

Адаптивная система фазостабильной передачи СВЧ сигналов на основе радиофотонных технологий

С. И. Иванов¹, А. П. Лавров², И. И. Саенко³

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

¹ivanov_si@spbstu.ru, ²lavrov_ap@spbstu.ru, ³ig-i-saenko@spbstu.ru

Аннотация. Приводятся описание и результаты экспериментального исследования замкнутой системы автоматического управления (САУ) фазостабильной передачи СВЧ сигналов по аналоговой оптоволоконной линии большой протяженности. Объектом автоматического управления является волоконный стретчер (растягиватель волокна) с пьезоэлектрическим драйвером, позволяющий регулировать электрическую длину оптоволоконной линии и компенсировать вариации фазы выходного СВЧ сигнала. В состав разработанной САУ входит ПИД-регулятор с настраиваемыми параметрами. Аппаратно-программная реализация САУ с ПИД-регулятором и трехканальной радиосистемой выполнена на основе технологий программно конфигурируемого радио с полосой рабочих частот до 6 ГГц и инструментальной среды LabVIEW. Экспериментально исследованы основные параметры вольт-градусной характеристики пьезостретчера, определяющие его работу в канале управления фазой сигнала. Представлены результаты измерения статистических характеристик флуктуаций фазы СВЧ сигнала при его передаче по оптоволоконной линии связи длиной до 1 км с разработанной замкнутой системой автоматического управления.

Ключевые слова: система автоматического управления; ПИД-контроллер; радиофотоника; СВЧ сигнал; программно конфигурируемое радио; оптоволоконная линия связи; волоконный стретчер

I. ВВЕДЕНИЕ

Перспективы построения современных радиоэлектронных систем различного назначения все чаще связывают с применением в них аналоговых волоконно-оптических (ВО) линий передачи (ВОЛП) УВЧ- и СВЧ-радиосигналов [1, 2]. Для целого ряда применений оптоволоконные линии, осуществляющие передачу не цифровых, а аналоговых сигналов, являются важным, а иногда и безальтернативным средством коммуникации, т.к. обладают такими уникальными преимуществами как сверхширокополосность (с мгновенной полосой до нескольких октав), низкими потерями, высокой устойчивостью к электромагнитным помехам и т.д.

При построении сверхширокополосных пространственно распределенных и многопозиционных систем одной из важнейших является задача

синхронизации (сохранения когерентности) сигналов, когда необходим контроль электрической длины различных участков (ветвей) ВОЛП с высокой точностью – до единиц градусов фазы в реальном масштабе времени. К таким системам относятся сверхширокополосные диаграммоформирующие устройства для фазированных антенных решеток, реализующих принцип «true-time-delay (TTD)», системы передачи синхросигналов на пространственно разнесенные приемные модули в радиоинтерферометрах, в том числе в радиоастрономии, и во многих других областях применения [1, 3–6].

Вариации электрических длин оптических линий, приводящие к фазовым рассогласованиям и нарушению синхронизации, происходят вследствие изменений температуры среды, также механических, в частности, акустических, воздействий на оптоволоконно. Так, например, вариации рабочей температуры ВОЛП приводят к изменению времени распространения сигнала в стандартном одномодовом оптическом волокне в соответствии с коэффициентом 30 пс/км/°C [1].

Для обеспечения фазовой стабильности передачи СВЧ сигналов в радиофотонных ВОЛП в реальном масштабе времени эффективно используются динамические управляемые системы на основе активной стабилизации задержки оптического пути по технологии TTD [8–9]. В таких замкнутых системах автоматического управления в составе регуляторов успешно применяются пропорционально-интегрально-дифференциальные ПИД-контроллеры [9], реализованных, в том числе, с использованием виртуальных инструментов LabVIEW.

