

# Руководство к лабораторному практикуму: ОСНОВЫ ТЕХНИКИ СВЯЗИ

Плата EMONA и NI ELVIS III для изучения систем связи



## Лабораторная работа 15: Принцип OFDM модуляции

## *Перечень изменений*

<b>Дата</b>	<b>Что изменено</b>
4/13/2019	Оформлена окончательная версия документа

## © 2018 Emona Instruments Pty Ltd

Все авторские права на все руководства пользователя по Emona TIMS/ETT-Series/DxIQ, руководства к лабораторным практикумам и прилагаемое к ним программное обеспечение принадлежат компании Emona Instruments Pty Ltd и ее подразделениям. Все права защищены.

### ОГРАНИЧЕНИЯ НА КОПИРОВАНИЕ РУКОВОДСТВ TIMS МАРКОЙ

Лицензионное соглашение предоставляет ограниченные полномочия только тем образовательным учреждениям, которые приобрели учебное лабораторное оборудование Emona TIMS/ETT/DxIQ. Эти полномочия включают в себя тиражирование (полностью или частично) и/или распространение любых руководств пользователя и лабораторных практикумов TIMS/ETT/DxIQ, изданных компанией Emona Instruments, для исключительного использования студентами этих учреждений.

Ограниченные полномочия не предусматривают никаких лицензионных выплат компании Emona.

Компании Emona Instruments Pty Ltd принадлежат права на любые переизданные и/или вторичные документы.

### ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Компания Emona Instruments Pty Ltd уважает чужие права на интеллектуальную собственность и призывает читателей к тому же самому. Этот ресурс защищен законами об авторском праве и интеллектуальной собственности.

LabVIEW и National Instruments являются торговыми марками корпорации National Instruments.

Все другие торговые марки и наименования компаний, упомянутые здесь, являются собственностью соответствующих компаний.

### ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ

Читатель принимает на себя все риски, связанные с использованием настоящего ресурса и всей информации, теоретических сведений, программ, которые там содержатся или описываются. Этот ресурс может содержать технические неточности, типографические ошибки, прочие ошибки и упущения, а также устаревшую информацию. Ни автор, ни издатель не несут никакой ответственности за любые ошибки и упущения, за обновление любой информации, за любые нарушения патентных и других прав интеллектуальной собственности.

Автор и издатель не дают никаких гарантий, включая, без ограничений, любые гарантии на полноту данного ресурса и любой информации, теоретических сведений или программ, содержащихся или описываемых в ресурсе. Также они не дают никаких гарантий, что любые содержащиеся или описываемые в данном ресурсе информация, теоретические сведения и программы не нарушают ничьих патентных прав и иных прав интеллектуальной собственности. **ДАННЫЙ РЕСУРС ПОСТАВЛЯЕТСЯ "КАК ЕСТЬ". НЕ ДАЮТСЯ НИКАКИЕ ГАРАНТИИ, ЯВНЫЕ ИЛИ ПОДРАЗУМЕВАЕМЫЕ, ВКЛЮЧАЯ, НО НЕ ОГРАНИЧИВАЕМЫЕ, ЛЮБЫЕ И ВСЕ ПОДРАЗУМЕВАЕМЫЕ ГАРАНТИИ ТОВАРНОЙ ПРИГОДНОСТИ, ПРИГОДНОСТИ ДЛЯ КОНКРЕТНОЙ ЦЕЛИ И ОТСУТСТВИЯ НАРУШЕНИЙ ПРАВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ.**

Никаких прав и лицензий не предоставляются издателем или автором под любым патентом или другим правом на интеллектуальную собственность явно, косвенно или по решению суда.

НИ ПРИ КАКИХ ОБСТОЯТЕЛЬСТВАХ ИЗДАТЕЛЬ ИЛИ АВТОР НЕ БУДУТ НЕСТИ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ ЗА ЛЮБОЙ ПРЯМОЙ, КОСВЕННЫЙ, УМЫШЛЕННЫЙ, НЕУМЫШЛЕННЫЙ, СТРАХОВОЙ, ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ИЛИ ВТОРИЧНЫЙ УЩЕРБ, ОБУСЛОВЛЕННЫЙ ДАННЫМ РЕСУРСОМ И ЛЮБОЙ ИНФОРМАЦИЕЙ, ТЕОРЕТИЧЕСКИМИ СВЕДЕНИЯМИ И ПРОГРАММАМИ, КОТОРЫЕ ТАМ СОДЕРЖАТСЯ И ОПИСЫВАЮТСЯ, ДАЖЕ ЕСЛИ ОСВЕДОМЛЕННЫ О ВОЗМОЖНОСТИ ТАКОГО УЩЕРБА И ДАЖЕ ЕСЛИ ЕГО ПРИЧИНОЙ ИЛИ ЕГО СПОСОБСТВОВАНИЮ ЯВЛЯЛАСЬ НЕВНИМАТЕЛЬНОСТЬ ИЗДАТЕЛЯ, АВТОРА ИЛИ ИНЫХ ЛИЦ. Применяемый закон не допускает исключений или ограничений по неумышленному или вторичному ущербу. Следовательно, вышеприведенные исключения или ограничения к вам не относятся.

## Содержание

Лабораторная работа 15: Принцип OFDM модуляции .....	6
Цель работы .....	6
Предварительные условия .....	6
Необходимые инструментальные средства и технологии .....	7
Ожидаемые результаты .....	8
Часть 1: Свойство ортогональности .....	9
1.1 Предварительное обсуждение .....	9
1.2 Настройка отдельной поднесущей .....	13
1.2.1 Запуск программы для формирования поднесущих .....	14
1.3 Восстановление отдельной поднесущей .....	18
1.4 Увеличение количества поднесущих .....	21
1.5 Извлечение данных отдельной поднесущей из OFDM сигнала .....	23
Список литературы, в том числе для дальнейшего изучения .....	26
Рисунок 1: Ортогональные поднесущие в частотной области .....	10
Рисунок 2: Поднесущие во временной области .....	11
Рисунок 3: Поднесущие в частотной области .....	11
Рисунок 4: Отдельные поднесущие и их сумма .....	12
Рисунок 5: Блок-схема реализации ОДПФ .....	12
Рисунок 6: Формула IDFT .....	12
Рисунок 7: Окно с проектом Lab15_OFDM.lvproj .....	15
Рисунок 8: Блок-схема системы формирования OFDM сигнала из трех поднесущих .....	16
Рисунок 9: Схема соединений только для поднесущей 1 кГц .....	16
Рисунок 10: Осциллограммы и DFT поднесущих и BPSK сигнала для поднесущей SC1 .....	17
Рисунок 11: Тактовый сигнал 1 кГц; входной и выходной сигналы модуля INTEGRATE & DUMP .....	20
Рисунок 12: Полная схема соединений для всех поднесущих .....	21
Рисунок 13: OFDM сигнал во временной и в частотной областях .....	22
Рисунок 14: Пример скриншот экрана осциллографа: исходный сигнал данных X1; отдельная поднесущая SC1 на входе модуля INTEGRATE & DUMP; выходной сигнал схемы выборки и хранения (S&H); тактовый сигнал .....	23
Рисунок 15: Пример скриншота с экрана осциллографа: исходные данные для поднесущей SC3, полный OFDM сигнал на входе модуля INTEGRATE & DUMP; сигнал на выходе модуля INTEGRATE & DUMP; тактовый сигнал .....	25

# Лабораторная работа 15: Принцип OFDM модуляции

## Цель работы

После выполнения этой лабораторной работы вы должны уметь:

1. Формировать OFDM сигнал с тремя поднесущими
2. Восстанавливать данные путем интегрирования со сбросом (Integrate & Dump)
3. Объяснять значение ортогональности поднесущих
4. Различать пропускную способность нескольких каналов
5. Описывать ограничения с учетом отношения пиковой и средней мощностей (PAPR)

## Предварительные условия

Вы должны выполнить лабораторные работы 1 и 2 и быть знакомыми с оборудованием, его применением и мерами предосторожности при работе с оборудованием.

