

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 1.7×10^{-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 1.3×10^{-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

фронта, описываемое параметром Фрида [17], не позволяет увеличивать размер лазерного пучка, что необходимо для уменьшения расходимости на больших расстояниях. Компенсация искажений волнового фронта возможна при помощи адаптивной оптики [18]. Задача передачи высокоточных сигналов на подвижный объект все еще не решена.

Разработка стационарных и транспортируемых оптических стандартов частоты в России [19–21] позволяет говорить о необходимости создания как оптоволоконных, так и открытых линий передачи высокостабильных сигналов. В то время как передача по волоконным линиям была успешно реализована в лабораторных условиях [22], передача по открытым каналам еще не исследовалась. В настоящей работе нами описывается создание лабораторного канала длиной 5 м с системой активной компенсации фазовых шумов и исследуются достижимые относительные нестабильность и неточность частоты.

2. Экспериментальная установка

Схема эксперимента показана на рис.1. Для детектирования фазовых шумов, вносимых каналом, используется схема автогетеродина [22], в которой пучок излучения волоконного лазера Koheras ADJUSTIK на дли-

не волны 1542 нм проходит через акустооптический модулятор (АОМ), управляемый радиочастотным (РЧ) генератором Г1 на частоте 38.4 МГц. После двойного прохождения пучка (в прямом и обратном направлениях) формируется локальный (inloop) сигнал биений с опорным пучком на фотодиоде ФД1 на передающей стороне, который, таким образом, содержит информацию о шумах фазы. Мощность излучения после первого прохода АОМа составляет 13 мВт, мощность на фотодиоде вернувшегося излучения – 0.3 мВт, опорного – 1 мВт. Сигнал фотодиода смешивается на аналоговом фазовом детекторе (двойной балансный смеситель) с сигналом опорного РЧ генератора Г2 на частоте 76.8 МГц для формирования сигнала ошибки в петле обратной связи, который, в свою очередь, подается на пропорционально-интегральный усилитель (ПИУ) на основе программируемой логической интегральной схемы STEMlab Red Pitaya. Выходной сигнал с ПИУ поступает на частотно-модуляционный (ЧМ) вход РЧ генератора Г1, питающего АОМ, и таким образом компенсирует флуктуации фазы сигнала.

На принимающей стороне канала часть излучения отщепляется с помощью поляризационного светоделиителя (кубика) и является сигналом, доставленным до удаленного пользователя. Вторая часть излучения отражается зеркалом обратно для формирования локального сигнала

