

УВЕЛИЧЕНИЕ ДАЛЬНОСТИ ПЕРЕДАЧИ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ С КОМАНДАМИ УПРАВЛЕНИЯ КЛЮЧЕВЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ИХ ВЫПОЛНЕНИЯ**Давыдов Вадим Владимирович**

доктор физико-математических наук, доцент, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет¹ Петра Великого; Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»²; ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича»³.

Резников Богдан Константинович

аспирант, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича»³.

Грызулёв Сергей Сергеевич

студент, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича»³.

¹Адрес: 195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая д. 29, лит. А.

²Адрес: 197022, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5, лит. Ф.

³Адрес: 193232, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, пр. Большевиков д. 22, к. 1.

E-mail для связи: davydov_vadim66@mail.ru

Аннотация: В статье обоснована необходимость использования аналоговых оптических сигналов для передачи команд управления и подтверждения их исполнения на расстояния более 400 км без усилителя. Предложен критерий оценки влияния увеличения мощности оптического излучения на битовую последовательность с использованием спектральных исследований. Представлены результаты моделирования спектров оптических сигналов на разных этапах их формирования для передачи по оптическому волокну. Проведено экспериментальное исследование спектров цифровых и аналоговых сигналов. Экспериментальные результаты подтвердили моделирование, что позволяет в дальнейшем использовать данный критерий для оценки максимальной мощности оптического излучения, вводимого в волокно для различных типов аналоговых сигналов при необходимости увеличения расстояния передачи информации без использования оптических усилителей, регенераторов и серверов.

Ключевые слова: оптический аналоговый и цифровой сигнал, команда управления, мощность, оптическое волокно, нелинейные искажения, спектр, отношение сигнал/шум.

Введение

В мире наиболее оптимальным вариантом размещением волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) для передачи информации по труднодоступной территории, а также различных команд управления и данных об их исполнении являются линии электропередач (ЛЭП) [1, 2]. В работах [3, 4] рассмотрены различные варианты размещения, отмечены преимущества данного расположения. Одним из существенных недостатков в данной конфигурации размещения оптической телекоммуникационной системы является сложность с использованием оптических усилителей, размещённых на ЛЭП. В случаях пробоя изолятора или грозы наведённое электрическое поле создаст в оптическом усилителе изменение поляризации излучения, что вызовет изменения в битовой последовательности передаваемой информации [5, 6]. Для цифровой битовой последовательности (0 и 1) разработаны алгоритмы, которые в ряде случаев позволяют установить часть утерянной информации при коротких промежутках сбоя в работе оптического усилителя [3, 7, 8]. Восстанавливаются битовые ошибки (BER). Наибольшие проблемы возникают при передаче команд управления ключевыми элементами и контроль их выполнения. Эти команды

передаются однократно (через большие интервалы времени). В промежутки между ними в ВОЛС нет оптического сигнала.

В случае рассмотренного негативного воздействия на оптический усилитель в нём может сформироваться оптический сигнал с несуществующей командой управления или её подтверждением (в зависимости от зоны воздействия). Могут сформироваться два оптических сигнала. Для передачи команд управления и контроля их исполнения используют однонаправленные ВОЛС, как в системе ПАО «Газпром». При поступлении данных команд на подстанцию или систему распределения электрической энергии может произойти авария при неправильном переключении устройств управления. В лучшем случае на время прекратится подача электрической энергии потребителю (аварийное отключение). При поступлении «ложных» подтверждений о исполнении команд управления, которых не было, у диспетчера возникнет необходимость проверки работы системы. Это займёт время, в ряде случаев произойдёт отключение потребителей и потребуются выезд ремонтной бригады для проверки случившегося. Поэтому для передачи данных команд управления и подтверждений их исполнения на трассе используют сервера или регенераторы. В системе протяжённых

ЛЭП, которые находятся в безлюдной и сложно проходимой местности, обслуживание серверов и регенераторов, установленных на трассе, связано с большими расходами, а в сложных метеоусловиях не всегда возможно.

По этой причине вопросу передачи команд управления и данных о работе ключевых элементов на большие расстояния без использования оптических усилителей, а также серверов и регенераторов, установленных в безлюдной местности, уделяется повышенное внимание.

