

УДК 535.8+621.3.087.92+621.371.399+681.7.068

Аналоговый оптический тракт с внешней модуляцией и с цифровым выходом для радиосигналов L -диапазона: экспериментальная оценка эффективного числа бит

© 2025 г. М. И. Казьмин, В. А. Небавский, Р. С. Стариков, Д. А. Третьяков, П. А. Черемхин

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, 115409, Россия

При передаче аналоговых сигналов по оптическим трактам качество сигнала ухудшается вследствие потерь, нелинейных искажений и шумов, что приводит к уменьшению эффективного числа бит в переданном сигнале, подвергнутом аналого-цифровому преобразованию. В настоящей статье представлены результаты экспериментального исследования функционирования сверхширокополосного сверхвысокочастотного аналогового оптического тракта с цифровым выходом. Целью работы является оценка качества передачи сигнала исследуемым трактом с точки зрения цифровых метрик. Выполнено сравнение результатов оцифровки сигнала генератора и этого же сигнала, переданного аналоговым оптическим трактом. При помощи анализа радиочастотных спектров оцифрованных сигналов оценен вклад оптической части системы в изменение качества сигнала. Измерением получено, что уровень нелинейных искажений и шума, вносимый в сигнал оптическим трактом, составил 14.7 дБ, что определяет уменьшение эффективного числа бит в оцифрованном сигнале тракта на 2.44.

Ключевые слова: микроволновая фотоника, радиофотоника, аналоговый оптический тракт, аналого-цифровое преобразование, эффективное число бит.

Введение

Технология передачи радиосигнала по оптоволокну (Radio over Fiber, RoF) [1, 2] находит все более широкое применение при построении радиотехнических систем различного назначения, а также выступает в качестве возможной основы для массовых технологий связи следующего поколения, таких как 5G и 6G [3–5]. Основной схмотехнической единицей RoF-систем является аналоговый оптический тракт (АОТ) [1], который, невосприимчив к электромагнитным помехам, имеет отличную электромагнитную совместимость, обеспечивает работу со сверхширокополосными сигналами. В рамках современных и разрабатываемых приложений важнейшей задачей является оцифровка сигнала АОТ [6].

В данной работе представлен СВЧ АОТ с внешней модуляцией с цифровым выходом, реализованный на базе коммерчески доступных компонентов и оснащенный на выходе платой с широкополосным АЦП. С целью оценки качества передачи сигнала проведено сравнение результатов оцифровки сигналов генератора, подаваемых на вход СВЧ АОТ, и выходных сигналов СВЧ АОТ.

Схема АОТ

Схема исследованного АОТ представлена на рис. 1. В качестве источника оптического излучения используется перестраиваемый по длине волны в $C+L$ диапазоне лазер TWL (Optilab, США). Лазер имеет внешнее устройство питания, управляемое при помощи персонального компьютера. Мощность

