

Научная статья

УДК 535.8+621.317.75+621.38+621.391.64+681.2.082+681.785

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-12-40-45>

Оценка эффективности применения высокоразрешающих анализаторов оптического спектра для характеристики аналоговых оптических трактов с внешней модуляцией

Всеволод Алексеевич Небавский^{1✉}, Ростислав Сергеевич Стариков²

^{1, 2} Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

¹nozaler@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-3515-5822>

²rstarikov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7369-1565>

Аннотация. Рассмотрена характеристика аналоговых оптических трактов и показано, что особый практический интерес представляют изучение, учёт и снижение нелинейностей, вносимых элементами оптического тракта в выходной сигнал при фотодетектировании. Приведены методы анализа нелинейных искажений аналоговых оптических трактов с внешней модуляцией и предложено применять для их характеристики высокоразрешающие анализаторы оптического спектра. В методах анализа используются результаты измерений оптического спектра, по которым характеризуется непосредственно оптический сигнал тракта без учёта влияния вносимых при фотодетектировании нелинейностей. Представлена аналитическая модель процесса модуляции монохроматического светового излучения двухтоновым радиочастотным сигналом с помощью электрооптического модулятора Маха-Цендера. Рассмотрена взаимосвязь нелинейных спектральных составляющих оптического модулированного и радиочастотного сигналов на выходе фотодетектора. Экспериментально исследованы оптический и радиочастотный спектры сигналов АОТ на специально собранном измерительном стенде. Приведены результаты экспериментов по измерению свободного динамического диапазона аналоговых оптических трактов с применением высокоразрешающих радиочастотного и оптического спектроанализаторов. Обсуждены возможные причины деградации свободного динамического диапазона в процессе фотодетектирования. С использованием аналитической модели нелинейностей модулятора Маха-Цендера экспериментально оценён вклад нелинейности фотодетектирования в искажения выходного сигнала оптического тракта и продемонстрированы различия мощности продуктов интермодуляции для сверхвысокочастотных фотодиодов двух типов.

Ключевые слова: микроволновая фотоника, радиофотоника, аналоговый оптический тракт, модулятор Маха-Цендера, нелинейные искажения, свободный динамический диапазон

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), грант № 20-37-90119.

Для цитирования: Небавский В. А., Стариков Р. С. Оценка эффективности применения высокоразрешающих анализаторов оптического спектра для характеристики аналоговых оптических трактов с внешней модуляцией // Измерительная техника. 2022. № 12. С. 40–45. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-12-40-45>

Testing high-resolution optical spectrum analyzers for characterization analog optical links with external modulation

Vsevolod A. Nebavskiy^{1✉}, Rostislav S. Starikov²

^{1, 2} National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

¹nozaler@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-3515-5822>

²rstarikov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7369-1565>

Abstract. The characterization of analog optical links is considered and it is noted that the study, accounting and reduction of nonlinearities introduced by the elements of the optical link into the output signal during photodetection are of particular practical interest. Methods for analyzing nonlinear distortions of analog optical paths with external modulation are presented and it is proposed to use high-resolution optical spectrum analyzers for their characterization. The analysis methods use the results of measurements of the optical spectrum, which directly characterize the optical signal of the link without taking into account the influence of nonlinearities introduced during photodetection. An analytical model of the process of modulation of monochromatic light radiation by a two-tone radio frequency signal using an electro-optical Mach-Zehnder modulator is presented. The relationship between the nonlinear spectral components of the optical modulated and radio frequency signals at the photodetector output is considered. The optical and radio frequency spectra of AOL signals were experimentally studied on a specially assembled measuring stand. The results of experiments on measuring SFDR of analog optical paths using high-resolution radio frequency and optical spectrum analyzers are presented. Possible reasons for the degradation of the SFDR during photodetection are discussed. Using an analytical model of nonlinearities of the Mach-Zehnder modulator, the contribution of the nonlinearity of photodetection to the distortion of the output signal of the optical link is experimentally estimated and the differences in the power of intermodulation products for microwave photodiodes of two types are demonstrated.

Keywords: Microwave photonics, analog optical link, Mach-Zehnder modulator, nonlinear distortions, spurious free dynamic range

Financial Support: The reported study was funded by Russian Foundation for Basic Research (RFBR), project number 20-37-90119.

