

## Стабилизация волоконного синтезатора частот с использованием акустооптического и электрооптического модуляторов

Н.А.Коляда, Б.Н.Нюшков, В.С.Пивцов, А.С.Дычков, С.А.Фарносов, В.И.Денисов, С.Н.Багаев

*Создан волоконно-оптический синтезатор частот, стабилизированный по оптическому стандарту частоты на основе молекулярного иода ( $Nd:YAG/I_2$ ). Экспериментально показана возможность переноса стабильности оптического стандарта частоты на другие оптические частоты в ИК диапазоне 1–2 мкм, а также в радиочастотный диапазон, за счет фазовой автоподстройки частот (ФАПЧ) синтезатора с помощью акустооптического и электрооптического модуляторов. Вносимая в гребенку оптических частот синтезатора аддитивная нестабильность (возникающая из-за остаточных случайных погрешностей ФАПЧ) на несколько порядков меньше собственной нестабильности используемого опорного оптического стандарта частоты (т. е. много меньше  $1 \times 10^{-13}$  за 1 с и  $5 \times 10^{-15}$  за 1000 с).*

**Ключевые слова:** волоконный синтезатор частот, оптический стандарт частоты, оптические часы, фемтосекундный волоконный лазер, гребенка эквидистантных оптических частот.

Фемтосекундный синтезатор частот является основой часового механизма в конструкции современных фемтосекундных оптических часов (ФОЧ) [1–4]. Он используется для непосредственного деления оптической частоты атомного осциллятора (оптического стандарта частоты) и тем самым обеспечивает возможность прямого синтеза стандартных радиочастот и формирования меток времени со стабильностью и точностью оптического стандарта. Основной блок любого фемтосекундного синтезатора частот – это задающий фемтосекундный лазер с синхронизацией мод и системой активной стабилизации. Такой лазер должен обеспечивать стабильную генерацию гребенки эквидистантных оптических частот (соответствующих продольным модам лазера). В настоящее время наиболее перспективным подходом к созданию мобильных ФОЧ представляется использование волоконной оптики в качестве основы для фемтосекундного синтезатора частот. Принципиальная возможность применения волоконных лазерных систем для этих целей продемонстрирована в ряде работ [5–9]. Волоконные фемтосекундные лазеры отличаются компактностью, низким энергопотреблением и высоким КПД. Кроме того, такие лазерные системы менее подвержены разъюстировке, т. к. использование дискретных юстируемых оптических элементов в них может быть сведено к минимуму или вообще исключено.

**Н.А.Коляда, А.С.Дычков, С.А.Фарносов, В.И.Денисов, С.Н.Багаев.** Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 13/3; e-mail: n.koliada@mail.ru  
**Б.Н.Нюшков.** Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 13/3; Новосибирский государственный университет, Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2; e-mail: nyushkov@laser.nsc.ru  
**В.С.Пивцов.** Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 13/3; Новосибирский государственный технический университет, Россия, 630092, Новосибирск, просп. К.Маркса, 20; e-mail: clock@laser.nsc.ru

В настоящей работе экспериментально исследовалась возможность прецизионной стабилизации октавной гребенки оптических частот, генерируемой с помощью фемтосекундного эрбиевого волоконного лазера [10, 11], по оптическому стандарту частоты  $Nd:YAG/I_2$ . С этой целью использовался метод фазовой автоподстройки частот (ФАПЧ) крайних спектральных компонент гребенки ( $\lambda_1 \approx 1064$  нм,  $f_1 \approx 2.8 \times 10^{14}$  Гц и  $\lambda_2 \approx 2128$  нм,  $f_2 \approx 1.4 \times 10^{14}$  Гц) по частоте фундаментального излучения ( $\lambda_{os} \sim 1064$  нм) оптического стандарта (рис.1). Для надежного фазового захвата частот и эффективного подавления шумов система ФАПЧ должна обладать достаточным быстродействием и обрабатывать возмущения в широкой полосе частот. Поэтому в созданной системе были применены такие подстроечные элементы, как миниатюрный внутррезонаторный электрооптический фазовый модулятор [12] и акустооптический частотный модулятор (АОЧМ) в волоконном исполнении (Brimrose), расположенный на выходе эрбиевого волоконного лазера. Это позволило реализовать полосы отработки шириной примерно 200 и 100 кГц в соответствующих петлях обратной связи (ОС), стабили-

