**Features**

Выполнение прямого и обратного преобразования Фурье форматов равных степеням 2. В реализации присутствует 6 разных вариантов исполнения основного модуля операции Бабочка. С разными аппаратными затратами и временными характеристиками. Присутствует внешний сброс входного FIFO, без вмешательства в работу основной части модуля.

**Application**

Спектральный анализ входного потока данных

**Pinot list**

Таблица 1. Параметры

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Название | Численное значение | Описание |
| DWL | >2 | Длинна входного слова |
| W\_DWL | >2 | Внутренняя длинна слова поворачивающего множителя |
| ALW | >2 | Формат преобразования равный 2AWL |
| BIT\_REVERS\_WRITE | 0 | Прямая адресация при записи данных во входное FIFO |
| 1 | Бит реверсная адресация при записи данных во входное FIFO |
| LayWL | [2:5] | Количество битов выделяемых под счетчик слоев в устройстве управления |
| INVERSE | 0 | Прямое преобразование Фурье |
| 1 | Обратное преобразование Фурье |
| synch\_RESET | 0 | Триггеры с асинхронным сбросом |
| 1 | Триггеры с синхронным сбросом |
| BUT\_CLK\_CYCLE | 2 | 2 такта на выполнение операции Бабочка. Затраты  (4MUL 3ADD 3SUB) |
| 3 | 3 такта на выполнение операции Бабочка. Затраты  (4MUL 3ADD 3SUB) |
| 4 | 4 такта на выполнение операции Бабочка. Затраты  (2MUL 2ADD 2SUB) |
| 5 | 4 такта на выполнение операции Бабочка. Затраты  (2MUL 1ADD 1SUB) |
| 6 | 4 такта на выполнение операции Бабочка. Затраты  (1MUL 1ADD 1SUB) |

Таблица 2. Порты

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Название | Разрядность | Описание |
| i\_DATA\_R | [DWL-1:0] | Входной порт реальной составляющей |
| i\_DATA\_I | [DWL-1:0] | Входной порт мнимой составляющей |
| i\_WR\_DATA | 1 | Сигнал записи(валидности) входных данных |
| IN\_FIFO\_RST | 1 | Сброс адресации входного FIFO, без нарушения работы устройства |
| FULL | 1 | Входное FIFO полное |
| o\_DATA\_R | [DWL-1:0] | Выходной порт реальной составляющей |
| o\_DATA\_I | [DWL-1:0] | Выходной порт мнимой составляющей |
| VALID | 1 | Сигнал стробирующий выходные данные |