Введение. Одна из важнейших проблем построения сверхширокополосных систем микроволновой фотоники – уменьшение нелинейных искажений передаваемых и обрабатываемых сигналов. Базовым элементом любой системы микроволновой фотоники является аналоговый оптический тракт (АОТ); различают АОТ с прямой и с внешней модуляциями светового сигнала [1, 2]. В настоящее время во многих случаях предпочтение отдаётся АОТ с внешней модуляцией. К источникам нелинейных искажений данных АОТ относятся нелинейности передаточных характеристик модуляторов, фотодетекторов и усиливающих элементов. В качестве средств модуляции света в таких оптических трактах наиболее распространены модуляторы Маха-Цендера (ММЦ). Серийные коммерческие образцы ММЦ обеспечивают широкие (до 100 ГГц) полосы рабочих частот, а также обладают приемлемыми электрическими и оптическими характеристиками. На практике часто именно нелинейность передаточной характеристики ММЦ вносит наибольший вклад в суммарные нелинейные искажения выходного сигнала АОТ. Уменьшить нелинейные искажения ММЦ можно путём точного контроля рабочей точки модулятора и применения методов линеаризации сигналов АОТ, методам линеаризации посвящено значительное количество работ [2–18].

При характеристике нелинейных искажений АОТ используют стандартный тест с двумя гармоническими сигналами с малой отстройкой частоты [19]. При этом анализируется радиочастотный спектр электрического сигнала АОТ на выходе, что препятствует непосредственному анализу работы модулятора и других оптических компонентов тракта. Появление новейших анализаторов оптического спектра с разрешением в десятки мегагерц предоставляет новые возможности характеристики АОТ и, в частности, обеспечивает получение оценок нелинейных искажений непосредственно светового сигнала, исключая вносимые при фотодетектировании нелинейности.

Цель настоящей статьи – оценка эффективности применения высокоразрешающих анализаторов оптического спектра для характеристики нелинейных искажений сигналов АОТ с внешней модуляцией. Характеризация основана на результатах измерений и анализа радиочастотного и оптического спектров сигналов АОТ.

Нелинейные искажения АОТ с внешней модуляцией.

Схема АОТ с внешней модуляцией представлена на рис. 1. В качестве источника светового излучения в зависимости от назначения тракта можно использовать узко- и широкополосные лазеры. Например, лазеры, работающие в режиме синхронизации мод, применяются при построении трактов с оптической выборкой. В настоящей работе рассмотрен монохроматический случай, но при необходимости его можно обобщить и на случаи широкополосного оптического излучения с учётом хроматизма элементов АОТ.

Рассмотрим основные метрики THD , $SFDR$, описывающие нелинейные искажения АОТ. Первая метрика представляет собой отношение суммарной мощности нелинейных

составляющих к основной гармонике сигнала (total harmonic distortions)

$$THD = -10 \lg \frac{P_{nl}}{P_l} = -10 \lg \frac{P_2 + P_3 + P_4 + \dots}{P_l}, \quad (1)$$

где P_{nl} – мощности кратных гармонических составляющих, порождённых основной гармоникой мощностью P_l .

Также к такой метрике может быть добавлена мощность шума P_N :

$$THD + N = -10 \lg \frac{P_{nl} + P_N}{P_l}. \quad (2)$$

Вторая метрика – свободный динамический диапазон (spurious free dynamic range)

$$SFDR_n [\text{дБ}] = \frac{n-1}{n} \left\{ OIP_n [\text{дБ}] - P_N \left[\frac{\text{дБ}}{\text{Гц}} \right] - 10 \lg B [\text{Гц}] \right\}, \quad (3)$$

где $OIP_n [\text{дБ}]$ (output interception point) – значения мощности на пересечении экстраполированных малых сигнальных откликов по основной частоте и по искажениям n -го порядка; B – полоса рабочих частот системы.

Параметр $SFDR$ можно определить как диапазон мощностей входного сигнала, при котором искажения системы находятся на уровне шумов.

