

Аналого-цифровой фазочастотный детектор для фазовой привязки мод диодного лазера к гребенке оптических частот

Н.Беверини, М.Преведелли, Ф.Соррентино, Б.Нюшков, А.Руффини

Построена оптоэлектронная система, объединяющая преимущества аналогового и цифрового фазовых детекторов, которая обеспечивает привязку оптических мод диодного лазера к фемтосекундной оптической гребенке. Низкий уровень шума и быстрый отклик сочетаются в системе с широким рабочим фазовым диапазоном и надежностью синхронизации. Дано подробное описание схемы, обсуждаются свойства различных фазовых детекторов при измерениях в оптическом диапазоне частот.

Ключевые слова: оптическая фазовая привязка, диодные лазеры, фемтосекундные оптические частотные гребенки.

1. Введение

Абсолютные частотные измерения в оптическом диапазоне в последнее время вызывают большой интерес. Лазерное охлаждение и лазерная спектроскопия высоко-го разрешения на нейтральных атомах и ионах в ловушках открыли новые перспективы как в метрологии частот [1, 2], так и в физике фундаментальных констант [3].

Чтобы выполнить абсолютное измерение оптической частоты, необходимо привязать ее к частоте вторичного стандарта. Обычно для этого требуется связывать частоты с очень большой разностью. Еще несколько лет назад фазово-когерентные связи удаленных оптических частот обеспечивались с помощью сложных частотных цепочек. Недавнее изобретение – частотные гребенки, излучаемые лазерами с синхронизацией мод [4, 5], сильно упростило структуру цепочек оптических частот. Сейчас любую оптическую частоту можно привязать к ВЧ стандарту, используя только один лазер с синхронизацией мод [6].

2. Фазовая привязка диодных лазеров

Для организации любой цепочки оптических частот нужны несколько лазеров с фазовой привязкой. Особенно хорошо для этой цели подходят диодные лазеры – благодаря охвату ими широкого диапазона длин волн. Одна из основных трудностей, возникающих при осуществлении оптической фазовой привязки, – это необходимость в широкой полосе пропускания системы из-за наличия быстрых фазовых флуктуаций. Большая ширина линии (обычно 20–100 МГц) диодных лазеров, работающих на собственном резонаторе, обусловлена очень малой его длиной. По той же причине диодные лазеры имеют высокий уровень фазового шума на высших частотах Фурье. Для уменьшения ширины линии можно ис-

пользовать оптическую обратную связь (ОС). Самый общий подход к уменьшению ширины линии заключается в использовании лазерного диода с внешним резонатором (ЛДВР), причем в большинстве случаев для обеспечения оптической ОС применяют дифракционную решетку. Наличие решетки также допускает большую медленную перестройку частоты в широком диапазоне, тогда как быстрое управление частотой возможно за счет тока накачки диодного лазера. Тем не менее ширина линии ЛДВР все еще довольно велика (обычно порядка нескольких сотен кГц).

Пределы, накладываемые шириной линии лазера на устойчивую фазовую синхронизацию, можно легко оценить в предположении белого частотного шума. В этом случае двусторонняя спектральная плотность частотных флуктуаций S_w (выраженная в Гц²/Гц) связана с шириной линии лазера соотношением $\delta\nu = \pi S_w$. Вклад быстрых частотных флуктуаций в среднеквадратический фазовый шум можно найти, интегрируя двустороннюю спектральную плотность фазовых флуктуаций

$$\Phi(\nu) = \frac{S_w}{\nu^2} \quad (1)$$

по частотам Фурье, большим значения ν_0 :

$$\langle \varphi^2 \rangle_{\nu > \nu_0} = \frac{2\delta\nu}{\pi\nu_0}. \quad (2)$$

Необходимо учесть, что фазовые детекторы имеют ограниченный рабочий фазовый диапазон. Для получения устойчивой системы фазовой синхронизации необходимо надежно удерживать фазовые флуктуации внутри рабочего диапазона фазового детектора. Поэтому из-за плохих спектральных характеристик лазерного источника приходится либо применять систему с очень быстрым откликом, либо использовать фазовый детектор с очень широким рабочим диапазоном. Самые быстрые системы получаются при использовании аналогового фазового детектора, в то время как цифровой фазовый детектор дает широкий рабочий фазовый диапазон. В настоящей работе применялась объединенная система, сочетающая преимущества обоих видов фазовых детекторов.