✉ М.И. Казьмин: MIKazmin@mephi.ru

Поступила в редакцию: 06.05.2025

После доработки: 22.06.2025

Принята к публикации: 03.07.2025

EDN EIFZKJ

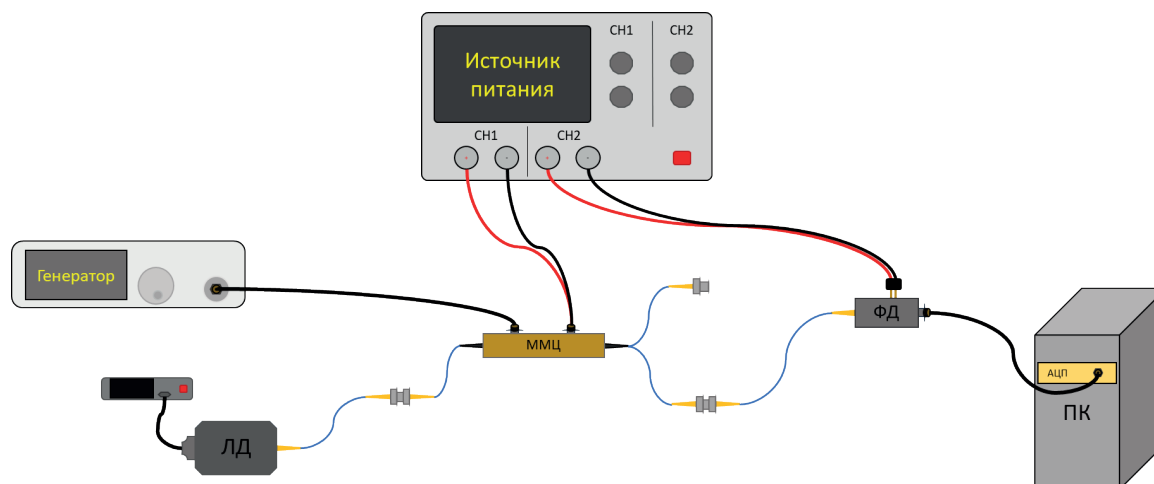


Рис. 1. Схема АОТ с цифровым выходом

излучения лазера – 16 дБм, а длина волны установлена 1550 нм. СВЧ-сигналы подаются на СВЧ-вход электрооптического модулятора Маха – Цендера (ММЦ, Optilab, США, рабочая полоса до 20 ГГц). Управление рабочей точкой ММЦ производится вручную [7] при помощи лабораторного источника питания GPS-73303A (GW Instek, Тайвань), используется точка положительной квадратуры. С выхода ММЦ оптический сигнал поступает на фотодетектор ДФДМШ40-012 (НПФ «Дилаз», Россия, рабочая полоса частот от 10 МГц до 12 ГГц, полоса спектральной чувствительности от 980 до 1650 нм). Фотодектированный сигнал оцифровывается платой АЦП с разрядностью 14 бит. Пример восстановленного сигнала на частоте 500 МГц представлен на рис. 2.