Описав процессы, происходящие в типовом АОТ (см. рис. 1), можно понять какие факторы влияют на образование нелинейных искажений. Поле на выходе модулятора в случае входного монохроматического излучения описывается выражением

$$E_{\text{вых}} = E_0 \left\{ a \sin(\omega_0 t) + b \sin \left(\omega_0 t + \pi \frac{V_{\text{см}} + V_{\text{п}}}{V_{\pi}} \right) \right\}, \quad (4)$$

где a , b имеют смысл коэффициентов затухания в плечах модулятора, причём $a^2 + b^2 \leq 1$; E_0 , ω_0 – амплитуда и несущая частота входного излучения; $V_{\text{см}}$ – постоянное напряжение смещения; $V_{\text{п}}$ – переменное напряжение модулирующего сигнала; V_{π} – полуволновое напряжение модулятора.

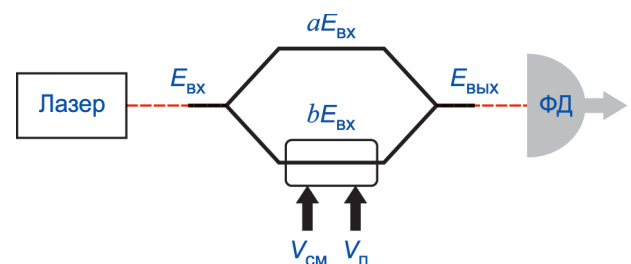


Рис. 1. Схема аналогового оптического тракта с модулятором Маха-Цендера (ФД – фотодиод)

Fig. 1. Schematic diagram of an analogue optical link with Mach-Zender modulator (PD – photodiode)

Постоянный набег фазы $\phi_0 = \pi V_{\text{см}}/V_{\pi}$ принято подбирать исходя из режима работы модулятора. Переменная составляющая в случае подачи двухтонового с частотами ω_1, ω_2 сигнала выражается как

$$\phi = m_1 \sin(\omega_1 t) + m_2 \sin(\omega_2 t), \quad (5)$$

где m_1, m_2 – глубины модуляции.

С учётом (5) выражение (4) для выходного поля можно разложить на спектральные составляющие:

$$E(t) = E_0 \left\{ a \sin(\omega_0 t) + b \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} J_n(m_1) J_k(m_2) \sin(\omega_0 t + (n\omega_1 + k\omega_2)t + \phi_0) \right\}, \quad (6)$$

где J_n, J_k – функции Бесселя первого рода n -го и k -го порядков.

Мощности несущей выходного поля P_{ω_0} и боковых гармоник $P_{\omega_0 + n\omega_1 + k\omega_2}$ соответственно описываются выражениями

$$P_{\omega_0} = E_0^2 \left\{ \frac{a^2}{2} + \frac{b^2 J_0^2(m_1) J_0^2(m_2)}{2} + ab J_0(m_1) J_0(m_2) \cos \phi_0 \right\}; \quad (7)$$

$$P_{\omega_0 + n\omega_1 + k\omega_2} = E_0^2 b^2 0,5 J_n^2(m_1) J_k^2(m_2); \quad n, k = 0, 1, 2, \dots, \quad (8)$$

где J_0 – функция Бесселя нулевого порядка.

Обозначим $\mathfrak{J}_{nk} = J_n^2(m_1) J_k^2(m_2)$ в выражениях (7), (8), которые зависят от свойств модулирующих сигналов. На рис. 2 приведён оптический спектр модулированного оптического излучения. Согласно выражениям (7), (8) и рис. 2 напряжение постоянного смещения, задающего рабочую точку модулятора, определяет разность фаз между несущей в его плечах, а, следовательно, мощность несущей, но не мощность боковых модуляционных составляющих на его выходе. Действительно, в силу закона сохранения энергии мощность, которая «уходит» в модулированную составляющую, отнимается из несущей.

Рассмотрим детектирование модулированного излучения фотодиодом, для простоты предположив, что он

работает в линейном режиме. Фототок можно описать выражением

$$i(t) = RT^{-1} \int_t^{t+T} E^2(\tau) d\tau, \quad (9)$$

где R – приведённая чувствительность; $T^{-1} = \Delta f$ – ширина рабочей полосы фотодиода.