## Необходимые инструментальные средства и технологии

Платформа: NI ELVIS III

Измерительные приборы:

- Осциллограф в режиме измерений во временной области
- Осциллограф в режиме БПФ
- Функциональный генератор

✓ Доступ к приборам

<https://measurementslive.ni.com>

✓ Руководство пользователя:

<http://www.ni.com/en-us/support/model.ni-elvis-iii.html>

✓ Учебные пособия

[www.ni.com](http://www.ni.com)

Аппаратные средства:

плата EMONA Communication

Компоненты, используемые в этой лабораторной работе:

- 4 шнура с разъемами BNC - штекер "банана" 2 мм
- Проводники со штекерами 2 мм
- Наушники или микронаушники

✓ Руководство пользователя

<http://www.ni.com/en-us/support/model.emona-communications-board-for-ni-elvis-iii.html>

Программное обеспечение:

LabVIEW 2018 и выше

Библиотеки и модули:

- LabVIEW Real-Time Module
- LabVIEW FPGA Module
- NI ELVIS III Toolkit

Файлы для данной лабораторной работы:

Lab15\_OFDM.vi из проекта  
L15\_OFDM.lvproj

✓ Перед загрузкой и установкой ПО обратитесь к преподавателю или лаборанту за информацией о лицензиях на программное обеспечение и об инфраструктуре вашей лаборатории.

✓ Загрузка и установка для станции NI ELVIS III

<http://www.ni.com/academic/download>

✓ Учебные пособия:

<http://www.ni.com/academic/students/learn-labview/>

## Ожидаемые результаты

В этой главе вы должны собрать для отчета:

- ✓ Результаты вычислений
- ✓ Результаты измерений
- ✓ Результаты наблюдений

Преподавателю, скорее всего, необходимо предъявить полный отчет о работе. Узнайте у вашего преподавателя, есть ли конкретные требования к отчету или шаблон для его оформления.



## Часть 1: Свойство ортогональности

### 1.1 Предварительное обсуждение

Модуляция со несколькими несущими дает возможность передачи нескольких модулированных сигналов (или несущих) одновременно в одном канале связи. Этот вид модуляции используется в ряде приложений, которые в настоящее время представлены на массовых рынках средств связи, в том числе в проводных системах типа DSL (Digital Subscriber Lines – цифровые абонентские линии), которые часто называют дискретными мультитональными системами, и в беспроводных системах. Такой вид модуляции обычно называют мультиплексированием с ортогональным частотным разделением сигналов (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing – OFDM), а системы, в которых используется этот вид модуляции – OFDM системами.

OFDM представляет собой комбинацию модуляции и мультиплексирования, или более конкретно и, – как оно следует из названия, является особым случаем частотного разделения каналов.

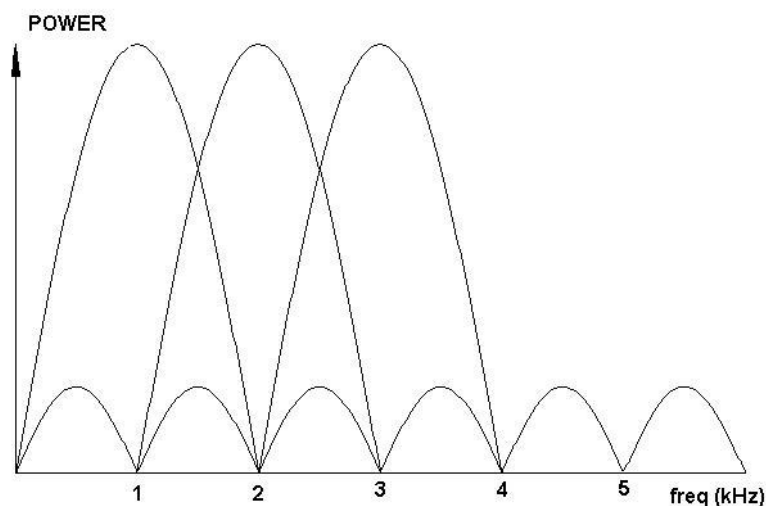
На первый взгляд, термин OFDM звучит очень загадочно, однако, однажды разобравшись с ним, мы увидим, что он нам вполне знаком. Понятие "частотное разделение каналов" знакомо нам из предыдущих лабораторных работ. Суть его заключается в мультиплексировании или распределении потока данных между несколькими несущими частотами.

Основной поток данных разделяется на много потоков данных с более низкой скоростью передачи (т.е. происходит мультиплексирование). Затем каждый из этих потоков модулирует отдельную поднесущую и, наконец, все промодулированные несущие объединяется в один сложный OFDM сигнал для передачи.

Термин "ортогональные" означает "независимые друг от друга", и он относится к частотам каждой поднесущей. Эти поднесущие должны быть независимы друг от друга, что достигается тщательным выбором конкретных частот. Мы обнаружим, что каждая частота поднесущей будет ортогональна остальным, если частоты будут гармонически связаны друг с другом. Проще говоря, каждая из используемых частот должна быть кратна первой из них, например, 1 кГц, 2 кГц, 3 кГц, и т.д., или, допустим, 5 кГц, 10 кГц, 15 кГц и т.д.

Особенностью такого соотношения частот является то, что в точке максимума пика частотного спектра каждой из модулированной поднесущей, значение спектральных компонент остальных поднесущих равно нулю. Благодаря этому основной лепесток спектра на каждой поднесущей можно считать независимым от основных лепестков спектра на соседних поднесущих, опять же, в частотной области.

Хотя в частотной области спектры поднесущих перекрываются, ортогональность частот позволяет их полностью разделить в приемнике. Свойство ортогональности означает, что нули соседних спектров совмещены, как это показано на рисунке 1 ниже.



**Рисунок 1: Ортогональные поднесущие в частотной области**

POWER – мощность, freq (kHz) – частота(кГц)

Для простоты количество поднесущих  $N$  выбрано равным трем:

- а) поднесущая 1 кГц – BPSK сигнал, модулированный сигналом данных Data 1, скорость передачи 1 кбит/с;
- б) поднесущая 2 кГц – BPSK сигнал, модулированный сигналом данных Data 2, скорость передачи 1 кбит/с;
- в) поднесущая 3 кГц – BPSK сигнал, модулированный сигналом данных Data 3, скорость передачи 1 кбит/с.

Каждый из трех сигналов  $m(t)$  (Data 1, Data 2, Data 3) является независимым потоком данных, который модулирует каждую соответствующую поднесущую. Используя три биполярных выхода данных, мы можем умножить каждый из этих сигналов на соответствующую поднесущую, чтобы сформировать три независимых BPSK сигнала. Можно представить себе, что каждый бит данных – это коэффициент конкретной поднесущей в соответствующий момент времени.

