

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.

17/06/2022

Нижний Новгород

Цели работы

- Исследование влияния нелинейности усилителя мощности на различные типы сигнала, используемые в стандарте мобильных сетей связи 5G NR
- Разработка модели усилителя мощности для миллиметрового диапазона длин волн
- Разработка метода компенсации нелинейных искажений усилителя мощности на приемнике

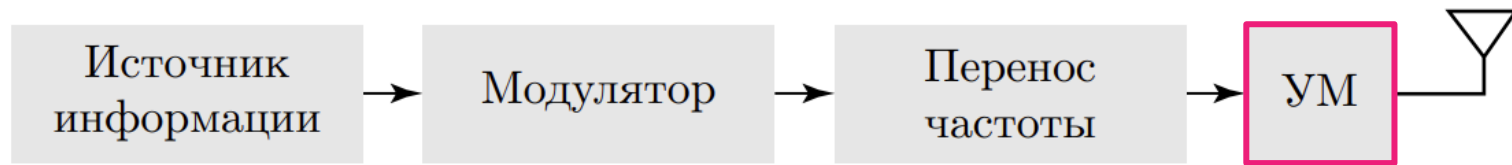
Актуальность работы

Исследование и компенсация нелинейных искажений снова актуальны по ряду причин

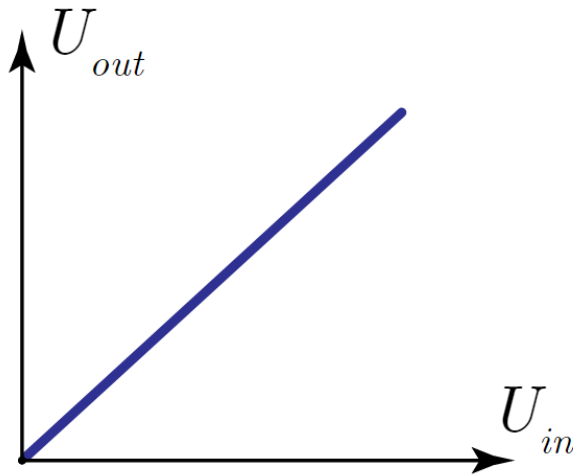
- Переход в миллиметровый диапазон длин волн, где технологии менее развиты по сравнению с более низкими частотами
 - Поддержка несущих частот до 52.6 ГГц в релизах 15, 16 стандарта 5G, расширение диапазона FR2 до 114 ГГц
- Введение Интернета Вещей (IoT) в мобильной системе связи 5G New Radio
 - Количество подключенных «умных» устройств в 2018 году – 8 млрд, в 2021 – 12 млрд
 - Передающие устройства – датчики, сенсоры должны быть эффективны, необходимо уменьшить количество сигнальной обработки на передатчиках и выполнять компенсацию на приемнике



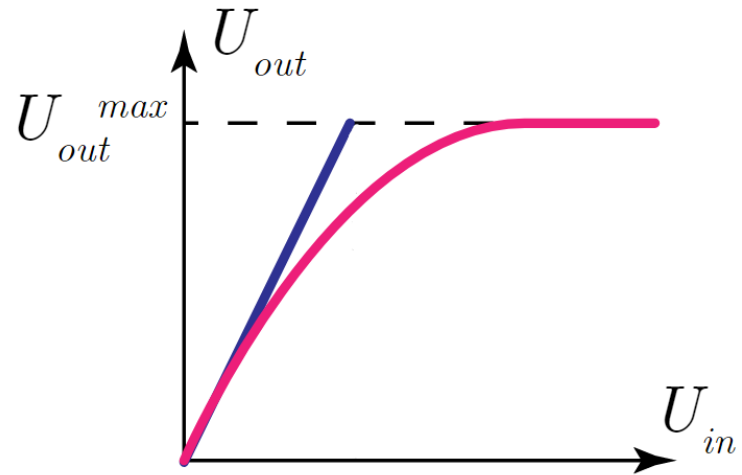
Нелинейность усилителя мощности (УМ)



Амплитудная характеристика УМ – зависимость выходной амплитуды от входной



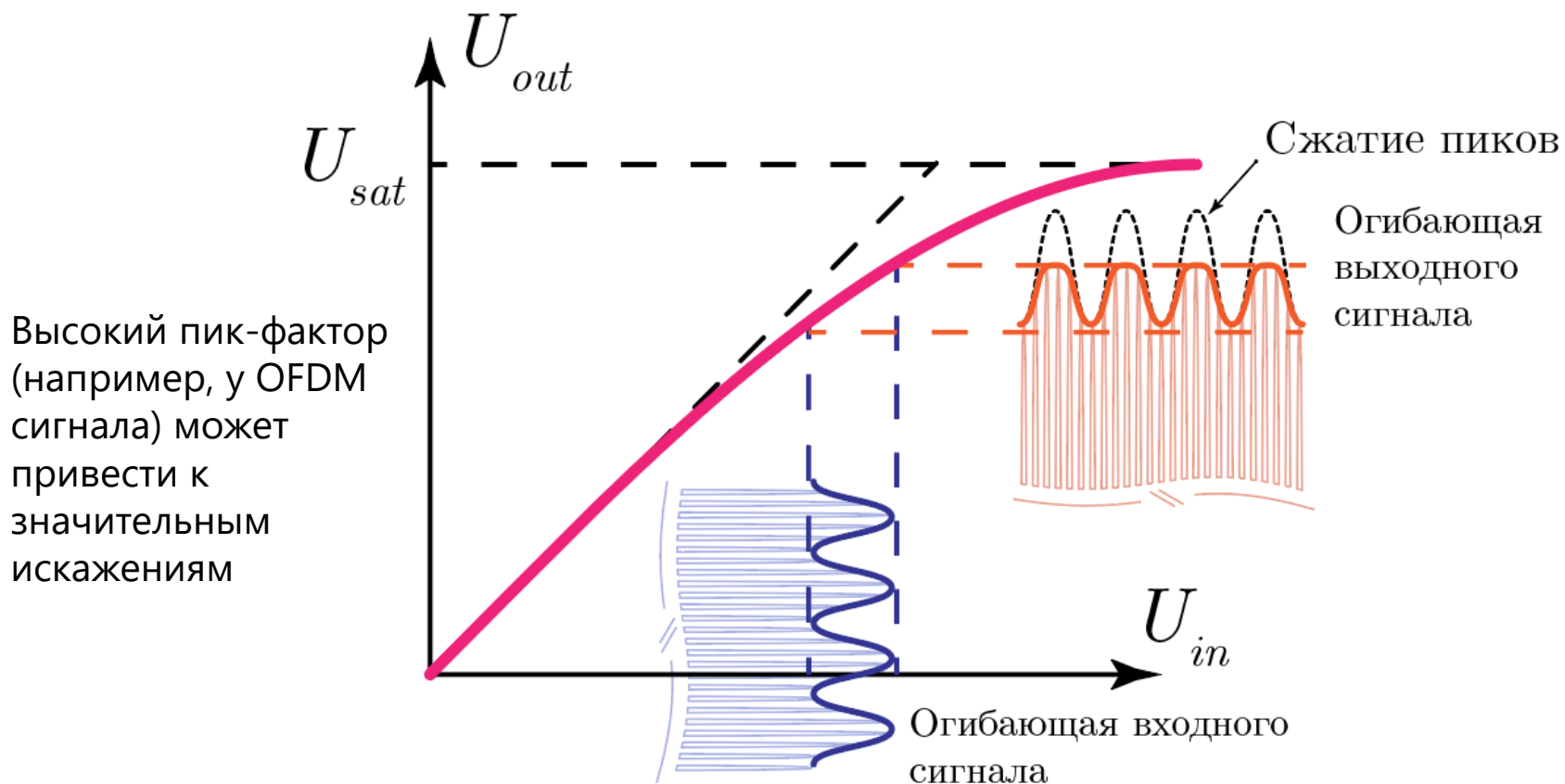
Идеальный
усилитель



Реальный
усилитель

Искажение сигнала нелинейным УМ

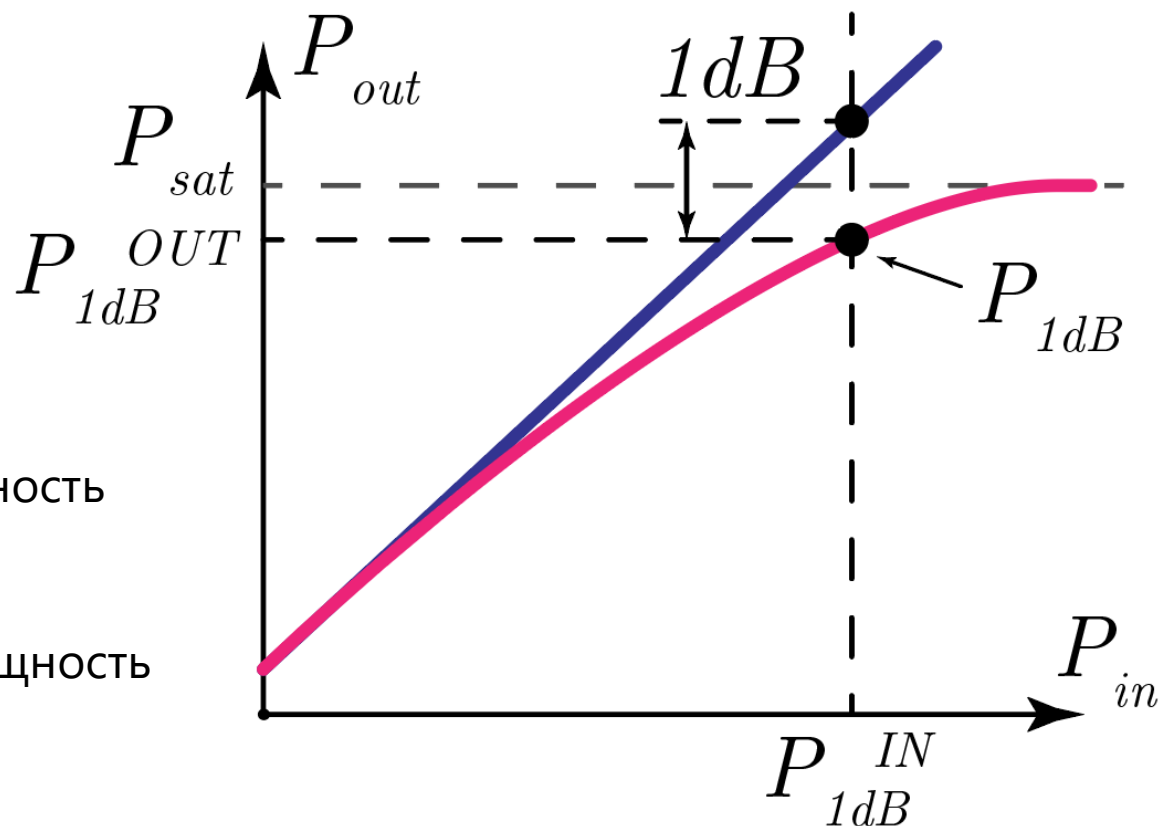
При подаче сигнала на нелинейный участок усилителя возникают искажения. Чем больше амплитуда на входе, тем больше искажение на выходе – эффект насыщения усилителя