На фотодиоде по сути наблюдается интерференция напряжённости полей двух плечей модулятора:

$$i = i_1 + i_{12} + i_2. \quad (10)$$

Фототок i_2 , обусловленный модулированной составляющей поля, запишем в виде

$$\begin{aligned} i_2 &= E_0^2 b^2 RT^{-1} \times \\ &\times \int_t^{t+T} \sin^2((\omega_0 \tau + m_1 \sin(\omega_1 \tau) + m_2 \sin(\omega_2 \tau) + \phi_0)) d\tau = \\ &= E_0^2 b^2 R 0,5 T^{-1} \times \\ &\times \int_t^{t+T} 1 - \cos^2((\omega_0 \tau + m_1 \sin(\omega_1 \tau) + m_2 \sin(\omega_2 \tau) + \phi_0)) d\tau = \\ &= E_0^2 b^2 R 0,5 T^{-1}. \end{aligned} \quad (11)$$

Из выражений (10), (11) следует, что модуляция содержится только в интерференционном члене:

$$\begin{aligned} i_{12} &= 2RT^{-1} \int_t^{t+T} E_1 E_2(\tau) d\tau = abRE_0^2 \times \\ &\times \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} T^{-1} \int_t^{t+T} J_n(m_1) J_k(m_2) \cos((\omega_1 n + \omega_2 k)t + \phi_0) d\tau = \\ &= abRE_0^2 \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \frac{\sin[0,5T(n\omega_1 + k\omega_2)]}{0,5T(n\omega_1 + k\omega_2)} J_n(m_1) J_k(m_2) \times \\ &\times \cos((\omega_1 n + \omega_2 k)t + \phi_0 + \phi_{nk}). \end{aligned} \quad (12)$$

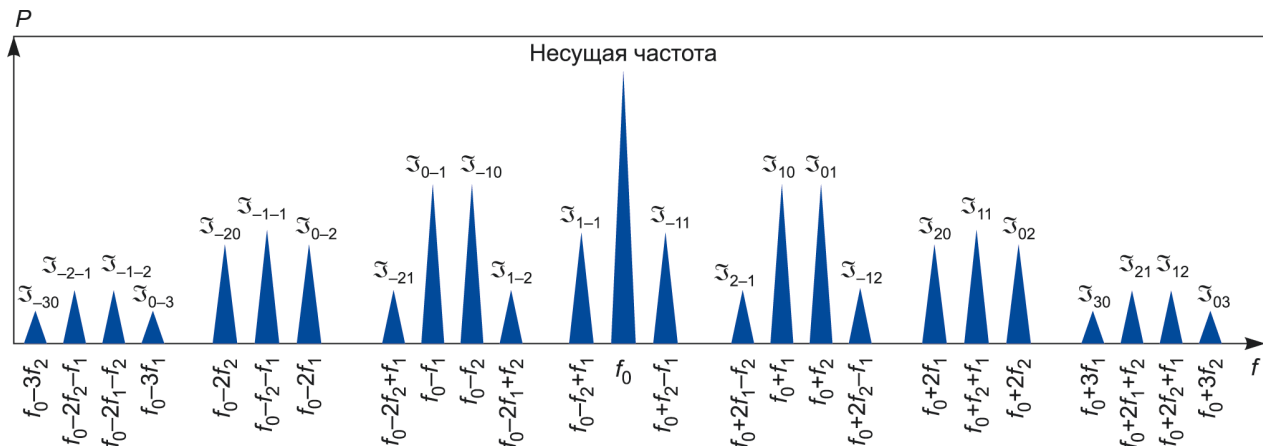


Рис. 2. Оптический спектр модулированного сигнала

Fig. 2. Optical spectrum of the modulated signal

Величина $H_{nk} = \frac{\sin[0,5T(n\omega_1 + k\omega_2)]}{0,5T(n\omega_1 + k\omega_2)}$ обусловлена формой функции спектральной чувствительности фотодетектора, а $\phi_{nk} = 0,5T(n\omega_1 + k\omega_2)$ – фазовой задержкой этой функции. Общее выражение для фототока, определяемого интерференционным членом выражения для i_{12} , разбивается на нечётные $i_{нч}$ и чётные $i_{ч}$ гармонические составляющие и постоянную i_{00} :

$$i_{12} = i_{00} + i_{ч} + i_{нч}; \quad (13)$$

$$i_{00} = \cos\phi_0 abRE_0^2 J_0(m_1) J_0(m_2); \quad (14)$$

$$i_{ч} = 2\cos\phi_0 abRE_0^2 \times \sum_{n+k(\text{чётное})}^{+\infty} H_{nk} J_n(m_1) J_k(m_2) \cos((\omega_1 n + \omega_2 k)t + \phi_{nk}); \quad (15)$$

$$i_{нч} = 2\sin\phi_0 abRE_0^2 \times \sum_{n+k(\text{нечётное})}^{+\infty} H_{nk} J_n(m_1) J_k(m_2) \sin((\omega_1 n + \omega_2 k)t + \phi_{nk}). \quad (16)$$

