

## Передача высокостабильного сигнала времени по волоконно-оптической линии связи

В. В. Григорьев, В. Е. Кравцов, А. К. Митюрёв, К. Б. Савкин, С. В. Тихомиров

Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва, Россия, e-mail: f3@vniiofi.ru

*Представлены результаты исследований установки для передачи высокостабильного сигнала времени 1 PPS от стандарта времени и частоты водородного по волоконно-оптической линии связи на расстояние 150 км с использованием активной электронной компенсации временных задержек. Погрешность (среднее квадратическое отклонение) передачи сигнала времени составляет не более 80 пс на суточном интервале усреднения. Установка позволяет обеспечить синхронизацию шкал времени удалённых друг от друга стандартов времени и частоты, входящих в состав эталонов единиц времени и частоты высших разрядов.*

**Ключевые слова:** стандарт времени и частоты, передача, волоконно-оптическая линия связи, временная задержка, компенсация, синхронизация.

Волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) представляют собой идеальный инструмент для передачи высокостабильных сигналов частоты и времени, а также для дистанционной синхронизации шкал времени удалённых радиочастотных стандартов, в том числе водородных. Основными преимуществами использования оптического волокна по сравнению с другими каналами передачи – атмосферными, космическими и основанными на применении перевозимых квантовых часов – являются высокая точность передачи и возможность обеспечения непрерывной синхронизации шкал времени удалённых потребителей. Передача высокостабильного сигнала частоты по ВОЛС описана в работе [1], продолжением которой является настоящая статья.

Передача по ВОЛС высокостабильного сигнала времени 1 PPS, синтезируемого радиочастотными стандартами, изучается практически во всех развитых и быстро развивающихся странах: Китае, Японии, Чехии, Швеции, Польше, США, Франции, России и др. Однако до сих пор не выработан единый подход к реализации схемы передачи. Анализ различных схемных решений по реализации высокоточных волоконно-оптических каналов передачи сигнала времени [2–8] показал, что, по сути, решения различаются видом применяемых систем компенсации временных задержек, вызванных распространением высокостабильного сигнала по ВОЛС. При этом, как правило, для компенсации временных задержек, вносимых каналом передачи, используются схемы активной электронной компенсации.

В Лаборатории метрологии малоинтенсивного лазерного излучения и волоконно-оптических систем ВНИИОФИ разработана установка для передачи высокостабильного сигнала времени 1 PPS по ВОЛС на расстояние не менее 150 км. В установке реализована активная электронная компенсация временных задержек передаваемого сигнала с помощью измерителя временных интервалов, а также внешняя частотная модуляция оптического излучения сигналом частоты генератора временного сдвига, синхронизованного по времени с водородным стандартом времени и частоты.

Схема реализации метода передачи высокостабильного сигнала времени по ВОЛС длиной 150 км приведена на рис. 1. На стороне источника И излучение высокостабильного узкополос-

ного DWDM-лазера 1550 нм Л1 поступает в блок электрооптического модулятора ЭОМ1. В этом блоке интенсивность излучения модулируется сигналом 1 PPS, формируемым генератором временного сдвига ГВС. При этом генератор ГВС синхронизован по времени с водородным стандартом времени и частоты СВЧ1, выполняющим функцию исходного источника высокостабильного сигнала времени. Оптимальная рабочая точка модулятора ЭОМ1 задаётся контроллером КРТ1 посредством постоянного контроля и минимизации искажений тестового сигнала, подмешанного в рабочую частоту модулятора.

С выхода модулятора ЭОМ1 излучение с помощью мультиплексора М1 поступает в ВОЛС длиной 150 км. На выходе ВОЛС на стороне потребителя П излучение усиливается с помощью EDFA-усилителя У1 и через демультиплексор Д1 подаётся на вход фотоприёмного устройства ФПУ1. Выделенный радиочастотный сигнал поступает на вход удалённого стандарта времени и частоты СВЧ2. При этом к исходному сигналу времени, полученному потребителем, добавляется временная задержка, которая пропорциональна длине канала ВОЛС. Для компенсации указанной временной задержки в схеме присутствует петля обратной связи. С использованием петли обратной связи часть радиочастотного сигнала с выхода устройства ФПУ1 на стороне потребителя П ответвляется в блок электрооптического модулятора ЭОМ2, управляемого рабочей точкой модулятора КРТ2. В указанном блоке модулируется лазерное излучение DWDM-лазера Л2. Частота излучения лазера Л2 сдвинута на один канал сетки DWDM (100 ГГц) относительно частоты DWDM-лазера Л1 на стороне источника И. Малое (0,5 нм) расстояние между каналами позволяет уменьшить влияние хроматической дисперсии и повысить точность передачи сигнала времени за счёт снижения перекрёстных помех и нелинейных оптических эффектов в оптическом волокне.