**Functional block diagram**

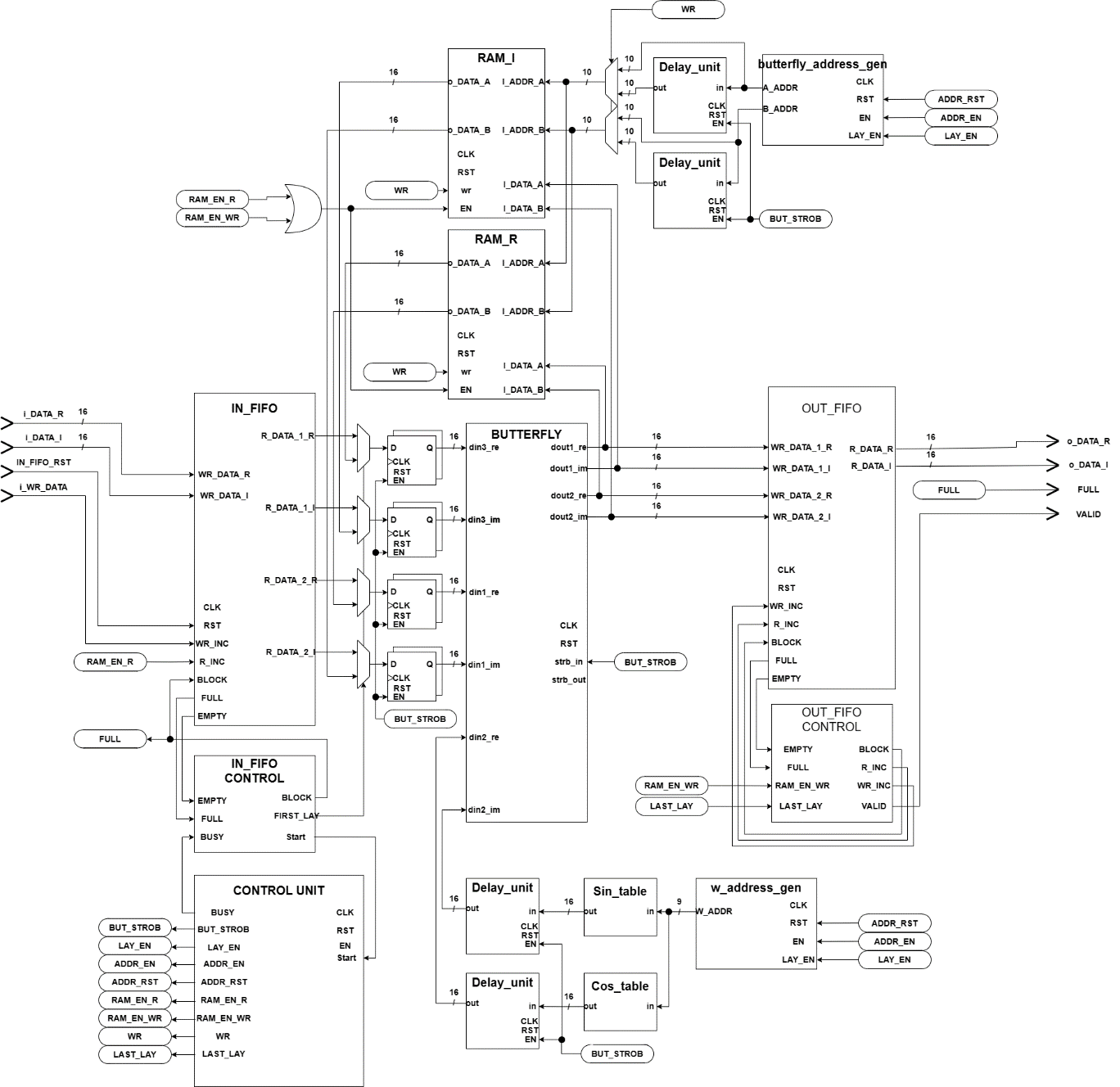


Рисунок 1 - Структурная схема

IN\_FIFO

Входное FIFO имеющее модифицированную структуру. Внутри находится две двух портовые память (Dual port RAM). Один порт предназначен только для чтения, другой переключаемый. Запись данных происходит как в обычном FIFO. Чтение происходит с двух портов. Сигнал BLOCK, блокирует запись в входное FIFO, тем самым разрешая чтение с двух портов. Чтения с одного порта запрещено.

IN\_FIFO CONTROL

Устройство контролирующее входное FIFO и формирующие сигнал START. Работает за счет полного заполнения и опустошения FIFO. Сигнал FULL возникающий на FIFO превращается в START и BLOCK, который держится до появления EMPTY.

OUT\_FIFO

Выходное FIFO имеющее модифицированную структуру. Внутри находится две двух портовые память (Dual port RAM). Один порт предназначен только для записи, другой переключаемый. Чтение данных происходит как в обычном FIFO. Запись происходит с двух портов. Сигнал BLOCK, разрешает запись с двух портов в выходное FIFO, тем самым запрещая чтение. Запись с одного порта запрещена.

OUT\_FIFO CONTROL

Устройство контролирующее выходное FIFO и формирующие сигнал VALID. Работает за счет полного заполнения и опустошения FIFO. Сигнал FULL возникающий на FIFO превращается в VALID и BLOCK, которые держатся до появления EMPTY.

BUTTERRFLY

Устройство выполнения операции Бабочка. Оно не имеет своих входных регистров, по этой причине они были установлены отдельно перед модулем.

RAM\_R/RAM\_I

Обычный модуль двух портовой памяти (Dual port RAM).

