

Передача сигнала опорной частоты на РСДБ-радиотелескоп по оптоволоконной линии

**© А. А. Царук, А. С. Карпичев, П. В. Зиновьев,
А. В. Вытнов, Д. В. Иванов**

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

В статье представлены результаты работы системы передачи сигналов опорной частоты на радиотелескоп РТ-13 за более чем годовой период эксплуатации и результаты эксперимента по использованию оптоволоконных линий для обеспечения опорной частотой аппаратуры радиотелескопа РТ-32. Показана зависимость фазы опорного сигнала от внешних воздействий, таких как переброс антенны и изменение температуры. Разработан принцип передачи сигналов эталонных частот по оптоволоконным линиям, учитывающий изменение фазы при переносе от хранителя времени и частоты до каждого из устройств, установленных на радиотелескопе.

Ключевые слова: оптическое волокно, нестабильность частоты, радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами, сигналы опорных частот.

Введение

Прогресс в области средств РСДБ-наблюдений, позволяющий повысить оперативность и улучшить точность определения параметров вращения Земли [1], выдвигает новые требования к аппаратуре, обеспечивающей частотно-временную синхронизацию устройств радиотелескопа. Одно из таких требований — повышение точности передачи фазы опорного сигнала от эталона времени и частоты до устройств, расположенных непосредственно на антенне радиотелескопа. Перспективным методом для передачи эталонных частот является использование оптоволоконных линий (ОВЛ).

Применение ОВЛ для передачи опорной частоты на РТ-13

Отличительной особенностью двухэлементного радиоинтерферометра ИПА РАН на базе антенн диаметром 13.2 м является то, что и приёмная аппаратура, и аппаратура преобразования и регистрации сигналов находится непосредственно на радиотелескопах. Созданный радиоинтерферометр применяется для серий коротких наблюдений длительностью 20–60 секунд, что накладывает требование минимизации нестабильности частоты опорного сигнала на малых временах усреднения. При разработке системы частотно-временной синхронизации радиотелескопа РТ-13 применен имеющийся опыт в области передачи сигналов опорной частоты по ОВЛ [2]. Более чем годовой интервал эксплуатации системы передачи сигналов опорной частоты на РТ-13 позволил оценить вносимую ОВЛ нестабильность опорной частоты на уровне 7×10^{-14} и 4.5×10^{-15} при временах усреднения 1 и 100 секунд соответственно. Это заметно меньше нестабильности, вносимой линией передачи с использованием радиочастотного кабеля (рис.1).

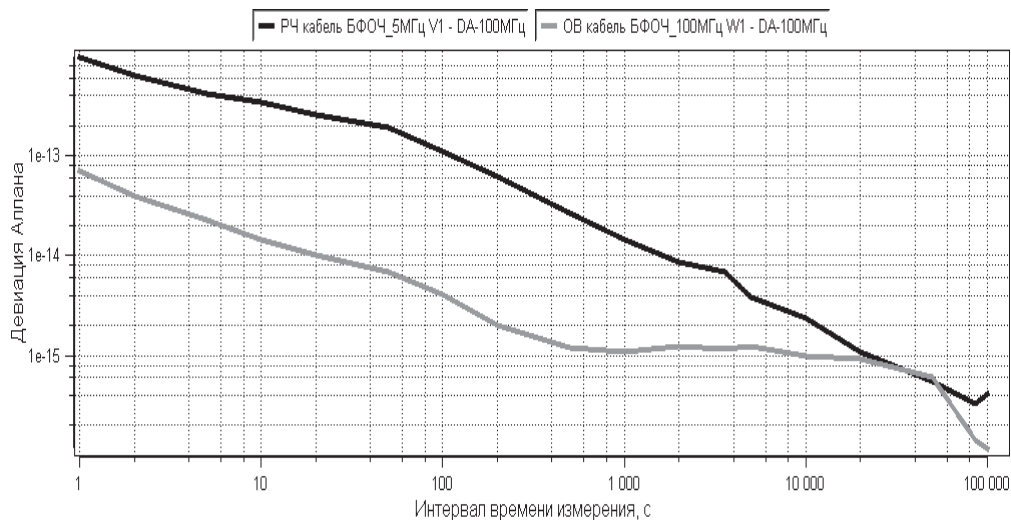


Рис. 1. Нестабильность частоты опорного сигнала обсерватории «Зеленчукская», вносимая: ОВЛ (серая линия) и радиочастотным кабелем (черная линия)

