

УДК 537.86, 621.396  
EDN: SOGAXG

PACS: 42.79.Sz

**Волоконно-оптическая система передачи  
аналогового сигнала в диапазоне частот 0,1–40 ГГц***В. С. Арыков, И. В. Юнусов, М. В. Степаненко, П. Е. Троян,  
А. В. Фатеев*

*Приведены результаты разработки волоконно-оптической системы передачи (ВОСП) аналогового сигнала в диапазоне частот 0,1–40 ГГц. Разработанная ВОСП позволяет осуществлять передачу модулированного по амплитуде оптического излучения с длиной волны 1,31 мкм. Система включает передающий и приемный оптоэлектронный модули. Корпуса модулей выполнены герметичными и имеют компактные размеры. В передающий модуль интегрированы системы контроля температуры и мощности лазера. Для функционирования ВОСП дополнительных внешних элементов управления не требуется. Вход и выход системы согласованы на импеданс 50 Ом. Разработанная система может применяться для передачи сигнала с частотой до 50 ГГц.*

*Ключевые слова:* передающий оптоэлектронный модуль, приемный оптоэлектронный модуль, волоконно-оптическая система передачи.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-6-91-96

**Введение**

Современные волоконно-оптические системы передачи (ВОСП) используются для передачи как цифрового, так и аналогового сигналов. Благодаря бурному развитию цифровых телекоммуникаций ВОСП цифрового

сигнала стандартизованы и коммерчески доступны. ВОСП аналогового сигнала [1–4] получили меньшее распространение, и используются, в первую очередь, в качестве замены классических коаксиальных линий передачи электрического сигнала.

Преимущества использования ВОСП аналогового сигнала по сравнению с коаксиальными линиями передачи основаны на следующих особенностях: низких погонных потерях мощности сигнала вне зависимости от частоты модуляции, малом удельном весе и малой толщине оптического волокна, помехозащищенности оптоволоконной линии. Благодаря этому ВОСП позволяют осуществлять передачу полезного сигнала от источника к приемнику, удаленному на расстояние до нескольких километров. Особый интерес такие ВОСП представляют для создания измерительных систем, комплексов тестирования оборудования в широком диапазоне частот, линий задержки сигнала.

Важно отметить, что круг применения ВОСП аналогового сигнала ограничен высо-

---

**Арыков Вадим Станиславович**<sup>1,2</sup>, директор, в.н.с., к.н.т.

E-mail: arykov.v@ir-mw.com

**Юнусов Игорь Владимирович**<sup>2</sup>, в.н.с.

E-mail: igor.v.yunusov@yandex.ru

**Степаненко Михаил Валерьевич**<sup>2</sup>, н.с.

E-mail: stepanenko.m@ir-mw.com

**Троян Павел Ефимович**<sup>2</sup>, в.н.с., д.т.н.

E-mail: tpe@tusur.ru

**Фатеев Алексей Викторович**<sup>2</sup>, зав. кафедрой., к.т.н.

E-mail: fateev@tusur.ru

<sup>1</sup> ООО «Ай Эм Тех».

Россия, 634041, г. Томск, просп. Кирова, 51А, стр. 5.

<sup>2</sup> Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники.

Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.

---

*Статья поступила в редакцию 11 октября 2022 г.*

---

© Арыков В. С., Юнусов И. В., Степаненко М. В.,  
Троян П. Е., Фатеев А. В., 2022

ким коэффициентом шума и сравнительно небольшим динамическим диапазоном. Однако даже с учетом обозначенных недостатков в ряде случаев такие системы оказываются приемлемыми, а иногда и единственно доступным решением.

Целью работы является создание ВОСП аналогового сигнала в диапазоне частот 0,1–40 ГГц. К основным задачам работы относятся разработка приемного и передающего оптоэлектронных модулей.

### Состав разработанной ВОСП

ВОСП аналогового сигнала состоит из двух основных элементов: передающего оптоэлектронного модуля (ПОМ) и приемного оптоэлектронного модуля (ПРОМ).