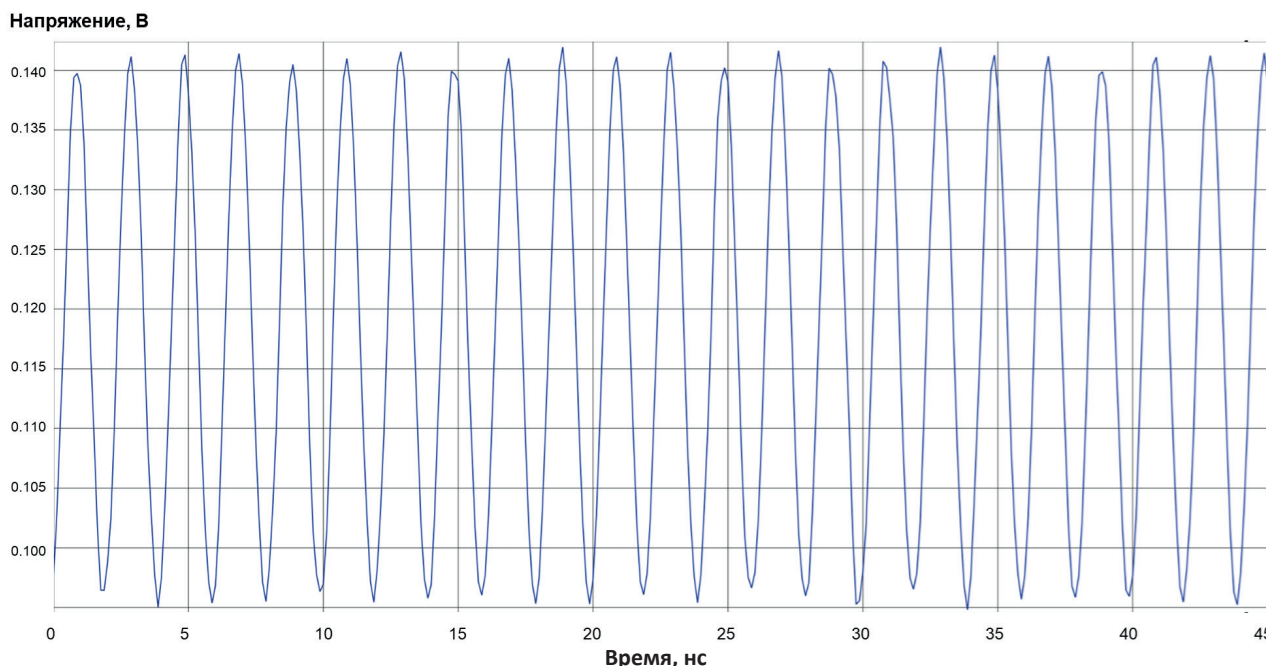


Рис. 2. Восстановленный сигнал АОТ после оцифровки

Описание экспериментов

Для оценки качества оцифровки обычно используются одночастотные, двухчастотные и многочастотные испытания [8, 9]. В рамках данной работы представлены результаты измерений одночастотных испытаний. С их помощью можно оценить такие параметры, как: коэффициент нелинейных искажений (THD – Total Harmonic Distortion), динамический диапазон, свободный от паразитных составляющих (SFDR – Spurious-Free Dynamic Range), отношение сигнал/шум (SNR – signal-to-noise ratio), отношение

сигнал/шум и коэффициент искажения ($SINAD$ – signal-to-noise and distortion ratio), эффективное число бит ($\mathcal{E}ЧБ$, $ENOB$ – effective number of bits).

Для проведения одночастотных испытаний СВЧ-АОТ с цифровым выходом использован тестовый синусоидальный сигнал, формируемый генератором N5181A (Agilent, США). Рабочий диапазон частот генератора 100 кГц – 6 ГГц, диапазон мощности сигнала генератора от –110 до 17 дБм. Сигнал генератора подавался на СВЧ-вход электрооптического модулятора Маха – Цендера (ММЦ), как показано на рис. 1. Результат оцифровки выходного сигнала АОТ записывается на диск персонального компьютера (рис. 3). Также для оценки характеристик исследуемого АОТ тестовый сигнал генератора оцифровывался напрямую, как показано на рис. 4.

