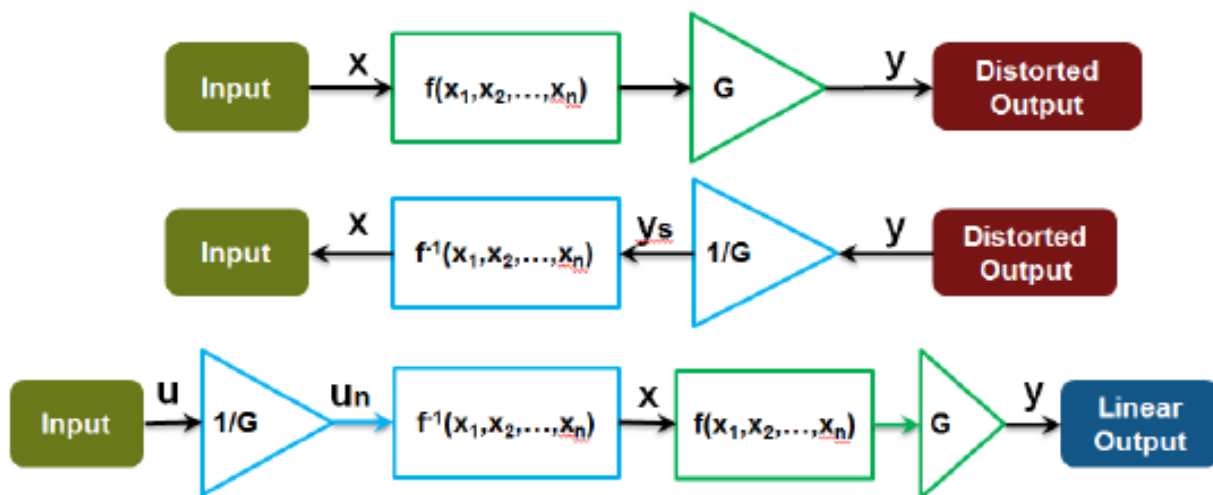


# Digital pre-distortion (DPD)

Шубин Д.А., ЦРТС, Санкт-Петербург, 2020г

Цифровой алгоритм DPD вносит во входной сигнал усилителя предускажения, которые компенсируют нелинейность передаточной характеристики (ПХ) усилителя. Рассматривается наиболее эффективный/реализуемый алгоритм полиномиальной адаптивной фильтрации с обучением методом LMS. В процессе обучения специальный сигнал пропускается через приемо-передающий тракт по петле. При динамической подстройке предускажений в процессе работы необходимо минимизировать время обучения, в течение которого тракт недоступен для приема и передачи.

## 1. Описание алгоритма



Нелинейный оператор усилителя мощности  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ :

$$y_{MP}(n) = \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{m=0}^{M-1} a_{km} x(n-m) \left| x(n-m) \right|^k$$

$x$  – входной сигнал усилителя

$y$  – выходной сигнал усилителя

$a_{km}$  – коэффициенты полинома

$M$  – глубина памяти усилителя

$K$  – степень полинома

$n$  – дискретное время

DPD-инверсный нелинейный оператор  $f^{-1}(x_1, x_2, \dots, x_n)$ :

$$x_{MP}(n) = \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{m=0}^{M-1} d_{km} y_{ss}(n-m) |y_{ss}(n-m)|^k$$

$$y_{ss}(n) = y(n+dn)/G$$

$G$  – коэффициент усиления

$dn$  – временной сдвиг

$d_{km}$  – коэффициенты полинома

Адаптация коэффициентов (алгоритм LMS):

$$W(n) = W(n-1) + \mu Y e(n)^*$$

$$e(n) = x(n) - W'Y$$

$$Y = [y(n) \ y(n-1) \dots y(n-M+1) \ y(n)^*|y(n)| \dots y(n-M+1)^*|y(n-M+1)| \dots \\ \dots y(n)^*|y(n)|^{(K-1)} \dots y(n-M+1)^*|y(n-M+1)|^{(K-1)}]$$

$$W = [d_{00} \ d_{01} \dots d_{0(M-1)} \ d_{10} \ d_{11} \dots d_{1(M-1)} \dots d_{(K-1)0} \dots d_{(K-1)(M-1)}] - \text{вектор коэффициентов}$$

