

## **Применение волоконно-оптических линий передачи в радиоастрономических приемных устройствах**

**© Ю. В. Векшин, А. А. Царук, А. В. Вытнов, М. Б. Зотов,  
А. С. Карпичев, Е. Ю. Хвостов**

**ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия**

В статье рассмотрено применение волоконно-оптической линии для передачи СВЧ-сигнала между блоками радиоастрономического приемника. Отмечены перспективы использования волоконно-оптических линий передачи для приемных устройств радиотелескопов с малыми антеннами (с диаметром зеркала порядка единицы метров).

Представлены результаты измерений следующих характеристик радиоастрономического приемника X-диапазона с волоконно-оптической линией передачи: амплитудно-частотной характеристики, групповой задержки, динамического диапазона, амплитудной стабильности и стабильности задержки. Предложен и испытан метод калибровки изменения задержки в волоконно-оптической линии передачи СВЧ-сигнала по передаваемому сигналу опорной частоты на другой оптической несущей. Результаты сопоставлены с измерением задержки с помощью векторного анализатора цепей и с помощью измерения сигнала пикосекундного импульса на широкополосной системе преобразования сигналов.

**Ключевые слова:** волоконно-оптическая линия передачи, радиоастрономический приемник, радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами, групповая задержка, фазовая калибровка.

**<https://doi.org/10.32876/AplAstron.50.16-22>**

### **Введение**

Волоконно-оптическая линия передачи (ВОЛП) радиосигналов осуществляет преобразование радиосигнала в модулированный оптический сигнал, передачу последнего по волоконному кабелю и обратное преобразование оптического сигнала в радиосигнал на выходе фотодетектора. ВОЛП радиосигналов имеют ряд преимуществ по сравнению с линиями на основе коаксиальных кабелей: незначительная зависимость коэффициента передачи от длины линии, сверхширокополосность, возможность мультиплексирования радиосигналов, фазовая стабильность, помехоустойчивость, гальваническая развязка, механическая гибкость оптического кабеля, малые габариты и вес [1]. Примеры использования ВОЛП в радиоастрономических системах можно найти в [2].

Необходимость использования ВОЛП-сигналов в радиоастрономических приемных устройствах возникает, например, при невозможности размещения всего приемного оборудования в первичном фокусе радиотелескопов с малыми антеннами [3]. Кроме того, для обеспечения высокой фазовой стабильности линии передачи опорных сигналов до гетеродинов приемных устройств и си-

стемы преобразования сигналов необходима минимизация ее длины. Таким образом, устройства, требующие синхронизации по опорному сигналу, можно расположить в непосредственной близости к стандарту частоты (наземной части радиотелескопа), а передачу сигнала между СВЧ-блоками приемных устройств осуществлять по ВОЛП. Пример исследования оптоволоконной линии для передачи широкополосных СВЧ-сигналов приведен в [4].

## Схема подключения

В данной работе исследуется возможность использования ВОЛП между входным криогенным приемным блоком и блоком преобразования частоты радиоастрономического приемника. Апробирована схема, позволяющая разместить устройства с преобразованием частоты в наземной части радиотелескопа (рис. 1). В реализованной схеме помимо передачи радиоастрономического СВЧ-сигнала ВОЛП используется также для передачи сигнала опорной частоты 5 МГц для синхронизации генератора пикосекундных импульсов (применяемого для фазовой калибровки тракта радиотелескопа). В используемой оптической линии передача СВЧ-сигнала осуществляется на длине волны 1310 нм, а сигнала опорной частоты — на длине волны 1550 нм. Сигналы вводятся в линию посредством оптического мультиплексирования. Задержка в ВОЛП измеряется фазовым компаратором путем сравнения фаз поданного и возвращенного по той же линии сигнала опорной частоты [5].