Butterfly\_address\_gen

Устройство генерации адреса выборки данных для операции Бабочка. Для алгоритма быстрого преобразования Фурье с прореживанием по времени. Генерация происходит согласно графу выборки см рис 2

w\_address\_gen

Устройство генерации адреса выборки поворачивающих множителей для операции Бабочка для алгоритма быстрого преобразования Фурье с прореживанием по времени. Генерация происходит согласно графу выборки см рис 2

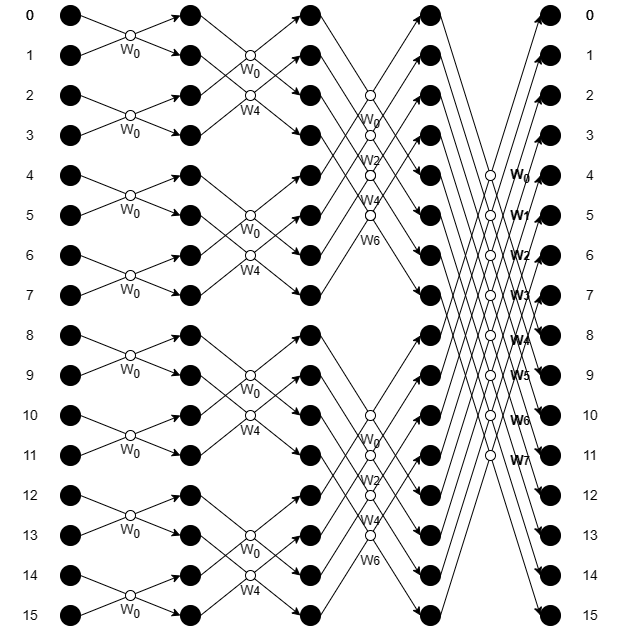


Рисунок 2 – Пример графа БПФ(FFT) прореживания по времени для 16 точек

cos\_table/sin\_table

Постоянное запоминающее устройство(ROM). Хранит полупериод косинуса либо синуса, для формирования поворачивающих множителей.

Delay\_unit

Устройство задержки, представляет собой последовательно включенные D-триггеры для формирования ножной временной диаграммы.

CONTROL\_UNIT

Устройство управления. Формирует временную диаграмму управляющих сигналов: генерации адреса, выборки, хранения, смены слоя и стробирующий сигнал для модуля Бабочка. Так как в проекте присутствует 5 различных вариантов устройств управления. Для каждого отельная временная диаграмма управляющих сигналов

**Description**

Имеется два режима работы: выполнение прямого и обратного преобразования Фурье. Выбор конкретного режима задается перед синтезом, в параметрах(INVERSE), и влияет на заполнение ROM хранящей в себе значения синуса.

Так же в параметрах задаются такие параметры как:

* Длинна входного слова(DWL), для мнимой и реальной части одинаковая
* Внутренняя длинна слова поворачивающего множителя(W\_WDL).
* Формат преобразования 2^AWL (нужно указать AWL)
* Запись входных данных в битинверсной адресации (BIT\_REVERS\_WRITE)
* Количество битов выделяемых для счетчика слоев в устройстве управления (LayWL)
* Количество тактов выполнения операции бабочка (BUT\_CLK\_CYCLE)
* Выбор сброса в тригерах синхронный(1), асинхронный(0) (synch\_RESET).

Взаимодействие с модулем происходит в соответствии с временной диаграммой, приведённой на рис 3.

На временной диаграмме присутствует 3 основных этапа:

* Запись данных

В этот момент входное FIFO записывает данные поступающие на входные порты по стробирующему сигналу i\_WR\_DATA. Количество входных посылок данных за время(количество тактов) выполнения FFT, не должно превышать формат преобразования. Количество тактов, требуемых для выполнения FFT рассчитывается по формуле 1 или 2. Где – формат преобразования, BCC(Butterfly Clock Cycle) – количество тактов выполнения операции Бабочка.

