

ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.391.64

СПЕКТРАЛЬНЫЙ СОСТАВ СВЧ-СИГНАЛОВ НА ВЫХОДЕ СМЕСИТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННОГО ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО МОДУЛЯТОРА ИНТЕНСИВНОСТИ

© В. М. Владимиров¹, М. Ю. Реушев^{1,2}, К. А. Древин³

¹ Федеральный исследовательский центр СО РАН,

660036, г. Красноярск, Академгородок, 50

² Сибирский федеральный университет,

660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79

³ ООО «НПФ Электрон»,

660036, г. Красноярск, Академгородок, 50

E-mail: reuget@mail.ru

Исследовано влияние работы преобразователя частоты на основе электрооптического модулятора типа Маха — Цендера на спектр частот выходного сигнала в режиме down-конверсии. Показано, что модулятор не вносит существенных изменений в распределение спектральной плотности мощности преобразованного сигнала, включая фазовый шум, по сравнению с сигналом на входе модулятора.

Ключевые слова: электрооптический модулятор, down-конверсия, смеситель СВЧ-сигналов, фазовый шум.

DOI: 10.15372/AUT20240209

EDN: GFXZZA

Введение. В последние десятилетия технологии фотоники стали вытеснять традиционные области, занимаемые радио- и технической электроникой, такие как хранение и передача информации, освещение, обработка материалов [1]. При этом наблюдаются тенденции к переходу от дискретной к интегральной фотонике, что уже в ближайшие годы приведёт к эффекту, сопоставимому с тем, что был получен в радиоэлектронике в результате перехода от дискретных к интегральным микросхемам [2, 3]. В перспективе применение интегральной фотоники в сочетании с волоконно-оптическими линиями связи (ВОЛС) позволяет создать системы для эффективного применения в авиационной и космической технике, промышленности, в сферах обороны и безопасности [3, 4].

В качестве основных элементов передающих систем в ВОЛС наиболее широкое распространение получили полупроводниковые лазеры (ППЛ), в которых модуляция излучения происходит за счёт модуляции тока накачки лазера (прямая модуляция). Такой способ эффективен в цифровых системах передачи, когда требования к частотному и динамическому диапазонам модуляционной характеристики не очень жёсткие. С повышением частоты модуляции ППЛ выше 3 ГГц усиливается оптическая вариация частоты передаваемого сигнала, которая отрицательно влияет на помехоустойчивость линии связи. При передаче по ВОЛС аналоговых сигналов в СВЧ-диапазоне требования по величине линейного участка динамического диапазона в два, а то и в три раза больше, чем при передаче цифровых сигналов, и, соответственно, возрастают требования к ППЛ [5]. К тому же эффективное оптическое распределение сигнала от ППЛ в системах транспортировки широкополосных

многоканальных сигналов по ВОЛС требует низкой флуктуации фазы лазерного излучения и большой мощности лазерного излучения для передачи сигнала нескольким приёмникам [6]. Малые флуктуации фазы и большая мощность полупроводникового лазера при работе на высоких частотах модуляции излучения несовместимы друг с другом. В такой ситуации требуется применение внешних оптических модуляторов (ОМ). В составе оптоэлектронных устройств ОМ применяются как в качестве самостоятельных элементов, так и элементов в составе интегральных оптических схем.

Среди ОМ электрооптические модуляторы (ЭОМ) являются наиболее перспективными элементами для применения в системах связи. Приборы на основе ЭОМ используются для передачи большинства форматов информационных сигналов, обладают высокой радиочастотной изоляцией, невосприимчивостью к электромагнитным помехам, способностью выполнять преобразования радиосигналов высокой частоты и др. [7].

Ранее в [8] сообщалось о результатах исследования характеристик волоконного электрооптического модулятора в режиме down-конверсии сигналов СВЧ-диапазона. Такой режим может быть реализован в системах радиофотоники, где требуется осуществлять не только передачу радиочастотных сигналов по каналам ВОЛС, но и их преобразования с целью разделения сигналов и создания настраиваемых межполосных кросс-соединений. В ходе экспериментальных исследований были изучены условия для достижения максимальной эффективности преобразования смешиваемых сигналов в сигнал разностной частоты.

Из радиоэлектроники известно, что если смеситель в системе переноса (преобразования) частоты имеет плохую стабильность, то его фазовый шум будет ухудшать отношение сигнал/шум на выходе смесителя и вносить искажения в его спектральный состав.

