

# Короткая оптоволоконная линия связи с системой компенсации фазовых шумов для передачи сигналов оптической частоты

К.Ю.Хабарова, К.С.Кудеяров, Г.А.Вишнякова, Н.Н.Колачевский

*Создана оптоволоконная линия с системой компенсации фазовых шумов длиной 5 м для передачи оптического сигнала частоты на длине волны 1.14 мкм. Исследована стабильность работы системы компенсации шумов при наличии гармонических механических возмущений. Продемонстрирована относительная нестабильность частоты переданного сигнала  $3.8 \times 10^{-15}$  за время усреднения 1 с и  $3.5 \times 10^{-20}$  – за 850 с.*

**Ключевые слова:** волоконные линии связи, передача сигналов частоты, компенсация фазовых шумов.

## 1. Введение

Прогресс в области создания оптических стандартов частоты, достигнутый за последние десять лет, привел к стремительному развитию как метрологии времени и частоты, так и многих других областей современной фундаментальной и прикладной физики. Относительная неточность и нестабильность современных оптических часов снизилась до нескольких единиц в восемнадцатом знаке [1, 2], что открывает новые горизонты для спутниковой навигации и геодезии, а также позволяет проводить тестирование фундаментальных теорий на новом уровне точности [3]. Одновременно начаты исследования по улучшению методов передачи высокостабильных сигналов частоты, что позволило бы достигать требуемого уровня стабильности за короткое время.

Наиболее широко используемые сегодня спутниковые методы распространения высокостабильных сигналов (GPS, TWSTFT) позволяют реализовать передачу сигналов частоты с относительной нестабильностью на уровне  $10^{-16}$  за время усреднения порядка суток [4, 5]. Этого недостаточно для сохранения стабильности сигналов частоты современных оптических часов при передаче на большие расстояния.

Одним из перспективных методов передачи высокостабильных сигналов частоты является метод передачи по оптическим волокнам. Была продемонстрирована передача радиочастотных сигналов с помощью амплитудной модуляции излучения непрерывного лазера с относительной нестабильностью  $5 \times 10^{-15}$  за 1 с усреднения [6], а также при передаче импульсов фемтосекундного лазера с относительной нестабильностью  $4.6 \times 10^{-15}$  [7] на расстоянии до 100 км. Однако наибольшей стабильности передачи сигналов частоты удалось достичь с использованием информации о фазе несущей, что позволило увеличить

расстояние до 1000–2000 км [8, 9] без потери свойств стабильности передаваемого сигнала.

В настоящий момент активно ведутся работы по созданию сети волоконных линий между европейскими институтами, которая позволит сличать различные стандарты частоты и использовать их в приложениях [3, 10]. Важным шагом стала и реализация передачи высокостабильных сигналов частоты и времени по коммерческим линиям, используемым для распространения Интернет-трафика [11], а также работы по созданию открытых каналов передачи оптических сигналов частоты, например через спутники [12].

Ключевой технологией в основе метода передачи сигнала оптической частоты по оптоволоконным линиям связи является компенсация фазовых шумов, накапливаемых сигналом в процессе распространения. Так, например, флуктуации показателя преломления, вызванные изменениями температуры и акустическими вибрациями, приводят к флуктуациям длины оптического пути и, как следствие, к фазовым шумам [13]. Такие шумы, называемые доплеровскими, необходимо детектировать и компенсировать.

В Отделе спектроскопии ФИАНа ведется работа по созданию репера частоты на ансамбле холодных атомов тулия [14]. Для передачи высокой стабильности опорного резонатора (относительная нестабильность частоты составляет  $2 \times 10^{-15}$  при временах усреднения до 100 с) [8] к опрашиваемому атомному ансамблю нами создана и охарактеризована оптоволоконная линия длиной 5 м с системой регистрации и компенсации фазовых шумов. В настоящей работе приводится описание этой линии и результаты исследования стабильности, которую она обеспечивает при передаче оптического сигнала частоты на длине волны 1.14 мкм. Аналогичная линия может быть использована для передачи высокостабильного оптического сигнала в другие лаборатории для проведения сличений различных стандартов частоты.