Для Бабочек с периодами 2 и 3

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1) |

Для Бабочек с периодами 4, 5 и 6

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2) |

* Выполнение первого слоя FFT

Во время данного этапа запись во входное FIFO не возможна. Количество тактов, затрачиваемых на выполнение первого слоя, рассчитывается по формуле 3

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3) |

* Вывод данных

Вывод данных может происходить как во время выполнения первого слоя, так и во время записи данных. Количество тактов, затрачиваемых на вывод, рассчитывается по формуле 4

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4) |

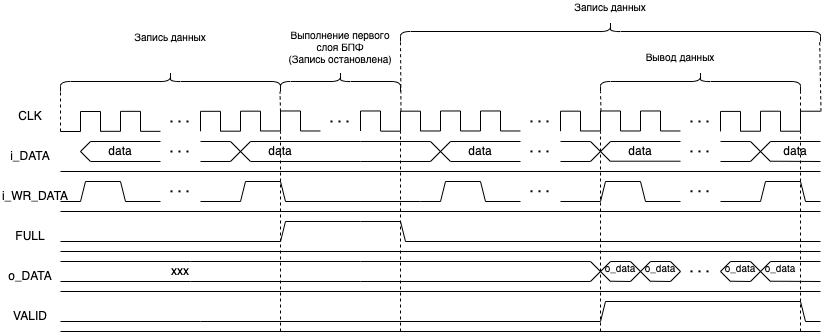


Рисунок 3 – Временная диаграмма взаимодействия с модулем FFT

**Area & Timing analysis**

Синтез, для получения данных этого раздела, происходил на максимально возможных частотах каждой конфигурации модуля FFT.

В таблицах 3, 4 и 5 представлены данные затрачиваемых ресурсов, потребляемой мощности и характеристики тактового сигнала. Данные представлены для конфигураций модуля FFT с 2,3,4,5 и 6, циклами тактового генератора для выполнения операции бабочка.

Таблица 3 – Затрачиваемы ресурсы

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Total LUTs | 484 | 470 | 367 | 443 | 399 |
| Logic LUTs | 484 | 479 | 367 | 443 | 399 |
| FFs | 365 | 400 | 308 | 325 | 396 |
| RAMB18 | 7 | 7 | 8 | 8 | 8 |
| DSP48 Blocks | 4 | 4 | 2 | 2 | 1 |

Таблица 4 – Потребляемая мощность

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Total On-Chip Power (W) | 0.128 | 0.161 | 0.119 | 0.116 | 0.120 |
| Dynamic (W) | 0.020 | 0.053 | 0.011 | 0.008 | 0.012 |
| Device Static (W) | 0.108 | 0.109 | 0.108 | 0.108 | 0.108 |

Таблица 5 – Характеристики тактового сигнала

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Period(ns) | 5.5 | 5.0 | 6.0 | 7.0 | 7.000 |
| Frequency(MHz) | 181.818 | 200 | 166.667 | 142.857 | 142.857 |

Все данные отчетов report\_utilization, report\_power, report\_timing\_summary программы Vivado расположены на гит репозитории в папке «../report/max»

Получив временные характеристики можно рассчитать возможную производительность модуля FFT. Расчет будет производить с учетом того что перед модулем расположен буфер способных хранить число отсчетов(можно рассчитать по формуле 5, если поток данных постоянный) поступивших за время выполнения первого слоя, а также выполняющий меж тактовую синхронизацию.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5) |

Расчет минимального периода тактового сигнала поступающих данных можно рассчитать по формуле 6.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (6) |