Нечётные или чётные гармонические составляющие подавляются в случае $\phi_0 = \pi n$, $n=0,1,2, \dots$, или $\phi_0 = \pi/2 + \pi n$, $n=0,1,2, \dots$. Мощности гармонических составляющих $P_{n\omega_1 + k\omega_2}$ фотодетектированного сигнала i в соответствии с выражениями (10)–(16) (рис. 3) определяются как

$$P_{n\omega_1 + k\omega_2} = \begin{cases} 2a^2 b^2 E_0^4 R^2 \cos^2 \phi_0 H_{nk}^2 \mathfrak{I}_{nk}, & n+k - \text{чётное}; \\ 2a^2 b^2 E_0^4 R^2 \sin^2 \phi_0 H_{nk}^2 \mathfrak{I}_{nk}, & n+k - \text{нечётное}; \\ E_0^4 R^2 \left(\frac{a^2 + b^2}{2} + ab J_0(m_1) J_0(m_2) \cos \phi_0 \right)^2, & n, k = 0. \end{cases} \quad (17)$$

Тогда коэффициент нелинейных искажений (без учёта нелинейностей фотодетектора) исходя из выражения (17) примет вид

$$THD = 10 \lg \left\{ \left(\cos^2 \phi_0 \sum_{n\omega_1 + k\omega_2 (\text{чётное})} H_{nk}^2 \mathfrak{I}_{nk} + \sin^2 \phi_0 \sum_{n\omega_1 + k\omega_2 (\text{нечётное})} H_{nk}^2 \mathfrak{I}_{nk} \right) \times \left[\sin^2 \phi_0 (H_{01}^2 \mathfrak{I}_{01} + H_{01}^2 \mathfrak{I}_{10}) \right]^{-1} \right\}.$$

Таким образом, вклад нелинейных составляющих радиочастотного спектра в выражении (17) определяются мощностями нелинейных спектральных составляющих оптического спектра (7), (8) и напряжением постоянного смещения.

Экспериментальное исследование оптического и радиочастотного спектров сигналов АОТ. Для экспериментов собран измерительный стенд, представленный на рис. 4. Источник оптического излучения – узкополосный перестраиваемый лазер TWL-C-HP-B-M (Optilab, США) с полосой

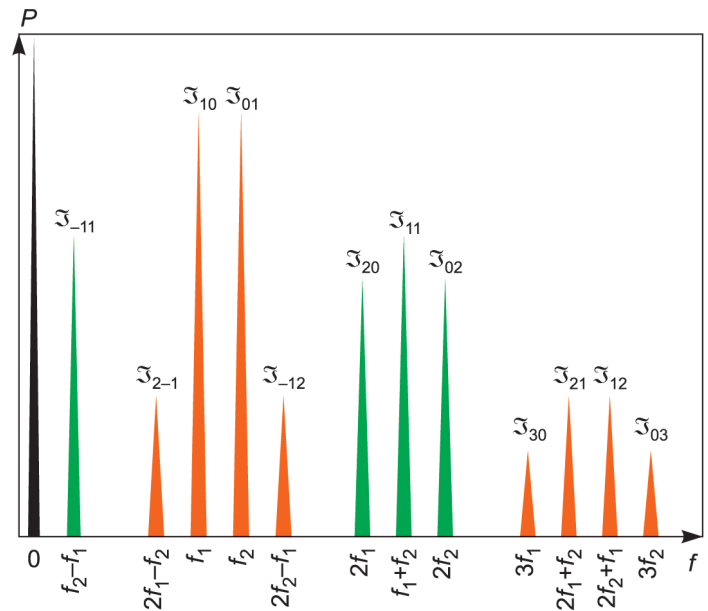


Рис. 3. Спектр двухтонового сигнала: рабочая точка модулятора в максимуме или минимуме (зелёный спектр); рабочая точка модулятора в квадратуре (оранжевый спектр)

Fig. 3. Spectrum of a two-tone signal: the operating point of the modulator is at maximum or minimum (Green); Modulator operating point in quadrature (Orange)

