

РАМ4 DSP для приёмопередатчиков с дальностью передачи до 80 км для использования в распределённых центрах обработки данных.



**Иванов Дмитрий Максимович
MALTsystem, инженер**

Октябрь 2023



РАМ4 DSP для приёмопередатчиков с дальностью передачи до 80 км для использования в распределённых центрах обработки данных.

Содержание

- 1 Актуальность
- 2 Цели работы
- 3 Задачи
- 4 Предлагаемая схема DSP
- 5 Теоретическое описание
- 6 Результаты моделирования
- 7 Практические результаты
- 8 Альтернативы PAM4
- 9 Выводы

Актуальность



В настоящее время активно исследуется вопрос применения технологий цифровой обработки сигналов и многоуровневой модуляции PAM4 в высокоскоростных волоконно-оптических линиях связи с дальностью от 2 до 80 км с целью повышения скорости передачи. Такие системы связи необходимы для создания распределённых центров обработки данных, которые играют критически важную роль для технологий ИИ и больших данных, а также облачных вычислений.

Цель работы



Целью работы является разработка высокоэффективного IM/DD приёмопередатчика, использующего модуляцию PAM4 и работающий на символьной скорости 28 GBaud. Такой приёмопередатчик может использоваться для реализации QSFP модулей стандартов 200G/400G, например, стандартов второго поколения 200/400GBASE-ER4/8 с дальностью передачи 40 км.

Задачи

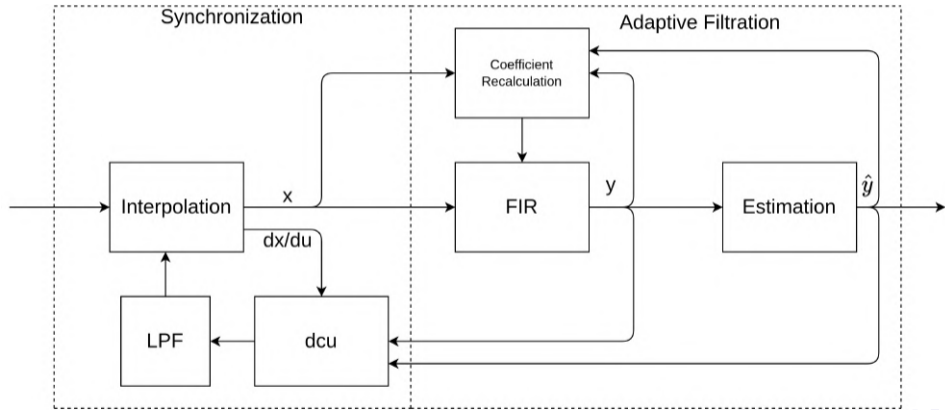


Для достижения цели необходимо решить несколько задач:

- 1 Разработать оптическую часть дискретную или основанную на интегральной фотонной технологии.
- 2 Разработать ЦАП, АЦП с достаточной полосой и символьной скоростью.
- 3 Реализовать алгоритмы синхронизации и коррекции межсимвольной интерференции, которая привносится в следствие несовершенства оптической и аналоговой части.



Предлагаемая схема DSP



Теоритическое описание DSP



Предлагаемый DSP состоит из двух блоков. Интерполятора, который обеспечивает синхронизацию. И адаптивного FFE-эквалайзера, который производит коррекцию межсимвольной интерференции. Коррекция коэффициентов эквалайзера производится традиционным методом на основании DD-FFE. Данный основан на градиентном спуске по коэффициентам эквалайзера C_{bs} для целевой функции.

$$CF = \sum_{i=0}^{N-1} (z_i - z_i^e)^2$$

Для коррекции момента интерполяции также используется минимизация по u .

DD-FFE-эквалайзер

Преобразование DD-FFE-эквалайзера:

$$z_i = \sum_{b=0}^{M_{sps}-1} \sum_{s=0}^{M_{FSE}} C_{bs} \hat{x}((i-s)M_{sps} - b) \quad (1)$$

Направление градиентного спуска DD-FFE-эквалайзера рассчитывается следующим образом:

$$\frac{\partial CF}{\partial C_{bs}} = \sum_{i=0}^{N-1} \hat{x}((i-s)M_{sps} - b) [z_i - z_i^e] \quad (2)$$

DD-FFE-эквалайзер



Расчёт направления спуска можно упростить применив voting-методы.

$$V_{bs}^{up} - V_{bs}^{down} = \sum_{i=0}^{N-1} \text{sgn}(\hat{x}((i-s)M_{sps} - b) [z_i - z_i^e]) \quad (3)$$

$$C_{bs}^{next} = \begin{cases} C_{bs} + step & \text{if } V_{bs}^{up} - V_{bs}^{down} > V_{thr} \\ C_{bs} - step & \text{if } V_{bs}^{up} - V_{bs}^{down} < -V_{thr} \\ C_{bs} & \text{if } -V_{thr} \leq V_{bs}^{up} - V_{bs}^{down} \leq V_{thr} \end{cases} \quad (4)$$