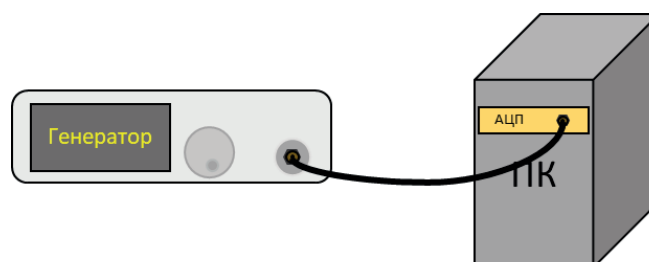


Рис. 3. Подключение генератора к плате АЦП

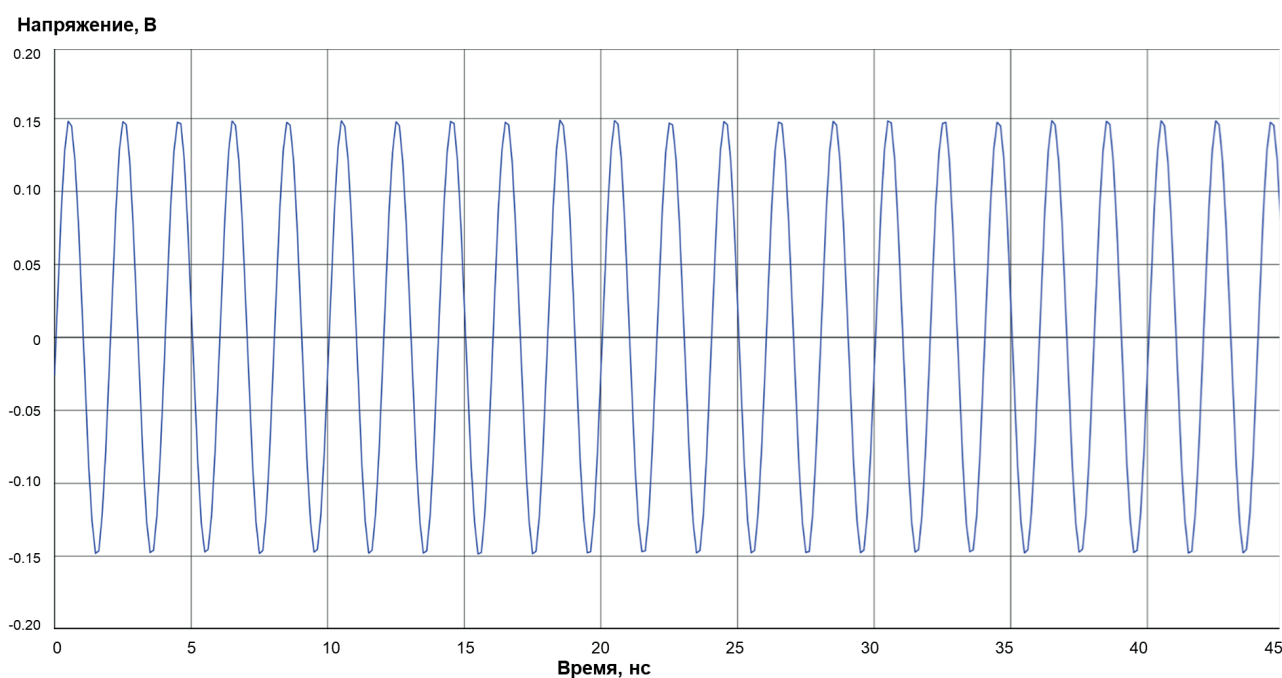


Рис. 4. Восстановленный сигнал генератора после оцифровки

Результаты измерений

С помощью дискретного преобразования Фурье рассчитывались спектры мощности оцифрованных сигналов. По спектрам определялись SNR и $SINAD$, а также рассчитывалось $ENOB$ ¹:

$$ENOB = \frac{SINAD - 1.76}{6.02}, \quad (1)$$

¹ IEEE Standard for Terminology and Test Methods for Analog-to-Digital Converters, IEEE Std 1241–2010, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010.

$$SINAD[dB] = 10 \lg \left(\frac{P_{signal}}{\sum_{i \neq 0, signal} P_i} \right), \quad (2)$$

здесь P_{signal} – мощность сигнальной составляющей в полученном дискретном спектре Фурье, P_i – мощности других составляющих спектра, включающие шумовые, собственные и нелинейные составляющие системы.

На рис. 5 представлены примеры спектров сигналов, в этом случае снижение ENOB составило 2.44.

Коэффициент передачи для сигнала с частотой 500 МГц составил 19.43 дБ, что эквивалентно потере ENOB в 3.22 бита. Аналогичные измерения проводились для сигналов других частот в пределах L -диапазона.

Измерения подтверждают известный факт, заключающийся в том, что основным источником снижения ENOB является уменьшение SNR-системы вследствие потери мощности полезного сигнала. Отличия