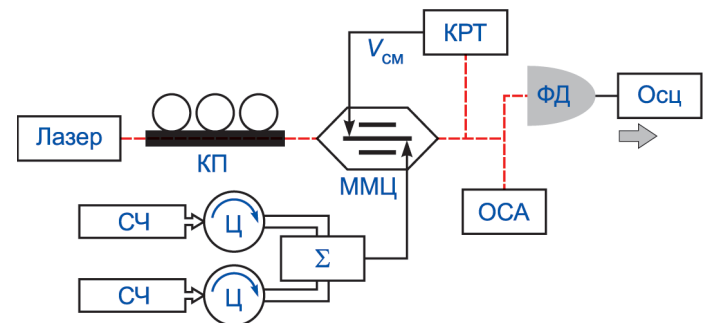


Рис. 4. Схемы измерения оптического и электрического спектров модулированного сигнала:

КП, КРТ – контроллеры поляризации и рабочей точки соответственно; Ц – циркулятор; Σ – сумматор сверхвысокочастотных сигналов; СЧ – синтезатор частот; ФД – фотодиод; Осц – осциллограф; ОСА – оптический спектроанализатор; ММЦ – модулятор Маха-Цендера

Fig. 4. Schemes for measuring the optical and electrical spectra of the modulated signal:

PC – polarization controller; BC – bias point controller; C – circulator; Σ – microwave signal adder; FS – frequency synthesizer; PD – photodiode; Osc – oscilloscope; OSA – optical spectrum analyzer; MZM – Mach-Zehnder modulator

перестройки 1527–1567 нм, максимальной мощностью около 10 дБм и шириной спектра оптического излучения менее 10 кГц. Тестовые радиосигналы формировались с помощью сложения в сумматоре сверхвысокочастотных сигналов двух источников – синтезаторов UNO-11M-RF (ООО «Адвантех», Россия), работающих в диапазоне 0,1–13 ГГц. Для подавления зеркальных составляющих сигналов примене-

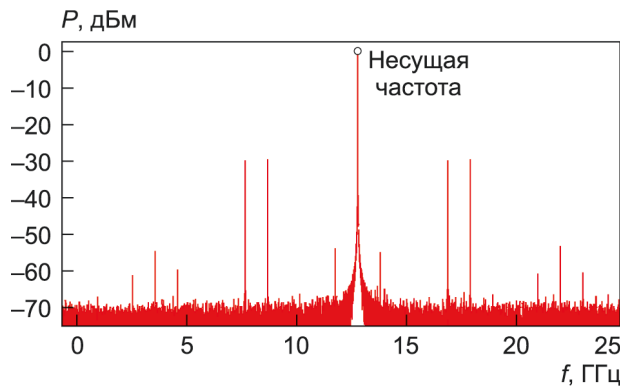


Рис. 5. Оптический спектр двухтонового сигнала (частоты 5; 6 ГГц), измеренный на выходе модулятора Маха-Цендера; несущая частота лазера на длине волны 1550 нм

Fig. 5. Optical spectrum of a two-tone signal at 5 and 6 GHz, measured at the output of a Mach-Zehnder modulator. Laser carrier at a wavelength of 1550 nm

ны циркуляторы. Тестовый двухтоновый сигнал подавался в модулятор LMB-20 (Optilab, США), обеспечивающий рабочую полосу частот 0,01–20 ГГц. На входе модулятора поляризация излучения лазера управлялась контролером поляризации. Для анализа модулированного оптического излучения использован бриллюэновский анализатор спектра высокого разрешения BOSA 400 (Aragon Photonics, Испания) с полосой анализа 1525–1565 нм, разрешением 10 МГц и динамическим диапазоном измерений 80 дБ. Оптический сигнал тракта регистрировался либо фотодиодом ДФДМШ40-012 (НПФ «Дилаз», Россия) с полосой пропускания 0,01–12 ГГц и диапазоном спектральной чувствительности 980–1650 нм, либо высоколинейным фотодиодом Optilab PD-50-M (Optilab, США) с полосой пропускания 0–50 ГГц и диапазоном спектральной чувствительности 1200–1650 нм. Спектр радиочастотного сигнала фотодетектора анализировался путём стандартного быстрого преобразования Фурье с помощью осциллографа DSAZ334A (Keysight, США) с истинной аналоговой полосой пропускания 33 ГГц. В силу низкой энергетики боковых составляющих модулированного сигнала анализ нелинейных составляющих оптического спектра был несколько ограничен по точности (рис. 5). Перекрёстные составляющие на частотах 3-го порядка скрыты за шумами, однако доступны перекрёстные составляющие 2-го порядка. Значения мощности для перекрёстных составляющих 3-го порядка в случае равенства мощностей фундаментальных составляющих можно вычислить по формуле (8). Для случая, представленного на рис. 6, разница основных составляющих и нелинейных искажений 3-го порядка (т. е. свободный динамический диапазон $SFDR$) составила 55 дБ. После фотодетектирования это значение уменьшилось до 51 и 44 дБ при использовании фотодиодов PD-50-M (Optilab, США) и ДФДМШ40-012 (НПФ «Дилаз», Россия) соответственно. Такое уменьшение измеренного значения $SFDR$ может быть обусловлено тремя причинами: неточностью при контроле рабочей точки ММЦ; собственными нелинейностями фотодиода; нелинейностями измерительного устройства.