Далее модулированное лазерное излучение через мультиплексор М2 поступает обратно в ВОЛС, на выходе которого также усиливается EDFA-усилителем У2, демультиплексируется демультиплексором Д2 и поступает на вход фотоприёмного устройства ФПУ2 на стороне источника И. На выходе устройства ФПУ2 радиочастотный сигнал имеет удвоенную временную задержку вследствие прохождения сигнала по

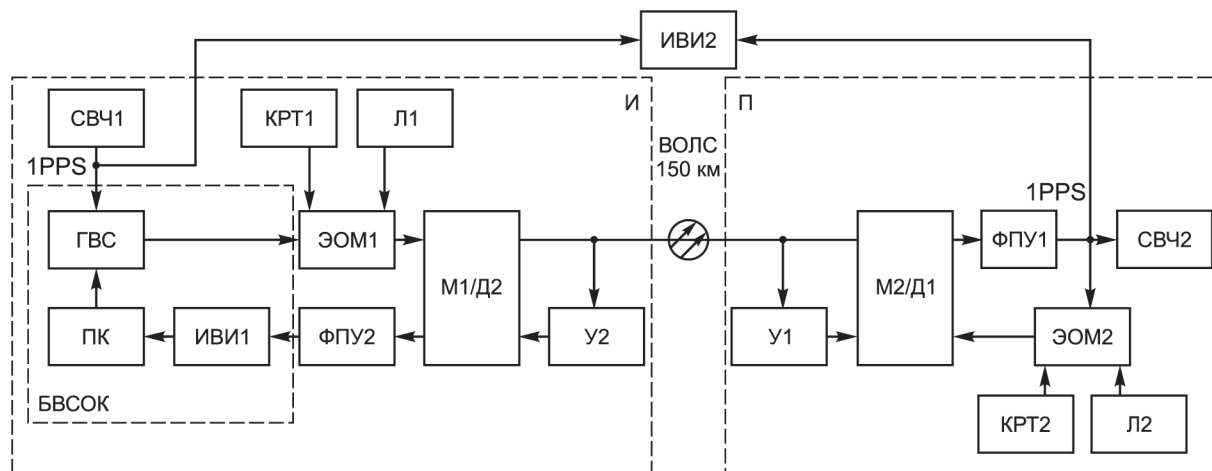


Рис. 1. Схема реализации метода передачи высокостабильного сигнала времени по волоконно-оптической линии связи длиной 150 км: И – источник; П – потребитель; БВСОК – блок выработки сигнала ошибки и компенсации; СВЧ1, СВЧ2 – стандарты времени и частоты; ГВС – генератор временного сдвига; ЭОМ1, ЭОМ2 – электрооптические модуляторы; КРТ1, КРТ2 – контроллеры рабочих точек модуляторов; Л1, Л2 – DWDM-лазеры; М/Д – мультиплексоры/демультиплексоры; У1, У2 – усилители; ФПУ1, ФПУ2 – фотоприёмные устройства; ИВИ1, ИВИ2 – измерители временных интервалов; ПК – персональный компьютер

ВОЛС от источника к потребителю и обратно. Затем этот сигнал направляется в блок выработки сигнала ошибки и компенсации БВСОК, в котором с помощью измерителя временных интервалов ИВИ1 измеряется значение удвоенной временной задержки. С помощью персонального компьютера ПК рассчитывается искомая временная задержка и вырабатывается соответствующее управляющее воздействие на генератор ГВС. Указанный генератор формирует отрицательный временной сдвиг сигнала, компенсирующий при его передаче по ВОЛС.

