

# Передача сигнала частоты по высокостабильному открытому воздушному каналу

К.С.Кудеяров, Д.С.Крючков, Г.А.Вишнякова, Н.О.Жаднов, К.Ю.Хабарова, Н.Н.Колачевский

*Продemonстрирована передача оптического сигнала на длине волны 1542 нм по высокостабильному открытому воздушному каналу длиной 5 м с системой компенсации фазовых шумов, вызванных атмосферными флуктуациями. Исследованы фазовые шумы, вносимые линией, и их вклад в нестабильность передачи частоты. Показано, что при включенной системе фазовой компенсации вклад линии в относительную нестабильность передаваемого сигнала в терминах девиации Аллана достигает  $1.7 \times 10^{-19}$  на времени усреднения 5000 с.*

**Ключевые слова:** передача оптического сигнала частоты, относительная нестабильность частоты, девиация Аллана, спектральная плотность мощности флуктуаций, открытый воздушный канал, атмосферная турбулентность.

## 1. Введение

Создание сети оптических часов, соединенных каналами для когерентной передачи сигналов частоты и времени, открывает большие перспективы для развития таких областей, как формирование национальных и международных временных шкал [1], спутниковая навигация [2], релятивистская геодезия [3], интерферометрия со сверхдлинной базой [4], проверка фундаментальных теорий [5] и поиск темной материи [6]. Современные стандарты частоты достигли уровня относительных неточности и нестабильности порядка  $10^{-18}$  [7, 8]. Передача сигналов от таких стандартов с сохранением характеристик радиочастотными методами оказывается невозможной, поскольку последние не обеспечивают нестабильность передаваемой частоты лучше  $10^{-16}$  [9]. Снизить уровень вносимых каналом связи фазовых шумов позволяет передача сигналов на оптической частоте. Активное развитие методов передачи высокостабильных сигналов по оптоволоконным линиям в последнее десятилетие позволило реализовать когерентную передачу сигналов частоты на расстояния до 2000 км [10], сигналов времени – на 6000 км [11]. В то же время для множества приложений требуется осуществление связи с транспортируемыми стандартами, которые могут находиться вне зоны расположения оптоволоконной инфраструктуры, что делает необходимым создание открытых оптических каналов. В дальнейшем подобные каналы могут использоваться для синхронизации

часов между наземными станциями и спутниками [12]. Комбинированное применение волоконных и открытых каналов связи позволит создать глобальную сеть для распространения точных сигналов частоты и времени.

Стабильность и точность сигнала, передаваемого по воздушному открытому каналу, может ограничиваться атмосферной турбулентностью, которая оказывает влияние как на амплитуду, так и на фазу оптического излучения. Флуктуации показателя преломления воздуха вносят в сигнал фазовые возмущения (доплеровские шумы), спектр которых описывается теорией турбулентности Колмогорова [13]. Согласно этой теории спектральная плотность мощности фазовых шумов

$$S_{\varphi}(f) = 0.016k^2 C_n^2 L V^{5/3} f^{-8/3}, \quad (1)$$

где  $f$  – частота;  $k$  – волновое число оптического излучения;  $C_n$  – структурная постоянная турбулентности атмосферы;  $L$  – длина открытого канала;  $V$  – скорость ветра.

Для сохранения характеристик передаваемого сигнала используются различные методы компенсации вносимых возмущений. Метод О-TWTFТ, в основе которого лежит двухсторонний обмен импульсами фемтосекундных гребенок, позволяет передавать сигнал частоты с относительной нестабильностью на уровне  $10^{-18}$  и синхронизировать время с фемтосекундной точностью при длине канала до 4 км [14]. Однако сложность и высокая стоимость подобных систем делают их установку на транспортируемые объекты затруднительной. Альтернативным решением могут стать методы передачи частоты с использованием непрерывных лазеров, по аналогии с методом, применяемым в оптоволоконных линиях. В работе [15] была продемонстрирована передача частоты на расстояние 600 м с относительной нестабильностью  $1.3 \times 10^{-18}$  на времени усреднения 64 с. Дальнейшее увеличение длины открытого канала требует дополнительного учета некоторых атмосферных эффектов. Для компенсации искажений траектории лазерного луча в открытом канале, влияющих на эффективность сбора передаваемого излучения, необходима система активной подстройки направления луча [16]. Кроме того, искажение волнового