Перевел с англ. А.А.Стратонников

N.Beverini, F.Sorrentino, B.Nyushkov, A.Ruffini. INFN and Dipartimento di Fisica 'E.Fermi', via F. Buonarroti, 2, 56127 Pisa, Italy
M.Prevedelli. Dipartimento di Fisica Chimica ed Inorganica, viale Risorgimento 4, 40136 Bologna, Italy

Поступила в редакцию 9 января 2004 г.

3. Условия устойчивой фазовой синхронизации

Система оптической фазовой автоподстройки частоты (ОФАПЧ) используется для стабилизации разности частот между ведомым и задающим лазерами. Опорная радиочастота локального осциллятора и сигнал биений между частотами двух лазеров посылаются на фазовый детектор, на выходе которого получают сигнал ошибки, управляющий частотой ведомого лазера. При замкнутой цепи ОС выходной сигнал фазового детектора поддерживается постоянным, так что разность частот двух лазеров равняется опорной радиочастоте.

Обозначим через $f(t)$ мгновенную разность частоты сигнала биений и частоты локального осциллятора, а через $S_f(v)$ – ее спектральную плотность. При замкнутой ОС спектральная плотность $S_f(v)$ уменьшается в

$$A(v) = \left| \frac{1}{1 + G(v)} \right|^2 \quad (3)$$

раз, где $G(v)$ – коэффициент передачи при разомкнутой цепи ОС. Величину $G(v)$ можно описать очень простым выражением, если предположить, что сигнал ошибки поступает непосредственно к ведомому лазеру, а частотная характеристика ведомого лазера является плоской. Поскольку передаточная функция фазового детектора пропорциональна $(2\pi iv)^{-1}$, получаем

$$G(v) = \frac{v_1}{iv}, \quad (4)$$

где v_1 – частота единичного усиления. Предполагая, что шум для свободно работающих лазеров является белым, можно получить среднеквадратический фазовый шум в режиме замкнутой ОС в виде

$$\langle \varphi^2 \rangle = 2 \int_0^\infty \frac{S_f(v)}{v^2} dv = 2 \int_0^\infty \frac{S_w}{v^2 A(v)} dv = \frac{\pi S_w}{v_1}. \quad (5)$$

При более реалистичном подходе в коэффициент $G(v)$ следует включить как отклик диодного лазера, так и задержку сигнала в цепи, а также передаточную функцию петлевого фильтра, который должен находиться между фазовым детектором и ведомым лазером. Кроме того, в $S_f(v)$ должен быть включен избыточный низкочастотный шум. Тем не менее среднеквадратическое значение остаточного фазового шума в основном растет с шириной линии свободно работающего лазера и уменьшается с шириной полосы пропускания ОС.

Фазовые детекторы имеют конечный рабочий диапазон $\Delta\varphi$, вне которого их показания перестают быть однозначными. Если разность фаз между двумя входными сигналами превышает этот диапазон, система ОС захватывает другую точку. Если величина $\langle \varphi^2 \rangle^{1/2}$ сравнима с $\Delta\varphi$, такие «пропущенные циклы» могут стать довольно частыми и вызвать случайные флуктуации разности частот. Для аналогового смесителя $\Delta\varphi = \pi$. В нашей простой модели среднее время между пропусками циклов может быть оценено [7] как

$$t_s = \frac{\pi \exp(2\langle \varphi^2 \rangle^{-1})}{4v_1}. \quad (6)$$

Таким образом, для типичных значений v_1 (несколько мегагерц) пропуск циклов может вызвать существенную нестабильность частоты, если $\langle \varphi^2 \rangle$ превышает 0.1 рад².

При использовании источников с высоким уровнем шумов, таких как диодные лазеры, для уменьшения $\langle \varphi^2 \rangle$ необходимо либо создавать быструю систему ОФАПЧ, либо использовать фазовый детектор с более широким рабочим диапазоном.

4. Аналоговый и цифровой фазовые детекторы

Выходной сигнал аналогового фазового детектора пропорционален синусу разности фаз, так что диапазон монотонности составляет лишь π рад. Помимо проблемы пропуска циклов, аналоговые фазовые детекторы накладывают предел на диапазон захвата петли ОФАПЧ, определяемый как максимально допустимая разность частот, при которой синхронизация восстанавливается. Когда входные частоты не совпадают, выходной сигнал осциллирует на частоте, равной разности входных частот. Поскольку система ОС отфильтровывает частоты, превышающие v_1 , диапазон захвата ФАПЧ с аналоговым фазовым детектором по порядку величины равен v_1 , что едва ли превышает несколько мегагерц.