Интерполяция



Интерполяция производится с помощью классической кубической интерполяции:

$$x_{r,i}(u) = x_{in,i-1}(-u^3/6 + u^2/2 - u/3) + x_{in,i}(u^3/2 - u^2 - u/2 + 1) + x_{in,i+1}(-u^3/2 + u^2/2 + u) + x_{in,i+2}(u^3/6 - u/6) \quad (5)$$

Для коррекции интерполяции воспользуемся будем минимизировать целевую функцию по u :

$$\frac{dCF}{du} = \sum_{i=0}^{N_F} \frac{\partial CF}{\partial x_{r,i}} \frac{\partial x_{r,i}}{\partial u} \quad (6)$$

Интерполяция

Производная целевой функции выписывается в виде:

$$\frac{dCF}{du} = 2 \sum_{b=0}^{M_{sps}-1} \sum_{s=0}^{M_{FSE}} \sum_{j=0}^{N-1} C_s(z_j - z_j^{est}) \frac{\partial x_{r,j-s}}{\partial u} \quad (7)$$

Для расчёта направления спуска необходим дополнительный интерполяционный фильтр, который используется для расчёта производных:

$$\begin{aligned} \frac{\partial x_{r,i}}{\partial u} = & x_{in,i-1}(-u^2/2 + u - 1/3) + x_{in,i}(3u^2/2 - 2u - 1/2) + \\ & + x_{in,i+1}(-3u^2/2 + u + 1) + x_{in,i+2}(u^2/2 - 1/6) \quad (8) \end{aligned}$$

Результаты моделирования

Параметры моделирования

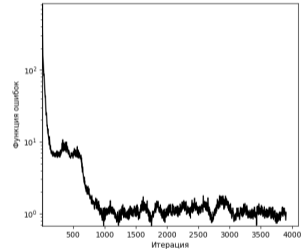
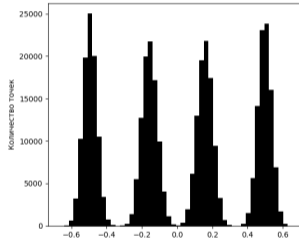
$$F_S = 28\text{GBd}$$

$$F_{CH} = 20\text{GHz}$$

$$L = 80\text{km}$$

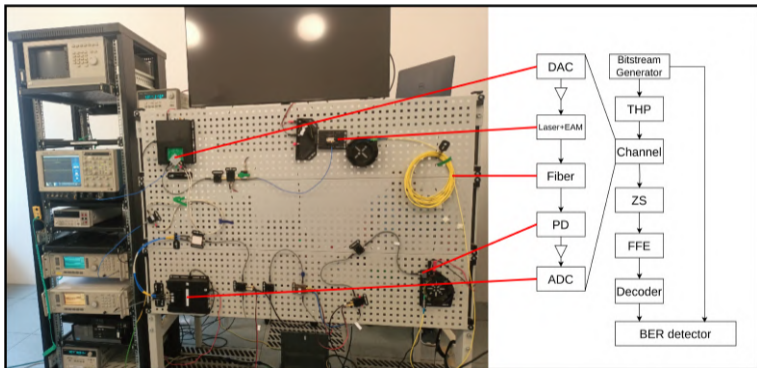
$$\Delta F = 100\text{kHz}$$

$$SNR = 24\text{dB}$$

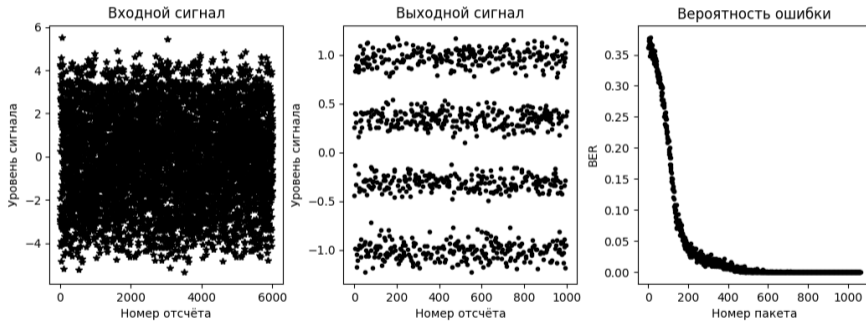


Гистограмма сигнала и зависимость функции ошибок от номера итерации.

Практические результаты



Практические результаты



Входной сигнал эквалайзера, выходной сигнал эквалайзера, вероятность битовой ошибки(BER)



Альтернативы PAM4



В качестве альтернатив исследовались системы с DMT модуляцией, а также когерентные схемы. DMT схемы требуют более сложной обработки сигналов, однако они гораздо менее требовательны к качеству аналоговой и оптической части. Когерентные схемы в свою очередь требуют более сложной оптической части, которая должна содержать в себе оптический гетеродин.

Формат модуляции	Пропускная способность
NRZ	16 Gb/s
PAM4	21 Gb/s
DMT	25-30 Gb/s

Выводы



- 1 В ходе работы разработаны и опробованы алгоритмы, которые корректируют межсимвольную интерференцию и обеспечивает синхронизацию для сигнала с форматом модуляции PAM4.
- 2 Проведено моделирование для линий длиной до 80 км.
- 3 Начаты практические исследования на собственной аналоговой части.

Спасибо за внимание.