В радиоэлектронике смеситель — это активный элемент из полупроводниковых элементов. Шумовые характеристики таких элементов и методы уменьшения шумов, вносимых радиоэлектронными смесителями на их основе, достаточно хорошо изучены [9, 10]. Для ЭОМ, используемых в качестве смесителей радиочастотных сигналов, вопросы, связанные со спектральным составом преобразуемых сигналов, по-прежнему являются актуальными [11].

Целью представленной работы являлось экспериментальное исследование влияния работы смесителя СВЧ-сигналов на основе ЭОМ интенсивности в режиме down-конверсии на спектр выходных сигналов разностной частоты.

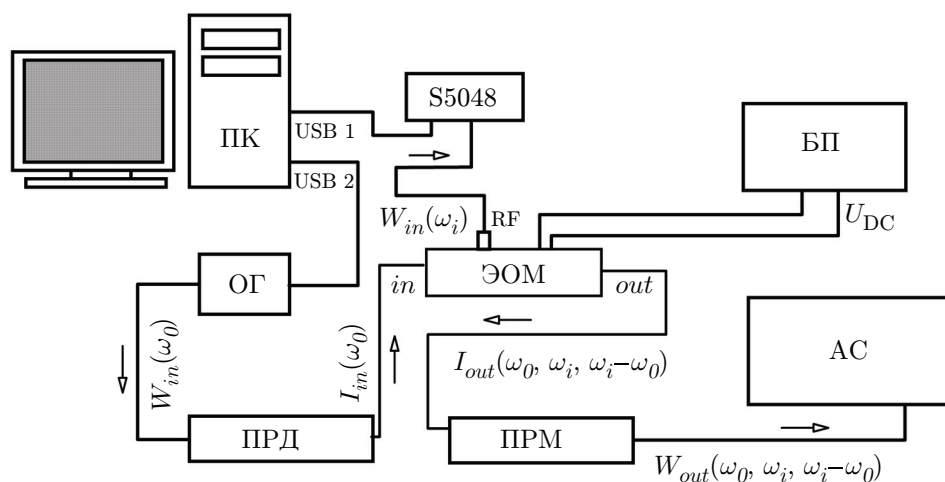


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Исследования и результаты. Общая схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Исследовались зависимости вида $W_{out}(\omega_0, \omega_i, \omega_i - \omega_0) = f[W_{in}(\omega_0, \omega_i, U_{DC})]$, где W_{in} , W_{out} — мощности входного и выходного сигналов; ω_0 , ω_i — частота опорного и преобразуемого СВЧ-сигналов; U_{DC} — постоянное напряжение (DC — direct current) смещения рабочей точки передаточной функции ЭОМ, подаваемого от лабораторного блока питания (БП) (МСН-302D-II, Китай); RF — радиочастотный вход ЭОМ.

В качестве генератора преобразуемого сигнала $W_{in}(\omega_i)$ использовался векторный анализатор цепей S5048. Источником опорного сигнала $W_{in}(\omega_0)$ с выходной мощностью до 10 дБм являлся программируемый генератор ОГ (ИЛПГ.464512.005, ООО «НПФ Электрон», г. Красноярск). В качестве оптического смесителя (конвертора) СВЧ-сигналов $W_{in}(\omega_0)$ и $W_{in}(\omega_i)$ был использован ЭОМ интенсивности MXLAN-LN-10 (iXblue, Франция) с волоконным выводом. Волоконно-оптический передатчик (ПРД) с прямой модуляцией лазерного диода формировал оптическую несущую $I_{in}(\omega_0)$ с выходной оптической мощностью 3 мВт на длине волны излучения 1,5 мкм. Детектирование оптического сигнала на выходе ЭОМ ($I_{out}(\omega_0, \omega_i, \omega_i - \omega_0) \rightarrow W_{out}(\omega_0, \omega_i, \omega_i - \omega_0)$) осуществлялось оптоволоконным приёмником ПРМ (OZ450 Rx, США). Спектральный анализ СВЧ-сигналов, включая спектр фазового шума вблизи центральных частот ω_0 , ω_i , $\omega_i - \omega_0$, производился с помощью анализатора спектра (АС) АКС1301 («Актаком», Россия).

На рис. 2 в виде скриншотов с экрана анализатора спектра приведён пример спектрального состава сигналов на выходе приёмного оптоэлектронного модуля (ПРОМ) после смесителя в режиме down-конверсии. Спектры получены при максимальном разрешении анализатора спектра при установках: ширина полосы видеофильтра (VBW) — 300 Гц, полоса разрешения (RBW) — 300 Гц.