К.С.Кудеяров, Д.С.Крючков, Г.А.Вишнякова, Н.О.Жаднов. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: gulnarav7@gmail.com

К.Ю.Хабарова. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений» Россия, Московская обл., 141570 Менделеево

Н.Н.Колачевский. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; Российский квантовый центр, Россия, 121205 Москва, Сколково, Большой б-р, 30, стр. 1



ла. Отщепляющий кубик и зеркало закреплены на единой базе. Можно показать [23], что, строго говоря, при замкнутой петле обратной связи характеристики точности и стабильности переданного и вернувшегося сигналов могут различаться. Кроме того, эффективность подавления шумов зависит от того, насколько точно выполняется предположение об одинаковости шумов, вносимых каналом при прямом и обратном распространении излучения. Поэтому для целей полного исследования характеристик линии удаленный пользователь обычно находится близко к передающей стороне, что дает возможность формирования еще одного, удаленного (remote) сигнала биений, как показано на рис.1. Мощность на фотодиоде ФД2 доставленного излучения равна 0.9 мВт, опорного пучка – 2 мВт. Характеристики этого сигнала и относятся к важнейшим характеристикам работы системы. Альтернативой является использование второй аналогичной линии с системой компенсации шумов, по которой сигнал, полученный удаленным пользователем, передается обратно на передающую сторону и формирует удаленный сигнал биений (так называемая антипараллельная схема).

Длина исследуемой в настоящей работе линии составляет 5 м. Все оптические элементы схемы, за исключением одного зеркала, расположены на одном оптическом столе, тогда как зеркало, находящееся примерно на половине длины канала, – на другом (рис.1). Такая конфигурация ближе к реальным условиям, в которых принимающая сторона не является полностью неподвижной.

Для измерения частот биений сигналов используется счетчик частоты высокого разрешения без мертвого времени К + К Messtechnik в Л-режиме (режим усреднения фазы). Сигналы биений усиливаются, смещаются на двойных балансных смесителях с сигналами с РЧ генераторов Г3 и Г4 для получения удобных диапазонов частот, фильтруются и подаются каждый на два канала счетчика для определения возможных событий проскальзывания фазы (cycle slip). В анализе учитываются только участки данных без проскальзывания фазы. На опорный вход всех РЧ генераторов и счетчика подается сигнал 10 МГц от пассивного водородного лазера. Стоит отметить, что использование лазера в данном эксперименте не является

необходимым, достаточно использовать сигнал 10 МГц с РЧ генератора. Генератор Г1 нуждается в опорном сигнале 10 МГц только при исследовании канала в отсутствие стабилизации. На основе данных со счетчика вычисляются средние значения частот, девиация Аллана  $\sigma_y$ , где  $y = \Delta v(t)/v_0$  – относительные флуктуации частоты,  $v_0$  – несущая оптическая частота (194 ТГц для  $\lambda = 1542$  нм), и спектральная плотность мощности флуктуаций фазы  $S_\varphi(f)$ , позволяющие сделать вывод о неточности и нестабильности сигнала, а также о характере преобладающих шумов [24].

### 3. Результаты и их обсуждение

На рис.2 приведены зависимости частот локального и удаленного сигналов биений от времени с окном измерения счетчика 1 мс. В момент времени  $t = 86$  с включалась петля обратной связи. Хорошо видно уменьшение флуктуаций частоты. На рис.3 показана относительная нестабильность частоты в терминах девиации Аллана для локального и удаленного сигналов для четырех серий измерений: в отсутствие компенсации шумов (верхние кривые) с окнами измерения счетчика 1 мс и 1 с и при активной петле обратной связи (нижние кривые) с окнами 1 мс и 1 с. Длительность измерений с окном 1 с составила 37000 с.