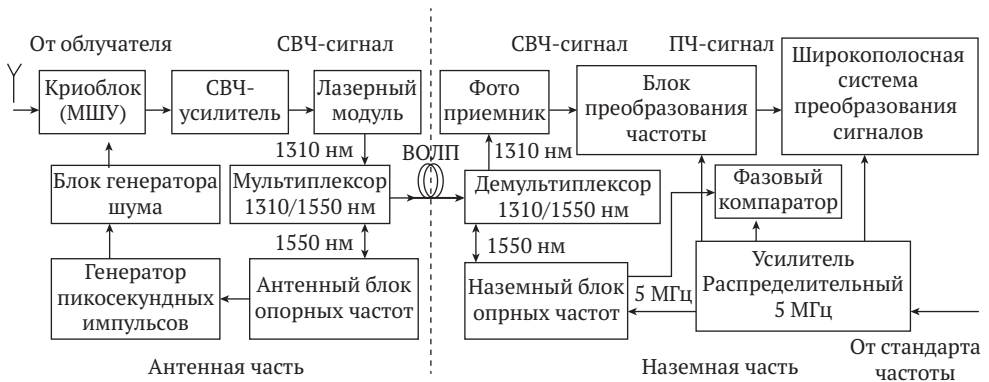


Рис. 1. Схема подключения ВОЛП в радиоастрономическом приемнике

## Результаты измерений

Исследовались характеристики радиоастрономического приемника X-диапазона (8.18–9.08 ГГц) комплекса «Квazar-КВО» [6] с соединением блоков коаксиальным кабелем или посредством ВОЛП. Длина исследуемой линии (20 м) выбрана исходя из планов ее использования для передачи сигнала в компактном радиотелескопе. Коэффициент передачи используемой ВОЛП составляет 35 дБ, а коэффициент шума — 50 дБ. При применении ВОЛП в радиоастрономическом приемнике вносимая шумовая температура на входе приемника должна составлять не более 1 К. Для достижения этого условия,

с учетом коэффициента передачи малошумящего усилителя в криоблоке 30 дБ, перед используемой линией необходим СВЧ-усилитель с коэффициентом передачи 46 дБ. Результаты измерений коэффициента передачи приемника (полоса ПЧ 100–1000 МГц) с ВОЛП и без нее представлены на рис. 2.

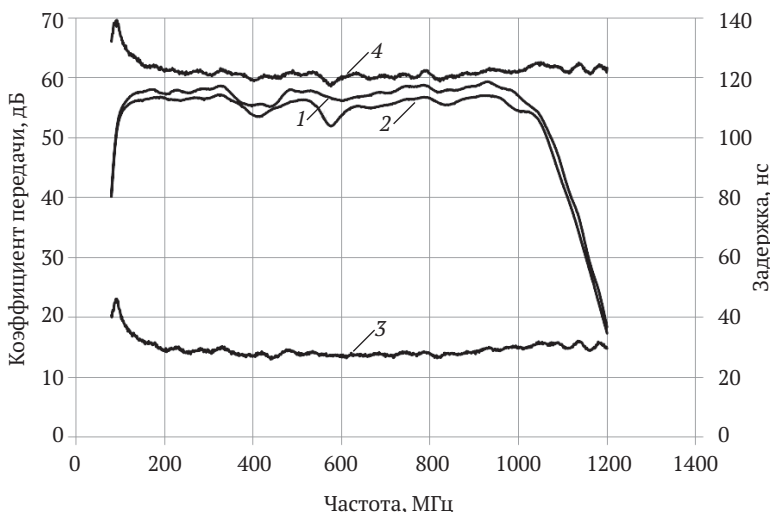


Рис 2. Коэффициент передачи и задержка приемника с ВОЛП:  
 1 — коэффициент передачи приемника, 2 — коэффициент передачи приемника с ВОЛП, 3 — задержка приемника, 4 — задержка приемника с ВОЛП

Неравномерность коэффициента передачи приемника составила 2 дБ, с линией — 3 дБ. Задержка сигнала в приемнике измерена с помощью опции измерения задержки преобразователей частоты со встроенным гетеродином векторного анализатора цепей ZVA 40 [7] и равна 27 нс. Задержка в линии длиной 20 м с учетом коэффициента преломления волокна составляет 94 нс, а вместе с приемником — 121 нс. Среднеквадратичное отклонение фазо-частотной характеристики линии от линейной в полосе 8.18–9.08 ГГц составляет  $4^\circ$ , что приемлемо для радиоинтерферометрии (снижение отношения сигнал/шум составит 0.25 %). Динамический диапазон приемника от уровня собственных шумов в полосе 1 ГГц до точки 1 дБ компрессии по выходу 9 дБм составил 45 дБ. Точка 1 дБ компрессии во входе ВОЛП составляет 13 дБм и сама по себе не ограничивает динамический диапазон приемника. Но за счет необходимости использования дополнительного СВЧ-усилителя для снижения шумов линии, динамический диапазон приемника с ВОЛП снижается до 39 дБ.