Для определения диапазона измерений, в котором сохраняется линейность масштабирования мощности регистрируемых анализатором сигналов, были проведены исследования зависимостей $W_{out}(\omega_0, \omega_i, \omega_i - \omega_0)$ от $W_{in}(\omega_0, \omega_i)$. Результаты исследований для сигналов с частотами $\omega_0 = 1,602$, $\omega_i = 2,650$, $\omega_i - \omega_0 = 1,048$ ГГц приведены на рис. 3. Из графиков следует, что линейный диапазон преобразования сигналов с частотами ω_i , поступающих на вход смесителя в сигнал разностной частоты $\omega_i - \omega_0$, сохраняется в диапазоне входной мощности W_{in} от +5 до -25 дБм.

Для качественной оценки спектрального состава сигналов разностной частоты, формируемых смесителем, была разработана методика, которая основана на сравнении спектрограмм, включающих сигнал центральной частоты и контур фазовых шумов в основании этого сигнала. На рис. 4 представлена структурная схема спектра СВЧ-сигнала.

Схема содержит следующие обозначения: RBW — спектральная ширина полосы разрешения анализатора спектра; Δf_1 — спектральная ширина верхней границы мощности фазового шума, Δf_2 — ширина нижней границы мощности фазового шума над общим уровнем шумов анализатора и приёмника (spectrum analyzer and receiver noise); FNL — максимальный уровень мощности фазовых шумов, превышающий шумов анализатора и приёмника; W_{max} — максимальное значение мощности измеряемого сигнала.

Качественная оценка сигнала состояла в определении коэффициента F — формфактора спектральной линии. Коэффициент F определялся из выражения:

$$F = \frac{2W_{max}RBW}{FNL(\Delta f_1 + \Delta f_2)},$$

где $W_{max}RBW$ — геометрическая площадь, равная произведению максимума мощности измеряемого сигнала центральной частоты на полосу разрешения анализатора спектра; $FNL(\Delta f_1 + \Delta f_2)/2$ — геометрическая площадь трапеции, равная произведению величины FNL на полусумму Δf_1 и Δf_2 . Согласно этой формуле неравенство $F_m > F_n$ означает,