$\mu$  – скорость градиентного спуска

$*$  – комплексное сопряжение

$e(n)$  – ошибка адаптации на  $n$ -м шаге

Критерии качества DPD:

1) Коэффициент подавления н/л искажений:

$$K = 10 \lg \left( \frac{\sum_{n=0}^{N-1} ((x_n(n) - y_n(n))^2)}{\sum_{n=0}^{N-1} ((x_n(n) - z_n(n))^2)} \right)$$

$x_n$  – нормированная комплексная огибающая сигнала на входе усилителя либо DPD-корректора

$y_n$  – нормированная комплексная огибающая сигнала на выходе усилителя без DPD-корректора

$z_n$  – нормированная комплексная огибающая сигнала на выходе усилителя с DPD-корректором

2) Выигрыш в динамическом диапазоне

Потери мощности в результате применения DPD:

$$K_{\text{п}} = 10 \lg \left( \frac{\sum_{n=0}^{N-1} (y(n)^2)}{\sum_{n=0}^{N-1} (z(n)^2)} \right)$$

$y$  – комплексная огибающая сигнала на выходе усилителя без DPD-корректора

$z$  – комплексная огибающая сигнала на выходе усилителя с DPD-корректором

Выигрыш в динамическом диапазоне после применения DPD оценивается как увеличение линейного диапазона линейности ПХ минус потери мощности.

Частота дискретизации 20 МГц

Тестовый сигнал для адаптации коэффициентов – три гармоники с некратными частотами

Сигнал для проверки качества адаптации в мат-модели – белый шум с ограниченной полосой 2 МГц

Сигнал для проверки качества адаптации в железе – три гармоники с некратными частотами

## 2. LMS DPD. Saleh-модель усилителя. Результаты моделирования

Обучающий сигнал – импульс 50 мкс (три гармоники). Рабочий сигнал - белый шум с ограниченной полосой 2 МГц. Память усилителя – 150 нс, н/л 5 степени