Характеристика нелинейности УМ

Точка компрессии P_{1dB} — точка, в которой усиление становится на 1 дБ меньше, чем у идеальной характеристики.

Усилитель часто считается линейным до достижения точки компрессии.



P_{1dB}^{IN} - входная мощность точки компрессии

P_{1dB}^{OUT} - выходная мощность точки компрессии

Модель для описания УМ

Модель Раппа

Амплитудное искажение (AM-AM)

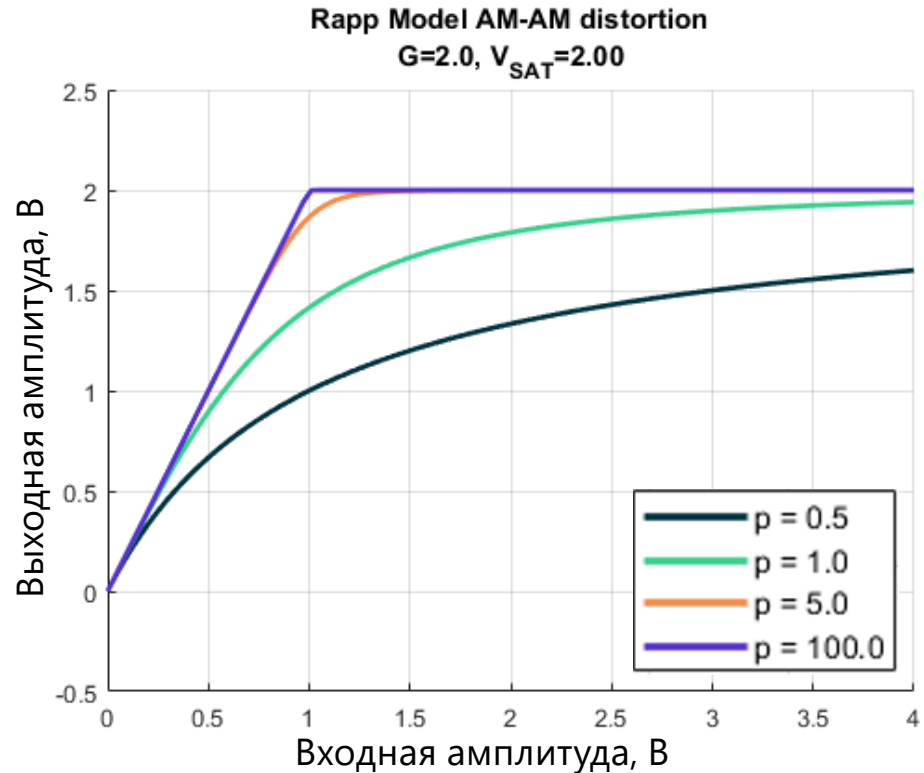
$$F_{AM-AM}(x) = \frac{Gx}{\left(1 + \left|\frac{Gx}{V_{SAT}}\right|^{2p}\right)^{\frac{1}{2p}}}$$

Фазовое искажение (AM-PM)

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

G – коэффициент усиления 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 $P_{1dB}^{OUT} = 12.6 \text{ dBm}$

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

AM-PM искажение

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

Параметры модели для диапазона 100-200 ГГц

Модель 100-200 ГГц была разработана на основе анализа последних работ по созданию твердотельных усилителей в соответствующем диапазоне частот

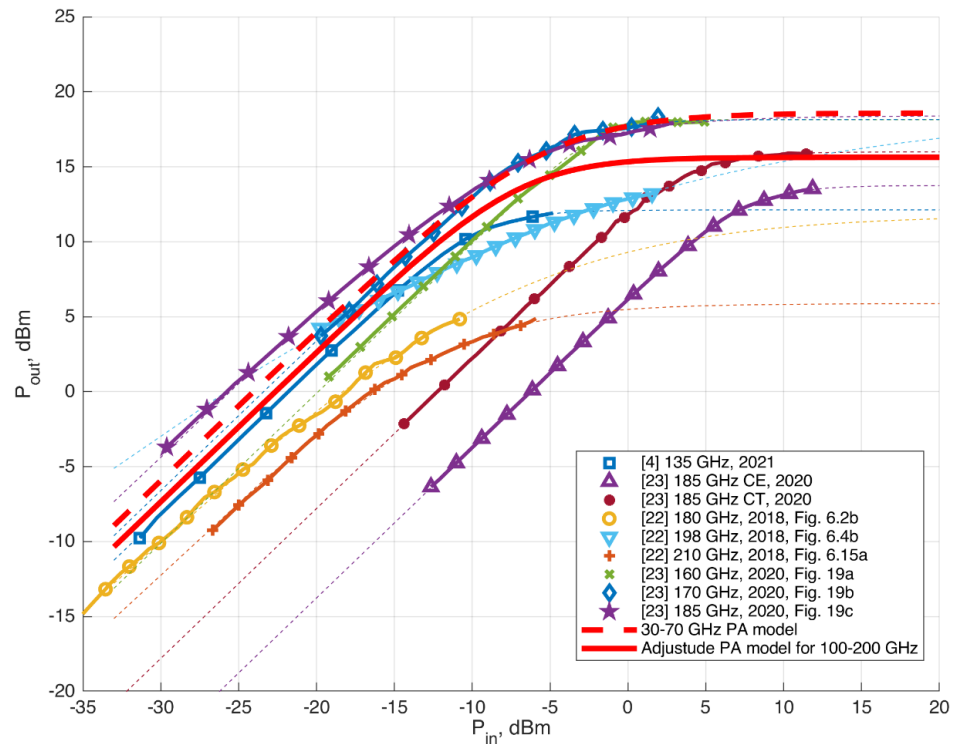
Характеристики из работ аппроксимировались моделью Раппа, затем полученные параметры G , V_{sat} , p были усреднены.

Полученные параметры для модели 100-200 ГГц

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

$$P_{1dB}^{OUT} = 11.6 \text{ dBm}$$

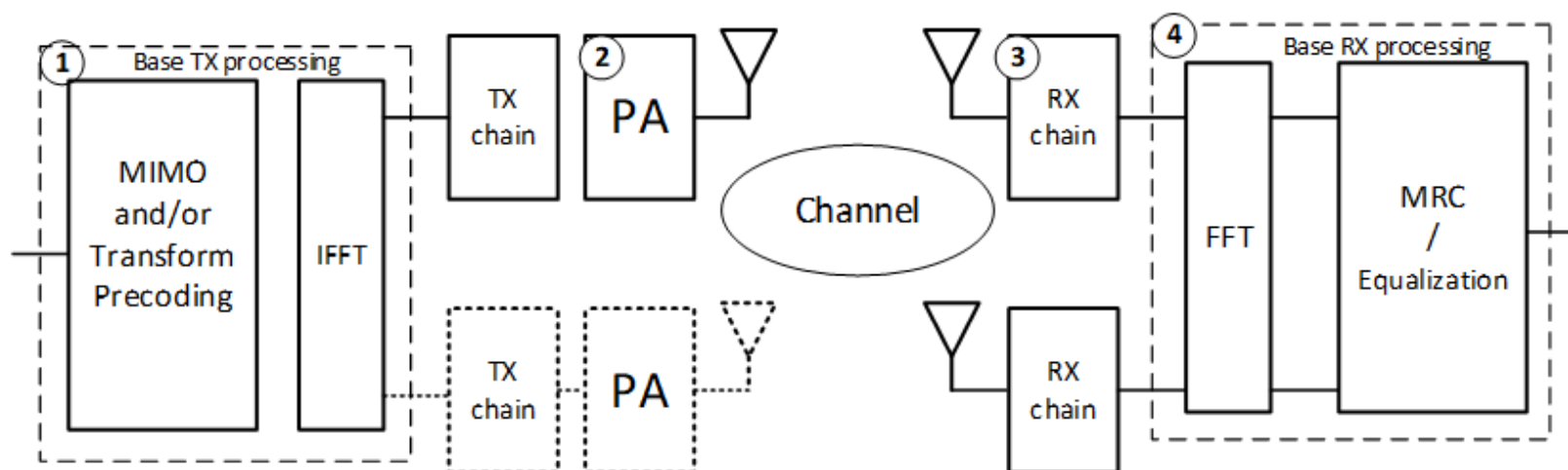
Амплитудные характеристики твердотельных УМ



Реализация УМ в LLS и искажение сигналов

Для моделирования использовался симулятор канального уровня - LLS, написанный в системе Matlab.