Результаты измерений стабильности выходной мощности и задержки приемника с ВОЛП и без нее с применением дисперсии Аллана по методике [8] представлены на рис. 3. Из рис. 3 видно, что использование имеющегося образца ВОЛП ухудшает амплитудную стабильность коэффициента передачи приемника с  $10^{-4}$  до  $4 \cdot 10^{-4}$  на интервалах более 10 с (графики 1 и 2). Это, возможно, связано с нестабильностью лазера, фотодетектора, волокна или качеством сборки ВОЛП и требует дальнейших исследований с другими компонентами ВОЛП. Стабильность задержки приемника (3) и приемника с ВОЛП (4) совпа-

дает на малых временных интервалах. На интервалах более 100 с проявляется температурная нестабильность ВОЛП (5). Изменение задержки за 1 час составило не более 2 пс. У используемого волокна температурный коэффициент равен 0.13 пс/град/м, что для линии 20 м дает коэффициент 2.6 пс/град. При необходимости улучшения температурной стабильности следует использовать волокно с температурным коэффициентом 0.04 пс/град/м.

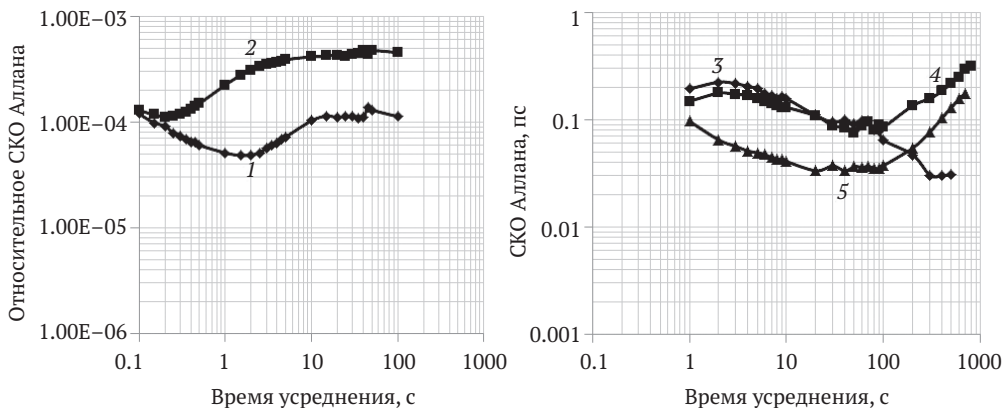


Рис 3. Стабильность приемника с ВОЛП:

1 — выходной мощности приемника, 2 — выходной мощности приемника с ВОЛП, 3 — задержки приемника, 4 — задержки приемника с ВОЛП, 5 — задержки ВОЛП

Для проверки правильности измерения задержки в ВОЛП по возвращенному сигналу опорной частоты 5 МГц на фазовом компараторе в линию был установлен пьезоэлектрический сканер, позволяющий изменять задержку в оптической линии на 20 пс [9]. Изменение задержки, получаемое по сигналу опорной частоты, сопоставлено с изменением задержки, измеряемым по векторному анализатору цепей R&S по схеме рис. 4.

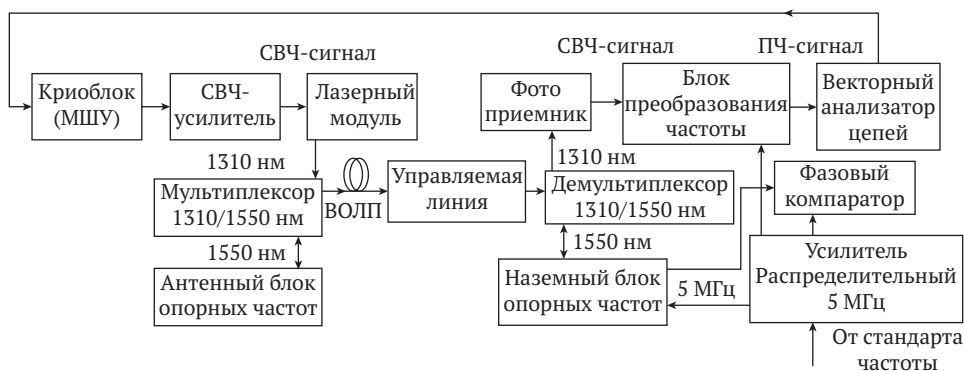


Рис 4. Схема измерения изменения задержки в ВОЛП

На рис. 5а представлены графики изменения задержки в оптической линии при измерении этими двумя методами и их разность, среднее квадратическое отклонение (СКО) разности составило 0.4 пс. Также проведено сравнение изменения задержки по возвращенному сигналу опорной частоты на фазовом