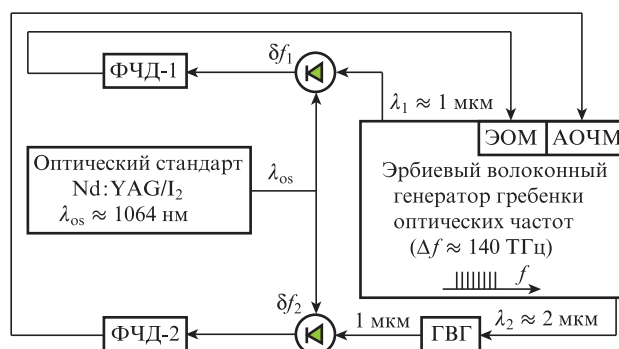


Рис.1. Схема стабилизации гребенки оптических частот синтезатора: ФЧД-1,2 – фазочастотные детекторы; ЭОМ – электрооптический модулятор; АОЧМ – акустооптический частотный модулятор; ГВГ – генератор второй гармоники на нелинейном кристалле PPLN.

зирующих коротковолновый и длинноволновый края гребенки оптических частот. Такая комбинация широкополосных петель ОС впервые реализована в волоконном эрбиевом фемтосекундном генераторе-синтезаторе оптических частот. В ранее опубликованных работах и коммерческих системах (например, Menlo Systems) подобное решение на основе АОЧМ не применялось, и качество стабилизации ограничивалось существенно более медленной (полоса менее 10 кГц) автоподстройкой путем изменения мощности накачки (инверсии населенности) активной среды задающего фемтосекундного волоконного эрбиевого лазера [13].

В ходе эксперимента нами одновременно проведены долговременные прецизионные измерения частот сигналов биений  $\delta f_1$  и  $\delta f_2$  между опорным оптическим стандартом частоты и стабилизируемыми по нему крайними компонентами октавной гребенки оптических частот синтезатора ( $f_1 \approx 2.8 \times 10^{14}$  Гц и  $f_2 \approx 1.4 \times 10^{14}$  Гц) с эквидистантными межмодовыми интервалами, формирующими выходную радиочастоту ФОЧ. Такой подход позволил обеспечить миллигерцевую точность привязки гребенки оптических частот (рис.2). В работе использовался оптический стандарт на основе Nd:YAG-лазера, частота которого была стабилизирована до уровня  $10^{-15}$  (относительная долговременная нестабильность частоты) по узким нелинейным резонансам насыщенного поглощения в компонентах сверхтонкой структуры молекулярного иода [14].

На рис.3 представлены соответствующие параметры Аллана (стандартные отклонения Аллана), которые были рассчитаны на основе результатов одновременного измерения частот биений  $\delta f_1$  и  $\delta f_2$  и нормированы на соответствующее значение оптической частоты (примерно  $2.8 \times 10^{14}$  Гц). Длинноволновый край гребенки ( $f_2 \approx 1.4 \times 10^{14}$  Гц) (рис.3,б) характеризуется чуть более значительными остаточными случайными девиациями частоты от-

