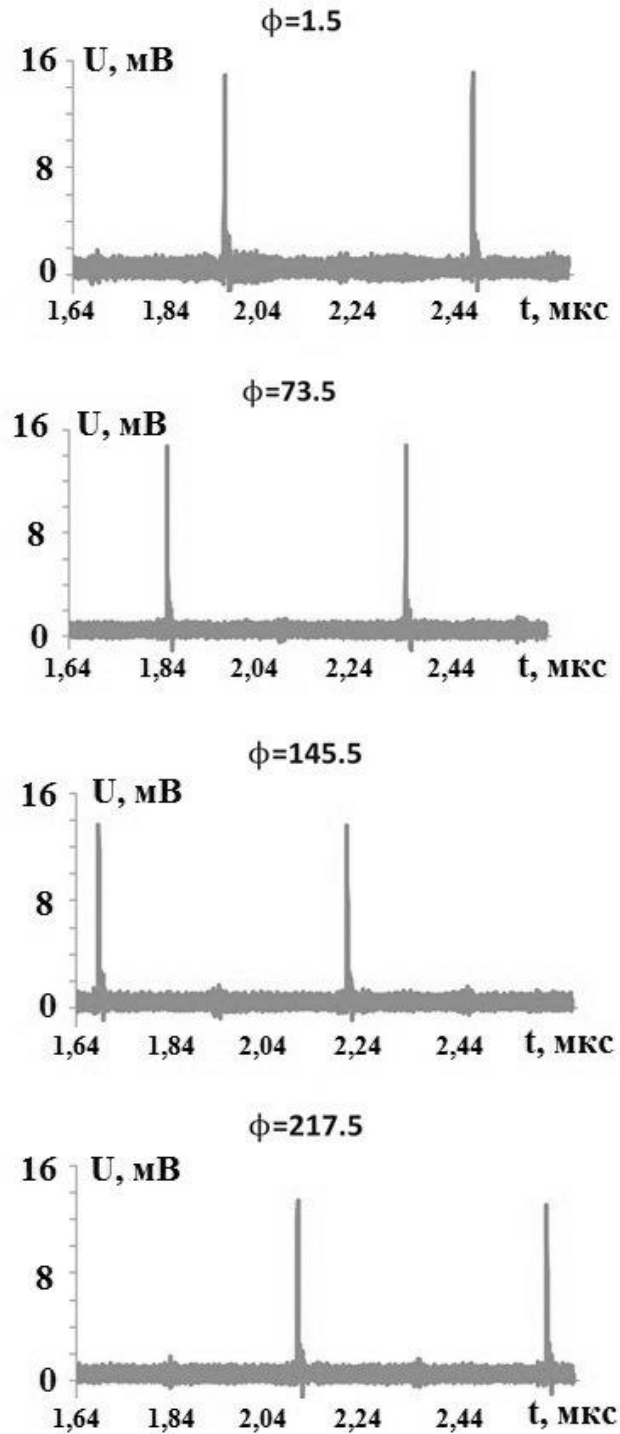


Рисунок 34 – Синтезированные последовательности идентичных импульсов

В случае "идеального" модулятора, который бы полностью подавлял "промежуточные" импульсы, спектры выглядели бы, как на рисунке 36, где

показаны разностные спектры, когда из спектров синтезированных последовательностей вычитался спектр прошедшего через выключенный модулятор излучения. Также видно, что разностные спектры отличаются друг от друга. Так, при отстройке фазы селектора от максимума пропускания, максимумы спектров смещаются в длинноволновую область спектра (пунктирные линии на рис. 33). Кроме того, снижается амплитуда длинноволновых максимумов обеих полос, а также изменяется отношение экстремумов спектров (рис. 34). Такая деформация спектров объясняется тем, что при отстройке селектируемые импульсы попадают на границы фазовой характеристики, которые имеют резкий спад, и деформируются. Несимметричность графиков отношений на рис. 37 обусловлена несимметричностью фазовой характеристики селектора.

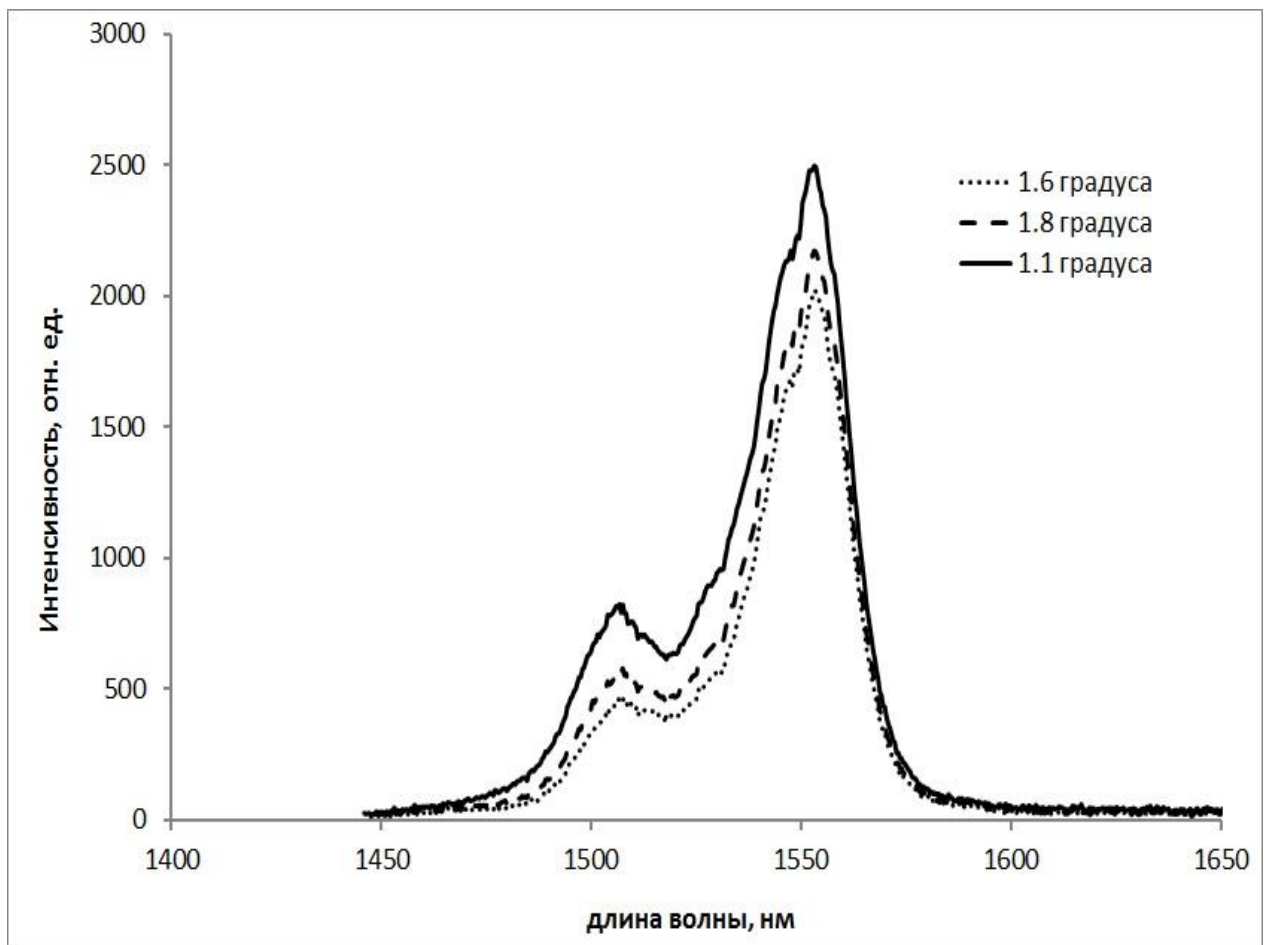


Рисунок 35 – Спектры синтезируемых последовательностей при различных фазах селектора импульсов

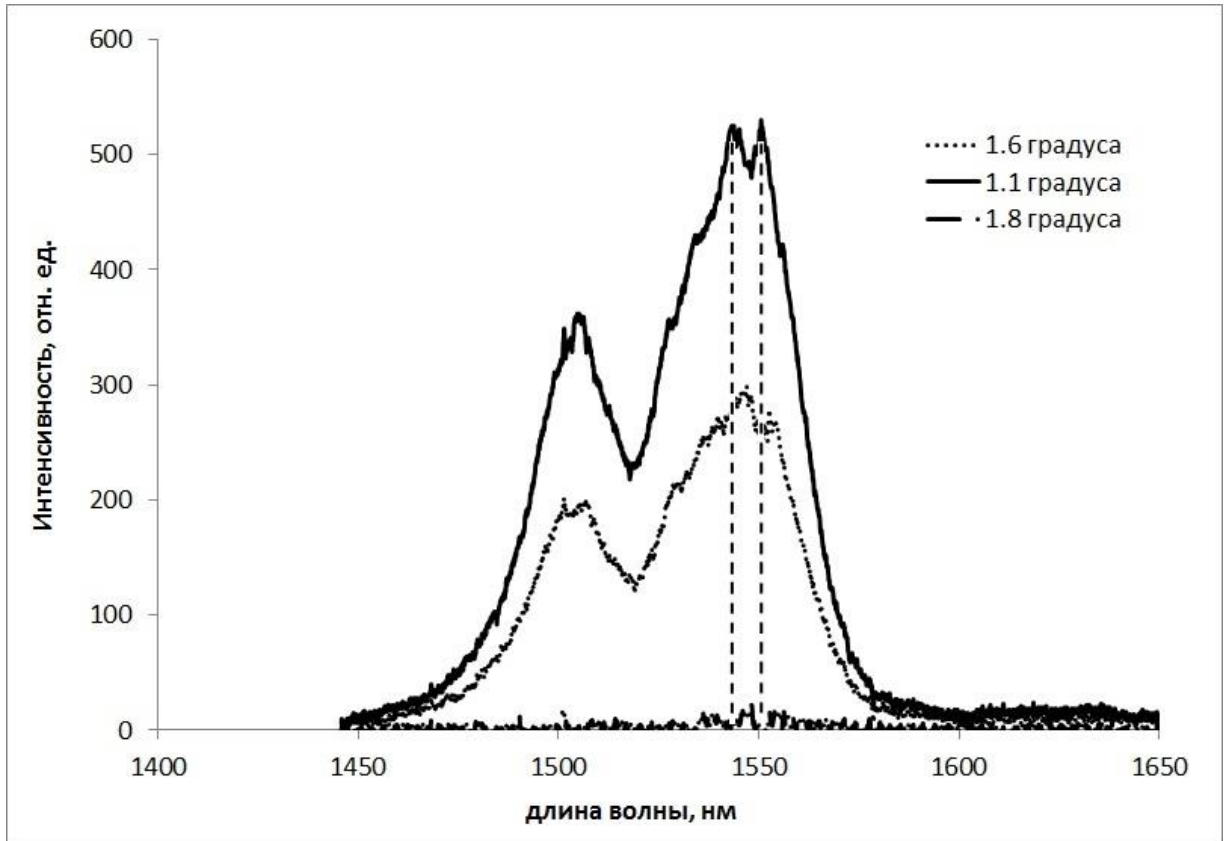


Рисунок 36 – Разностные спектры синтезированных последовательностей

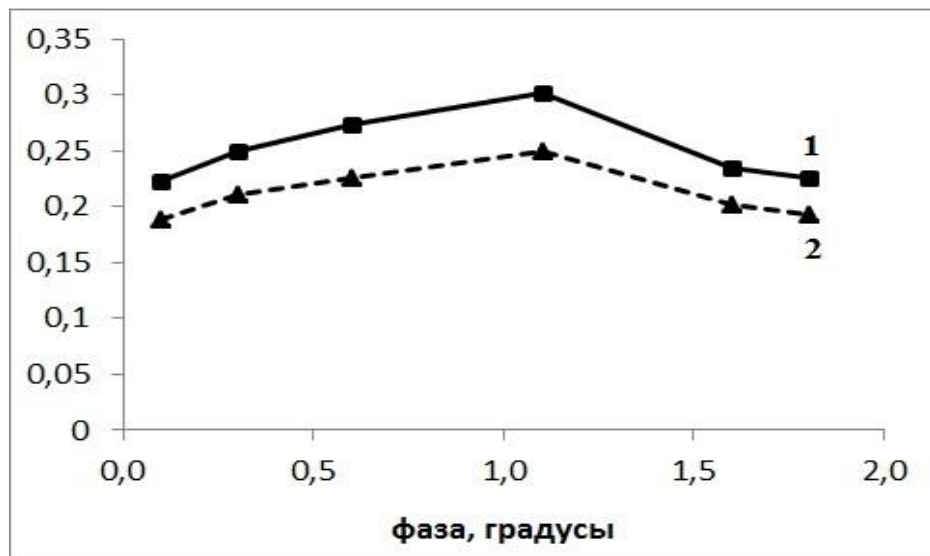


Рисунок 37 – Отношения экстремумов разностных спектров. 1 – отношение коротковолнового максимума (1500 нм) к длинноволновому (1550 нм), 2 – отношение промежуточного минимума (1520 нм) к длинноволновому максимуму

В следующем эксперименте при частоте повторения лазерных импульсов 250 МГц и выбранном значении сдвига частотной гребенки 21 МГц было синтезировано 250 последовательностей идентичных фемтосекундных импульсов с частотой повторения $F = 1$ МГц и дискретностью перестройки фазы несущей относительно огибающей $2\pi/250$. Величина k была равна 250, а $q = 21$. Диапазон перестройки фазы формирователя импульсов, когда все еще имеет место «чистая» последовательность импульсов, составляет порядка 0.8 градусов при диапазоне перестройке между двумя соседними последовательностями 1.44 градуса. На рисунке 38 приведен график коэффициента пропускания селектора импульсов. Минимальное пропускание селектора составляет величину порядка 10 процентов относительно максимума. На рисунке 39 приведены спектры последовательностей при различных фазах селектора импульсов.

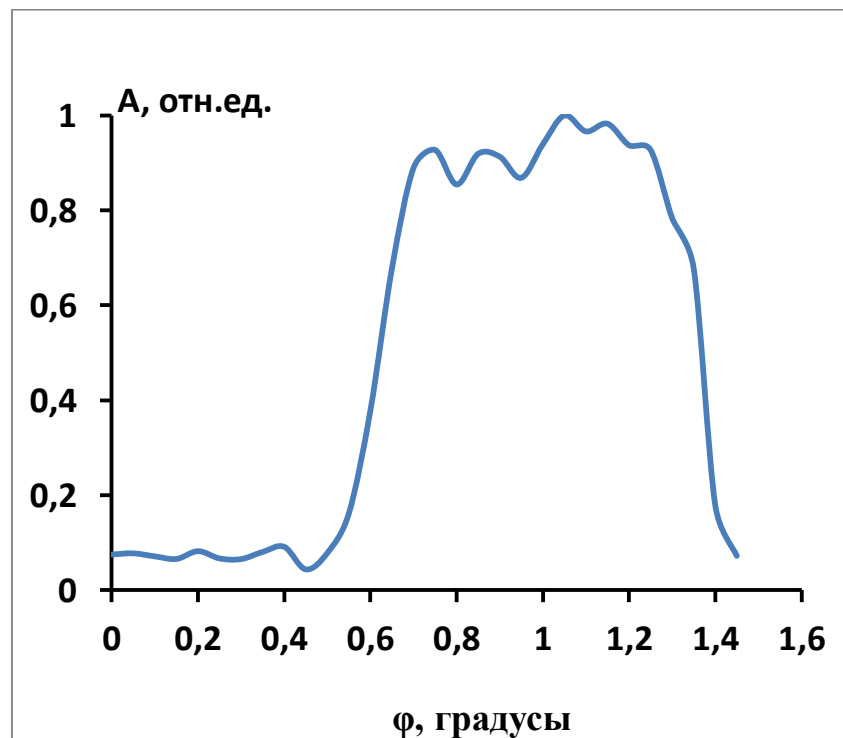


Рисунок 38 – Нормированный коэффициент пропускания селектора импульсов от фазы управляющего сигнала

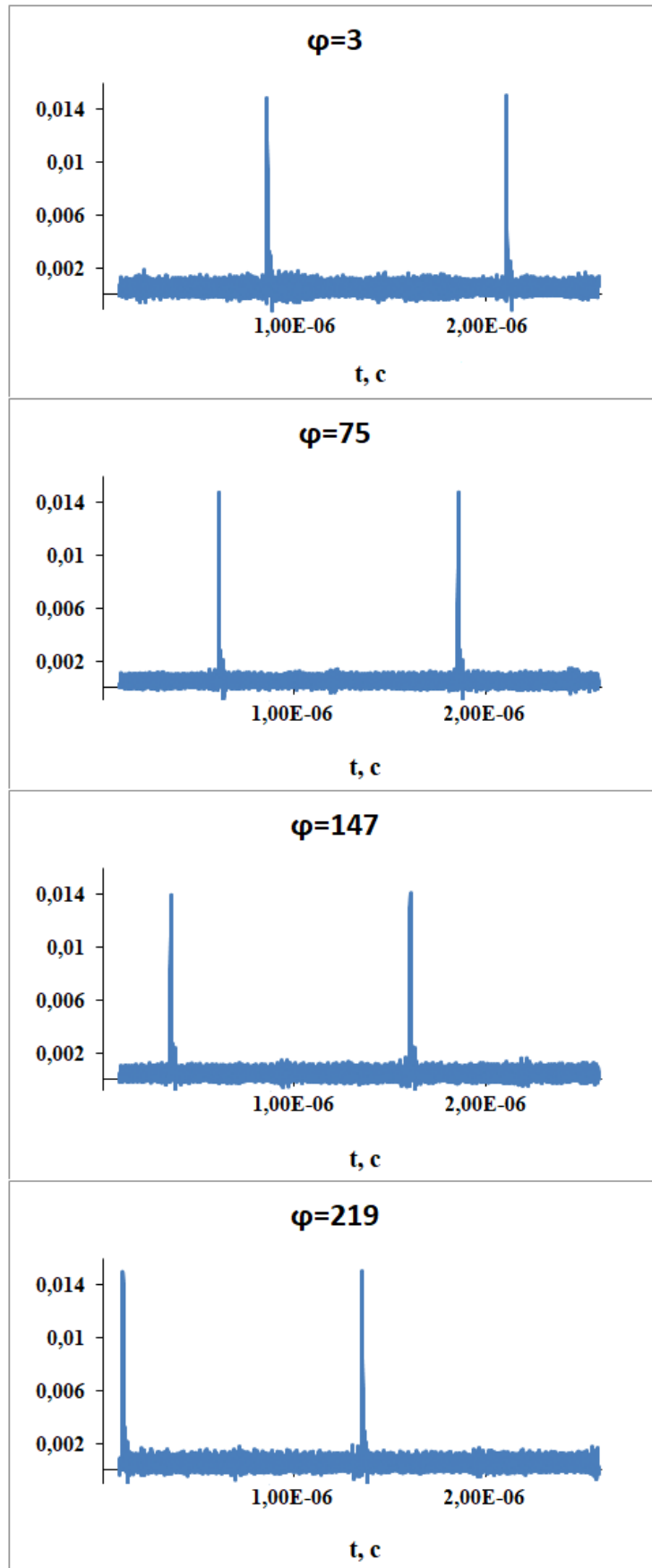


Рисунок 39 – Синтезированные последовательности идентичных импульсов.

По оси абсцисс отложено напряжение в вольтах.

5.2 Создание последовательностей ультракоротких импульсов с заданным скольжением фазы между соседними импульсами

Поскольку минимальный временной интервал между идентичными импульсами равен k/f , то выделяя из излучения лазера импульсы, отстоящие друг от друга на величину временного интервала $k/(m \cdot f)$, можно получить последовательность импульсов со скольжением СЕР, равным $2\pi/m$. В частности, при $m=2$ будет иметь место последовательность импульсов со скольжением СЕР, равным π , что для коротких импульсов, длительностью порядка нескольких оптических колебаний приведет к получению их знакопеременных по напряженности электромагнитного поля последовательностей. Создание таких последовательностей может представлять интерес, например, для изучения быстропротекающих процессов.