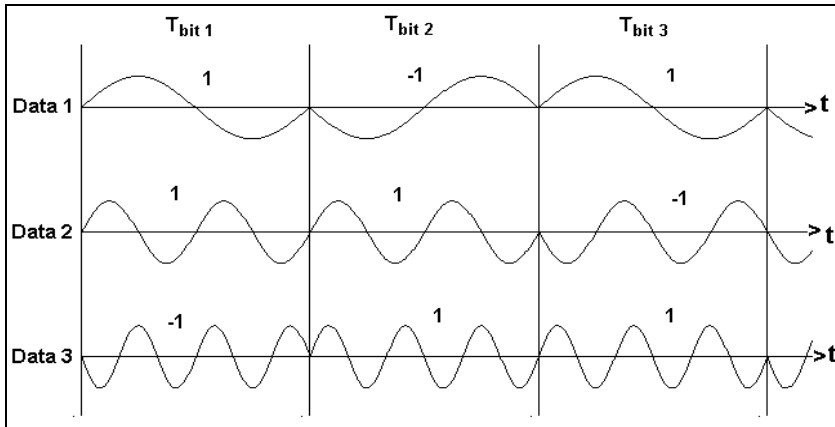


Рисунок 2: Поднесушие во временной области

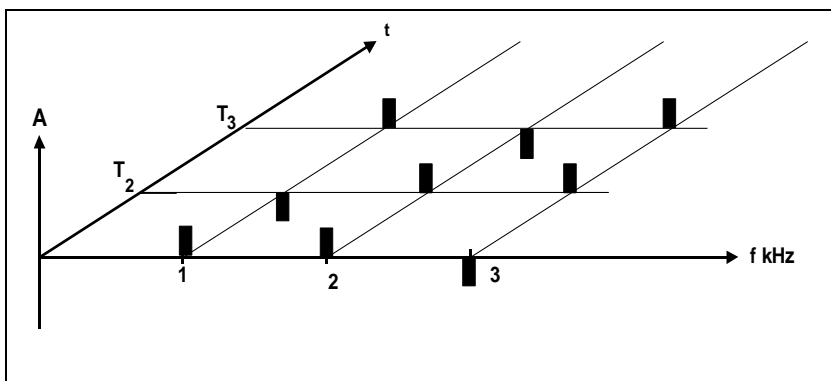


Рисунок 3: Поднесушие в частотной области

Чтобы реализовать дискретное преобразование Фурье (Discrete Fourier Transform – DFT) в аналоговой форме, эти три BPSK сигнала суммируются в соответствии рисунком 4. Таким образом параллельные биты формируют набор коэффициентов для всех поднесущих в каждый момент времени.

Разберем этот процесс подробнее. Представим, то у нас есть 3 потока битов, которые представлены в следующей форме:

Data 1: 1, -1, 1, -1, 1..... Data 2: 1, 1,-1,-1,-1..... Data 3: -1, 1, 1,-1,1.....

Data1– это последовательность относительных фазовых сдвигов BPSK сигнала на поднесущей 1 кГц, а Data2 и Data3 – последовательности относительных фазовых сдвигов на поднесущих соответственно 2 кГц и 3 кГц.

Во время передачи первого бита у нас будет неинвертированная несущая 1 кГц, неинвертированная несущая 2 кГц и инвертированная несущая 3 кГц по отношению к первым двум.

Во время передачи второго бита у нас будет инвертированная несущая 1 кГц, неинвертированная несущая 2 кГц и неинвертированная несущая 3 кГц.

Все эти сигналы суммируются, чтобы сформировать выходной сигнал функции инверсного дискретного преобразования Фурье (Inverse Discrete Fourier Transform – IDFT), который будет основой нашего OFDM сигнала (рисунок 5).

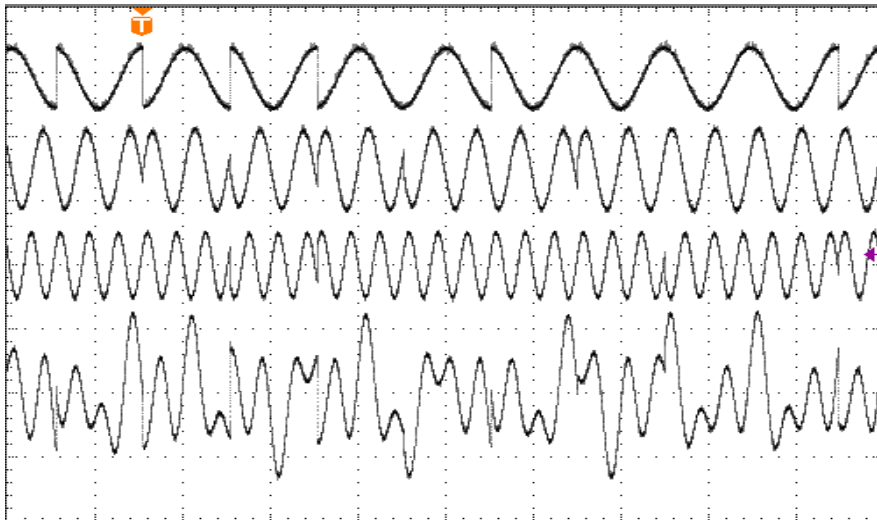


Рисунок 4: Отдельные поднесущие и их сумма

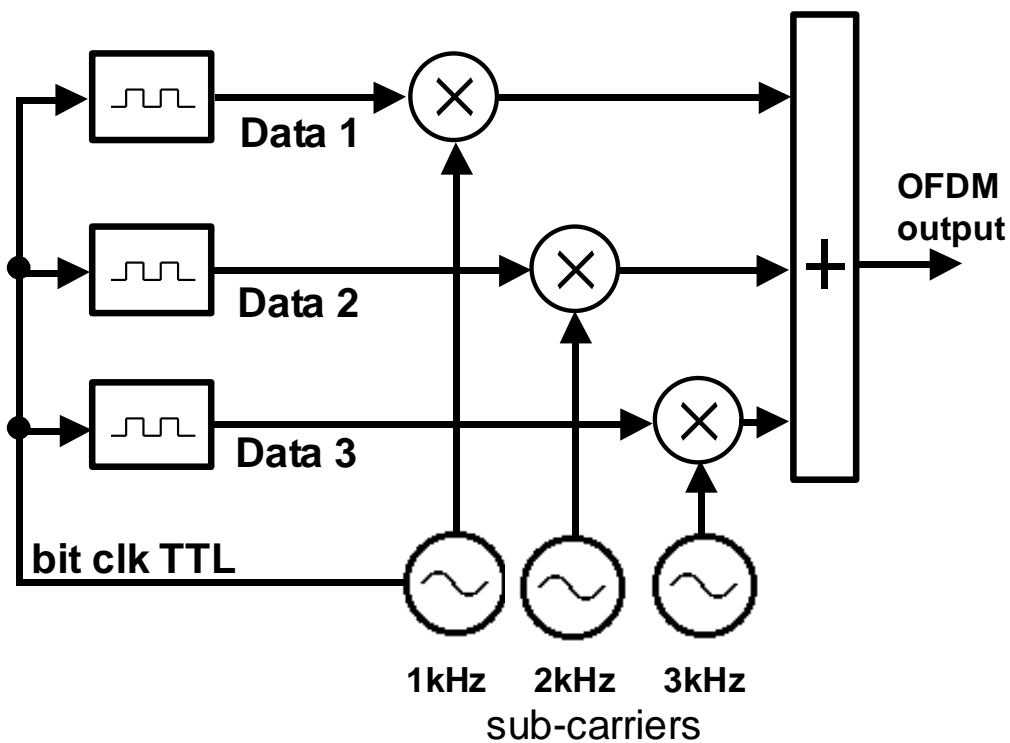


Рисунок 5: Блок-схема реализации ОДПФ

Bit clk TTL –ТТЛ сигнал битовой синхронизации, sub-carriers – поднесущие, OFDM output – выходной OFDM сигнал

$$C(t) = \sum_{n=1}^N m_n(t) \cdot \sin(2\pi n t)$$

Рисунок 6: Формула IDFT

На рисунке 6  $m_n(t)$  – множество (N) мультиплексированных потоков данных, а  $\sin(2.\pi.nt)$  – множество (N) ортогональных поднесущих. Этот набор операций умножения и сложения сигналов и данных можно представить как инверсное дискретное преобразование Фурье (IDFT).