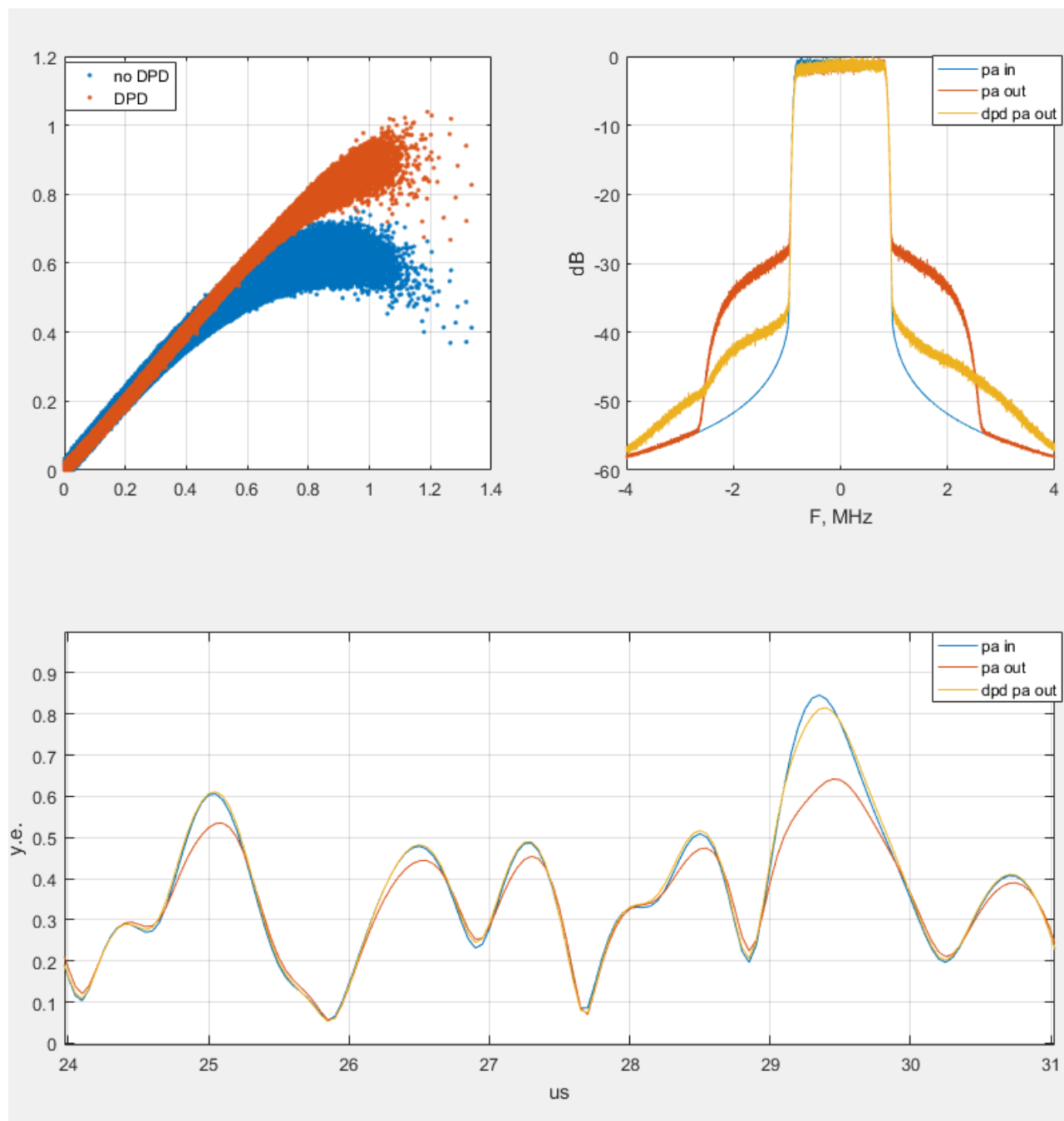


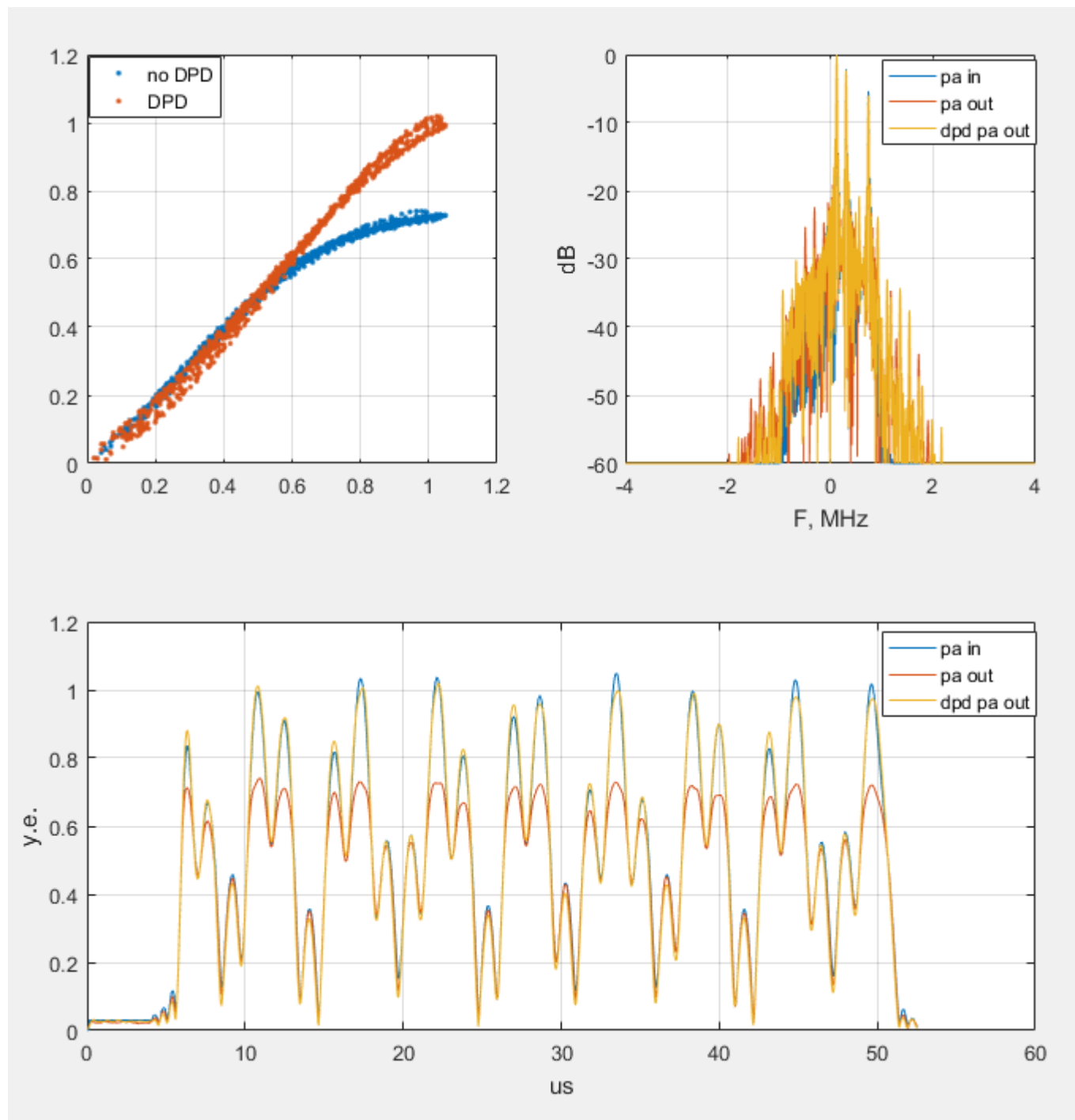
Рис 1 - 1) ПХ тракта до (no DPD) и после (DPD) коррекции; 2) спектр до (pa\_in) и после (pa\_out) усилителя, а также после усилителя с DPD-коррекцией (dpd\_pa\_out); 3) нормированные амплитуды огибающих сигналов до усилителя (pa\_in), после (pa\_out) и после с DPD-коррекцией (dpd\_pa\_out)