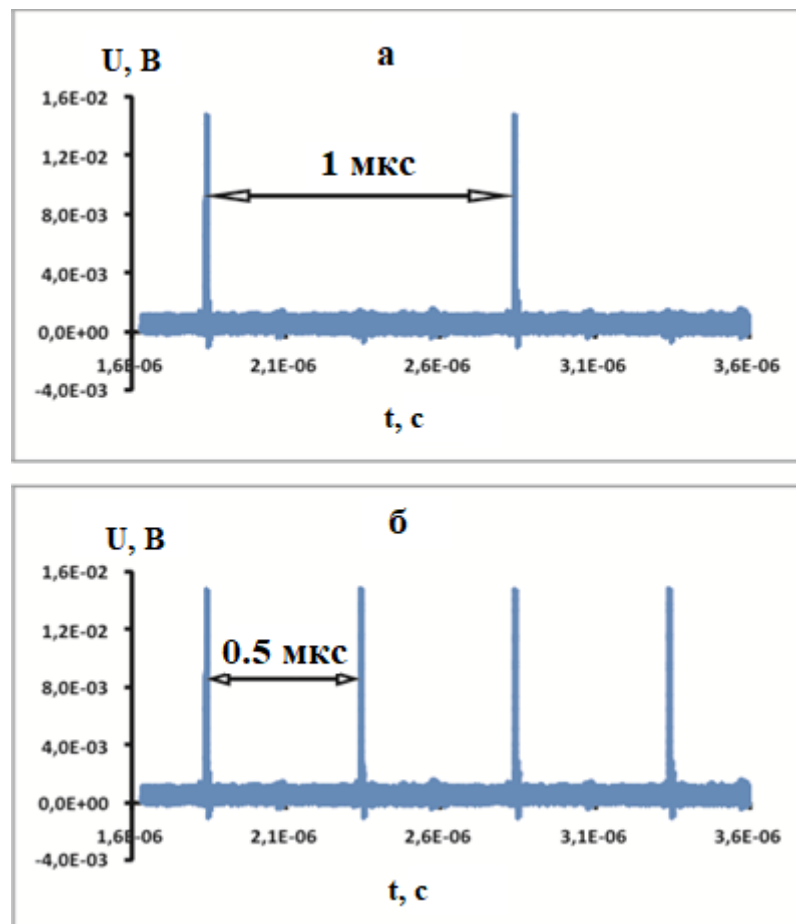


Рисунок 40 – Последовательности идентичных (а) и знакопеременных по напряженности поля (б) импульсов

На рисунке 40а показана одна из последовательностей идентичных фемтосекундных импульсов с частотой повторения 1 МГц (см. рис. 39), когда временной интервал между соседними импульсами составлял 1 мкс. Выделение импульсов с временным интервалом, равным 0.5 мкс обеспечило получение последовательности фемтосекундных импульсов со скольжением CEP между соседними импульсами, равным π , с частотой следования 2 МГц (рис. 40б).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Соискателем предложены метод и схема контроля сдвига частотной гребенки с помощью интерферометра Майкельсона. Предложенная схема управления сдвигом частотной гребенки с помощью интерферометра Майкельсона пригодна для различных ширин спектра излучения лазера, что позволяет распространить рассмотренный метод создания оптического стандарта частоты на лазеры с самосинхронизацией мод нано- и пикосекундного диапазонов.

Предложен и экспериментально реализован метод получения последовательности идентичных фемтосекундных импульсов без сдвига частотной гребенки с управляемой разностью фаз между огибающей и несущей. Предложенный метод получения последовательностей фемтосекундных импульсов без сдвига частотной гребенки с селективируемой разностью фаз между огибающей и несущей имеет практическую значимость для таких приложений нелинейной оптики, как получение аттосекундных импульсов и когерентное сложение импульсов. Получение последовательности фемтосекундных импульсов без сдвига частотной гребенки при измерении длин интерферометрическими методами с помощью установок на основе фемтосекундных лазеров обеспечивает более точное определение длины за счет совпадения максимумов огибающей и полосы интерференционной картины.

Предложен и экспериментально реализован метод получения знакопеременных по напряженности электрического поля последовательностей ультракоротких импульсов. Создание знакопеременных по напряженности электрического поля последовательностей импульсов может представлять интерес, для изучения быстропротекающих процессов при взаимодействии излучения с веществом.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АОМ – акустооптический модулятор

АЦП – аналого-цифровой преобразователь

ПИД – пропорционально-интегрально-дифференциальный

СВЧ – сверхвысокие частоты

ФАПЧ – фазовая автоподстройка частоты

ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь

ЭОМ – электрооптический модулятор

АС – переменный ток

ADC – (analog to digital converter) аналого-цифровой преобразователь

CEO – (carrier-envelope offset) сдвиг несущей относительно огибающей

CEP – (carrier-envelope phase) фаза несущей относительно огибающей

DC – постоянный ток

DAC – (digital to analog converter) цифро-аналоговый преобразователь

CW лазер, (continuous wave laser) – непрерывный лазер

PLL – (phase locking loop) блок фазовой автоподстройки частоты

PPLN – периодически поляризованный кристалл ниобата лития

RAM – оперативное запоминающее устройство

μC – микроконтроллер

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bohan A.D. Phase-Dependent Harmonic Emission with Ultrashort Laser Pulses / Bohan A.D., Antoine P., Milosevic D.B., Piraux B. // *Physical Review Letters*. – 1998. – Vol. 81, № 9. – P.1837-1840.
2. Ivanov M. Routes to Control of Intense-Field Atomic Polarizability / Ivanov M., Corcum P.B., Zuo T., Bandrauk A. // *Physical Review Letters*. – 1995. – Vol. 74, № 15. – P. 2933-2936.
3. Christov I.P. High-Harmonic Generation of Attosecond Pulses in the “Single-Cycle” Regime / Christov I.P., Murnane M.M., Kapteyn H.C. // *Physical Review Letters*. – 1997. – Vol. 78, № 7. – P. 1251-1254.
4. Gubin M.A. Present performance of the transportable He-Ne/CH₄ optical frequency standards / M.A. Gubin, A.S. Shelkovnikov, E.V. Kovalchuk, D.D. Krylova, E.A. Petrukhin, D.A. Tyurikov // *Proceedings of the 1999 Joint Meeting of the European Frequency and Time Forum and the IEEE International Frequency Control Symposium, Besancon, France, 13–16 April. – 1999. – P. 710 – 713.*
5. Jones D.J. Carrier-Envelope Phase Control of Femtosecond Mode-Locked Lasers and Direct Optical Frequency Synthesis / D.J. Jones, S.A. Diddams, J.K. Ranka, A. Stentz, R.S. Windeler, J.L. Hall, S.T. Cundiff // *Science*. – 2000. – Vol. 288. – Issue 5466. – P. 635-639.
6. Beverini N. Coherent multiwave heterodyne frequency measurement of a far-infrared laser by means of a femtosecond laser comb / Beverini N., Carelli G., De Michele A., Maccioni E., Nyushkov B., Sorrentino F., Moretti A. // *Optics Letters*. – 2005. – V. 30. – №1. – P. 32-34.
7. Ye J. Femtosecond Optical Frequency Comb Technology: Principle, Operation and Application / J. Ye, S.T. Cundiff, – New York: Springer, 2005. – 361 p.

8. Ye J. Optical frequency combs: from frequency metrology to optical phase control / J. Ye, H. Schnatz, L.W. Hollberg // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. – 2003. – Vol. 9. – №2. – P. 1041-1058.
9. Udem, T. Optical frequency metrology / Udem T., Holzwarth R. & Hänsch T. // Nature. 2002. – Vol. 416. –P. 233-237.
10. Cundiff S. Optical frequency synthesis based on mode-locked lasers / Cundiff S., Ye J., Hall J. // Review of Scientific Instruments. – 2001. – Vol. 72. – P. 3749.
11. Reichert J. Measuring the frequency of light with mode-locked lasers. / Reichert J., Holzwarth R., Udem Th., Hänsch Th. // Optics Communications. – 1999. – Vol. 172. – P. 59-68.
12. Schilt S. Carrier-Envelope Offset Stabilized Ultrafast Diode-Pumped Solid-State Lasers / Schilt S., Südmeyer T. // Applied Sciences. – 2015. – Vol. 5. – Issue 4. –P. 787 – 816.
13. Diddams S.A. Direct Link between Microwave and Optical Frequencies with a 300 THz Femtosecond Laser Comb / Diddams S.A., Jones D.J., Ye Jun, Cundiff S.T., Hall J.L., Ranka J.K., Windeler R.S., Holzwarth R., Udem Th., Hänsch T.W. // Physical Review Letters. – 2000. – V.84. – Issue 4. – P. 5102-5105.
14. Bagayev S.N. Femtosecond Frequency Combs Stabilized with a He–Ne/CH₄ Laser: Toward a Femtosecond Optical Clock / Bagayev S.N., Dmitriyev A.K., Chepurov S.V., Dychkov A.S., Klementyev V.M., Kolker D.B., Kuznetsov S.A., Matyugin Yu.A., Okhapkin M.V., Pivtsov V.S., Skvortsov M.N., Zakharyash V.F., Birks T.A., Wadsworth W.J., Russel P.St.J., Zheltikov A.M. // Laser Physics. – 2001. – V.11. – № 12. – P. 1270-1282.
15. Beverini N. Coherent multiwave heterodyne frequency measurement of a far-infrared laser by means of a femtosecond laser comb / Beverini N., Carelli G., De Michele A., Maccioni E., Nyushkov B., Sorrentino F., Moretti A. // Optics Letters. – 2005. – V. 30. – №1. – P. 32-34.

16. Helbing F.W. Carrier-envelope-offset dynamics and stabilization of femtosecond pulses / F.W. Helbing, G. Steinmeyer, J. Stenger, H.R. Telle, U. Keller // *Applied Physics B*. – 2002. – Vol. 74. – P. S35–S42.
17. Telle H.R. Carrier-envelope offset phase control: A novel concept for absolute optical frequency measurement and ultrashort pulse generation / Telle H.R., Steinmeyer G., Dunlop A.E., Stenger J., Sutter D.H., Keller U. // *Applied Physics B*. – 1999. – V.69. – P.327-332.
18. Jones R.J Stabilization of the frequency, phase, and repetition rate of an ultrashort pulse train to a Fabry–Perot reference cavity / Jones R.J., Dies J.-C., Jasapara J., Rudolph W. // *Optics Communications*. – Vol. 175. – P. 409-418.
19. Jones R.J. Stabilization of Femtosecond Lasers for Optical Frequency Metrology and Direct Optical to Radio Frequency Synthesis / Jones R.J., Dies J.-C., Jasapara J. // *Physical Review Letters*. – 2001. – Vol. 86. – Iss. 15. – P. 3288-3291.
20. Jones R. J. Stabilized femtosecond lasers for precision frequency metrology and ultrafast science / Jones R. J., Ido T., Loftus T., Boyd M., Ludlow A., Holman K., Thorpe M., Moll K., and Ye J. // *Laser Physics*. – Vol. 15. – №7. – P. 1-4.
21. Баснак Д.В. Измерение смещения гребенки частот излучения фемтосекундного лазера с помощью интерферометра Фабри–Перо / Баснак Д.В., Бикмухаметов К.А., Дмитриев А.К., Дмитриева Н.И., Луговой А.А., Покасов П.В., Чепуров С.В. // *Квантовая электроника*. – 2010. – Т.40. – №8 – С.733 – 738 = Basnak D.V. Measurement of the carrier envelope offset frequency of a femtosecond frequency comb using a Fabry—Perot interferometer / D.V. Basnak, K.A. Bikmukhametov, Aleksandr K. Dmitriev, N.I. Dmitrieva, A.A. Lugovoi, P.V. Pokasov and S.V.Chepurov // *Quantum Electronics*. – 2010. – V.40. – №8. – P.733-738.
22. Баснак Д.В. Измерение сдвига частотной гребенки фемтосекундного лазерного излучения интерференционным методом / Баснак Д.В., Бикмухаметов К.А., Дычков А.С., Кузнецов С.А., Луговой А.А., Мицзита П. // *Квантовая электроника*. – 2012. – Т. 42. – №1. – С.71-75 = Basnak D.V.

- Measuring the shift of a femtosecond laser frequency comb by the interference method / Dmitriy V. Basnak, K.A. Bismukhametov, Aleksandr K. Dmitriev, Aleksandr S. Dychkov, Sergei A. Kuznetsov, A.A. Lugovoy and P.Mitsziti // *Quantum Electronics*. – 2012. – V. 42. – №1 – P.71-75.
23. Baklanov E.V. Optical frequency standard based on coherent population trapping resonance / Baklanov E.V., Dmitriev A.K. // *Laser Physics*. – 2010. – Vol. 20. – Iss. 1. – P. 52-56.
24. UdemTh. Absolute Optical Frequency Measurement of the Cesium D₁ Line with a Mode-Locked Laser / UdemTh., Reichert J. Holzwarth R., Hänsch T.W. // *Physical Review Letters*. – 1999. – V.82. – Iss. 18. – P.3568 3571.
25. Foreman S. Demonstration of a HeNe/CH₄-based optical molecular clock / S. Foreman, A. Marian, J. Ye, E. Petrukhin, M. Gubin, O. Mücke, F. Wong, E. Ippen, F. Kaertner // *Optics Letters*. – 2005. – Vol. 30. – Iss. 5. – P. 570-572.
26. Gubin M.A. Femtosecond fiber laser based methane optical clock / M.A. Gubin, A.N. Kireev, A.V. Konyashchenko, P.G. Kryukov, A.S. Shelkovnikov, A.V. Tausenev, D.A. Tyurikov // *Applied Physics B*. – 2009. – Vol. 95. – P. 661–666.
27. Rauschenberger J. Control of the frequency comb from a mode-locked Erbium-doped fiber laser / J. Rauschenberger, T.M. Fortier, D.J. Jones, J. Ye, S.T. Cundiff. // *Optics Express*. – 2002. – Vol. 10. – Iss. 24. – P. 1404-1410.
28. Tauser F. Amplified femtosecond pulses from an Er: fiber system: Nonlinear pulse shortening and self-referencing detection of the carrier-envelope phase evolution / F. Tauser, A. Leitenstorfer, W. Zinth // *Optics Express*. – 2003. – Vol. 11. Iss. 6. – P. 594-600.
29. Adler F. Phase-locked two-branch erbium-doped fiber laser system for long-term precision measurements of optical frequencies / F. Adler, K. Moutzouris, A. Leitenstorfer, H. Schnatz, B. Lipphardt, G. Grosche, F. Tauser // *Optics Express*. – 2004. – Vol. 12. Iss. 24. – P. 5872-5880.
30. Schibli T.R. Frequency metrology with a turnkey all-fiber system / T.R. Schibli, K. Minoshima, F.-L. Hong, H. Inaba, A. Onae, H. Matsumoto, I. Hartl, M.E. Fermann // *Optics Letters*. – 2004. – Vol. 29. Iss. 21. – P. 2467-2469.

31. Peng J.-L. Highly stable, frequency-controlled mode-locked erbium fiber laser comb / J.-L. Peng, H. Ahn, R.-H. Shu, H.-C. Chui, J.W. Nicholson // *Applied Physics B*. – 2007. – V.86. – P. 49-53.
32. McFerran J.J. Suppression of pump-induced frequency noise in fiber-laser frequency combs leading to sub-radian f ceo phase excursions / J.J. McFerran, W.C. Swann, B.R.Washburn, N.R. Newbury // *Applied Physics B*. – 2007. – V.86. – P. 219-227.
33. Бакланов Е.В. Абсолютное измерение длины с помощью фемтосекундного лазера / Бакланов Е.В., Дмитриев А.К. // *Квантовая электроника* – 2002. – Т.32. – №10. – С.925-928 = Baklanov E.V. Absolute length measurements with a femtosecond laser E.V. Baklanov and Aleksandr K. Dmitriev // *Quantum Electronics*. – 2002. – V. 32. – №10. – P.925-928.
34. Баснак Д.В. Фемтосекундная лазерная линейка / Баснак Д.В., Дмитриев А.К., Луговой А.А. Покасов П.В. // *Квантовая электроника*. – 2008. –Т.38. – №2. – С.187-190 = Basnak D.V. Femtosecond laser ruler / D.V. Basnak, A.K. Dmitriev, A.A. Lugovoy and P.V. Pokasov // *Quantum Electronics*. – 2002. – V. 38. – №2. – P.187-190.
35. Ким А.В. От фемтосекундных к аттосекундным импульсам / Ким А.В., Рябикин М.Ю., Сергеев А.М. // *Успехи физических наук*. –1999. –Т. 169. – С. 58–66.
36. Bohan A.D. Phase-Dependent Harmonic Emission with Ultrashort Laser Pulses / Bohan A.D., Antoine P., Milosevic D.B., Piraux B. // *Physical Review Letters*. – 1998. – V.81 – Iss. 9. – P.1837-1840.
37. Ivanov M. Routes to Control of Intense-Field Atomic Polarizability / Ivanov M., Corcum P.B., Zuo T., Bandrauk A. // *Physical Review Letters*. – 1995. – V.74 – Iss. 15. – P. 2933-2936.
38. Christov I.P. High-Harmonic Generation of Attosecond Pulses in the “Single-Cycle” Regime / Christov I.P., Murnane M.M., Kapteyn H.C.// *Physical Review Letters*. – 1997. – V.78 – Iss. 7. – P. 1251-1254.

39. Strelkov V. V. Attosecond electromagnetic pulses: generation, measurement, and application. Generation of high-order harmonics of an intense laser field for attosecond pulse production / V.V. Strelkov, V.T. Platonenko, A F Sterzhantov, M Yu Ryabikin // *Physics-Uspekhi*. – 2016. – V.59. – №5. – Pp. 425-445.
40. Attosecond Physics. Attosecond Measurements and Control of Physical Systems / Luis Plaja, Ricardo Torres, Amelle Zaïr (Editors) // *Springer Series in Optical Sciences*. – Vol. 177. – Berlin, Heidelberg: Springer. – 2013. – ISBN 978-3-642-37622-1
41. L’Huillier A. Generation of high-order harmonics and attosecond pulses / Antoine Browaeys and others (eds) // *Current Trends in Atomic Physics*. – Oxford: Oxford Academic online edn, 2019. [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/10.1093/oso/9780198837190.003.0008>.
42. Scrinzi, A., Muller, H.G. Attosecond Pulses: Generation, Detection, and Applications / Brabec, T. (eds) // *Strong Field Laser Physics*. – Springer Series in Optical Sciences. – 2008. – vol 134. – New York: Springer.
43. Birulia V. A. Generation of attosecond pulses with a controllable carrier-envelope phase via high-order frequency mixing / V. A. Birulia, M. A. Khokhlova, and V. V. Strelkov // *Phys. Rev. A*. – 2022. – Vol. 106. – Art. No. 023514
44. Jones D.J. Carrier-Envelope Phase Control of Femtosecond Mode-Locked Lasers and Direct Optical Frequency Synthesis / Jones D.J., Diddams S.A., Ranka J.K., Stentz A., Windeler R. S., Hall J. L., Cundiff S. T. // *Science*. – 2000. – Vol. 288. – Iss.5466. P. 635–639.
45. Xu L. Route to phase control of ultrashort light pulses / Xu L., Spielmann Ch., Poppe A., Brabec T., Krausz F., Hänsch T. W. // *Optics Letters*. – 1996. – Vol. 21. – Iss.24. – P. 2008–2010.
46. Apolonski A. Controlling the Phase Evolution of Few-Cycle Light Pulses / Apolonski A., Poppe A., Tempea G., Spielmann Ch., Udem Th., Holzwarth R., Hänsch T.W., and Krausz F. // *Physical Review Letters*. – 2000. – Vol. 85. – Iss.4. – P. 740-743.