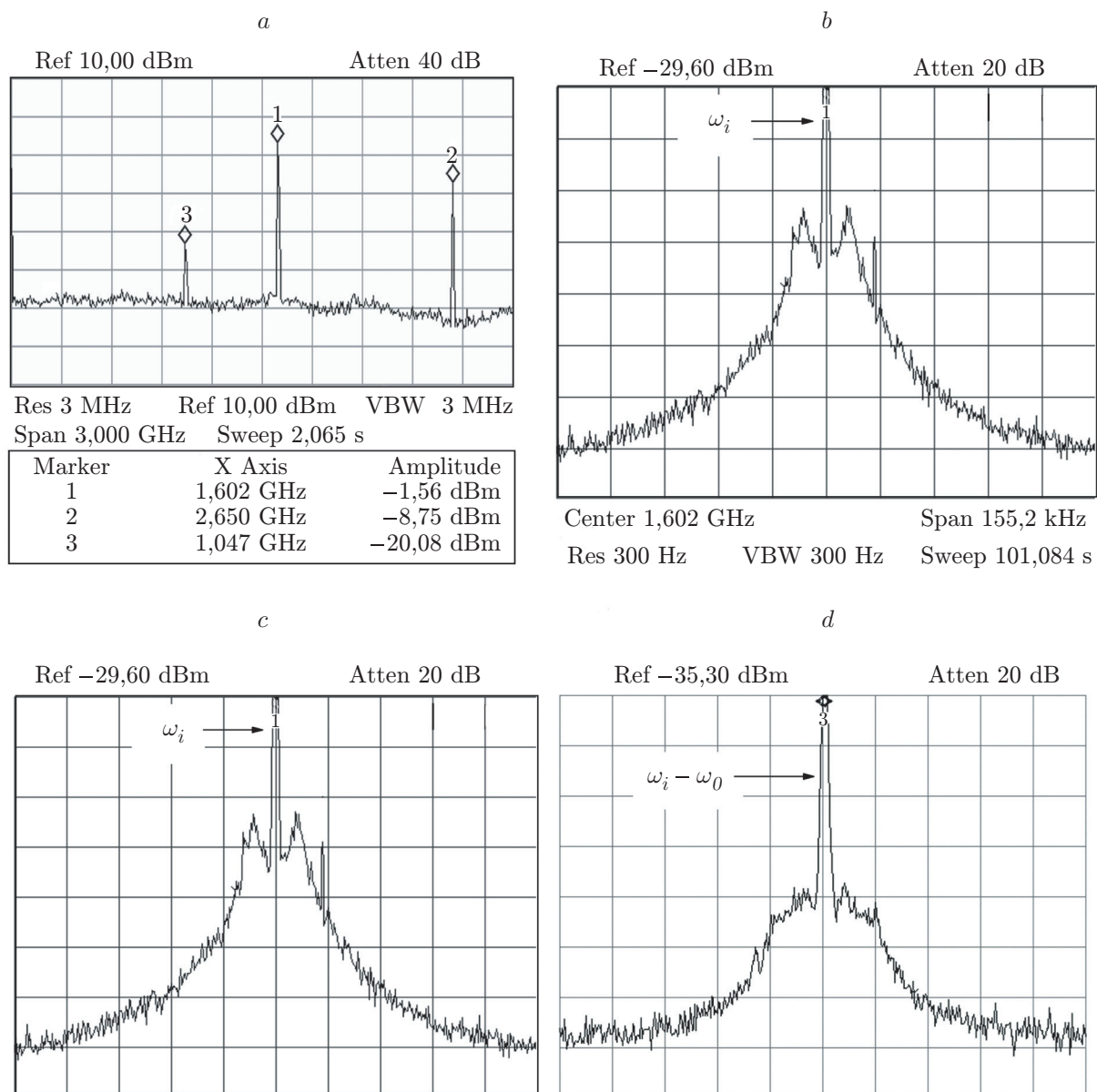


Рис. 2. Спектральный состав сигналов на выходе ПРМ: *a* — развёрнутый спектр сигналов на выходе ПРМ; *b* — спектр сигнала опорной частоты $\omega_0 = 1,602$ ГГц; *c* — спектр преобразуемого сигнала $\omega_i = 2,650$ ГГц; *d* — спектр сигнала разностной частоты $\omega_i - \omega_0 = 1,048$ ГГц

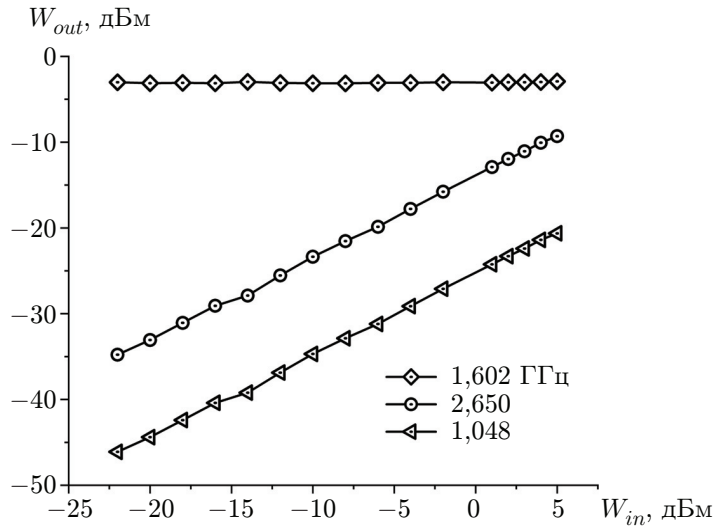


Рис. 3. Зависимость мощности СВЧ-сигнала на выходе смесителя $W_{out}(\omega_0, \omega_i, \omega_i - \omega_0)$ от мощности $W_{in}(\omega_0, \omega_i)$ на его входе

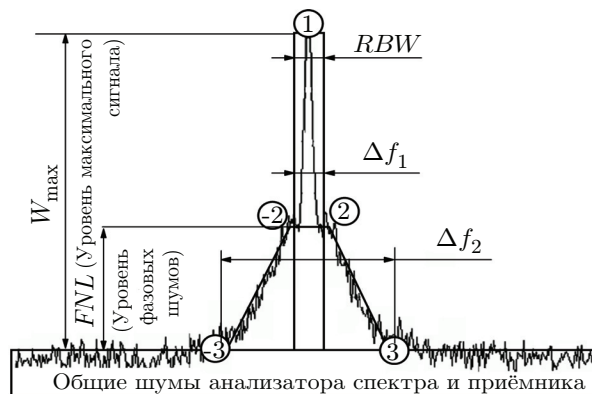


Рис. 4. Структура спектра СВЧ-сигнала

что спектральный состав сигнала с центральной частотой ω_m отличается от сигнала с частотой ω_n меньшим уровнем мощности фазовых шумов на единицу спектрального интервала вблизи центральной частоты, что означает лучшее качество сигнала ω_m по сравнению с сигналом ω_n .

