

## Совместная передача сигналов опорной частоты и шкалы времени по одному оптическому волокну

© А. С. Карпичев, П. В. Зиновьев, А. В. Вытнов

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

### Реферат

Волоконно-оптические линии передачи занимают все более прочные позиции в вопросах передачи как цифровых, так и аналоговых сигналов различного назначения. В обсерваториях, входящих в состав комплекса «Квазар-КВО», по волоконно-оптическим линиям передачи осуществляется передача гармонического сигнала опорной частоты, а также импульсных сигналов шкалы времени, используемых для синхронизации удаленного оборудования. В настоящее время эти сигналы передаются по независимым линиям связи, в то время как объединение этих систем в одну позволило бы повысить точность калибровки линии передачи.

В данной работе представлены экспериментальные результаты по совместной передаче сигналов опорной частоты и шкалы времени по одному оптическому волокну. Объединение оптических сигналов достигнуто при помощи CWDM-мультиплексирования (Coarse Wavelength Division Multiplexing, мультиплексирование с грубым разделением по длине волны), широко используемого в телекоммуникационном оборудовании. В ходе эксперимента на суточном интервале получены данные о поведении сигналов опорной частоты и шкалы времени в линии передачи: при помощи измерителя временных интервалов зафиксировано изменение задержки сигнала шкалы времени в ходе эксперимента; при помощи фазового компаратора измерена нестабильность сигнала опорной частоты, вносимая линией передачи.

Результаты, представленные в статье, позволяют сделать вывод, что предлагаемый способ передачи сигналов пригоден для использования в РСДБ-системах нового поколения. При этом появляется возможность измерять в реальном времени задержку распространения сигналов в линии передачи с точностью лучше 100 пс.

**Ключевые слова:** передача сигналов по оптическому волокну, передача опорной частоты, передача шкалы времени, синхронизация удаленного оборудования.

*Контакты для связи: Карпичев Андрей Сергеевич (labtf.ak@mail.ru).*

**Для цитирования:** Карпичев А. С., Зиновьев П. В., Вытнов А. В. Совместная передача сигналов опорной частоты и шкалы времени по одному оптическому волокну // Труды ИПА РАН. 2022. Вып. 60. С. 39–43.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.60.39-43>

## Time and Frequency Signal Transmission Over Single Optical Fiber

A. S. Karpichev, P. V. Zinovev, A. V. Vytnov

Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia

### Abstract

In recent years, fiber-optic transmission lines have taken an increasingly strong position in the transmission of both digital and analog signals for various purposes. In observatories of Quasar VLBI Network optical fibers are used for transmission of time and frequency signals from hydrogen masers to remote devices. Time and frequency signals use independent optical transmission lines. Merging time and frequency signals in single optical fiber allows to raise accuracy of line calibration.

The paper shows experimental results of such communication method that requires a single optical fiber to transmit both time and frequency signals. Combining optical signals is achieved by using telecommunication CWDM-multiplexer, widely used in telecommunication equipment. Cable delay change in time and frequency stability (Allan variance) was measured within a 24-hour experiment. Cable delay was measured with a help of time interval counter. Allan variance was measured with the help of frequency comparator.

The result reveals that combined time and frequency signals can be transmitted over a single optical fiber. Such transmission method can be used in modern VLBI radio telescopes. This makes it possible to measure the propagation delay of signals in the transmission line in real time with accuracy better than 100 ps.

**Keywords:** signal transmission over optical fiber, frequency transfer, time transfer, remote devices synchronization.

*Contacts: Andrey S. Karpichev (labtf.ak@mail.ru).*

**For citation:** Karpichev A. S., Zinovev P. V., Vytnov A. V. Time and frequency signal transmission over single optical fiber // Transactions of IAA RAS. 2022. Vol. 60. P. 39–43.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.60.39-43>

## Введение

Волоконно-оптические линии передачи (ВОЛП) занимают все более прочные позиции в вопросах передачи как цифровых, так и аналоговых сигналов различного назначения (Krehlik, 2015; Ebenhag, 2019). В обсерваториях, входящих в состав комплекса «Квазар-КВО» (Shuygina, 2019), по ВОЛП осуществляется передача как гармонических сигналов опорной частоты, так и импульсных сигналов шкалы времени (ШВ), используемых для синхронизации удаленного оборудования. В настоящее время сигналы опорной частоты и ШВ передаются по полностью независимым оптическим линиям связи.