Исследования в [6, 9, 10] показали, что дальность передачи оптических сигналов по волокну можно увеличить только двумя способами. Первый — это увеличить мощность передаваемого оптического сигнала (автоматически увеличится отношение сигнал/шум). Второй — это использовать оптическое волокно с малым коэффициентом рэлеевского рассеяния α_p . Этот коэффициент определяет затухание оптического сигнала в волокне. Второй способ связан с технологией изготовления волокна с сердцевинной из чистого кварца, у которого $\alpha_p < 0,168$ дБ/км. В новых разработках волокон с сердцевинной из чистого кварца достигнуто значение $\alpha_p = 0,166$ дБ/км. Выигрыш в 0,002 дБ/км на расстоянии 400 км использование нового волокна даёт дополнительно 0,8 дБ, что при стоимости такого волокна в 2–2,5 раза больше, чем волокна с $\alpha_p = 0,168$ дБ/км экономически нецелесообразно (расстояние увеличивается на 5–6 км).

В такой ситуации способ увеличения мощности оптического сигнала с использованием находящего в эксплуатации канала связи является более перспективным, чем прокладка нового канала связи с новым типом волокна. С другой стороны, увеличение мощности оптического сигнала приводит к появлению нелинейных искажений, влияющих на битовую последовательность, в которой заложена информация [3, 6, 11]. Искажается спектр оптического сигнала, а сама битовая последовательность трансформируется. Это приводит к полной или частичной потере информации. Для команд управления и их подтверждения данные искажения недопустимы.

Нелинейные эффекты, которые приводят к искажениям в битовой последовательности, возникающие при большой мощности оптического излучения в волокнах устранить невозможно. Можно попробовать снизить их влияние на искажение в битовой последовательности до определённого значения мощности оптического излучения, чтобы после его регистрации достоверно расшифровать передаваемую информацию. Поэтому целью нашей работы является выбор типа и разработка кодировки оптических сигналов, чтобы уменьшить влияние нелинейных искажений, возникающих при увеличении мощности оптического сигнала, на битовую последовательность и спектр передаваемого сигнала. Определение границы мощности оптического сигнала для передачи команд управления и подтверждения их исполнения в оптических волокнах.

Обоснование спектрального сравнения цифровых и аналоговых оптических сигналов, используемых в командах управления, формируемых с прямой модуляцией

В системах управления ключевыми элементами при решении задач по работе с потребителями отправляется последовательно по одному оптическому каналу (одномодовое волокно) от 10 до 30 команд управления в последовательном режиме [3, 6]. В этом случаях проводят параллель с методом радиочастотных идентификационных меток (РИМ) на поверхностных акустических волнах (ПАВ) для идентификаций и управления [12]. В этом случае действует теорема Шеннона [13], связанная с ограничением по количеству одновременно распознаваемых объектов $N_{\max}$

$$N = BT, \quad (1)$$

где B — полоса пропускания системы; T — время задержки сигнала в системе.

Исходя из этого в командах управления перешли на низкочастотную модуляцию, что крайне удобно при использовании оптического передающего модуля с модуляцией по току (отказались от дорогостоящего электрооптического модулятора) и уменьшили полосу пропускания в системе. Необходимо также отметить, что команду управления можно передавать как в «пакете» (несколько команд), так и одиночно. В этом случае период передачи управляющих сигналов отсутствует (интервал между командами управления на один и тот же ключевой элемент носит случайный характер). Поэтому для оценки полосы используется длительность передачи всей команды управления и результата подтверждения ее выполнения. В работах [3, 6] нами рассмотрены различные команды управления (аналоговый оптический сигнал) и новый метод их формирования (командные коды). Аналогично также можно провести к кодовым конструкциям [14]. В этом случае формула Шеннона для скорости C передачи информации трансформируется в следующий вид [15]:

$$C = W \log_2(1 + P_{ns} / P_{nf}), \quad (2)$$

где W — полоса передачи; P_s — мощность оптического сигнала, регистрируемая на фотоприёмнике; P_{nf} — шумовая мощность диода фотоприёмника, либо можно использовать эквивалентную ей формулой Найквиста

$$C = 2 \log_2 M, \quad (3)$$

где M — количество различных состояний информационного параметра

Для цифровой битовой последовательности состояний $M = 2$ (0 и 1). Для разработанного нами метода командных кодов [3, 6] значение $M = 10$. Вся битовая последовательность не превышает 100 мс. Полоса в данном случае 10 Гц. При передаче аналогового оптического сигнала на большие расстояния на таких скоростях возможна его регистрация на уровне шума P_s порядка P_{nf} . В этом случае логарифм равен 1. Значение C определяется

только полосой W , которая должна выбираться исходя из соображений уровня допустимых искажений сигнала. В цифровом оптическом сигнале для передачи команды управления как в аналоговом сигнале используется большое число бит с 0 и 1, а также старт битов и стоп битов. В этом случае длительность команды управления может увеличиться в 20–25 раз. Данный факт крайне нежелателен. Так при передаче, например, 20 команд управления, временной интервал между началом реализации первой команды и последней командой может быть больше 40 с. А для подтверждения выполнения команд управления, например, в энергетической системе «Пирамида», все ответы придут через 4–5 минут (это недопустимый временной интервал). По этой причине в цифровом сигнале используются другие длительности прямоугольных импульсов и интервалы между ними.

