

Метод компенсации нелинейных искажений усилителя мощности для стандарта мобильной связи 5G NR

Выполнил студент
2 курса магистратуры
Шиков А. П.

Научный руководитель
профессор, д.ф.-м.н
Мальцев А. А.

06/06/2022

Нижний Новгород

Цели работы

- Исследование влияния нелинейности усилителя мощности на различные типы сигнала, используемые в стандарте 5G NR
- Разработка модели усилителя для миллиметрового диапазона 100-200 ГГц
- Разработка метода компенсации нелинейных искажений усилителя мощности на приемнике

Актуальность работы

Интернет вещей (IoT) и 5G NR

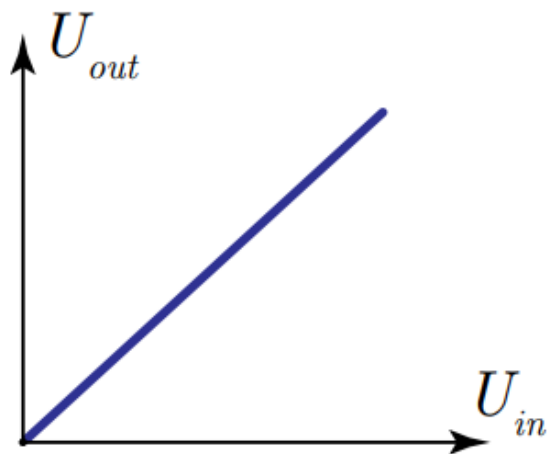
- Высокая скорость, надежность, возможность массового подключения устройств
- Количество подключенных «умных» устройств в 2018 году – 8 млрд, в 2021 – 12 млрд.
- Поддержка несущих частот до 52.6 ГГц в релизах 15, 16 стандарта 5G
- Расширение диапазона FR2 до 114 ГГц
- Характеристики усилителей в миллиметровом диапазоне значительно хуже более низких частот
- Передающие устройства – датчики, сенсоры должны быть энергоэффективны, необходимо уменьшить количество сигнальной обработки на них



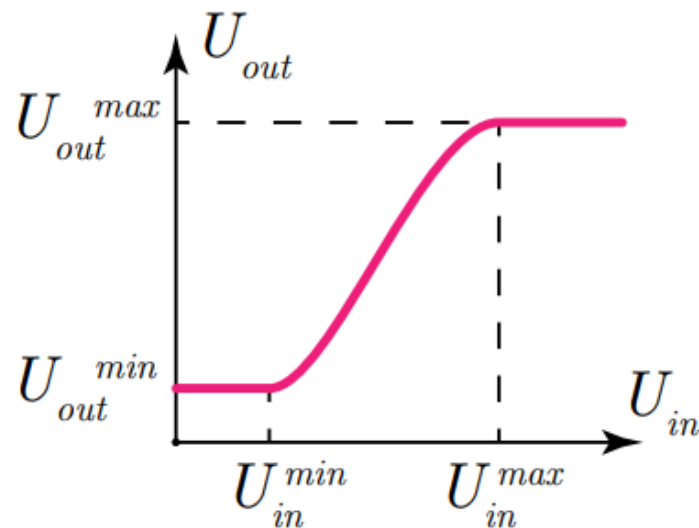
Нелинейность усилителя мощности (УМ)



Амплитудная характеристика УМ – зависимость выходной амплитуды от входной



Идеальный
усилитель



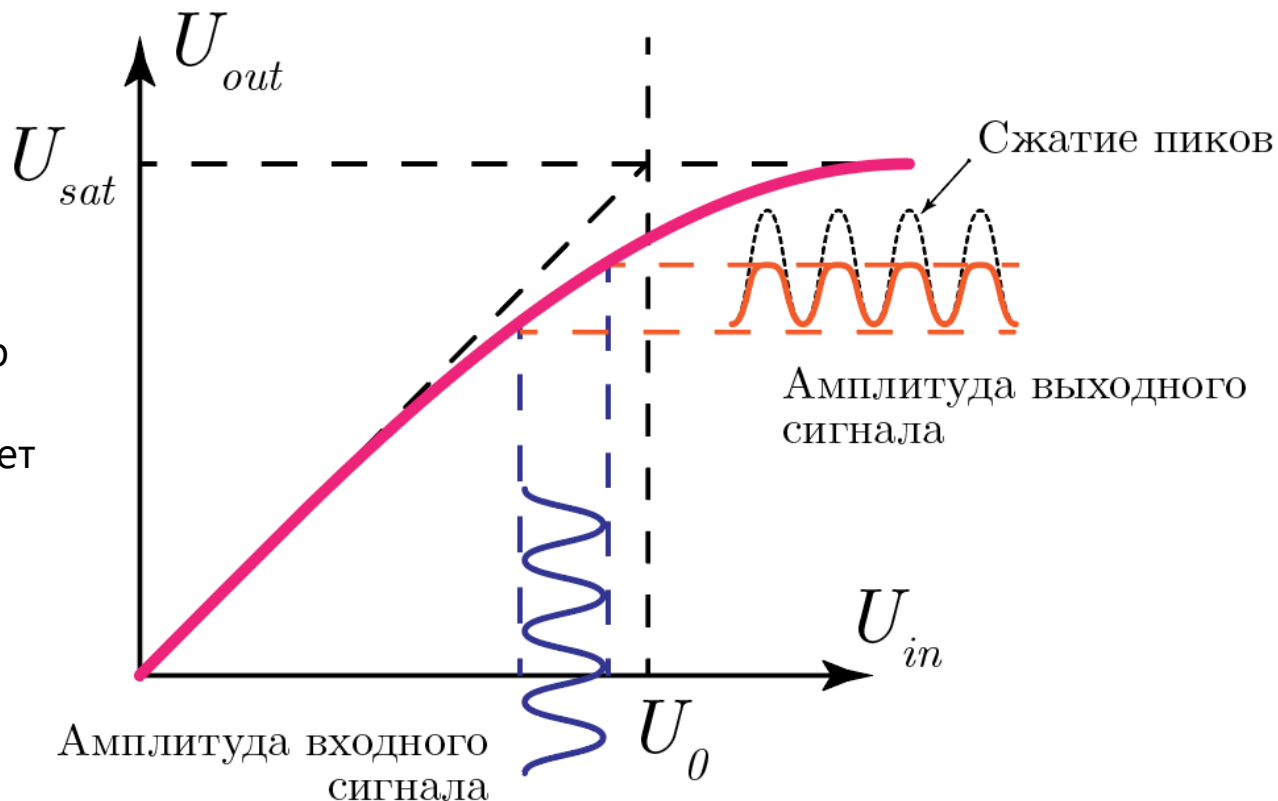
Реальный
усилитель

Искажение сигнала нелинейным УМ

При подаче сигнала на нелинейный участок
усилителя возникают искажения

Чем больше амплитуда на входе, тем больше
искажение на выходе – эффект насыщения
усилителя

Высокий пик-фактор
(PARP) (например, у
OFDM сигнала) может
привести к
значительным
искажениям



Отступы по мощности IBO, OBO

Чтобы минимизировать искажения, рабочую точку усилителя сдвигают ближе к линейному участку – делается отступ по средней мощности