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



Принципиальная схема LLS

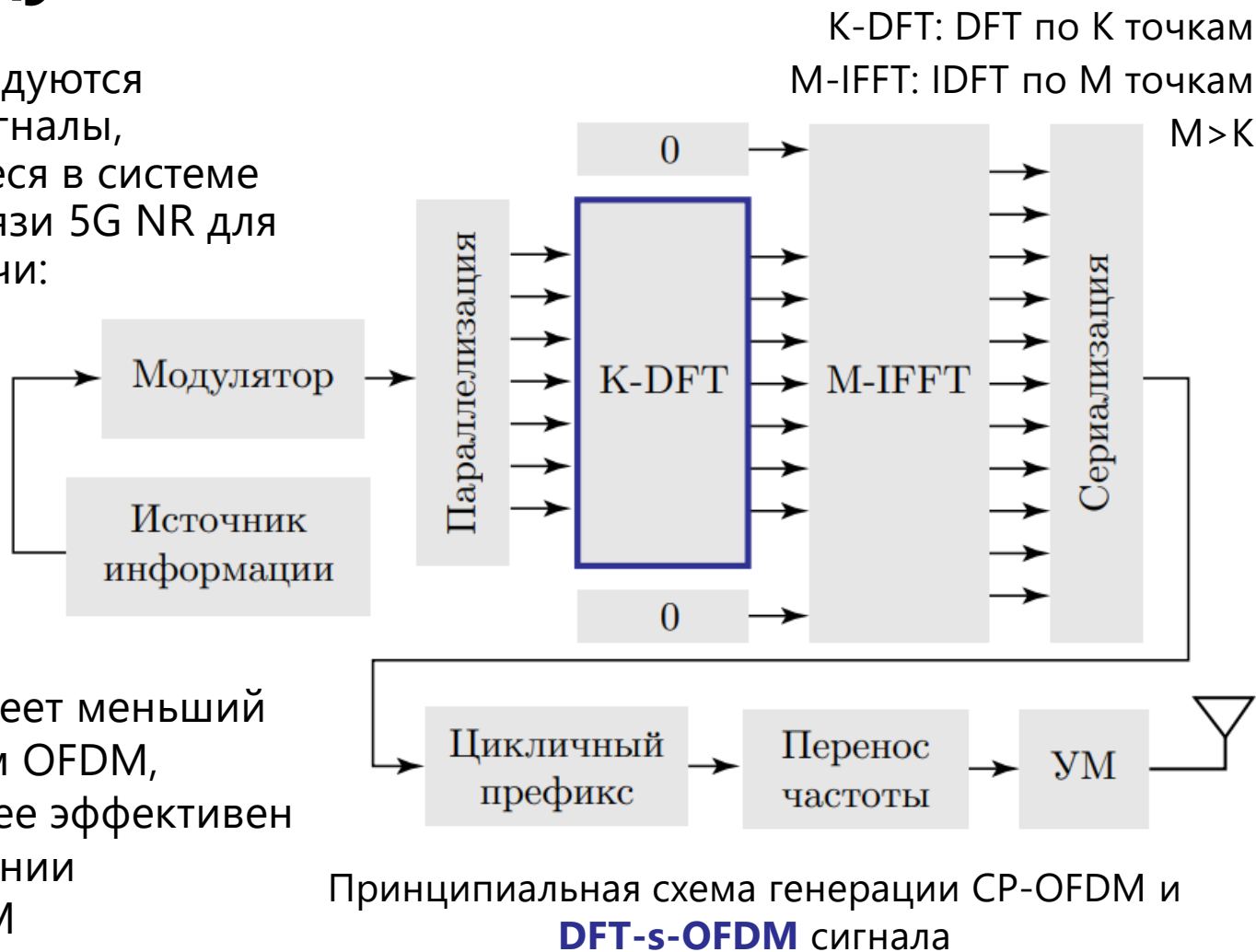
Исследуемые сигналы

В работе исследуются следующие сигналы, используемые в системе мобильной связи 5G NR для Uplink-передачи:

CP-OFDM

DFT-s-OFDM

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

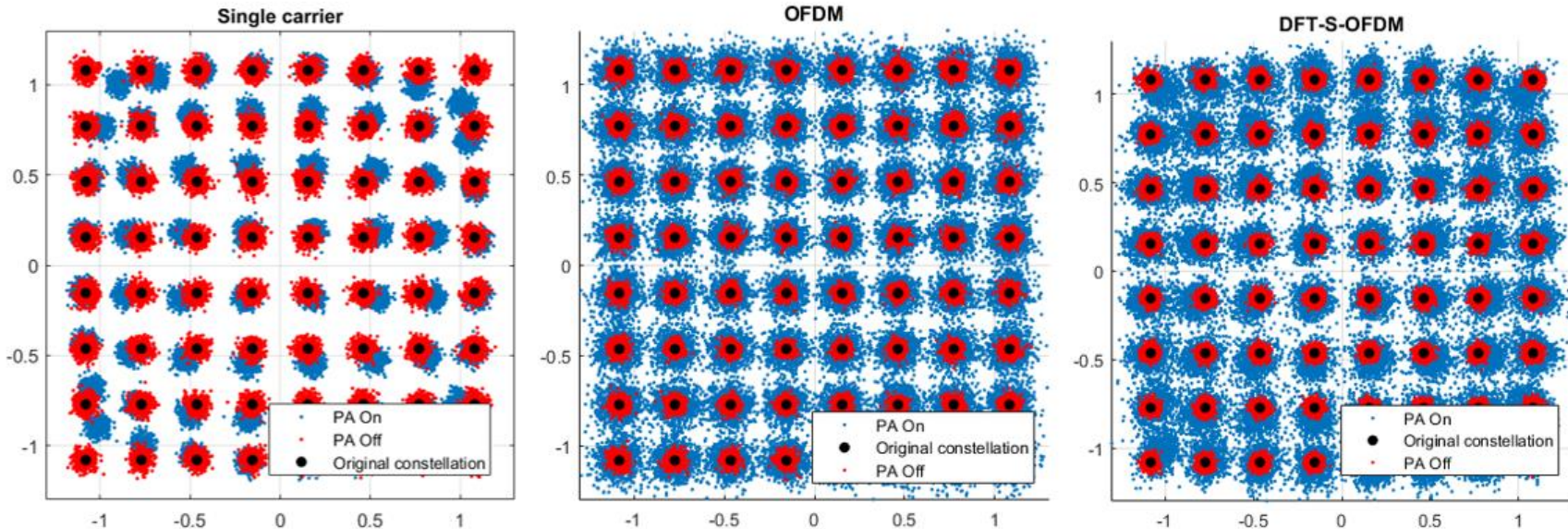


CP-OFDM – *Cyclic Prefix - Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*

DFT-s-OFDM – *Discrete Fourier Transform-spread-OFDM*

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 услителем

- 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

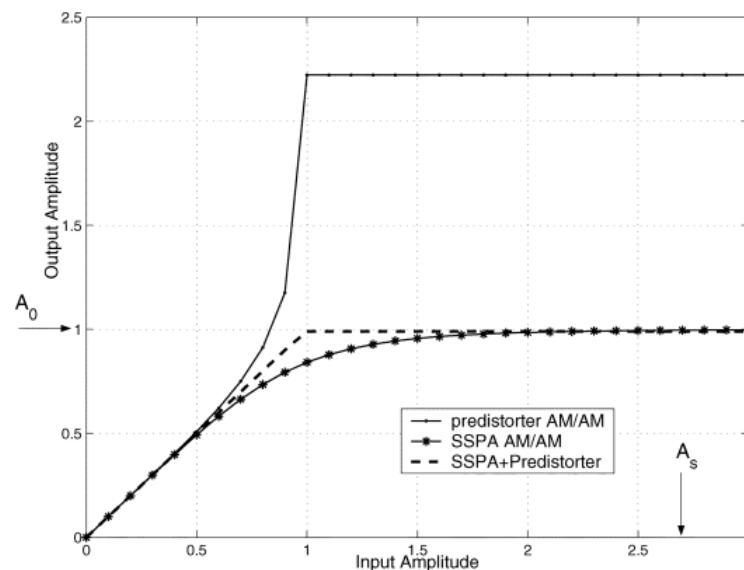
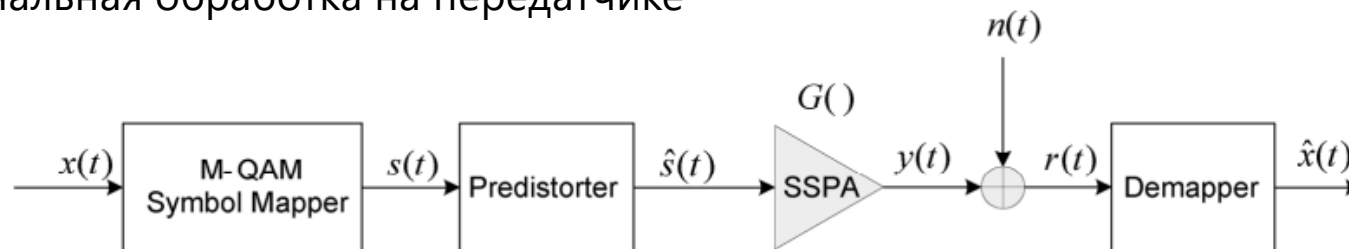


Fig. 2. Characteristic function of the SSPA, the predistorter, and SSPA+predistorter, where $\alpha_\phi = 0.1$, $A_o = 1$, $A_s = 2.65$, $p = 2$, and $\nu = 1$.