компараторе и с помощью измерения фазы гармоники пикосекундного импульса на широкополосной системе преобразования сигналов по схеме рис. 1. Результаты представлены на рис. 5б, СКО разности составило 0.8 пс.

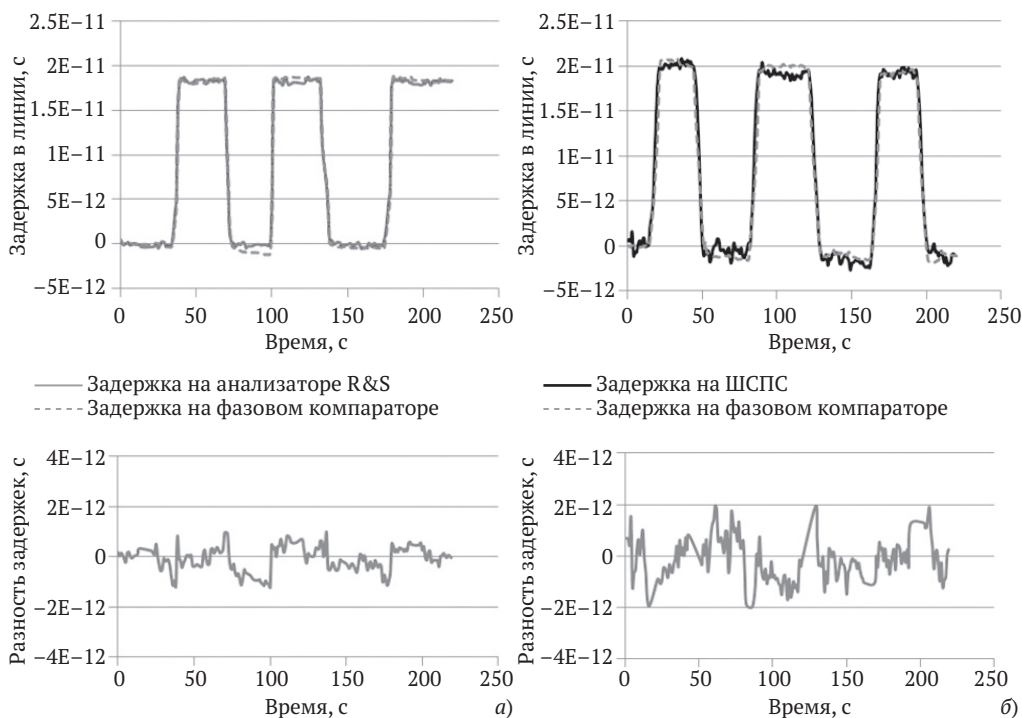


Рис 5. Результаты измерений изменения задержки в ВОЛП:

а — по сигналу опорной частоты и анализатору цепей;

б — по сигналу опорной частоты и фазы гармоники сигнала фазовой калибровки на широкополосной системе преобразования сигналов

Таким образом, измерение задержки в ВОЛП с помощью сигнала опорной частоты дает достаточную точность, СКО разности задержки относительно других методов составляет менее 1 пс. При этом вся измерительная аппаратура располагается в наземной части радиотелескопа. Точность измерения задержки данным методом с помощью фазового компаратора может быть повышена при использовании частоты опорного сигнала 100 МГц вместо 5 МГц.

## Заключение

Передача радиоастрономического СВЧ-сигнала с помощью ВОЛП возможна и целесообразна в случае разнесения блоков радиоастрономического приемника, что актуально для радиотелескопов с малыми антеннами. ВОЛП не ухудшает основные параметры приемника, за исключением амплитудной стабильности коэффициента передачи, которая важна для радиометрии. Проведение экспериментов с другими образцами ВОЛП позволит выбрать необходимую конфигурацию оборудования для улучшения данного параметра.