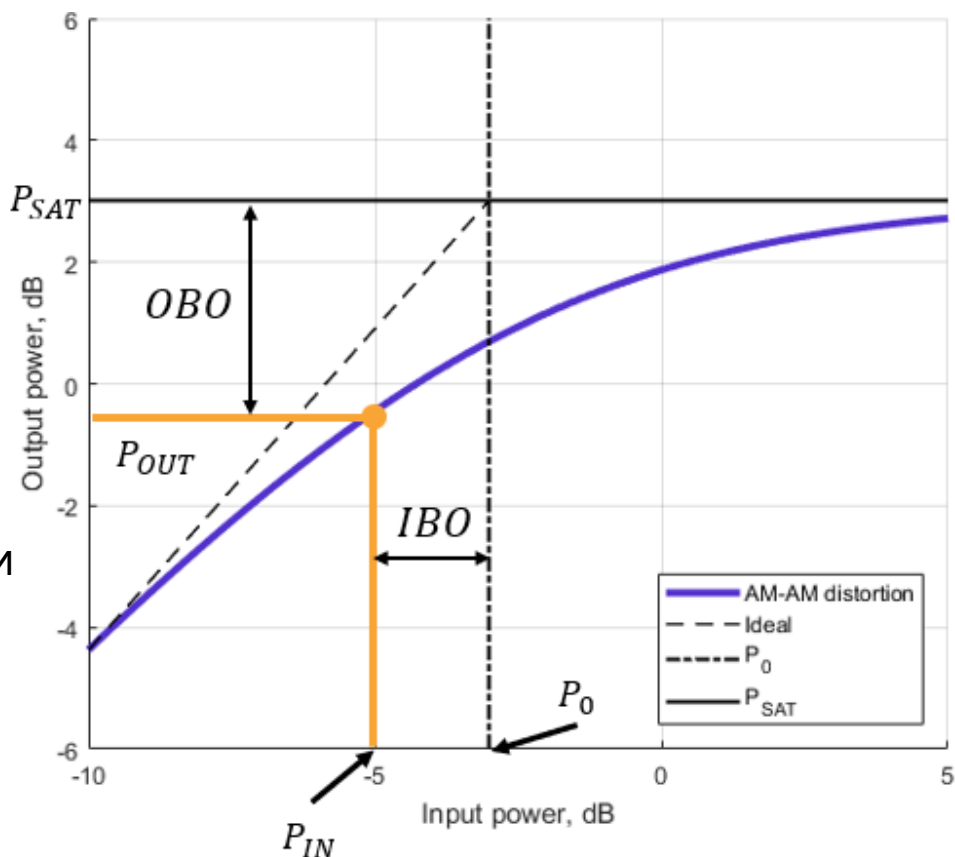
Output back-off:

$$OBO = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_{SAT}}{P_{OUT}} \right)$$

Input back-off:

$$IBO = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_0}{P_{IN}} \right)$$

Чем больше отступ OBO или IBO, тем более линейный участок характеристики используется, но тем меньше средняя выходная мощность



Модель для описания УМ

Модель Раппа

Амплитудное искажение (AM-AM)

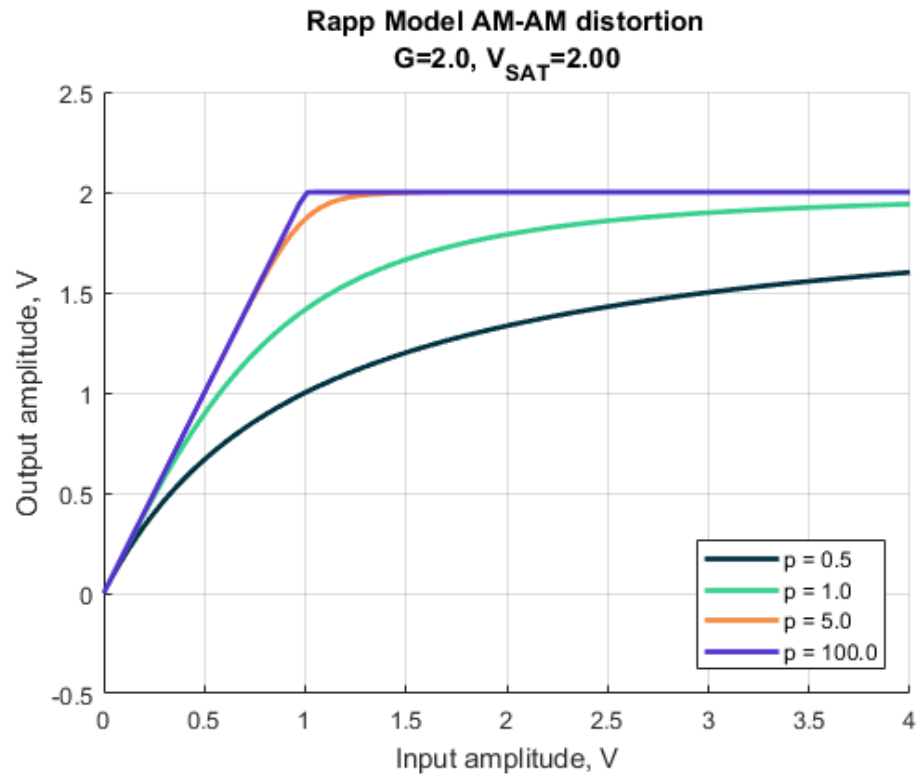
$$F_{AM-AM}(x) = \frac{Gx}{\left(1 + \left|\frac{Gx}{V_{SAT}}\right|^{2p}\right)^{\frac{1}{2p}}}$$

Фазовое искажение (AM-PM)

$$F_{AM-PM}(x) = \frac{Ax^q}{\left(1 + \left(\frac{x}{B}\right)^q\right)}$$

G – КУ малого сигнала, p – гладкость (нелинейность) кривой, V_{SAT} – напряжение насыщения.

A, B, q – параметры кривой фазового искажения.



Параметры модели для диапазона 30-70 ГГц, предложенные Nokia

AM-AM искажение

$$G = 16, V_{SAT} = 1.9 \text{ V}, p = 1.1.$$

AM-PM искажение

$$A = -345, B = 0.17, q = 4$$

Параметры модели для диапазона 100-200 ГГц

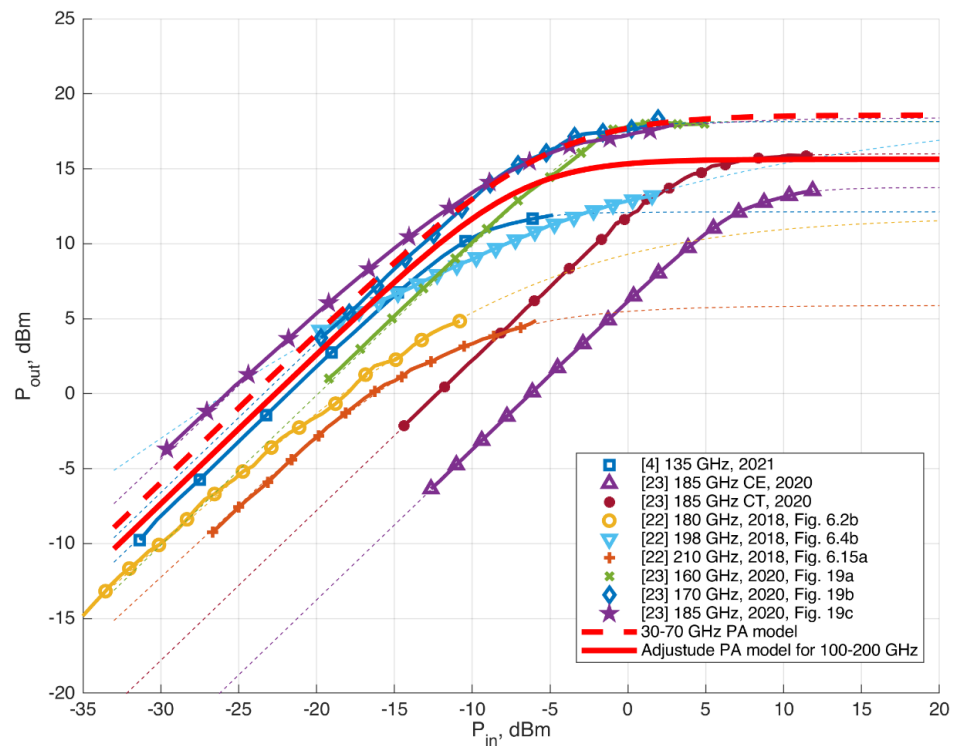
Параметры для модели 100-200 ГГц были получены по данным из последних работ по созданию твердотельных усилителей в соответствующем диапазоне частот

Характеристики из работ аппроксимировались моделью Раппа, затем полученные параметры G , V_{sat} , p были усреднены.