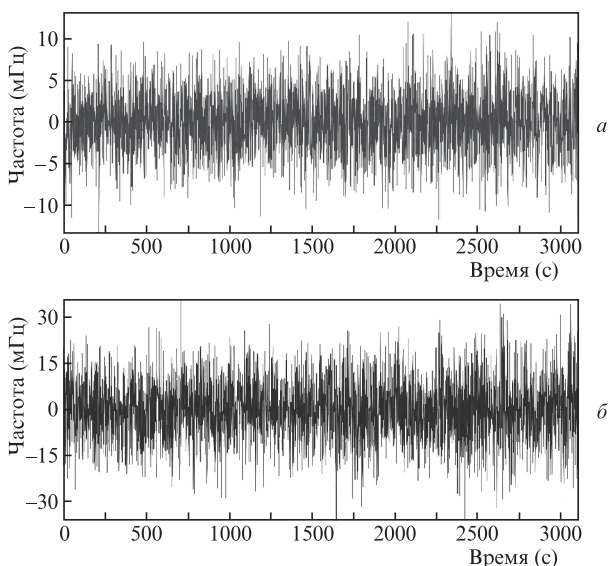


Рис.2. Временные диаграммы частоты сигнала биений  $\delta f_1$  между опорным оптическим стандартом частоты и стабилизируемой по нему компонентой коротковолнового края ( $\lambda_1 \approx 1064$  нм,  $f_1 \approx 2.8 \times 10^{14}$  Гц) (а) и частоты сигнала биений  $\delta f_2$  между опорным оптическим стандартом частоты и стабилизируемой по нему удвоенной по частоте компонентой длинноволнового края ( $\lambda_2 \approx 2128$  нм,  $f_2 \approx 1.4 \times 10^{14}$  Гц) (б) октавной гребенки оптических частот синтезатора. Время единичного измерения 1 с.

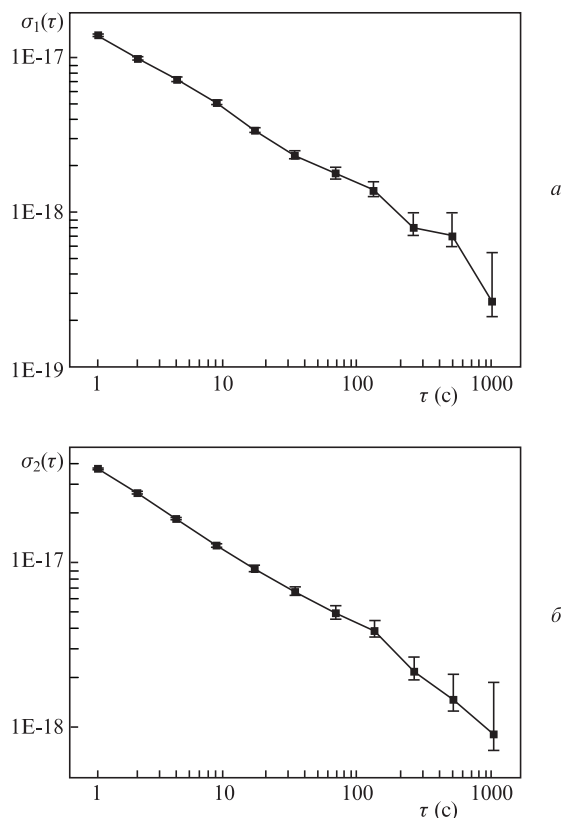


Рис.3. Параметр Аллана (стандартное отклонение Аллана), рассчитанный для остаточных случайных отклонений компоненты коротковолнового края ( $f_1 \approx 2.8 \times 10^{14}$  Гц) (а) и удвоенной по частоте компоненты длинноволнового края ( $f_2 \approx 1.4 \times 10^{14}$  Гц) (б) гребенки оптических частот синтезатора относительно частоты опорного стандарта ( $\sim 2.8 \times 10^{14}$  Гц), по которому они стабилизируются.

носительно частоты опорного оптического стандарта частоты, чем коротковолновый ( $f_1 \approx 2.8 \times 10^{14}$  Гц). Это объясняется различием в реализации систем ФАПЧ для указанных компонент гребенки оптических частот и разной шириной полос отработки в соответствующих петлях ОС. Тем не менее даже значения худшего из полученных параметров Аллана находятся в интервале примерно от  $4 \times 10^{-17}$  за 1 с до  $1 \times 10^{-18}$  за 1000 с.