Эксперимент по передаче опорной частоты по ОВЛ на РТ-32

На основе опыта эксплуатации системы передачи опорной частоты по ОВЛ на радиотелескопах РТ-13 создан макет для решения задачи контроля электрической длины линии передачи опорной частоты на

радиотелескоп РТ-32 [3]. Применение ОВЛ для передачи опорной частоты на радиотелескоп РТ-32 предполагает установку наземного оптического блока, синхронизированного от сигнала опорной частоты 5 МГц, и оптического блока в надзеркальной кабине антенны. Сигнал, переданный по ОВЛ, преобразуется в антенной части в радиосигнал частотой 100 МГц, разветвляется, снова преобразуется в оптический сигнал и передаётся по той же ОВЛ в обратном направлении. Для решения задачи контроля электрической длины в линии передачи опорной частоты на радиотелескоп измеряется относительное изменение задержки сигнала при его прохождении в прямом и обратном направлении.

На рис. 2а приведено относительное изменение задержки опорного сигнала в оптическом кабеле длиной 10 м, полученное при калибровке макета в лабораторных условиях. Результаты эксперимента по передаче опорной частоты на радиотелескоп РТ-32 по ОВЛ представлены на рис. 2б. Долговременные изменения задержки сигнала вызваны изменением температуры окружающей среды, а кратковременные — перебросами антенны.

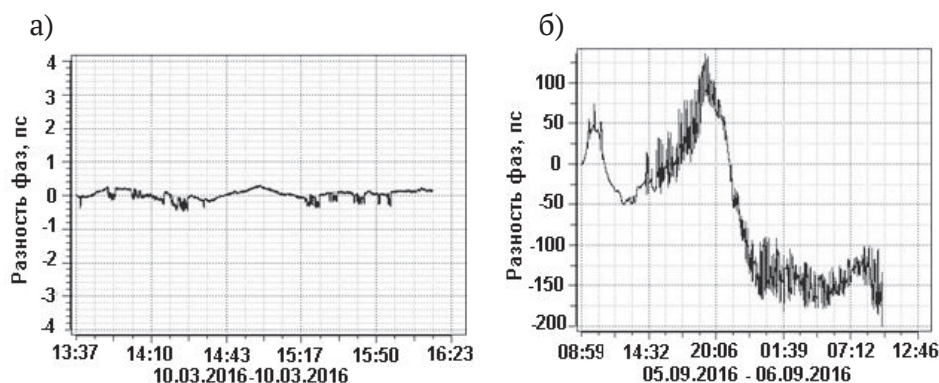


Рис. 2. Изменение задержки сигнала в оптическом кабеле:
 а) калибровка макета, б) изменение фазы в линии передачи опорной частоты обсерватории «Светлое» во время сеанса IVS EUR143

Проведённые эксперименты показали, что применение описанного метода позволит оценивать изменения электрической длины линии передачи опорной частоты, равной 5 МГц, до радиотелескопа с точностью порядка 1 пс и определять изменения задержки, вызванные как изменением температуры, так и движением антенны.

Передача сигнала по ОВЛ на двух длинах волн

При передаче по ОВЛ сильное влияние на фазу сигнала опорной частоты оказывает изменение температуры. Стандартные оптические волокна имеют температурный коэффициент задержки α_z , равный 38 пс/(км·К). В случае РТ-32 основное температурное изменение фазы происходит в магистральном кабеле передачи опорной частоты, находящемся на открытой части угломестной кабельной петли. В случае же РТ-13 наибольшее влияние оказывает изменение температуры внутри угломестной кабины радиотелескопа, где передача осуществляется по внутриобъектовому оптическому шнуру с α_z , равному 130 пс/(км·К). Магистральный оптоволоконный кабель для передачи сигналов на РТ-13 проложен на метровой глубине, где нет существенного изменения температуры, поскольку тепловая волна ослабляется с ростом глубины экспоненциально.