Полученные параметры для модели 100-200 ГГц

$$G = 13.59, \quad V_{sat} = 1.35, \quad p = 1.41$$

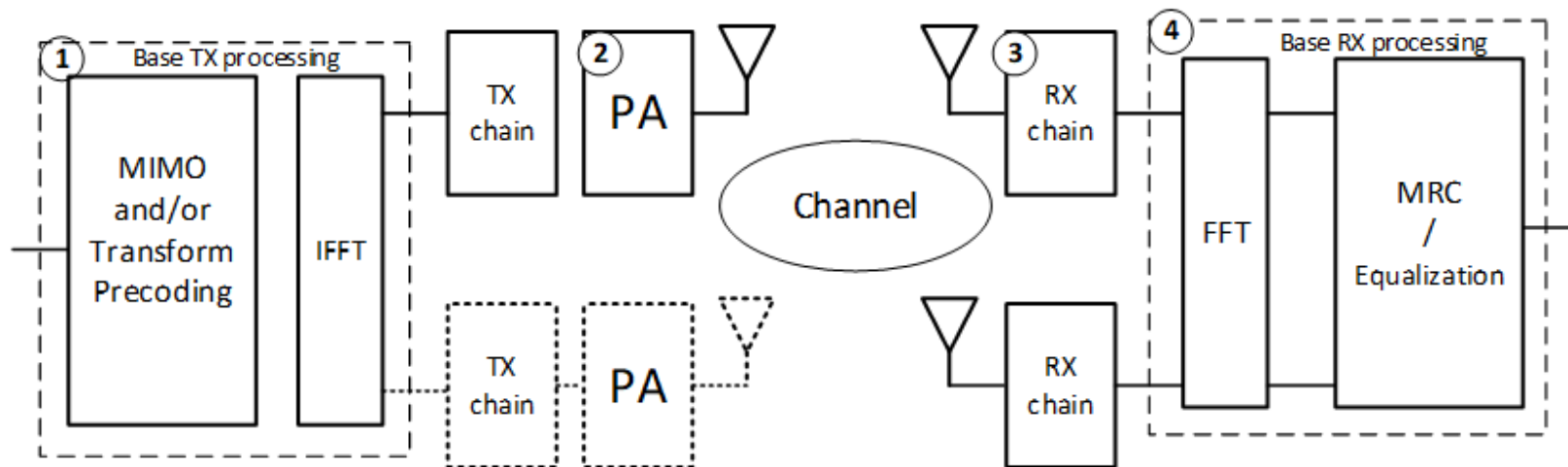
Амплитудные характеристики твердотельных УМ



Реализация УМ в LLS и искажение сигналов

Для моделирования использовался симулятор канального уровня - LLS, написанный в системе Matlab и соответствующий стандарту 5G

Модель Раппа была имплементирована в симулятор для оценки степени искажения, и дальнейшей компенсации



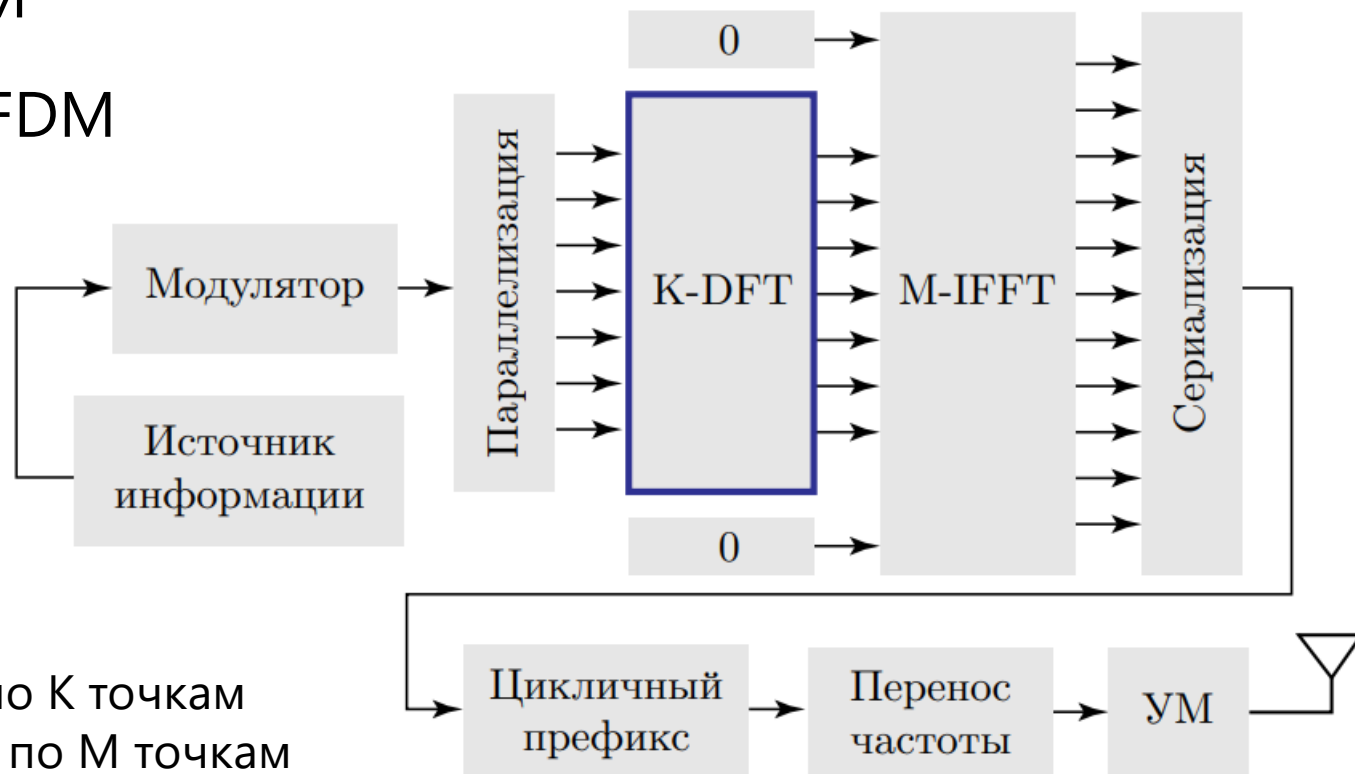
Принципиальная схема LLS

Используемые типы сигналов

В работе рассматриваются следующие сигналы, используемые для Uplink

- CP-OFDM
- DFT-s-OFDM

DFT-s-OFDM имеет меньший пик-фактор (PAPR), чем OFDM, поэтому он более эффективен при использовании нелинейного УМ

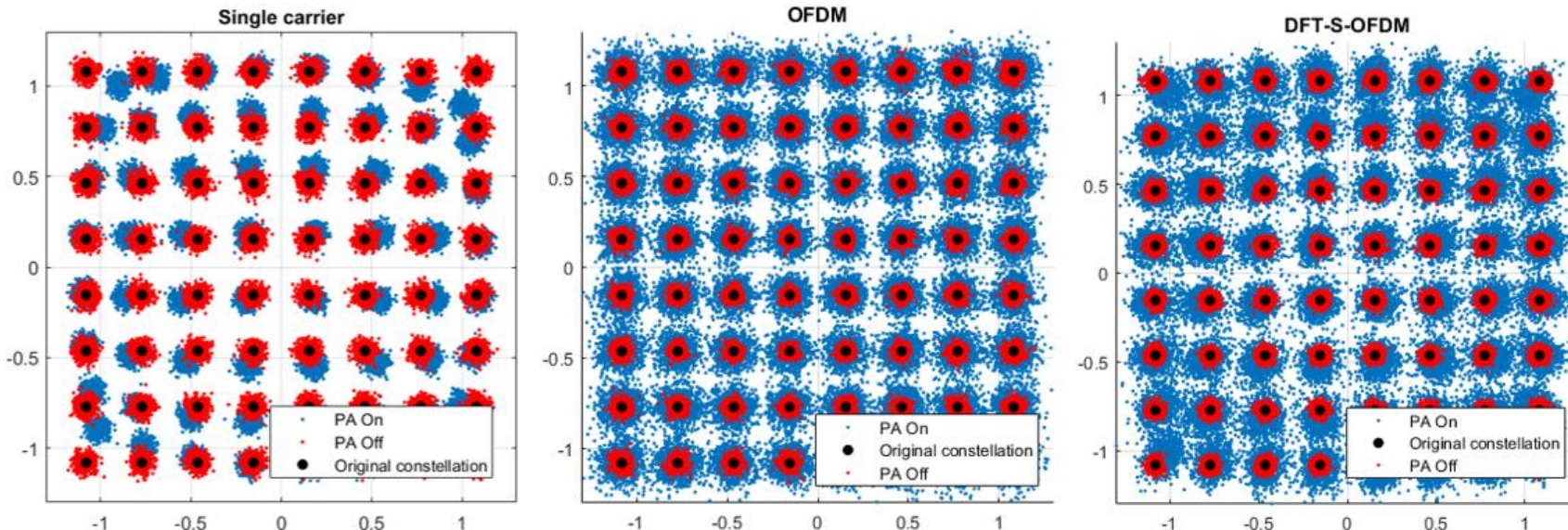


K-DFT: DFT по K точкам
M-IFFT: IDFT по M точкам
 $M > K$

Принципиальная схема генерации CP-OFDM и
DFT-s-OFDM сигнала

Искажение сигналов нелинейным УМ

Созвездия сигнала на приемнике



- Изначальные созвездия
- Без искажения усилителем
- После искажения усилителем на передатчике

