

# FONTE EID

# Research Bulletin

# Брошюра об исследованиях Russian Edition



Дата публикации 1 Oct 2020 | <https://fonte.astonphotonics.uk/>

## ТЕМАТИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Волоконно-оптические системы связи составляют основу мировой инфраструктуры связи, поскольку они обеспечивают львиную долю (более 99%) глобального трафика данных. Однако, продолжающийся экспоненциальный рост сетевого трафика подталкивает к своим пределам современные технологии, позволявшие увеличивать скорость передачи данных последние несколько десятилетий. Широко признано, что нелинейные эффекты в оптическом волокне в настоящее время являются основным ограничивающим фактором в современных волоконно-оптических системах связи. Нелинейные свойства волоконно-оптической среды ограничивают возможность увеличения емкости линии связи за счет простого увеличения мощности сигнала. При этом, большинство используемых сегодня технологий передачи изначально были разработаны для линейных (проводных или беспроводных) каналов связи. За последние несколько десятилетий значительные улучшения в скорости передачи данных были достигнуты за счет локальных усовершенствований и модификаций при неизменности общей парадигмы линейной передачи. Однако, есть много свидетельств того, что из-за нелинейности волокна данная тенденция закончится в течение следующего десятилетия. Существует явная потребность в радикально новых подходах к кодированию, передаче и обработке информации, учитывающих нелинейные свойства оптического волокна. Помимо этого также требуется обучение и подготовка нового поколения инженеров и специалистов по оптической связи, обладающих знаниями в области нелинейных методов и технологий.

Исследования в EID FONTE (ФОНТЕ) сосредоточены на разработке прорывных методов и подходов к волоконно-оптической связи учитывающих нелинейности, выходящих за рамки существующих технологий. Консорциум, в который входит Nokia Bell Labs Germany - ведущий мировой научный центр в области телекоммуникаций, уже делает важные новаторские шаги в развитии техники нелинейного преобразования Фурье (НПФ) и ее реализации в практических системах связи. Этот информационный бюллетень посвящен последним научным результатам, полученными нашими исследователями (ESRs).

## ПУБЛИКАЦИИ

Журнальные  
статьи  
студентов  
3

Конференцио-  
нные статьи  
студентов  
2

Отчеты об  
исследованиях  
12

Устные  
Доклады  
студентов на  
конференциях  
3



This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under the Marie Skłodowska-Curie grant agreement No 766115  
Проект профинансирован исследовательской и инновационной программой Европейского Союза Горизонт 2020 в рамках гранта имени Мари Склодовской-Кюри № 766115

# WP1: Разработка новых методов передачи НПФ

Исследователь:  
Нескорнюк В. (ESR1)



## О чём первый рабочий пакет (WP1)?

WP1, возглавляемый Астонским Университетом (проф. С. Турицын), ориентирована на разработку новых схем модуляции и демодуляции на основе нелинейного преобразования Фурье (НПФ) и (с помощью отраслевого партнера NOKIA BELL LABS) интеграцию этих схем в практические оптические системы оптоволоконной связи.

## Мотивация

Хотя в литературе уже были предложены несколько методов связи на основе НПФ, практическое использование НПФ в системах оптической связи требует дальнейших исследований. На сегодняшний день не существует коммерчески жизнеспособного продукта на основе НПФ из-за нескольких инженерных проблем. FONTE станет пионером в разработке новых методов модуляции, демодуляции и обработки сигналов, которые учитывают уникальные преимущества НПФ и его реальные ограничения. WP1 направлен на улучшение и оптимизацию существующих подходов НПФ, определённых членами консорциума.

## Прогресс, достигнутый WP1

Были рассмотрены существующие методы модуляции нелинейного Фурье-спектра. Мы пришли к выводу, что следующие два метода потенциально могут обеспечить наибольшую эффективность: b-модуляция, позволяющая контролировать длительность сигнала, и периодическое НПФ, которая может принести пользу при обработке сигналов и помехах сигнал-шум.

В рамках WP1 мы разработали новый метод компенсации нелинейности в волоконно-оптических линиях связи на основе нейронных сетей (НС) применимый, в частности, к режиму сильной нелинейности. Мы показали, что НС способна компенсировать не только нелинейные искажения, вызванные распространением сигнала по оптическому волокну, но и дефекты, возникающие в результате использования недорогих устаревших компонентов приемопередатчиков, таких как цифро-аналоговый преобразователь и модулятор Маха-Цендера.