В такой ситуации, когда расстояния между битами, в которых заложена информация, в передаваемой последовательности различается для цифрового и аналогового сигнала, ключевую роль в оценке влияния нелинейных искажений при увеличении мощности оптического сигнала отдаётся его спектру. Причём спектр оптического сигнала обязательно регистрировать после 400 000 м его передачи по волокну. Достаточно провести исследования на расстоянии 100 000 м, так как для чистого кварца затухание на этом участке составит 16,8 дБм, а мощность оптического сигнала в 10 дБм не создаёт никаких нелинейных искажений в оптическом волокне [8–11]. Использовать для передачи информации по волокну оптический сигнал мощностью порядка 26,8 дБм скорее всего невозможно.

Поэтому для определения возможностей увеличения расстояния передачи оптического сигнала за счёт увеличения его мощности предлагается рассмотреть спектры и исследовать возникновение в них нелинейных искажений в зависимости от изменения мощности.

Спектральный анализ цифрового и аналогового сигнала для передачи информации

В командах управления и контроля их исполнения необходимо осуществлять передачу кода в одном пакете, например, следующую последовательность цифр: 1562-67431-1542-19744 [6]. Для передачи этих команд используется последовательность импульсов разной амплитуды (длительностью 1 мс) и расстоянием между импульсами 3 мс. Старт бит и стоп бит длительностью 2 мс. Для передачи модулированного лазерного излучения по ВОЛС используется синусоидальный сигнал с поднесущей частотой 200 МГц. Прямоугольные импульсы создаются с использованием прямой модуляции передающего модуля. Альтернативным вариантом передачи такой команды управления является использование битовой последовательности (цифровой сигнал) из нулей и единиц. Как ранее было отмечено, в цифровом сигнале длительность импульсов уменьшается минимум в 10 раз, рас-

стояние между ними в 30 раз. Для определения влияния увеличения мощности лазерного излучения для обеспечения дальности передачи данных на спектр цифрового и аналогового сигнала было проведено их моделирование. Для сравнения спектров моделируются сигналы, проходящие через двухуровневую амплитудную модуляцию (АМ). Исходные сигналы — цифровой, представляющий собой последовательность импульсов с уровнями 0 и 1, и аналоговый. При формировании сигнала последовательно модулируются две несущие: на первой ступени — основную MW-поднесущую, на второй ступени — оптическую несущую. Для первой ступени модуляции используется поднесущая частота f_1 (MW-поднесущая):

$$c_1(t) = \cos(2\pi f_1 t), \quad (4)$$

а для второй — несущая частота f_2 (оптическая несущая):

$$c_2(t) = \cos(2\pi f_2 t). \quad (5)$$

Цифровой сигнал $b(t)$ формируется как последовательность прямоугольных импульсов со значениями $b_n \in \{0, 1\}$, каждый с длительностью T_b :

$$b_n(t) = \sum_{n=0}^{N-1} b_n \operatorname{rect}\left(\frac{t - nT_b}{T_b}\right), \quad (6)$$

где $\operatorname{rect}(t)$ — прямоугольная функция:

$$\operatorname{rect}(t) = \begin{cases} 1, & |t| \leq 1/2 \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}. \quad (7)$$

Аналоговый сигнал $a(t)$ представляет собой последовательность импульсов с амплитудой A_n и промежутками между ними T_p :

$$a_n(t) = \sum_{n=0}^{M-1} A_n \operatorname{rect}\left(\frac{t - nT_i}{T_i}\right), \quad (8)$$

где $T = T_i + T_p$ — период сигнала, включающий импульс, в котором заложена цифра длительностью T_i , и паузу между этими импульсами T_p , $A_n \in [A_{\min}, A_{\max}]$, где $A_{\min}$ и $A_{\max}$ максимальные и минимальные значения амплитуд, которые используются для передачи цифр в аналоговом сигнале, например, при напряжении в 1 В, используется интервал от 0,9 до 1,0 В. На рис. 1 и 2 представлены осциллограммы и спектры сформированных сигналов.

Анализ полученных результатов моделирования показывает, что спектр аналогового сигнала более узкий по сравнению с цифровым. Так как прямоугольные импульсы формируются в передающем модуле с использованием прямой модуляции (изменяется ток), то дальше необходимо рассмотреть спектральные составляющие с учётом амплитудной модуляции микроволновой поднесущей.