Искажения сигналов:

- **Single carrier:** Общий сдвиг точек в зависимости от амплитуды
- **OFDM:** Увеличение разброса относительно центров созвездий
- **DFT-s-OFDM:** Совмещенный сдвиг точек и увеличенный разброс

Обзор методов компенсации

Существующие методы борьбы с искажениями можно разделить на два основных подхода

Подготовка сигнала на передатчике перед усилителем

- Сигналу придаются свойства, которые минимизируют влияние нелинейности УМ, эффективно «выпрямляя» амплитудную характеристику (pre-distortion – предварительное искажение)
- Имеет малую эффективность при низких ОВО\ИВО
- Необходима дополнительная сигнальная обработка на передатчике

$$G\left\{F[s(t)]\right\} = s(t).$$

Efficient Compensation of the Nonlinearity of Solid-State Power Amplifiers Using Adaptive Sequential Monte Carlo Methods / Mahdi Shabany, 2008

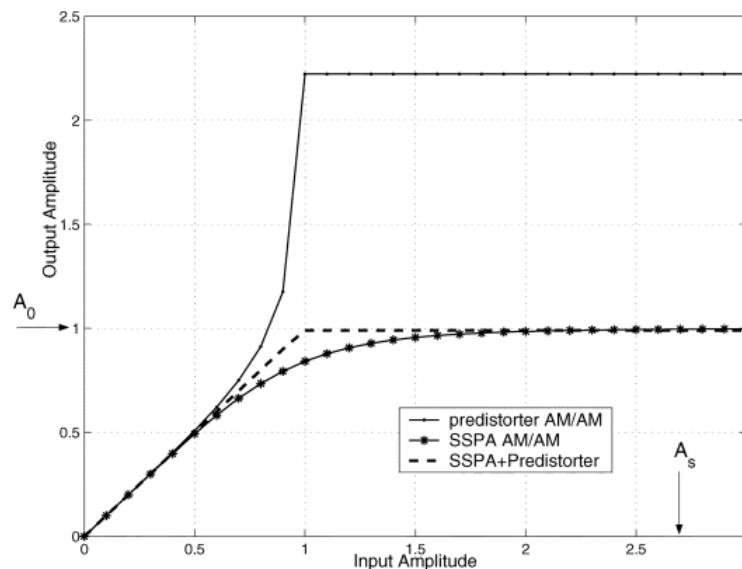
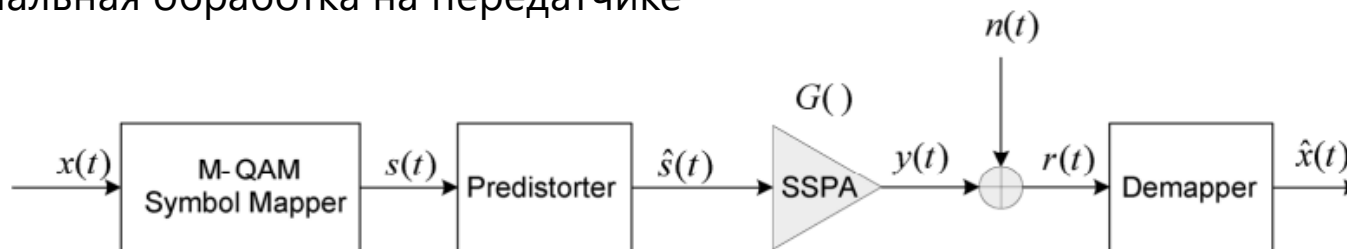


Fig. 2. Characteristic function of the SSPA, the predistorter, and SSPA+predistorter, where $\alpha_\phi = 0.1$, $A_o = 1$, $A_s = 2.65$, $p = 2$, and $\nu = 1$.



Метод компенсации искажений на приемнике

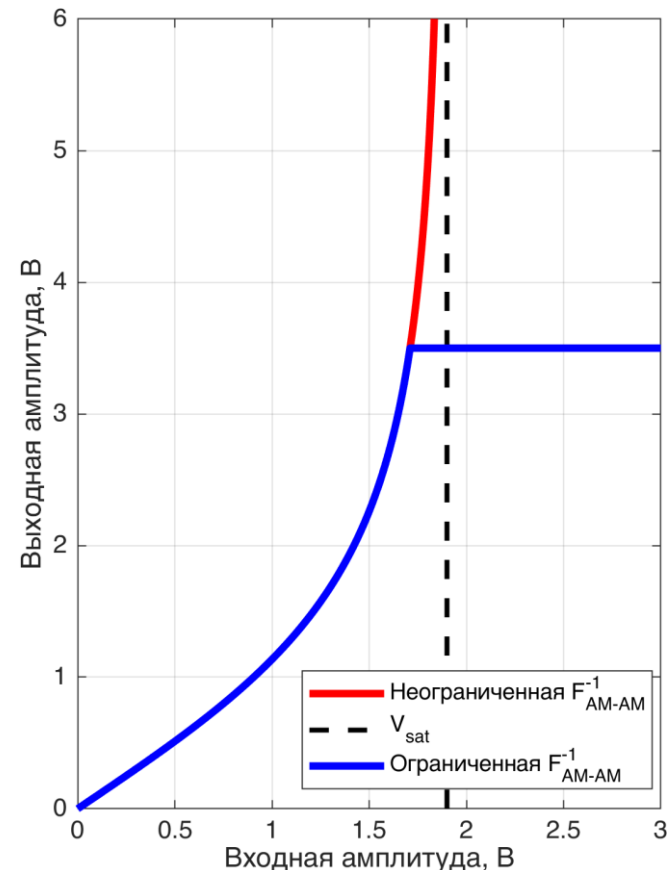
В основе метода лежит использование ограниченной обратной амплитудной характеристики УМ

$$F_{AM/AM}^{-1}(y) = \begin{cases} \frac{y}{\left(1 - \left|\frac{y}{V_{sat}}\right|^{2p}\right)^{1/2p}} & y < \alpha V_{sat} \\ \frac{\alpha V_{sat}}{(1 - |\alpha|^{2p})^{1/2p}} & y \geq \alpha V_{sat} \end{cases}$$

Ограничение необходимо для предотвращения еще больших искажения сигнала ввиду свойства насыщения характеристики усилителя

Параметр α выступает как граничный коэффициент

Параметры УМ а также рабочая точка считаются известными (переданы в сервисной информации)