IDFT просто и естественно реализуется в цифровых сигнальных процессорах (DSP), как предварительное мультиплексирование.

В настоящей лабораторной работе мы эффективно реализуем эту функцию IDFT с помощью отдельных схемных модулей, и, таким образом, лучше разберемся в сути этого важного процесса самого по себе и его применения при формировании OFDM сигнала. Поскольку IDFT реализовано в аналоговой форме, на входе приемника прямое преобразование Фурье не требуется. Для каждой поднесущей будет использоваться простая некогерентная демодуляция.

## 1.2 Настройка отдельной поднесущей

В большинстве экспериментов с OFDM сигналами будет использоваться одновременно некоторое множество поднесущих. Такие сигналы модулируются с помощью алгоритма цифровой обработки сигналов (DSP), и в этом случае полный поток данных распределяется между множеством поднесущих с использованием одной процедуры IDFT. В данном вводном эксперименте вы будете использовать отдельные потоки данных для каждой поднесущей, и все эти поднесущие будут затем суммироваться. Это позволяет полностью сосредоточить внимание на формировании сигнала из многих поднесущих.

Будут исследоваться проблемы синхронизации с символами данных в процессе восстановления, а корректность восстановления данных с каждой поднесущей будет подтверждаться визуально. Рассматривается также, как использовать модуль INTEGRATE & DUMP (интегрирующий фильтр со сбросом).

Для выполнения этого эксперимента вам потребуется 45-60 минут.

## Включение питания платы EMONA Communications

1. Убедитесь, что кнопка *Board Power* включения питания платы в левом верхнем углу NI ELVIS III находится в состоянии OFF (не светится).
2. Аккуратно вставьте плату EMONA Communications в слот станции NI ELVIS III, убедившись, что она полностью зафиксирована спереди и сзади.
3. Убедитесь в том, что станция NI ELVIS III подключена к компьютеру с помощью USB кабеля, и компьютер включен.
4. Включите питание платы, нажав один раз на кнопку *Board Power*, и убедитесь в том, что она светится. Светодиоды на плате EMONA Communications также должны светиться. Если они не светятся, немедленно выключите питание платы и проверьте, правильно ли она вставлена и подключена.
5. Откройте в вашем браузере утилиту Instrument Launcher (утилита запуска измерительных приборов) и выберите нужные измерительные приборы.

### Конфигурация осциллографа

Channels (Каналы)	2V/div (2 В/дел.)
Horizontal & Acquisition (Масштаб по оси времени)	1ms/div (1 мс/дел.)
Trigger (Запуск)	Type: Analog edge, Source: Channel 1 input, Rising (Аналоговый "фронт", Источник: канал 1, нарастающий)
Probe Attenuation (Коэффициент деления пробника)	1x

#### 1.2.1 Запуск программы для формирования поднесущих

В данном конкретном эксперименте нам нужны три синхронизированных синусоидальных сигнала в качестве поднесущих. Поскольку они являются гармонически связанными, самый простой вариант синхронизации заключается в обеспечении нулевой разности фаз их между собой, а также между ними и тактовым импульсом битовой синхронизации.

Фактически, импульсы битовой синхронизации в данном эксперименте формируются при переходе через нуль соответствующего синусоидального сигнала, чтобы гарантировать полную синхронизацию этих сигналов.

Эти сигналы генерируются FPGA станции NI ELVIS III, что позволяет формировать точно такие сигналы, как нам нужны в данном приложении. Эти сигналы поступают с модуля NI ELVIS SIGNALS OUT на плате Emona Communications.

После того, как вы загрузили необходимый в данном эксперименте файл Lab15\_OFDM.lvproj, откройте его, как показано ниже в окне Project Explorer на рисунке 7. Генерирует сигнал OFDM\_intro\_signals.vi. В результате ее компиляции создается двоичный файл, который загружается в FPGA.

Чтобы запустить данную программу после компиляции, вам необходимо:

- a) Сконфигурировать IP адрес вашей станции NI ELVIS III – ввести актуальный IP адрес.
- b) Запустить программу из файла “Lab15\_OFDM.vi”. Она представляет собой "интерфейсную" программу, которая загружает двоичный файл в FPGA и запускает его.
- c) Когда вы закончите работать с программой, щелкните по кнопке STOP.

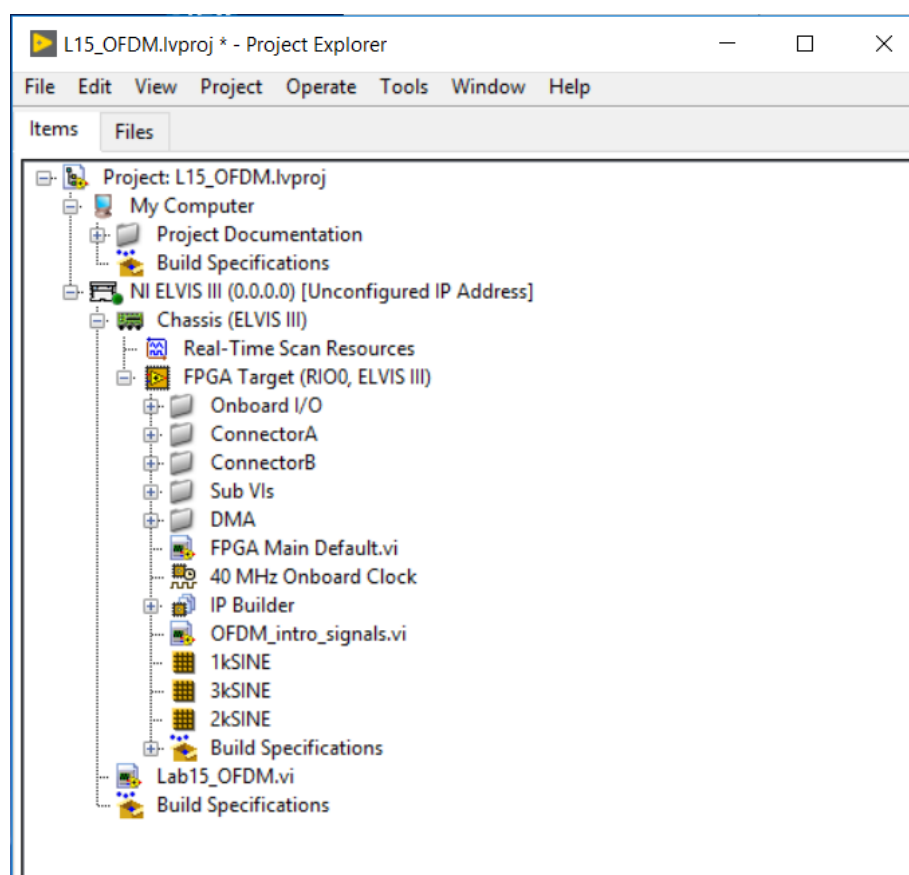
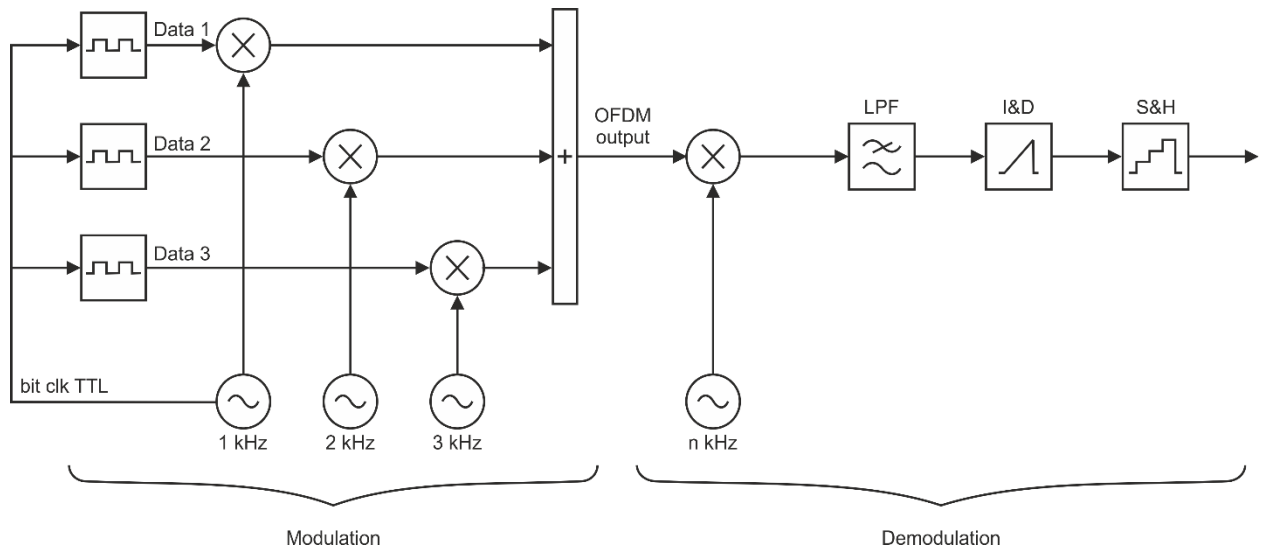