На первом этапе формирования оптического сигнала реализуется классическая АМ, при которой амплитуда MW-поднесущей модулируется исходным сигналом:

— для цифрового сигнала:

$$S_1^{(b)}(t) = b(t) \cos(2\pi f_1 t), \quad (9)$$

— для аналогового сигнала:

$$S_1^{(a)}(t) = a(t) \cos(2\pi f_1 t). \quad (10)$$

На рис. 3 и 4 представлены осциллограммы и

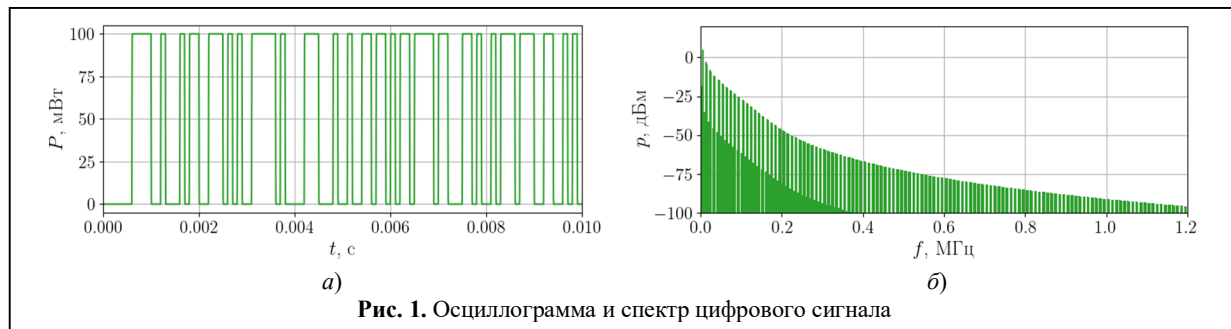


Рис. 1. Осциллограмма и спектр цифрового сигнала

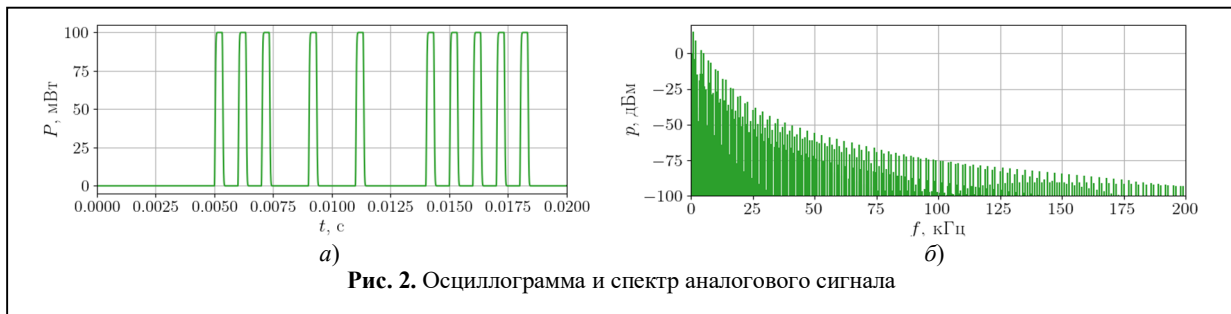


Рис. 2. Осциллограмма и спектр аналогового сигнала

спектры цифрового и аналогового сигналов с АМ MW-поднесущей.

Анализ полученных результатов моделирования показывает, что цифровой сигнал будет более чувствителен к нелинейным искажениям, которые сформируются в оптическом волокне при увеличении мощности лазерного излучения, чем аналоговый. Для более наглядного подтверждения данного предположения рассмотрим амплитудную модуляцию несущей. На этом этапе модулируется сигнал $s_1(t)$ с использованием оптической несущей частоты:

$$\begin{aligned} &\text{— для цифрового сигнала:} \\ &S_2^{(b)}(t) = S_1^{(b)}(t) \cos(2\pi f_2 t) = \\ &= b(t) \cos(2\pi f_1 t) \cos(2\pi f_2 t), \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} &\text{— для аналогового сигнала:} \\ &S_2^{(a)}(t) = S_1^{(a)}(t) \cos(2\pi f_2 t) = \\ &= a(t) \cos(2\pi f_1 t) \cos(2\pi f_2 t). \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} &\text{Используя тригонометрическое тождество} \\ &\cos(2\pi f_1 t) \cos(2\pi f_2 t) = \\ &= 1/2 [\cos(2\pi(f_2 - f_1)t) + \cos(2\pi(f_2 + f_1)t)] \end{aligned} \quad (13)$$

можно показать, что итоговый спектр содержит компоненты на частотах $f_2 - f_1$ и $f_2 + f_1$. Таким образом, двухступенчатая АМ приводит к переносу исходного сигнала в две новые боковые полосы.