Система компенсации шумов позволяет подавить вклад, вносимый линией в нестабильность передаваемого сигнала, с  $1.8 \times 10^{-15}$  до  $2.2 \times 10^{-16}$  на времени усреднения 1 с и с  $1.6 \times 10^{-18}$  до  $1.7 \times 10^{-19}$  – на времени 5000 с. Вклад в неточность (отличие среднего значения от номинального) после усреднения в течение 37000 с снижается с 1 мГц до 25 мкГц или (в относительных единицах) с  $5 \times 10^{-18}$  до  $1.25 \times 10^{-19}$ . Эти характеристики достаточны для использования такого канала при сличении лучших современных транспортируемых стандартов частоты [25]. Для локального сигнала вклад в нестабильность снижается с  $3.6 \times 10^{-15}$  до  $7.3 \times 10^{-19}$  на времени 1 с и с  $2.8 \times 10^{-18}$  до  $7.7 \times 10^{-22}$  на времени 5000 с, вклад в неточность частоты – с 1.4 мГц до 50 нГц или с  $7 \times 10^{-18}$  до  $2.5 \times 10^{-22}$  соответственно. Характеристики локального сигнала значительно лучше характеристик удаленного, возможная причина этого обсуждается ниже.

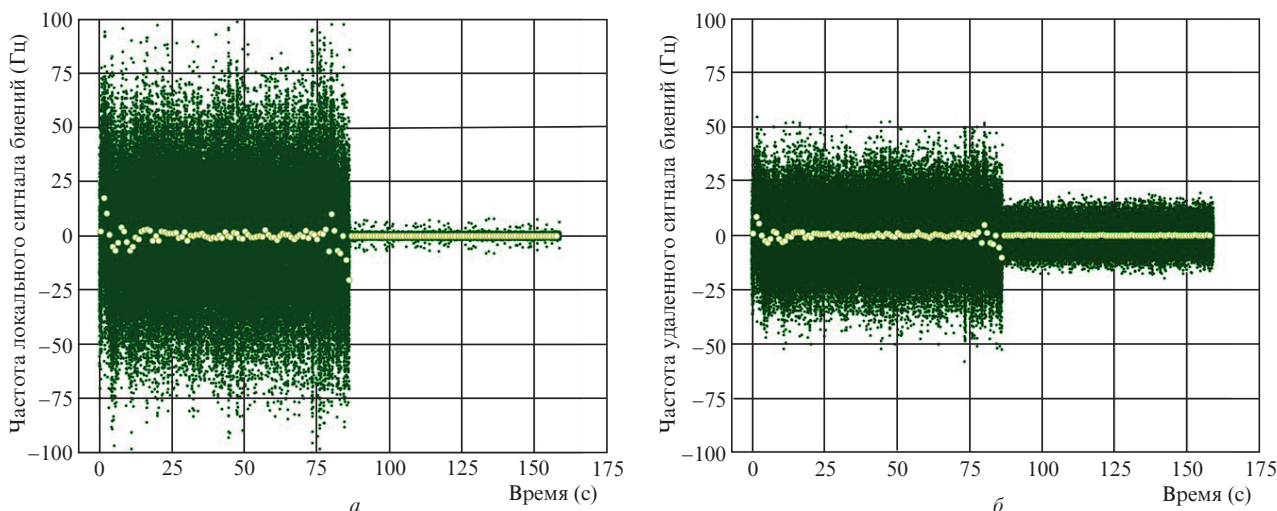


Рис.2. Зависимости частоты локального (а) и удаленного (б) сигналов биений от времени. В момент времени  $t = 86$  с активировалась петля обратной связи. Поле из темных точек – данные со счетчика с окном измерения 1 мс, светлые точки – данные, полученные усреднением за 1 с. Для наглядности частоты локального и удаленного сигналов биений приведены за вычетом 21 и 22 МГц соответственно.