Обзор методов компенсации

Компенсация искажений на приемнике

- Компенсация производится посредством оценки параметров УМ с помощью пилотных сигналов, либо параметры считаются известными/переданными в сервисной информации. На основе полученных параметров применяется дополнительная обработка
- Многие работы рассматривают теоретические случаи, редко производится полноценное моделирование системы
- Не удалось найти пример использования компенсации для DFT-s-OFDM сигнала

Receiver based compensation of nonlinear distortion in MIMO-OFDM / Drotar et. al., 2010

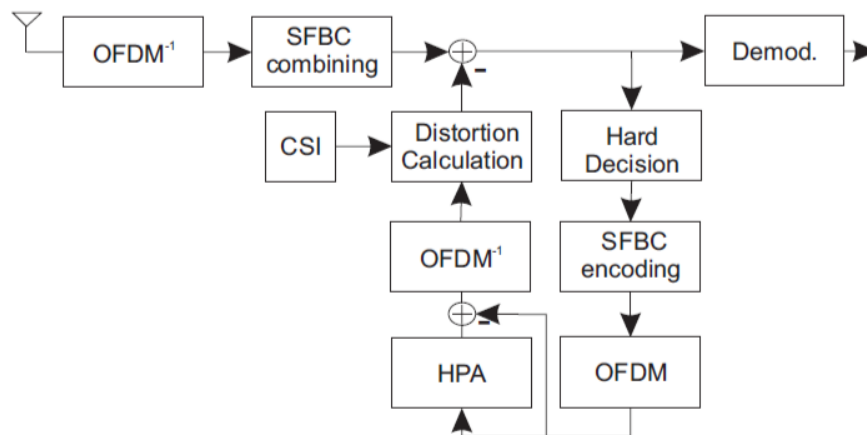


Fig. 1. Proposed SFBC-OFDM receiver structure for iterative detection of nonlinearly distorted signals.

Метод компенсации искажений на приемнике

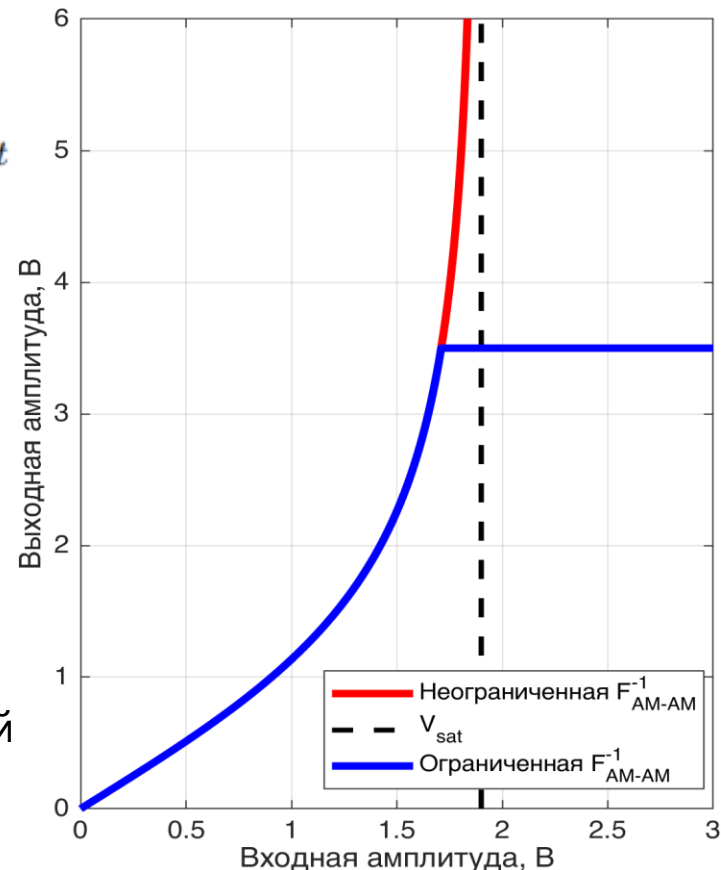
В основе метода лежит использование ограниченной обратной амплитудной характеристики УМ

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

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

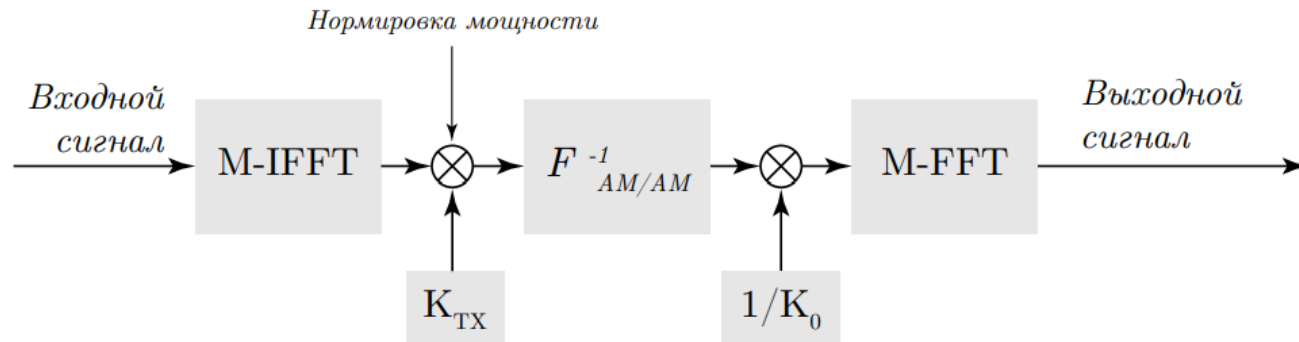
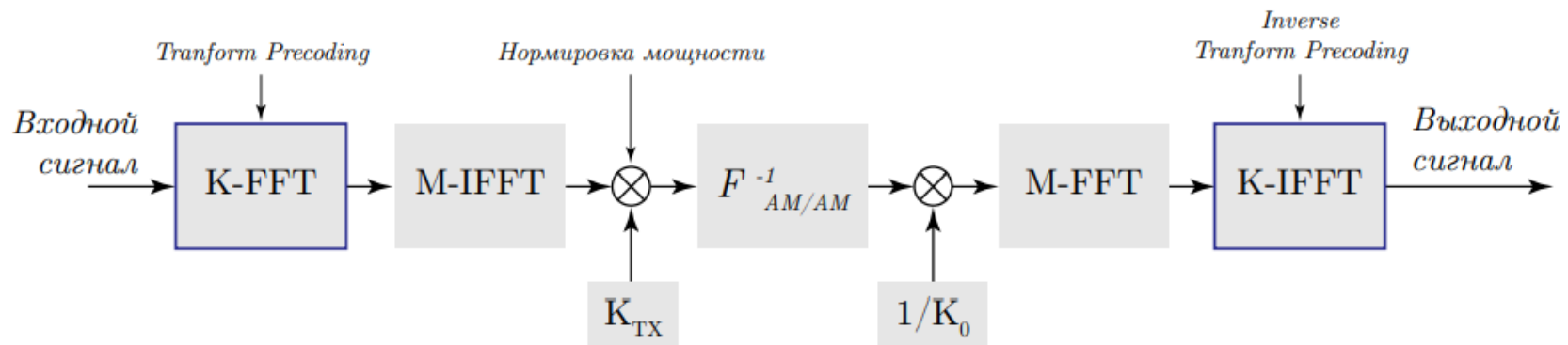


Схема компенсации DFT-s-OFDM сигнала



Параметры симуляций

Разработанный метод компенсации был реализован в LLS. Ниже приведен перечень типичных для системы 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