Рисунок 7: Окно с проектом Lab15\_OFDM.lvproj

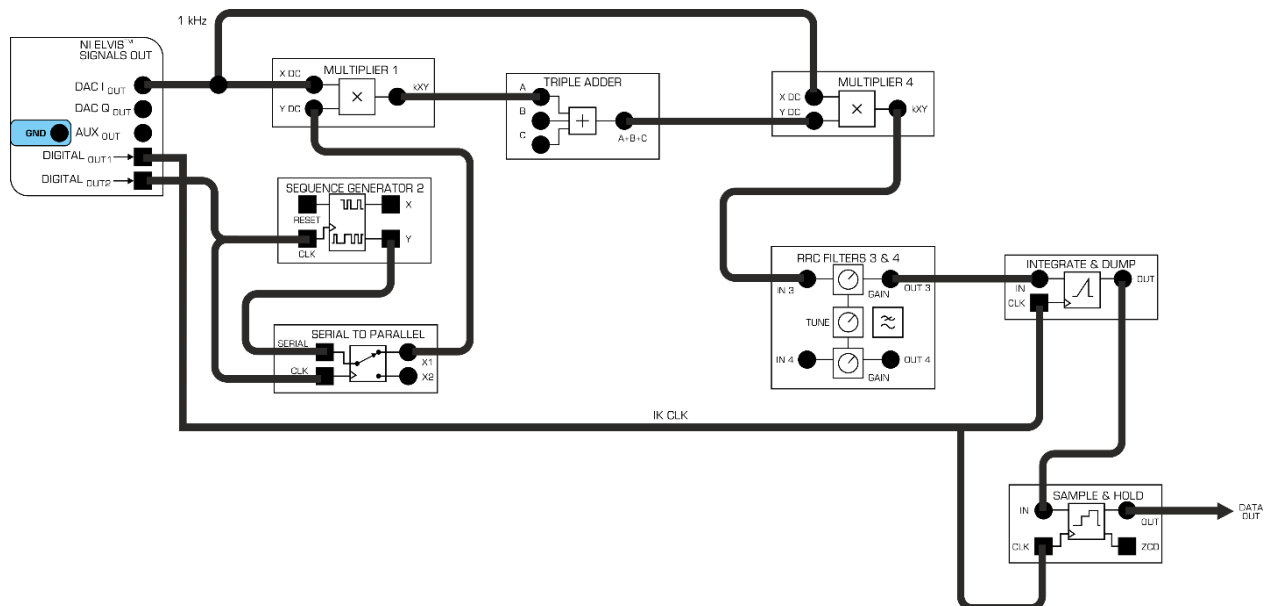
Чтобы создать наш OFDM сигнал из трех поднесущих, мы реализуем блок-схему системы, приведенную ниже на рисунке 8.



**Рисунок 8: Блок-схема системы формирования OFDM сигнала из трех поднесущих**

Modulation – Модуляция, Bit clk TTL – TTL сигнал битовой синхронизации, Data X – поток данных X Demodulation – Демодуляция, OFDM output – выходной OFDM сигнал

1. Начните собирать схему с первой поднесущей 1 кГц, как показано на рисунке 9.



**Рисунок 9: Схема соединений только для поднесущей 1 кГц**





Рисунок 10: Осциллограммы и DFT поднесущих и BPSK сигнала для поднесущей SC1

2. Пронаблюдайте осциллограммы сигналов X1 и X2 на выходе модуля SERIAL TO PARALLEL вместе с сигналом битовой синхронизации 1 кГц на выходе DIGITAL<sub>OUT1</sub> модуля NI ELVIS SIGNALS OUT. Убедитесь в том, что период следования в каждом биполярном потоке данных равен 1 мс, даже если частота тактового сигнала на входе модуля SERIAL TO PARALLEL равна 2 кГц.

1-1 Почему периоды следований данных для сигналов X1 и X2 равны 1 мс, а не 0,5 мс?

---



---



---



---

Переключение уровней сигналов X1 и X2 происходит по разным фронтам тактового сигнала 1 кГц, однако в данном случае это не имеет значения. Заметьте, что мы обозначаем биполярные сигналы X1 и X2 как "символы" (элементы данных), а не как биты, поскольку они были преобразованы в биполярную форму из цифрового потока бит с помощью модуля SERIAL TO PARALLEL.

3. Пронаблюдайте первую BPSK поднесущую на выходе модуля TRIPLE ADDER. Убедитесь в том, что на экране осциллографа в режиме FREQUENCY виден именно BPSK сигнал частотой 1 кГц.

### 1.3 Восстановление отдельной поднесущей

Теперь мы рассмотрим процесс демодуляции для этой же отдельной поднесущей.

1. Пронаблюдайте сигнал на выходе умножителя MULTIPLIER 4, подключив его к каналу осциллографа, который ранее использовался для измерения сигнала X2. Обратите внимание на ожидаемую уже знакомую спектральную составляющую с удвоенной частотой, а также четко выраженный уровень постоянной составляющей.

1-2 Почему сигнал содержит постоянную составляющую и гармонику 2 кГц?

---

---

---

---

2. Пронаблюдайте выходной сигнал фильтра RRC FILTER 3 с помощью того же канала осциллографа. Установите регуляторы GAIN и TUNE на максимальное значение (по часовой стрелке до упора).

В данный момент перед нами стоят две задачи, которые необходимо решить настройкой RRC фильтра. Во-первых, необходимо уменьшить полосу пропускания фильтра примерно до 1 кГц, а также устранить "суммарную" спектральную составляющую 2 кГц. Во-вторых, требуется синхронизировать восстановленный сигнал с тактовым сигналом битовой синхронизации 1 кГц для последующего использования в модуле INTEGRATE & DUMP (интегрирующий фильтр со сбросом).