Метод компенсации искажений на приемнике

Схема компенсации OFDM сигнала

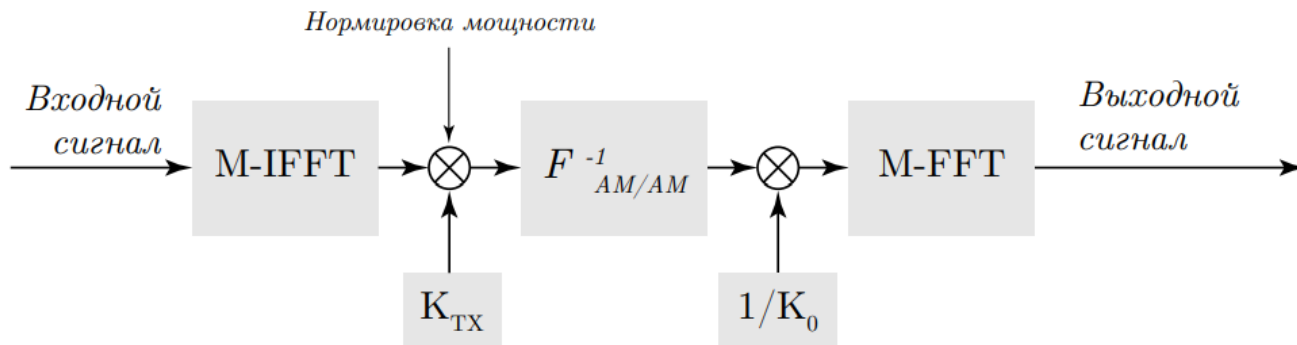
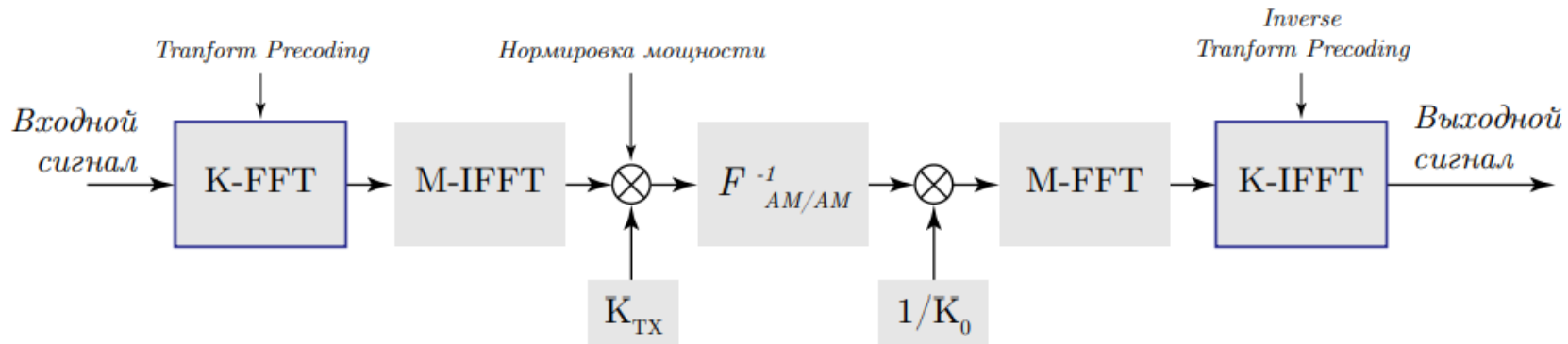


Схема компенсации DFT-s-OFDM сигнала



Параметры симуляций

Разработанный метод компенсации был реализован в LLS. Ниже приведен перечень параметров, использованных при моделировании

В результате моделирования были получены кривые зависимости количества блоковых ошибок от ОСШ

(BLER vs SNR)

$$BLER = N_{error}^B / N^B$$

Параметр	Используемые значения
Несущая частота, f_c	60GHz
Полоса частот	400 MHz
Тип сигнала	CP-OFDM, DFT-s-OFDM
Модель УМ	30-70 GHz, 100-200 GHz
Мощность передатчика	10 dBm
SCS	120 kHz, 480 kHz, 960 kHz
Количество ресурсных блоков	256, 64, 32 RBs
Модель канала	TDL-A, 5 ns DS, 3 km/h
Параметры передачи	1 TX, 2 RX MRC
Модуляция и кодирование	64-QAM (MCS Table 1;22, 27) 256 QAM(MCS Table 2; 22)

Результаты симуляций

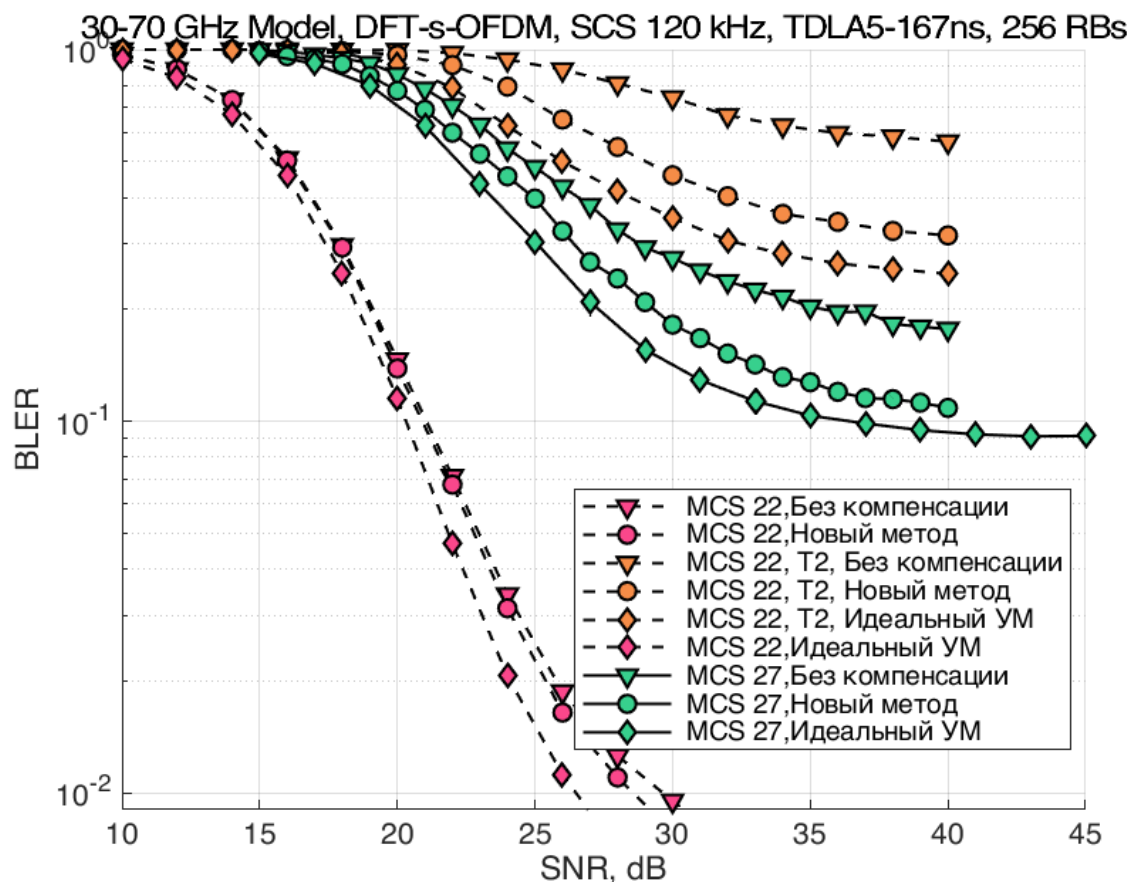
DFT-s-OFDM / 30-70 ГГц / SCS 120 кГц

Использование
компенсации
уменьшает количество
ошибок для
выбранного ОСШ по
сравнению с не
компенсированным
случаем (кривая
сдвигается вниз)