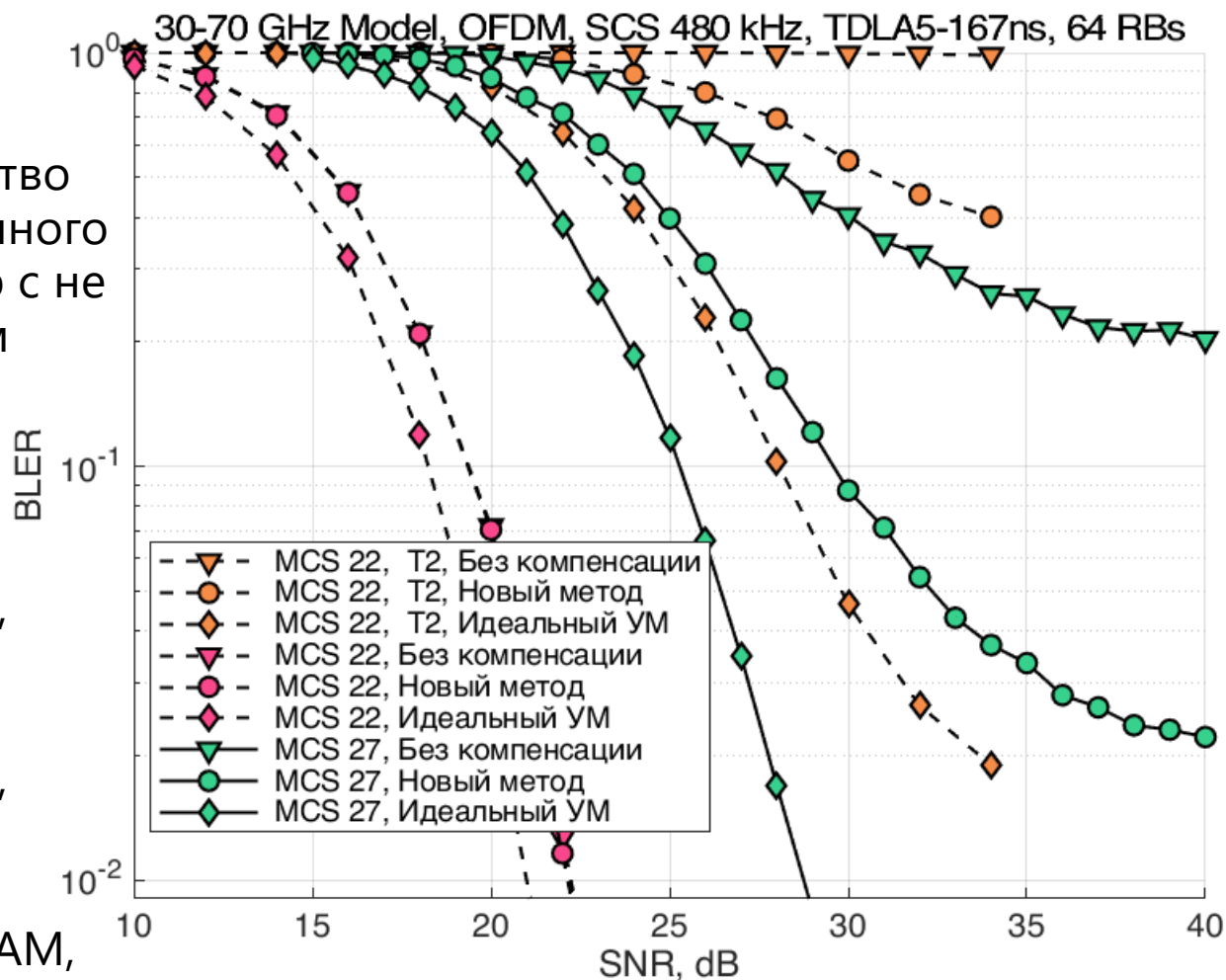
CP-OFDM / 30-70 ГГц / SCS 480 кГц

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

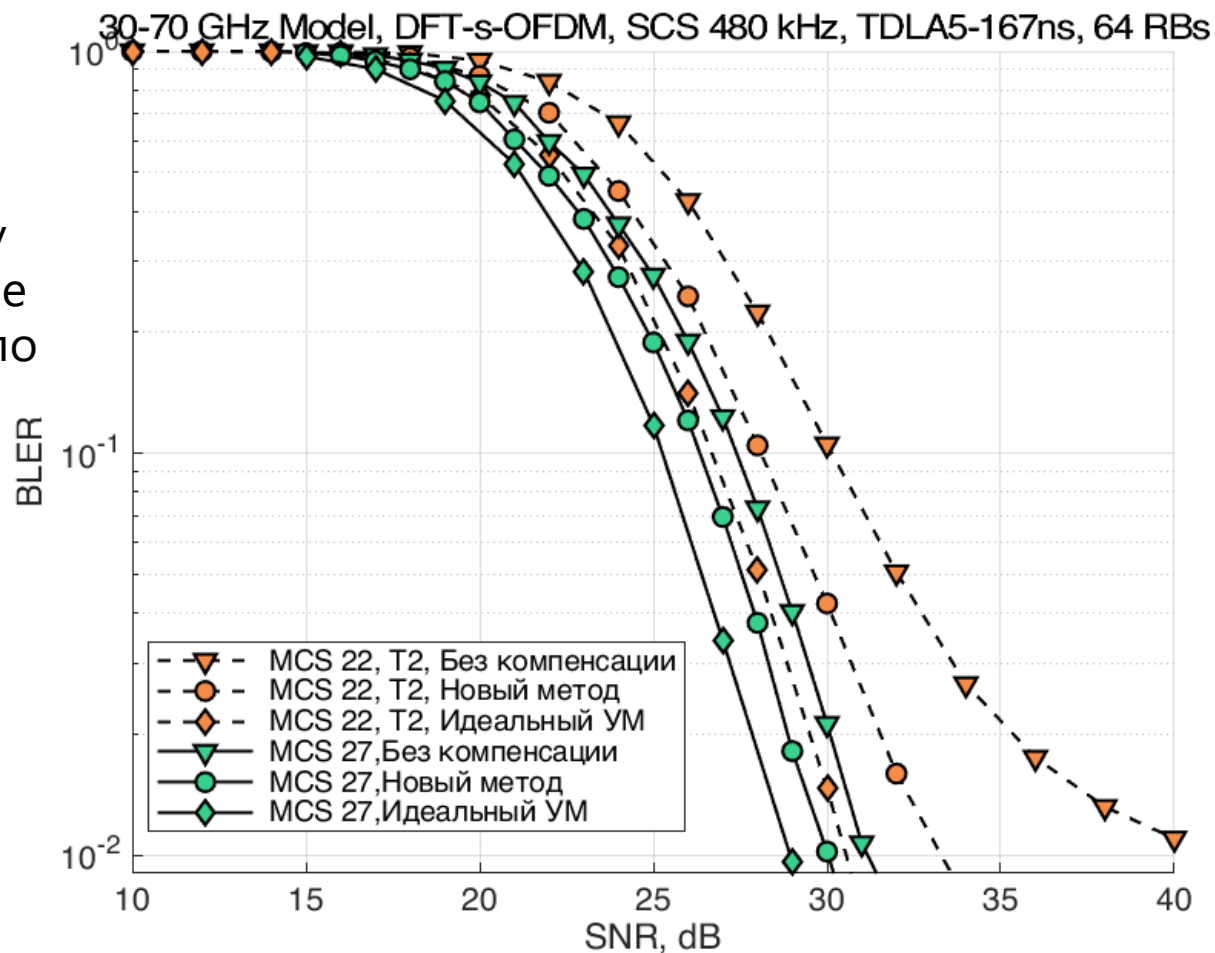


Результаты симуляций

DFT-s-OFDM / 30-70 ГГц / SCS 480 кГц

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

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



○ MCS 22t2: 256-QAM,
R = 0.74

● MCS 27: 64-QAM,
R = 0.89

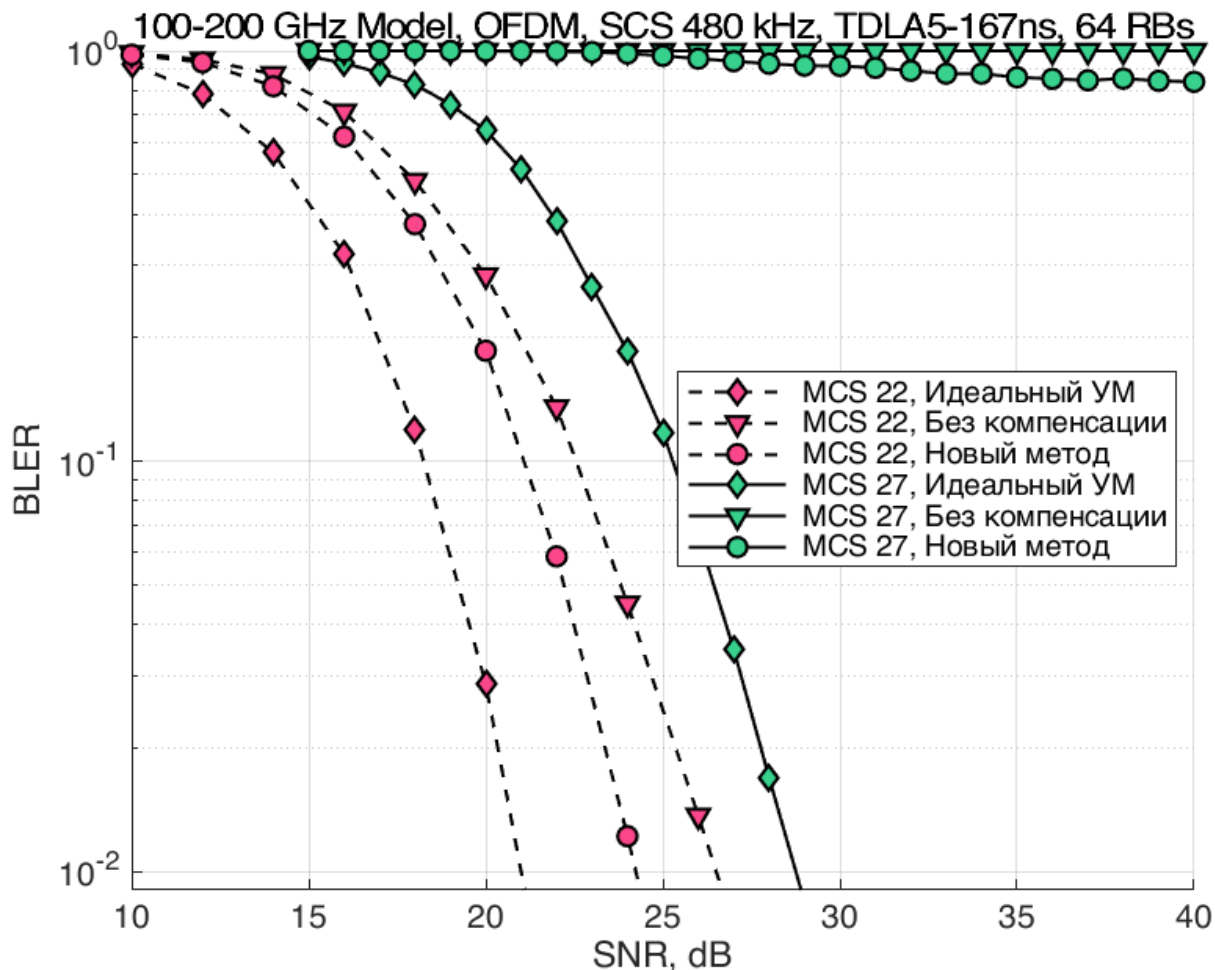
Результаты симуляций

CP-OFDM / 100-200 ГГц / SCS 480 кГц

В случае OFDM сигнала искажения еще хуже.