В данной работе представлены результаты разработки системы фазостабильной передачи СВЧ сигналов в радиофотонной ВОЛП с использованием аппаратно-программных средств компании National Instruments: модуля программно конфигурируемого радио, платы сбора данных для технической реализации ПИД-контроллера и инструментальной среды LabVIEW. Такой подход к решению задачи существенно упрощает аппаратную и техническую реализацию системы при сохранении соответствующих требований к рабочим характеристикам радиофотонной ВОЛП.

II. ЧЕТЫРЕХКАНАЛЬНЫЙ ВОЛОКОННООПТИЧЕСКИЙ СТРЕТЧЕР С ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ

Как отмечалось во введении, в составе регулятора замкнутой системы автоматического управления в качестве активных компенсаторов изменения электрической длины линии используются: термоуправляемая катушка с волокном, перестраиваемый по длине волны лазер, перестраиваемая линия задержки или волоконный пьезоэлектрический стретчер.

Термоуправляемые катушки с волокном очень надежны и обычно используются для расширения диапазона фазовой компенсации, но системы управления, использующие их, большие и дорогие и не подходят для применений антенных решеток [9]. Метод перестраиваемого по длине волны лазера (WTL) [9] обладает преимуществами очень большого настраиваемого диапазона задержки, который пропорционален длине оптоволоконного канала, что позволяет его использовать для протяженных ВОЛП. Однако, дискретность (шаг) регулировки задержки становится большим, когда дальность передачи велика. Кроме того, скорость настройки WTL довольно низкая и кратковременная фазовая стабильность сравнима со стабильностью линии без компенсации [9]. Чтобы решить проблему кратковременной и долговременной стабильности мы использовали волоконный пьезоэлектрический стретчер (PFS: piezoelectric fiber stretcher) совместно с работой механически прецизионно перестраиваемой линией задержки (VDL: variable delay line). PFS обеспечивает компенсацию относительно быстрых флуктуаций задержки небольшой величины, выигрывая за счет короткого времени отклика и точной регулировки. Медленные изменения задержки большой величины компенсируются VDL, имеющей большой диапазон изменения задержки.

В качестве переменной линии задержки, перестраиваемой вручную, была использована линия типа VDL-001 (General Photonics, США) [10], с диапазоном задержек 0-330 пс. При использовании прецизионного сервопривода, VDL можно использовать в составе регулятора замкнутой САУ.

В качестве волоконного стретчера нами была использована модель FST-001-B (General Photonics Corp., США) [10], скомпонованная с драйвером для пьезоэлектрического управления. Задержка оптического сигнала в этом стретчере основана на обратном пьезоэлектрическом эффекте. Стретчер имеет 4 последовательно включенных исполнительных канала с независимым управлением каждым из них.

Основная рабочая характеристика стретчера FST-001-B – зависимость его эффективной электрической длины $l_s(U)$ от управляющего входного напряжения драйвера U приведено на рис. 1. для квазистатического режима изменения напряжения. Выбор режима определялся областью применения данного устройства в системе фазостабильной передачи СВЧ сигналов в ВОЛП. Дополнительные экспериментальные исследования стретчера FST-001-B диктуются отсутствием необходимых

данных измерений характеристики $l_s(U)$ в документации производителя.

В квазистатическом режиме для исследования эффективности управления фазой передаваемого по ВО линии СВЧ сигнала на два канала аналогового управления драйвера стретчера подавалось управляющее напряжение от источников постоянного напряжения. Управляющее напряжение менялось дискретно с шагом 1 В в интервале от 0 В до 5 В (5 В – максимально допустимое входное управляющее напряжение) и с временным шагом около 10 с. В динамическом режиме управляющее напряжение с частотой 1 Гц подавалось одновременно на четыре канала драйвера стретчера. Амплитуда также менялась дискретно с шагом 1 В. Измерения проводилось в режимах фиксированной частоты СВЧ сигнала, равной 3 и 5 ГГц.