ПОМ содержит узкополосный лазер с высокой стабильностью длины волны излучения, а также преобразователь, позволяющий выполнить модуляцию оптической несущей в соответствии с законом изменения входного электрического сигнала. Представленный в данной статье ПОМ позволяет осуществлять передачу модулированного по амплитуде оптического излучения с длиной волны 1,31 мкм. ПРОМ представляет собой фотодетектор на основе *p-i-n*-фотодиода. СВЧ-вход ПОМ и СВЧ-выход ПРОМ согласованы на импеданс 50 Ом.

### Передающий оптоэлектронный модуль

ПОМ построен на основе DFB-лазера с модулятором электроабсорбционного типа. Использование полупроводникового кристалла, включающего лазер и модулятор, позволяет обеспечить компактность модуля, недостижимую в случае использования модуляторов на основе ниобата лития. Размеры ПОМ составляют 60×30×10 мм без учета выводов питания, хвостовика вывода оптического излучения и СВЧ-разъема.

В разработанный ПОМ интегрированы системы управления температурой кристалла лазера и выходной мощностью лазера. Внутри модуля предусмотрено место для установки усилителя входного СВЧ-сигнала. Модификации ПОМ без усилителя, с широкополосным

малозумящим усилителем или усилителем для требуемого диапазона частот имеют одинаковые габариты и схему подключения питания.

ПОМ может быть выполнен со встроенным или с внешним инжектором питания. В случае использования внешнего инжектора питания через него осуществляется подача напряжения смещения рабочей точки модулятора.

Для питания модуля требуется один источник с напряжением плюс 5 В (рабочий ток в установившемся режиме менее 150 мА). В случае использования внешнего инжектора питания требуется второй источник напряжения минус (0,7–0,8) В (потребляемый ток менее 15 мА).

### Приемный оптоэлектронный модуль

ПРОМ построен на базе СВЧ-фотодиода с цепями питания и согласования по СВЧ-сигналу. Конструкция модуля аналогична [5]. Так же, как и ПОМ, ПРОМ может содержать встроенный усилитель выходного СВЧ-сигнала требуемого диапазона или широкополосный малозумящий усилитель. Приведенные в данной работе результаты относятся к модификации без усилителя. Чувствительность ПРОМ на основе фосфид-индиевого фотодиода составляет 0,65 А/Вт на длине волны оптического излучения 1,31 мкм. Напряжение питания модуля плюс 4 В (потребляемый ток менее 3 мА). Габаритные размеры корпуса составляют 10×10×10 мм без учета выводов питания, хвостовика ввода оптического излучения и СВЧ-разъема.

### Результаты и обсуждение

Фотография разработанной ВОСП, подключенной к векторному анализатору цепей, приведена на рис. 1.

Частотные характеристики разработанной ВОСП аналогового сигнала были измерены с использованием стенда, включающего векторный анализатор цепей Agilent Technologies N5227A и требуемые источники напряжения. Измерения включают систему «передатчик-приемник», а также инжектор питания Anritsu K251.