47. Baltuška A. Phase-controlled amplification of few-cycle laser pulse. / Baltuška A., Uiberacker M., Goulielmakis E., Kienberger R., Yakovlev V. S., Udem Th., Hänsch Th. W., and Krausz F. //IEEE Journal Selected Topics in Quantum Electronics. – 2003. – Vol. 9. – Iss.4. – P. 972–989.
48. Golovin N. N. A Femtosecond Pulse Train with a Selectable Carrier–Envelope Offset Phase / N. N. Golovin, N. I. Dmitrieva, E. A. Gorokhov, and A. K. Dmitriev // Optics and Spectroscopy = Optika i spektroskopiya. – 2019. – vol. 127. – P. 449-452.
49. Furch F. J. CEP-stable few-cycle pulses with more than 190 μJ of energy at 100 kHz from a noncollinear optical parametric amplifier / F. J. Furch, T. Witting, A. Giree, Ch. Luan, F. Schell, G. Arisholm, C. P. Schulz, and M. J. J. Vrakking // Optics Letters. – 2017. – Vol42. – Iss.13. – P. 2495–2498.
50. Natile M. CEP-stable high-energy ytterbium-doped fiber amplifier / Natile M., Golinelli A., Lavenu L., Guichard F., Hanna M., Zaouter Y., Chiche R., Chen X., Hergott J. F., Boutu W., Merdji H., and Georges P. // Optics Letters. – 2019. – Vol. 44. – Iss.16. – P. 3909–3912.
51. Shestaev E. High-power ytterbium-doped fiber laser delivering few-cycle, carrier-envelope phase-stable 100 μJ pulses at 100 kHz / Shestaev E., Hoff D., Saylor A. M., Klenke A., Hadrich S., Just F., Eidam T., Jojart P., Varallyay Z., Osvay K., Paulus G. G., Tunnermann A., and Limpert J. // Optics Letters. – 2020. – Vol45. – Iss.1. – P. 97 – 100.
52. Golovin N. N. Generation of identical femtosecond pulses with adjustable carrier-envelope phase. / Golovin N. N., Dmitrieva N. I., Gorokhov E. A., Dmitriev A. K. // Optics InfoBase Conference Papers. – 2019. – Part F140-CLEO_Europe 2019. – P. 2019-cf_p_8. – [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/10.1109/CLEOE-EQEC.2019.8873319>.
53. Головин Н. Н. Периодическая последовательность фемтосекундных импульсов с заданной разностью фаз между огибающей и несущей = Femtosecond radiation without a shift of the frequency comb with a fixed carrier envelope offset phase / Н. Н. Головин, Н. И. Дмитриева, К. М. Сабакарь, А.

- К. Дмитриев // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2018) = Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE–2018) : тр. 14 междунар. науч.-техн. конф., Новосибирск, 2–6 окт. 2018 г.: в 8 т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2018. – Т. 5. – С. 41–43. – 45 экз. – ISBN 978-5-7782-3619-6.
54. Головин Н. Н. Волоконный фемтосекундный лазер с управлением фазой между несущей и огибающей / Н. Н. Головин, Н. И. Дмитриева, К. М. Сабакарь, А. К. Дмитриев // 8 Российский семинар по волоконным лазерам: тез. докл., Новосибирск, 3–7 сент. 2018 г. – Новосибирск: Изд-во СО РАН. – С. 160–161. - ISBN 978-5-7692-1612-1.
55. Golovin N. N. Periodic sequence of femtosecond pulses with preselected carrier envelope offset phase / N. N. Golovin, N. I. Dmitrieva, K. M. Sabakar, A. K. Dmitriev // Modern problems of laser physics: techn. digest, the 8 intern. symp., Novosibirsk, 25 Aug. – 1 Sept. 2018. – Novosibirsk, 2018. – P. 120-121.
56. Golovin N. N. Generating a sequence of femtosecond pulses without a carrier envelope offset phase / N. N. Golovin, N. I. Dmitrieva, A. K. Dmitriev // International Conference Laser Optics (ICLO 2018): proc., Saint Petersburg, 4–8 June 2018. – Saint Petersburg: IEEE, 2018. – Art. R8-p31. - ISBN 978-153863612-1.
57. Golovin N. N. Femtosecond Radiation without a Shift of the Frequency Comb with a Fixed Carrier Envelope Offset Phase / N. N. Golovin, N. I. Dmitrieva, K. M. Sabakar, A. K. Dmitriev // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2018) = Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE–2018): тр. 14 междунар. науч.-техн. конф., Новосибирск, 2–6 окт. 2018 г.: в 8 т. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. – Т. 1, ч. 2. – С. 314-317. - 45 экз. - ISBN (NSTU) 978-5-7782-3614-1.
58. Дмитриев А. К. Генерация последовательности идентичных фемтосекундных импульсов с контролируемой фазой несущей относительно огибающей / А. К. Дмитриев, Н. Н. Головин, Е. А. Горохов,

- Ю. П. Бычев, Б. Н. Нюшков, А. С. Толстикова [и др.] // Фотон-Экспресс. - 2019. - № 6. - С. 409-410. - (спецвыпуск).
59. Golovin N. N. Periodic sequence of femtosecond pulses with preselected carrier envelope offset phase / N. N. Golovin, N. I. Dmitrieva, E. A. Gorokhov, A. K. Dmitriev // AIP Conference Proceedings. - 2019. - Vol. 2098: Modern problems of laser physics (MPLP-2018): 8 intern. symp., Novosibirsk, 2018. - Art. 020007 (9 p).
60. Golovin N. N. A femtosecond pulse train with a selectable carrier-envelope offset phase / N. N. Golovin, N. I. Dmitrieva, E. A. Gorokhov, A. K. Dmitriev // Optics and Spectroscopy. - 2019. - Vol. 127. – Iss. 3. - P. 483–486.
61. Golovin N. N. Pulse Picker for Generating Femtosecond Radiation with a Selectable Carrier-Envelope Phase / N. N. Golovin, A. K. Dmitriev, Y. P. Bychev, K. N. Savinov. - DOI 10.1109/APEIE52976.2021.9647559. - Text: direct // Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE–2021): proc. of the 15 intern. sci. and techn. conf., Novosibirsk, 19–21 Nov. 2021. – Novosibirsk: Publ. NSTU, 2021. – P. 692-695. - ISBN 978-1-6654-3408-9. - ISBN 978-1-6654-3408-9.
62. Способ получения последовательности идентичных фемтосекундных импульсов [Текст]: пат. № 2701209 / Бакланов Е.В., Головин Н.Н., Дмитриев А.К., Дмитриева Н.И. заявл. 12.02.2019; опубл. 25.09.2019; Бюл. № 27.
63. Isakova A. A. Multi-frequency lasing of diode laser (795 nm) for pumping Rb frequency standard / A. A. Isakova, A. K. Dmitriev, K. A. Bikmuhametov, V. V. Velichansky, V. L. Vasiliev, S. A. Zibrov // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2014) = Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE–2014): тр. 12 междунар. конф., Новосибирск, 2–4 окт. 2014 г.: в 7 т. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – Т. 1. – С. 446-448. – 250 экз. – ISBN 978-1-4799-6019-4, ISBN 978-5-7782-2506-0.

64. Isakova A. A. The laser pumping rubidium frequency standard / A. A. Isakova, N. N. Golovin, K. Savinov, A. K. Dmitriev // Modern problems of laser physics: techn. digest, the 7 intern. symp. and young scientists school (MPLP–2016), Novosibirsk, 22–28 Aug. 2016. – Novosibirsk: Офсет-ТМ, 2016. – P. 165-166. - ISBN 978–5–85957–131–4.
65. Isakova A.A. The diode laser for Rb standard with the cavity coordinated to modulation frequency / A. A. Isakova, N. N. Golovin, K. N. Savinov, A. K. Dmitriev // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2016) = Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE–2016): тр. 13 междунар. науч.-техн. конф., Новосибирск, 3–6 окт. 2016 г.: в 12 т. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – Т. 1, ч. 1. – С. 388-389 - ISBN 978-5-7782-2991-4.
66. Исакова А.А. Особенности режимов генерации полупроводникового лазера с внешним резонатором при СВЧ модуляции = Specific features of oscillation regimes of an external cavity diode laser under microwave modulation / А.А. Исакова, К. Н. Савинов, Н. Н. Головин, Н. Ж. Алтынбеков, В. И. Вишняков, А. К. Дмитриев // Квантовая электроника. - 2017. - Т. 47, № 7. - С. 610-613. = Specific features of oscillation regimes of an external cavity diode laser under microwave modulation / A. A. Isakova, K. N. Savinov, N. N. Golovin, N. Z. Altynbekov, V. I. Vishnyakov, A. K. Dmitriev // Quantum Electronics. - 2017. - Vol. 47, iss. 7. - P. 610–613.
67. Головин Н. Н. Волоконный фемтосекундный лазер с управлением фазой между несущей и огибающей / Н. Н. Головин, Н. И. Дмитриева, К. М. Сабакарь, А. К. Дмитриев // 8 Российский семинар по волоконным лазерам: тез. докл., Новосибирск, 3–7 сент. 2018 г. – Новосибирск: Изд-во СО РАН. – С. 160–161. - ISBN 978-5-7692-1612-1. - DOI: 10.31868/RFL2018.160-161.
68. Дмитриев А. К. Диодный лазер с ВЧ модуляцией тока накачки для рубидиевого стандарта частоты = Diode laser with HF modulation of pump current for rubidium frequency standard / А. К. Дмитриев, А.А. Исакова, К. Н. Савинов, Н. Н. Головин // Актуальные проблемы электронного

- приборостроения (АПЭП–2018) = Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE–2018): тр. 14 междунар. науч.-техн. конф., Новосибирск, 2–6 окт. 2018 г.: в 8 т. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. – Т. 5. – С. 44–46. - 45 экз. - ISBN 978-5-7782-3619-6.
69. Isakova A. A. Multifrequency source pump of CPT resonances based on a diode laser with an external resonator / A. A. Isakova, K. N. Savinov, N. N. Golovin, A. K. Dmitriev // International Conference Laser Optics (ICLO 2018): proc., Saint Petersburg, 4–8 June 2018. – Saint Petersburg: IEEE, 2018. – Art. R3-p27. - ISBN 978-153863612-1.
70. Dmitriev A. K. Diode laser with HF modulation of pump current for rubidium frequency standard / A. K. Dmitriev, A. A. Isakova, K. N. Savinov, N. N. Golovin // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2018) = Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE–2018): тр. 14 междунар. науч.-техн. конф., Новосибирск, 2–6 окт. 2018 г.: в 8 т. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. – Т. 1, ч. 2. – С. 318-321. - 45 экз. - ISBN (NSTU) 978-5-7782-3614-1.
71. Isakova A. A. Diode laser with HF modulation of pump current for lasing of CPT resonances / A. A. Isakova, K. N. Savinov, N. N. Golovin, A. K. Dmitriev // Modern problems of laser physics: techn. digest, the 8 intern. symp., Novosibirsk, 25 Aug. – 1 Sept. 2018. – Novosibirsk, 2018. – P. 122-123.
72. Isakova A. A. Multifrequency source for pumping CPT-resonances based on an external cavity diode laser / A. A. Isakova, N. N. Golovin, K. N. Savinov, A. K. Dmitriev // Quantum Electronics. - 2019. - Vol. 49, iss. 6. - P. 600–603.
73. Isakova A. A. Multi-frequency diode laser for pumping cpt resonances [Electronic resource] / A. A. Isakova, K. N. Savinov, A. K. Dmitriev // Conference on lasers and electro-optics Europe & European quantum electronics conference (CLEO/Europe-EQEC): [proc.], Germany, Munich, 23–27 June 2019. – IEEE, 2019. – 1 p. - Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8944613>. - Title from screen - ISBN 978-1-7281-0469-0.

74. Dmitriev A. K. Emission spectrum of a diode laser with an external cavity with RF modulation / A. K. Dmitriev, K. N. Savinov // AIP Conference Proceedings. - 2019. - Vol. 2098: Modern problems of laser physics (MPLP-2018): 8 intern. symp., Novosibirsk, 2018. - Art. 020006 (4 p.).
75. Isakova A. A. Combined microwave and high-frequency modulation of the injection current of a diode laser for multiple-frequency excitation of CPT-resonances / A. A. Isakova, K. N. Savinov, N. N. Golovin, K. M. Sabakar, A. K. Dmitriev, A. A. Rundau // Russian Physics Journal. - 2020. - Vol. 63. – Iss. 1. - P. 171-175.
76. Савинов К. Н. Управление спектром излучения диодного лазера при ОБЧ-модуляции тока инжекции / К. Н. Савинов, А. К. Дмитриев, А. А. Рундау // Оптика и спектроскопия = Optika i spektroskopiya. - 2021. - Т. 129. – № 6. - С. 760-763. = Control of emission spectrum of a diode laser under VHF modulation of injection current / K. N. Savinov, A. K. Dmitriev, A. A. Rundau. // Optics and Spectroscopy. - 2021. - Vol. 129. – Iss. 7. - P. 821–824.
77. Savinov K. N. Specifics of using multifrequency pumping to register CPT resonances / K. N. Savinov, A. K. Dmitriev, A. V. Krivetskii // Journal of Physics: Conference Series. - 2021. – Vol. 2067: Modern Problems of Laser Physics (MPLP 2021): the 9 intern. symp. - Art. 012001 (5 p.).
78. Savinov K. N. CPT resonances under multifrequency pumping / K. N. Savinov, A. K. Dmitriev, A. V. Krivetskii // Quantum Electronics. - 2022. - Vol. 52. – iss. 2. - P. 116–118.
79. Квантовый стандарт частоты оптического и СВЧ диапазона [Текст]: пат. № 143081 / Бикмухаметов К.А., Головин Н.Н., Дмитриев А.К. – заявл. 22.10.2013; опубл. 10.07.2014; Бюл. № 19.
80. Квантовый стандарт частоты оптического и СВЧ диапазона [Текст]: пат. № 143824 / Бикмухаметов К.А., Головин Н.Н., Дмитриев А.К. – заявл. 30.07.2013; опубл. 27.07.2014; Бюл. № 21.
81. Бакланов Е.В. Абсолютное измерение длины с помощью фемтосекундного лазера / Бакланов Е. В., Дмитриев А.К. // Квантовая электроника. – 2002. –

- Т. 32. – № 10. – С 925-928. = Baklanov E. V. Absolute length measurements with a femtosecond laser / E. V. Baklanov, A.K. Dmitriev // Quantum Electronics. – 2002. – Т. 32. – № 10. – С 925-928.
82. Бакланов Е.В. Фемтосекундный стандарт частоты с внешним высокочастотным интерферометром / Бакланов Е.В., Головин Н.Н., Григорьева С.В., Дмитриев А.К. // Оптика и спектроскопия. – 2016. – Т. 121. – № 6. – С. 1001-1004. = E. V. Baklanov. A femtosecond frequency standard with an external high-finesse interferometer / E. V. Baklanov, N. N. Golovin, S. V. Grigor'eva, A. K. Dmitriev // Optics and Spectroscopy. - 2016. - Vol. 121. – iss. 6. - Pp. 930–933.
83. Dmitriev A. Stabilisation of a femtosecond frequency standard using a Michelson interferometer / A. Dmitriev, E. Baklanov, N. Golovin, S. Grigoryva // Modern problems of laser physics: techn. digest, the 7 intern. symp. and young scientists school (MPLP–2016), Novosibirsk, 22–28 Aug. 2016. – Novosibirsk: Офсет-ТМ, 2016. – Р. 138. - ISBN 978–5–85957–131–4.
84. Способ получения последовательности идентичных фемтосекундных импульсов для излучения с произвольной шириной спектра [Текст]: пат. № 2760624 / Головин Н.Н., Дмитриев А.К., Савинов К.Н. – заявл. 07.12.2020; опубл. 29.11.2021. Бюл. № 34.
85. Головин Н.Н. Селектор импульсов для получения фемтосекундного излучения с управляемой фазой несущей относительно огибающей / Головин Н.Н., Дмитриев А.К. // Системы анализа и обработки данных. – 2022. – Т. 86. – № 2. – С. 121–132.
86. User Manual – SYNCRO Locking Electronics. – Munich: Menlo Systems GmbH, 2016. – 94 p.

ПРИЛОЖЕНИЕ А СТАБИЛИЗАЦИЯ СДВИГА ЧАСТОТНОЙ ГРЕБЕНКИ И ЧАСТОТЫ ПОВТОРЕНИЯ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРА MENLOSYSTEMS FC1500-250WG

Электроника стабилизации, интегрированная в платформу SYNCRO фемтосекундного лазера, состоит из регулируемого аналогового ПИД-регулятора с цифровым интерфейсом, управляемого микроконтроллером (рис.41). Входной сигнал на ПИД-регулятор может быть направлен через один из двух входных каналов с независимыми регулировками смещения и усиления. Секция ввода также включает настраиваемый пиковый детектор переходных процессов, который можно использовать для автоматического переключения между входными каналами.

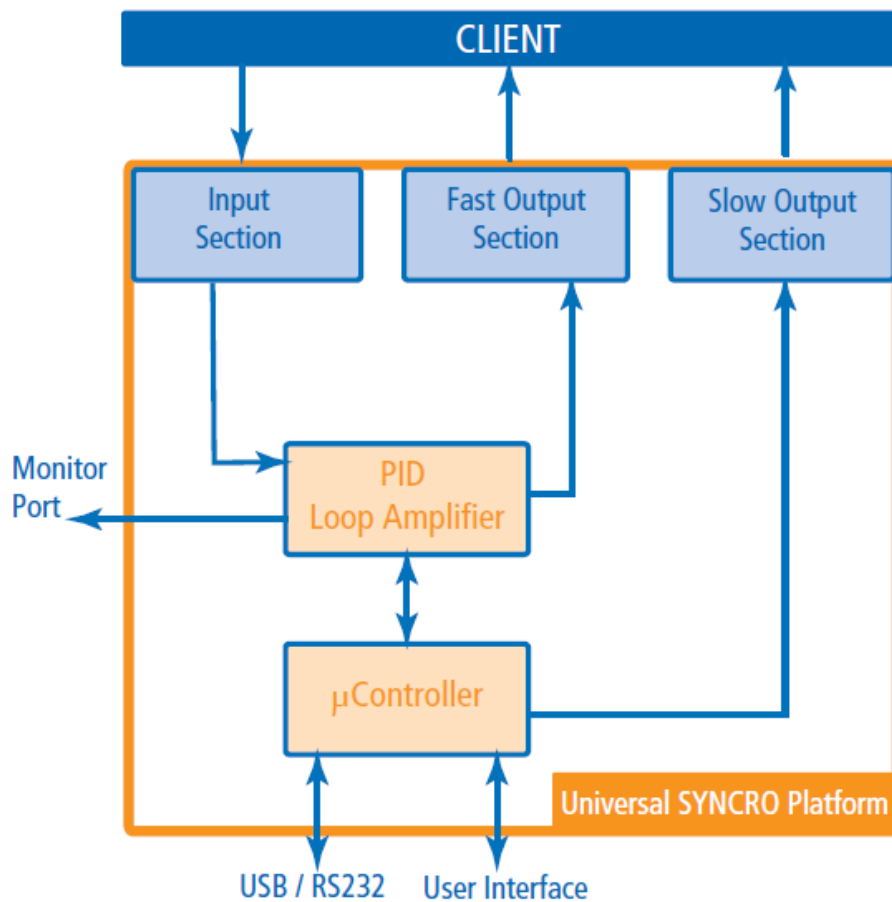


Рисунок 41 – Блок схема платформы SYNCRO [86]

ПИД-регулятор может быть сконфигурирован для дополнительного использования трактов сигналов интегратора и дифференциатора.

Соответствующие угловые частоты можно легко отрегулировать, чтобы получить наилучший результат для любого заданного контура управления. Сам контроллер может способствовать медленному интегратору для получения долговременной стабильности рабочего диапазона ПИД-регулятора.