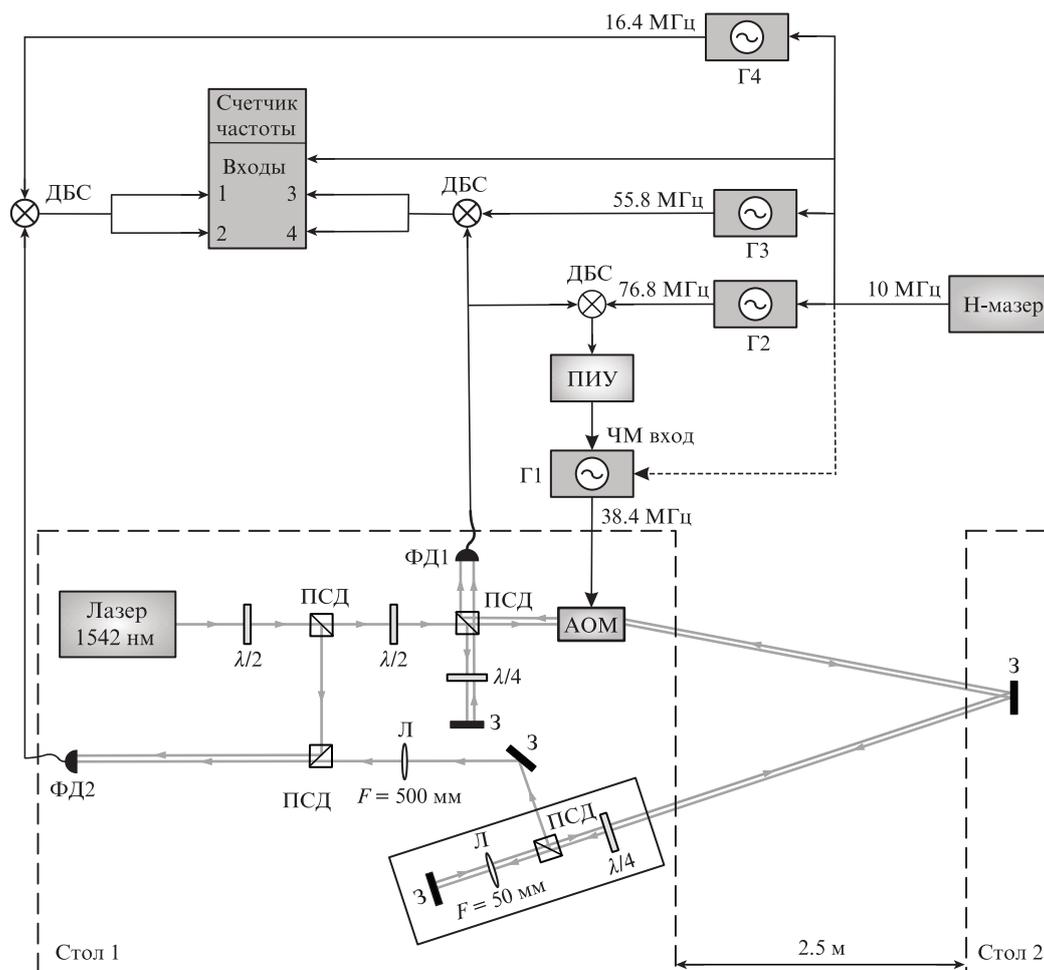


Рис.1. Схема установки:
 АОМ – акустооптический модулятор; ФД1, ФД2 – фотодиоды, измеряющие локальный и удаленный сигналы; ПИУ – пропорционально-интегральный усилитель; $\lambda/2$ и $\lambda/4$ – полуволновая и четвертьволновая фазовые пластинки; Г1–Г4 – радиочастотные (РЧ) генераторы; ЧМ – частотно-модуляционный вход РЧ генератора; Н-мазер – пассивный водородный мазер; З – зеркало; ПСД – поляризационный светоделиитель; Л – линза; ДБС – двойной балансный смеситель.

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 K + K 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 σ_y , где $y = \Delta\nu(t)/\nu_0$ – относительные флуктуации частоты, ν_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 1.8×10^{-15} до 2.2×10^{-16} на времени усреднения 1 с и с 1.6×10^{-18} до 1.7×10^{-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 5×10^{-18} до 1.25×10^{-19} . Эти характеристики достаточны для использования такого канала при сличении лучших современных транспортируемых стандартов частоты [25]. Для локального сигнала вклад в нестабильность снижается с 3.6×10^{-15} до 7.3×10^{-19} на времени 1 с и с 2.8×10^{-18} до 7.7×10^{-22} на времени 5000 с, вклад в неточность частоты – с 1.4 мГц до 50 нГц или с 7×10^{-18} до 2.5×10^{-22} соответственно. Характеристики локального сигнала значительно лучше характеристик удаленного, возможная причина этого обсуждается ниже.

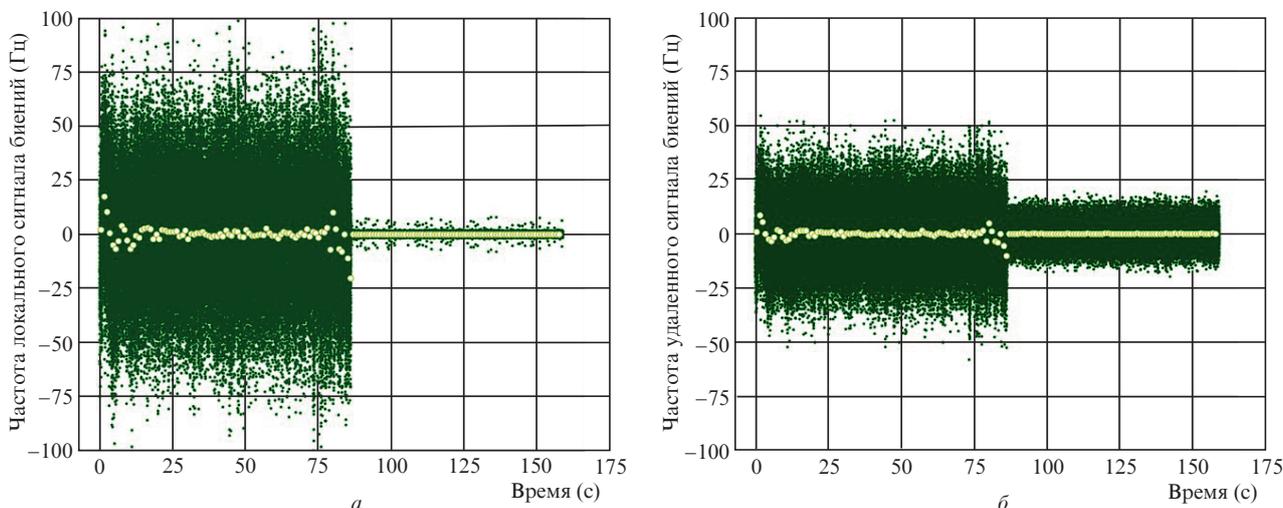


Рис.2. Зависимости частоты локального (а) и удаленного (б) сигналов биений от времени. В момент времени $t = 86$ с активировалась петля обратной связи. Поле из темных точек – данные со счетчика с окном измерения 1 мс, светлые точки – данные, полученные усреднением за 1 с. Для наглядности частоты локального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