Коэффициент подавления н/л искажений, дБ	12,29
Увеличение линейного диапазона, дБ	5,19
Потери, дБ	2,54
Выигрыш в динамическом диапазоне, дБ	2,65

### 3. Усилитель LPST.

#### 3.1. Результаты коррекции до -13дБм

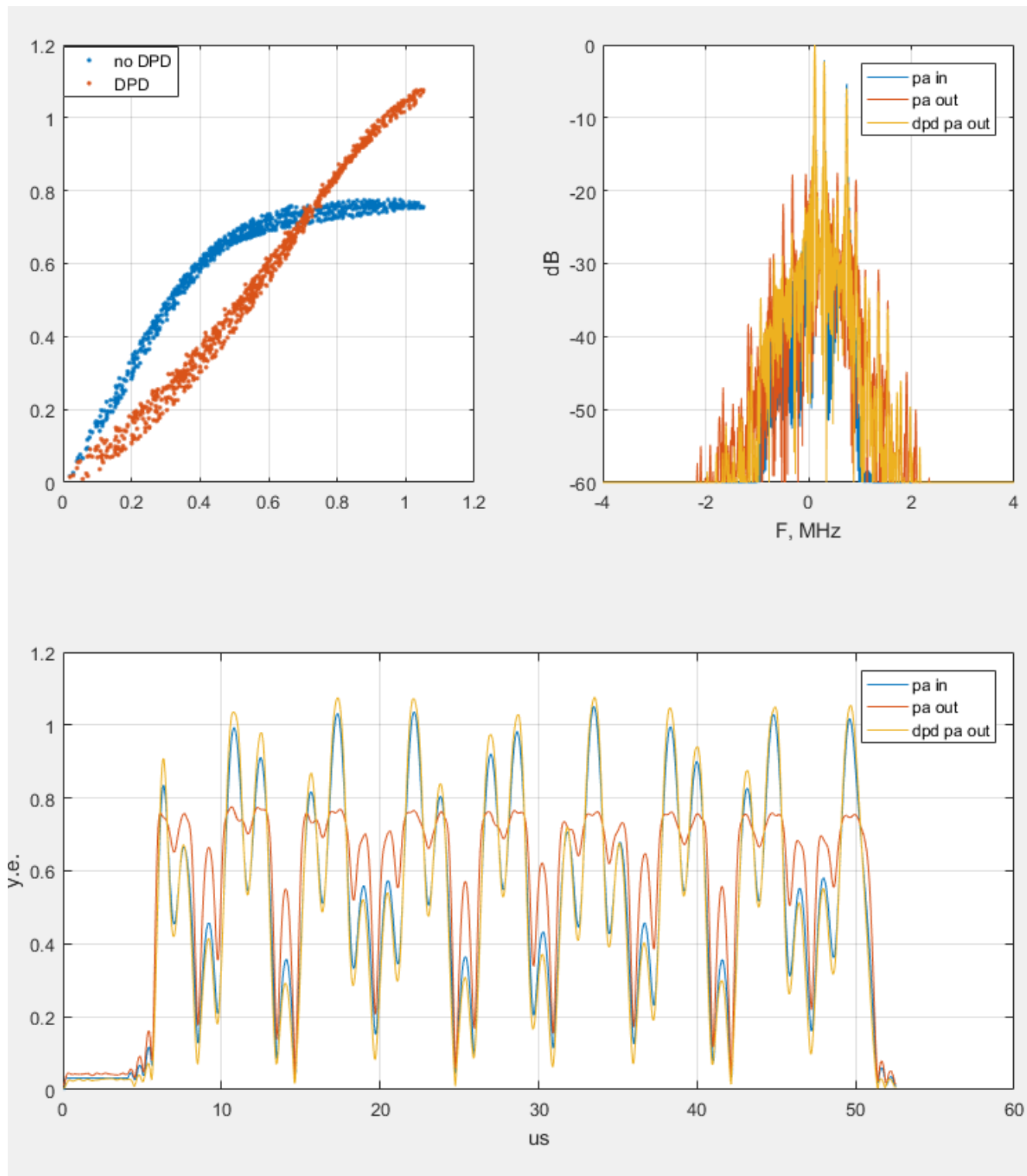
Уровень TX – 250 квантов. Степень полинома – 5, память – 3