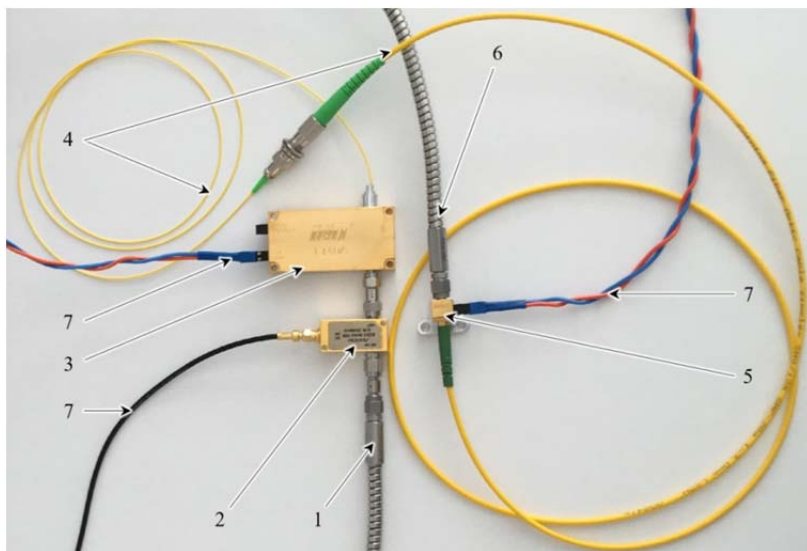


Рис. 1. Разработанная ВОСП аналогового СВЧ-сигнала: 1 – коаксиальный кабель ввода СВЧ-сигнала; 2 – инжектор питания; 3 – аналоговый ПОМ; 4 – оптическая цепь ВОСП; 5 – аналоговый ПРОМ; 6 – коаксиальный кабель вывода СВЧ-сигнала; 7 – кабель питания

Частотная зависимость параметров рассеяния разработанной ВОСП приведена на рис. 2. Частотная зависимость коэффициента шума приведена на рис. 3. Частотная зависимость входной мощности СВЧ-сигнала, при

которой коэффициент передачи (КП) снижается на 1 дБ, приведена на рис. 4. Измерения были выполнены при напряжении питания рабочей точки модулятора минус 0,8 В.