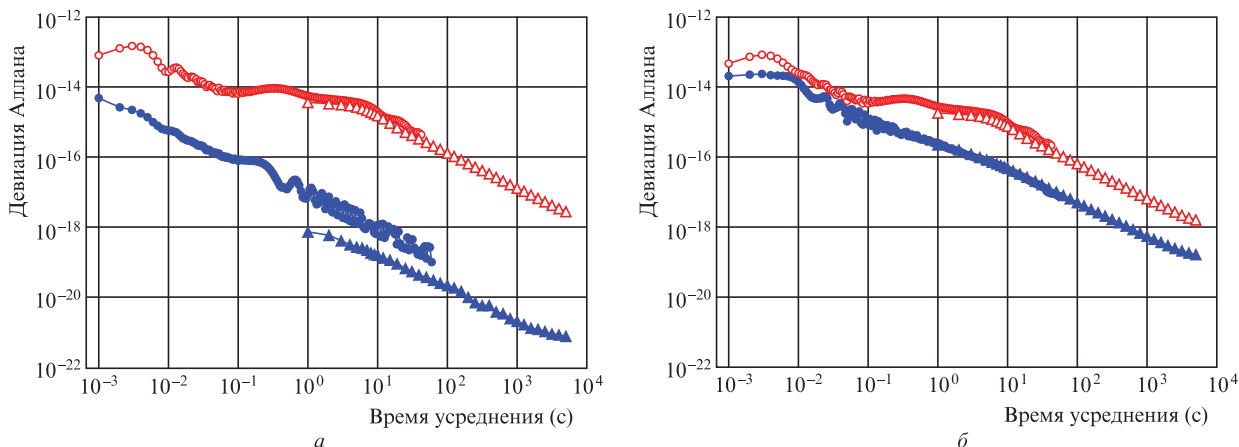


Рис.3. Девияция Аллана в зависимости от времени усреднения локального (а) и удаленного (б) сигналов без компенсации шумов (светлые точки) и с их компенсацией (темные точки). Кружки – данные, полученные с окном измерения счётчика 1 мс, треугольники – с окном 1 с. Точки соединены кривыми для наглядности.

По характеру зависимости девиации от времени усреднения можно судить о типе преобладающих шумов, однако в случае сложной структуры последних это затруднительно. Для более глубокого анализа шумов удобно рассмотреть спектральную плотность мощности флуктуаций фазы  $S_\varphi(f)$ . На рис.4 показана спектральная плотность мощности флуктуаций фазы, построенная по сериям данных с окном измерения счётчика 1 мс.

Аппроксимация данных для сигналов без компенсации в области частот 0.1 – 10 Гц степенной функцией дает наименьшую ошибку для показателя степени  $-2.3$ , т.е.  $S_\varphi(f) \propto f^{-2.3}$ , что свидетельствует о преобладании шумов, обусловленных турбулентностью воздуха. Отклонения от спектра Колмогорова, который имеет вид  $f^{-8/3}$ , неоднократно наблюдались в различных экспериментах (так, зависимость  $f^{-2.3}$  наблюдалась в работе [13] для передачи сигналов методом О-TWTFT по уличным открытым каналам). Формула вида (1) позволяет оценить структурную постоянную турбулентности  $C_n$  для исследуемого канала: считая, что движение воздуха, вызванное системой вентиляции в лаборатории, имеет скорость, которая приблизительно равна 0.1 м/с, получим  $C_n = 2 \times 10^{-13} \text{ м}^{-2/3}$ . В области частот 10–500 Гц зависимость становится более

пологой и приближается к  $f^{-1}$ . В области частот от 40 до 200 Гц наблюдаются резонансные пики, соответствующие, возможно, дрожаниям зеркал и качаниям оптических столов.

Спектральная плотность мощности для локального сигнала с компенсацией шумов практически постоянна в диапазонах 0.1 – 2 Гц, 8–40 Гц и 150 – 500 Гц, что говорит о преобладании белого шума фазы. Характер шума в области 3–8 Гц близок к белому шуму. Хорошо различимы резонансы на частотах около 2 Гц и в области 40–150 Гц. Спектр шума удаленного сигнала с активной компенсацией шумов существенно отличается от спектра шума локального сигнала. Во-первых, он гораздо больше по амплитуде, а во-вторых, имеет другой характер. В области частот 20–500 Гц наблюдаются его резонансы, а в области 0.1–20 Гц он близок по форме к спектру шума нестабилизированных сигналов. Возможная причина – наличие участков оптических путей, не являющихся общими для локального и удаленного сигналов, в частности большое (около 0.5 м) расстояние, которое излучение, достигшее удаленного пользователя, проходит от места отщепления до фотодиода (см. рис.1), и локальный интерферометр, формирующий локальный сигнал биений. Изоляция