Случайная погрешность стабилизации всей гребенки оптических частот синтезатора определяется суммарной случайной погрешностью стабилизации компонент длинноволнового и коротковолнового краев гребенки. Эта погрешность может быть интерпретирована как вносимая нестабильность, аддитивная к нестабильности опорного оптического стандарта частоты при реализации ФОЧ. Используя полученные в данном исследовании значения параметров Аллана (см. рис.3), суммарную случайную погрешность можно рассчитать по формуле

$$\sigma_{\Sigma}(\tau) = \sqrt{\sigma_1^2(\tau) + \sigma_2^2(\tau)}, \tag{1}$$

где  $\sigma_1(\tau)$  и  $\sigma_2(\tau)$  – отклонения Аллана для компоненты коротковолнового края ( $\lambda_1 \approx 1064$  нм,  $f_1 \approx 2.8 \times 10^{14}$  Гц) и для удвоенной по частоте компоненты длинноволнового края ( $\lambda_2 \approx 2128$  нм,  $f_2 \approx 1.4 \times 10^{14}$  Гц) гребенки оптических частот синтезатора. Проведенная указанным способом оценка дает следующий диапазон примерных значений параметра Аллана для случайной погрешности стабили-

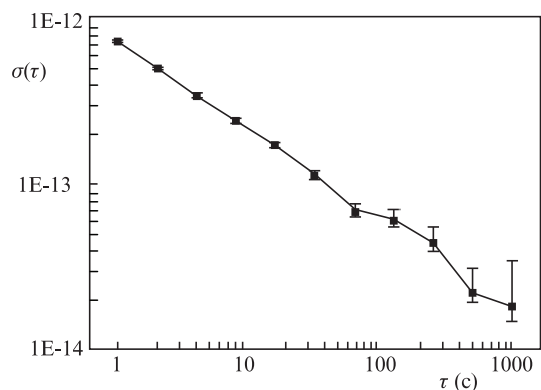


Рис.4. Параметр Аллана (стандартное отклонение Аллана), рассчитанный для взаимной нестабильности выходной радиочастоты ФОЧ  $f_{\text{гер}}$  и частоты вспомогательного опорного РЧ генератора, стабилизированного по пассивному водородному стандарту частоты.

зации ФОЧ на основе разработанного синтезатора:  $4.2 \times 10^{-17}$  за 1 с –  $1.1 \times 10^{-18}$  за 1000 с.

Для экспериментальной оценки возможности использования разработанного синтезатора в режиме ФОЧ были проведены предварительные измерения нестабильности межмодовой частоты (межмодового интервала) в гребенке оптических частот синтезатора. Для этого с помощью фотоприемника детектировался радиочастотный сигнал на межмодовой частоте синтезатора ( $f_{\text{гер}} \sim 107$  МГц). Затем проводилось долговременное измерение низкой разностной частоты ( $\sim 3$  кГц) между указанной радиочастотой синтезатора и частотой вспомогательного опорного РЧ генератора (Rohde & Schwarz 1090.3000.11), стабилизированного по пассивному водородному стандарту частоты Ч1-1006. Рассчитанные по результатам измерения значения нестабильности (рис.4) практически совпадают с паспортными характеристиками нестабильности используемого водородного стандарта. Это свидетельствует о том, что основной вклад в измеренную величину взаимной нестабильности дает водородный стандарт частоты (совместно со стабилизированным по нему генератором). Нестабильность собственно выходной радиочастоты ФОЧ должна быть существенно меньше полученных значений параметра Аллана. Грубую оценку нестабильности можно также получить, используя соотношения (1) и исходя из того, что известными величинами в данном случае являются измеренная взаимная (суммарная) нестабильность, паспортная нестабильность водородного стандарта частоты и вносимая нестабильность вспомогательного опорного РЧ генератора. Такая оценка дает значения, близкие к значениям нестабильности используемого опорного оптического стандарта частоты ( $\sim 2 \times 10^{-13}$  за 1 с и  $\sim 6 \times 10^{-15}$  за 1000 с).

Более точно измерить нестабильность выходной радиочастоты ФОЧ на основе разработанного волоконно-оптического синтезатора частот можно путем сравнения выходных радиочастот двух независимых экземпляров

ФОЧ. Такие исследования планируется провести в следующих работах.