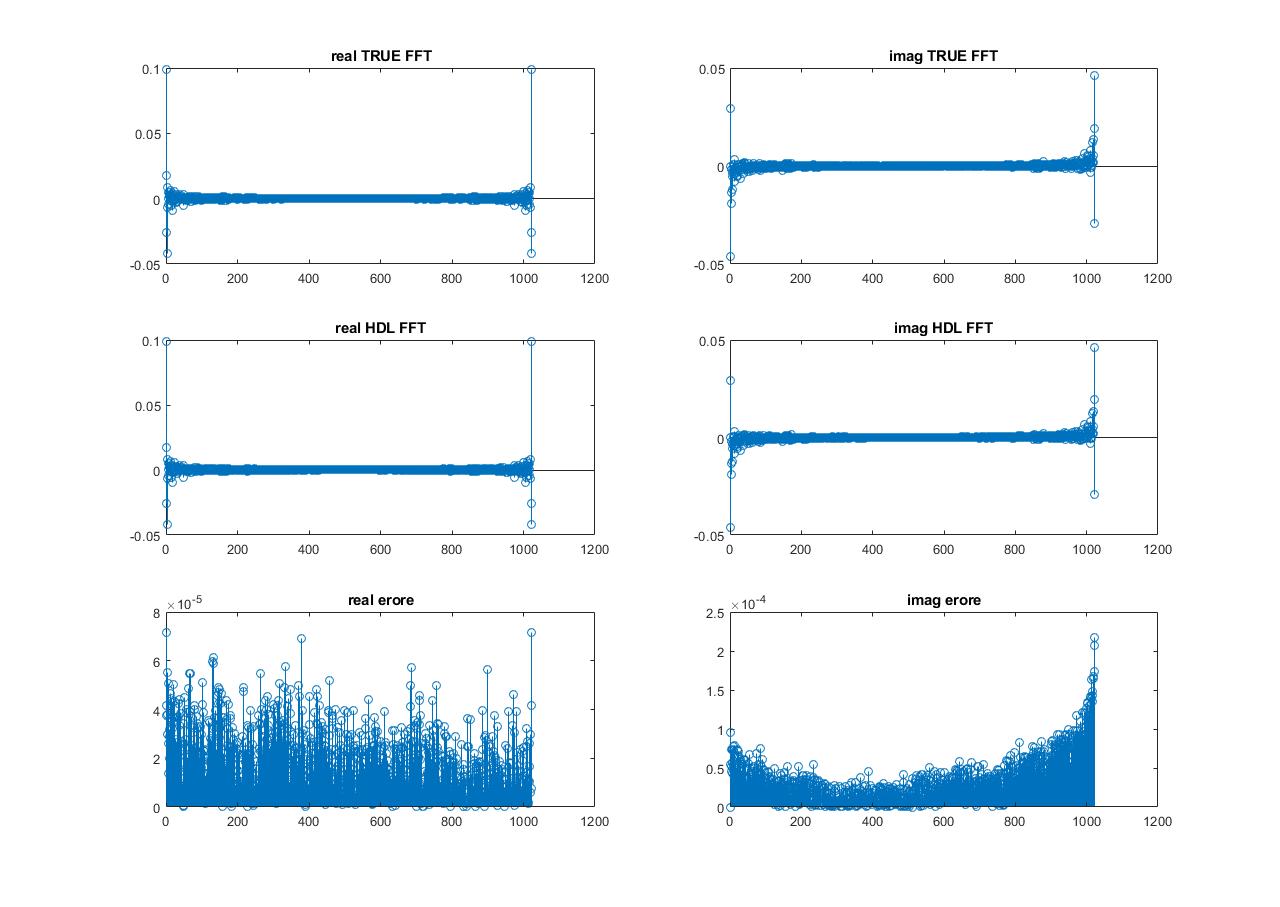
Для примера возьмем для всех конфигураций модуля FFT одну частоту на которой они способны работать , а также максимальные частоты для каждой конфигурации для сравнения их пиковой производительности. Получим следующие результаты см таблица 6 рис 678.