## 2. Экспериментальная установка

Схема эксперимента приведена на рис.1. Регистрация фазовых шумов волокна осуществляется методом автогеродинамирования. Излучение непрерывного диодного

К.Ю.Хабарова, К.С.Кудеяров, Н.Н.Колачевский. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; Российский квантовый центр, Россия, 143025 Москва, Сколково, ул. Новая, 100; e-mail: kseniakhabarova@gmail.com  
Г.А.Вишнякова. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53

Поступила в редакцию 1 августа 2017 г.

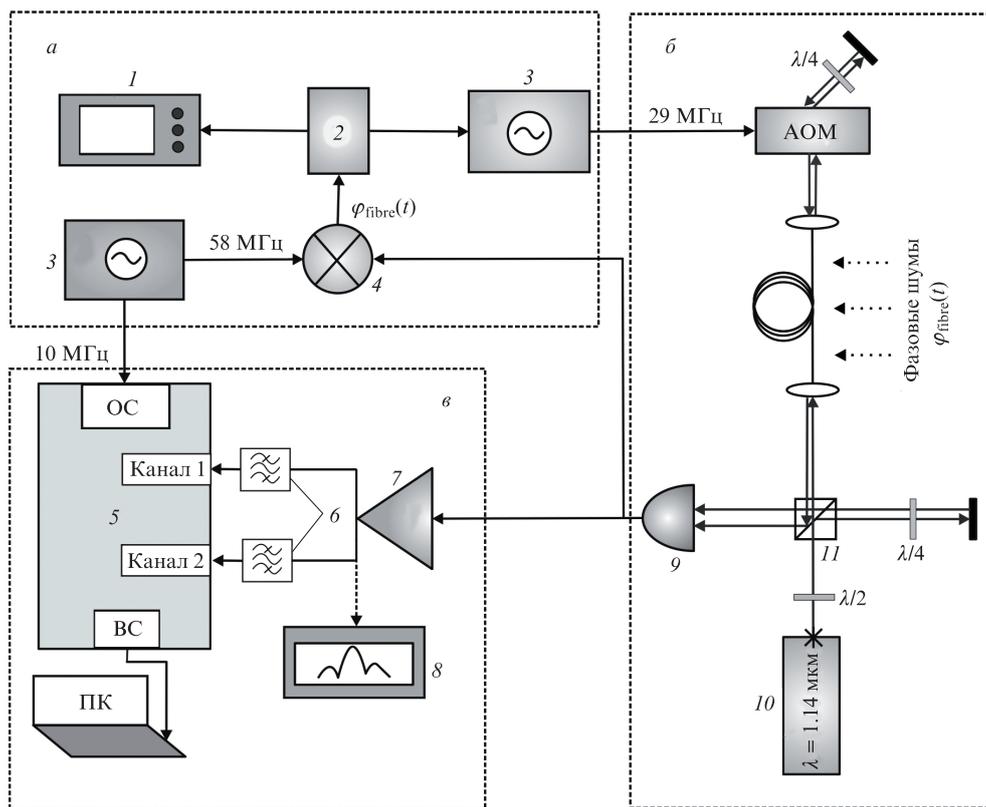


Рис.1. Схема установки для детектирования и компенсации фазовых шумов волокна, состоящая из петли обратной связи (а), оптической схемы (б) и блока измерения стабильности переданного сигнала (в):

1 – осциллограф; 2 – пропорционально-интегральный усилитель; 3 – генератор; 4 – фазовый детектор; 5 – счетчик; 6 – полосовые фильтры; 7 – усилитель; 8 – анализатор спектра; 9 – фотоприемник; 10 – лазерный источник; 11 – поляризационный светоделитель; АОМ – акустооптический модулятор; ОС – опорный сигнал; ВС – выходной сигнал; ПК – персональный компьютер;  $\lambda/2$  – полуволновая пластинка;  $\lambda/4$  – четвертьволновая пластинка.

лазера Toptica DL-100 на длине волны 1.14 мкм делится при помощи полуволновой пластинки и поляризационного светоделителя на две части. Одна часть пучка является опорной и направляется по короткому плечу интерферометра. Вторая часть проходит оптоволоконную линию в прямом и обратном направлениях, отражаясь на дальнем конце от зеркала. Это излучение содержит удвоенные шумы волоконной линии. Частота излучения этого пучка смещается на 58 МГц при двукратном прохождении через акустооптический модулятор (АОМ). Опорный и вернувшийся из волокна пучки совмещаются на поляризационном светоделителе, после чего сигнал биений на разностной частоте (58 МГц) регистрируется фотодетектором. Одна часть сигнала с фотодетектора используется в петле обратной связи для компенсации шумов, а вторая – усиливается и подается на счетчик частоты для изучения стабильности сигнала.