3. Пронаблюдайте на одном из каналов осциллографа сигнал битовой синхронизации 1 кГц на входе CLK модуля INTEGRATE & DUMP. На другом канале наблюдайте сигнал на выходе фильтра RRC FILTER 3. Кроме того, на третьем канале наблюдайте сигнал OUT на выходе модуля INTEGRATE & DUMP. Вы увидите осциллограмму, похожую на показанную на рисунке 10.
4. Плавно поворачивайте регулятор TUNE против часовой стрелки, пока спектральная составляющая 2 кГц не исчезнет. С этого момента вращайте регулятор еще медленнее, чтобы переходы через ноль восстановленного сигнала синхронизировались с положительным фронтом сигнала битовой синхронизации 1 кГц, как показано на рисунке 10. Поскольку это может вызвать затруднения, полезно (i) настроить запуск осциллографа по сигналу битовой синхронизации, (ii) использовать режим однократного запуска развертки осциллографа ("Single"), чтобы после каждой тонкой регулировки просматривать отдельный кадр, и так до тех пор, пока не добьетесь требуемого результата.
5. Сделайте скриншот этого синхронизированного сигнала для вашего отчета.

Следует обратить внимание на то, что восстановленный элемент данных (символ) корректно синхронизируется с тактовым сигналом 1 кГц, т.е. весь элемент данных интегрируется от начала до конца, не затрагивая часть соседнего элемента. На рисунке 10 вы можете видеть, что если все сделано правильно, проинтегрированный выходной сигнал максимален.

Модуль INTEGRATE & DUMP обладает мощными возможностями подавления шума, поскольку шум усредняется в течение периода интегрирования, а "сигнал" максимизируется.

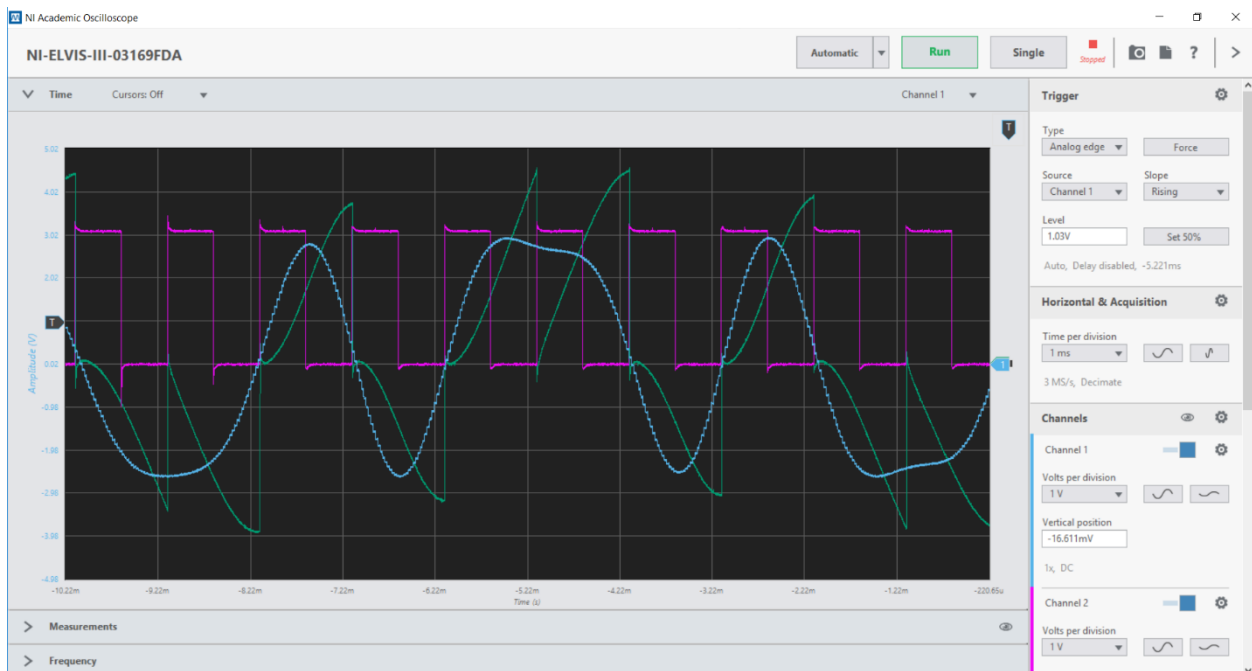


Рисунок 11: Тактовый сигнал 1 кГц; входной и выходной сигналы модуля INTEGRATE & DUMP

6. С помощью 4-го канала осциллографа наблюдайте также сигнал исходных данных X1 на выходе модуля SERIAL TO PARALLEL и убедитесь в том, что вы можете видеть соотношение между исходным сигналом и сигналом на выходе модуля INTEGRATE & DUMP.
7. Переключите 4-й канал осциллографа с выхода модуля INTEGRATE & DUMP на выход модуля SAMPLE & HOLD. Убедитесь в соответствии сигнала X1 и этого биполярного сигнала.
8. Сделайте скриншот осциллограммы этих восстановленных сигналов для вашего отчета.

## 1.4 Увеличение количества поднесущих

1. Соберите схему всей системы, добавив оставшиеся две поднесущие, так, как показано ниже на рисунке 12.

