

ПИСЬМА

Фемтосекундный делитель оптической частоты в СВЧ диапазон с относительной нестабильностью частоты 10^{-14} – 10^{-16} ($\tau = 1$ – 100 с)

А.Н.Киреев, А.В.Таусенев, Д.А.Тюриков, А.С.Шелковников,
Д.В.Шепелев, А.В.Конященко, М.А.Губин

Разработан малошумящий делитель оптической частоты в СВЧ диапазон спектра на основе фемтосекундного волоконного эрбиевого лазера. Источником оптического сигнала служил He–Ne/CH₄-стандарт частоты. Сравнение двух фемтосекундных делителей показало, что относительная нестабильность выходных СВЧ сигналов, вносимая делителями, составляет 10^{-14} – 10^{-16} для времен усреднения $\tau = 1$ – 100 с. Достигнутая нестабильность соответствует требованиям, предъявляемым к генераторам опорного сигнала в эталонах времени и частоты на основе «фонтана» атомов Cs и Rb.

Ключевые слова: фемтосекундный делитель оптических частот, волоконный лазер, He–Ne/CH₄-стандарт частоты, СВЧ генератор со сверхнизкими фазовыми шумами.

1. Развитие различных радиотехнических систем (единого времени, ГЛОНАСС, связи, радиолокации) настоятельно требует создания задающих радиогенераторов (ЗГ) с высокой кратковременной стабильностью частоты и низким уровнем фазовых шумов. В частности, ЗГ с относительной нестабильностью частоты (девиация Аллана) $\sigma_{\text{МО}} = 1 \times 10^{-14}$ – 1×10^{-15} (при времени усреднения $\tau = 1$ с) необходимы для эталонов и хранителей частоты фонтанного типа на атомах Cs, Rb, составляющих основу национальной и международной шкалы времени. «Фонтаны» имеют точность частоты $(1-2) \times 10^{-16}$, но время ее достижения зависит от стабильности частоты СВЧ поля, с которым взаимодействует ансамбль холодных атомов (эффект Дика [1]). Лучшие водородные мазер (Н-мазер) обладают кратковременной нестабильностью $\sigma_{\text{мазер}} \sim 1 \times 10^{-13}$ ($\tau = 1$ с) и при использовании их в качестве ЗГ для достижения указанной точности требуется более 10 суток ($\sim 10^6$ с). В силу обратной корневой зависимости нестабильности «фонтана» от времени усреднения [2] снижение нестабильности ЗГ на порядок, до $\sigma_{\text{МО}} = 1 \times 10^{-14}$ ($\tau = 1$ с), приводит к уменьшению времени выхода «фонтана» на номинальную точность на два порядка. При

дальнейшем снижении нестабильности ЗГ стабильность «фонтана» начинает определяться другими источниками шума.

Исследования последних лет показали, что эта задача может быть успешно решена с помощью высокостабильных лазеров и фемтосекундных делителей оптических частот (ДОЧ), передающих стабильность частоты из оптического диапазона в СВЧ диапазон спектра [3–5]. Получение высокостабильного излучения в оптике в настоящее время не является проблемой, и общепринятый способ состоит в стабилизации частоты полупроводникового лазера по высокодобротному резонатору Фабри–Перо методом Паунда – Древера – Холла [2, 6]. Что касается надежных малошумящих фемтосекундных ДОЧ, не ухудшающих достигнутой в оптике стабильности, то они до сих пор активно разрабатываются. На временной «джиттер» сигналов на выходе ДОЧ влияет целый ряд факторов, в частности стабильность режима синхронизации мод волоконного лазера и полоса частот обратной связи системы управления длиной его резонатора, а на этапе преобразования оптических фемтосекундных импульсов в электрические пикосекундные импульсы – свойства фотодетекторов.

При детектировании фемтосекундных импульсов существуют фундаментальные ограничения на стабильность частоты получаемого в микроволновом диапазоне сигнала: дробовые шумы фотодетекторов и преобразование флуктуаций интенсивности падающих импульсов в фазовый шум. С помощью специальных мер можно подавить связанные с этими ограничениями вклады в нестабильность микроволнового сигнала до уровня 1×10^{-16} ($\tau = 1$ с), что важно для применений в различных областях радиофотоники [3, 4].