тра. Использование ВОЛП при решении задач измерения задержки в РСДБ не вносит дополнительной нестабильности задержки на малых временных интервалах, температурная нестабильность задержки в ВОЛП на длительных интервалах более 100 с может быть откалибрована или уменьшена выбором соответствующего волокна. Метод калибровки изменения задержки СВЧ-сигнала в ВОЛП по сигналу опорной частоты, передаваемому на другой оптической несущей, показал свою состоятельность.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП/УНУ «Радиоинтерферометрический комплекс «Квазар-КВО».

## Л и т е р а т у р а

1. Урик В. Дж., МакКинни Дж. Д., Вильямс Л. Дж. Основы микроволновой фотоники. — М.: Техносфера, 2016. — С. 376.

2. Spencer R., Smith B., Bentley M., Morison I., Anderson B., Moodie D., Robertson M., Nesset D. The Use of Optical Fibres in Radio Astronomy // Journal of Modern Optics. — 2000. — Vol. 47, no. 11. — P. 2015–2020.

3. Иванов Д. В., Ипатов А. В., Гаязов И. С., Зотов М. Б., Мельников А. Е., Стэмповский В. Г., Суркис И. Ф., Чернов В. К. Оценка возможности использования малогабаритных РСДБ-систем для решения задач КВНО // Седьмая Всероссийская конференция Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение (КВНО-2017), 17–21 апреля 2017 г., Санкт-Петербург: Тезисы докладов. — СПб.: ИПА РАН, 2017. — С. 131–132.

4. Иванов С. И., Лавров А. П., Саенко И. И., Иванов Д. В., Одноблюдов М. А., Царук А. А. Исследование характеристик модулей передатчиков с внутренней и внешней модуляцией в аналоговых волоконно-оптических линиях передачи СВЧ радиосигналов // Электроника и микроэлектроника СВЧ. Сборник статей V Всероссийской конференции. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. — Том 2. — С. 69–73.

5. Царук А. А., Карпичев А. С., Зиновьев П. В., Вытнов А. В., Иванов Д. В. Передача сигнала опорной частоты на РСДБ-радиотелескоп по оптоволоконной линии // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2017. — Вып 43. — С. 143–150.

6. Кольцов Н. Е., Мардышкин В. В., Маршалов Д. А., Евстигнеев А. А. Результаты модернизации приемных каналов S/X-диапазонов длин волн на радиотелескопах комплекса «Квазар-КВО» // Труды ИПА РАН, 2012. — Вып. 23. — С. 224–229.

7. R&S ZVA-K9: измерение группового времени задержки без доступа к гетеродину. — URL: [https://www.rohde-schwarz.com/ru/applications/r-s-zva-k9-application-card\\_56279-40196.html](https://www.rohde-schwarz.com/ru/applications/r-s-zva-k9-application-card_56279-40196.html) (дата обращения 06.06.2019).

8. Векшин Ю. В., Лавров А. П., Хвостов Е. Ю. Методика и результаты исследований амплитудной и фазовой стабильности супергетеродинного радиоастрономического приемника // Радиотехника. — М.: Радиотехника, 2018. — №1. — С. 24–30.

9. Царук А. А., Вытнов А. В., Иванов Д. В. Исследование применения пьезоэлектрического сканера задержки в оптоволоконной линии и возможности его использования для передачи эталонных частот в РСДБ // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2014. — Вып. 30. — С. 23–27.

# Fiber Optic Transmission Lines for the Radio Astronomy Receivers

Yu. V. Vekshin, A. A. Tsaruk, A. V. Vytnov, M. B. Zotov,  
A. S. Karpichev, Y. Y. Khvostov

This paper describes the fiber optic lines which transmit microwave signals between the parts of a radio astronomy receiver. It emphasises the importance of the fiber optic transmission lines for the small receivers of compact radio telescopes in future.

The following characteristics of our X-band receiver with the fiber optic transmission line have been measured: amplitude/frequency response, group delay, dynamic range, amplitude stability and delay stability. Allan variance has been calculated to compare the receiver stability with and without the fiber optic transmission line.

Also, we have proposed and tested a method to calibrate changes in the fiber optic transmission line delay using reference frequency signals from another optical carrier. The results are compared to the delay measurements using a network vector analyser and picosecond pulse signal measurements in our broadband signal acquisition system.

**Keywords:** fiber optic transmission line, radio astronomy receiver, VLBI, group delay, phase calibration.