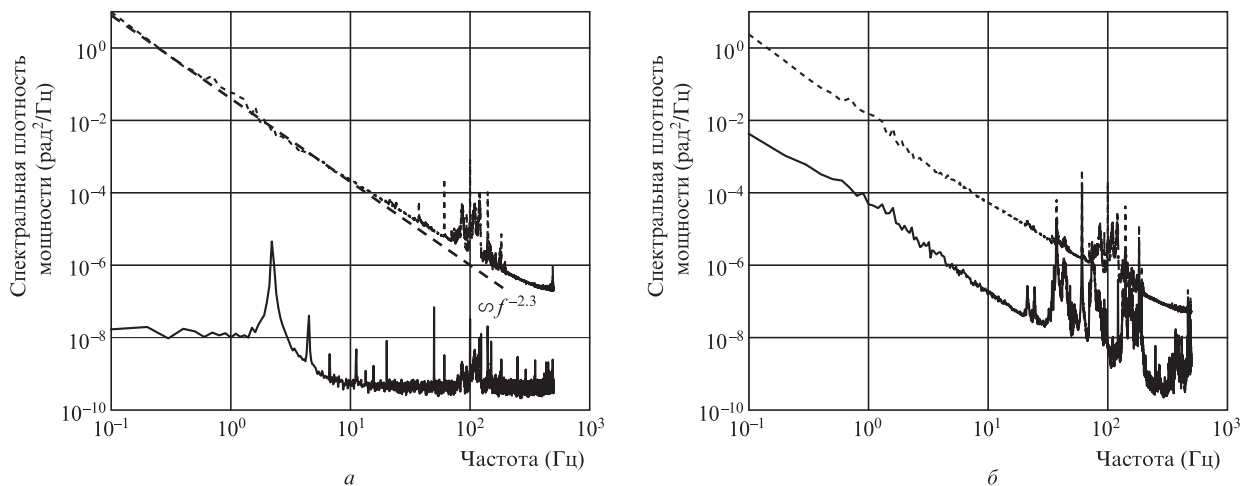


Рис.4. Спектральная плотность мощности флуктуаций фазы  $S_\varphi(f)$  локального (а) и удаленного (б) сигналов. Верхние пунктирные кривые соответствуют случаю без компенсации шумов, нижние сплошные – с компенсацией. Штриховая прямая на рис.4,а соответствует аппроксимации данных при низких частотах степенной зависимостью  $f^{-2.3}$ .

и термостабилизация области нахождения локального интерферометра должны уменьшить его влияние. По аналогичной причине колебания части оптического стола со стойкой, на которой закреплены кубик, отводящий часть излучения удаленного сигнала, и зеркало, отражающее пучок обратно (см. рис.1), поперек направления пучка, могут вносить вклад в нестабильность удаленного сигнала, т. к. пучок, формирующий локальный сигнал и, соответственно, сигнал ошибки в петле обратной связи, не отражается от плоскости кубика. Однако стоит отметить, что чувствительность к движениям зеркала вдоль пучка в данной схеме снижена. Шумы, вносимые зеркалом, детектируются в локальном сигнале и компенсируются петлей обратной связи, фактически записываясь в частоту передаваемого излучения. Сигнал, который получает удаленный пользователь, не испытывает отражения на этом зеркале, однако отражается от плоскости кубика, расположенной под углом  $45^\circ$ , и поэтому шумы, обусловленные движениями вдоль пучка, компенсируются. В дальнейшем планируется более подробное исследование этой особенности и улучшение характеристик удаленного сигнала.

В продолжение настоящей работы мы собираемся увеличить длину линии до 500 м и использовать беспилотный летательный аппарат с закрепленным на нем зеркалом в качестве модели движущегося приемника.