Коэффициент подавления н/л искажений, дБ	11,32
Увеличение линейного диапазона, дБ	4,43
Потери, дБ	1,76
Выигрыш в динамическом диапазоне, дБ	2,67

### 3.2. Результаты коррекции до -9 дБм

Уровень TX - 400 квантов. Степень полинома – 7, память – 3



Коэффициент подавления н/л искажений, дБ	9,71
Увеличение линейного диапазона, дБ	6,93
Потери, дБ	3,4
Выигрыш в динамическом диапазоне, дБ	3,52

## 4. Результаты коррекции 1090ES. Усилитель LPST до -9дБм

### 4.1. Полоса сигнала 4 МГц. Степень -7. Память – 3

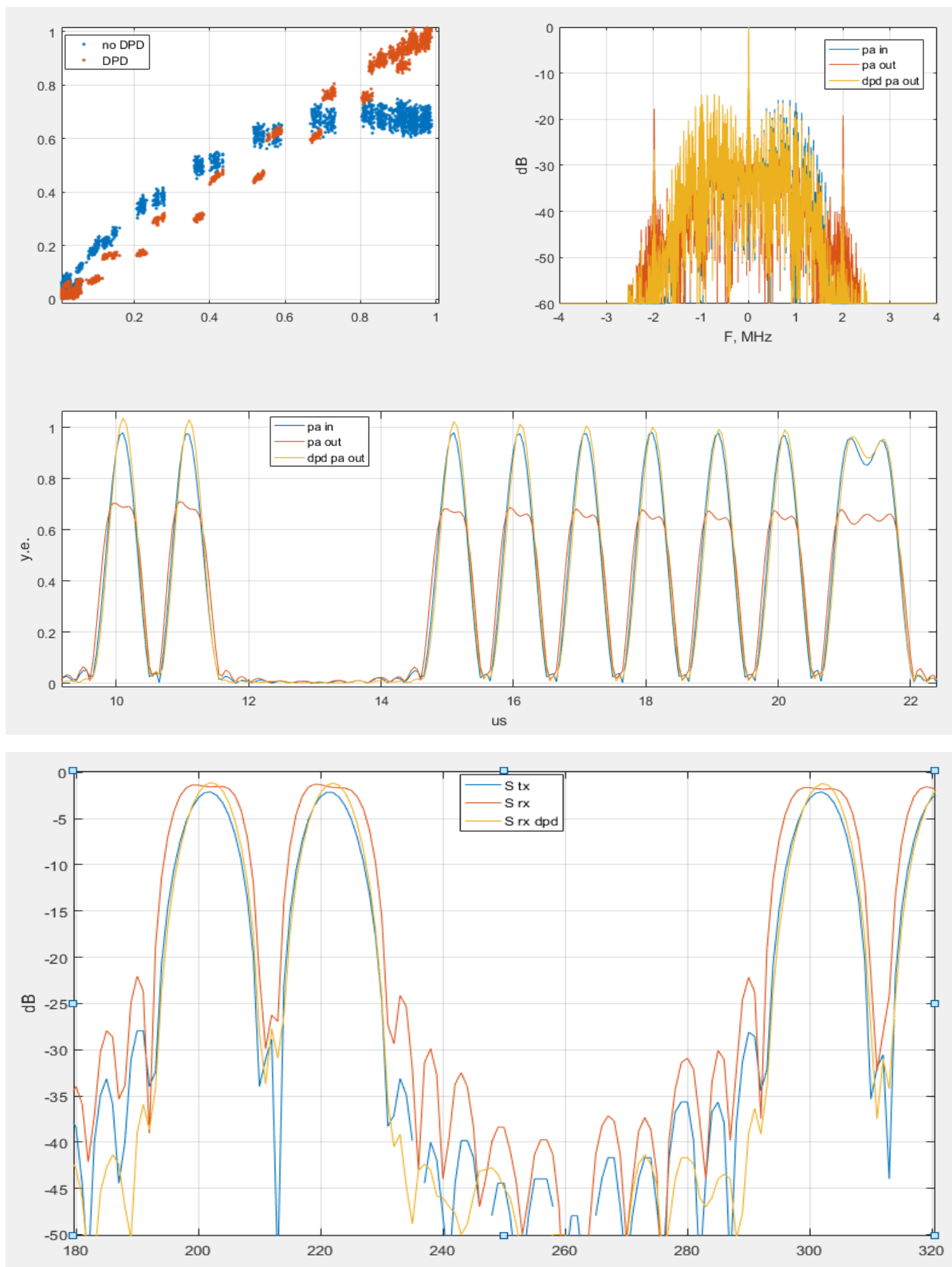


Рис – Амплитуды огибающих в логарифмическом масштабе

## 4.2 Полоса сигнала 10 МГц. Степень -7. Память – 3

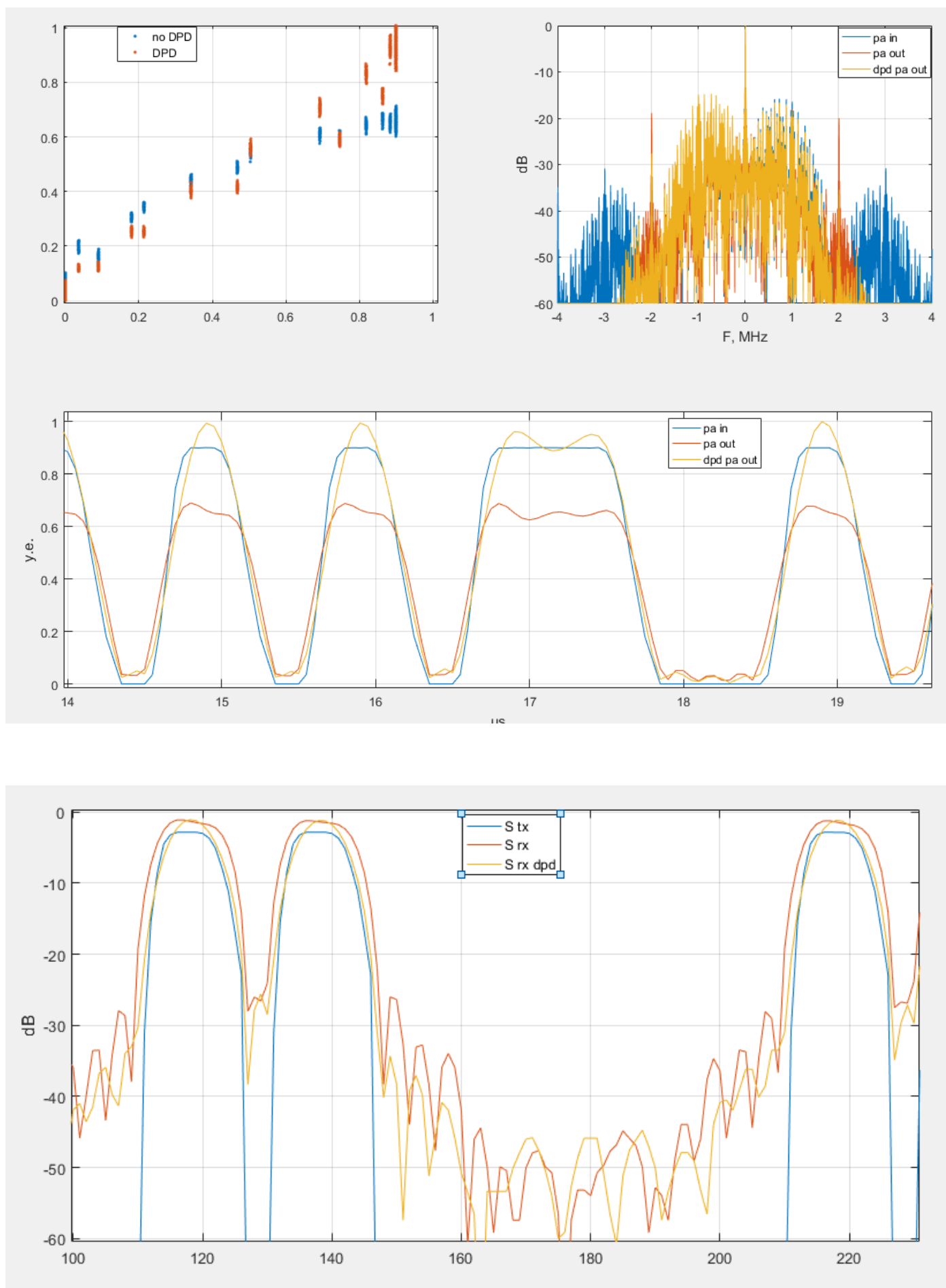


Рис – Амплитуды огибающих в логарифмическом масштабе

## **5. Выводы**

### **Алгоритм DPD LMS:**

- дает выигрыш в динамическом диапазоне около 3 дБ;
- адаптируется к изменениям в тракте за 50 мкс;
- работает в реальном времени и достаточно прост в реализации в ПЛИС;
- для сигнала 1090ES во временной области устраняет уширение импульсов и уменьшает уровень боковых лепестков на 8 дБ;
- результаты для сигнала 1090ES заметно лучше, когда полоса 4 МГц, а не 10 МГц. В литературе встречаются упоминания, что полоса обработки должна быть хотя бы в три раза больше полосы сигнала