В настоящей работе впервые в России решена задача создания ДОЧ с кратковременной нестабильностью частоты $\sigma_{\text{ОФД}} \approx 1 \times 10^{-14}$ ($\tau = 1$ с), достаточной для радикального сокращения времени выхода на номинальную точность в «фонтанах» атомов Cs и Rb. Специальных мер по подавлению вклада шумов, возникающих в процессе фо-

А.Н.Киреев, Д.А.Тюриков, А.С.Шелковников. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана, Россия, 105005 Москва, 2-я Бауманская ул., 5; e-mail: shelkov@x4u.lebedev.ru

А.В.Таусенев, А.В.Конященко. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; ООО «Авеста», Россия, 108840 Москва, Троицк, ул. Физическая, 11
Д.В.Шепелев. ООО «Авеста», Россия, 108840 Москва, Троицк, ул. Физическая, 11

М.А.Губин. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана, Россия, 105005 Москва, 2-я Бауманская ул., 5; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31

тодетектирования, и соответствующего усложнения схемы ДОЧ для решения этой задачи не потребовалось.

2. В качестве источника высокостабильного оптического излучения использован оптический He–Ne/CH₄-стандарт частоты (ОСЧ) на $\lambda = 3.39$ мкм, обладающий кратковременной нестабильностью частоты $\sigma_{\text{OFS}} < 1 \times 10^{-14}$ ($\tau = 1$ с) [7]. Частота He–Ne/CH₄-ОСЧ (88 ТГц) ниже частоты излучения волоконного фемтосекундного Er³⁺-лазера (190 ТГц), используемого в ДОЧ, что позволяет применить упрощенную схему делителя на основе генерации гребенки разностных частот в нелинейном кристалле. В этой схеме стабилизируется только один параметр – частота следования фемтосекундных импульсов $f_{\text{греб}}$ [8–10].

Схема ДОЧ в составе «метановых оптических часов» на основе He–Ne/CH₄-ОСЧ и волоконного фемтосекундного Er³⁺-лазера подробно описана в [9, 10], где исследования проводились с одним ДОЧ. Для определения нестабильности полученного СВЧ сигнала его частота сравнивалась с частотой Н-мазера, однако это не позволило определить собственную нестабильность выходной частоты на временах усреднения $\tau < 30$ с, где она существенно ниже нестабильности Н-мазера. В настоящей работе сообщается об измерениях с двумя вновь разработанными независимыми фемтосекундными ДОЧ с существенной модернизацией входящих в их состав волоконных Er³⁺-лазеров [11].

В отличие от [9, 10], Er³⁺-лазеры собраны на волокнах, поддерживающих поляризацию. Лазер имеет линейный резонатор, на одном конце которого находится оптическое нелинейное отражающее зеркало. На другом конце резонатора имеется воздушный промежуток, где сколлимированное излучение отражается от глухого концевого зеркала, закрепленного на пьезокерамическом трансляторе. Перед зеркалом расположен электрооптический фазовый модулятор на кристалле LiNbO₃. Использование внутрирезонаторного модулятора позволяет расширить полосу системы стабилизации частоты следования фемтосекундных импульсов. В настоящей работе ширина полосы обратной связи составила 150 кГц. Лазер работает в режиме синхронизации мод с $f_{\text{греб}} \sim 60$ МГц, средняя мощность излучения составляет 40 мВт, ширина спектра – 38 нм.

Излучение лазера ($\lambda = 1550$ нм) усиливалось в волоконном усилителе и далее сжималось отрезком волокна с отрицательной дисперсией групповых скоростей. Длительность усиленных импульсов составила 150 фс, средняя мощность – 220 мВт. Часть излучения (10%) отделялась с помощью волоконного ответвителя, коллимировалась и использовалась в качестве выходного излучения с длиной волны 1550 нм. Другая часть (90%) заводилась в отрезок волокна с высокой нелинейностью длиной 4 см, где генерировалось излучение суперконтинуума с шириной спектра от 1000 до 2000 нм. Это излучение также коллимировалось, и его коротковолновая часть (1060 нм) смешивалась в нелинейном кристалле с исходным излучением (1550 нм) для получения гребенки разностных частот в области 3400 нм.