Таким образом, полученные результаты подтверждают возможность применения разработанного синтезатора для переноса стабильности оптического стандарта частоты на другие оптические частоты (в диапазоне длин волн 1–2 мкм), а также в радиочастотный диапазон. При этом впервые для стабилизации волоконного эрбиевого синтезатора частот использовалась комбинация из миниатюрного внутривибраторного электрооптического фазового модулятора [12] и акустооптического частотного модулятора в волоконном исполнении (Brimrose). Полученная высокостабильная гребенка оптических частот может быть использована для решения практических задач прецизионной метрологии: измерения оптических частот и спектроскопии, создания фемтосекундных оптических часов, а также для исследований в сфере разработки новых телекоммуникационных технологий. Волоконное исполнение генератора-синтезатора гребенки оптических частот позволит сделать метрологическое оборудование на его основе высоконадежным, компактным и мобильным.

Работа выполнена при частичной поддержке государственных и ведомственных программ и заданий (регистрационные номера: NSh-6689.2016.2, 030720140005 и 030720140007).

- Diddams S.A., Udem Th., Bergquist J.C., Curtis E.A., Drullinger R.E., Hollberg L., Itano W.M., Lee W.D., Oates C.W., Vogel K.R., Wineland D.J. *Science*, **293**, 825 (2001).
- Bagayev S.N., Denisov V.I., Klementyev V.M., Korel I.I., Kuznetsov S.A., Pivtsov V.S., Zakharyash V.F. *Laser Phys.*, **14**, 1367 (2004).
- Ye J., Cundiff S.T. (Eds). *Femtosecond Optical Frequency Comb Technology: Principle, Operation and Application* (New York: Springer, 2005).
- Gubin M.A., Kireev A.N., Konyashchenko A.V., Kryukov P.G., Shelkovnikov A.S., Tausenev A.V., Tyurikov D.A. *Appl. Phys. B*, **95**, 661 (2009).
- Adler F., Moutzouris K., Leitenstorfer A., Schnatz H., Lipphardt B., Grosche G., Tauser F. *Opt. Express*, **12**, 5872 (2004).
- Washburn B.R., Diddams S.A., Newbury N.R., Nicholson J.W., Yan M.F., Jørgensen C.G. *Opt. Lett.*, **29**, 250 (2004).
- Washburn B.R., Fox R.W., Newbury N.R., Nicholson J.W., Feder K., Westbrook P.S., Jørgensen C.G. *Opt. Express*, **12**, 4999 (2004).
- Inaba H., Daimon Y., Hong F.L., Onae A., Minoshima K., Schibli T.R., Matsumoto H., Hirano M., Okuno T., Onishi M., Nakazawa M. *Opt. Express*, **14**, 5223 (2006).
- Губин М.А., Киреев А.Н., Коляда Н.А., Крюков П.Г., Таусенев А.В., Тюриков Д.А., Шелковников А.С. *Квантовая электроника*, **38**, 613 (2008).
- Korel I.I., Nyushkov B.N., Denisov V.I., Pivtsov V.S., Koliada N.A., Sysolyatin A.A., Ignatovich S.M., Kvashnin N.L., Skvortsov M.N., Bagaev S.N. *Laser Phys.*, **24**, 074012 (2014).
- Пивцов В.С., Нюшков Б.Н., Корель И.И., Коляда Н.А., Фарносов С.А., Денисов В.И. *Квантовая электроника*, **44** (6), 507 (2014).
- Нюшков Б.Н., Пивцов В.С., Коляда Н.А., Каплун А.Б., Мешалкин А.Б. *Квантовая электроника*, **45** (5), 486 (2015).
- Haverkamp N., Hundertmark H., Fallnich C., Telleet H.R. *Appl. Phys. B*, **78**, 321 (2004).
- Денисов В.И., Игнатович С.М., Квашнин Н.Л., Скворцов М.Н., Фарносов С.А. *Квантовая электроника*, **46** (5), 464 (2016).