Существуют несколько путей создания цифрового фазового детектора с более широким диапазоном монотонности. Наиболее подходящий способ [8] – это послать сигнал биений на счетчик, работающий на увеличение, а сигнал локального осциллятора – на счетчик, работающий на уменьшение. В результате сигналы с выходов счетчиков подаются на цифровой сумматор, выход с которого после цифроаналогового преобразования и НЧ фильтрации дает линейный отклик на разность фаз. Диапазон линейности зависит лишь от числа бит счетчиков и сумматора. Насыщение отклика достигается за счет блокировки соответствующего счетчика, происходящей при наименьшем или наибольшем значении сумматора. Поэтому, когда входные частоты различны, детектор дает постоянное значение, показывающее знак разности частот. Таким образом, система действует как фазочастотный детектор (ФЧД), схема которого показана на рис.1.

По сравнению с аналоговыми фазовыми детекторами цифровые ФЧД обладают несколькими преимуществами в построении систем ОФАПЧ. Более широкий фазовый диапазон допускает фазовую синхронизацию без пропуска циклов даже при наличии сильного остаточного фазового шума. Последнее может иметь место при работе с источниками с широким спектром, такими как диодные лазеры, или когда мало отношение сигнал/шум сигнала биений [8], как в случае оптических гребенок частот. Фазовая привязка диодных лазеров к оптическим гребенкам может потребовать очень узкой полосы пропускания [9] и тем самым уменьшить рабочий диапазон

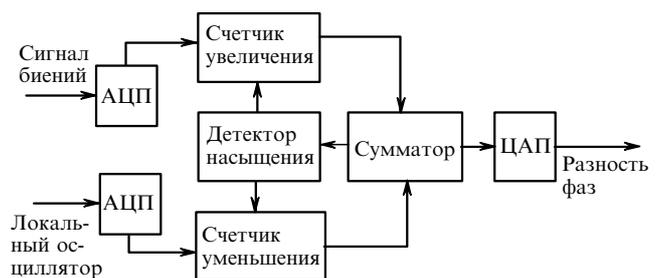


Рис.1. Схема цифрового ФЧД.

захвата. Это ограничивает надежность синхронизации и требует тщательного уменьшения внешних возмущений. Диапазон захвата системы ОФАПЧ, использующей ФЧД, ограничен только скоростью АЦП и логических схем и по порядку величины может составлять около 100 МГц. Такой большой диапазон захвата делает данную систему более надежной с точки зрения внешних возмущений по сравнению с аналоговыми системами. Кроме того, цифровой ФЧД допускает калибровку фазовой чувствительности, и тем самым коэффициента передачи ОС, простым изменением числа бит. Он также позволяет осуществить выбор боковой полосы, тогда как в аналоговой ОФАПЧ частота ведомого лазера может привязываться к частоте задающего лазера с любой стороны.

Помимо этих преимуществ цифровые ФЧД накладывают также некоторые важные ограничения на скорость и отношение сигнал/шум. Преобразование и логические операции создают временную задержку сигнала. Временная задержка является одним из основных фундаментальных факторов, ограничивающих петлевую полосу пропускания системы ОФАПЧ, поскольку она создает фазовый сдвиг (растущий линейно с частотой Фурье), который уменьшает фазовый диапазон устойчивой работы системы ОС. Аналоговая система ФАПЧ по сути быстрее цифровой и допускает тем самым меньшую остаточную ошибку фазы (см. (5)). Кроме того, цифровые ФЧД, как правило, шумят сильнее, чем аналоговые фазовые детекторы. Это обусловлено тем, что аналоговые детекторы чувствительны к средней разности фаз за период, в то время как цифровые детекторы регистрируют только фронты входных сигналов. Отношение сигнал/шум является другим важным ограничением на достижимый остаточный фазовый шум [8].