Часть сигнала, используемая для компенсации шумов, и эталонный сигнал от генератора на частоте 58 МГц подаются на фазовый детектор. На выходе детектора формируется сигнал ошибки, пропорциональный разности фаз входных сигналов, который используется для формирования сервосигнала при помощи пропорционально-интегрального усилителя. Пропорционально-интегральный усилитель должен обладать полосой, превышающей полосу частот, подлежащих компенсации. Нами использовался усилитель с полосой 100 кГц и одним каскадом усиления, созданный в нашей лаборатории и во многом аналогичный коммерчески доступной модели SRS SIM960. Сервосигнал подается на генератор, управляет

мый напряжением, который, в свою очередь, управляет частотой АОМа. Частота АОМа подстраивается так, чтобы поддерживать сигнал ошибки равным нулю и, таким образом, компенсировать вносимые волоконной линией шумы.

Для измерения частоты биений используется многоканальный счетчик П-типа (без внутреннего усреднения), не имеющий «мертвого» времени, что позволяет характеризовать стабильность сигнала при помощи девиации Аллана. Для получения дополнительной информации о типах фазовых шумов в переданном сигнале можно использовать счетчик Л-типа. На опорный вход счетчика для синхронизации подается сигнал на частоте 10 МГц с генератора, используемого для формирования сигнала ошибки. Частота биений (58 МГц) заранее была выбрана не кратной задающей частоте счетчика, чтобы избежать перекрестных помех. Сигнал подается на два канала счетчика через фильтры с различной полосой пропускания, что необходимо для обнаружения проскальзываний цикла. Совпадение показаний в обоих каналах является критерием правильной работы счетчика и достоверности получаемых данных. Данные, содержащие проскальзывания цикла, исключаются из рассмотрения.

Для корректного детектирования фазовых шумов, вносимых волокном, необходимо, чтобы вклад собственных шумов лазерного источника был пренебрежимо мал, т.е. чтобы длина когерентности излучения была много больше удвоенной длины волокна. В эксперименте с короткой волоконной линией длиной 5 м дополнительная стабилизация частоты источника не требуется. В даль-

нейшем при компенсации шумов в более длинных линиях передающий лазер будет дополнительно стабилизироваться по высокочастотному резонатору Фабри–Перо для увеличения длины когерентности лазера.

### 3. Стабильность передачи частоты

Для оценки стабильности передаваемой частоты нами использовалась дисперсия Аллана:

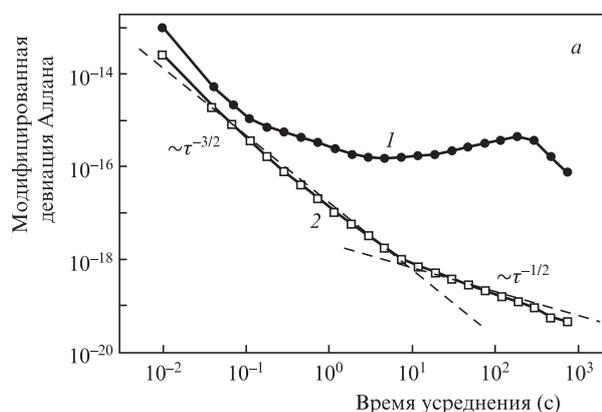
$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2} \langle (y_2(\tau) - y_1(\tau))^2 \rangle,$$

где  $t$  – время;  $\tau$  – время усреднения;  $y_i(\tau) = \overline{\Delta v_i(t)}/v$ ,  $i = 1, 2$  – средние относительные отклонения частоты  $v$  для различных времен усреднения [15]. Для более детального анализа вычислялась спектральная плотность мощности (СПМ) фазовых шумов  $S_\phi(f)$ , где  $f$  – частота фурье-компоненты. При вычислении дисперсии нами применялся метод анализа с перекрывающимися участками данных, что позволяет более эффективно использовать результаты измерений и получать дисперсию Аллана на больших временах усреднения [16]. По наклону графика зависимости девиации Аллана  $\sigma_y(\tau)$  от времени усреднения в двойном логарифмическом масштабе можно судить о вкладах различных типов шумов (табл. 1). Фликкер- и белый шум фазы приводят к одинаковой временной зависимости девиации, поэтому для их распознавания необходимо построение модифицированной девиации Аллана [17].