#### 4. Заключение

В работе представлены результаты по передаче сигнала частоты по открытому воздушному каналу длиной 5 м. Шумы, вносимые в сигнал каналом, определяются влиянием атмосферной турбулентности и имеют спектральную зависимость  $f^{-2.3}$ . Отклонения от теории Колмогорова могут объясняться несовершенством модели, которая предполагает выполнение гипотезы Тейлора и постоянство скорости движения воздуха [13] и поэтому не может учесть все возможные тепловые и механические явления в воздушных потоках. Система компенсации фазовых шумов позволяет снизить вклад линии в нестабильность и неточность передаваемого сигнала до уровня нескольких единиц  $10^{-19}$  после 5000 с усреднения, что гово-

рит о применимости канала для целей сличения транспортируемых стандартов частоты.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 19-72-10166).

1. Riehle F. *Nat. Photon.*, **11**, 25 (2017).
2. Lewandowski, W., Arias, E.F. *Metrologia*, **48**, 219 (2011).
3. Mehlstäubler T.E., Grosche G., Lisdat C., et al. *Rep. Progr. Phys.*, **81**, 064401 (2018).
4. Clivati C., Costanzo G. A., Frittelli M., et al. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, **62** (11), 1907 (2015).
5. Delva P., Lodewyck J., Bilicki S., et al. *Phys. Rev. Lett.*, **118**, 221102 (2017).
6. Wcisło P., Ablewski P., Beloy K., et al. *Sci. Adv.*, **4** (12), 1 (2018).
7. Oelker E., Hutson R.B., Kennedy C.J., et al. *Nat. Photon.*, **13**, 714 (2019).
8. Brewer S.M., Chen J.-S., Hankin A.M., et al. *Phys. Rev. Lett.*, **123**, 033201 (2019).
9. Fujieda M., Piester D., Gotoh T., et al. *Metrologia*, **51**, 253 (2014).
10. Droste S., Udem T., Holzwarth R., & Hänsch T.W. *Comptes Rendus Physique*, **16** (5), 524 (2015).
11. Zhang H., Wu G., Li H., et al. *IEEE Photon. J.*, **8** (5), 1 (2016).
12. Samain E., Exertier P., Courde C., et al. *Metrologia*, **52**, 423 (2015).
13. Sinclair L.C., Giorgetta F.R., Swann W.C., et al. *Phys. Rev. A*, **89**, 023805 (2014).
14. Bergeron H., Sinclair L.C., Swann W.C., et al. *Nat. Commun.*, **10**, 1819 (2019).
15. Gozzard D.R., Schediwy S.W., Stone B., et al. *Phys. Rev. Appl.*, **10**, 024046 (2018).
16. Swann W.C., Sinclair L.C., et al. *Appl. Opt.*, **56**, 9406 (2017).
17. Fried D.L. *Proc. IEEE*, **55**, 57 (1967).
18. Wright M.W., Morris J.F., Kovalik J.M., et al. *Opt. Express*, **23**, 33705 (2015).
19. Golovizin A., Fedorova E., Tregubov D., et al. *Nat. Commun.*, **10**, 1724 (2019).
20. Семериков И.А., Хабарова К.Ю., Заливако И.В. и др. *Кр. сообщ. физ. ФИАН*, № 11, 14 (2018) [*Bull. Lebedev Phys. Inst.*, (45), 337 (2018)].
21. Сутырин Д.В., Бердасов О.И., Антропов С.Ю. и др. *Квантовая электроника*, **49**, 199 (2019) [*Quantum Electron.*, **49**, 199 (2019)].
22. Kudryarov K.S., Vishnyakova G.A., Khabarova K.Yu., Kolachevsky N.N. *Laser Phys.*, **28**, 105103 (2018).
23. Williams P., Swann W.C., Newbury N.R. *J. Opt. Soc. Am. B*, **25** (8), 1284 (2008).
24. Хабарова К.Ю., Кудряров К.С., Вишнякова Г.А., Колачевский Н.Н. *Квантовая электроника*, **47**, 794 (2017) [*Quantum Electron.*, **47**, 794 (2017)].
25. Koller S.B., Grotti J., Vogt St., et al. *Phys. Rev. Lett.*, **118** (7), 073601 (2017).