MCS 27: 64-QAM,
 $R = 0.89$

MCS 22: 64-QAM,
 $R = 0.65$

MCS 22t2: 256-QAM,
 $R = 0.74$



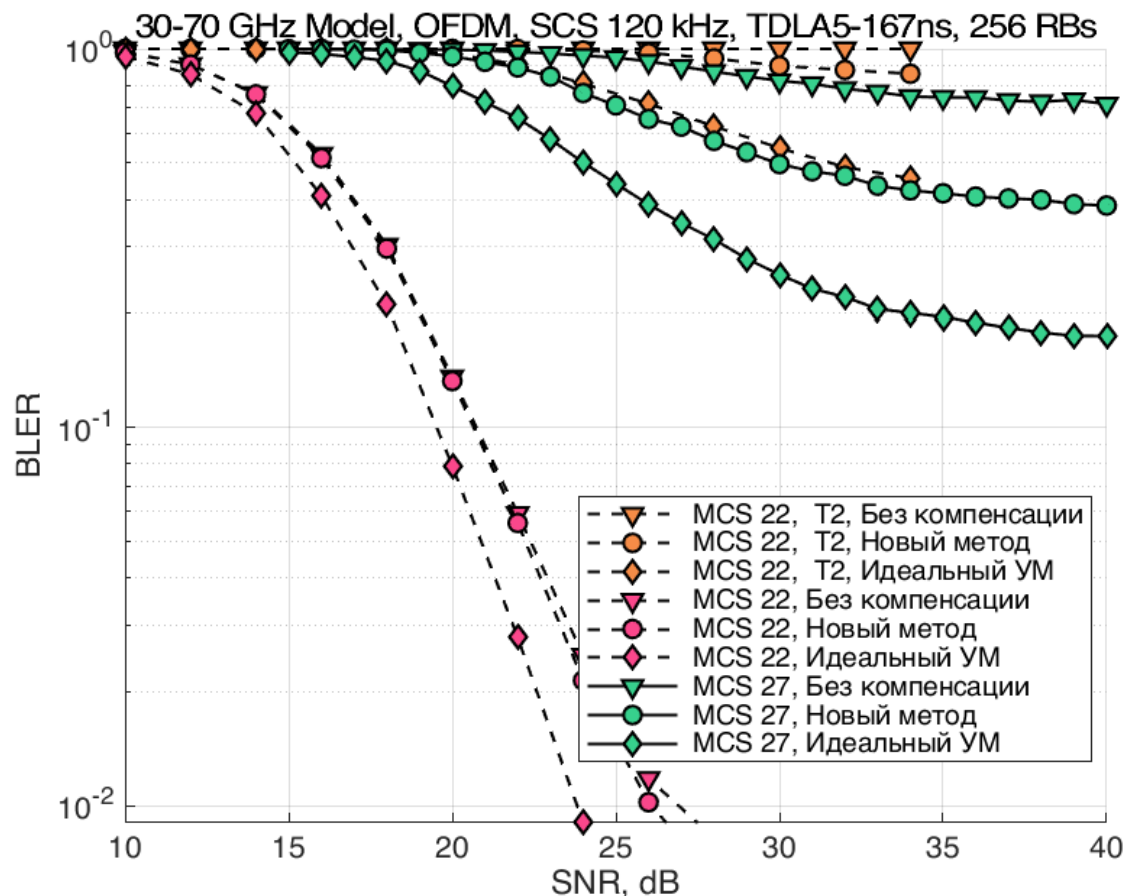
Результаты симуляций

CP-OFDM / 30-70 ГГц / SCS 120 кГц

Пик-фактор OFDM сигнала выше чем у DFT-s-OFDM, поэтому наблюдается большее количество ошибок по сравнению с DFT-s-OFDM.

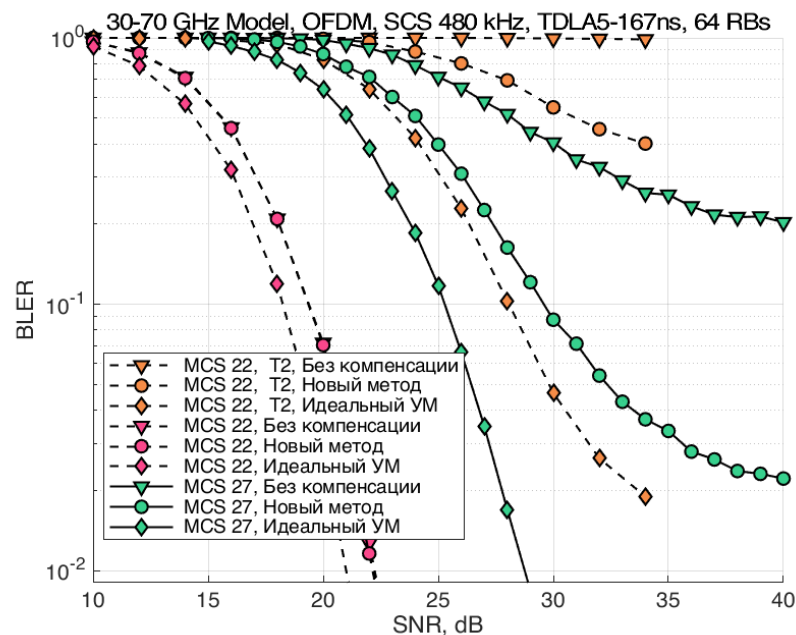
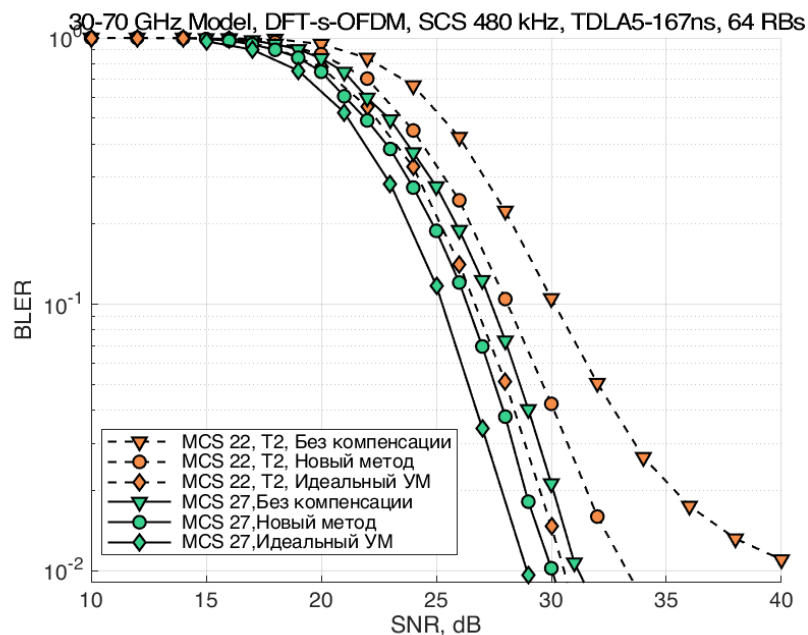
В случае модуляции 256-QAM искажения сильнее чем для 64-QAM

Для сигнала OFDM применение компенсации также улучшает результат для MCS 27 и 22t2



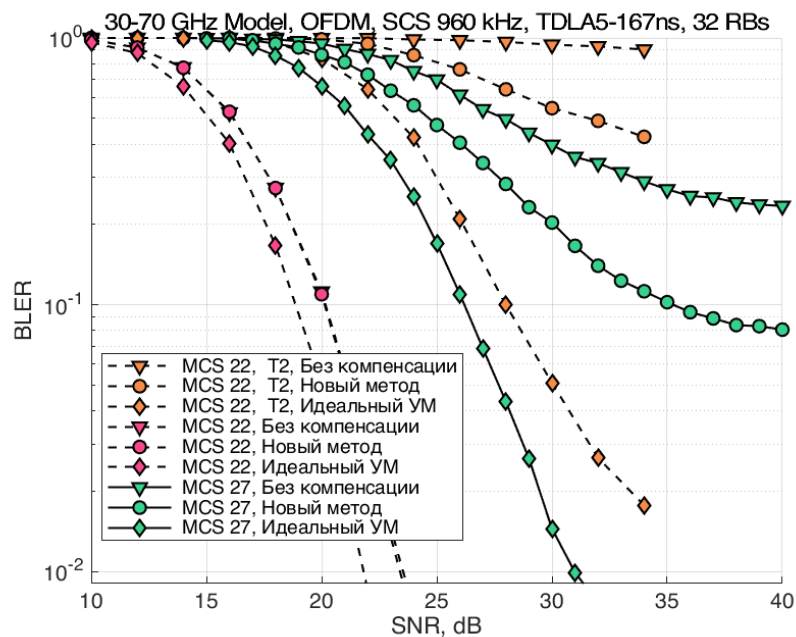
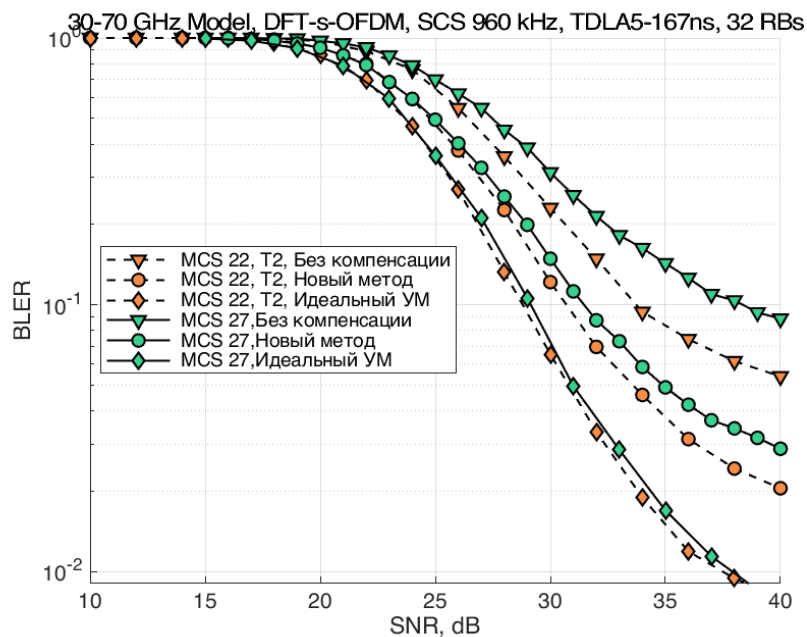
Результаты симуляций