Было проведено измерение эффективной электрической длины l_s стретчера, которая составила 29.175 м. Данный результат необходимо учитывать при измерениях фазовых характеристик и расчете длин ВО линии. Кроме того, наличие волокна большой длины внутри стретчера приводит к нестабильности задержки оптического сигнала из-за влияния изменения температуры, что подтвердили наши дальнейшие исследования. Анализ полученных данных показывает: максимальное изменение фазы одного канала стретчера при подаче на него максимального управляющего напряжения составляет 3,5 градуса/канал при $f=3$ ГГц.

Измеренная неидентичность эффективной электрической длины каналов стретчера при подаче одинакового управляющего напряжения оценивается величиной 0.02 мм. Максимальная величина изменения электрической длины стретчера при подаче максимального управляющего напряжения (5 В) на один канал составляет около 1 мм, изменение электрической длины при постоянном напряжении не превышает 0.01 мм и связана, в том числе, с упоминавшейся температурной нестабильностью параметров стретчера.

III. АРХИТЕКТУРА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА СИСТЕМЫ ФАЗОСТАБИЛЬНОЙ ПЕРЕДАЧИ СВЧ СИГНАЛОВ

Архитектура аппаратно-программного комплекса, разработанной адаптивной системы фазостабильной передачи СВЧ сигналов по ВО линии, представлена

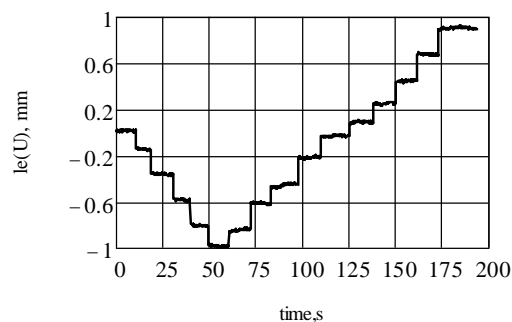


Рис. 1. Изменение эффективной электрической длины одного канала PFS при ступенчатом изменении управляющего напряжения U

структурной схемой на рис. 2. Она включает передающий (Tr) и приемный (Rc) модули аналоговой широкополосной ВОЛП Optiva OTS-2-18 (Emcore, США) [11], волоконный стретчер (PFS) модель FST-001-B, переменную линию задержки (VDL), прибор с технологией программно-конфигурируемого радио USRP-2901 (National Instruments, США) [12], плата сбора данных (NI DAQ) (National Instruments, США), 3-х децибелный делитель СВЧ сигнала (Sp), векторный анализатор цепей (VNA) (ООО «ПЛАНАР», Россия) и персональный компьютер (PC). На рис. 3 приведен внешний вид лабораторного макета системы, использованного в экспериментах.

В передатчике Tr входной СВЧ сигнал преобразуется в сигнал оптического диапазона с использованием интегральнооптического модулятора Маха-Цендера, реализующего модуляцию по интенсивности. В передающих и приемных модулях Tr и Rc предусмотрены термостабилизация и микропроцессорная корректировка рабочих параметров при изменении режимов работы. Некоторые результаты проведенных нами измерений характеристик ВО линий на основе модулей Optiva OTS-2-18 приведены в [13]. Для создания опорного СВЧ сигнала, необходимого для реализации регулятора замкнутой системы автоматического управления, используется делитель Sp (рис. 2). Управляемый волоконный пьезоэлектрический стретчер (PFS) совместно с перестраиваемой линией задержки (VDL) (рис. 2) являются активными элементами компенсации кратковременной и долговременной фазовой нестабильности, соответственно. На управляющие входы драйвера PFS – параллельно объединенные друг с другом каналы 1 и 2 (Ch1-2) и каналы 3 и 4 (Ch3-4) (рис. 2) – поступает сигнал с платы DAQ, входящей в состав регулятора разработанной замкнутой системы автоматического управления (САУ). Между оптическим выходом VDL и входом приемного модуля Rv установлена катушка (FL) одномодового волокна Corning SMF-28e длиной 1000 м.