На рис. 5 и 6 представлены осциллограммы и спектры сигналов, которые передаются с использованием лазерного излучения по оптическому волокну. Полученный результат однозначно показывает, что влияние нелинейных искажений на цифровой сигнал начнётся раньше (при меньших мощностях оптического излучения), чем на аналоговый. Экспериментальная проверка данного факта была реализована с использованием аналогового оптического канала связи, который подробно рассмотрен в

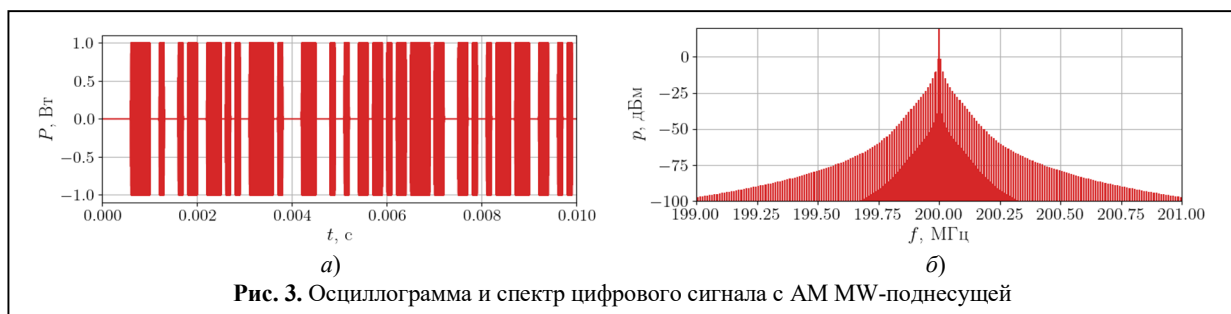


Рис. 3. Осциллограмма и спектр цифрового сигнала с АМ MW-поднесущей

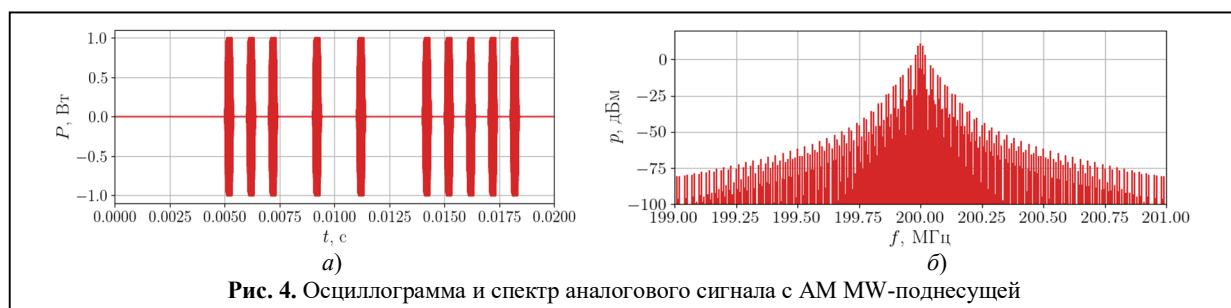
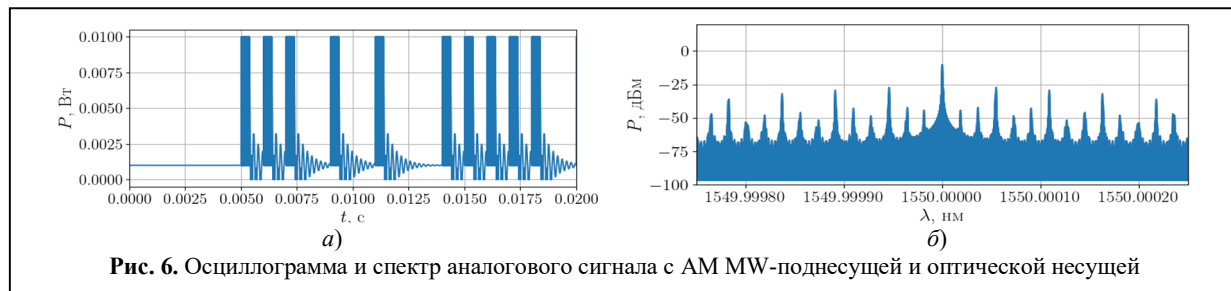
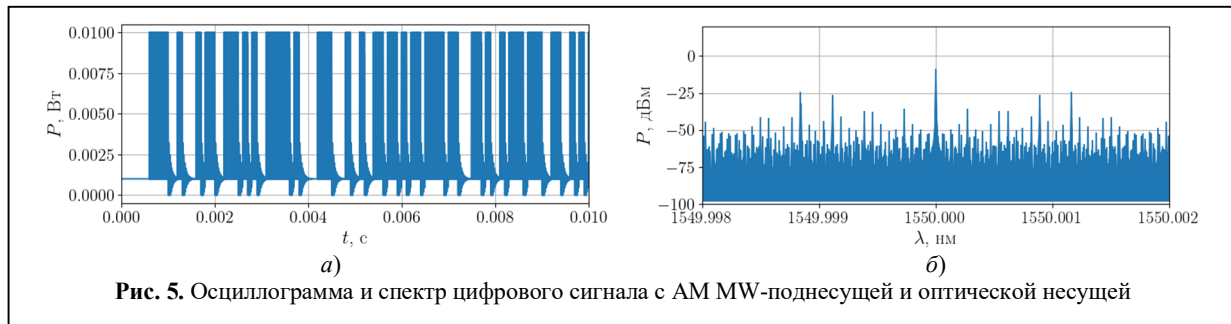