30-70 ГГц / SCS 480 кГц



Результаты симуляций

30-70 ГГц / SCS 960 кГц

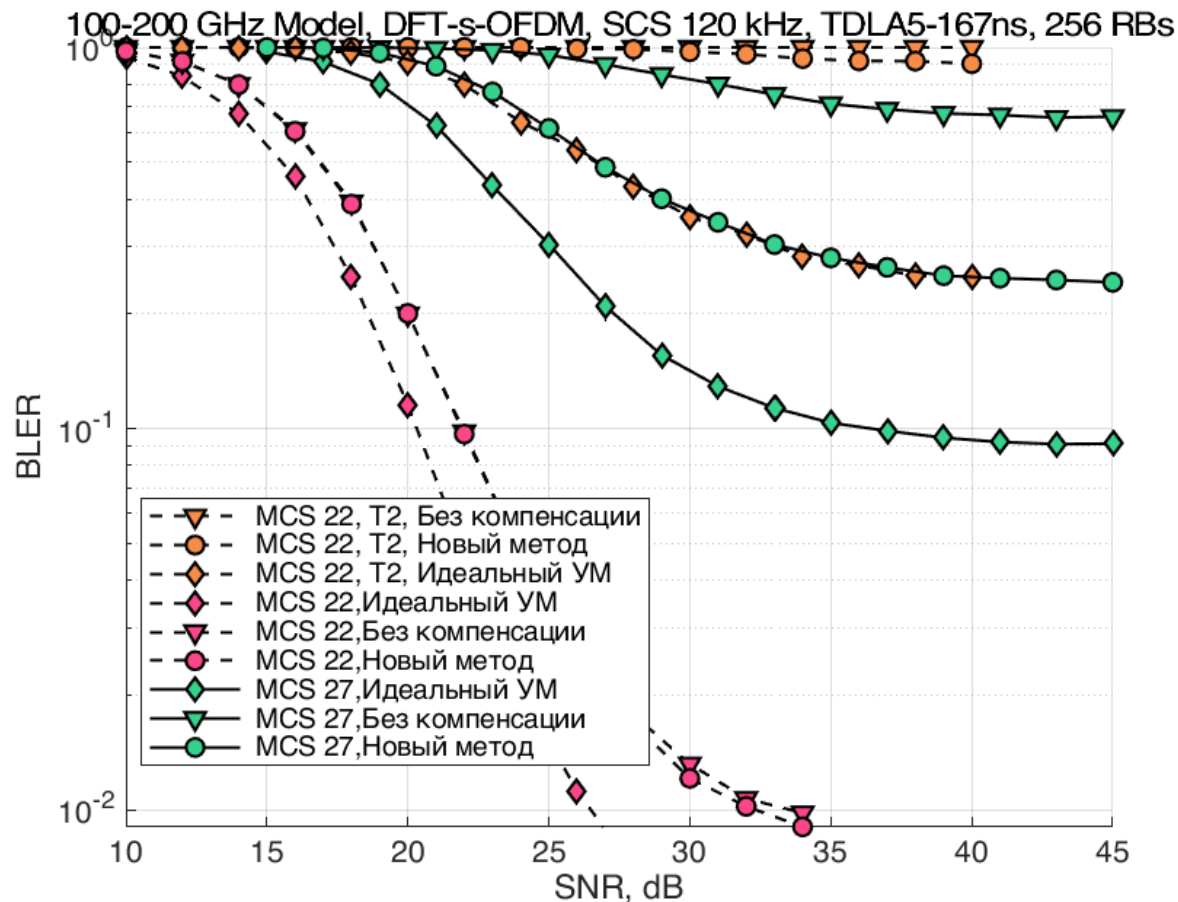


Результаты симуляций

DFT-s-OFDM / 100-200 ГГц / SCS 120 кГц

Характеристики УМ
значительно хуже,
даже в случае DFT-s-
OFDM наблюдается
сильное падение
производительности.

При высокой
модуляции часть
информации может
быть невосвратно
искажена



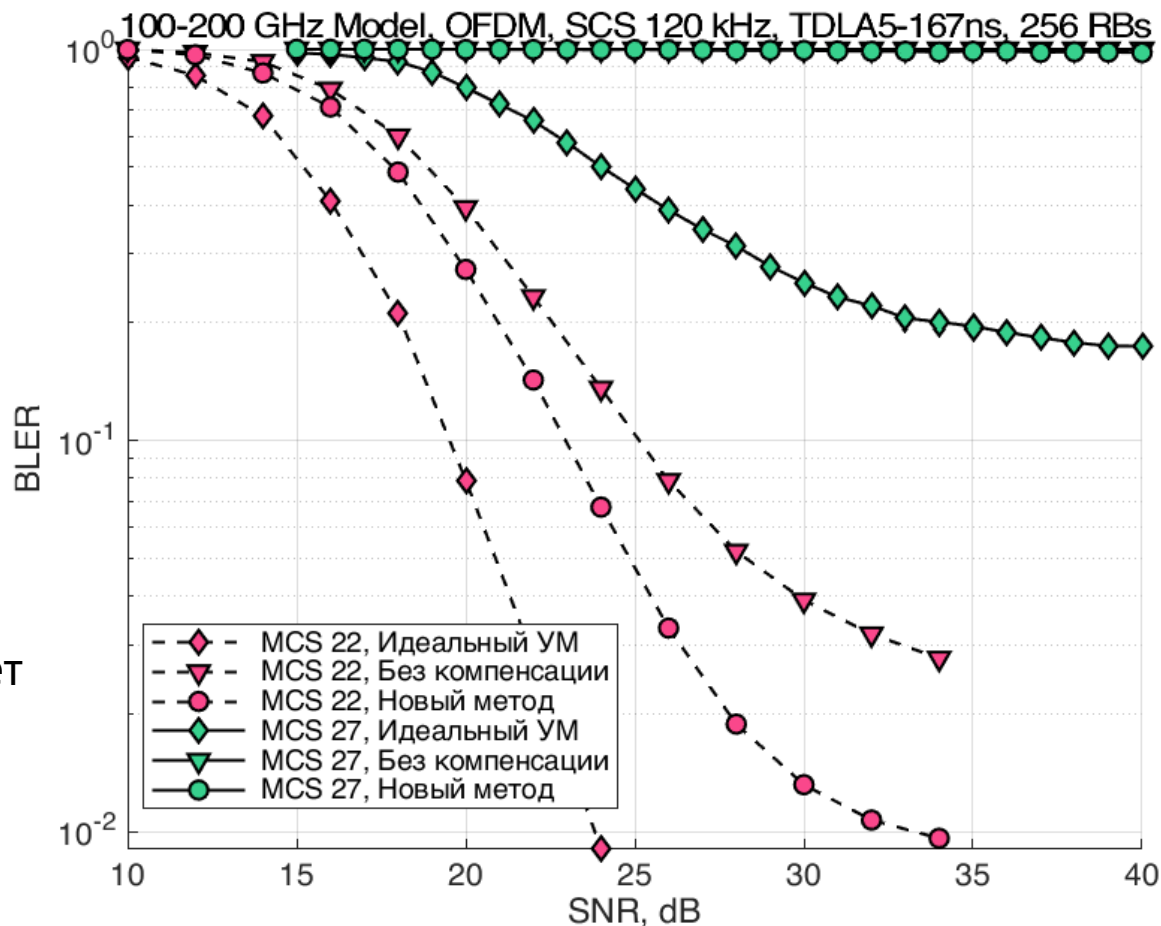
Результаты симуляций

CP-OFDM / 100-200 ГГц / SCS 120 кГц

В случае OFDM
сигнала искажения
еще хуже.