Регулятор САУ состоит из платы DAQ, программно-конфигурируемого радио USRP и компьютера ПК. Периферийные устройства связаны с ПК по последовательному интерфейсу стандарта USB 3.0. Входными сигналами регулятора САУ являются опорный СВЧ сигнал VNA и контролируемый СВЧ сигнал с выхода приемного модуля Rc. В модуле программно-конфигурируемого радио USRP входные СВЧ сигналы усиливаются с контролируемым коэффициентом усиления, преобразуются в сигналы промежуточной частоты, далее в цифровой код с помощью АЦП. Выходными сигналами регулятора САУ являются сигналы управления Ch1-2 и Ch3-4 с выходов платы DAQ (рис. 2). Программное сопровождение САУ, основанной на ПИД-коррекции, реализовано с использованием инструментальной среды LabVIEW.

Важно, что предлагаемое схемотехническое решение построения системы фазостабильной передачи СВЧ сигналов по ВОЛП соответствует технологии TTD, а, следовательно, обладает сверхширокополосностью.

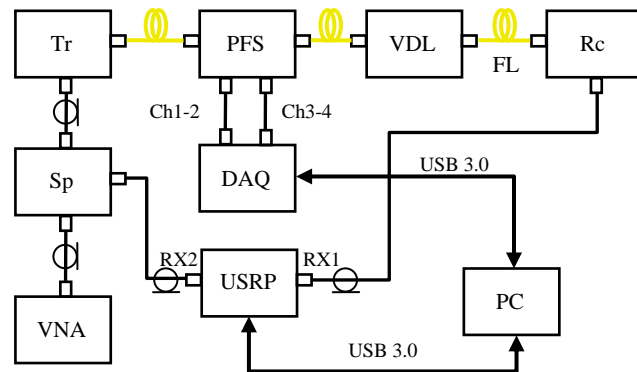


Рис. 2. Архитектура аппаратно-программных средств адаптивной системы фазостабильной передачи СВЧ сигналов по ВО линии

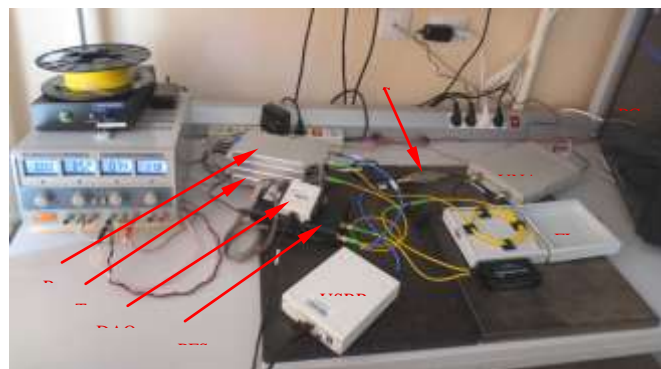


Рис. 3. Внешний вид лабораторного макета адаптивной системы фазостабильной передачи СВЧ сигналов по ВО линии

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ФАЗОСТАБИЛЬНОЙ ПЕРЕДАЧИ СВЧ СИГНАЛОВ

В разделе представлены результаты тестовых измерений разработанного лабораторного макета системы фазостабильной передачи СВЧ сигналов по ВОЛП, его структурная схема приведена на рис. 2. Частота СВЧ сигнала (с выхода VNA) составляла $f = 5.9$ ГГц. Тестирование проводилось в два этапа. На первом этапе на управляющий вход стретчера Ch1-2 подавался гармонический возмущающий сигнал с амплитудой, близкой к максимально допустимой и частотой $F = 0.03$ Гц. Этот сигнал создавал соответствующую фазовую модуляцию в ВОЛП с амплитудой равной 5.25 градусов. Вход стретчера Ch3-4 использовался для подачи сигнала компенсирующего сигнала управления регулятора замкнутой САУ. На рис. 4 представлены результаты измерений. Анализ результатов показывает, что коэффициент подавления флуктуаций фазы при возмущении длины ВО линии сигналом, формируемым платой сбора DAQ, составляет 37 дБ. Шумы измерительной системы в пересчете на флуктуации электрической длины ВО линии составили около 0.01 мм.