Настраиваемые аппаратные выходные ограничители гарантируют, что выходное напряжение ПИД-регулятора поддерживается в заданном диапазоне, чтобы безопасно оставаться в пределах рабочего диапазона окончного устройства (клиента) стабилизации параметров лазера(например, вход модуляции драйвера лазера).

ПИД-регулятор (рис. 42) имеет два входных канала C1 и C2. Одновременно в ПИД-регулятор может подаваться только один входной канал. Параметр усиления предусилителя для каждого канала может быть установлен независимо.

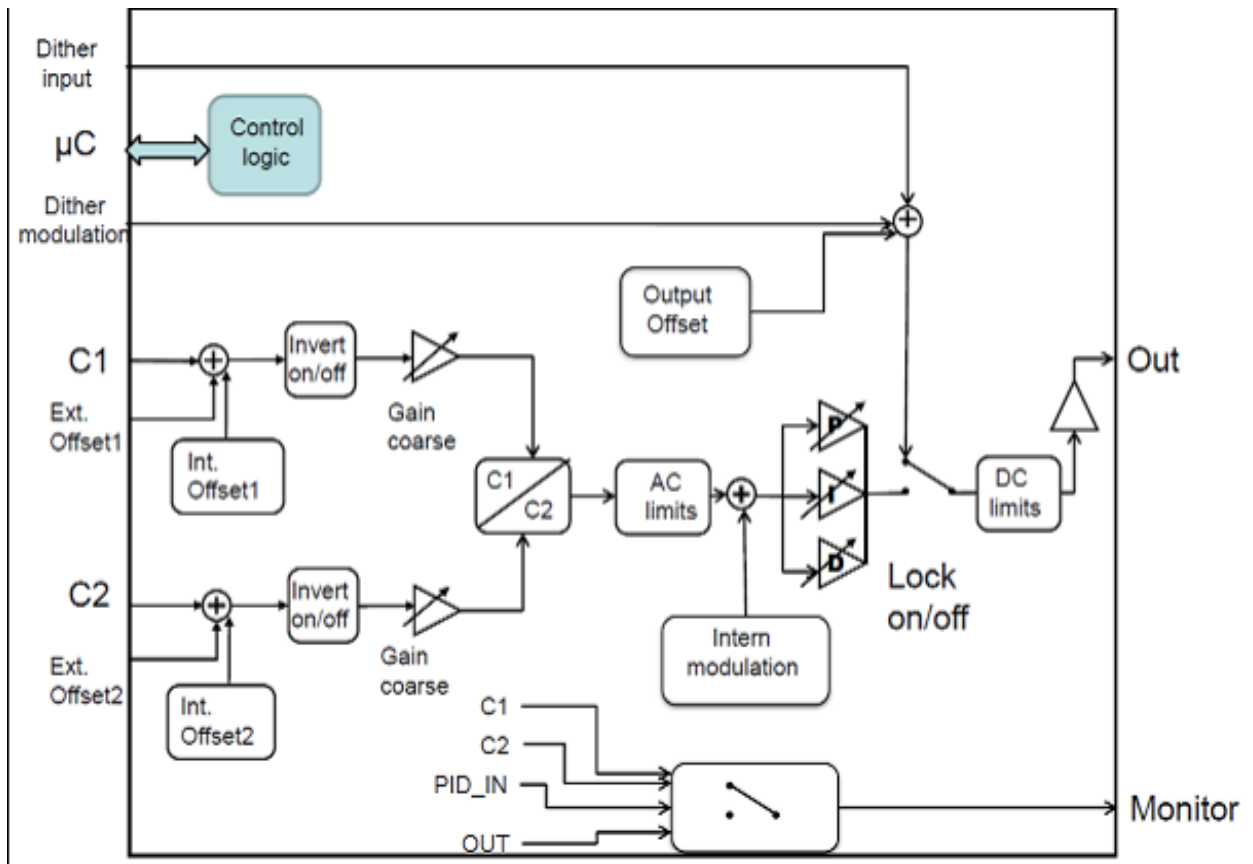


Рисунок 42 – Функциональная схема ПИД-регулятора [86]

Формирование входного сигнала позволяет инвертировать входные сигналы в канале 1 и канале 2, а также регулировать смещение соответствующего сигнала. Секция ПИД позволяет регулировать пропорциональное усиление (подраздел «P»), частоту среза интегратора (подраздел «I») и частоту среза дифференциатора (подраздел «D») активного входного канала. Настройки ПИД для каждого входного канала сохраняются отдельно. Интегральную и дифференциальную часть параметров блокировки можно активировать или деактивировать независимо друг от друга.

На рис. 43 показан снимок экрана прецизионной настройки параметров ПИД-регулятора. Пиктографический рисунок символизирует функциональную схему ПИД-регулятора и обеспечивает быстрый доступ к отдельным параметрам.

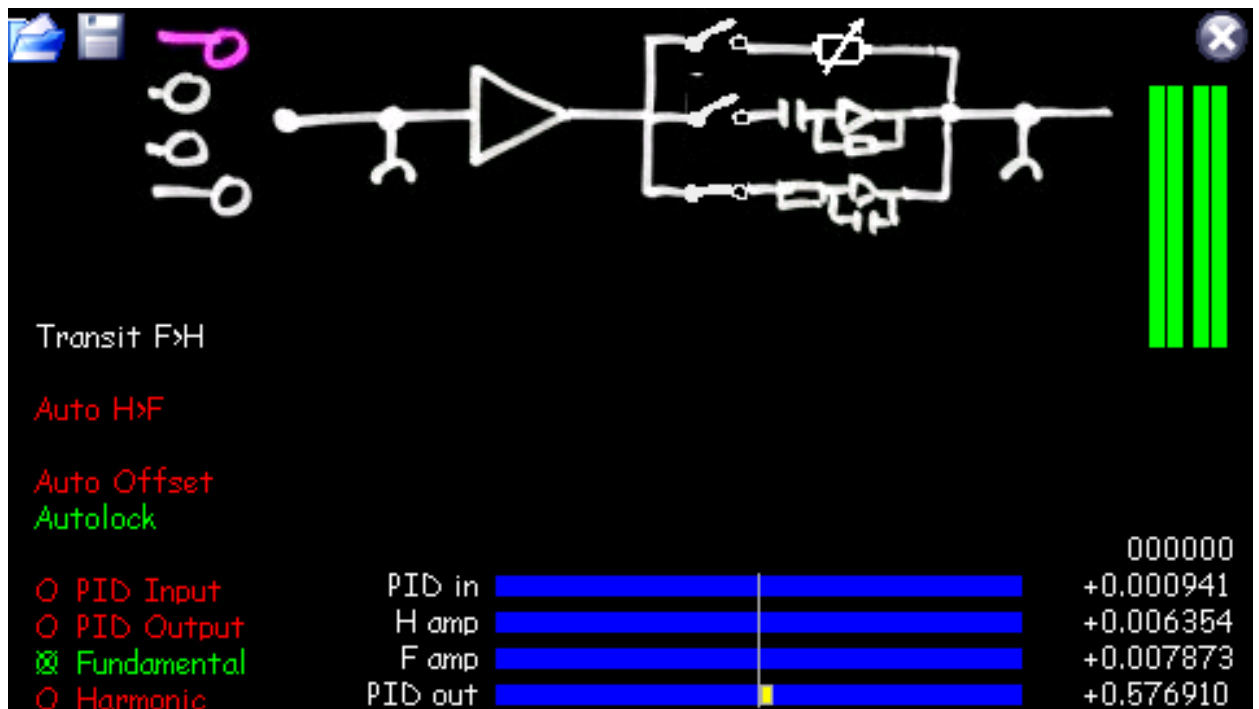


Рисунок 43 – Экран прецизионной настройки параметров ПИД-регулятора

В системах с двухступенчатой стабилизацией кнопка «Транзит F>H» меняет вход с C1 (несущий сигнал ошибки на основной частоте) на C2 (сигнал ошибки на частоте гармоники). В этом контексте, если активирована опция «Auto H>F», регулятор автоматически переключится обратно на вход «C1» (также обозначается, как сигнал «Fundamental») всякий раз, когда детектор

порога переменного тока сигнализирует о быстром изменении сигнала ошибки.

Для контроля параметров стабилизации лазера можно настраивать следующие параметры ПИД-регулятора: параметры предусилителя (рис. 44), усиление пропорционального канала (рис. 45), постоянную времени интегрального канала (рис. 46), постоянную времени дифференциального канала (рис. 47).

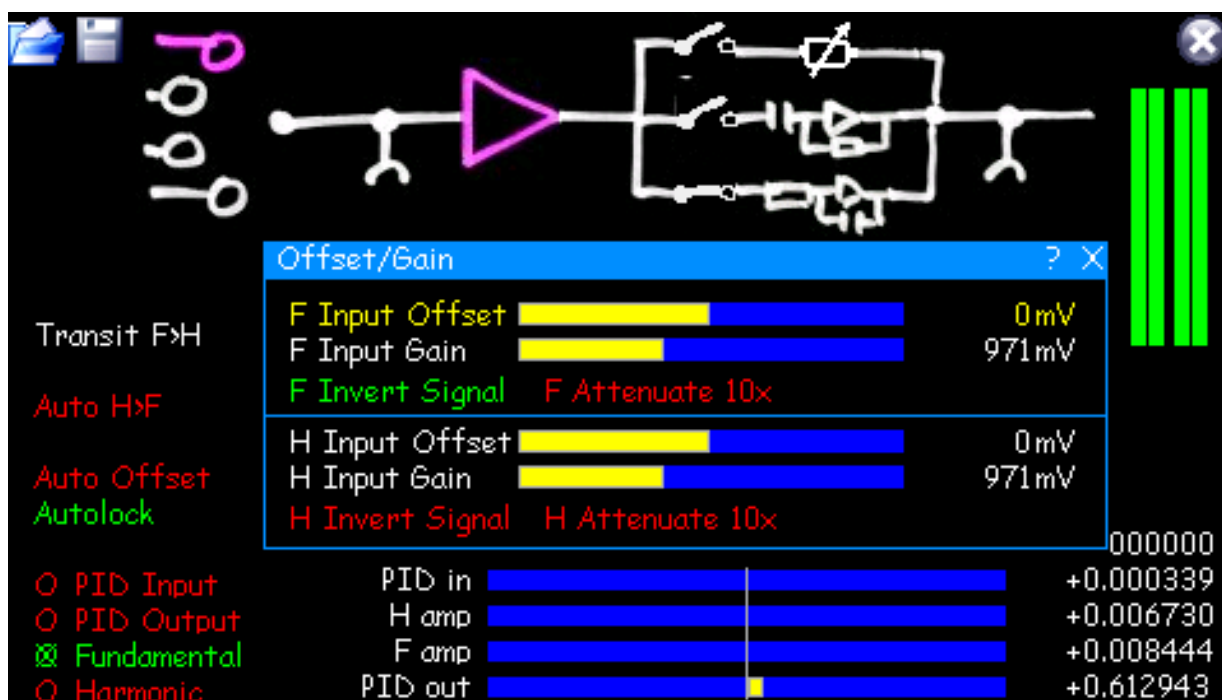


Рисунок 44 – Настройка параметров предусилителя ПИД-регулятора

Общее усиление и смещение сигнала для двух входных каналов можно настроить с помощью соответствующих полос дисплея:

- «FInputOffset»: сигнал смещения добавляется к входу ПИД-регулятора на C1 (основной).
- «FInputGain»: усиление смещения на входе ПИД-регулятора для канала C1.
- «FInvertSignal»: инвертировать сигнал. Эффект виден только при включенном замке.
- «FAttenuate 10x»: для ослабления входного сигнала ПИД-регулятора в 10 раз на канале C1.

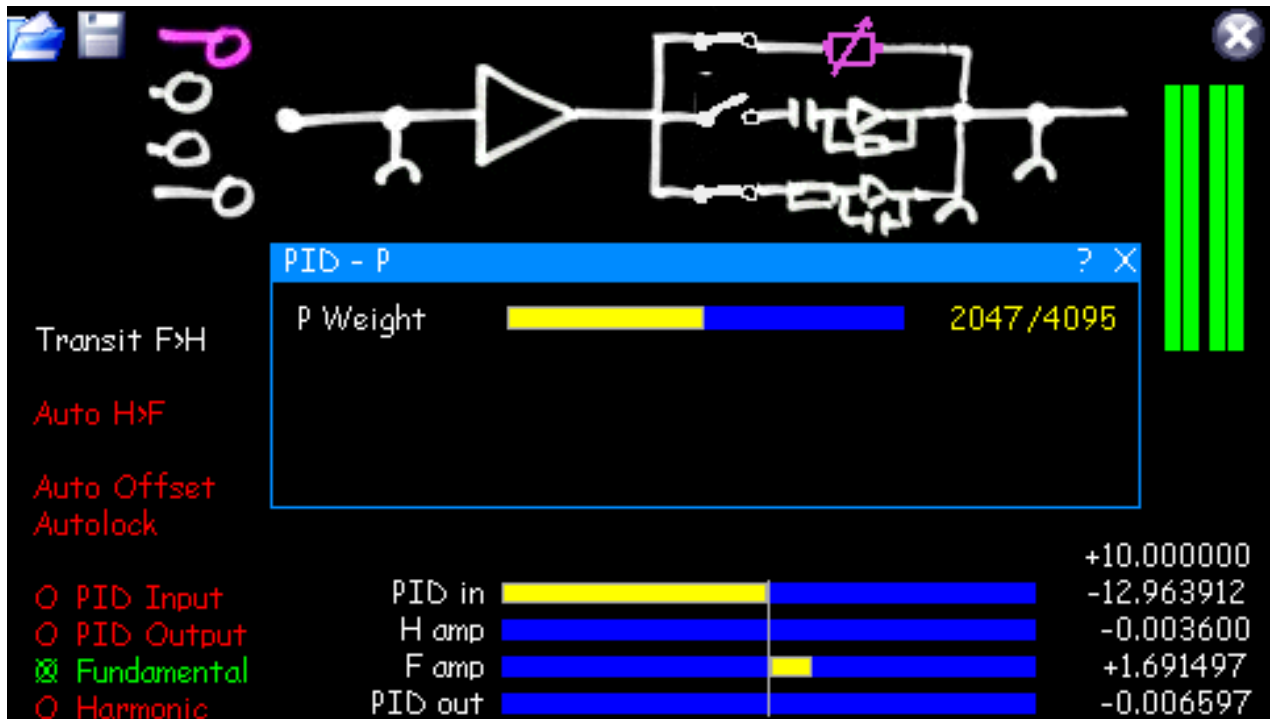


Рисунок 45 – Настройка параметров пропорционального канала ПИД-регулятора

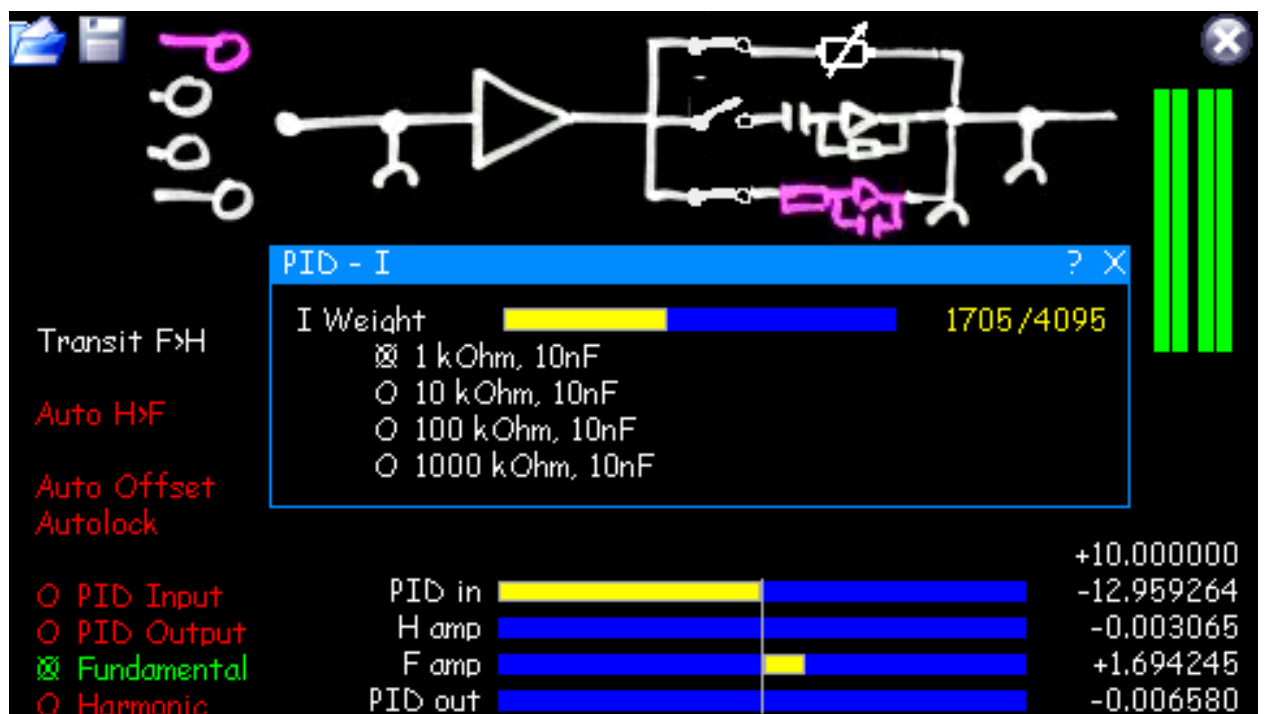


Рисунок 46 – Настройка параметров интегрального канала ПИД-регулятора

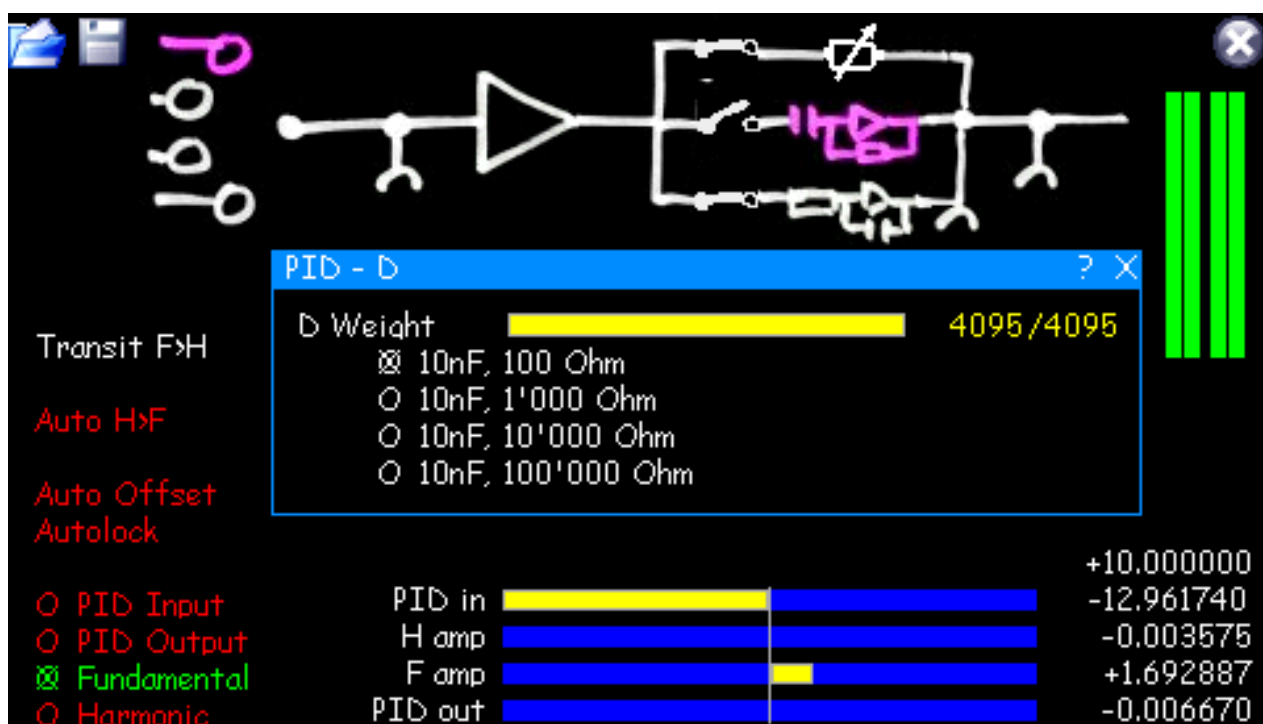


Рисунок 47 – Настройка параметров дифференциального канала ПИД-регулятора

Помимо ПИД-регулятора в платформу SYNCRO входят следующие блоки:

Аналого-цифровой преобразователь

Модуль аналого-цифрового преобразователя (АЦП) (рис. 48) установлен на платформе SYNCRO для обеспечения монитора с низким уровнем шума с биполярными входами ± 10 В. Модуль АЦП имеет три несимметричных и три псевдодифференциальных входа. Доступны два дополнительных входных сигнала. Преобразователь имеет высокую точность с 16-битным разрешением.