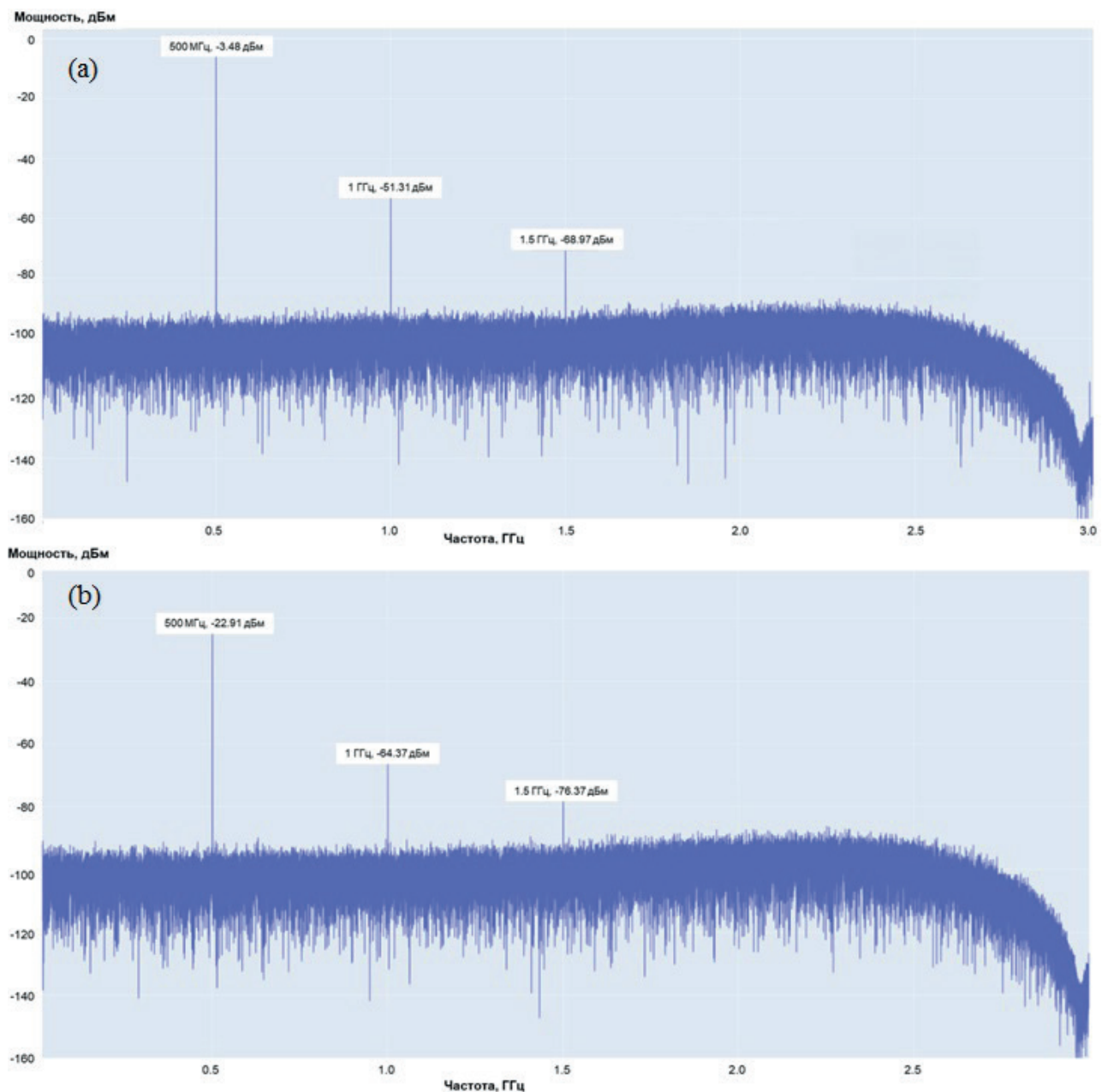


Рис. 5. Фурье-спектры мощности оцифрованных синусоидальных сигналов с частотой 500 МГц: а) генератора; б) АОТ

же ожидаемого изменения $ENOB$ из-за потерь СВЧ-мощности и измеренного могут быть обусловлены следующими причинами:

- отклонением от оптимальных условий дискретизации и квантования при оцифровке;
- температурным дрейфом рабочей точки ММЦ;
- особенностями шумов используемых образцов лазера и фотодетектора;
- влиянием перекрестных искажений собственных частот платы оцифровки.