Для компенсации изменения фазы в оптоволоконных кабелях передачи опорной частоты от хранителя времени и частоты до радиотелескопа возможно применение методов с электронной или оптоэлектрической стабилизацией фазы [3]. Однако при синхронизации нескольких устройств внутри угломестной кабины радиотелескопа, таких как широкополосная система преобразования сигналов (ШСПС) и генератор пикосекундных импульсов (ГПИ) РТ-13, находящихся в разных тепловых условиях, может возникнуть неучтённая разность фаз между ними, что приведёт к снижению точности системы фазовой калибровки радиотелескопа. Для исключения влияния температурной неравномерности предлагается к реализации схема передачи сигналов опорной частоты на длинах волн 1550 нм и 1310 нм, используемая для уплотнения каналов в телекоммуникации. Для передачи сигнала опорной частоты в два пространственно-разнесённых места по одному волокну используются два однооконных циркулятора на длинах волн 1310 нм и 1550 нм, объединённых через широкополосный модуль оптического уплотнения Wavelength Division Multiplexing (WDM)-фильтр.

Антенный оптический блок на длине волны 1310 нм устанавливается в блок синхронизатора и позволяет учесть задержку передачи сигнала опорной частоты в ШСПС и в синхронизатор на фазовом компараторе. Антенный оптический блок на длине волны 1550 нм устанавливается внутри приемной системы радиотелескопа и позволяет учесть задержку передачи сигнала опорной частоты в гетеродины и ГПИ на фазовом компараторе. Разность учтённых задержек представ-

ляет собой изменение задержки опорного сигнала между ШСПС и ГПИ, которая позволит скомпенсировать изменение принятого радиоастрономического сигнала, происходящее в приемно-преобразующем тракте, вызванное изменением кабельных задержек при передаче опорной частоты.

На рис. 3 представлен макет линии передачи на двух длинах волн. В качестве прибора, регистрирующего изменение фазы на выходе антенных и наземных оптических блоков, использовался фазовый компаратор.

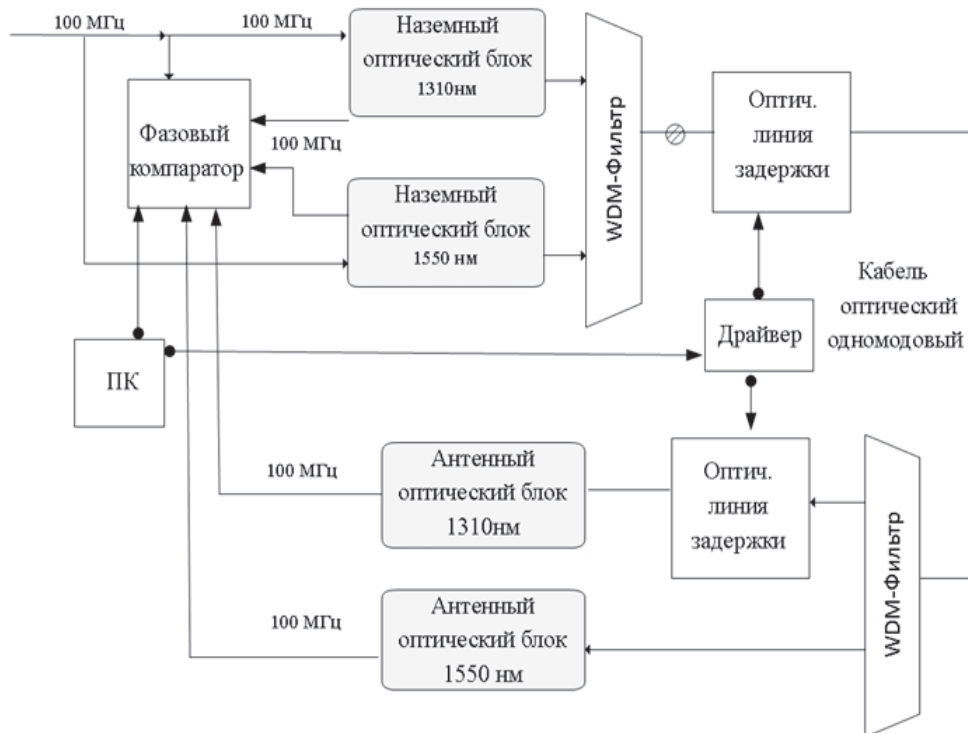


Рис. 3. Линия передачи опорной частоты на РСДБ-радиотелескоп по оптоволоконной линии на двух длинах волн