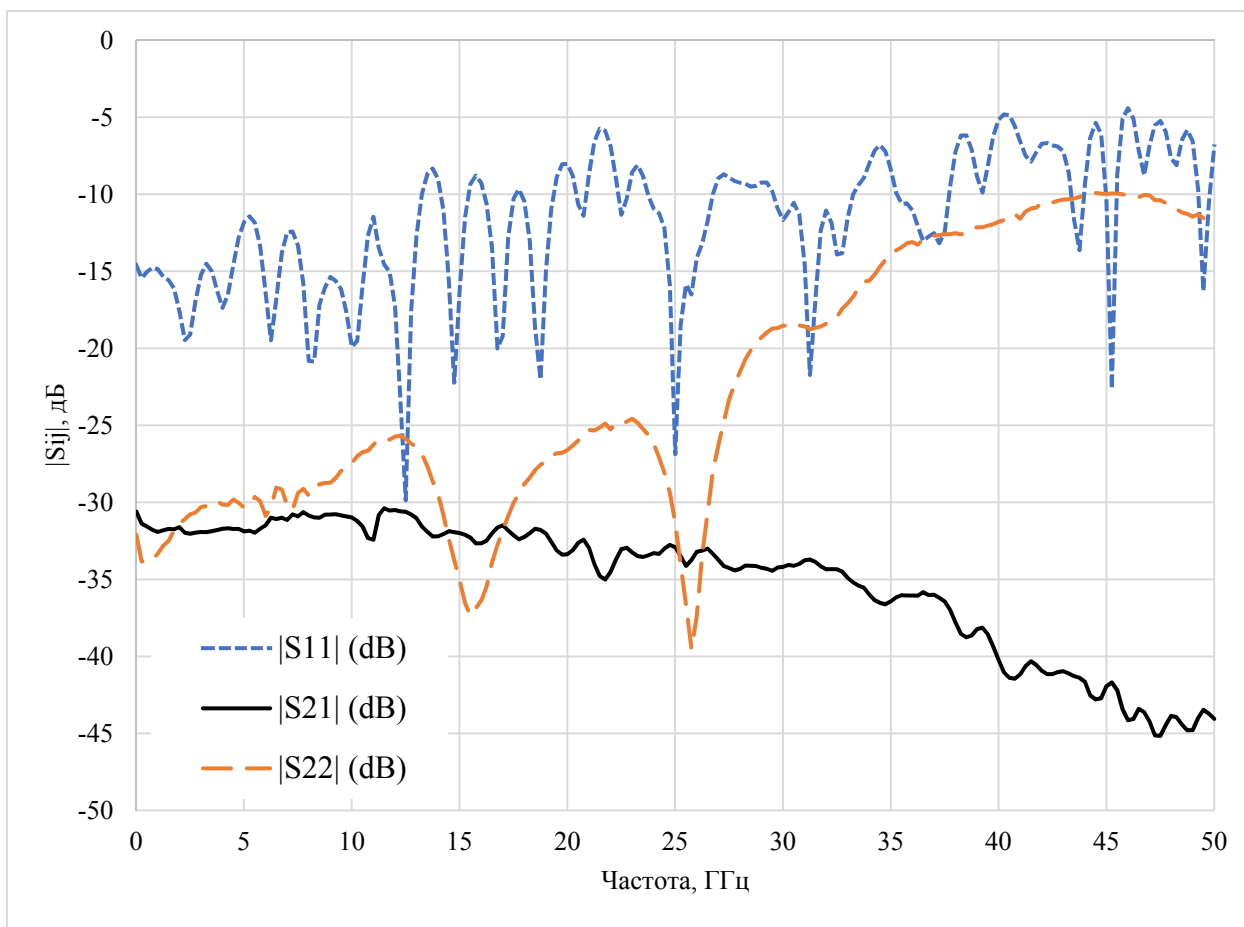
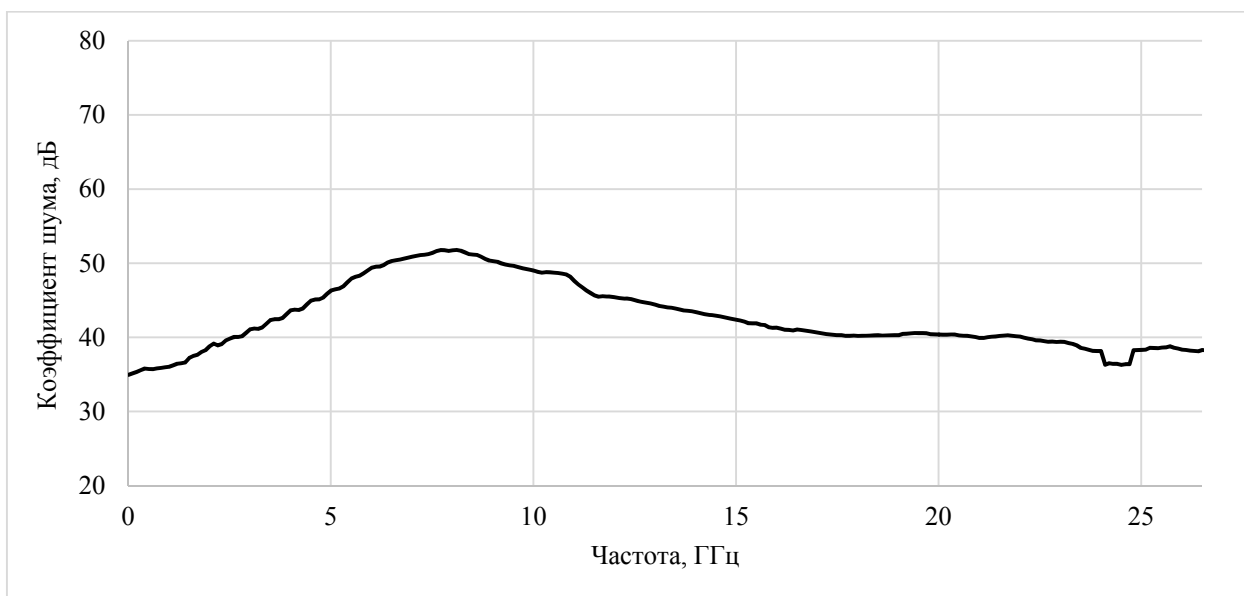
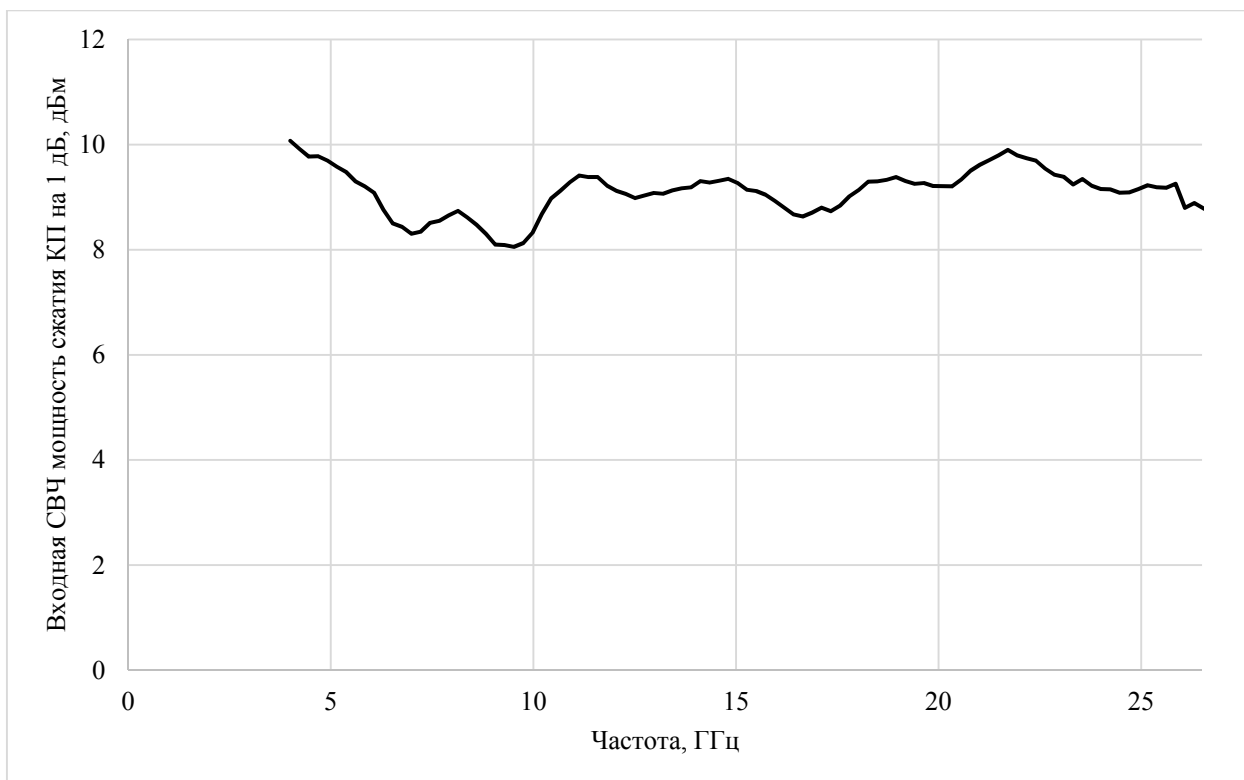