Итак, хотя цифровые ФЧД позволяют создать более надежные и устойчивые системы ФАПЧ даже при наличии источников с широким спектром и большим шумом, однако при использовании аналоговых детекторов остаточный фазовый шум меньше. Мы создали новую систему, сочетающую преимущества обоих видов детекторов, и использовали ее для привязки ЛДВР к моде фемтосекундного лазера.

5. Описание схемы

5.1. Цифровой ФЧД

Основная идея, на которой базируется наша система, состоит в том, что выходной сигнал аналогового фазового детектора может быть использован только тогда, когда сигнал ошибки фазы меньше одного периода, в то время как выходной сигнал цифрового ФЧД может быть использован для расширения диапазона регистрации фазы и детектирования частоты при нахождении системы вне синхронизации. Для того чтобы использовать оба фазовых детектора вместе, необходимо обеспечить выключение аналогового детектора, когда ошибка фазы превышает один период. Когда ошибка фазы меньше одного периода, должен быть отключен цифровой ФЧД.

Этого можно достичь, добавив несколько дополнительных логических элементов к схеме на рис.1. Вход локального осциллятора аналогового фазового детектора переключается логическим сигналом, показывающим, что фазовая ошибка меньше одного периода. Когда ошибка фазы больше одного периода, входной сигнал

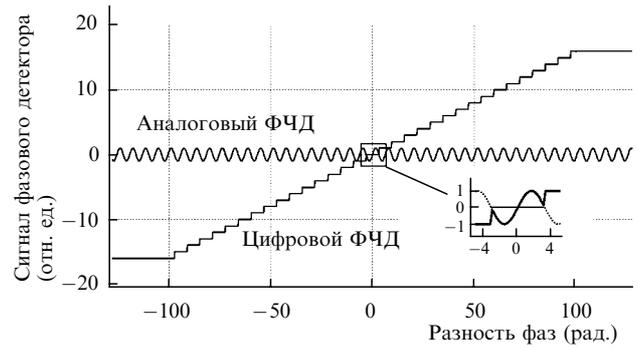


Рис.2. Формирование сигнала фазовой ошибки в аналого-цифровом детекторе. Жирной кривой на врезке обозначен сигнал совмещенного детектора. Для ясности диапазон монотонности цифрового детектора уменьшен до 32 периодов (5-битная логика).

аналогового детектора отключается и его выходной сигнал становится равным нулю. Кроме того, за счет использования синхронного сумматора, тактируемого сигналом локального осциллятора, отклик ФЧД становится ступенчатой функцией разности фаз и имеет «мертвую зону» в диапазоне, в котором включен аналоговый детектор. Наконец, сигнал локального осциллятора посылается на аналоговый детектор после соответствующей задержки, так что точка аналоговой привязки находится посередине мертвой зоны. Отклик такого совмещенного детектора на разность фаз для случая 5-битной логики приведен на рис.2.

В нашей системе обе функции счетчиков и сумматора выполняются с помощью одиночного сложного программируемого логического устройства (СПЛУ), которое также управляет сигналом, включающем аналоговый детектор. Данное СПЛУ (EPM7064 из семейства Altera MAX7000S) может быть легко перепрограммировано путем подсоединения схемы к компьютеру. Таким образом можно изменять число бит счетчиков и сумматора, а также вводить делители частоты для локального осциллятора или для сигнала биений. В эксперименте мы использовали 7-битный сумматор. Следовательно, диапазон монотонности нашего ФЧД составляет 128 периодов (около 804 рад).

5.2. Совмещенная цепь ФЧД и обратной связи

Электрическая схема цепи фазовой привязки показана на рис.3. Сигналы локального осциллятора и биений приводятся к прямоугольному виду с помощью двух скоростных компараторов (LT1016) и посылаются как входные сигналы на СПЛУ вместе с двумя управляющими сигналами: одним – для включения цифрового детектора, другим – для включения аналогового детектора. Таким образом, система допускает четыре различных режима работы: только цифровой ФЧД, только аналоговый ФЧД, совмещенный ФЧД и режим нулевого выходного сигнала.

Прямоугольный сигнал биений также посылается на аналоговый фазовый детектор (Minicircuits RPD-1). СПЛУ имеет три выхода: цифровой сигнал счета, копия прямоугольного сигнала локального осциллятора и сигнал, включающий аналоговый детектор. Первый сигнал посылается на ЦАП, а остальные два – на буферный элемент с тремя состояниями (74ACT245), который обеспечивает также временную задержку ключа. Выходной сигнал буферного элемента идет на аналоговый фазовый детектор в качестве сигнала локального осциллятора.