Цифро-аналоговый преобразователь

Модуль цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) (рис. 49) может быть установлен на платформе SYNCRO для обеспечения монитора с низким уровнем шума и биполярным выходом ± 10 В. Преобразователь имеет высокую точность с 16-битным разрешением.

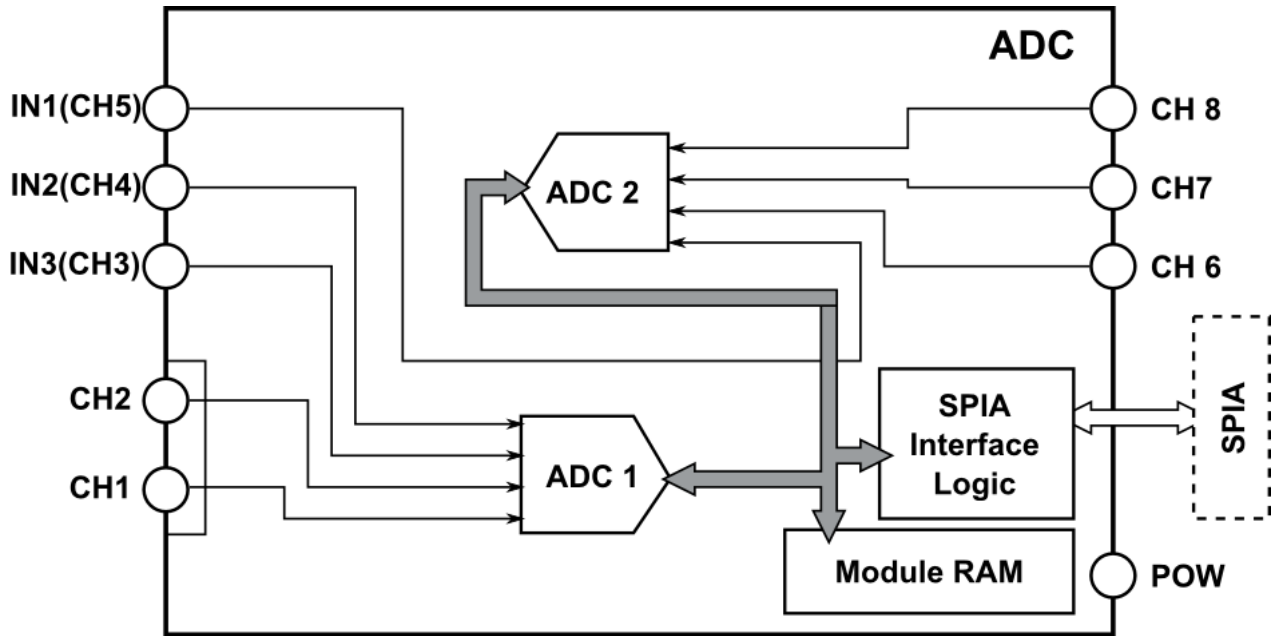


Рисунок 48 – Функциональная блок-схема АЦП [86]

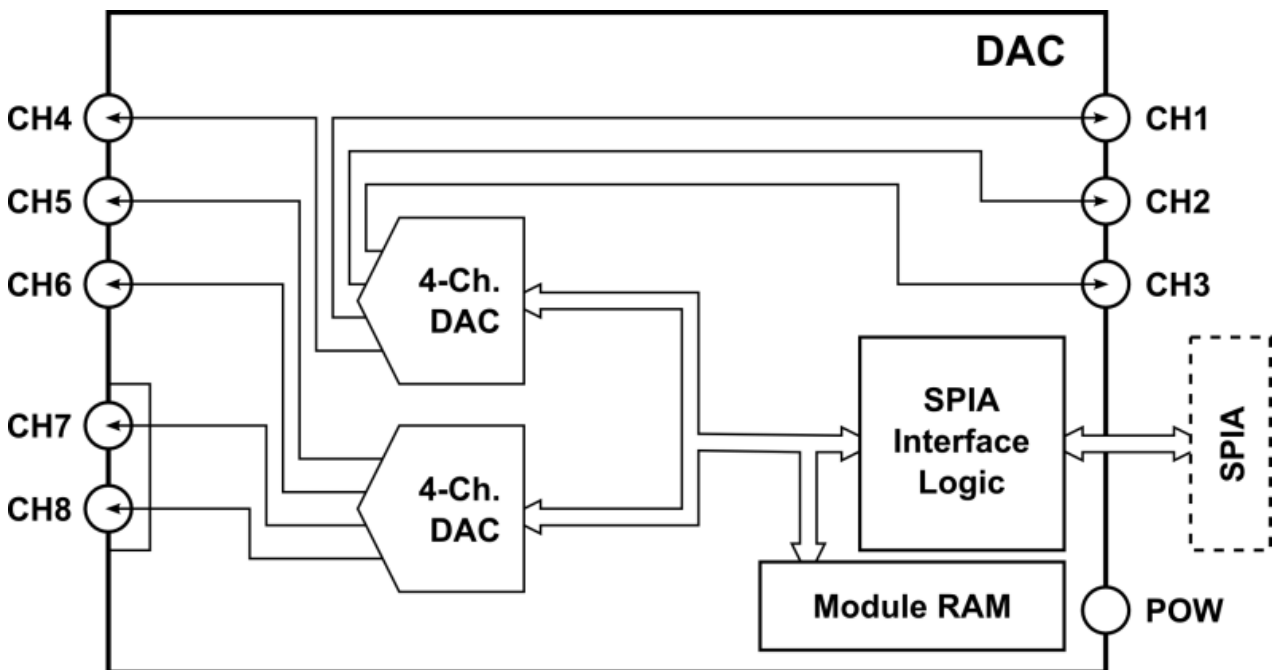


Рисунок 49 – Функциональная блок-схема ЦАП [86]

Модуль цифрового ввода/вывода (DIO)

В конфигурации RRE платформы SYNCRO (т.е. для стабилизации частоты повторения импульсов фемтосекундного лазера) модуль DIO (рис.50) используется для определения наличия или отсутствия опорного сигнала 10 МГц для модуля фазовой автоподстройки частоты.

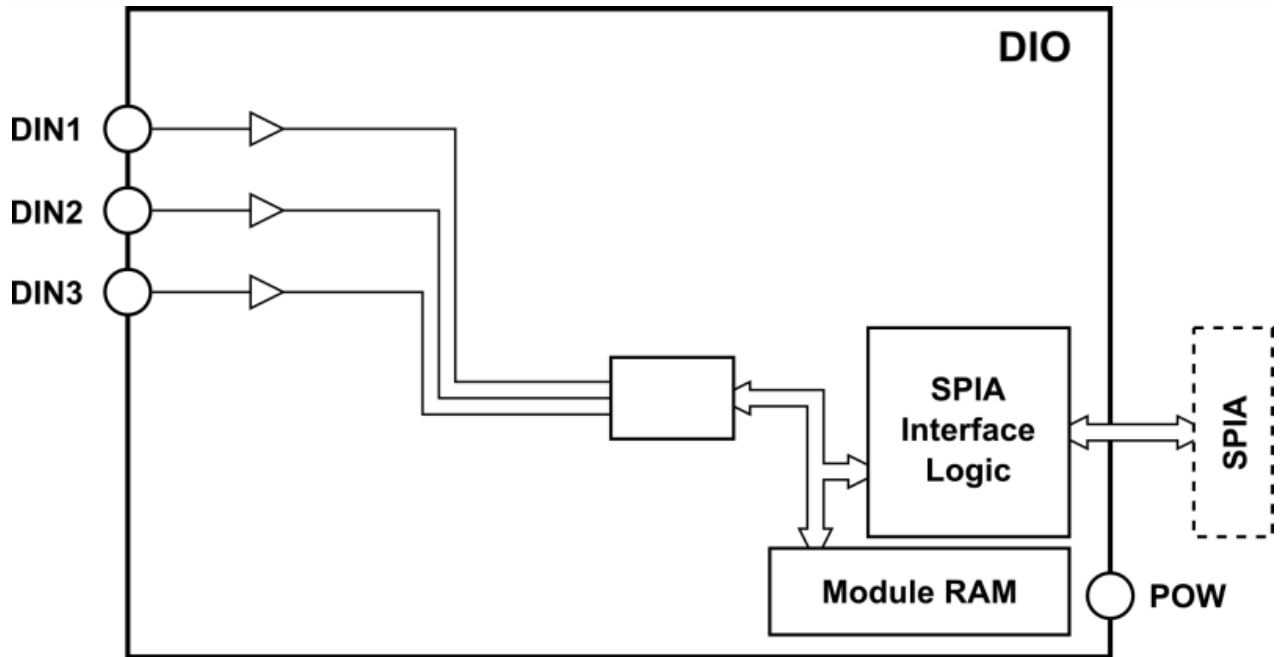


Рисунок 50 – Функциональная блок-схема модуля цифрового ввода-вывода

[86]

Модуль DUO

DUO (рис. 51) можно использовать для реализации аппаратного трекера, при этом выходной сигнал ПИД-регулятора поддерживает трекер близко к идеальной рабочей точке. Основное применение заключается в объединении быстрого электрооптического модулятора (ЭОМ) для быстрого управления частотой повторения с высокой пропускной способностью в ограниченном диапазоне изменения с медленным пьезоприводом, который обеспечивает гораздо больший диапазон блок фазовой привязки частоты повторения.

Модуль SYNCRO DUO состоит из двух выходных буферов: один для выходного сигнала шлюза, а другой для медленного интегратора с регулируемой рабочей точкой и смещением. Возможные области применения включают в себя управление быстрым исполнительным механизмом с малым влиянием на частоту в широкой полосе пропускания с выходом ПИД-регулятора, а также стабилизацию среднего выходного сигнала ПИД-регулятора с использованием медленного интегратора для управления вторым

исполнительным механизмом с малой пропускной способностью и большим влиянием.

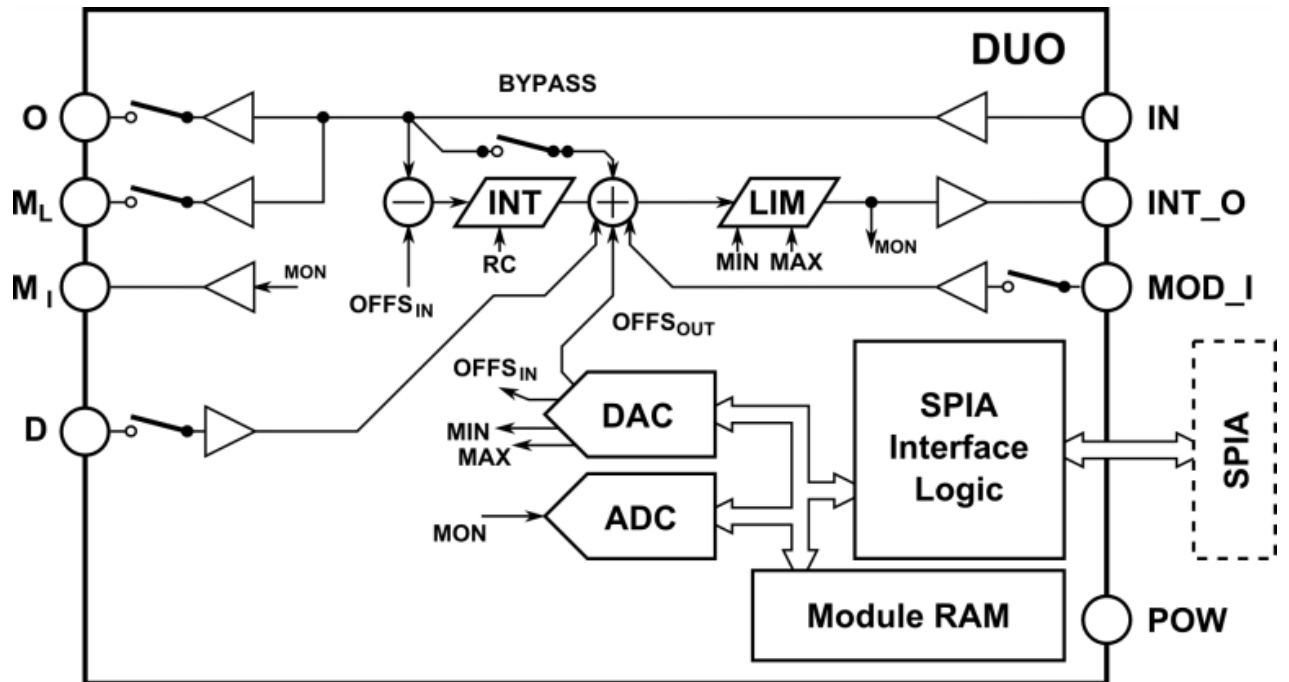


Рисунок 51 – Функциональная блок-схема модуля DUO [86]

Модуль DXD

Модуль DXD (рис.52) представляет собой цифровой фазовый детектор.

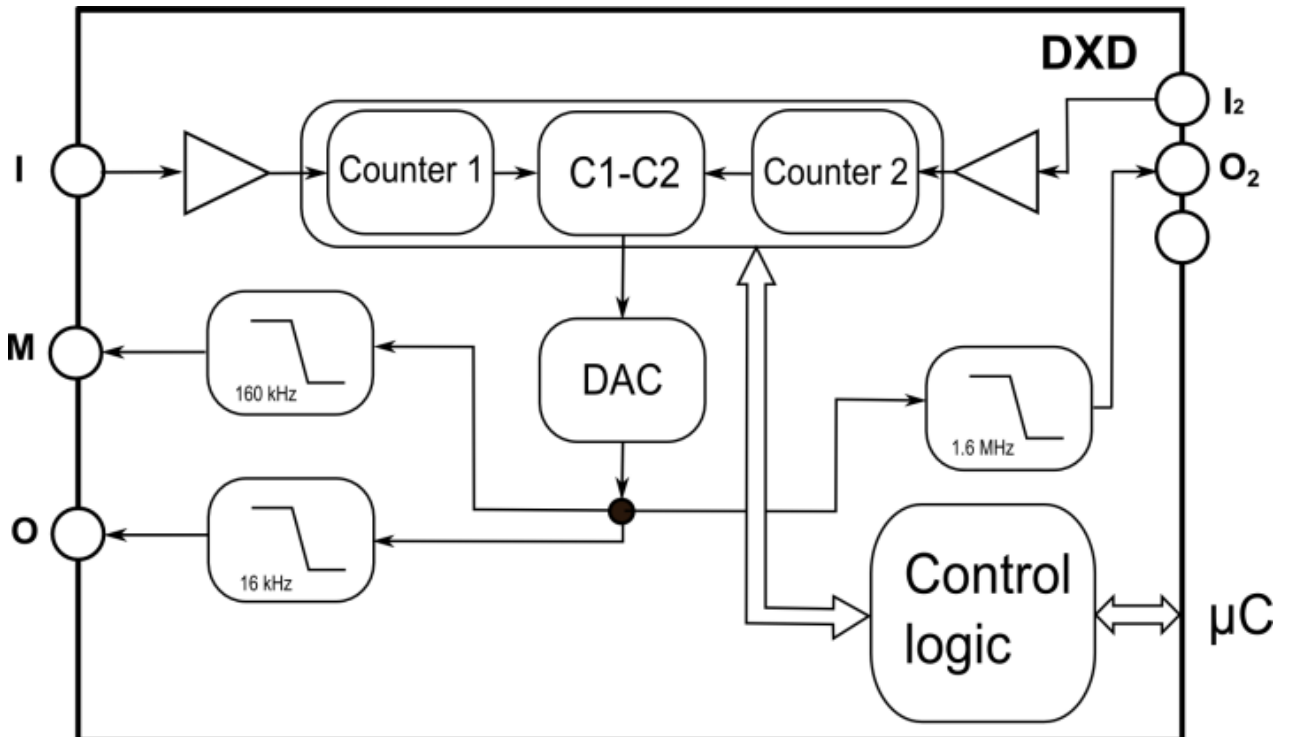


Рисунок 52 – Функциональная блок-схема модуля DXD [86]

Основным элементом цифрового фазового детектора DXD является счетчик, в котором выпрямленный сигнал на входе I_1 ведет прямой отсчет, а выпрямленный сигнал на входе I_2 на задней панели устройства DXD ведет обратный отсчет. 6-битный счетчик имеет диапазон значений от 0 до 64 и поэтому может отслеживать разность фаз $\pm 32 \cdot 2\pi$ между двумя источниками. 12-битный счетчик имеет диапазон от 0 до 4096 и может отслеживать разность фаз $\pm 2048 \cdot 2\pi$ между двумя источниками.

На рисунке 53 показан выходной сигнал для двух немного различающихся входных сигналов. Этот сигнал подается в цифро-аналоговый преобразователь для генерации сигнала, пропорционального относительной фазе.

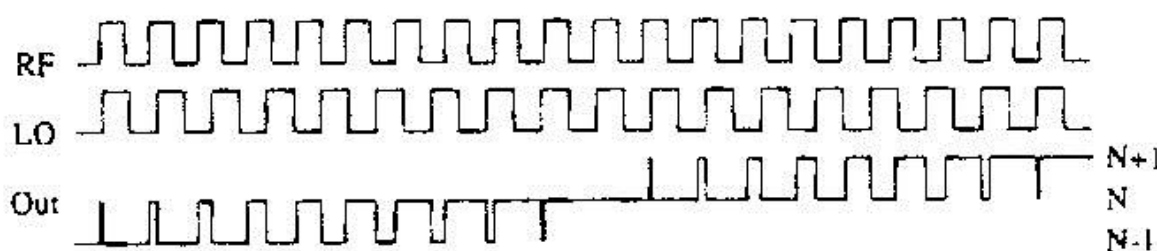


Рисунок 53 – Входные (RF, LO) и выходной (Out) сигналы цифрового фазового детектора

Устройство имеет два выходных порта с выходным напряжением, пропорциональным положению счетчика. Диапазон выходного напряжения составляет от -3,3 В до +3,3 В. Выходной порт O_2 , который подается на SYNCRO, имеет фильтр нижних частот (полоса пропускания 3 дБ, 1,6 МГц), как и выходные порты O и M (полоса пропускания по уровню 3 дБ: O – 16 кГц, M – 160 кГц).

Допустимые уровни входного сигнала находятся в диапазоне от -27 дБм до +13 дБм. Оба входных порта имеют импеданс 50 Ом, порт O имеет высокий импеданс (> 1 кОм), порт M также имеет высокий импеданс (10 кОм).

На рисунке 54 приведены примеры выходных сигналов модуля DXD.