При помощи фазового компаратора во время передачи гармонического сигнала опорной частоты от эталона к потребителям осуществляется непрерывное сравнение фазы эталонного сигнала с фазой сигнала, доставленного потребителям и вернувшегося обратно. Это позволяет в режиме реального времени контролировать изменение длины линии (задержки распространения сигнала) с течением времени. Но из-за фазовой неопределенности нельзя узнать абсолютную задержку в линии. А это необходимо, например, в задачах высокоточного сравнения удаленных на большие расстояния шкал времени методом РСДБ.

В случае же передачи сигнала метки времени (представляющего из себя импульсный сигнал с частотой равной одному импульсу в секунду (1PPS1 — pulse per second) можно осуществлять непрерывное измерение времени распространения сигнала до потребителей и обратно при помощи измерителя временных интервалов. Однако существующий метод передачи сигнала 1PPS при помощи оптических SFP-трансиверов (Small Form-factor Pluggable) имеет низкую точность измерения задержки в линии, поскольку обладает значительной систематической погрешностью (порядка 10–20 нс).

Объединение этих двух независимых систем в одну несет ряд преимуществ: позволяет уменьшить количество необходимых линий связи, а также делает возможным непрерывный контроль линии двумя различными способами. Измерение задержки распространения сигнала шкалы времени позволяет получить грубую оценку длины линии, а контроль фазы сигнала опорной частоты дает информацию об изменениях длины линии на уровне нескольких десятков пикосекунд. Также можно в несколько раз уменьшить систематическую погрешность при измерении задержки распространения сигнала 1PPS, если использовать при передаче прямое преобразование электрического сигнала в оптический и обратно (Царук, 2019).

## Экспериментальная установка

Для исследования характеристик сигналов, передаваемых совместно по одному оптическому волокну, в ИПА РАН была собрана экспериментальная установка (рис. 1). Внешний вид установки представлен на рис. 2.

Источником эталонных сигналов служит стандарт частоты и времени Ч1-1007 производства АО «Время-Ч».

Передача сигналов шкалы времени осуществляется на длине волны лазерного излучения 1310 нм. В качестве передатчика и приемника используются ВОЛП синхроимпульсов «ВОЛП-01» (лазерный диод и фотодиод) производства ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», национальной академии наук Беларуси (Царук, 2019). В линии передачи «ВОЛП-01» используется прямое преобразование сигналов шкалы времени

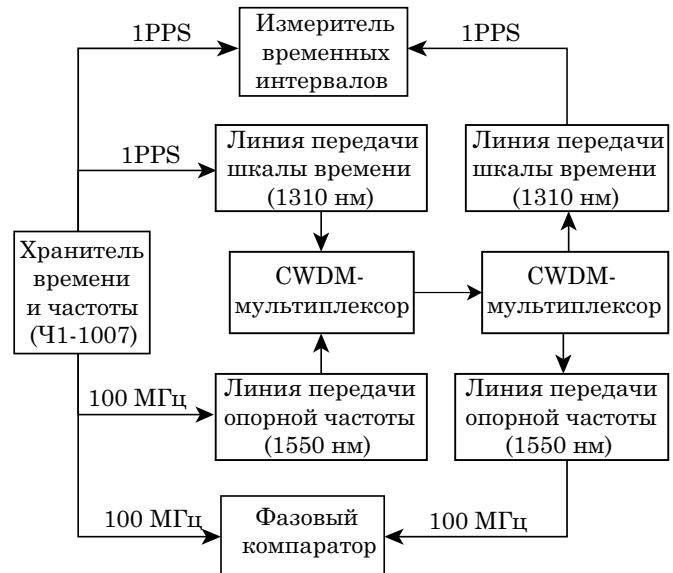


Рис. 1. Экспериментальная установка. Структурная схема



Рис. 2. Экспериментальная установка. Внешний вид

в лазерное излучение и обратно, в отличие от способа передачи сигналов с использованием SFP-трансиверов, где метка времени передается в виде кода. Это позволяет снизить погрешность при измерении задержки распространения сигнала в линии до уровня десятков-сотен пикосекунд (вместо десятков наносекунд в случае применения SFP-трансиверов).