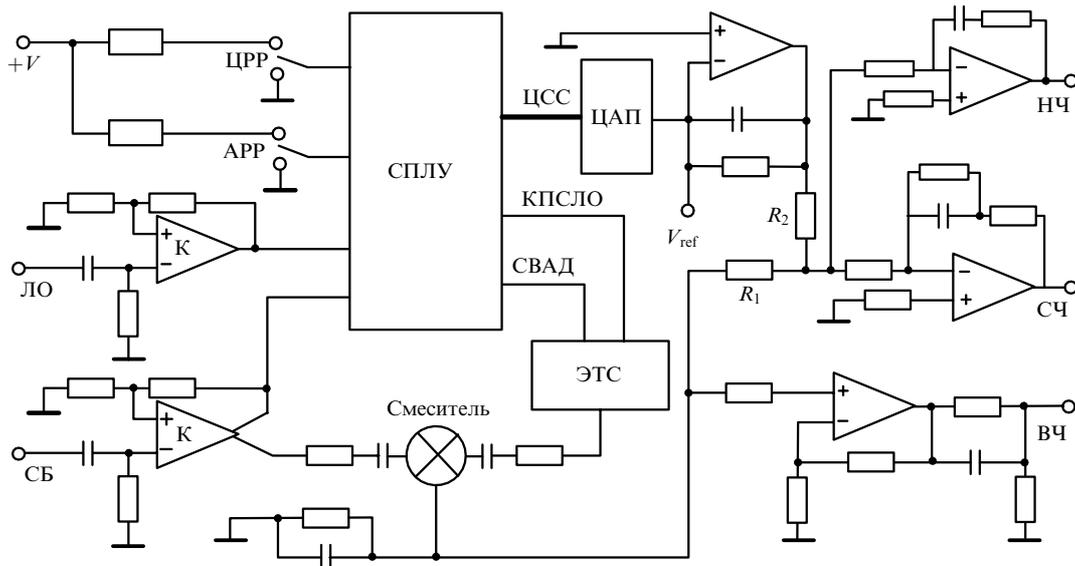


Рис.3. Электрическая схема цепи фазовой привязки:

ЭТС – буферный элемент с тремя состояниями; К – компаратор; ЦПР(АПР) – выключатель для цифрового (аналогового) режима работы; ЛО – локальный осциллятор; СБ – сигнал биений; ЦСС – цифровой сигнал счета; КПСЛО – копия прямоугольного сигнала локального осциллятора, включаемая АПР; СВАД – сигнал включения аналогового детектора; V_{ref} – опорное напряжение для смещения цифрового выхода; НЧ – низкочастотный выход на привод пьезоэлемента; СЧ – среднечастотный выход для питания диодного лазера; ВЧ – высокочастотный прямой выход на ток накачки диодного лазера.

Сигналы от фазового детектора и ЦАП проходят через фильтр низких частот и суммируются. Для устойчивости системы ОС фазовая чувствительность должна быть одинаковой в двух режимах работы (аналоговое и цифровое детектирование фазы). Отношение сопротивлений R_1/R_2 выбрано с учетом разных чувствительностей двух детекторов.

Система ОС состоит из трех цепей и управляет тремя исполнительными механизмами в различных диапазонах фурье-частот. Наиболее быстрая цепь воздействует непосредственно на ток накачки диодного лазера. Для компенсации завала частотного отклика в диодном лазере применяется RC-фильтр, обеспечивающий фазовое опережение, в результате чего расширяется полоса пропускания системы ОС. В этой цепи используется сигнал лишь аналогового детектора, поскольку в случае близкой привязки цифровой ФЧД все равно отключен. Сигнал поправки средней частоты подается на систему токовой накачки диодного лазера, обеспечивая высокое усиление в области $10^1 - 10^4$ Гц. Частота единичного усиления для этой цепи составляет около 100 кГц. Для поддержания тока накачки вблизи постоянного значения (токовая АЧХ диодного лазера, а следовательно, и передаточная функция системы меняются с током накачки) медленная коррекция частоты осуществляется за счет изменения длины резонатора ЛДВР с помощью пьезоэлемента. Интегратор увеличивает усиление на низких частотах.