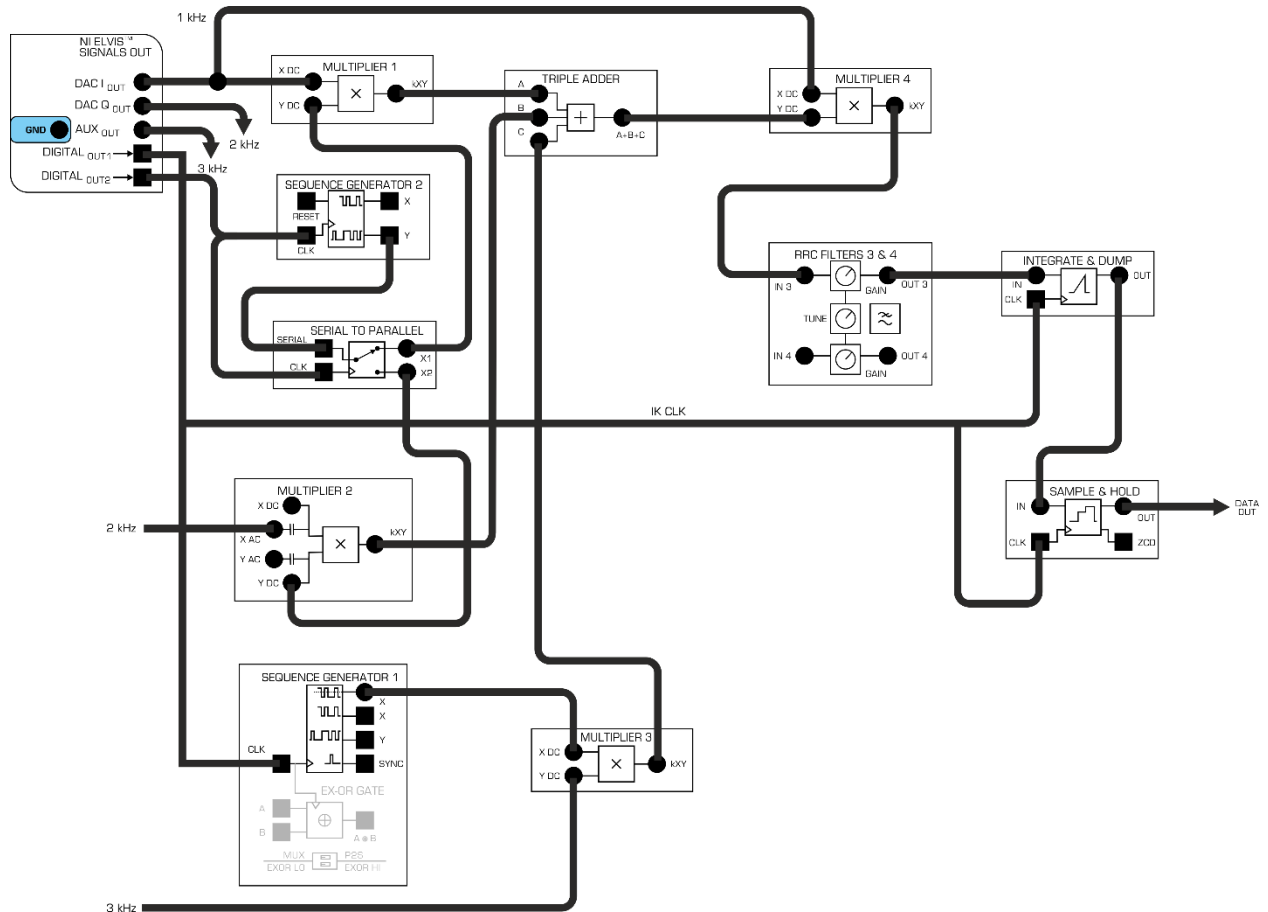


Рисунок 12: Полная схема соединений для всех поднесущих

2. Пронаблюдайте полный OFDM сигнал на выходе модуля TRIPLE ADDER во временной и в частотной областях. Отключите часть поднесущих от входов модуля TRIPLE ADDER, чтобы увидеть индивидуальный вклад оставшихся поднесущих в выходной сигнал во временной и в частотной областях.

1-3 Запишите отображаемые на экране FFT центральные частоты для каждого компонента поднесущих BPSK сигналов.

---



---



---



---

Обратите внимание, что хотя модуляция с постоянной огибающей типа BPSK используется для каждой из поднесущих, огибающая OFDM сигнала не является постоянной. Поскольку OFDM сигнал является суммой многих поднесущих, то у него очень высокий уровень отношения пиковой и средней мощностей (Peak to Average Power Ratio – PARP). Если максимальная амплитуда одной из несущих равна  $V$ , то максимально возможная амплитуда OFDM сигнала равна  $N \times V$ . Этот максимум может быть достигнут, когда все поднесущие синхронизированы, что в общем случае при большом  $N$  бывает крайне редко.

$$PAPR = \frac{|x(t)|^2}{P_{avg}}$$

Большое значение отношения пиковой и средней мощностей является самым существенным для практического применения недостатком OFDM сигнала, поскольку требуют, чтобы в передатчиках OFDM сигнала использовались усилители мощности, которые являются линейными в широком диапазоне мощностей. Поскольку максимальную амплитуду передаваемый сигнал достигает редко, только малая часть диапазона мощностей усилителя может использоваться большую часть времени. Это очень неэффективно. Несмотря на то, что любые нелинейности в цепях передатчика приводят к увеличению коэффициента битовых ошибок (BER), в практически используемых системах применяется некоторое ограничение амплитуды (что является нелинейной операцией). Поскольку такое случается очень редко, с этим можно смириться.

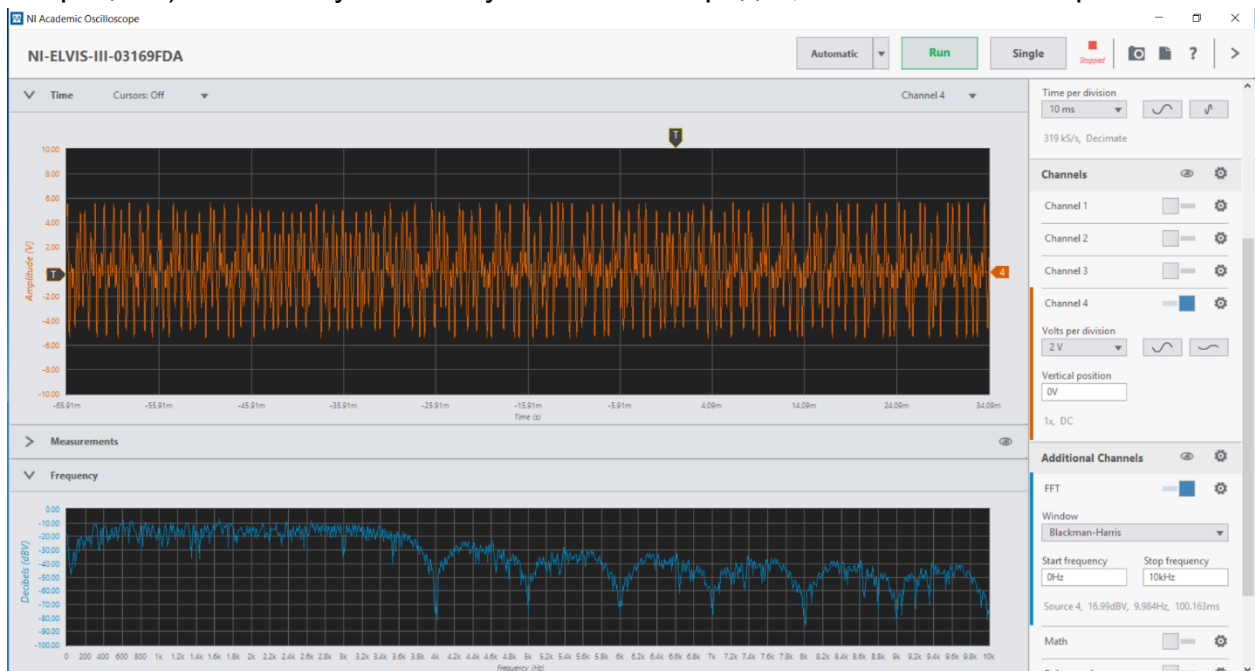


Рисунок 13: OFDM сигнал во временной и в частотной областях

## 1.5 Извлечение данных отдельной поднесущей из OFDM сигнала

OFDM система на основе DSP процессора одновременно извлекает данные из отдельных поднесущих с помощью функции FFT, которая преобразует сигнал из частотной области во временную область.

В этой части лабораторной работы пользователю предстоит "вручную" извлекать данные отдельных поднесущих поочередно.

1. Пронаблюдайте сигнал на входе модуля INTEGRATE & DUMP и тактовый сигнал 1 кГц, который следует использовать в качестве сигнала запуска осциллографа.
2. Отсоедините проводники от входов В и С сумматора TRIPLE ADDER и настройте RRC фильтр так, чтобы период следования символов данных был синхронизирован с тактовым сигналом битовой синхронизации. То же самое вы делали ранее в п.1.3 этой лабораторной работы. Выполните такую же процедуру для синхронизации.