Применение описанных выше фемтосекундных лазеров позволило обеспечить устойчивый суточный режим работы ДОЧ.

3. Схема эксперимента для исследования нестабильности двух ДОЧ приведена на рис.1. На рис.2 показана гребенка радиочастотных компонент с $f_{\text{греб}} \sim 60$ МГц ($f_N =$

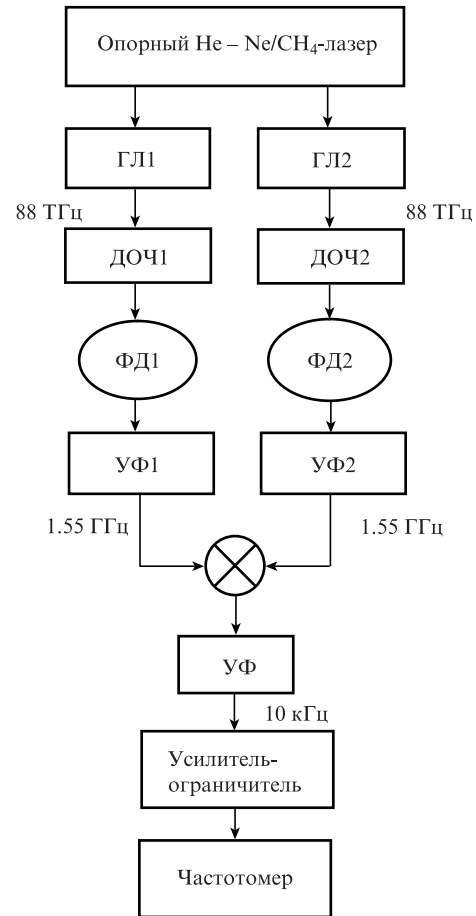


Рис.1. Схема эксперимента: ДОЧ – делитель оптической частоты; ГЛ – гетеродинный лазер; ФД – фотодетектор; УФ – узкополосный фильтр.

$Nf_{\text{греб}}$, где N – номер гармоники) на выходе фотодетектора, регистрирующего фемтосекундные импульсы волоконного Er³⁺-лазера, входящего в состав ДОЧ. Верхняя граница показанного спектра частот ограничивалась рабочим диапазоном анализатора (3 ГГц). Для регистрации оптических фемтосекундных импульсов на выходе ДОЧ использовался широкополосный линейный pin-фотодиод на InGaAs с полосой 10 ГГц по уровню –3 дБ. Из рис.2 видно, что отношение сигнал/шум для компонент гребенки

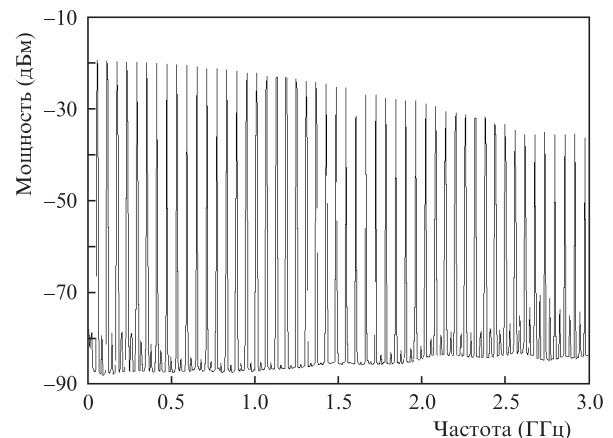


Рис.2. Радиочастотная гребенка гармоник частоты следования импульсов фемтосекундного волоконного Er³⁺-лазера на выходе фотодетектора. Полоса анализатора спектра 1 МГц.