Выводы

Реализован сверхширокополосный аналоговый оптический тракт с внешней модуляцией с цифровым выходом, обеспечивающий передачу сигналов L -диапазона и их аналого-цифровое преобразование. Эксперименты показали, что для построенного тракта, для сигнала малой мощности, основной причиной уменьшения эффективного числа бит на выходе являются потери мощности фундаментальной составляющей. Эффективное число бит переданного сигнала сокращается на 2.44 по сравнению с передаваемым. Число эффективных бит может быть увеличено путем повышения мощности используемых сигналов при поиске оптимума между влиянием шума и нелинейных искажений. В представленных в данной работе экспериментах влияние нелинейных искажений незначительное. Для повышения эффективного числа бит требуются также более точный контроль рабочей точки модулятора Маха – Цендера и оптимизация параметров оцифровки.

Финансирование

Исследование выполнено в рамках работ по программе «Приоритет-2030».

Конфликт интересов

Конфликт интересов отсутствует.

Вклад авторов

М.И. Казьмин – формулировка идеи и целей исследования, постановка задачи, выбор методов исследования, постановка эксперимента, выполнение измерений, анализ экспериментальных и теоретических данных, участие в обсуждении результатов, редактирование текста статьи.

В.А. Небавский – разработка математической модели, выполнение измерений, анализ экспериментальных и теоретических данных, подбор литературных источников, участие в обсуждении результатов, редактирование текста статьи.

Р.С. Стариков – анализ экспериментальных и теоретических данных, участие в обсуждении результатов, редактирование текста статьи.

Д.А. Третьяков – анализ экспериментальных и теоретических данных, участие в обсуждении результатов, редактирование текста статьи;

П.А. Черемхин – формулировка идеи и целей исследования, постановка задачи, участие в обсуждении результатов.

Список литературы

1. Cox III C.H. Analog Optical Links: Theory and Practice. Cambridge University Press, 2004. DOI: 10.1017/CBO9780511536632.
2. Urick V.J., McKinney J. D., Williams K.J. Fundamentals of microwave photonics (Urick/Fundamentals of Microwave Photonics). Wiley & Sons, 2015. DOI: 10.1002/9781119029816.
3. Chen N., Okada M. Toward 6G Internet of Things and the Convergence With RoF System // IEEE Internet of Things Journal, 2021. V. 8. № 11. P. 8719–8733. DOI: 10.1109/JIOT.2020.3047613.
4. Yang H., Tian W., Li J., Chen Y. Multi-Band Analog Radio-over-Fiber Mobile Fronthaul System for Indoor Positioning, Beamforming, and Wireless Access // Sensors, 2025. V. 25. № 7. P. 2338. DOI: 10.3390/s25072338.

5. Sung M., Kim S., Kim E. S., Moon S.R., Kim M. et al. Photonic THz Communications Based on Radio-Over-Fiber Technology for 6G Mobile Network: Design and Opportunity // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2023. Vol. 29. № 5. P. 1–11. DOI: 10.1109/JSTQE.2023.3308899.
6. Hoff M.T., Ralph S.E., Stevens R.C. Optical Signal Transport on Aerospace Platforms: Analog vs. Digital Links // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2025. DOI: 10.1109/MAES.2025.3554480.
7. Fu Y., Zhang X., Hraimel B., Liu T., Shen D. Mach-Zehnder: A Review of Bias Control Techniques for Mach-Zehnder Modulators in Photonic Analog Links // IEEE Microwave Magazine, 2013. V. 14. № 7. P. 102–107. DOI: 10.1109/MMM.2013.228033.
8. Walden R. Analog-to-digital converter survey and analysis // IEEE J. Sel. Areas Commun., 1999. V. 17. P. 539–550.
9. Walden R. Analog-to-digital conversion in the early twenty-first century / The Wiley Encyclopedia of Computer Science and Engineering. John Wiley & Sons Inc., New York, 2008. P. 126–138.