Сигнал опорной частоты передаётся на опорный вход фазового компаратора и на две линии передачи по ОВЛ с длинами волн 1310 и 1550 нм, соединёнными через WDM-фильтр.

Сигналы 100 МГц с выходов антенной части с длинами волн 1310 и 1550 нм подаются на входы 1 и 3 фазового компаратора, на входы 2 и 4 фазового компаратора подаются сигналы с наземных частей с теми же длинами волн (рис. 3).

Регистрируемые на фазовом компараторе сигналы представляют собой изменение задержки в линии передачи. Для проверки работоспособности предложенного метода используется линия задержки, управляемая специализированным драйвером. В зависимости от напряжения, приложенного к линии задержки, изменяется физическая длина линии передачи, а значит и задержка сигнала в линии. При использовании линии задержки, включенной на участке ОВЛ, где происходит совместная передача сигналов на длинах волн 1310 и 1550 нм, могут быть отслежены изменения фазы в магистральном кабеле передачи опорной частоты. Результаты данного эксперимента приведены на рис. 4.

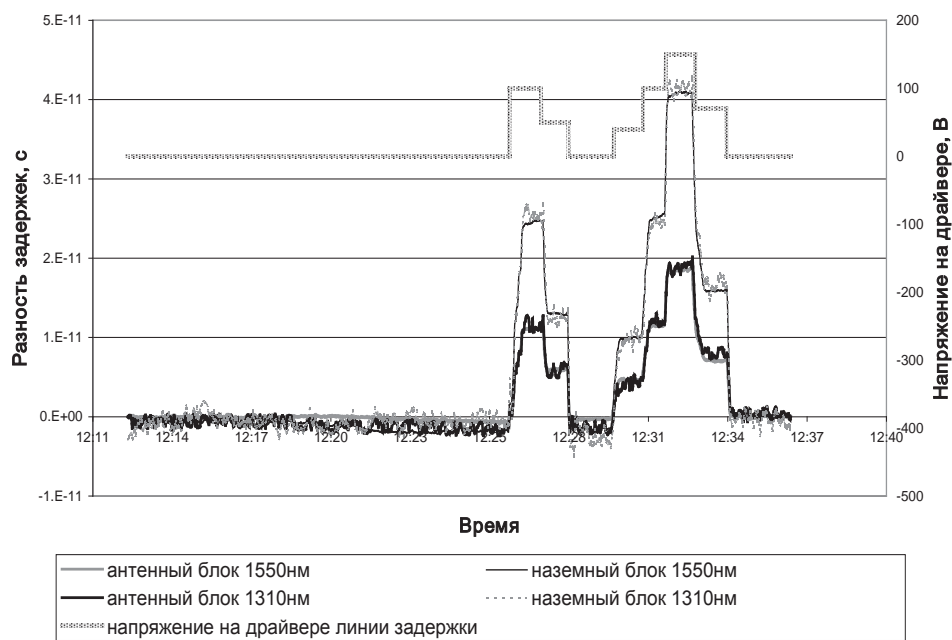


Рис. 4. Изменения задержки на выходе антенных и наземных блоков

Изменение длины линии задержки, включенной в линию передачи на длине волны 1310 нм, будет описывать температурные изменения фазы опорного сигнала внутри угломестной кабины радиотелескопа РТ-13. Изменение фазы между сигналом, переданным в антенную часть на длине волны 1310 нм, и сигналом, переданным на длине волны 1550 нм (ШСПС и ГПИ), определяется как разность задержек между наземной частью на длине волны 1310 нм и наземной частью на длине волны 1550 нм, делённое на 2. На рис. 5 представлены разности задер-

жек между антенной частью на длине волны 1310 нм и антенной частью на длине волны 1550 нм, полученное из прямых измерений и рассчитанное описанным методом из измерений наземных частей на длинах волн 1310 нм и 1550 нм.