Передача сигналов опорной частоты осуществляется на длине волны лазерного излучения 1550 нм. Для передачи сигнала используются передающий оптический модуль ДМПО155-21 и приемный оптический модуль ДФДМШ70-06 производства НПФ «Дилаз» (Царук, 2015).

Приемные и передающие модули линий передачи соединены оптическим волокном длиной ~1 м. Объединение сигналов опорной частоты и шкалы времени происходит за счет спектрального уплотнения посредством CWDM-мультиплексора.

## Результаты

В ходе эксперимента на суточном интервале были получены данные о поведении сигналов опорной частоты и шкалы времени в линии передачи.

Измерителем временных интервалов Keysight 53230A фиксировалось время прохождения сигнала 1PPS через тракт экспериментальной установки, получаемое путем усреднения значений на интервале наблюдения 100 с. Результаты измерений, полученные за 24 ч, представлены на рис. 3 (для удобства график отображает изменение задержки относительно первого значения, а не абсолютную величину).

Также, при помощи фазового компаратора «VCH-315» было измерено изменение фазы сигнала опорной частоты в ходе эксперимента (рис. 4).

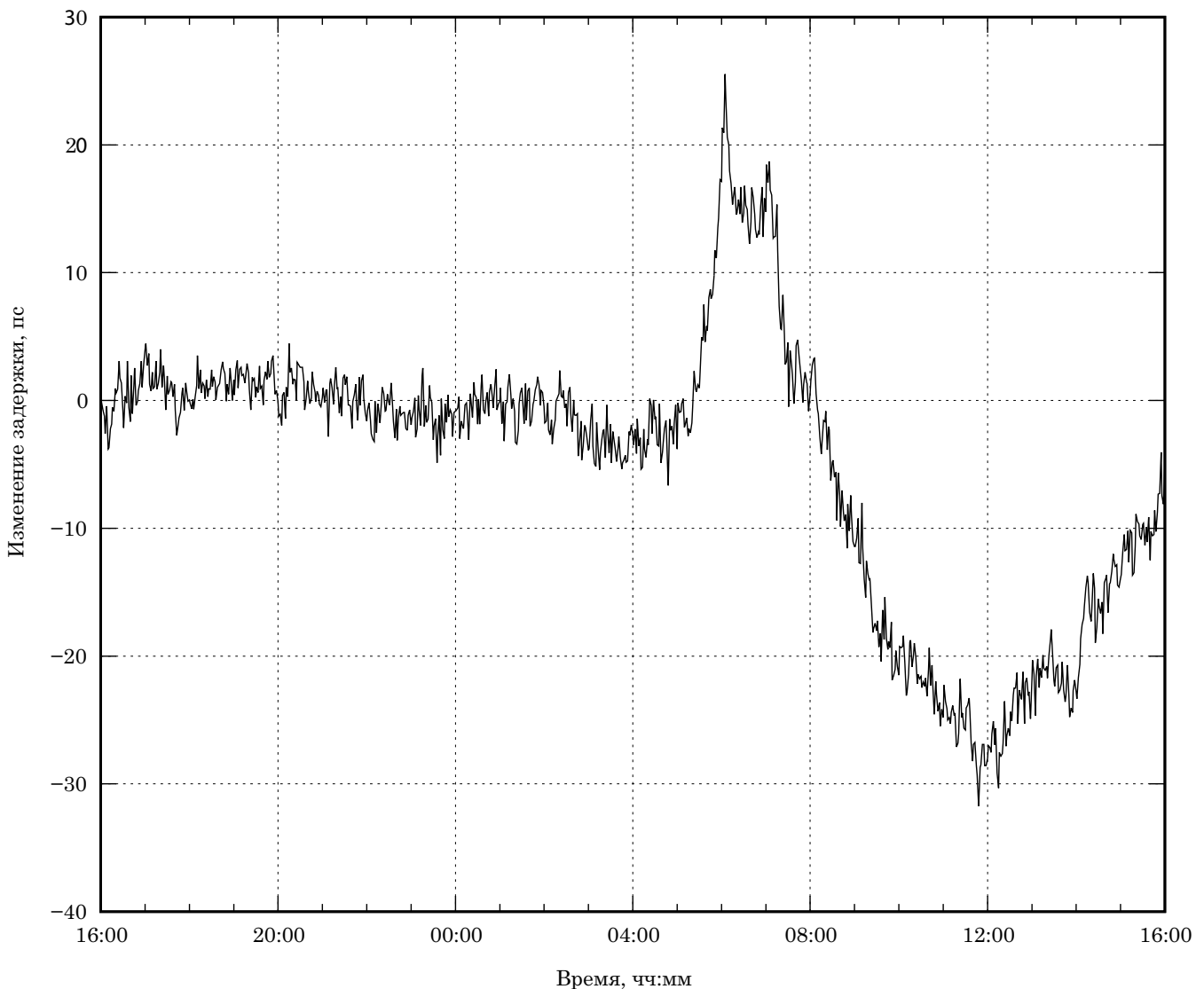


Рис. 3. Изменение задержки распространения сигнала шкалы времени (1PPS) в ходе 24-часового эксперимента

Под изменением понимается разность фаз сигнала на выходе линии передачи и сигнала на входе.

Вносимая нестабильность (среднее квадратическое относительное двухвыборочное отклонение) линии передачи отражена в таблице. Также в таблице приведены данные о собственной нестабильности компаратора, измеренной по методикам поверки прибора.

Существенное изменение фазы опорного сигнала во второй половине эксперимента предположительно связано с изменением температуры

окружающего воздуха в помещении и помехами по сети электропитания. Это косвенно подтверждается изменением фазы контрольного сигнала на фазовом компараторе, которое может быть вызвано нагревом аппаратуры. Оценка влияния температуры на задержку передаваемых сигналов выходит за рамки данного эксперимента. Поэтому подтвердить или опровергнуть эту гипотезу могут лишь дальнейшие эксперименты, в которых будет в том числе оцениваться и влияние температуры.