## WP2: Влияние практических искажений на НПФ

Исследователь:  
V. Bajaj (ESR2)



### О чём второй рабочий пакет (WP2)?

WP2 под руководством Делфтского технического университета (к.т.н. З. Вальс) занимается анализом эффекта практических искажений сигнала на НПФ и направлен на использование этих знаний для помощи в разработке надежных числовых алгоритмов вычисления НПФ, форматов модуляции и методов компенсации искажений в оптоволоконных линиях связи.

### Мотивация

Любой реальный волоконно-оптический трансивер вызывает множество искажений, таких как, например, различные виды шума, неидеальное усиление, эффекты квантования, наложения спектров или перекрестные помехи. Влияние таких искажений на нелинейный Фурье-спектр в настоящее время недостаточно изучено. Классический анализ этих эффектов применим только в слабо-нелинейном режиме. О сильно-нелинейном режиме, к исследуемому FONTE, известно очень мало. Цель этого пакета задач - проанализировать влияние реальных искажений на НПФ и использовать эти знания для разработки надежных численных алгоритмов НПФ, форматов модуляции и методов коррекции, которые максимально нечувствительны к таким нарушениям.

### Прогресс, достигнутый WP2

Нелинейные искажения ограничивают пропускную способность современных волоконно-оптических систем связи. Нетрадиционные методы передачи, основанные на нелинейных преобразованиях Фурье (НПФ), представляют собой интересный подход для решения этих проблем. Эти методы передачи, однако, основаны на идеальной модели волокна без потерь мощности, тогда как на практике данные потери присутствуют. Было исследовано влияние потерь в волокне на волоконно-оптические системы передачи на основе НПФ. Был исследован новый подход к включению потерь в системы на основе НПФ, который использует модифицированный НПФ и работает в специализированных волокнах, уменьшающих дисперсию (DDF). Комбинированное использование DDF вместе с модифицированным НПФ полностью устраняет эффекты ухудшения качества из-за потерь в волокне в идеальном математическом сценарии. Численные оценки показали значительный выигрыш в производительности линии связи, достигнутый с использованием предложенного решения.

## WP3: Методы машинного обучения для волоконно-оптического канала

Исследователь:  
S.M. Ranzini (ESR3)



### О чём третий рабочий пакет (WP3)?

WP3, возглавляемый Датским Техническим Университетом (профессор Д. Зибар), фокусируется на разработке схем мониторинга качества работы оптоволоконных систем и алгоритмов оценки каналов, использующих НПФ. Инструменты машинного обучения и других моделей на основе обучения с учителем будут применяться для оптимизации волоконно-оптических систем связи.

### Мотивация

Мониторинг качества работы жизненно важен для обеспечения устойчивой и надежной работы систем оптической связи. Он предоставляет показатели качества передачи сигнала, такие как Q-фактор, и помогает приблизительно определить параметры оптического канала связи. Q-фактор связан с оптическим отношением сигнал-шум (ООСШ) и может быть вычислен, глядя на глазковую диаграмму в точках контроля на линии связи. Эти вопросы хорошо изучены для систем, использующих традиционные формы сигналов. Однако, если в будущих оптических сетях будут использоваться схемы передачи на основе НПФ с нестандартными формами сигналов, необходимо разработать алгоритмы для измерения таких величин, как Q-фактор или (ООСШ). В настоящее время не существует известного метода Q-фактора по глазковой диаграмме для НПФ-сигналов. Данная оценка требует точных алгоритмов для систем с негауссовского шума, зависящем от сигнала. Машинное обучение могло бы помочь с этой задачей.

### Прогресс, достигнутый WP3

ESR3 разрабатывает новый приемник на основе опто-электронного машинного обучения для систем на основе некогерентного приёма амплитудно-модулированных сигналов. Предварительная оптическая обработка сигнала заключается в нарезке спектра принятого сигнала на небольшие поддиапазоны с помощью пассивных оптических фильтров, каждый из них обнаруживается отдельным фотодетектором. Цифровая постобработка основана на новейшем методе машинного обучения - резервуарных вычислениях. Мы показали возможность передачи on-off keying сигнала на 32 ГБод и показали увеличение максимальной дальности данной линии связи с 10 км до 40 км (400%) по сравнению существующими чисто цифровыми технологиями.

## WP4: Сетевые приложения технологии NFT

Исследователь:  
A. Shahkarami (ESR4)



### О чём четвёртый рабочий пакет (WP4)?

WP4, возглавляемый Национальной Школой Телекоммуникаций (профессор М. И. Юсефи), фокусируется на разработке систем мультиплексирования с нелинейным частотным разделением каналов на основе NFT для волоконно-оптических сетей.