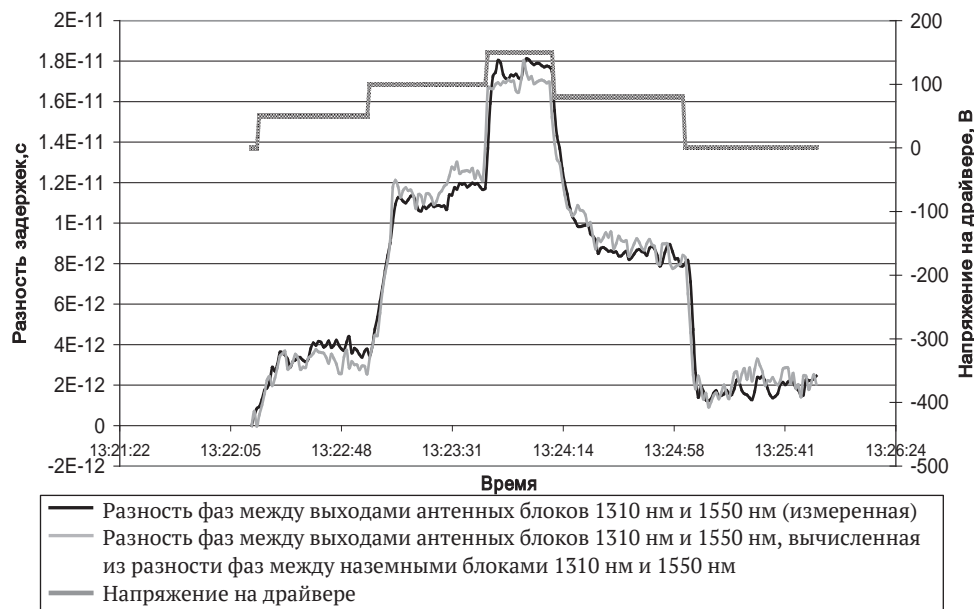


Рис. 5. Изменение разности задержек между антенной частью 1310 нм и антенной частью 1550 нм: измеренное и вычисленное из задержек на выходе наземных блоков

Заключение

Применение ОВЛ для передачи сигналов опорной частоты в РСДБ позволит не только уменьшить вклад линии передачи в суммарную нестабильность эталонных сигналов, но и позволит учитывать изменение фазы опорного сигнала, как в магистральной линии передачи, так и непосредственно внутри угломестной кабины радиотелескопа на пикосекундном уровне точности.

Литература

1. *Ипатов А. В.* Радиоинтерферометр нового поколения для фундаментальных и прикладных исследований // *Успехи физических наук.* — М.: 2013. — Т. 183, № 5. — С. 769–777.
2. *Царук А. А., Вытнов А. В., Иванов Д. В.* Методы передачи высокостабильных опорных сигналов по оптоволоконной линии для синхронизации

радиоастрономической аппаратуры // Вестник НИЯУ МИФИ, 2016. — Том 5, № 3. — С. 100–107.

3. *Витнов А. В., Иванов Д. В., Карпичев А. С.* Средства контроля фазовой стабильности в радиоинтерферометрических экспериментах // Приборы и техника эксперимента, 2013. — № 2. — С. 54–57.

Reference Frequency Signal Transfer to a VLBI Telescope Using an Optical Fiber Line

A. Tsaruk, A. Karpichev, P. Zinovev, A. Vytnov, D. Ivanov

The article gives the results of a reference frequency signal transfer system operating with the RT-13 and the RT-32 telescopes via optical fiber lines. It shows that the phase of the transmitted reference signal depends on external influences, such as antenna rotation and ambient temperature changes. Also, we have worked out the principles for transferring reference frequencies to each of the devices located in different places of the radio telescope, with the possibility of measuring the phase changes in the transmission lines with 1ps accuracy.

Keywords: VLBI, stability of the reference frequency, optical fiber.