Алгоритм компенсации и передачи высокостабильного сигнала времени можно описать следующими формулами. Пусть  $t_i$  – некомпенсированная временная задержка прохождения сигнала от источника к потребителю по ВОЛС, где  $i$  – номер цикла передачи сигнала времени. Тогда общее время прохождения сигнала от источника к потребителю и обратно  $T_i$  (включающее время компенсации  $\Delta t_i$  (время, на которое надо сдвинуть исходный сигнал времени, чтобы компенсировать плавающую временную задержку сигнала в ВОЛС)), определяется как

$$T_i = 2t_i + \Delta t_{i-1}.$$

Условие компенсации временной задержки в канале передачи имеет вид

$$C = t_i + \Delta t_i,$$

где  $C$  – некоторая константа, зависящая от внутренних задержек схемы компенсации, в идеале должна быть равна нулю.

Тогда время компенсации можно вычислить по соотношению

$$\Delta t_i = C + (\Delta t_{i-1} - T_i) / 2.$$

Генератор временных сдвигов может не только задерживать секундный импульс относительно исходного, но и генерировать

импульс, опережающий исходный. Поэтому время компенсации  $\Delta t_i$  может принимать отрицательные значения без потери работоспособности схемы компенсации.

В качестве источников оптического излучения применены перестраиваемые с шагом 50 ГГц лазеры С-поддиапазона. Используемые многоступенчатые измерители временных интервалов позволяют измерять временные интервалы между любыми импульсами в последовательности со средним квадратическим отклонением не более 4 пс. В качестве генератора временных сдвигов применялся генератор сдвига фазы и частоты с разрешением по сдвигу сигнала времени не более 0,15 фс, а источником высокостабильного сигнала времени 1 PPS служил стандарт времени и частоты водородный с приписанной характеристикой относительной нестабильности сигнала частоты не более  $5 \cdot 10^{-16}$  на суточном интервале усреднения.

Результаты экспериментальных исследований по передаче высокостабильного сигнала времени по ВОЛС длиной 150 км оценивались с использованием измерителя ИВИ2. Выполнены измерения времени задержки между сигналом времени от исходного стандарта времени и частоты СВЧ1 на стороне источника и сигналом, снятым с выхода фотоприёмного устройства ФПУ1 на стороне потребителя. Результаты представлены на рис. 2 в виде погрешности (среднего квадратического отклонения) передачи сигнала времени по ВОЛС на расстояние 150 км. На суточном интервале  $\tau$  усреднения получена погрешность менее 80 пс.

**Заключение.** Разработана и опробована установка для передачи высокостабильного сигнала времени 1 PPS по ВОЛС на расстояние 150 км. Проведенные исследования показали, что достигнутой погрешности передачи сигнала времени (не более 80 пс) достаточно для обеспечения дистанционной синхронизации шкал времени удалённых радиочастотных стандартов времени и частоты, входящих в состав эталонов времени и частоты высших разрядов.

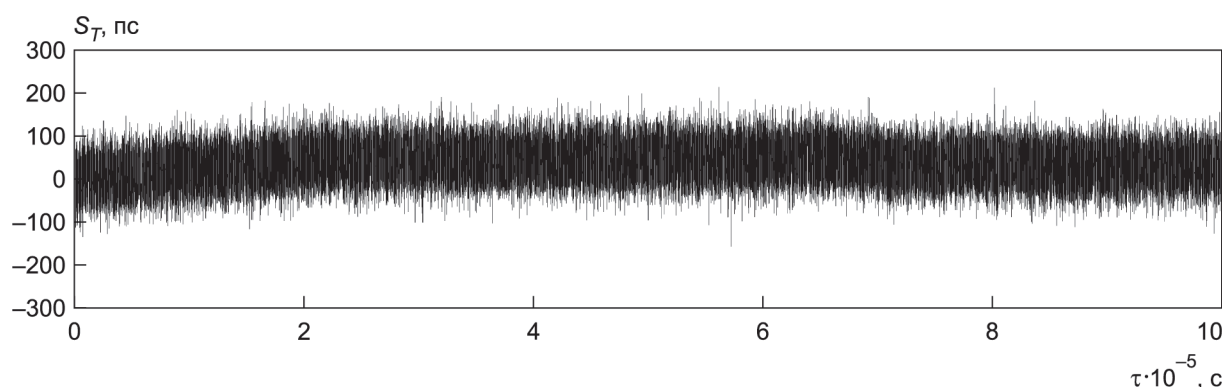


Рис. 2. Погрешность  $S_T$  (среднее квадратическое отклонение) передачи сигнала времени по ВОЛС на расстояние 150 км на суточном интервале  $\tau$  усреднения