### Мотивация

Мультиплексирование с нелинейным частотным разделением каналов (МНЧРК) может применяться к одно- и многопользовательским каналам. В настоящий момент, численные и экспериментальные демонстрации в основном ограничиваются однопользовательскими каналами. Тем не менее, МНЧРК имеет большое преимущество в сетях, где имеется несколько передатчиков и приемников. WP4 исследует данные сетевые применения НПФ. Это наиболее актуальный кейс для отраслевого партнера NOKIA BELL LABS и коммерческих систем.

### Прогресс, достигнутый WP4

Недавно было предложено использование глубокого обучения моделей описанию всего оптоволоконного канала с целью устранения ограничения, накладываемых Керровской нелинейностью на скорость передачи информации по волоконно-оптическим системам связи. Важно понять, как этот подход соотносится с традиционными методами. Создав нейронную сеть, приближающую канал, мы провели данное сравнение для маломасштабной системы, которое в настоящее время расширяем до крупномасштабных систем. Помимо этого, ESR4 вместе со своими руководителями исследовал подхода, основанного на обучении признакам, чтобы помочь защитить последовательность передаваемых символов от ошибок, вносимых каналом.



## WP5: Экспериментальная реализация и тестирование систем на основе НПФ

Участвуют все студенты

**NOKIA**  
Bell Labs

### О чём пятый рабочий пакет (WP5)?

WP5, возглавляемый промышленным партнером FONTE NOKIA BELL LABS (к.т.н. Х. Бюлоу), фокусируется на экспериментальной демонстрации алгоритмов, разработанных в WP1-WP4, новых конструкциях систем связи, внедрении и коммерциализации результатов.

### Мотивация

Академические партнеры FONTE - ведущие мировые эксперты в области NFT. Этот необычный кластер экспертов позволяет NOKIA BELL LABS точно определить перспективные технологии на самом раннем этапе, развивать лицензирование интеллектуальной собственности и принимать решения о коммерциализации и разработке продукта.

### Прогресс, достигнутый WP5

Характеристики когерентных оптических высокоскоростных трансиверов ограничены их физическими ограничениями и недостатками. Чтобы работать с максимальной мощностью, мы должны уменьшить нежелательные искажения этих устройств. Экономически эффективный способ решить эту проблему - использовать методы цифрового предварительного искажения (DPD). ESR2 исследовал технику предискажения сигнала нейронной сетью и в лабораторных экспериментах показал улучшение допустимого отношения сигнал-шум на 3 дБ по сравнению с традиционными методами. ESR3 исследует новую конструкцию трансивера, основанную на одновременном применении оптической и цифровой обработки сигнала реализованной с помощью методов машинного обучения. Экспериментальный анализ конструкции, проведенный в NBL, показал увеличение максимальной дальности передачи на 800% по сравнению с чисто цифровыми технологиями.

# Публикации FONTE

## WP1:

- [D1.1 Review and optimization results for the NIS NFT-based systems](#)
- [D1.2 New modulation techniques for NFT systems](#)
- [D1.3 Numerical verification advanced modulation techniques](#)

## WP2:

- [D2.1 Report on major impairments in NFT-based transmission](#)
- [D2.2 Software implementations of the developed robust NFT algorithms](#)
- [D2.3 Numerical and experimental validation of the robust modulation format](#)
- V. Bajaj, S. Chimmalgi, V. Aref and S. Wahls, "Exact NFDM Transmission in the Presence of Fiber-Loss," in Journal of Lightwave Technology, vol. 38, no. 11, pp. 3051-3058, 1 June 1, 2020, [doi: 10.1109/JLT.2020.2984041](https://doi.org/10.1109/JLT.2020.2984041)

## WP3:

- [D3.1 Survey of machine learning algorithms for optical performance monitoring](#)
- [D3.2 System identification and parameter estimation](#)
- [D3.3 Performance analysis of monitoring techniques based on machine learning](#)
- Francesco Da Ros, Stenio M. Ranzini, Henning Bülow, & Darko Zibar. (2020). "Reservoir-computing based equalization with optical pre-processing for short-reach optical transmission." <http://doi.org/10.1109/JSTQE.2020.2975607>
- Ranzini, S.M.; Da Ros, F.; Bülow, H.; Zibar, D. "[Tunable Optoelectronic Chromatic Dispersion Compensation Based on Machine Learning for Short-Reach Transmission.](#)" Appl. Sci. 2019, 9, 4332

## WP4:

- [D4.1 Principles of linear and nonlinear frequency-division multiplexing](#)
- [D4.2 Multi-user communication and information theory](#)

## WP5

- [D5.1 Transmission regime definition and plan of experiments](#)
- [D5.2 Experimental transmissions of NFT-based systems, including \(1\) the NFDM systems and \(2\) the nonlinear inverse synthesis systems](#)