Рис. 4. Осциллограмма и спектр аналогового сигнала с АМ MW-поднесущей



[3, 6]. Выход оптического волокна данного канала подключается на вход анализатора спектра OSA, YOKOGAWA-AQ6370C.

На рис. 7 и 8 для примера представлены зарегистрированные спектры цифрового и аналогового сигналов при мощности оптического сигнала на входе в волокно $P_{\text{вх}} = 15$ дБм. Измерения проводились при $T = 296,4$ К.

Анализ полученных результатов показывает, что нелинейные искажения в цифровом сигнале начинают проявляться при более низких значениях входной мощности по сравнению с аналоговым сигналом. Без существенных искажений в спектре, которые могут влиять на качество передаваемой информации. Результаты спектральных исследований позволили установить, что для аналоговых сигналов можно увеличивать мощность оптического излучения до 23,0 дБм, и однозначно расшифровывать передаваемую информацию в виде командных кодов.

Заключение

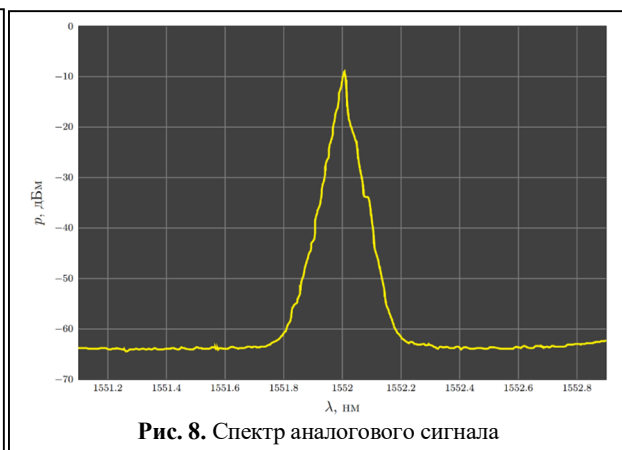
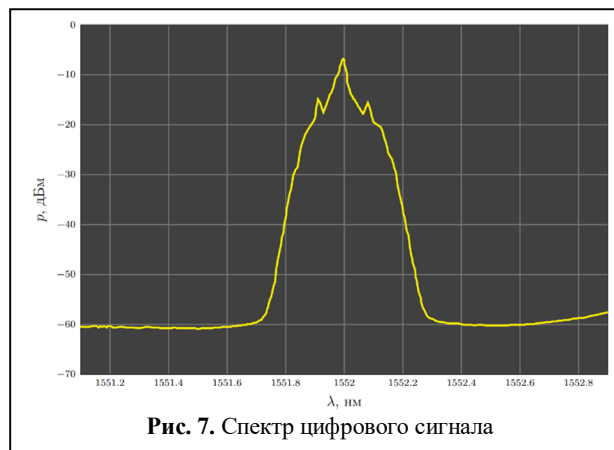
Полученные результаты показывают преимущества использования аналоговых низкочастотных сигналов по сравнению с цифровыми для передачи ко-

манд управления и подтверждений их на расстоянии более 400 км без использования на линии оптических усилителей, серверов и регенераторов. Дальнейшее увеличение дальности передачи команд управления по ВОС возможно только с использованием волокон с меньшим коэффициентом рэлеевского рассеяния. Увеличение мощности оптического излучения более 23,0 дБм, как показали результаты спектрального анализа, нецелесообразно. Возникающие в волокне нелинейные искажения вносят искажения в передаваемый сигнал, что приводит к ошибкам при его расшифровке.