Значение величины W_{max} определялось по точке маркера (1) на спектрограмме, полученной с помощью анализатора спектра; ширина спектра Δf_1 — по точкам маркеров (-2, 2); ширина спектра Δf_2 — по точкам маркеров (-3, 3). Значение RBW при измерениях, результаты которых приведены на рис. 2, равнялось 300 Гц, что соответствовало максимальной разрешающей способности анализатора. Величина FNL определялась по разности между максимальным уровнем мощности фазового шума спектральной линии (маркеры (-2) и (2)) и уровнем суммарной мощности шума анализатора спектра и оптоволоконного приёмника ПРМ (маркеры (-3) и (3)).

В табл. 1 приведены значения величин W_{max} , RBW , FNL , Δf_1 , Δf_2 для частот $\omega_0 = 1,601$, $\omega_i = 2,65$, $\omega_i - \omega_0 = 1,048$ ГГц.

Как видно из табл. 1, значения коэффициентов F для преобразуемой частоты ω_i и разностной частоты $(\omega_i - \omega_0)$ на выходе модулятора практически совпадают, несмотря на то, что коэффициент F для опорной частоты ω_0 показывает на худший спектральный состав

Таблица 1

Результаты измерений $W_{\max}$, RBW , FNL , Δf_1 , Δf_2 для спектрограмм (см. рис. 2)

Параметры	$\omega_0 = 1,601$ ГГц	$\omega_i = 2,650$ ГГц	$\omega_i - \omega_0 = 1,055$ ГГц
$W_{\max}$, дБм	-2,67	-9,30	-21,68
RBW , Гц	300	300	300
FNL , дБм	-52,28	-56,08	-65,63
Δf_1 , Гц	13 398	7403	12 202
Δf_2 , Гц	131 911	42 749	50 735
F	122,80	237,72	236,80

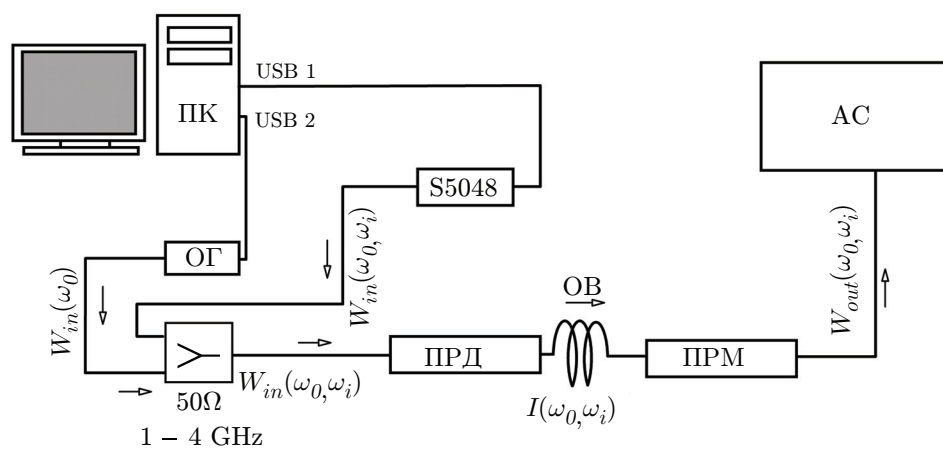


Рис. 5. Схема экспериментальной установки без ЭОМ

Таблица 2

Результаты измерений $W_{\max}$, RBW , FNL , Δf_1 , Δf_2 для схемы без ЭОМ

Параметры	$\omega_0 = 1,601$ ГГц	$\omega_i = 2,650$ ГГц
$W_{\max}$, дБм	-2,84	-9,46
RBW , Гц	300	300
FNL , дБм	-46,9	52,42
Δf_1 , Гц	14 332	7644
Δf_2 , Гц	85 356	41 115
F	154,47	243,5

по уровню мощности фазовых шумов на единицу спектрального интервала.