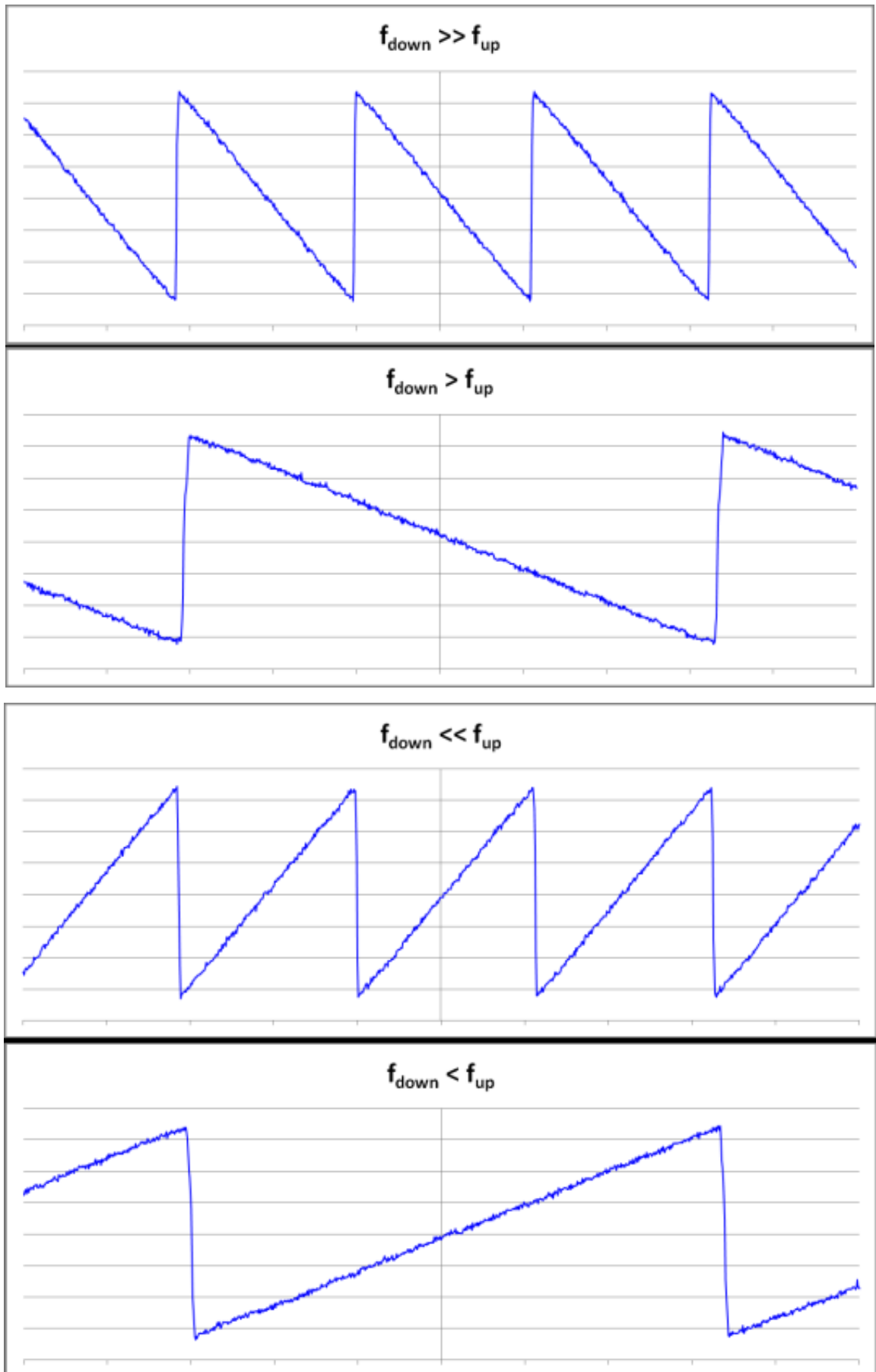


Рис. 54. Выходные сигналы цифрового фазового детектора

Модуль FDT

Модуль FDT (рис. 55) делит сигнал частоты повторения лазерного излучения. Он также используется в платформе SYNCRO-RRE, для деления частоты сигнала биений.

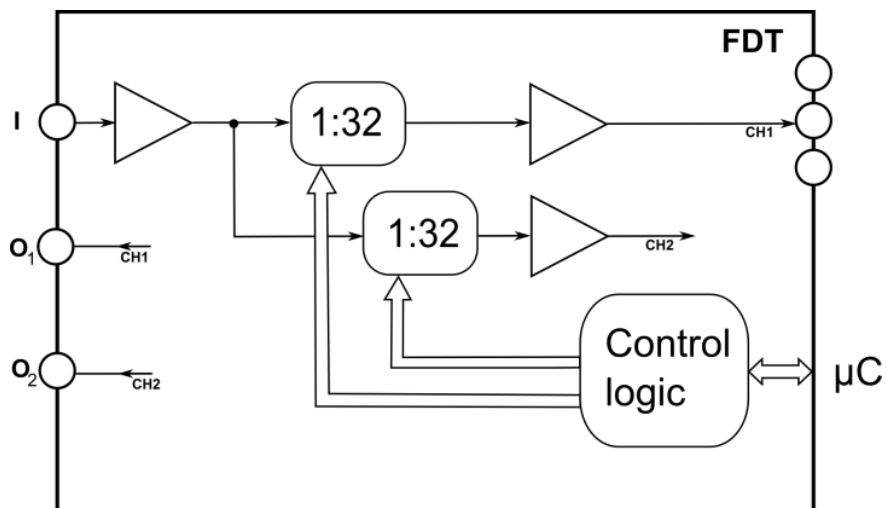


Рисунок 55 – Функциональная блок-схема модуля FDT [86]

Блок делителя предназначен для разделения радиочастотных сигналов с коэффициентом деления от 1 до 32. Он принимает входные сигналы частотой от 1 МГц до 1 ГГц с амплитудой от -28 дБм до +13 дБм и выдает выходные ТТЛ-сигналы. Каждый выход можно использовать независимо. Коэффициент деления для внутреннего и внешнего выхода можно установить независимо.

Высоковольтный усилитель

Блок усилителя высокого напряжения (HVA) управляет пьезоэлектрическим преобразователем, служащим для перемещения зеркала резонатора лазера.

Модуль HVA (рис. 56) предназначен для усиления выходного сигнала ПИД-регулятора или сигнала от (медленного) трекера. Модуль включает в себя преобразователь HV-DC/DC для подачи питания до 200 В на встроенный высоковольтный усилитель. Дополнительные внешние высоковольтные источники питания не требуются.

При использовании в стандартном выходном слоте SYNCRO модуль HVA действует как усилитель и драйвер для выходного сигнала ПИД-регулятора, чтобы напрямую управлять, например, пьезоэлементом или ЭОМ в качестве основного исполнительного механизма в контуре управления. В качестве альтернативы HVA можно установить в дополнительный выходной слот SYNCRO. Здесь он усиливает сигнал от медленного устройства слежения (например, медленного каскада интегратора), чтобы управлять более длинным пьезоэлементом с узкой полосой пропускания для увеличения диапазон аперемещения контура управления.

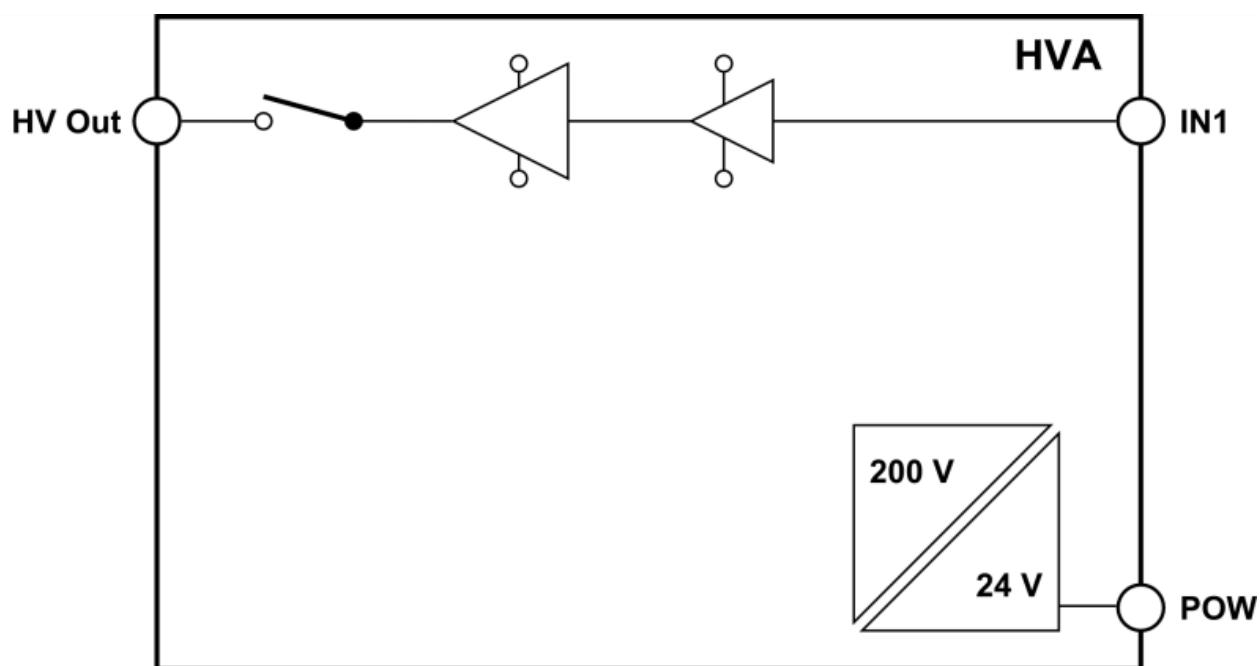


Рисунок 56 – Функциональная блок-схема усилителя высокого напряжения

[86]

Шаговые двигатели

Шаговые двигатели (рис. 57) используются в качестве приводов для программно-управляемого медленного интегратора.

Модуль OFD

Модуль OFD (рис. 58) используется для усиления, фильтрации и распределения сигналов низкого уровня: частотного сигнала СЕО (при

стабилизации CEO) или сигнала биений между непрерывным (continuouswave, CW) лазером и гребенкой (при измерении длины волны излучения CW лазера).

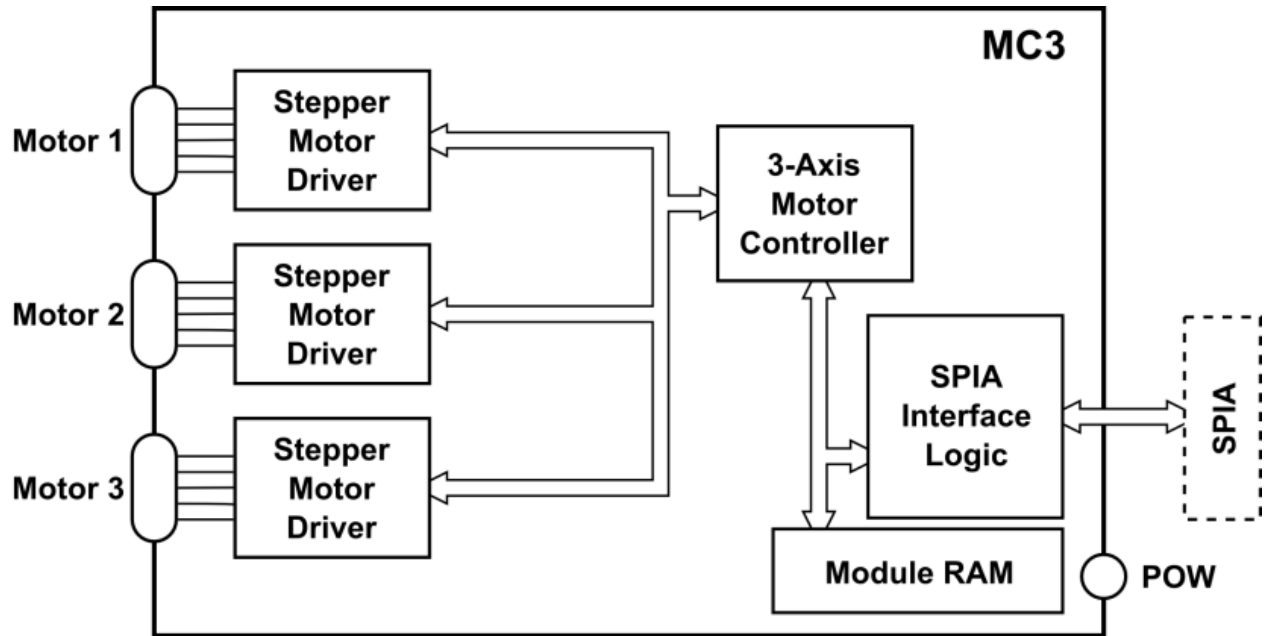


Рисунок 57 – Функциональная блок-схема модуля шаговых двигателей [86]

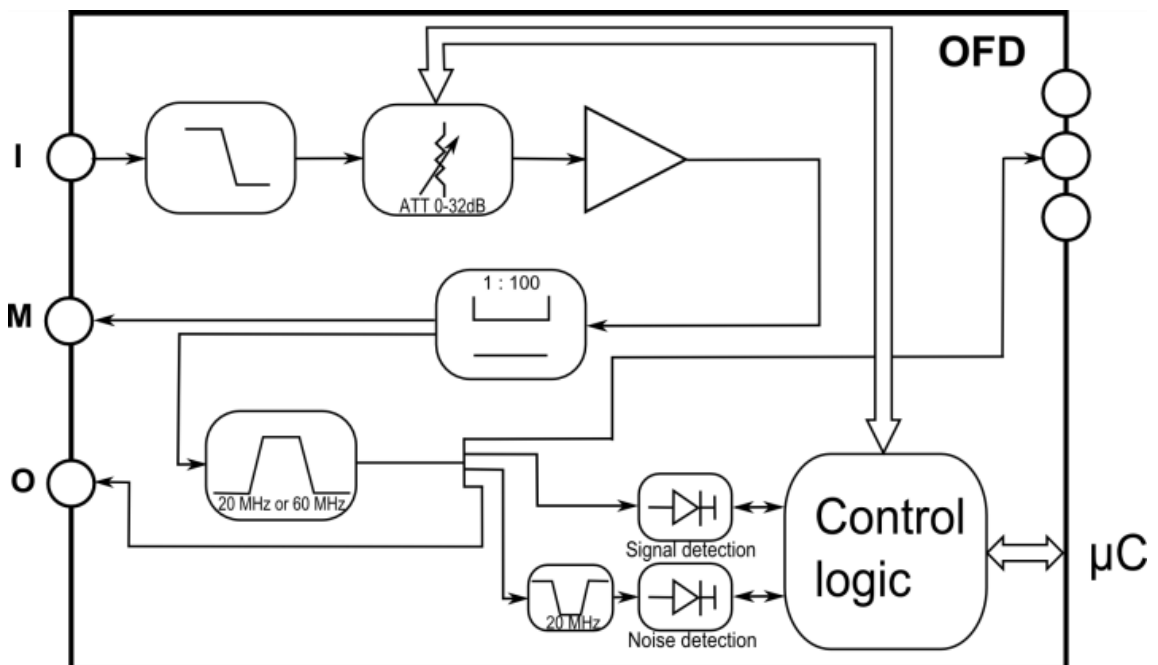


Рисунок 58 – Функциональная блок-схема модуля OFD [86]

Сигнал с частотой CEO выделяется с помощью PIN-фотодиода, либо с помощью лавинного фотодиода и подается на вход I модуля OFD. Сигнал

проходит фильтрацию нижних частот (50 МГц или 105 МГц) и усиливается. Ослабление можно использовать для выбора оптимальных уровней мощности, и оно регулируется в диапазоне от 0 до 32 дБ. Сигнал после ослабления разделяется на две части, одна часть подается на порт монитора М, другая часть подвергается полосовой фильтрации на частоте 20 МГц (центр полосы: 21,4 МГц, полоса пропускания по 3 дБ: 17,9 МГц ... 25,3 МГц) или 60 МГц (центр полосы: 60 МГц, полоса пропускания по 3 дБ: 49,8 МГц ... 70,5 МГц). Другой разветвитель распределяет сигнал между портом О (для частотомера), управляющей логикой и портом вывода для дальнейшей обработки в блоке SYNCRO.

Модуль RFC

Модуль RFC (рис. 59) представляет собой аналоговый фазовый детектор. Он определяет фазу сигналов частотой ~ 20 МГц относительно опорного ВЧ-сигнала и обеспечивает выходной сигнал для счетчика.

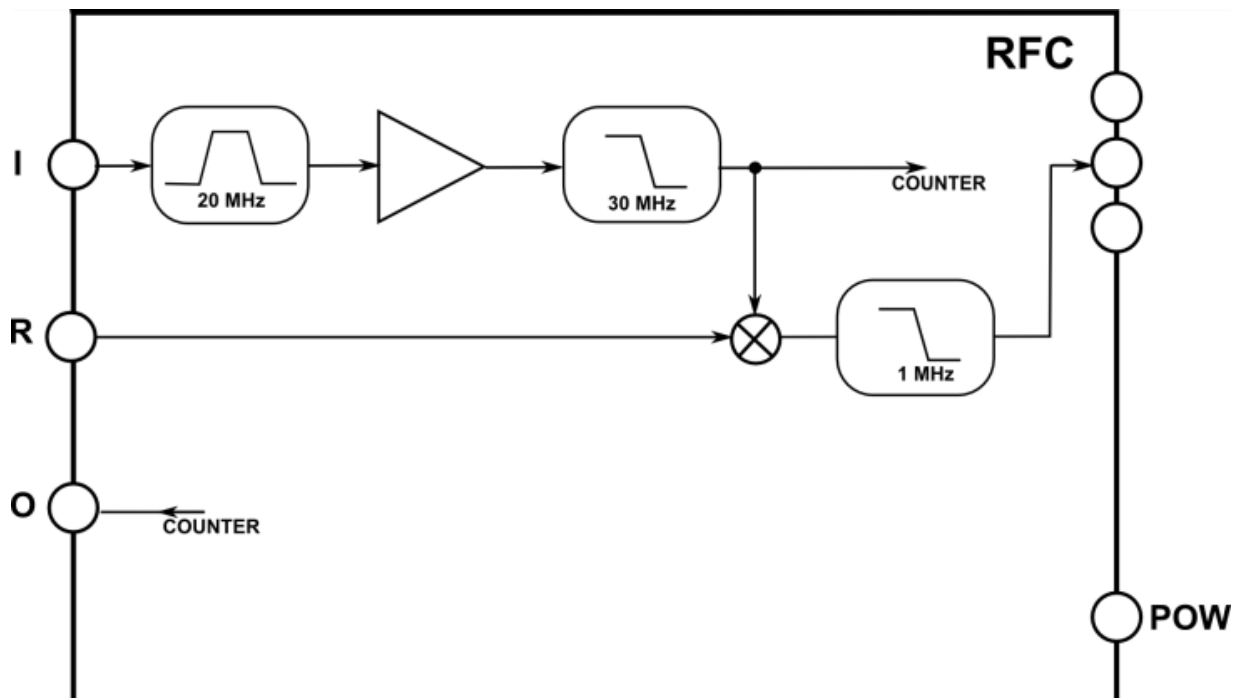


Рисунок 59 – Функциональная блок-схема модуля RFC [86]

Сигнал частотой около 20 МГц подается на входной порт I. Он фильтруется, усиливается и разделяется между выходным портом О (счетчик)

и фазовым детектором. Выходной порт О предназначен для измерения стабилизированного сигнала. Используя опорный сигнал частотой 20 МГц (например, синтезатор DDS120) на опорном входе R, RFC микширует входной сигнал I до постоянного тока. Результирующий сигнал постоянного тока проходит фильтрацию нижних частот и подается на ПИД-регулятор SYNCRO в качестве сигнала ошибки.

Модуль RFS

Модуль RFS (рис. 60) – это блок аналогового фазового детектора, входящий в состав платформы SYNCRO-RRE. Он определяет фазу входных РЧ-сигналов относительно опорного РЧ-сигнала.