## 6. Список литературы

- 1) A Generalized Memory Polynomial Model for Digital Predistortion of RF Power Amplifiers - Dennis R. Morgan, *Senior Member, IEEE*, Zhengxiang Ma, Jaehyeong Kim, Michael G. Zierdt, and John Pastalan
- 2) Memory\_Effects\_in\_RF\_Circuits - Paul Colestock, George EstepRF
- 3) Output-Controllable Partial Inverse Digital Predistortion for RF Power Amplifiers - Anding Zhu, *Senior Member, IEEE*
- 4) Ultrawideband Digital Predistortion (DPD): The Rewards (Power and Performance) and Challenges of Implementation in Cable Distribution Systems - Patrick Pratt, Frank Kearney
- 5) Guan L., Zhu A. Green communications: digital predistortion for wideband RF power amplifiers // *IEEE Microwave Magazine*. 2014. Vol. 15, № 7. P. 84–99.
- 6) Open-Loop Digital Predistorter for RF Power Amplifiers Using Dynamic Deviation Reduction-Based Volterra Series - Anding Zhu, Paul Draxler
- 7) Методы линеаризации характеристик усилителей мощности - Е. Б. Соловьева, Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» № 9/2015
- 8) Полиномиальные и нейронные модели нелинейных дискретных систем - Соловьева Е. Б., СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014.