6. Эксперимент по фазовой привязке

6.1. Лазеры

Мы использовали смешанный ФЧД для привязки 850-нм ЛДВР к моде фемтосекундной гребенки оптических частот с периодом повторения 100 МГц. ЛДВР состоит из диодного GaAlAs-лазера (SDL-5400-C), коллимирующего объектива и дифракционной решетки 1200

штр./мм в конфигурации Литтрова, находящейся на расстоянии 25 мм от лазера. При рабочем токе 60 мА мощность самого диодного лазера составляет около 37 мВт; доступная мощность ЛДВР была около 6 мВт. В целях тепловой и акустической изоляции система была заключена в алюминиевый корпус. Температура ЛДВР поддерживалась постоянной с точностью 3 мК с помощью элементов Пельтье. Для предотвращения паразитной оптической обратной связи излучение ЛДВР проходило через два последовательно расположенных фарадеевских изолятора.

Оптическая гребенка генерируется фемтосекундным Т1:сапфировым лазером с синхронизацией мод на керровской линзе. Оптическая схема, выполненная целиком в нашей группе, представляла собой стандартный Z-образный резонатор с четырьмя зеркалами, состоящий из активной среды с торцами под углом Брюстера, вогнутых зеркал и двух плеч, ограниченных плоскими зеркалами. Одно плечо содержит пару призм для компенсации дисперсии групповой скорости, а другое, образованное плоскими зеркалами, играет роль выходного. Лазер накачки – это лазер системы Millennia мощностью 10 Вт с длиной волны 532 нм. При мощности накачки около 6.5 Вт и выходной мощности фемтосекундного лазера 0.5 Вт эффективность оптической системы составляет около 8%. Длительность импульса излучения равна 35 фс при ширине спектра около 45 нм (~19 ТГц). Центральная длина волны может устанавливаться в пределах 855–880 нм путем перемещения одной из призм. Частота повторения импульсов лазера составляет 97.7 МГц и может изменяться до 5 МГц путем перемещения одного из зеркал.

6.2. Экспериментальная установка

Экспериментальная установка показана на рис.4. Два лазерных пучка объединялись в поляризующем расщепителе, за ним был установлен поляризатор, вращая который можно было получить в сигнале биений наилучшее отношение сигнал/шум. Последний детектировался ла-

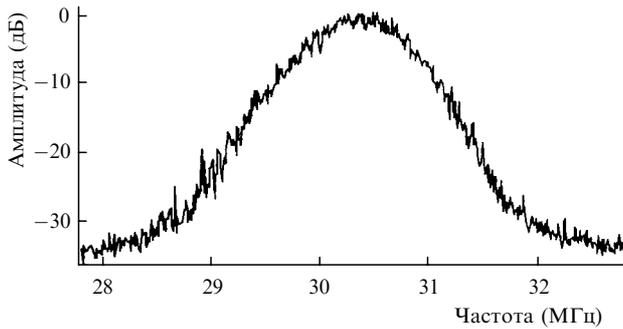


Рис.7. Средний по четырем измерениям спектроанализатора спектр сигнала биений при замкнутой цепи ОС, когда аналоговый детектор отключен; разрешение 10 кГц.

6.3. Результаты

В качестве генератора опорной частоты для системы ОФАПЧ мы использовали 30-МГц генератор. При установке угла наклона эталона на максимум пропускания излучения диодного лазера в полосе приема (0–50 МГц) всегда есть один сигнал биений. Замыкая цепь ОС, можно автоматически получить фазовую синхронизацию, какова бы ни была начальная частота сигнала биений. Действительно, наш ФЧД избирателен к боковой полосе, а частота диодного лазера может оказаться на неправильной стороне от ближайшей моды гребенки. В таком случае система ОС уводит частоту диодного лазера от ближайшей моды и привязывает ее к соседней. Таким образом, для каждой моды гребенки диапазон захвата составляет 30 МГц по одну сторону моды и 70 МГц – по другую.

При открытой петле ОС наблюдаемый сигнал биений уширяется на несколько мегагерц акустическими вибрациями; он также подвержен дрейфу частоты порядка 10 МГц/мин, главным образом из-за процессов механической релаксации в ЛДВР. Замыкание петли ОС с помощью ФЧД, настроенного на простой цифровой режим работы, эффективно уменьшает шум частоты биений в спектральной области менее 10 кГц. Типичная запись спектра сигнала биений в таких условиях показана на рис.7. Полная ширина спектра по уровню –3 дБ составляет около 500 кГц и может быть обусловлена, главным образом, быстрыми флуктуациями частоты в ЛДВР.