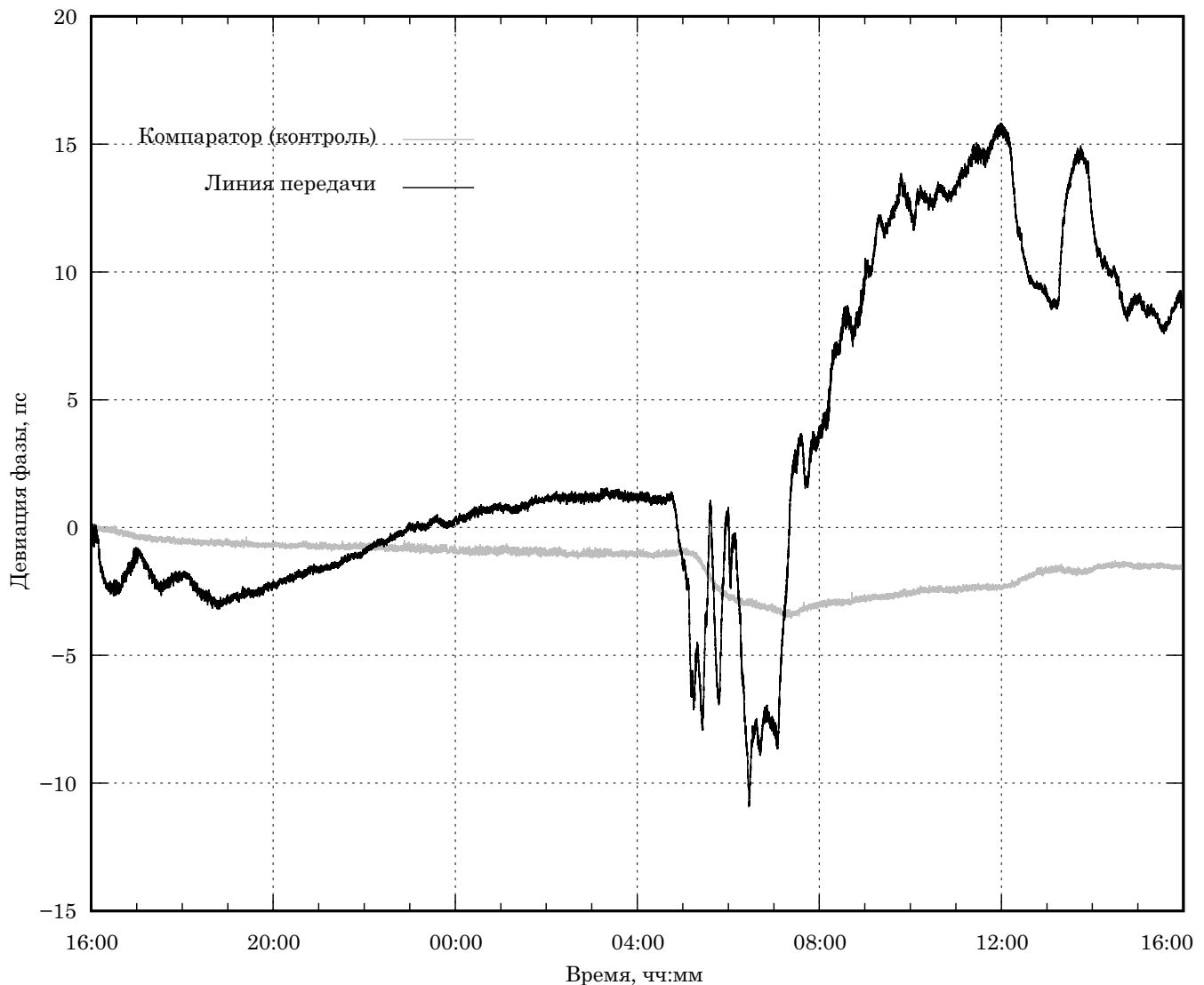


Рис. 4. Девиация фазы опорного сигнала в ходе 24-часового эксперимента

Вносимая нестабильность частоты линии передачи при разных температурных условиях

Интервал измерения	Собственная нестабильность компаратора	Вносимая нестабильность линии передачи
1 с	$7 \cdot 10^{-14}$	$7 \cdot 10^{-14}$
10 с	$8.2 \cdot 10^{-15}$	$1.4 \cdot 10^{-14}$
100 с	$9.1 \cdot 10^{-16}$	$2.6 \cdot 10^{-15}$
1000 с	$1.3 \cdot 10^{-16}$	$1.8 \cdot 10^{-15}$
1 ч	$1.2 \cdot 10^{-16}$	$1.2 \cdot 10^{-15}$

### Заключение

Как видно из полученных экспериментальных данных, при помощи измерителя временных интервалов возможно осуществлять прямое измерение задержки распространения сигнала ШВ с точностью лучше 100 пс. Такой уровень точности делает систему передачи пригодной для использования в задачах сравнения удаленных шкал времени и частот.

Более точно контролировать линию передачи можно при помощи измерения фазы сигнала опорной частоты, распространяющейся по той же самой оптической линии передачи. Это позволяет в случае необходимости повысить точность измерений задержки линии передач.

При этом вносимая нестабильность при передаче сигнала опорной частоты не превышает значения  $1.2 \cdot 10^{-15}$  на часовом интервале измерения.