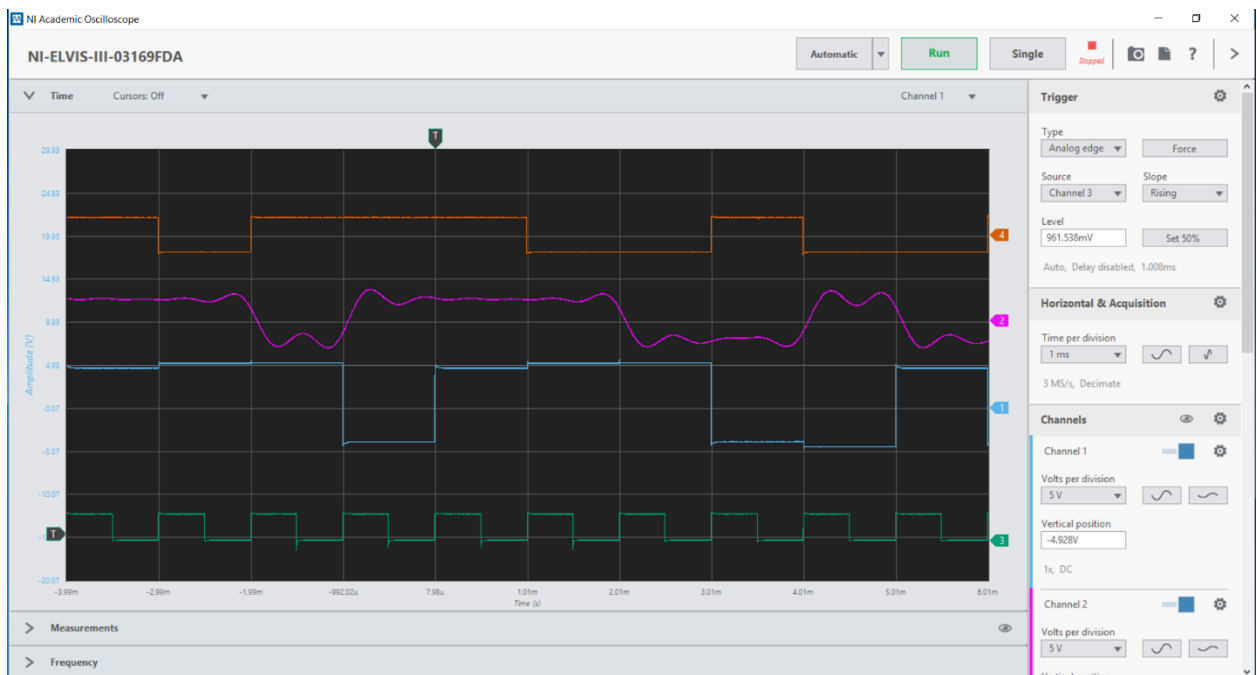


Рисунок 14: Пример скриншот экрана осциллографа: исходный сигнал данных X1; отдельная поднесущая SC1 на входе модуля INTEGRATE & DUMP; выходной сигнал схемы выборки и хранения (S&H); тактовый сигнал

На рисунке 14 – обратите внимание на задержки сигнала от передатчика до приемника и схемы восстановления данных.

3. Снова подключите отключенные ранее две поднесущие на входы В и С и наблюдайте исходный сигнал данных X1 с частотой 1 кГц и сигнал на выходе схемы выборки и хранения. Теперь вы работаете с полным OFDM сигналом из трех поднесущих. У вас должна быть возможность убедиться, что восстановленные данные совпадают с исходными данными (X1) с точностью до некоторой задержки.

1-4 Почему возникает задержка?

---

---

---

4. Повторите то же самое для поднесущей 2 кГц. На этот раз убедитесь, что при демодуляции несущая 2 кГц поступает на вход умножителя MULTIPLIER 4. Отсоедините проводники от входов А и С. Добейтесь синхронизации данных. Восстановите подключение проводников ко входам А и С и сравните потоки данных (X2). Теперь вы работаете с полным OFDM сигналом из трех поднесущих. Восстановленный поток данных может оказаться инвертированным.

1-5 Почему восстановленные данные могут оказаться инвертированным?

---

---

---

5. Повторите то же самое для поднесущей 3 кГц. На этот раз убедитесь, что при демодуляции несущая 3 кГц подана на вход умножителя MULTIPLIER 4. Отсоедините проводники от входов А и В. Добейтесь синхронизации данных. Восстановите подключение проводников ко входам А и В и сравните потоки данных (биполярный сигнал X с выхода генератора последовательностей SEQUENCE GENERATOR 1). Теперь вы снова работаете с полным OFDM сигналом из трех поднесущих, из которого вы восстанавливаете один поток данных из трех передаваемых потоков.



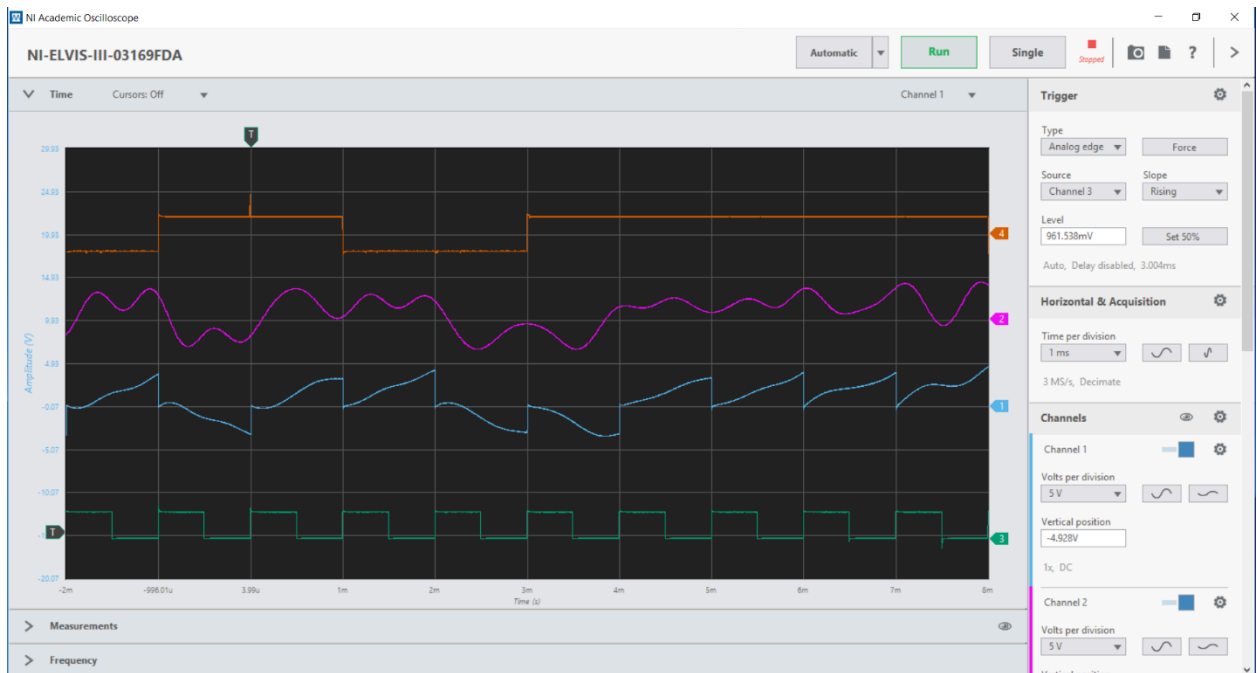


Рисунок 15: Пример скриншота с экрана осциллографа: исходные данные для поднесущей SC3, полный OFDM сигнал на входе модуля INTEGRATE & DUMP; сигнал на выходе модуля INTEGRATE & DUMP; тактовый сигнал

На данном этапе у вас будет восстановленный поток данных с каждой поднесущей полного OFDM сигнала, реализованные "вручную" функцией DFT, которая является обратной по отношению к функции IDFT, используемой для формирования OFDM сигнала в передатчике.

Обладая этими знаниями, вы без труда поймете, как значительно большее количество поднесущих может быть использовано для повышения помехозащищенности OFDM модуляции за счет распределения данных по всей доступной ширине спектра

## Список литературы, в том числе для дальнейшего изучения

B.Le Floch, M. Alard and C.Berrou, "Coded Orthogonal Frequency Division Multiplex", Proc. IEEE, pp.982-996, Vol.83, No.6, June 1995

C. Langton, "Orthogonal Frequency Division Multiplex Tutorial",  
[www.complextoreal.com](http://www.complextoreal.com)