Рис. 2. Параметры рассеяния разработанной ВОСП аналогового СВЧ-сигнала



**Рис. 3.** Частотная зависимость коэффициента шума разработанной ВОСП



**Рис. 4.** Частотная зависимость входной мощности СВЧ-сигнала, при которой КП снижается на 1 дБ

Приведенные частотные характеристики измерены для ВОСП с СВЧ-разъемами тип 3,5 мм.

Основные параметры разработанной ВОСП приведены в таблице.

Таблица

**Параметры разработанной ВОСП (при нормальных условиях)**

Параметр	Обозначение	Значение	Единица измерения
Рабочая длина волны оптического излучения	$\lambda$	1311	нм
Диапазон рабочих частот	$\Delta f$	0,1–40	ГГц
Максимальная мощность оптического излучения	$P_{\text{опт макс}}$	5	мВт
Средняя оптическая мощность в оптимальной рабочей точке для передачи аналогового сигнала	$P_{\text{опт ср}}$	2,5	мВт
Входной импеданс	$Z_{\text{вх}}$	50	Ом
Выходной импеданс	$Z_{\text{вых}}$	50	Ом
Напряжение питания ПОМ	$U_{\text{пит ПОМ}}$	5	В
Ток потребления ПОМ, не более	$I_{\text{пит ПОМ}}$	150	мА
Напряжение смещения электроабсорбционного модулятора в рабочей точке ПОМ	$U_{\text{см ПОМ}}$	–0,8	В
Ток потребления электроабсорбционного модулятора ПОМ, не более	$I_{\text{см ПОМ}}$	15	мА
Напряжение питания ПРОМ	$U_{\text{пит ПРОМ}}$	4	В
Ток потребления ПРОМ, не более	$I_{\text{пит ПРОМ}}$	3	мА