Полученные результаты подтверждают, что предложенный способ может быть использован для передачи сигналов шкалы времени и опорной частоты в существующих, а также перспективных РСДБ-системах, требуемая нестабильность частоты которых на интервале времени измерения 1000 с, не должна превышать  $4 \cdot 10^{-15}$ .

Неизвестной остается величина влияния окружающей температуры на характеристики аппаратуры. Для ее оценки планируется провести ряд дополнительных экспериментов.

### Литература

*Krehlik P., Buczek L., Kołodziej J., et al.* Fibre-optic delivery of time and frequency to VLBI station // *A&A*. 2017. Vol. 603, A48. doi: 10.1051/0004-6361/201730615.

*Ebenhag S.-C., Hedekvist P. O., Rieck C., et al.* Evaluation of fiber optic time and frequency distribution system in a coherent communication network. 2019 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium and European Frequency and Time Forum (EFTF/IFC). 2019. P. 1–5. doi: 10.1109/FCS.2019.8856039.

*Shuygina N., Ivanov D., Ipatov A.* Russian VLBI network “Quasar”: Current status and outlook // *Geodesy and Geodynamics*. Vol. 10, Issue 2. 2019. P. 150–156. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2018.09.008>.

*Царук А. А., Карпичев А. С., Вытнов А. В. и др.* Калибровка тракта передачи шкал времени радиотелескопа для реализации РСДБ-сличений // *Труды ИПА РАН*. 2019. Вып. 48. С. 92–99.

*Царук А. А., Вытнов А. В., Иванов Д. В.* Методы обеспечения опорной частотой аппаратуры радиотелескопа // *Труды ИПА РАН*. 2015. Вып. 32. С. 71–84.