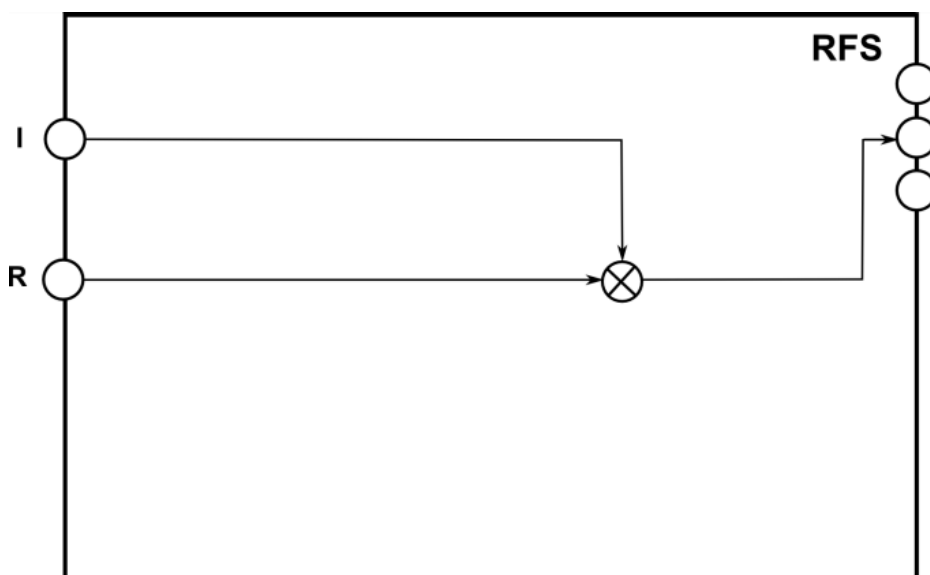


Рисунок 60. Функциональная блок-схема модуля RFS [86]

Платформа стабилизации CEO фемтосекундного лазера SYNCRO-CEO

Стандартная платформа SYNCRO-CEO состоит из следующих модулей:

- 1 OFD с внутренним полосовым фильтром 20 МГц,,
- 1 x DXD,
- 1 x PID,

- 1 x LBO.

На следующем рисунке 61 представлен общий вид входных и выходных соединений платформы.

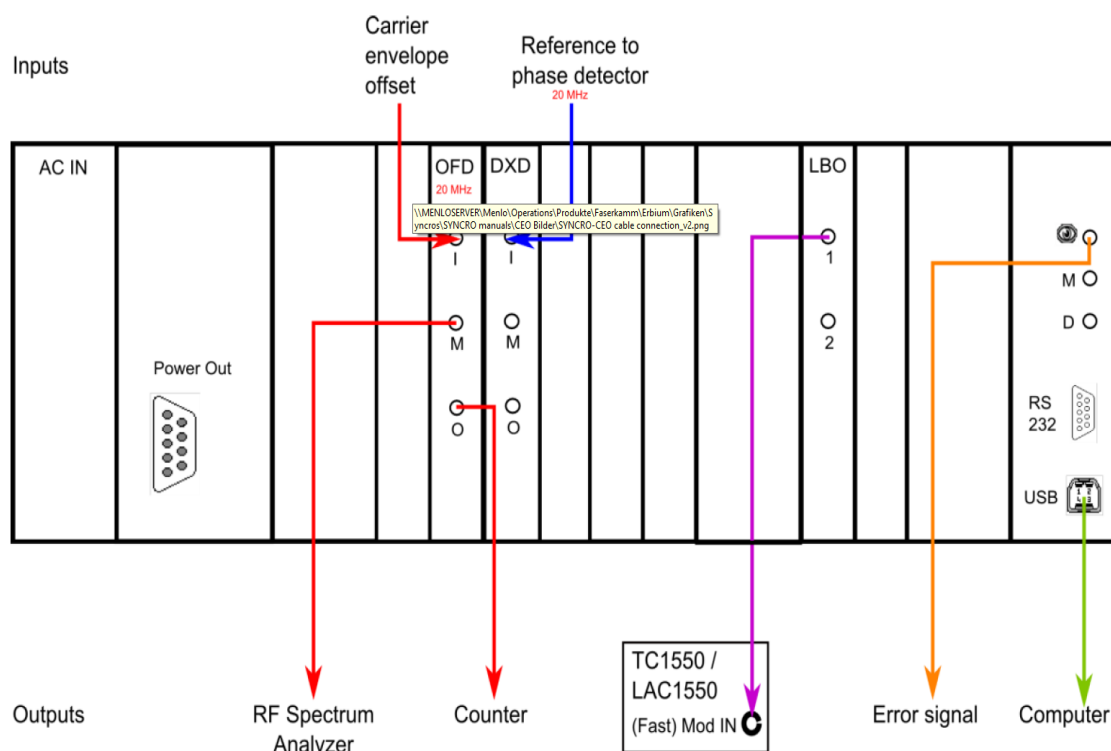


Рисунок 61 – Входы и выходы платформы SYNCRO-CEO [86]

Сигнал с частотой, равной сдвигу несущей относительно огибающей (f_{ceo}), детектированной в $f-2f$ интерферометре, подается на входному порту I модуля OFD. Усиленный и отфильтрованный сигнал внутренне подключается к модулю DXD, который определяет разность фаз между CEO и опорным сигналом, подаваемым на входной порт I DXD.

Соединение между DXD и ПИД-регулятором осуществляется внутри платформы. Выход ПИД-регулятора обеспечивается выходным портом 1 модуля LBO и подключается к входному порту блока драйвера генератора «(Fast) ModIn».

Чтобы визуализировать сигнал биений CEO, порт M модуля OFD должен быть подключен к анализатору РЧ спектра. Внешний выходной порт O OFD может быть подключен к счетчику. Сигнал ошибки должен отображаться на осциллографе.

Стабилизация CEO

Прежде чем приступить к настройкам параметров стабилизации CEO, необходимо оптимизировать отношение сигнал/шум биений. Оптимизация достигается регулировкой величин токов четырех светодиодов накачки фемтосекундного лазера. Отношение сигнал/шум наблюдаемого на анализаторе спектра сигнала биений должно быть равно не менее 30 дБ в полосе разрешения 100 кГц.

На рисунке 62 показано окно управления параметрами стабилизации CEO, расположенное на передней панели платформы SYNCRO-CEO. Стабилизация осуществляется по каналу С1 (основной сигнал биений). Усиления P устанавливается в пределах [-15; 0] дБ. Полоса интегратора I устанавливается в пределах [100; 3000] Гц. Выходное напряжение SYNCRO (нижняя полоса настройки на рис. 33) устанавливается в середине диапазона регулировки: 0,5 В.

Далее следует установить $f_{ceo} \approx 20$ МГц. Грубая подстройка частоты осуществляется изменением напряжения канала С1. Тонкая подстройка частоты осуществляется изменением выходного напряжения SYNCRO. При этом сигнал ошибки, наблюдаемый на осциллографе должен стать «плоским» (рис. 86, среднее изображение). После этого можно включать режим стабилизации CEO.

После включения режима стабилизации CEO можно оптимизировать настройки ПИД-регулятора, чтобы уменьшить амплитуду сигнала ошибки.

Платформа стабилизации частоты повторения фемтосекундного лазера SYNCRO-RRE

SYNCRO-RRE используется для привязки частоты повторения либо к РЧ эталону (РЧ привязка), либо к сверхстабильному CW лазеру с узкой шириной линии (оптическая синхронизация).

При привязке частоты повторения к опорному радиочастотному сигналу в SYNCRO-RRE присутствуют следующие модули:

1 x DIO, 1 x RFC, 1 x HVA150, 1 x PID.

При выполнении оптической синхронизации (т. е. привязки одной моды гребенки к сверхстабильному непрерывному лазеру с узкой шириной линии излучения) SYNCRO-RRE содержит следующие модули:

1 x DIO, 1 x RFC, 1 x HVA150, 1 xPID, 1 xOFD с внутренним полосовым фильтром 60 МГц, 1 xFDT, 1 xRFS, 1 xDUO.

На рисунке 64 представлен общий обзор входных и выходных соединений при выполнении радиочастотной привязки.

Частота повторения с понижающим микшированием подается на входной порт I модуля RFC. RFC обнаружит разность фаз между частотой повторения микшированного сигнала и опорным сигналом, подаваемым на опорный порт R модуля RFC (выходной сигнал DDS120).

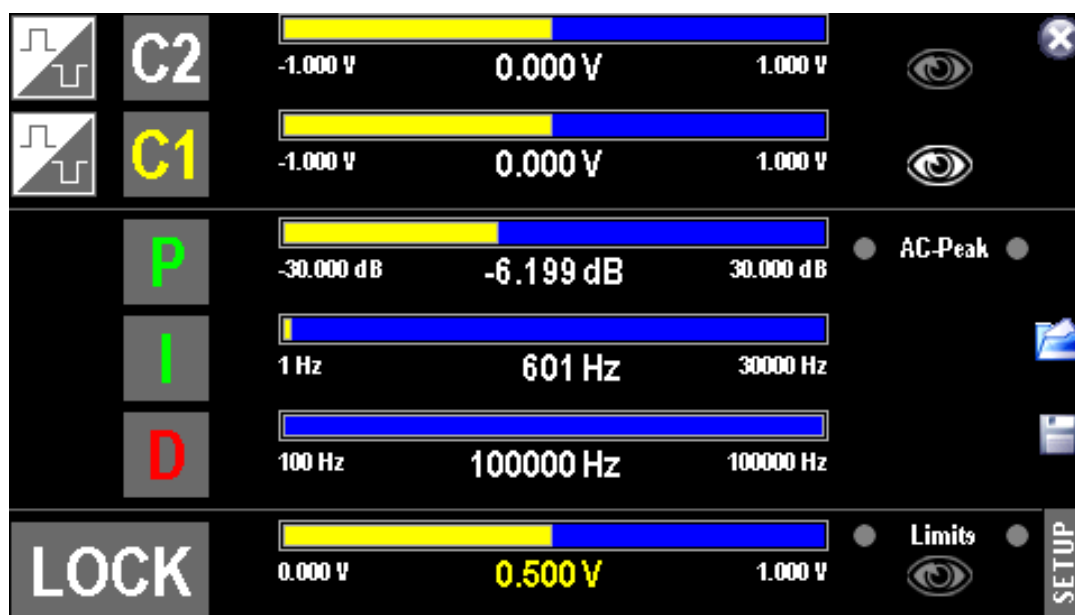


Рисунок 62 – Окно управления параметрами стабилизации СЕО

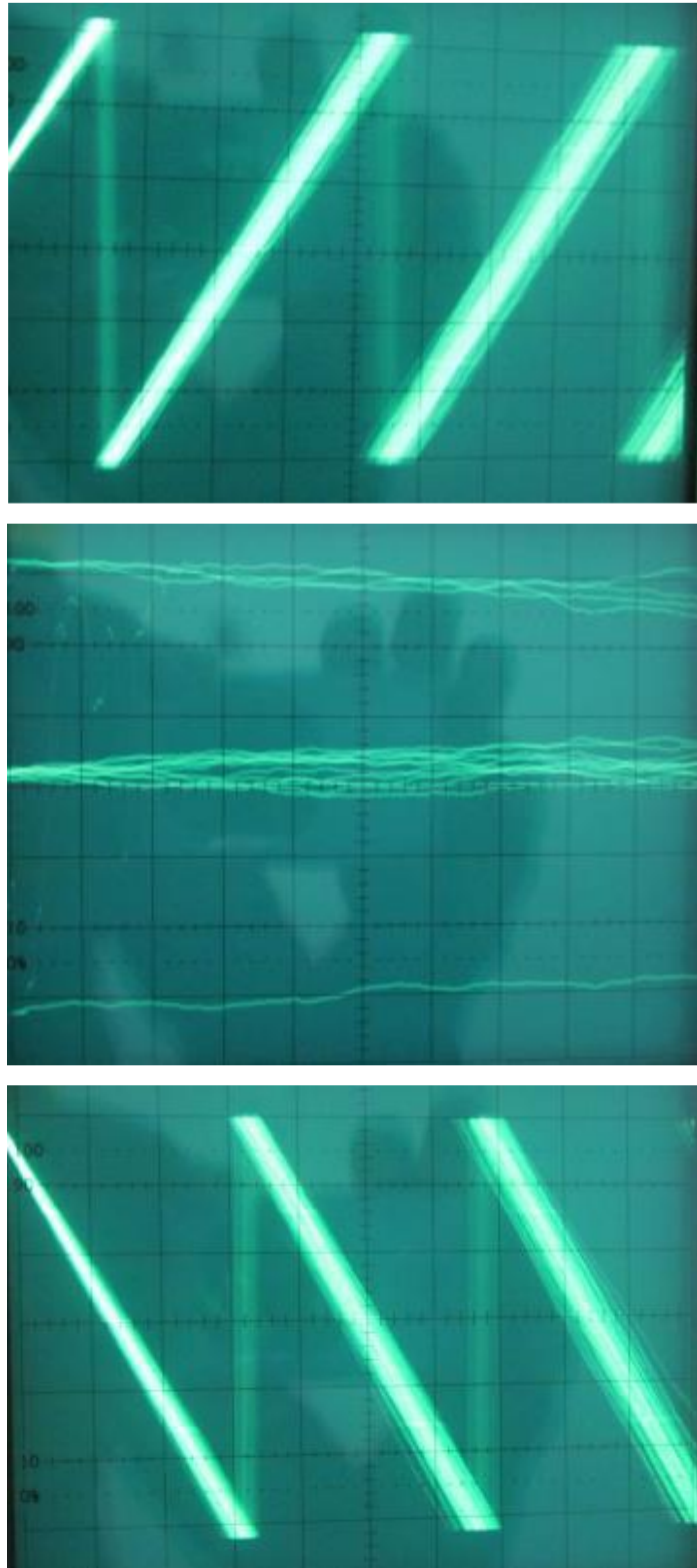


Рисунок 63 – Сигнал ошибки при $f_{ceo} < 20$ МГц (верхнее изображение), $f_{ceo} \approx 20$ МГц (среднее изображение), и $f_{ceo} > 20$ МГц (нижнее изображение)

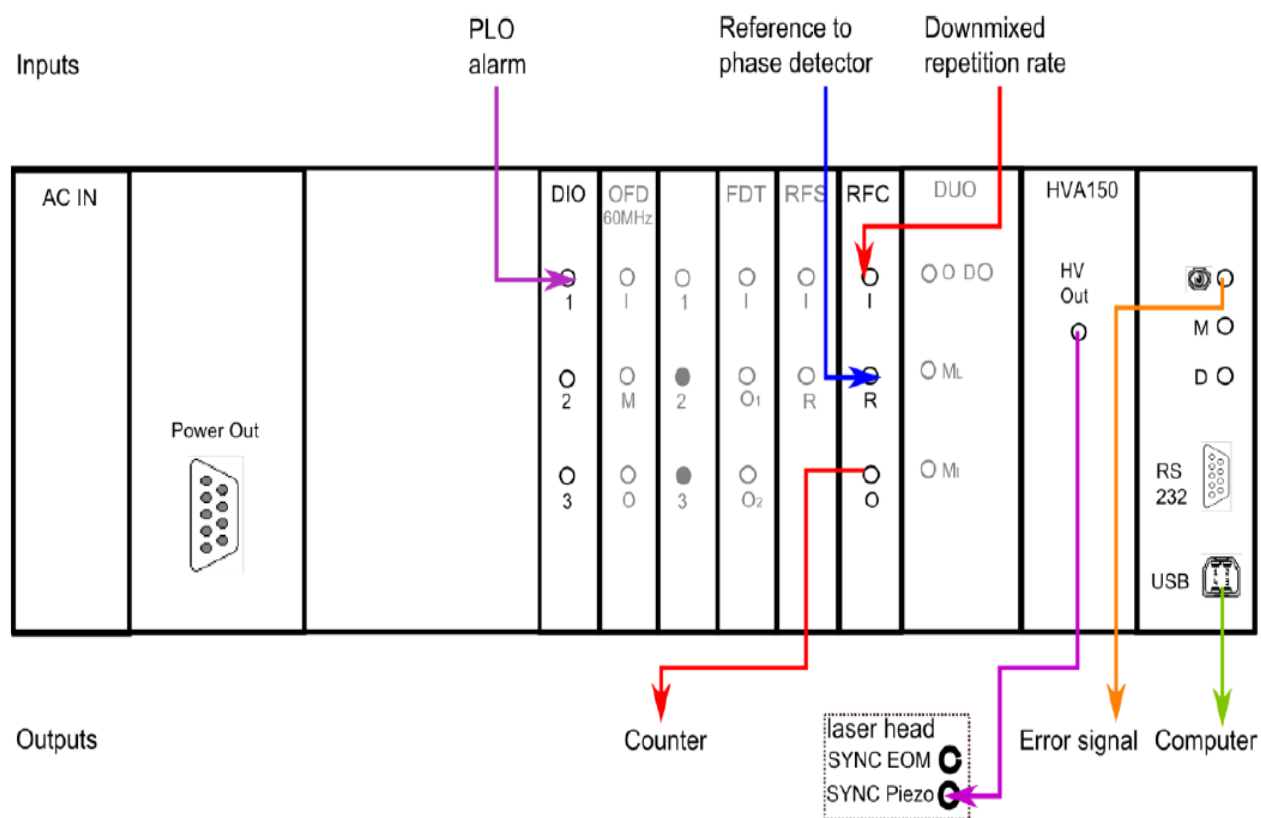


Рисунок 64 – Входы и выходы платформы SYNCRO-RRE при выполнении радиочастотной привязки [86]

Соединение между модулем RFC и ПИД-регулятором осуществляется внутри платформы. Выход ПИД-регулятора обеспечивается выходным портом HV Out модуля HVA150 и подключается к пьезоэлементу в резонаторе фемтосекундного лазера. Внешний порт O модуля RFC подключается к счетчику. Сигнал ошибки должен отображаться на осциллографе.

На рисунке 65 представлен общий обзор входных и выходных соединений при выполнении оптической синхронизации.

Радиочастотный сигнал «Beat CW1» представляет собой биения между оптической частотной гребенкой и сверхстабильным CW лазером с узкой шириной линии генерации. Он детектируется в блоке детектирования биений (BDU) с помощью фотодиода и подается в модуль OFD. Усиленный и отфильтрованный сигнал поступает на входной порт I модуля FDT, который разделяет выходной сигнал OFD. Выход ФДТ подключен к фазовому

детектору RFS. Модуль RFS детектирует разность фаз между сигналом биений и опорным сигналом синтезатора (DDS120).

Соединение RFS и ПИД-регулятора осуществляется внутри платформы SYNCRO-RRE. Выходной сигнал регулятора подается на модуль DUO, который управляет как медленным интегратором (малая полоса пропускания, большой диапазон), так и пьедесталом (широкая полоса пропускания, малый диапазон).

Порт монитора М модуля OFD подключается к анализатору радиочастотного спектра для визуализации сигнала биений. Внешний выходной порт О модуля OFD может быть подключен к счетчику. Сигнал ошибки отображается на осциллографе.

Обратите внимание, что в приложении оптической привязки лазерная головка оснащена EOM.