Измеренная при передаче сигнала по волоконной линии длиной 5 м относительная нестабильность частоты сигнала, а также СПМ фазовых шумов приведены на рис.2. В отсутствие компенсации шумов на временах усреднения более 1 с наблюдается существенное влияние флик-

Табл. 1. Вклад шумов в нестабильность передачи частоты ( $\sigma_y(\tau)$  – девиация Аллана,  $S_\phi(f)$  – спектральная плотность мощности фазовых шумов).

Тип шума	Оценка стабильности частоты	
	$\sigma_y(\tau)$	$S_\phi(f)$
Случайные уходы частоты	$\propto \tau^{1/2}$	$\propto f^{-4}$
Фликкер-шум частоты	const	$\propto f^{-3}$
Белый шум частоты	$\propto \tau^{-1/2}$	$\propto f^{-2}$
Фликкер-шум фазы	$\propto \tau^{-1}$	$\propto f^{-1}$
Белый шум фазы	$\propto \tau^{-1}$	const



кер-шума частоты, вызванного, вероятно, колебаниями температуры в лаборатории. Активная компенсация шумов позволяет достичь относительной нестабильности  $3.8 \times 10^{-15}$  за время усреднения 1 с и  $3.5 \times 10^{-20}$  – за время  $\sim 1000$  с. При активной стабилизации линии модифицированная девиация Аллана за время усреднения до 10 с характеризуется зависимостью  $\tau^{-3/2}$ , что соответствует белому шуму фазы. С увеличением времени усреднения зависимость приобретает вид  $\tau^{-1/2}$  (белый шум частоты).

### 4. Влияние возмущений

Чтобы проверить устойчивость нашей системы к возмущениям, мы провели измерения стабильности передаваемого сигнала частоты при механическом воздействии на волокно с различными частотами в диапазоне 5–120 Гц. Девиация Аллана гармонического сигнала с частотой  $f_m$  выражается как [16]

$$\sigma_y(\tau) \propto \frac{\sin^2(\pi f_m \tau)}{\pi f_m \tau}.$$

Данные, полученные в ходе эксперимента с возмущением на частоте  $f_m = 5$  Гц, приведены на рис.3. Без компенсации шумов девиация Аллана имеет максимумы на временах усреднения, кратных  $1/(2f_m)$ , что соответствует вкладу возмущения. В спектре шумов виден характерный пик на частоте  $f_m$ . При включенной системе компенсации шумов вклад возмущения существенно подавляется.

### 5. Заключение

Короткая волоконная линия с системой активной компенсации фазовых шумов обеспечивает относительную нестабильность передачи сигналов оптических частот на уровне единиц 20-го знака, что обеспечивает возможность передачи ультрастабильных сигналов частоты оптических часов в пределах лаборатории. Это востребовано как при создании системы часового лазера, стабилизированного по высокочастотному оптическому резонатору Фабри–Перо, так и для передачи оптического сигнала к опрашиваемому ансамблю ультрахолодных атомов. В исследованной нами полосе частот механических гармонических возмущений (5–120 Гц) петля обратной связи позволяет снизить спектральную плотность мощности фазовых шумов до уровня  $10^{-5}$  рад<sup>2</sup>/Гц. В дальней-

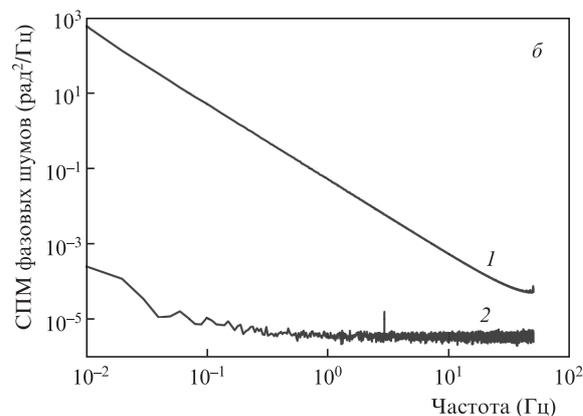


Рис.2. Модифицированная девиация Аллана (а) и спектральная плотность мощности фазовых шумов (б) при передаче сигнала без компенсации шумов (1) и с активной компенсацией шумов (2).