Для MCS 27 информация практически не восстановлена (ввиду высокого кодрейта)

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



● MCS 22: 64-QAM,
R = 0.65

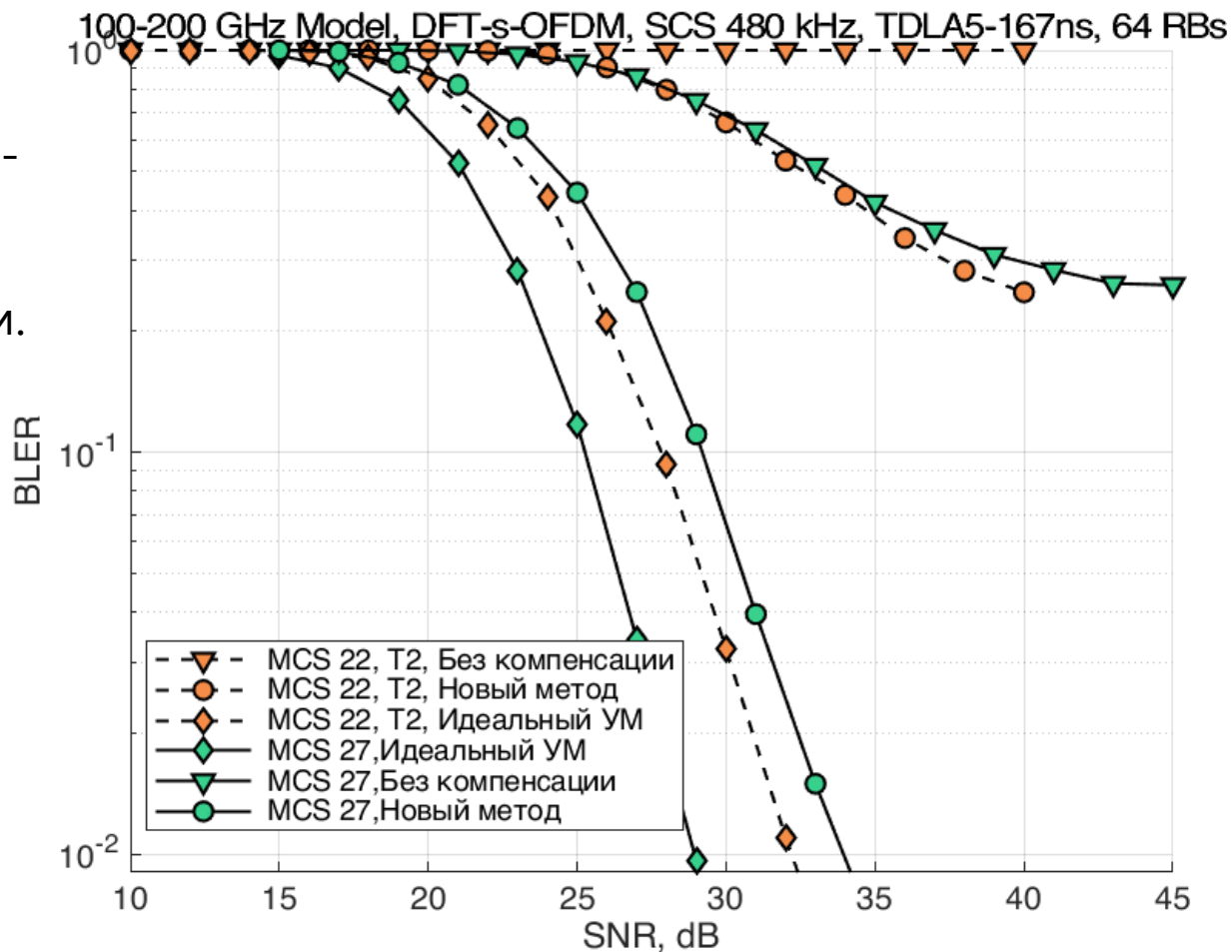
● MCS 27: 64-QAM,
R = 0.89

Результаты симуляций

DFT-s-OFDM / 100-200 ГГц / SCS 480 кГц

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

При высокой
модуляции часть
информации может
быть неовзвратно
искажена



○ MCS 22t2: 256-QAM,
R = 0.74

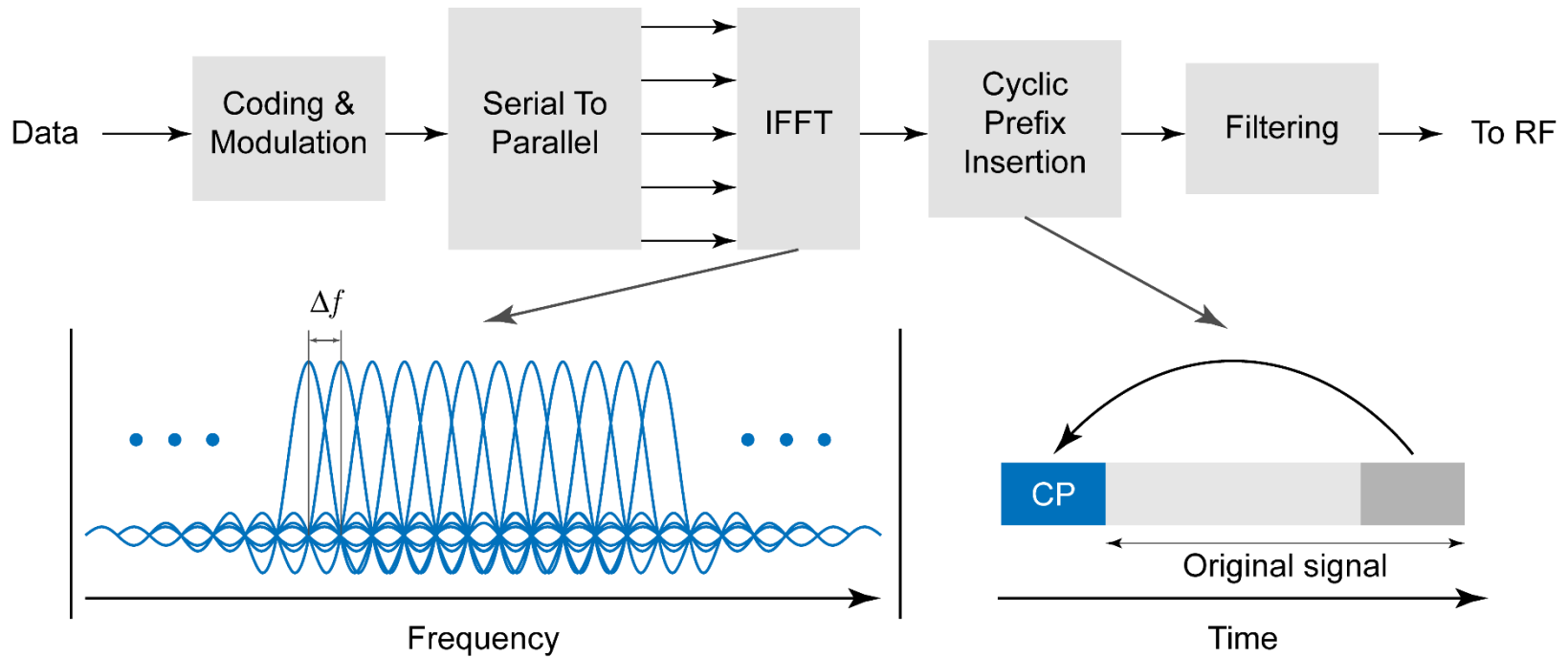
● MCS 27: 64-QAM,
R = 0.89

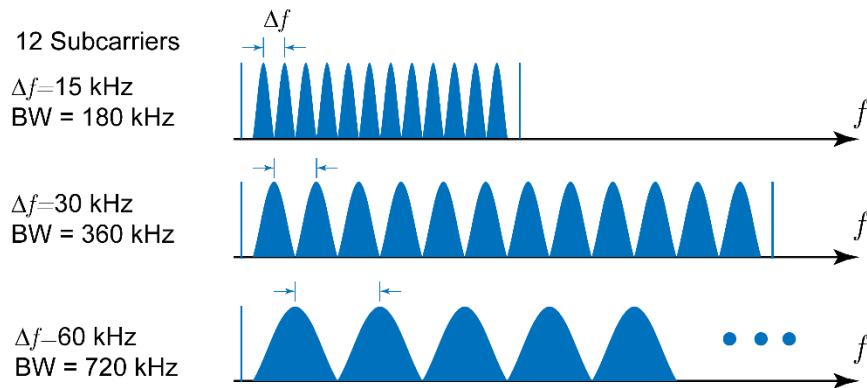
Заключение

- Исследовано влияние нелинейности усилителя мощности на различные сигналы, используемые в стандарте мобильной системы связи 5го поколения 5G NR.
- Создана модель усилителя мощности для диапазона 100-200 ГГц
 - Усилитель значительно менее линеен по сравнению с 30-70 ГГц.
- Разработан метод компенсации нелинейных искажений усилителя на приемнике, проведены соответствующие исследования в симуляторе канального уровня.
 - Компенсация выполняется на приемнике, позволяя базовой станции обрабатывать данные с простых передающих устройств
 - Метод способен улучшить производительность системы для обеих моделей усилителя по сравнению со случаем отсутствия компенсации