Результаты исследований могут быть востребованы для обеспечения следующих процессов: синхронизации средств измерительной техники, в том числе, в составе глобальных навигационных спутниковых систем и различных испытательных полигонов; тактовой сетевой синхронизации систем связи и передачи информации; получения высокостабильных сигналов в научных и учебных применениях.

Работа выполнена с применением оборудования Центра коллективного пользования высокоточных измерительных технологий в области фотоники, созданного на базе ВНИИОФИ и поддержанного Минобрнауки России в рамках выполнения соглашения № 14.595.21.0003 от 28.08.2017 г. (уникальный идентификатор RFMEFI59517X0003).

#### Литература

1. Григорьев В. В., Кравцов В. Е., Митюрёв А. К., Савкин К. Б., Тихомиров С. В. Передача высокостабильных сигналов частоты по волоконно-оптической линии связи на расстояние 150 км // Измерительная техника. 2018. № 7. С. 37–40.
2. Wang B., Gao C., Chen W. L., Miao J., Zhu X., Yu Bai, Jing Zhang, Yanying Feng, Li T. C., Wang L. J. Precise and continuous time and frequency synchronisation at the  $5 \cdot 10^{-19}$  accuracy level // Sci.

Rep. 2012. No. 2. P. 556–560. DOI:10.1038/srep00556.

3. Krehlik P., Sliwczynski L., Buczek L., Lipinski M. Fiber-optic joint time and frequency transfer with active stabilization of propagation delay // IEEE Trans. Meas. 2012. V. 61. No. 10. P. 2845–2851.
4. Sliwczynski L., Krehlik P., Czubla A., Buczek L., Lipinski M. Dissemination of time and RF frequency via a stabilized fibre optic link over a distance of 420 km // Metrologia. 2013. V. 50. P. 133–145.
5. Kihara M., Imaoka A. SDH-based time and frequency transfer system // Proc. 9<sup>th</sup> EFTF, Besancon, France, 1995. P. 317–322.
6. Ebenhag S. C., Jaldenhag K., Jarlemark P., Hedekvist P. O., Emardson R., Lothberg P. Time transfer using an asynchronous computer network: results from a 500 km baseline experiment // Proc. 39<sup>th</sup> Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting, Long Beach, California, USA, 2007. P. 477–488.
7. Smotlacha, V. and Kuna, A. and Mache, W. Time Transfer In Optical Network // Proc. 42<sup>th</sup> Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting, Reston, Virginia, 2010. P. 427–436.
8. Иванов А. В., Моховиков Н. В., Каган С. Н., Малимон А. Н., Пестерев С. В., Пальчиков В. Г., Галышев А. А. Сличения территориально удаленных эталонов времени и частоты с применением волоконно-оптических линий связи // Труды ИПА РАН. 2012. Вып. 23. С. 131–135.

Дата принятия: 20.07.2018.

## Transmission of highly stable time signal over optical fiber communication line

V. V. Grigoriev, V. E. Kravtsov, A. K. Mityurev, K. B. Savkin, S. V. Tikhomirov

All-Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements, Moscow, Russia, e-mail: f3@vniiofi.ru

The research results of device for the transmission of highly stable time signal from hydrogen maser over 150 km optical fiber communication line using the active electronic compensation of time delay are presented. The signal transmission error (standard deviation) is 80 ps on the daily averaging interval. The device allows you to synchronize the time scales of remote from each other oscillators included in the primary and secondary standards of units of time and frequency.

**Key words:** hydrogen maser, transmission, optical fiber communication line, time delay, compensation, synchronization