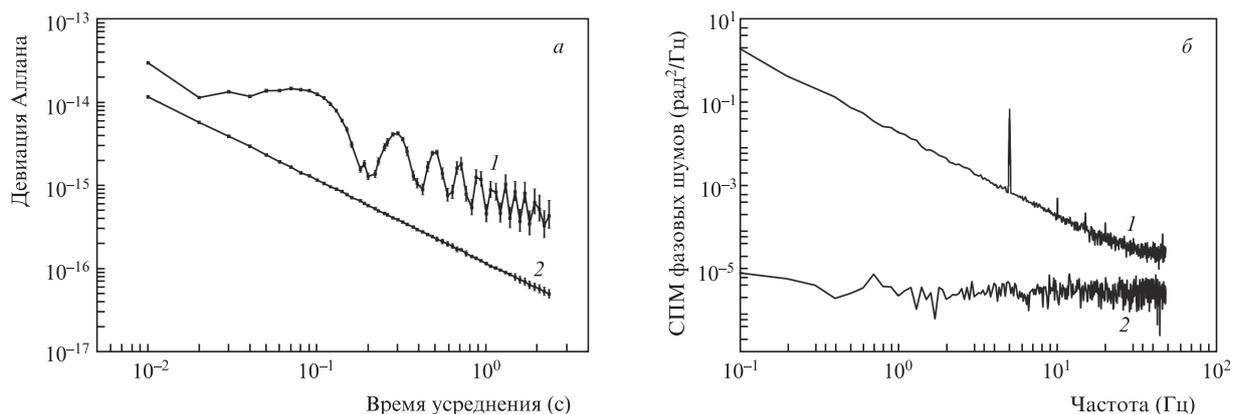


Рис.3. Девияция Аллана (а) и спектральная плотность мощности фазовых шумов (б) при передаче сигнала с механическим возмущением на частоте 5 Гц без компенсации шумов (1) и с активной компенсацией шумов (2).

шем мы планируем исследовать передачу сигналов по длинным линиям длиной до 4 км для создания оптоволоконной сети в масштабах ФИАНа.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 15-02-03936 и 16-29-11723).

- Bloom B. J., Nicholson T. L., Williams J. R., et al. *Nature*, **506**, 71 (2014).
- Hinkley N., Sherman J.A., Phillips N.B., et al. *Science*, **341**, 1215 (2013).
- Riehle F. *Nat. Photonics*, **11**, 25 (2017).
- Petit G., Kanj A., Loyer S., et al. *Metrologia*, **52**, 301 (2015).
- Fujieda M., Piester D., Gotoh T., et al. *Metrologia*, **51**, 253 (2014).
- Lopez O., Amy-Klein A., Lours M., et al. *Appl. Phys. B*, **98**, 723 (2010).
- Marra G., Margolis H.S., Richardson D.J. *Opt. Express*, **20**, 1775 (2012).
- Predehl K., Grosche G., Raupach S.M.F., et al. *Science*, **336**, 441 (2012).
- Calonico D., Bertacco E.K., Calosso C., et al. *Appl. Phys. B*, **117**, 979 (2014).
- Lisdat C., Grosche G., Quintin N., et al. *Nat. Commun.*, **7**, 12443 (2016).
- Lopez O., Kanj A., Pottier P.-E., et al. *Appl. Phys. B*, **110**, 3 (2013).
- Deschênes J.-D., Sinclair L.C., Giorgetta F.R., et al. *Phys. Rev. X*, **6**, 021016 (2016).
- Hocker G.B. *Appl. Opt.*, **18**, 1445 (1979).
- Sukachev D., Fedorov S., Tolstikhina I., et al. *Phys. Rev. A*, **94**, 022512 (2016).
- Allan D.W. *Proc. IEEE*, **54**, 221 (1966).
- Риде Ф. *Стандарты частоты. Принципы и приложения* (М.: Физматлит, 2009).
- Allan D.W., Barnes J. *Proc. 35th Ann. Freq. Control Symposium* (Ft. Monmouth: Electronic Industries Association, 1981, p. 470).