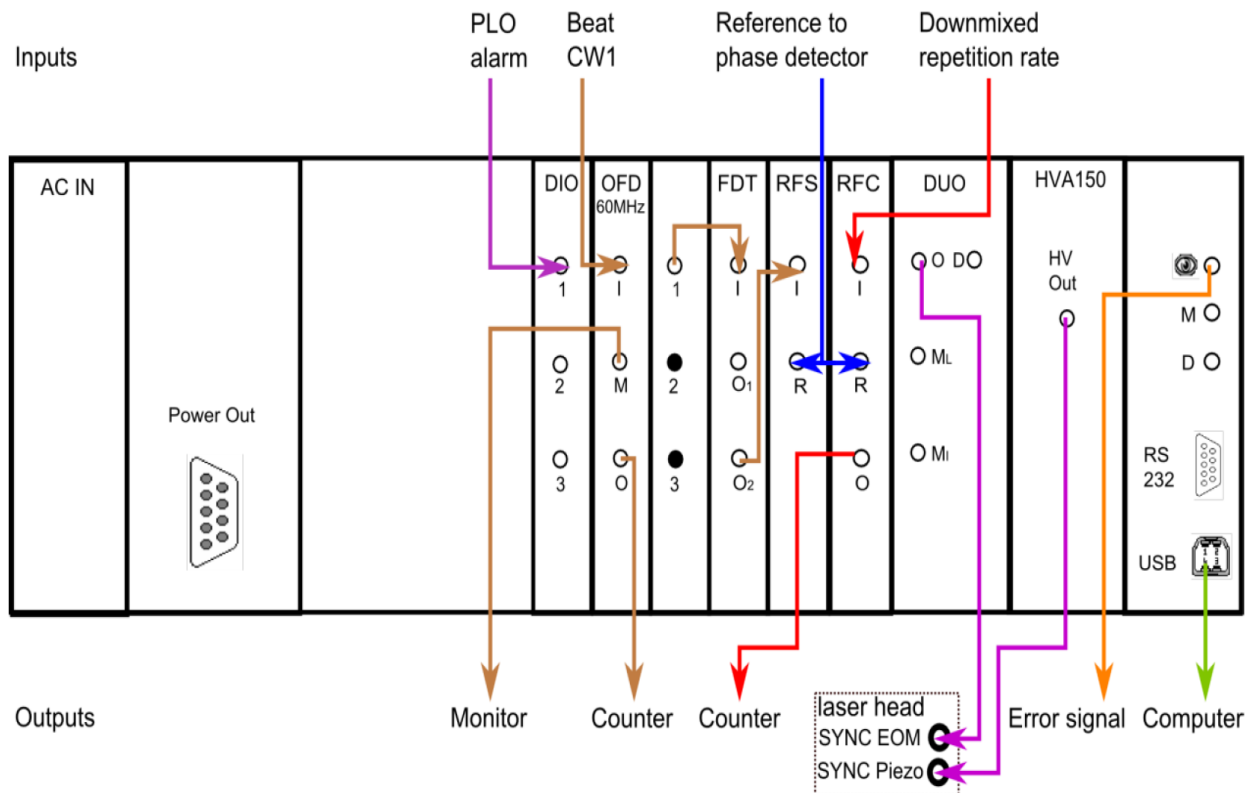


Рисунок 65 – Входы и выходы платформы SYNCRO-RRE при выполнении оптической привязки [86]

РЧ стабилизация частоты повторения фемтосекундного лазера

Стабилизация частоты повторения фемтосекундного лазера производится после выполнения стабилизации СЕО.

На рисунке 66 показано окно управления параметрами стабилизации частоты повторения при РЧ привязке, расположенное на передней панели платформы SYNCRO-RRE. Перед первоначальной настройкой параметров необходимо убедиться, что синтезатор DDS120 включен и выдает частоту приблизительно 20 МГц. Стабилизация осуществляется по каналу С1 (основной сигнал биений). Усиления Р устанавливается в пределах [-20; 5] дБ. Полоса интегратора I устанавливается в пределах [100; 3000] Гц. Выходное напряжение SYNCRO (нижняя полоса настройки на рис. 66) устанавливается в середине диапазона регулировки: 5 В.

Далее следует установить частоту повторения фемтосекундного лазера близкой к требуемой. Грубая регулировка частоты повторения осуществляется приведением в действие мотора торцевого зеркала, пока частота, полученная при смещении частоты повторения, не станет близка к выходной частоте синтезатора. Тонкая подстройка частоты осуществляется изменением выходного напряжения SYNCRO-RRE, подаваемого на пьезоэлектрический элемент. При этом сигнал ошибки, наблюдаемый на осциллографе должен стать «плоским» (рис. 86, среднее изображение). После этого можно включать режим стабилизации частоты повторения фемтосекундного лазера.

После включения режима стабилизации частоты повторения можно оптимизировать настройки ПИД-регулятора, чтобы уменьшить амплитуду сигнала ошибки.

Оптическая стабилизация частоты повторения фемтосекундного лазера

Оптическая стабилизация частоты повторения фемтосекундного лазера осуществляется путем привязки к сверхстабильному CW лазеру с узкой шириной линии генерации (оптическая синхронизация).

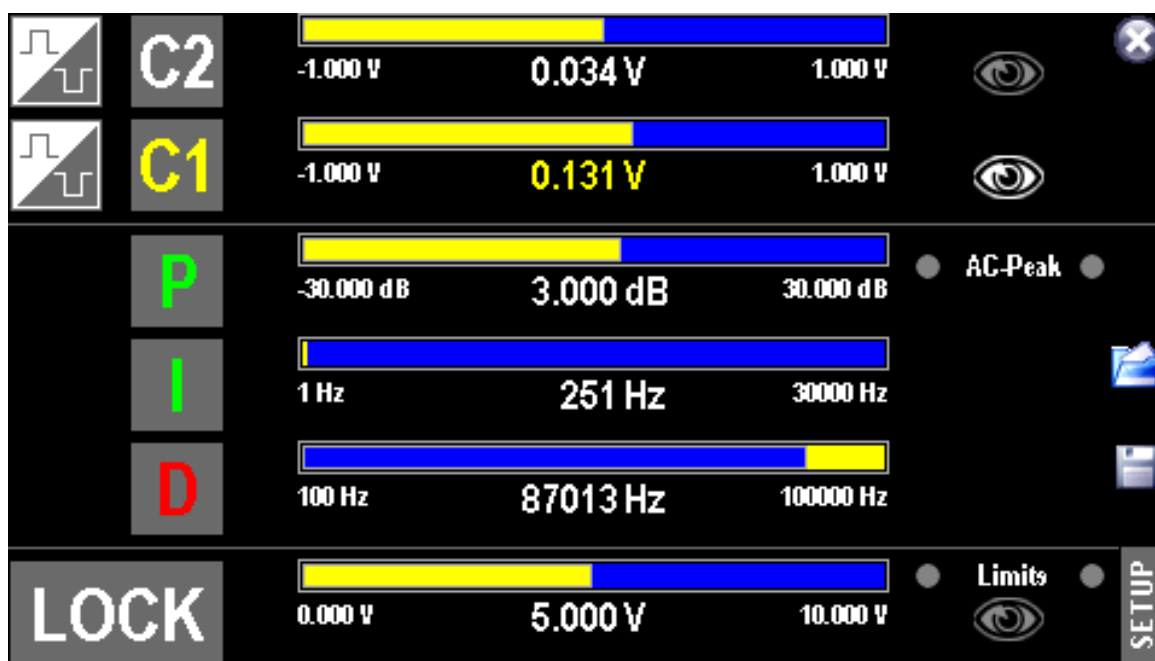


Рисунок 66 – Окно управления параметрами стабилизации частоты повторения фемтосекундного лазера при РЧ-стабилизации.

Сначала нужно получить биения между оптической частотной гребенкой (или её второй гармоникой в случае привязки к оптическому излучению комбинированного стандарта частоты и CW лазером. Сигнал биений детектируется с помощью модуля BDU. Его отношение сигнал/шум должно быть оптимизировано и быть выше 30 дБ при полосе разрешения 100 кГц.

Принимая во внимание значение полосы пропускания внутреннего фильтра ВР модуля OFD, необходимо выбрать соответствующие выходную частоту синтезатора и коэффициент деления FDT. В таблице 1 приведены несколько примеров.

На рисунке 67 показано окно управления параметрами стабилизации частоты повторения при оптической привязке, расположенное на передней панели платформы SYNCRO-RRE. Перед первоначальной настройкой параметров необходимо убедиться, что синтезатор DDS120 включен и выдает частоту, выбранную согласно Таблице 1. Стабилизация осуществляется по каналу C2. Усиление P устанавливается в пределах [0; 30] дБ. Полоса

интегратора I устанавливается в пределах [100; 5000] Гц. Выходное напряжение SYNCRO (нижняя полоса настройки на рис. 67) устанавливается в середине диапазона регулировки: 0 В.

Далее следует установить частоту повторения фемтосекундного лазера близкой к требуемой. При этом сигнал ошибки, наблюдаемый на осциллографе должен стать «плоским» (рис. 86, среднее изображение). После этого можно включать режим стабилизации частоты повторения фемтосекундного лазера.

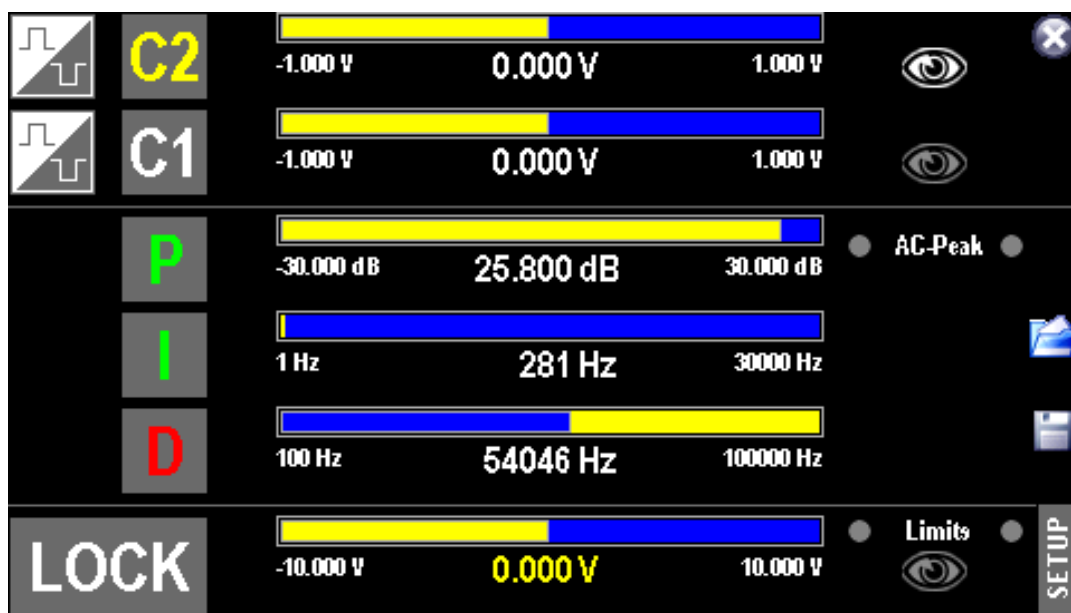


Рисунок 67 – Окно управления параметрами стабилизации частоты повторения фемтосекундного лазера при оптической привязке.

Таблица 1 – Соответствие выходной частоты синтезатора и коэффициента деления FDT

Полоса пропускания в OFD (МГц)	Коэффициент деления FDT	Выходная частота синтезатора DDS(МГц)
20	1	20
	2	10
60	3	20
	4	15

	12	5

ПРИЛОЖЕНИЕ Б ОПИСАНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО РУБИДИЕВОГО СТАНДАРТА ЧАСТОТЫ.

Схема комбинированного рубидиевого стандарта частоты приведена на рис. 68.

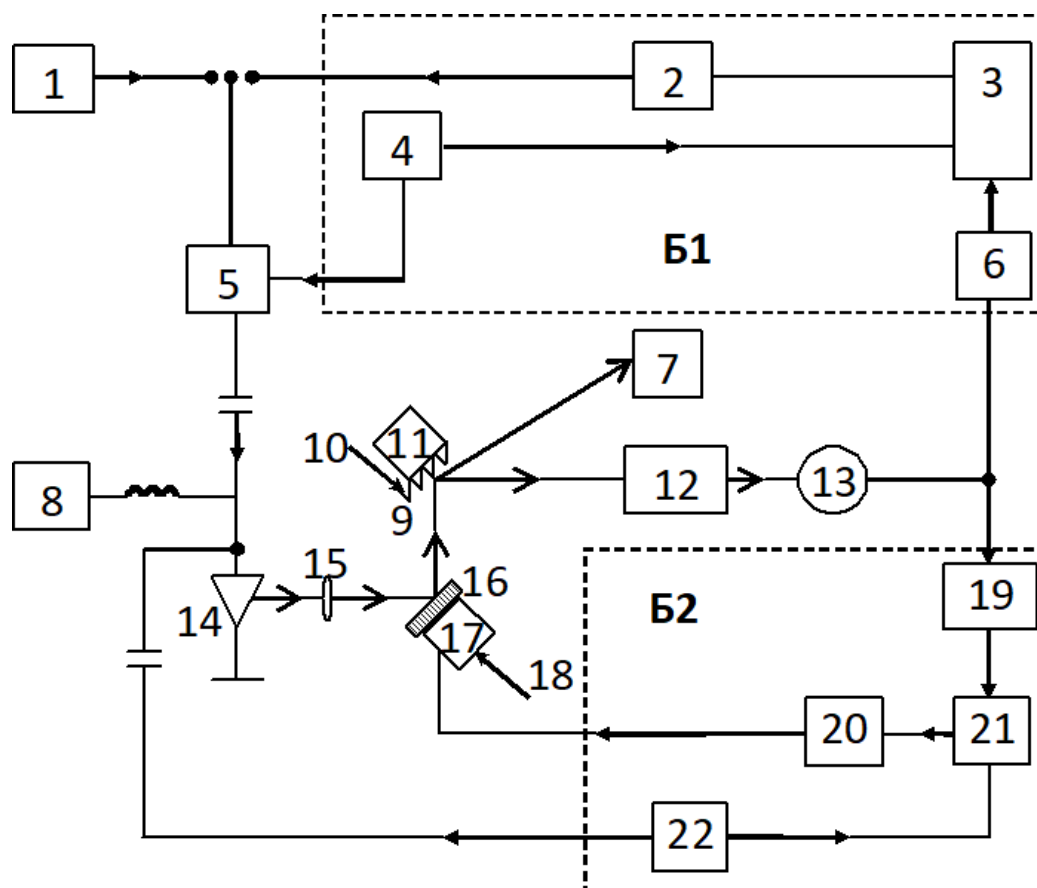


Рисунок 68 – Схема комбинированного рубидиевого стандарта частоты. **Б1** – блок настройки частоты на КРН-резонанс, **Б2** – блок настройки оптических частот на линии поглощения.

1 – генератор пилообразного напряжения; 2,20 – операционные усилители; 3 – синхронный детектор (100 Гц); 4 – звуковой генератор 100 Гц; 5 – генератор на 3.4 ГГц; 6 – избирательный усилитель (100 Гц); 7 – измеритель длин волн; 8 – источник питания; 9 – дифракционная решетка; 10, 18 – микровинты; 11,17 – пьезокерамика; 12 – рубидиевая ячейка; 13 – фотоприемник; 14 – диодный лазер; 15 – линза; 16 – зеркало; 19 – избирательный усилитель (40 МГц); 21 – синхронный детектор (40 МГц); 22 – генератор на 40 МГц.

Диодный лазер на длине волны излучения 795 нм работает с внешним резонатором. В качестве одного из зеркал резонатора используется дифракционная решетка (9), укрепленная на пьезокерамическом преобразователе (11). Пьезокерамический преобразователь обеспечивает точную установку угла отражения дифракционной решетки для получения генерации на нужной длине волны. Предварительно этот угол устанавливается микровинтом (10). Эффективная модуляция излучения лазера на частоте 3,4 ГГц возможна при согласовании межмодовой частоты лазера с частотой модуляции. Для этого поворотное зеркало (16) может перемещаться с помощью микровинта (18). Согласование светового пучка с дифракционной решеткой в резонаторе обеспечивается за счет установки микролинзы (15). Питание лазерного диода (14) осуществляется источником постоянного тока (8) через индуктивность. Последнее обстоятельство позволяет устранить влияние генераторов переменного тока на источник постоянного тока. Для получения спектральных составляющих в оптическом излучении, отстоящих друг от друга на 6,8 ГГц, что соответствует частоте часового перехода изотопа рубидия-87, на лазерный диод подается сигнал на частоте 3,4 ГГц от генератора (5), частота которого может управляться внешним сигналом.

В этом случае частота часового перехода будет соответствовать разности частот между боковыми компонентами, отстоящими от несущей на 3,4 ГГц. Для привязки оптических компонент спектра к линиям поглощения и одновременно создания гребенки частот используется модуляция излучения лазера на частоте 40 МГц с помощью ВЧ-генератора (22).

Часть излучения лазера поступает на измеритель длины волны (7), который позволяет контролировать частоту излучения лазера с погрешностью менее 1 ГГц и устанавливать боковые компоненты спектра на частотах 3,4 ГГц вблизи оптических линий поглощения рубидия. Другая часть излучения подается на рубидиевую ячейку (12) и далее на фотодетектор (13). С выхода фотодетектора сигнал поступает на блок настройки частоты

модуляции лазера (вблизи 3,4 ГГц) на КПН-резонанс (Б1) и на блок настройки оптических частот на линии поглощения D1 изотопа рубидия-87 (Б2).

В первом случае сигнал поступает на избирательный (полосовой) усилитель (6), где выделяется сигнал на частоте звукового генератора (4). Последний модулирует частоту СВЧ-генератора (5) и подает опорное напряжение на синхронный детектор (3). С выхода синхронного детектора (3) напряжение, пропорциональное отстройке частоты 3,4 ГГц от центра КПН-резонанса, подается на операционный усилитель (2) с регулируемой полосой и коэффициентом усиления. В режиме стабилизации сигнал с выхода операционного усилителя управляет частотой генератора (5) таким образом, чтобы частота 3,4 ГГц соответствовала максимуму (центру) КПН-резонанса. Для наблюдения КПН-резонанса используется генератор пилообразного напряжения (1).

Вторая часть сигнала с выхода фотодетектора (13) поступает на избирательный усилитель (19), настроенный на частоту генератора сигналов (22), который, с одной стороны, модулирует частоту излучения лазера и, с другой стороны, подает опорное напряжение на синхронный детектор (21). С выхода синхронного детектора (21) напряжение поступает на операционный усилитель (20) и далее на пьезокерамический преобразователь (17), на котором укреплено зеркало (16), перемещение которого меняет длину резонатора лазера и, следовательно, частоту излучения. Это позволяет настраивать боковые компоненты частот лазера на оптические переходы линии поглощения D1 изотопа рубидия-87.

Таким образом, разность боковых компонент в излучении лазера будет стабилизироваться по часовому переходу, а привязка оптических частот к линиям поглощения обеспечит максимальную амплитуду КПН-резонанса и одновременно минимизирует полевой сдвиг.

ПРИЛОЖЕНИЕ В АКТ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной работе НГТУ

доктор технических наук, доцент

Сергей Викторович Брованов



2022 г.

АКТ

использования результатов диссертационной работы Головина Н.Н.

«Управление сдвигом гребенки частот и фазой между огибающей и несущей излучения
фемтосекундного лазера»

10 октября 2022 г.

г. Новосибирск

Настоящим актом подтверждаем, что результаты диссертационной работы Головина Н.Н. «Управление сдвигом гребенки частот и фазой между огибающей и несущей излучения фемтосекундного лазера» обладают актуальностью, представляют практический интерес и были использованы при выполнении ряда НИР.

Метод управления сдвигом частотной гребенки с помощью интерферометра Майкельсона был использован при выполнении научно-исследовательской работы по проекту № 1316 «Лазерные стандарты частоты и длины», выполняемому в рамках государственного задания (проектная часть) в 2014 – 2016 гг.

Метод получения последовательностей фемтосекундных импульсов без сдвига частотной гребенки с селективируемой с малой дискретностью разностью фаз между огибающей и несущей был использован при выполнении научно-исследовательских работ по следующим проектам:

- Проект № 18-02-00316 «Стабилизация фемтосекундного стандарта частоты с когерентным сложением импульсов» (РФФИ);
- Проект № 3.6835.2017/БЧ «Фемтосекундная интерферометрия» (государственное задание);
- Проект FSUN-202-0007 «Прецизионные методы и средства оптического и СВЧ диапазонов» (государственное задание);

- «Квантовая криогенная электроника» (в рамках выполнения стратегического проекта «Проектирование и производство гибридных микросборок энергопреобразующей аппаратуры для аэрокосмического применения» по программе «Приоритет 2030»).

Заведующий кафедрой лазерных систем



И. Б. Мирошниченко