Таблица 6 –

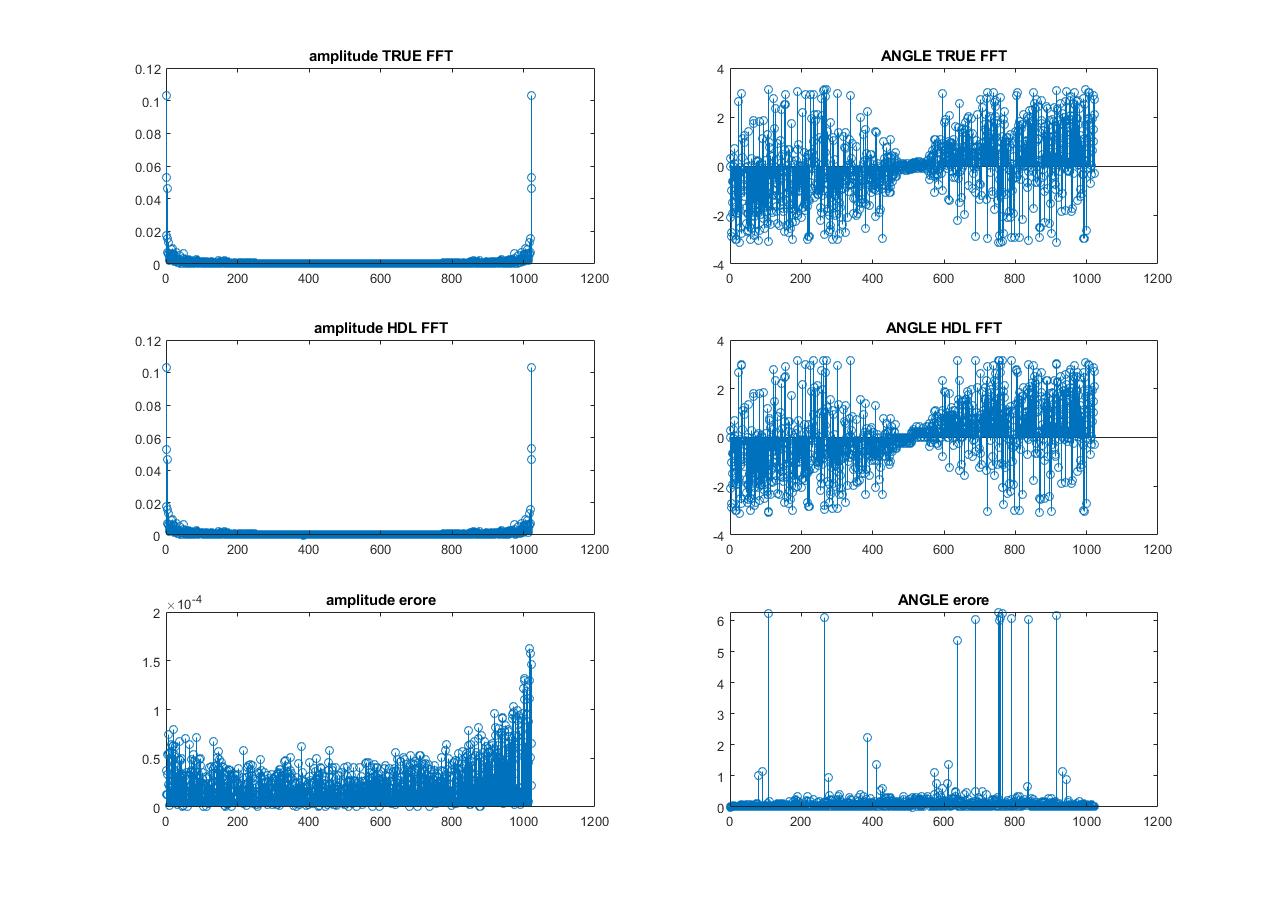
|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|  |  | | | | |
| Период CLK (ns) | 110 | 160 | 210 | 260 | 310 |
| Частота(MHz) | 9.09 | 6.25 | 4.76 | 3.84 | 3.22 |
|  |  | | | | |
| Период CLK | 60.5 | 80 | 126 | 182 | 217 |
| Частота(MHz) | 16.52 | 12.50 | 7.93 | 5.49 | 4.60 |