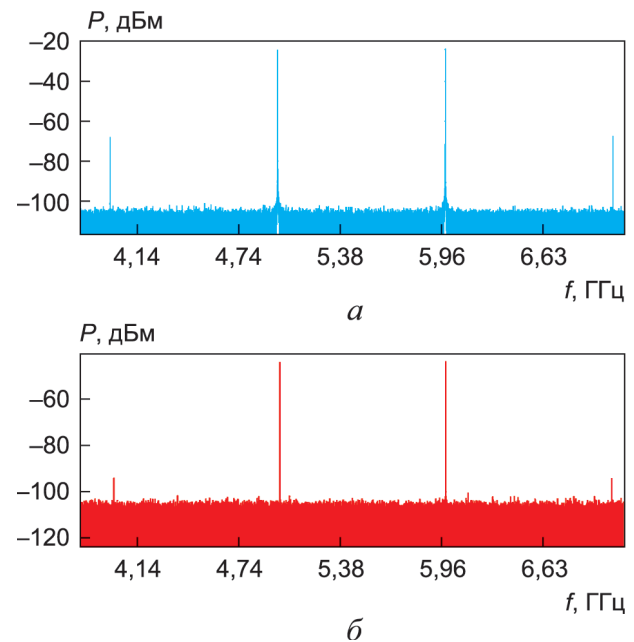


Рис 6. Электрический спектр двухтонового сигнала (частоты 5; 6 ГГц) в окрестности перекрёстных нелинейных искажений 3-го порядка, измеренный на выходах фотодиодов ДФДМШ40-012 (а) и Optilab PD-50-M (б)

Fig. 6. The electrical spectrum of a two-tone signal at frequencies of 5 and 6 GHz, measured in the area of third order intermodulation products, measured at the output of a DFDMSH40-012 photodiode (a) and an Optilab PD-50-M photodiode (b)

Если нелинейность оценивается по искажениям 3-го порядка, то первую причину можно исключить. Кроме того, в случае высокой мощности электрического сигнала на выходе фотодиода (как в представленном эксперименте с фотодетектором ДФДМШ40-012) для устранения влияния нелинейности измерительного устройства необходимо использовать существующие широко распространённые сверхвысокочастотные спектроанализаторы высокого класса. Кроме того, для АОТ с «длинными линиями» подобные измерения можно проводить отдельно после модуляции, отдельно после прохождения оптоволокна, отдельно после фотодетектирования и усиления. Заметим также, что подобный анализ для АОТ с прямой модуляцией также возможен на основе моделей генерационных характеристик модулируемых лазерных источников. Таким образом, имеется возможность независимого анализа деградации свободного динамического диапазона, происходящей на отдельных элементах АОТ.