Vestnik Natsional'nogo Issledovatel'skogo Yadernogo Universiteta «MIFI», 2025, vol. 14, no. 4, pp. 291–297

Analog optical link with external modulation and digital output for *L*-band signals: experimental evaluation of the effective number of bits

M. I. Kazmin , V. A. Nebavskiy, R. S. Starikov, D. A. Tretyakov, P. A. Cheremkhin

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409, Russia

 MIKazmin@mephi.ru

Received May 06, 2025; revised June 22, 2025; accepted July 03, 2025

When transmitting analog signals through optical link, the signal quality deteriorates due to losses, nonlinear distortions, and noise, leading to a reduction in the effective number of bits in the transmitted signal subjected to analog-to-digital conversion. The paper presents the results of an experimental study on the operation of a ultra-wideband ultra-high-frequency analog optical channel with a digital output. The aim of the work is to assess the signal transmission quality of the studied channel in terms of digital metrics. A comparison of the digitization results of the generator signal and the same signal transmitted through the analog optical link has been performed. By analyzing the radio frequency spectra of the digitized signals, the contribution of the optical part of the system to the change in signal quality has been evaluated. Measurements have shown that the level of nonlinear distortions and noise introduced into the signal by the optical channel was 14.7 dB, which is equivalent to a reduction in the effective number of bits by 2.44, primarily due to power losses in the optical part.

Keywords: microwave photonics, radio-over-fiber, analog optical link, analog-to-digital conversion, effective number of bits.

Reference

1. Cox III C.H. Analog Optical Links: Theory and Practice. Cambridge University Press, 2004. DOI: 10.1017/CBO9780511536632.
2. Urick V.J., McKinney J. D., Williams K.J. Fundamentals of microwave photonics (Urick/Fundamentals of Microwave Photonics). Wiley & Sons, 2015. DOI: 10.1002/9781119029816.
3. Chen N., Okada M. Toward 6G Internet of Things and the Convergence With RoF System. IEEE Internet of Things Journal, 2021. Vol. 8. No. 11. Pp. 8719–8733. DOI: 10.1109/JIOT.2020.3047613.
4. Yang H., Tian W., Li J., Chen Y. Multi-Band Analog Radio-over-Fiber Mobile Fronthaul System for Indoor Positioning, Beamforming, and Wireless Access. Sensors, 2025. Vol. 25. No. 7. Pp. 2338. DOI: 10.3390/s25072338.

5. Sung M., Kim S., Kim E. S., Moon S.R., Kim M. et al. Photonic THz Communications Based on Radio-Over-Fiber Technology for 6G Mobile Network: Design and Opportunity. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2023. Vol. 29. No. 5. Pp. 1 – 11. DOI: 10.1109/JSTQE.2023.3308899.
6. Hoff M.T., Ralph S.E., Stevens R.C. Optical Signal Transport on Aerospace Platforms: Analog vs. Digital Links. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2025. DOI: 10.1109/MAES.2025.3554480.
7. Fu Y., Zhang X., Hraimel B., Liu T., Shen D. Mach-Zehnder: A Review of Bias Control Techniques for Mach-Zehnder Modulators in Photonic Analog Links. IEEE Microwave Magazine, 2013. Vol. 14. No. 7. Pp. 102 – 107. DOI: 10.1109/MMM.2013.228033.
8. Walden R. Analog-to-digital converter survey and analysis. IEEE J. Sel. Areas Commun., 1999. Vol. 17. Pp. 539 – 550.
9. Walden R. Analog-to-digital conversion in the early twenty-first century / The Wiley Encyclopedia of Computer Science and Engineering. John Wiley & Sons Inc., New York, 2008. Pp. 126 – 138.