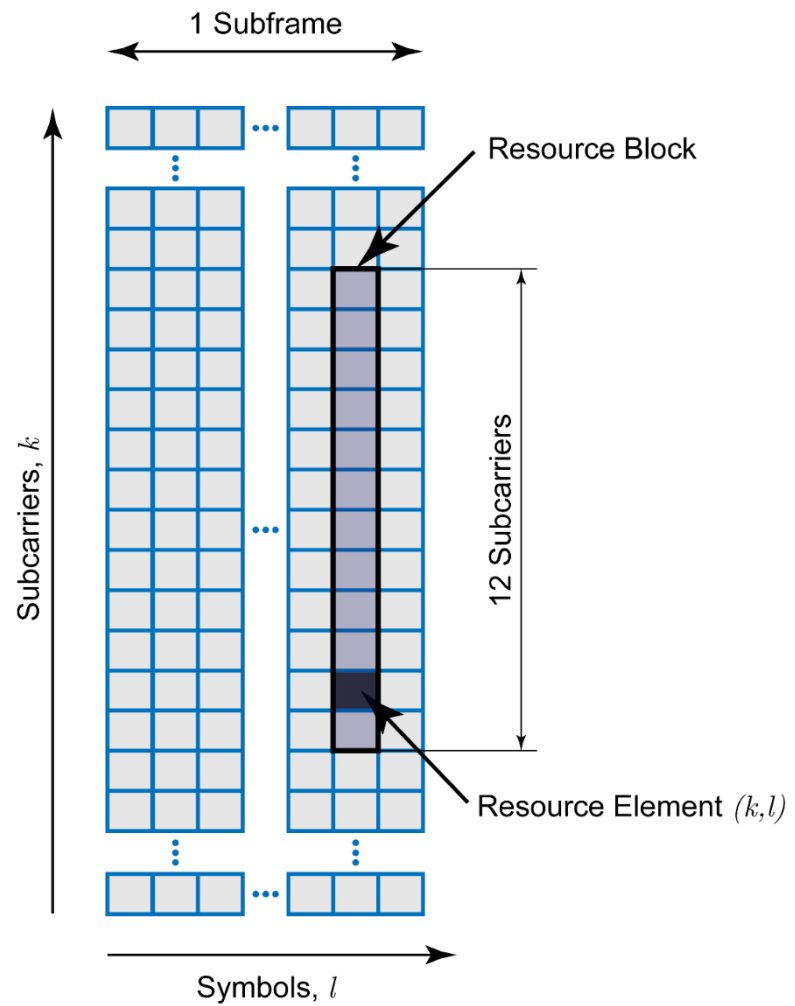
**Спасибо за
внимание!**

OFDM Waveform





μ	$\Delta f = 2^\mu \times 15 \text{ kHz}$	Cyclic prefix
0	15	Normal
1	30	Normal
2	60	Normal, Extended
3	120	Normal
4	240	Normal
5	480	Normal
6	960	Normal



Отступы по мощности IBO, OBO

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

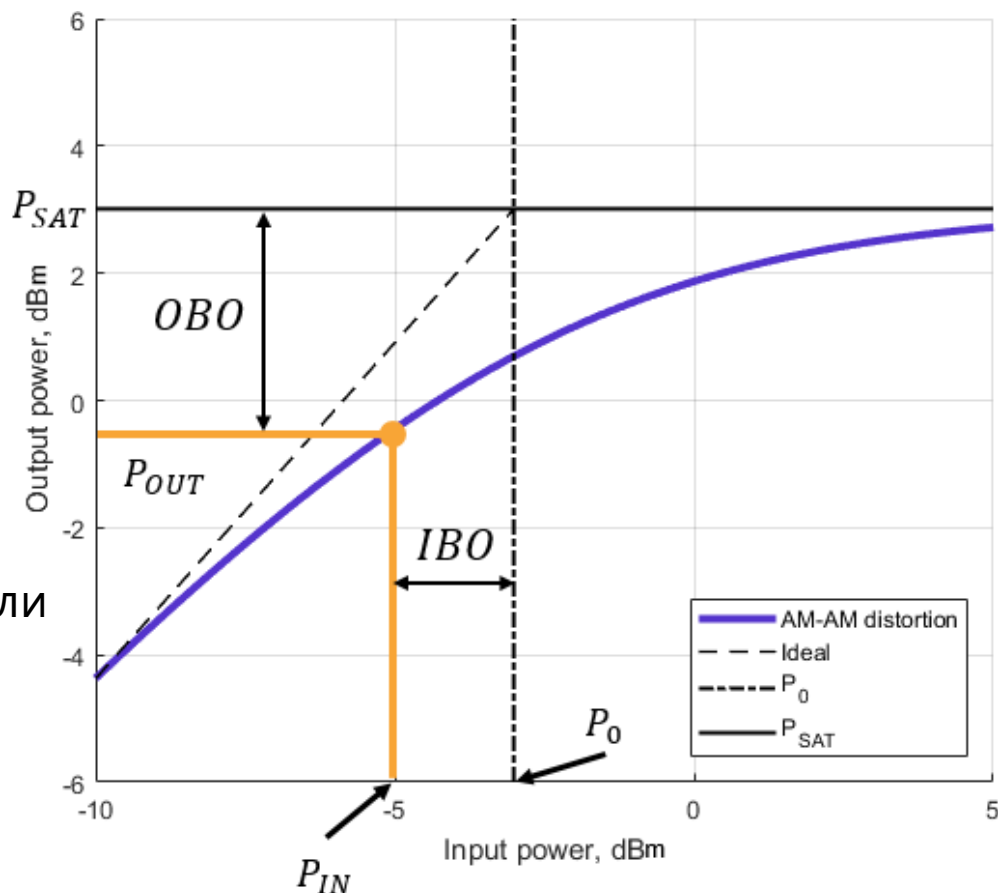
Output back-off:

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

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



Метод компенсации искажений на приемнике

K_{TX} — коэффициент нормировки для приведения мощности сигнала к выходной мощности на усилителе

K_0 — коэффициент нормировки для приведения мощности сигнала к входной мощности до усилителя

Схема компенсации OFDM сигнала

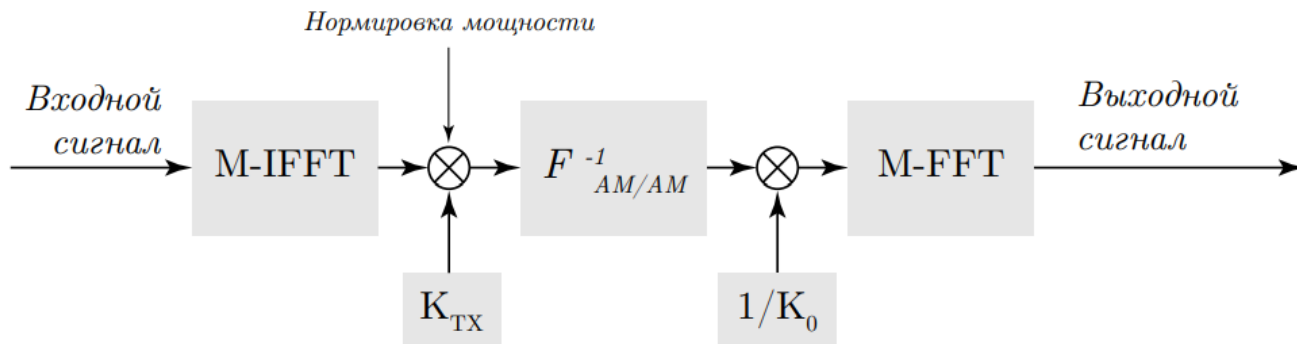
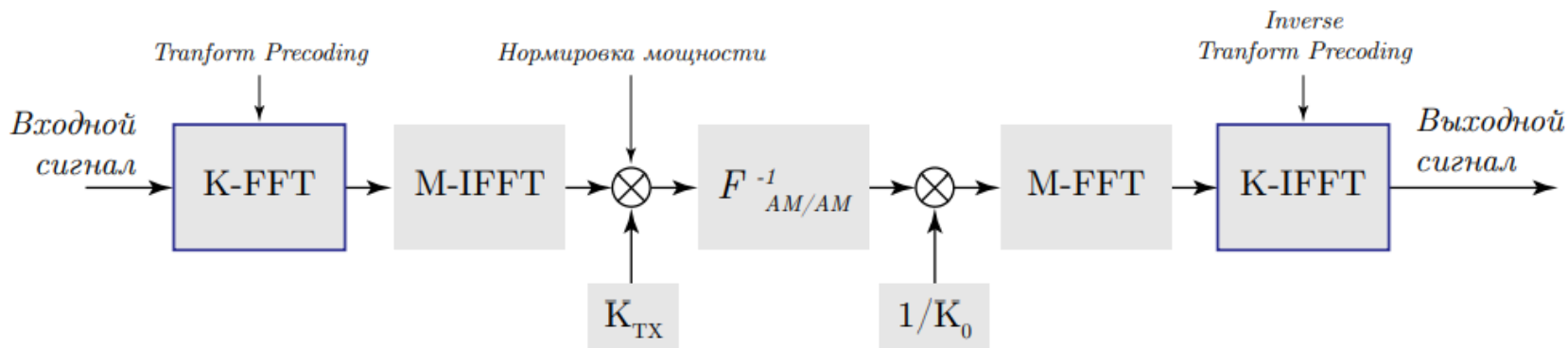