Когда ФЧД настроен на аналого-цифровой режим работы, полоса пропускания системы ОС увеличивается до 1.2 МГц (рис.8). Синхронизация устойчива даже при наличии сильных механических возмущений на оптическом столе. Она сохранялась в течение нескольких часов, и ее длительность была ограничена, в основном, рабочим диапазоном высоковольтного усилителя для пьезоэлемента. В чисто аналоговом режиме работы фазового детектора получен спектр сигнала биений, аналогичный показанному на рис.8, но с гораздо меньшими устойчивостью стабилизации и диапазоном захвата.

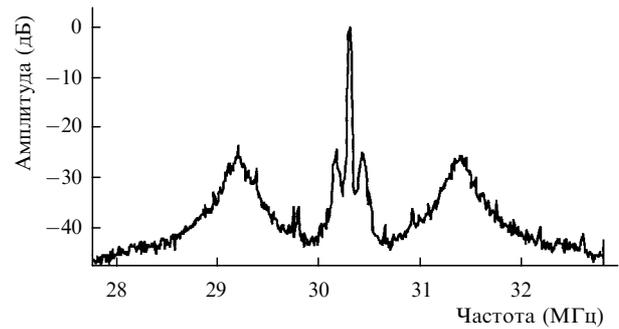


Рис.8. Средний по четырем проходам спектроанализатора спектр сигнала биений при замкнутой цепи ОС, когда ФЧД настроен на аналого-цифровой режим работы; разрешение 10 кГц.

Остаточная среднеквадратическая фазовая ошибка $\langle \varphi^2 \rangle$ была рассчитана по соотношению [8]

$$\langle \varphi^2 \rangle = -\ln \eta, \quad (7)$$

где $\eta = 0.75$ – доля энергии в несущей сигнала биений и, следовательно, $\langle \varphi^2 \rangle = 0.29$ рад. Значение η было измерено путем прямого интегрирования спектра сигнала биений на рис.8, при этом форма крыльев (их ширина была равна ширине на кривой рис.7) предполагалась лоренцевской.

7. Заключение

Свойства аналого-цифрового ФЧД делают его особенно подходящим для систем ОФАПЧ, в которых требуется высокая спектральная чистота наряду с надежной и устойчивой синхронизацией в условиях слабых сигналов биений с широким спектром и малой интенсивностью. Типичные применения – это измерения оптических частот с помощью фемтосекундных гребенок.

1. Wilpers G., Binnewies T., Degenhardt C., Sterr U., Helmcke J., Riehle F. *Phys. Rev. Lett.*, **89**, 230801 (2002).
2. Tanaka U., Bize S., Tanner C.E., Drullinger R.E., Diddams S.A., Hollberg L., Wineland D.J., Bergquist J.C. *J. Phys. B*, **36**, 545 (2003).
3. Udem T., Huber A., Gross B., Reichert J., Prevedelli M., Weitz M., Hänsch T.W. *Phys. Rev. Lett.*, **79**, 2646 (1997).
4. Reichert J., Holzwarth R., Udem Th., Hänsch T.W. *Opt. Commun.*, **172**, 59 (1999).
5. Bagayev S.N., Chepurov S.V., Klementyev V.M., Kuznetsov S.A., Pivtsov V.S., Pokasov V.V., Zakharyash V.F. *Appl. Phys. B*, **70**, 375 (2000).
6. Jones D.J., Diddams S.A., Ranka J.K., Stentz A., Windeler R.S., Hall J.L., Cundiff S.T. *Science*, **288**, 635 (2000).
7. Nakagawa K., Kourogi M., Ohtsu M. *Appl. Phys. B*, **57**, 425 (1993).
8. Prevedelli M., Freearge T., Hänsch T.W. *Appl. Phys. B*, **60**, S241 (1995).
9. Багаев С.Н., Захарьяш В.Ф., Клементьев В.М., Колкер Д.В., Кузнецов С.А., Матюгин Ю.А., Пивцов В.С., Скворцов М.Н., Чепуров С.В. *Квантовая электроника*, **31**, 383 (2001).