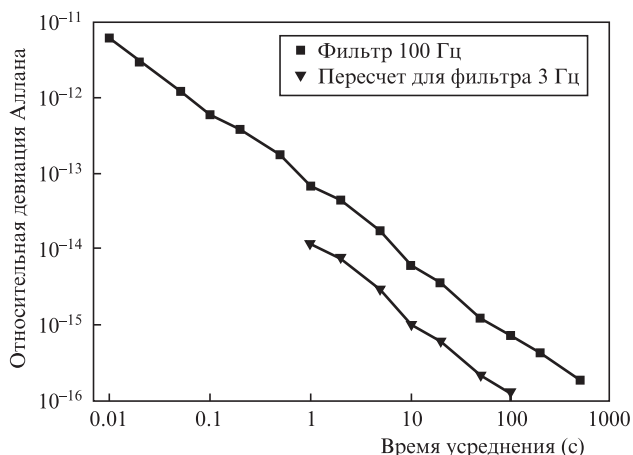


Рис.3. Зависимости относительной девиации Аллана от времени усреднения для двух ДОЧ (несущая частота ~ 1.55 ГГц, 26-я гармоника частоты следования импульсов фемтосекундного Er^{3+} -лазера).

ки с ростом частоты уменьшается несущественно, и для получения сигнала с высокой стабильностью выгодно брать гармоники с большими номерами N . С учетом выходных характеристик фотоприемника и имеющейся элементной базы были выбраны компоненты с $N = 26$ на частоте ~ 1.55 ГГц. Разность частот 26-х гармоник двух ДОЧ, составлявшая ~ 10 кГц, измерялась частотомером.

4. Относительная девиация Аллана для времен усреднения $\tau = 0.01$ – 500 с приведена на рис.3. Зависимость, показанная черными квадратами, – измеренная собственная нестабильность двух ДОЧ. Измерения проводились с фильтром с полосой 100 Гц на входе частотомера. Зависимость ведет себя как $\sim 1/\tau$, что характерно для белого фазового шума [2]. Вклад такого шума в измеряемую нестабильность зависит от полосы частот пропускания тракта на входе частотомера. Результат пересчета девиации Аллана для фильтра с полосой 3 Гц, который исполь-

зуется в стандартной процедуре измерения нестабильности мазеров, показан на рис.3 треугольниками.

Таким образом, из рис.3 видно, что достигнутая нестабильность деления частоты $\text{He-Ne/CH}_4\text{-ОСЧ}$ в СВЧ диапазон составляет 1×10^{-14} – 1×10^{-16} в интервале времен усреднения 1–100 с (для фильтра с полосой 3 Гц). Зависимость аппроксимируется функцией $\sigma(\tau) = 1 \times 10^{-14}/\tau$. Для применений ДОЧ в составе задающего генератора для эталонов частоты на «фонтане» атомов Cs или Rb важна стабильность при времени усреднения $\tau = 1$ с. Полученный уровень нестабильности для $\tau = 1$ с близок к результатам работы [5], где оптический ЗГ на «фонтане» атомов Cs позволил сократить время выхода «фонтана» на точность 2×10^{-16} от 10 суток (при использовании Н-мазера) до суток.

Работа по созданию ДОЧ выполнялась при организационной и финансовой поддержке руководителя группы компаний «Конти» Т.Р.Тимербулатова. Экспериментальные исследования моноблочного $\text{He-Ne/CH}_4\text{-ОСЧ}$, выполненные Д.А.Т., А.С.Ш. и М.А.Г., поддержаны Российским научным фондом (проект № 16-19-10694).

1. Santarelli G. et al. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, **45**, 887 (1998).
2. Риле Ф. *Стандарты частоты. Принципы и приложения* (М.: Физматлит, 2009).
3. Fortier T.M. et al. *Nature Photon.*, **5**, 425 (2011).
4. Zhang W. et al. *Appl. Phys. Lett.*, **96**, 211105 (2010).
5. Lipphardt B. et al. arXiv:1609.05718v1 [physics.atom-ph] 19 Sep 2016.
6. Alnis J. et al. *Phys. Rev. A*, **77**, 053809, (2008).
7. Gubin M. et al., in *Abstract book of 2013 Joint UFFC, EFTF and PFM Symposium* (Prague, Czech Republic, 21–25 July).
8. Zimmermann M. et al. *Opt. Lett.*, **29**, 310 (2004).
9. Губин М.А. и др. *Квантовая электроника*, **38**, 613 (2008).
10. Gubin M.A. et al. *Appl. Phys. B*, **95**, 661 (2009).
11. Киреев А.Н., Конященко А.В., Таусенев А.В. и др. *Тез. докл. Российского семинара по волоконным лазерам 2016* (Новосибирск, 2016, с. 98).