Схема компенсации DFT-s-OFDM сигнала

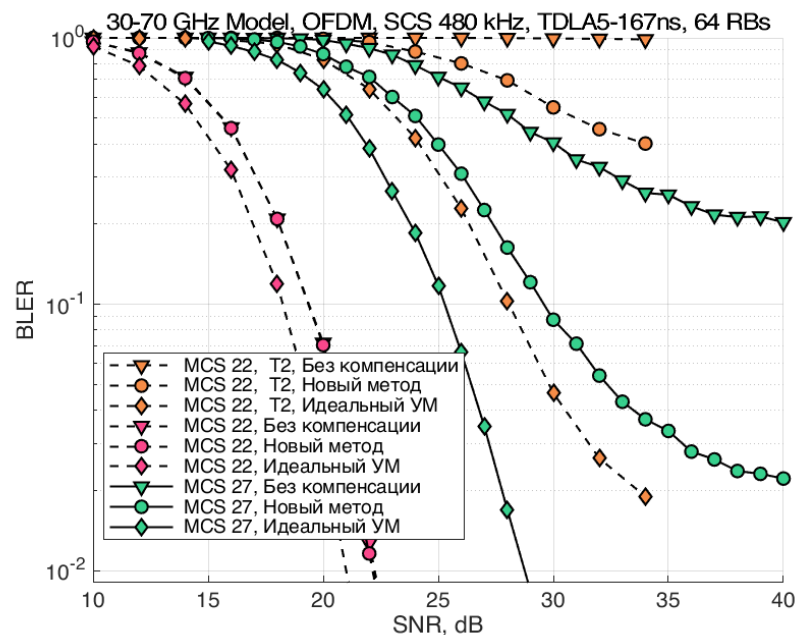
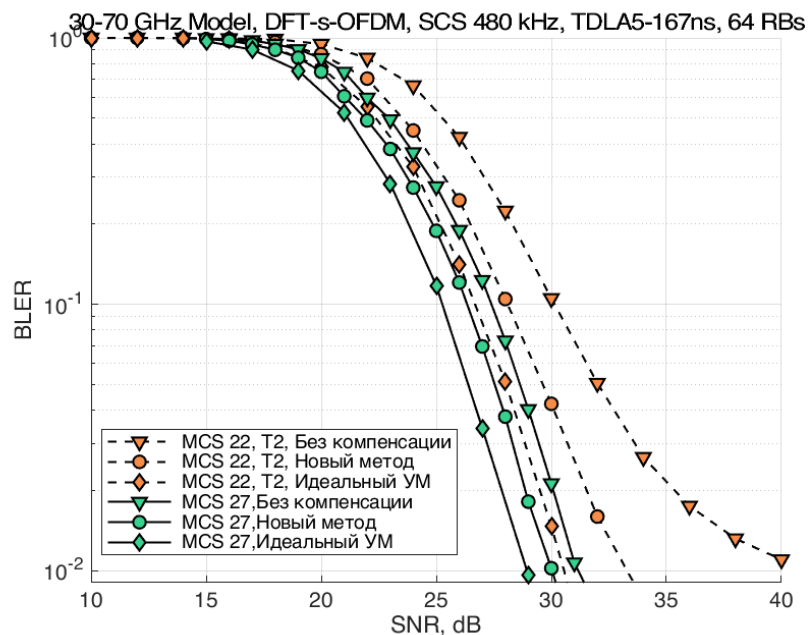


Параметры симуляций

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)

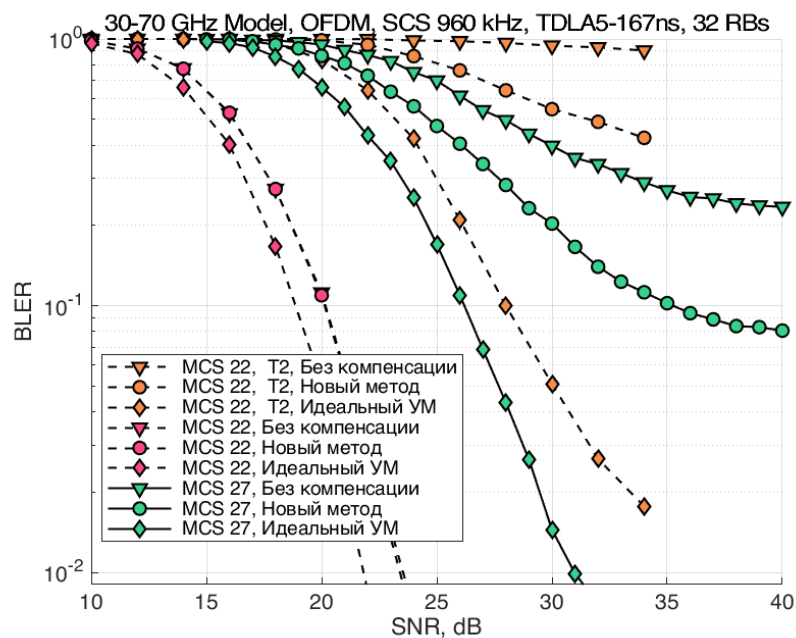
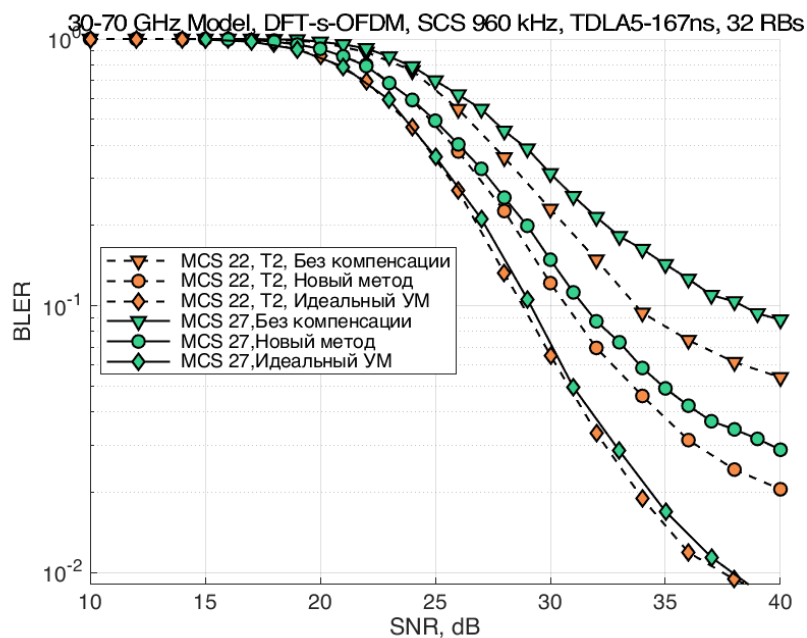
Результаты симуляций

30-70 ГГц / SCS 480 кГц



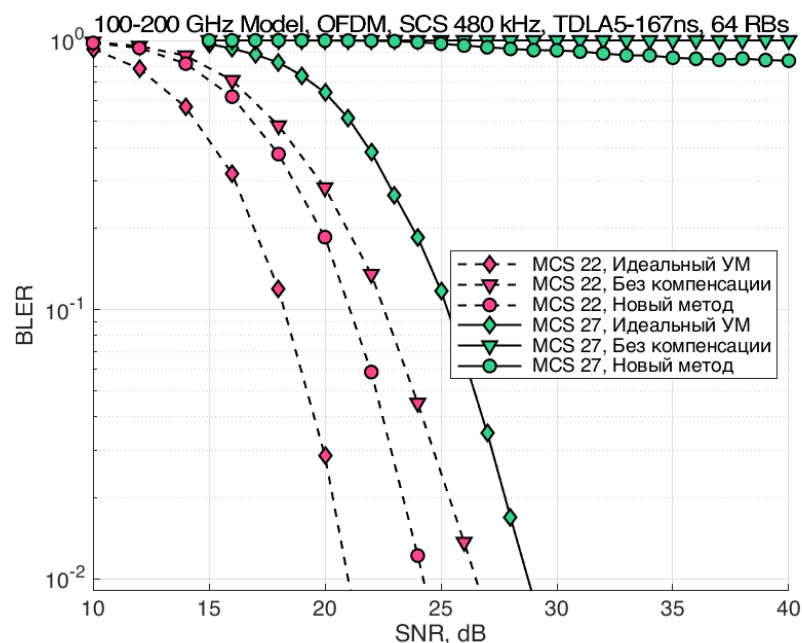
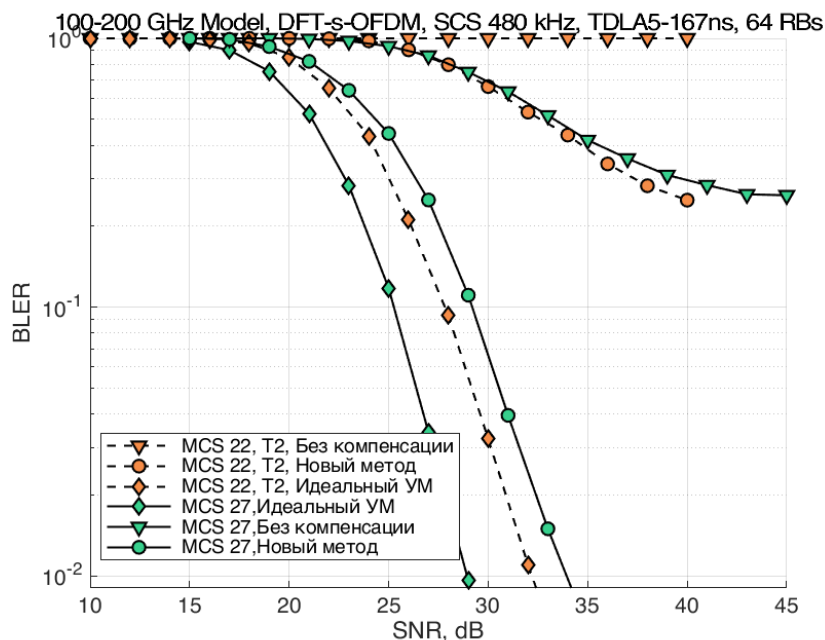
Результаты симуляций

30-70 ГГц / SCS 960 кГц



Результаты симуляций

100-200 ГГц / SCS 480 кГц



Результаты симуляций

100-200 ГГц / SCS 960 кГц