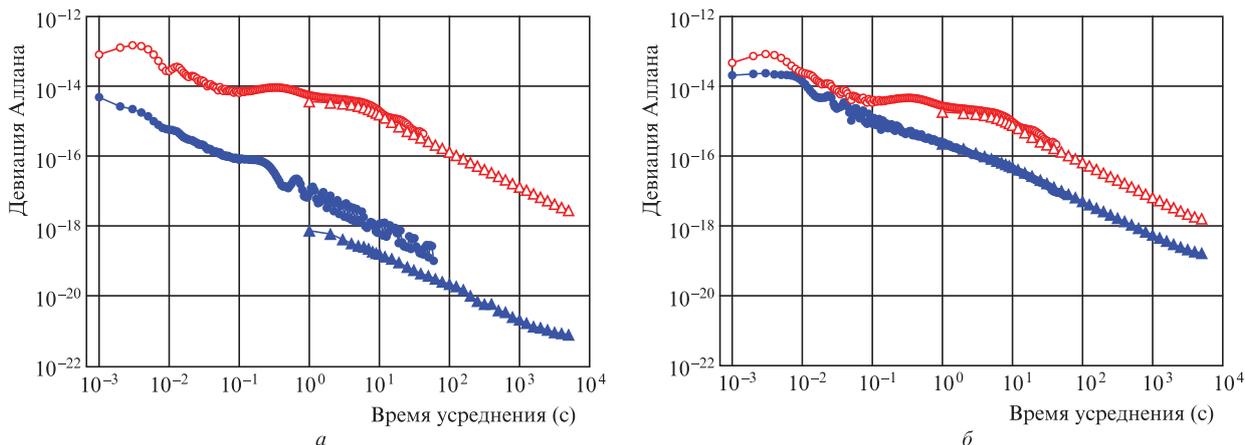


Рис.3. Девияция Аллана в зависимости от времени усреднения локального (а) и удаленного (б) сигналов без компенсации шумов (светлые точки) и с их компенсацией (темные точки). Кружки – данные, полученные с окном измерения счётчика 1 мс, треугольники – с окном 1 с. Точки соединены кривыми для наглядности.

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 приближенно 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

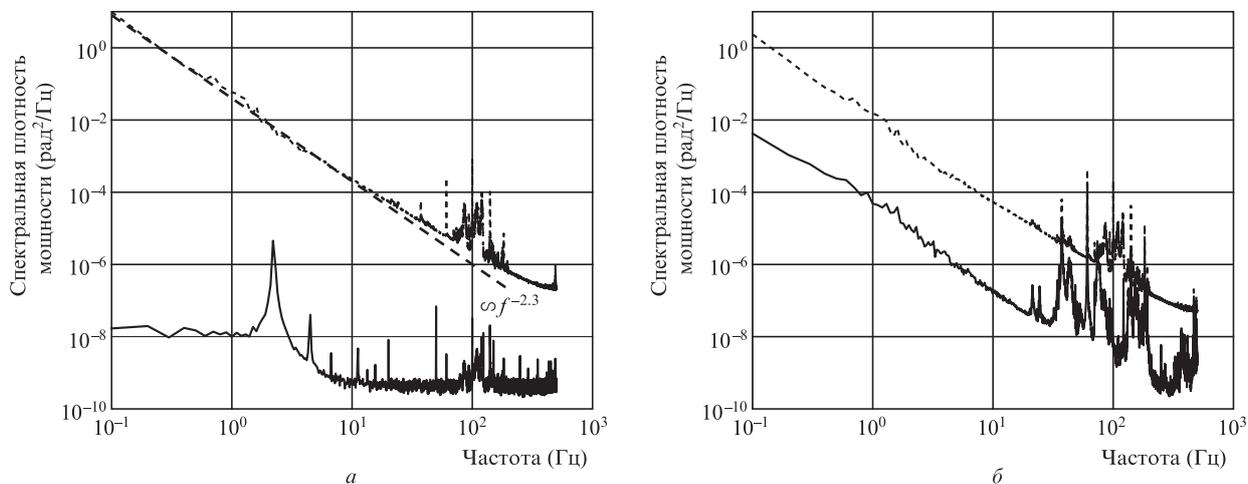


Рис.4. Спектральная плотность мощности флуктуаций фазы $S_\varphi(f)$ локального (а) и удаленного (б) сигналов. Верхние пунктирные кривые соответствуют случаю без компенсации шумов, нижние сплошные – с компенсацией. Штриховая прямая на рис.4,а соответствует аппроксимации данных при низких частотах степенной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