**Simulation results**

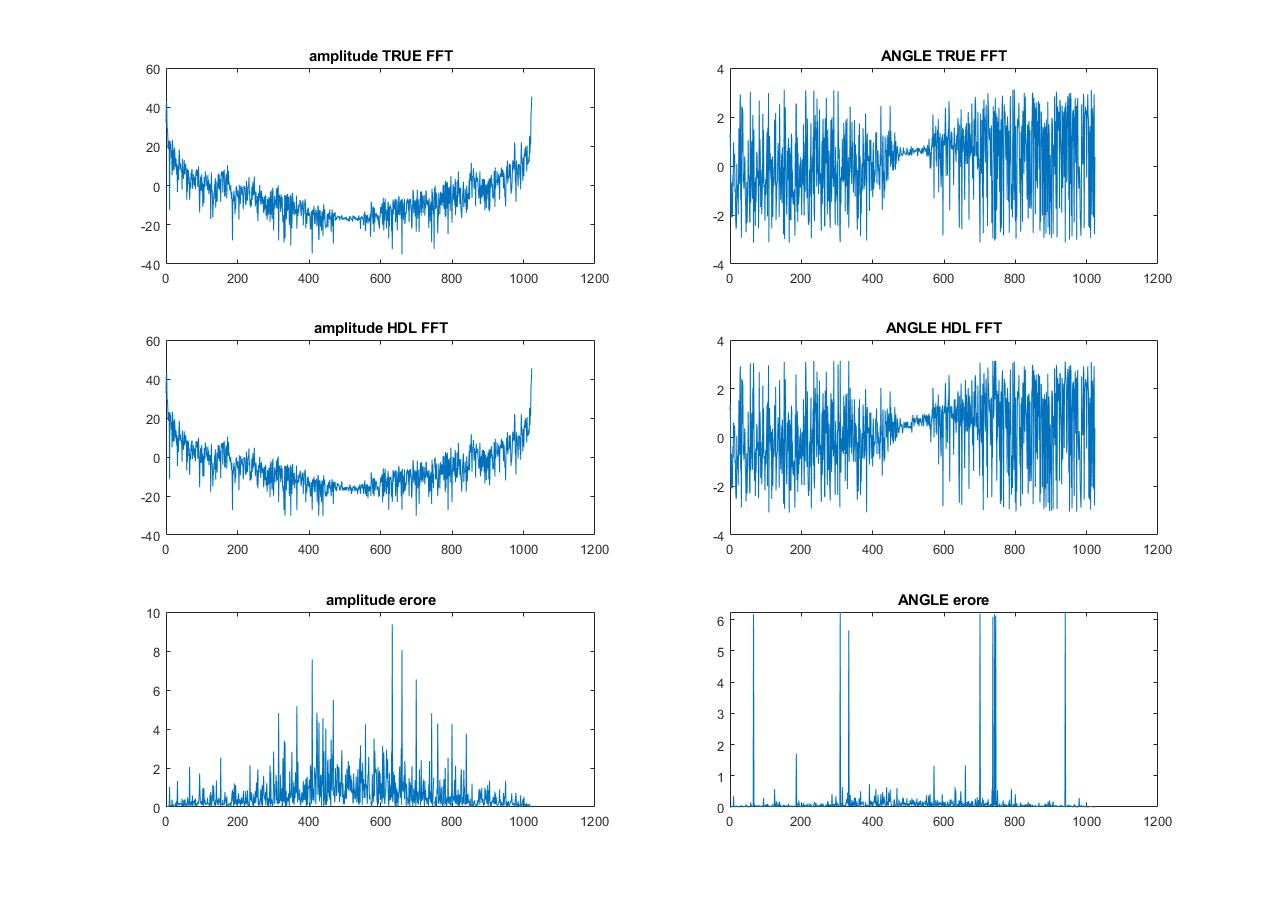
В качестве эталонной модели возьмем функцию MATLAB «fft» с форматом преобразования 1024 и возвращаемым типом данных double. HDL модель имеет такой же формат преобразования 1024, но выходной тип данных Q15. На вход обоих моделей подадим квантованные данные, чтобы оценить ошибку, вносимую самой моделью и не учитывать ошибку, вносимую первоначальным квантованием данных.



Сравнение амплитудного и фазового спектра



Так же представим амплитудный и фазовый спектр в логарифмическом масштабе



Так же в качестве примера подадим наборы данных состоящих из простых синусоид в мнимой и реальной частях и постоянной составляющей в мнимой части.