На втором этапе тестирования измерялись характеристики долговременной фазовой стабильности ВО линии протяженностью $l = 1$ км в лабораторных

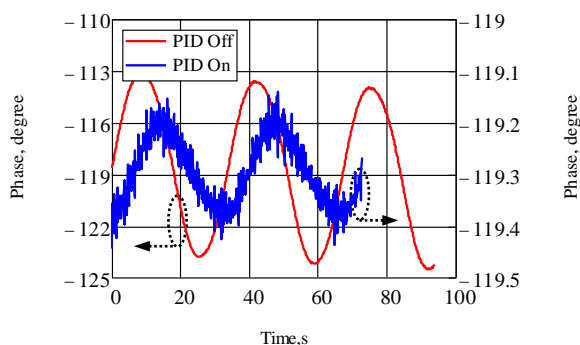


Рис. 4. Компенсация фазы СВЧ сигнала при возмущении длины ВО линии внешним сигналом

условиях: изменения температуры окружающей среды составляли $\approx \pm 2$ градуса/час. Сигнал ПИД-коррекции подавался параллельно на все 4 управляющих входа драйвера стретчера. Количественным параметром оценки долговременной стабильности фазы является дисперсия Аллана [14]. На рис. 5 представлены результаты расчета дисперсии Аллана $\text{Var_Allan}(T)$ флуктуаций фазы СВЧ сигнала на выходе ВО линии для случая разомкнутой и замкнутой петли ПИД-регулятора. При разомкнутой и замкнутой петлях обратной связи регулятора величина $\text{СКО } \sigma_\varphi = \sqrt{\text{Var_Allan}(T)}$ флуктуаций фазы оставила, соответственно: 0.7 град на временном интервале $T = 250$ с и 0.015 град на интервале $T = 1000$ с. Анализ зависимости дисперсии Аллана от времени усреднения показывает, что при разомкнутой петле регулятора на высоких частотах флуктуации фазы представляют белый шум, а на низких частотах – шум случайных блужданий.

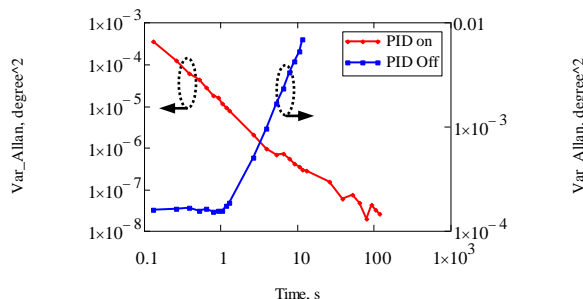


Рис. 5. Дисперсия Аллана флуктуаций фазы СВЧ сигнала на выходе ВО линии

Расчет по экспериментальным данным показал, что при замкнутой петле регулятора спектральная плотность флуктуаций фазы возрастает с ростом частоты, что указывает на инерционность работы реализованного ПИД-регулятора (его алгоритмической компоненты).

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена архитектура программно-аппаратного комплекса замкнутой системы автоматического управления для аналоговой ВО линии, предназначенной для фазостабильной передачи СВЧ сигналов. Рассмотрена техническая реализация САУ по