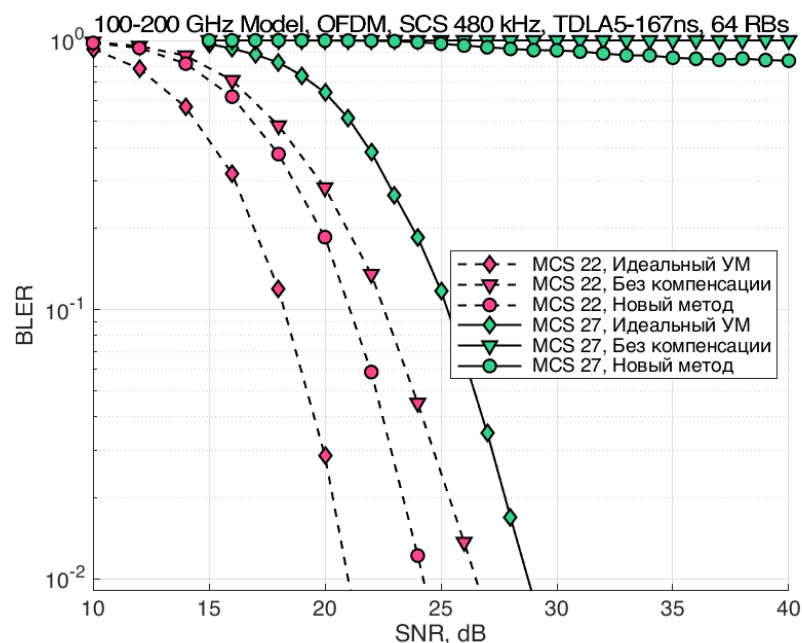
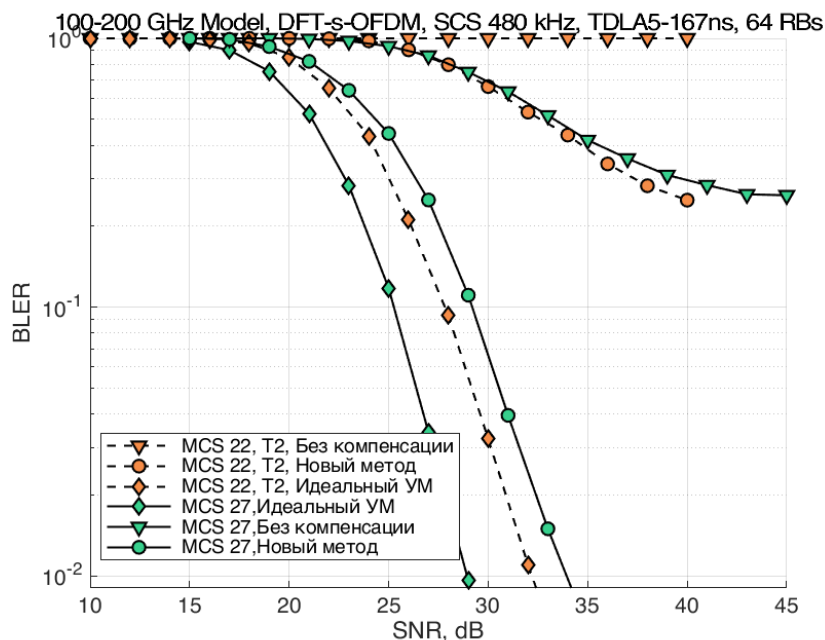
Для MCS 27
информация
практически не
восстановлена.

Для MCS 22
наблюдается
увеличение
искажений, при этом
компенсация улучшает
результат сдвигая
кривую на 3-5 дБ



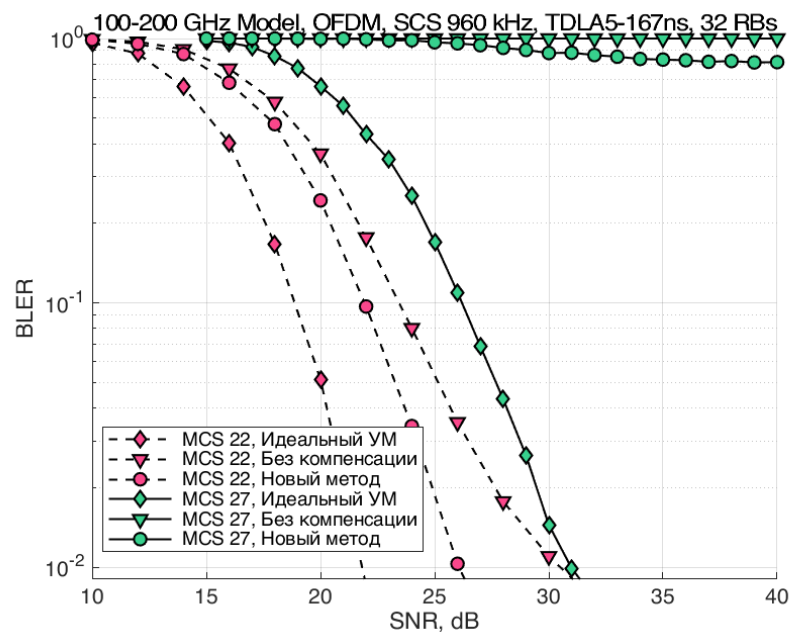
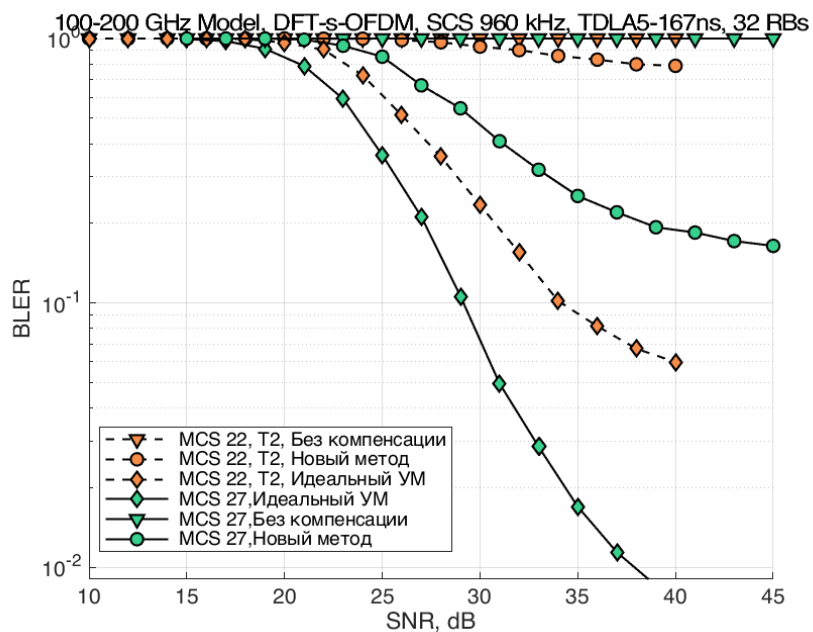
Результаты симуляций

100-200 ГГц / SCS 480 кГц



Результаты симуляций

100-200 ГГц / SCS 960 кГц



Заключение

- Исследовано влияние нелинейности усилителя мощности на сигналы CP-OFDM, DFT-s-OFDM
- Подобраны параметры для модели Раппа в диапазоне 100-200 ГГц
 - В данном диапазоне УМ значительно хуже по сравнению с диапазоном 30-70 ГГц. Искажения более значительны, в некоторых случаях информацию практически невозможно восстановить
- Разработан и реализован в LLS метод компенсации нелинейных искажений усилителя на приемнике
 - Компенсация выполняется на приемнике, это важно для уменьшения сигнальной обработки на передатчике
 - Метод способен улучшить производительность системы для обеих моделей усилителя по сравнению со случаем отсутствия компенсации для определенных наборов параметров

**Спасибо за
внимание!**

Параметр	Используемые значения
Несущая частота, f_c	60 ГГц
Полоса частот	400 МГц
Тип сигнала	CP-OFDM, DFT-s-OFDM
Модель УМ	Модель 30-70 ГГц [21], модель 100-200 ГГц 10
Мощность P_{TX}	10 dBm
SCS	120, 480, 960 кГц
N_{RB}	256, 64, 32
Модель канала	TDL-A, 5 нс DS, 3 км/ч
Параметры антенн	1 TX, 2 RX MRC
Модуляция и кодирование	64-QAM (MCS Таблица 1: 22, 27), 256-QAM (MCS Таблица 2: 22)
Помехи	Фазовый шум (BS and UE example 2 model [18]), компенсирован LS фильтром. Оценка канала - LS fitting per precoding region (24subc)