**Заключение**

В результате проведенной работы была создана ВОСП аналогового сигнала, состоящая из ПОМ и ПРОМ. Разработанная система характеризуется широким диапазоном частот передаваемого сигнала, компактностью и наличием интегрированных систем контроля температуры и мощности лазера.

Направления дальнейшего развития работы включают: 1) улучшение равномерности частотных характеристик ПОМ за счет оптимизации элементов СВЧ-тракта; 2) разработку ВОСП аналогового сигнала со встроенными в ПОМ и ПРОМ усилителями СВЧ-сигнала, обеспечивающими компенсацию потерь мощности в результате электрооптического и оптоэлектронного преобразований сигнала.

*Работа выполнена коллективом научной лаборатории интегральной оптики и радиофотоники при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках соглашения № 075-03-2020-237/1 от 5 марта 2020 г. (внутренний номер проекта FEWM-2020-0040).*

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Seeds A. // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 2002. Vol. 50. № 3. P. 877.
2. Cox C. Analog Optical Links. – U.K.: Cambridge Univ. Press, 2004.
3. Cox C., Ackerman E., Betts G., Prince J. // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 2006. Vol. 54. № 2. P. 906.
4. Yao J. // J. Lightwave Technol. 2009. № 27. P. 314.
5. Юнусов И. В., Кондратенко А. В., Арыков В. С., Степаненко М. В., Троян П. Е. // Прикладная физика. 2021. № 6. С. 41.

## 0.1–40 GHz radio over fiber system

V. S. Arykov<sup>1,2</sup>, I. V. Yunusov<sup>2</sup>, M. V. Stepanenko<sup>2</sup>, P. E. Troyan<sup>2</sup> and A. V. Fateev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Infrared and Microwave Technologies, LLC  
Bd. 5, 51A Kirova st., Tomsk, 634041, Russia

<sup>2</sup>Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics  
40 Lenina st., Tomsk, 634050, Russia  
E-mail: igor.v.yunusov@yandex.ru

*Received October 11, 2022*

***The paper presents the results of the development of 0.1–40 GHz radio over fiber (RoF) system. The system transmits amplitude-modulated light with 1.31  $\mu\text{m}$  wavelength over an optical fiber and includes a transmitting and a receiving optoelectronic modules. Modules cases are hermetically sealed and have small size. The transmitting module includes integrated systems for temperature control and laser power control. No additional external controls are required for the RoF system to function. The RF input and RF output of transmitting and receiving modules are matched to 50 ohms. The developed system can be used to transmit a signal with a frequency of up to 50 GHz.***

*Keywords:* transmitting optoelectronic module, receiving optoelectronic module, radio over fiber system.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-6-91-96

### REFERENCES

1. A. Seeds, Microwave photonics, IEEE Trans. Microw. Theory Tech. **50** (3), 877 (2002).
2. C. Cox, *Analog Optical Links*. (Cambridge Univ. Press, U.K., 2004).
3. C. H. Cox, E. I. Ackerman, G. E. Betts, J. L. Prince, IEEE Trans. Microw. Theory Tech. **54** (2), 906 (2006).
4. Jianping Yao, J. Lightwave Technol. **27**, 314 (2009).
5. I. V. Yunusov, A. V. Kondratenko, V. S. Arykov, M. V. Stepanenko and P. E. Troyan, Applied Physics, No. 6, 41 (2021) [in Russian].