Заключение. Характеризация нелинейностей сигналов аналоговых оптических трактов с внешней модуляцией непосредственно на разных компонентах тракта может быть обеспечена эффективным применением высокоразрешающих оптического и радиочастотного спектроанализаторов. С использованием аналитической модели нелинейностей модулятора Маха-Цендера получены экспериментальные оценки вклада фотодетектирования в нелинейность выходного сигнала тракта, продемонстрированы различия

мощности интермодуляционных искажений 3-го порядка для высоколинейного и обычного сверхвысокочастотного фотодиодов. Следует отметить некоторое ограничение рассмотренных методов анализа нелинейных искажений аналоговых оптических трактов с внешней модуляцией, связанное с относительно низкими значениями динамического диапазона измерений современных высокоразрешающих оптических спектроанализаторов (в настоящее время типично до 80 дБ) по сравнению с доступным динамическим диапазоном радиочастотных спектроанализаторов (более 120 дБ). Несмотря на это, по мнению авторов настоящей статьи, опробованные в данной работе методы характеристики аналоговых оптических трактов и реализующие эти методы высокоразрешающие спектроанализаторы можно успешно применять при решении широкого ряда задач микроволновой фотоники.

Список источников / References

1. Cox C. H., *Analog Optical Links*, Cambridge, Cambridge University Press, 2009, 288 p.
2. Urlick V. J., McKinney J. D., Williams K. J., *Fundamentals of microwave photonics*, NY, Wiley, 2015, 496 p.
3. Urlick V. J. et al., Analog fiber-optic links employing cascaded phase modulation stages, *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 2012, vol. 54, pp. 2797–2801.
4. Dai Y. et al., *Opt. Express*, 2017, vol. 25, no. 17, pp. 20770–20779. <https://doi.org/10.1364/OE.25.020770>
5. Zhu G., Liu W., Fetterman H. R., *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2009, vol. 21, no. 21, pp. 1627–1629. <https://doi.org/10.1109/LPT.2009.2031166>
6. Li S. et al., *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2010, vol. 22, no. 24, pp. 1775–1777. <https://doi.org/10.1109/LPT.2010.2082516>
7. Li J. et al., *Opt. Lett.*, 2013, vol. 38, no. 21, pp. 4285–4287. <https://doi.org/10.1364/OL.38.004285>
8. Chan E. H. W., *Appl. Opt.*, 2014, vol. 53, no. 7, pp. 1306–1314. <https://doi.org/10.1364/AO.53.001306>
9. Liang D. et al., *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2015, vol. 27, no. 15, pp. 1639–1641. <https://doi.org/10.1109/LPT.2015.2433015>
10. Singh S., Arya S. K., Singla S., *Wireless Pers. Commun.*, 2020, vol. 114, no. 1, pp. 85–92. <https://doi.org/10.1007/s11277-020-07351-w>
11. Shaqiri S., Haxha S., Mirza T. N., *Opt. Express*, 2020, vol. 28, no. 12, 17521. <https://doi.org/10.1364/OE.394461>
12. Shaqiri S., Haxha S., *Elsevier Optik*, 2020, vol. 204, 164103. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.164103>
13. Mirza T. N., Haxha S., Dayoub I., *IEEE Systems Journal*, 2021, vol. 15, no. 4. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2021.3051394>
14. Prescod A., Dingel B.B., Madamopoulos N., *Proceedings SPIE OPTO: Integrated Optoelectronic Devices*, 2009, San Jose, USA, 2009, vol. 7234, Broadband Access Communication Technologies III, 72340E. <https://doi.org/10.1117/12.808230>
15. Dingel B., Madamopoulos N., Prescod A., *Opt. Commun. Technol. InTech 2017*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.69262>
16. Dingel B. et al., *Optics Communications*, 2011, vol. 284, no. 24, pp. 5578–5587. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2011.08.030>
17. Небавский В. А., Стариков Р. С., Черёмхин П. А. Методы линеаризации аналоговых оптических трактов // Успехи современной радиоэлектроники. 2021. Т. 75. № 12. С. 42–62. [Nebavskiy V. A., Starikov R. S., Cheremkhin P. A., Linearization methods for analog optical paths, *Journal Achievements of Modern Radioelectronics*, 2021, no. 12, pp. 42–62. (In Russ.)]
18. Prescod A. et al., *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2010, vol. 22, no. 17, pp. 1297–1299. <https://doi.org/10.1109/LPT.2010.2053842>
19. Kundert K., *Accurate and Rapid Measurement of IP 2 and IP 3*, The Designer's Guide Community, 2002, 13 p.

Статья поступила в редакцию 04.10.2022; одобрена после рецензирования 05.10.2022; принята к публикации 07.10.2022.
The article was submitted 04.10.2022; approved after reviewing 05.10.2022; accepted for publication 07.10.2022.