Отдельным моментом можно отметить, что установленное нами предельное значение в 23,0 дБм для волокон с сердцевиной из чистого кварца может изменяться для различных партий таких волокон в диапазоне $\pm 0,15$ дБм, что связано с технологией изготовления волокон (в первую очередь с температурой заморозки)

Литература

1. Koziel S., Hilber P., Westerlund P., Shayesteh E. Investments in data quality: Evaluating impacts of faulty data on asset management in power systems // Applied Energy. 2021. Vol. 281. P. 116057.



2. Ding Y., Islam M.Z., Shiau J., Wang T., Lin Y. Resilient DFOS Placement Strategy for Power Grid Monitoring: Integrating Fiber and Power Network Dependencies // Proceedings of SPIE the International Society for Optical Engineering. 2025. Vol. 13639. P. 136398B.

3. Reznikov B.K., Stepanenkov G.V., Isaenko D.I., Pachin A.V., Kolybelnikov N.Yu. Peculiarities of telemetry information transmission using analog fiber-optic communication line over long distances in a complex electromagnetic environment // St Petersburg State Polytechnical University Journal Physics and Mathematics. 2023. Vol. 16. No. 3.2. Pp. 143–149.

4. Attarpour A., Ibrahim M., Di Cicco N., Ragni M., Tornatore M. Joint QoT-Aware Optimization of OTN and WDM Layers for Low-Cost Optical Metro Networks // IEEE International Conference on Communications. 2024. Vol. 2024. Pp. 4979–4984.

5. Трещников В.Н., Листвин В.Н. DWDM-системы. Изд. 5. М.: Техносфера, 2024. 476 с.

6. Davydov V., Reznikov B., Dudkin V. New Optical System for Long Distance Control of Electrical Energy Flows // Energies. 2023. Vol. 16. No. 3. P. 1040.

7. Полушин П.А., Архипов Н.А., Шалина В.В. Модификация метода кодирования при борьбе с межсимвольными искажениями цифровых сигналов с модуляцией QPSK // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2023. № 1(49). С. 33–40.

8. Tong W., Zhu M., Ding J., Hua B., Yu J. Spectrally efficient frequency division multiplexing for improving photonics-aided terahertz wireless transmission capacity // Optics

Express. 2025. Vol. 33. No. 23. Pp. 47796–47812.

9. Yu D., Wang Y., Liu J., Zhou X., Zheng K. Fiber optic transmission system for high-speed CMOS image data // Optics and Precision Engineering. 2025. Vol. 33. No. 11. Pp. 1793–1802.

10. Kaur H., Bhamrah M.S., Kaur B. A comprehensive study on radio over fiber systems: Present evaluations and future challenges // Journal of Optical Communications. 2024. Vol. 45. No. 4. Pp. 829–843.

11. Li Z., Xiao Q., Pan X., Li X., Zhu J. Hundred-Watt Thin-Disk Regenerative Amplifier with High Optical-to-Optical Efficiency // Chinese Journal of Lasers. 2024. Vol. 51. No. 17. P. 1701001.

12. Сучков С.Г., Никитов С.А. Исследование по созданию антиколлизийных радиочастотных идентификационных меток на поверхностных акустических волнах // Радиотехника и электроника. 2025. Т. 70. № 4. С. 348–354.

13. Shannon C.E. The Mathematical Theory of Communication. Urbana: Univ. of Illinois Press, 1949. 234 p.

14. Полушин П.А., Корнеева Н.Н. Метод диагностики сигнально-кодowych конструкций // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2024. № 1(53). С. 25–33.

15. Bin-Salem A.A., Wan T.-C., Chong Y.-W., Mohamad I.J. LTE peak data rate estimation using modified alpha-Shannon capacity formula // Asian Internet Engineering Conference Aintec 2014. 2014. Vol. 2014. Pp. 9–14.

Поступила 12 ноября 2025 г.

English

INCREASING THE TRANSMISSION DISTANCES OF OPTICAL SIGNALS WITH CONTROLLING KEY ELEMENTS COMMANDS OF POWER SUPPLY SYSTEMS AND CONTROL ITS IMPLEMENTATION

Vadim Vladimirovich Davydov — Grand Dr. in Physics and Mathematics, Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University¹; Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"²; The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications³.

Bogdan Konstantinovich Reznikov — Postgraduate Student, The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications³.

Sergey Sergeevich Gryzulev — Student, The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications³.

¹Address: 195251, Russian Federation, Saint Petersburg, Politekhnikeskaya St., 29, Building A.

²Address: 197022, Russian Federation, Saint Petersburg, Saint Petersburg, Professor Popov St., 5, Building F.

³Address: 193232, Russian Federation, Saint Petersburg, Bolshhevikov ave., 22/1.