схеме с ПИД-регулятором, с настраиваемыми параметрами, выполненного с применением технологий National Instruments. В качестве объекта управления фазой выходного СВЧ сигнала, использован пьезоэлектрический волоконный стретчер, программирование осуществляется в инструментальной среде LabVIEW с пакетом расширения Control Design and Simulation. Проведены тестовые измерения лабораторного макета при передаче СВЧ сигналов в частотном диапазоне до 6 ГГц по линии длиной 1 км. Коэффициент подавления флуктуаций фазы от внешних возмущений ВО линии достигает 37 дБ. Анализ дисперсии Аллана флуктуаций фазы СВЧ сигнала на выходе ВО линии показал, что предложенная система фазостабильной передачи СВЧ сигналов может успешно использоваться в ВО линиях, в том числе, при быстрых неинтенсивных изменениях температуры окружающей среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] V. J. Urick, J. D. McKinney, and K. J. Williams, *Fundamentals of Microwave Photonics*, John Wiley&Sons Inc., 2015.
- [2] I. L. Newberg, C. M. Gee, G. D. Thurmond, and H. W. Yen, "Long microwave delay fiber-optic link for radar testing," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 38, no. 5, pp. 664–666, 1990. DOI: 10.1109/22.54937.
- [3] S. I. Ivanov, A. P. Lavrov, and I. I. Saenko, "Application of microwave photonics components for ultrawideband antenna array beamforming," *Lecture Notes in Computer Science. LNCS*, vol. 9870, pp. 670–679, 2016. DOI: 10.1007/978-3-319-463018_58.
- [4] V. A. Volkov, D. A. Gordeev, S. I. Ivanov, A. P. Lavrov, and I. I. Saenko, "Photonic Beamformer Model Based on Analog Fiber-Optic Links' Components," *J. of Physics Conf. Series*, vol. 737, paper 012002 (6), 2016. DOI: 10.1088/1742-6596/737/1/012002.
- [5] Sergey I. Ivanov, Alexander P. Lavrov, Igor I. Saenko, Sergey A. Bessoltsev, Alexander V. Dostovalov, and Alexey A. Wolf, "Microwave photonic beamforming system with broadband chirped fiber Bragg grating," *Proc. SPIE*, vol. 10774, paper 107740W, 2018. DOI: 10.1117/12.2318086.
- [6] B. Shillue, et al., "The ALMA photonic local oscillator system," *Proc. SPIE*, vol. 8452, paper 845216, 2012. DOI: 10.1117/12.927174.
- [7] A. Zhang, et al., "Phase stabilized downlink transmission for wideband radio frequency signal via optical fiber," *Optics Express*, vol. 22(18), pp. 21560–21566, 2014. DOI: 10.1364/OE.22.021560.
- [8] S. Huang, and R. Tjoelker, "Stabilized photonic links for deep space tracking, navigation, and radio science applications," *Proc. 43rd Annual PTTI Syst. Appl. Meet.*, pp. 1–8. California, USA, 2012. doi: <http://hdl.handle.net/2014/42503>.
- [9] F. Yin, et al., "Improved Phase Stabilization of a Radio-Over-Fiber Link Under Large and Fine Delay Tuning," *IEEE Photonics Journal*, vol. 7, No. 4, pp. 1–6. DOI: 10.1109/JPHOT.2015.2458180.
- [10] General Photonics Corporation (2019) <http://www.generalphotonics.com/index.php/product/fst-001-fiber-stretcher> (accessed 08 September 2019).
- [11] Optiva OTS-2 18 GHz Amplified Microwave Band Fiber Optic Links. <http://products.emcore.com/avcat/images/documents/dataSheet/Optiva-OTS-2-18GHz-Amplified2.pdf> (accessed 08 September 2019).
- [12] Software Defined Radio Device. <https://www.ni.com/rus/support/model.usrp-2901.html> (accessed 08 September 2019).
- [13] S. I. Ivanov, A. P. Lavrov, and I. I. Saenko, "Investigation of Key Components of Photonic Beamforming System for Receiving Antenna Array," *Lecture Notes in Computer Science. LNCS*, vol. 9247, pp. 679–688, 2015. DOI: 10.1007/978-3-319-23126-6_61.
- [14] J. A. Barnes, A. R. et al., "Characterization of Frequency Stability," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. IM-20, No. 2, pp. 105–120, 1971. DOI: 10.1109/TIM.1971.5570702.