С целью определения степени влияния электрооптического модулятора на значения коэффициентов F дополнительно были проведены измерения для опорной и преобразуемой частот без участия модулятора в схеме измерений, которые были проведены с целью определения степени влияния электрооптического модулятора на значение коэффициентов F . Схема экспериментальной установки для таких измерений приведена на рис. 5. Схема содержит приборы, используемые в схеме на рис. 1, и стандартный радиочастотный разветвитель 50 Ом с полосой пропускания 14 ГГц.

В ходе измерений определялись значения коэффициента F для сигналов с частотами $\omega_0 = 1,601$, $\omega_i = 2,65$ ГГц. При измерениях мощности сигналов $W_{in}(\omega_i)$, $W_{in}(\omega_0)$ устанавливались такими, чтобы на выходе ПРМ анализатором спектра регистрировались сигналы с выходной мощностью, близкой к значениям $W_{\max}$, приведённым в табл. 1. Результаты измерений даны в табл. 2.

Заключение. Сравнение значений F для сигналов с частотами ω_0 и ω_i , представленных в табл. 1 и 2, позволяет сделать следующие выводы.

1. Спектральный состав радиочастотных сигналов разностной частоты ($\omega_i - \omega_0$) на выходе смесителя на основе волоконного ЭОМ интенсивности определяется качественным составом сигналов преобразуемой частоты ω_i , включая интенсивность сигнала на центральной частоте и спектральную мощность фазового шума вблизи этой частоты.

2. Качественный спектральный состав сигнала опорной частоты ω_0 смесителя незначительно влияет на спектральный состав сигналов разностной частоты на выходе смесителя, что связано с особенностью работы ЭОМ интенсивности по типу волоконного интерферометра Маха — Цендера при смешивании сигналов ω_0 и ω_i в нелинейной оптической среде модулятора.

3. Для минимизации уровня фазовых шумов при работе смесителя на основе ЭОМ интенсивности в режиме генерации разностной частоты требуются дополнительные экспериментальные и теоретические исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ковш И. Б.** Производство продукции фотоники в России // Лазер-Информ. 2016. № 3-4. С. 8–11. URL: <https://bibl.laser.nsc.ru/download/448-570all.pdf> (дата обращения: 16.10.2016).
2. **Key Data.** Photonics Industry Report 2013. URL: https://www.photonikforschung.de/media/branche/pdf/UT_Photonik_Handout_English_bf_abA7.pdf (дата обращения: 27.12.2016).
3. **Галеев Р. Г., Втюрин А. Н., Реушев М. Ю.** Компоненты волоконно-оптических линий связи — перспективы и направление исследований // Успехи современной радиоэлектроники. 2015. № 10. С. 162–166.
4. **Пономарев А. К., Романов А. А., Тюлин А. Е.** Фотонные технологии в космическом приборостроении // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2016. 3, вып. 2. С. 4–23.
5. **Сох С. Н., III.** Analog Optical Links: Theory and Practice // Cambridge: Cambridge University Press, 2004. 302 p.
6. **Варданян В. А.** Оценка количества спектральных и поднесущих каналов в волоконно-оптических сетях доступа при однополосной оптической модуляции // Автометрия. 2016. 52, № 3. С. 116–124. DOI: 10.15372/AUT20160315.
7. **Петров В. М., Агрузов П. М., Лебедев В. В. и др.** Широкополосные интегрально-оптические модуляторы: достижения и перспективы развития // УФН. 2021. 191, № 7. С. 760–780.
8. **Владимиров В. М., Реушев М. Ю., Древин К. А., Семенкова А. А.** Исследование работы конвертора сигналов СВЧ-диапазона на основе волоконного электрооптического модулятора интенсивности // Автометрия. 2022. 58, № 3. С. 106–111. DOI: 10.15372/AUT20220312.
9. **Goyal P.** Theory and Practical Considerations for Measuring Phase Noise Better Than – 165 dBc/Hz: Part I // Microwave Journal. 2004. 47, N 10. P. 62–78.
10. **Goyal P.** Theory and Practical Considerations for Measuring Phase Noise Better Than – 165 dBc/Hz: Part II // Microwave Journal. 2004. 47, N 11. P. 70–90.
11. **Белоусов А. А., Вольхин Ю. Н., Гамиловская А. В. и др.** О применении методов и средств радиофотоники для обработки сигналов дециметрового, сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн // Прикладная фотоника. 2014. 1, № 1. С. 65–86.

Поступила в редакцию 02.10.2023

После доработки 22.10.2023

Принята к публикации 23.10.2023