E-mail: davydov_vadim66@mail.ru

Abstract: This article substantiates the need to use analog optical signals to transmit control commands and confirm their execution over distances exceeding 400 km without an amplifier. A criterion for assessing the impact of increasing optical power on the bit sequence is proposed using spectral studies. The results of modeling the spectra of optical signals at different stages of their formation for transmission over optical fiber are presented. An experimental study of the spectra of digital and analog signals is conducted. The experimental results confirm the modeling, allowing this criterion to be further used to assess the maximum optical power injected into fiber for various types of analog signals when it is necessary to increase the transmission distance without the use of optical amplifiers, regenerators, and servers.

Keywords: Optical analog and digital signal, control command, power, optical fiber, nonlinear distortion, spectrum, signal-to-noise ratio.

References

1. Koziel S., Hilber P., Westerlund P., Shayesteh E. Investments in data quality: Evaluating impacts of faulty data on asset management in power systems. Applied Energy. 2021. Vol. 281, Pp. 116057. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.116057

2. Ding Y., Islam M.Z., Shiau J., Wang T., Lin Y. Resilient DFOS Placement Strategy for Power Grid Monitoring: Integrating Fiber and Power Network Dependencies. Proceedings of SPIE the International Society for Optical Engineering. 2025. Vol. 13639, Pp. 136398B. DOI: 10.1117/12.3060520.

3. Reznikov B.K., Stepanenkov G.V., Isaenko D.I., Pachin A.V., Kolybelnikov N.Yu. Peculiarities of telemetry information transmission using analog fiber-optic communication line over long distances in a complex electromagnetic environment. *St Petersburg State Polytechnical University Journal Physics and Mathematics*. 2025. Vol. 16. No. 3.2. Pp. 143–149. DOI: 10.18721/JPM.163.224.
4. Attarpour A., Ibrahimi M., Di Cicco N., Ragni M., Tornatore M. Joint QoT-Aware Optimization of OTN and WDM Layers for Low-Cost Optical Metro Networks. *IEEE International Conference on Communications*. Vol. 2024, Pp. 4979–4984. DOI: 10.1109/ICC51166.2024.10622501
5. Trestchikov V.N., Listvin V.N. DWDM-sistems. Edition. 5. M.: Technosphere, 2024. 476 p.
6. Davydov V., Reznikov B., Dudkin V. New Optical System for Long Distance Control of Electrical Energy Flows. *Energies*. 2023. Vol. 16. No. 3. Pp. 1040. DOI: 10.3390/en16031040.
7. Polushin P.A., Arkhipov N.A., Shalina V.V. Modification of the coding method for combating intersymbol interference of QPSK modulated digital signals. *Radio engineering and telecommunication systems*. 2023. No. 1(49). Pp. 33–40.
8. Tong W., Zhu M., Ding J., Hua B., Yu J. Spectrally efficient frequency division multiplexing for improving photonics-aided terahertz wireless transmission capacity. *Optics Express*. 2025. Vol. 33, no. 23. Pp. 47796–47812. DOI: 10.1364/OE.575764.
9. Yu D., Wang Y., Liu J., Zhou X., Zheng K. Fiber optic transmission system for high-speed CMOS image data. *Optics and Precision Engineering*. 2025. Vol. 33. No. 11. Pp. 1793–1802. DOI: 10.37188/OPE.20253311.1793.
10. Kaur H., Bhamrah M.S., Kaur B. A comprehensive study on radio over fiber systems: Present evaluations and future challenges. *Journal of Optical Communications*. 2024. Vol. 45, no. 4. Pp. 829–843. DOI: 10.1515/joc-2022-0040.
11. Li Z., Xiao Q., Pan X., Li X., Zhu J. Hundred-Watt Thin-Disk Regenerative Amplifier with High Optical-to-Optical Efficiency. *Chinese Journal of Lasers*. 2024. Vol. 51. No. 17. Pp. 1701001. DOI: 10.3788/CJL231347.
12. Suchkov S.G., Nikitov S.A. Research on the creation of anti-collision radio frequency identification tags on surface acoustic waves. *Radiotekhnika i elektronika*. 2025. Vol. 70. No. 4. Pp. 348–354.
13. Shannon C.E. *The Mathematical Theory of Communication*. Urbana: Univ. of Illinois Press, 1949. 234 p.
14. Polushin P.A., Korneeva N.N. Method for diagnosing signal-code structures. *Radio engineering and telecommunication systems*. 2024. No. 1(53). Pp. 25–33.
15. Bin-Salem A.A., Wan T.-C., Chong Y.-W., Mohamad I.J. LTE peak data rate estimation using modified alpha-Shannon capacity formula. *Asian Internet Engineering Conference Aintec 2014*, Vol. 2014, Pp. 9–14. DOI: 10.1145/2684793.2684795.