Добрый день, уважаемые члены комиссии, вашему вниманию представляется работа «Метод компенсации нелинейных искажений усилителя мощности для стандарта мобильной связи 5G NR»

**Слайд 2 - Введение**

Целью данной работы является исследование влияния нелинейности усилителя на различные типы сигнала, используемые в стандарте 5G NR, разработка модели усилителя для миллиметрового диапазона 100-200 ГГц и разработка метода компенсации нелинейных искажений усилителя на приемнике, в частности для сигнала DFT-s-OFDM.

**Слайд 3 – Актуальность**

Исследование и компенсация нелинейных искажений усилителя мощности снова стала актуальной по двум основным причинам – это переход в миллиметровый диапазон длин волн, где технологии менее совершенные по сравнению с более низкими частотами. Текущий стандарт поддерживает частоты до 52.6 ГГц и уже ведутся работы по расширению до 114 ГГц.

Второй причиной является введение технологии интернета вещей в систему мобильной связи 5го поколения 5G NR. В данном случае мы имеем много простых и дешевые устройств, которые не отличаются высоким качеством комплектующих, в частности усилителей мощности. Также передающие устройства должны быть энергоэффективными, т.е. необходимо свести к минимуму обработку на передатчике и выполнять, например компенсацию искажений на приемнике.

**Слайд 4 – Нелинейность УМ**

Усилитель мощности является ключевым компонентом передатчика, отвечающий за повышение мощности сигнала. На схеме он выделен и находится между антенной и блоком повышения частоты. За счет внешнего источника питания, усилитель увеличивает амплитуду, соответственно и мощность передаваемого сигнала. В случае идеального усилителя, амплитудная характеристика представляет прямую в соответствии с графиком слева – коэффициент усиления (отношение) постоянен. Однако в реальности усилитель имеет уровень насыщения, возникает нелинейность характеристики, что показано на графике справа.

**Слайд 5 – Искажение сигнала**

Рассмотрим, как именно искажается сигнал. Приведена характеристика нелинейного усилителя, на оси абсцисс – входная амплитудная огибающая усиливаемого сигнала. В случае линейной характеристики, сигнал усиливается и не искажается, в соответствии с пунктирной линией. При использовании нелинейной характеристики, выходная амплитуда меньше, чем в случае линейного усилителя, происходит искажение формы сигнала. Чем больше средняя подаваемая мощность, тем больше искажается сигнал, и тем ближе выходная мощность к уровню насыщения.

**Слайд 6 – Точка компрессии**

Для описания степени нелинейности усилителя используют такую характеристику, как точка децибельной компрессии – точка, в которой усиление мощности становится на 1 дБ меньше, чем у идеального усилителя. До этой точки характеристика часто считается линейной.

**Слайд 7 – Модель Раппа**

Для дальнейшего описания и моделирования искажения сигналов усилителем была выбрана стандартная модель Раппа, включенная в спецификацию 3GPP. Функция Famam описывает амплитудное искажение, х – входная амплитуда, famam – выходная амплитуда.

В качестве базовых параметров модели были выбраны предложенные Нокиа в одном из исследований для диапазона 30-70 ГГц. Соответствующие значения параметров приведены на слайде, также приведено значение точки децибельной компрессии.

**Слайд 8 – модель 100-200**

В связи с расширением в миллиметровый диапазон, модель Нокиа не покрывает все интересующие нас частоты. Нами были проведен анализ доступных экспериментальных работ в области создания твердотельных усилителей мощности. Извлеченные из работ параметры были усреднены и полученные параметры для диапазона 100-200 ГГц приведены на слайде.

Отметим, что параметры заметно хуже чем для модели Нокиа, в частности более низкое значение напряжения насыщений и точки децибельной компрессии, что значит что нелинейность наступает быстрее.

**Слайд 9 – LLS**

Для моделирования системы использовался симулятор канального уровня. Обобщенная схема симулятора приведена на слайде.

Симулятор состоит из блоков предварительной подготовки и передачи. Далее сигнал пропускается через канал, обрабатывается на приемнике и декодируется. Имеется поддержка многоканальной передачи, однако в данной работе рассматривался только один поток. Симулятор соответствует требованиям стандарта 5G и соответствующим образом откалиброван.

Описанная ранее модель усилителя Раппа была имплементирована в симулятор (2).

**Слайд 10 - Сигналы**

Для исследования были выбраны два основных сигнала, использующиеся в Uplink это OFDM и DFT-s-OFDM сигналы. Принципиальная схема генерации этих сигналов приведена на слайде.

OFDM сигнал передает данные, состоящие из большого количества поднесущих, при его обработке удобно использовать дискретные фурье преобразования.

DFTS-OFDM сигнал имеет немного более сложную структуру, в частности, имеется дополнительно преобразование фурье, благодаря которому пик фактор ближе к single carrier сигналу. Это важно при использовании нелинейного усилителя на пользовательском устройстве.

**Слайд 11 - Искажения**

В результате реализации усилителя в LLS были получены следующие результаты. Приведены созвездия полученного сигнала на приемнике. Первый график – сигнал с одной несущей, искажения носят прямолинейный характер, сигнал искажается в зависимости от амплитуды.

ОФДМ сигнал искажается иначе, наблюдается увеличение разброса относительно центров созвездий по сравнению со случаем идеального усилителя.

ДФТС имеет совмещенные искажения, присутствует как общий сдвиг в зависимости от амплитуды, так и увеличение разброса. Необходимо компенсировать возникшие искажения

**Слайд 12 – обзор методов компенсации**

Существующие методы борьбы с искажениями можно разделить на два основных подхода.

Первый – это предварительная подготовка сигнала на передатчике, обычно это pre-distortion, некое выпрямление суммарной характеристики системы. Однако такая обработка добавляет нагрузку на передающее устройство, в нашем случае это неприемлимо.

**Слайд 13 – обзор методов компенсации**

Второй подход – это компенсация искажений на приемнике. Компенсация производится посредством оценки параметров усилителя с помощью пилотных сигналов, либо параметры считаются известными, также имеет место статистическая обработка для компенсации искажений. Многие изученные работы часто рассматривают сильно теоретические случаи, также редко производится полноценное моделирование системы. Помимо этого, не удалось найти примеров использования компенсации для сигнала ДФТС-ОФДМ. Поэтому в данной работе был разработан новый метод компенсации искажений.

**Слайд 14 – Новый метод компенсации**

Разработанный метод компенсации предназначен для обработки на приемнике, таким образом уменьшается нагрузка на передатчик. В основе метода лежит использование ограниченной обратной характеристики усилителя. Параметры усилителя и рабочая точка считаются известными.

**Слайд 15 – Блок схема метода компенсации**

Приведены блок схемы разработанного метода компенсации в зависимости от типа используемого сигнала.

По сути, сигнал на приемнике проходит цепочку обратных преобразований и приводится к состоянию, в котором он искажался усилителем, затем применяется обратная амплитудная характеристика, и затем сигнал возвращается в частотную область, уже компенсированный.

Схемы для ОФДМ ДФТСОФДМ и отличаются наличием специфичного Фурье-прекодинга.

**Слайд 16 - Симуляции**

Разработанный метод был протестирован на полноценных симуляциях LLS. Типичные для системы параметры симуляций приведены в таблице. Используются высокие модуляции 64 и 256 QAM поскольку для них особо критично влияние нелинейных искажений. В качестве результатов были получены кривые зависимости блоковых ошибок от отношения сигнал шум.

**Слайд 17 – Результаты симуляций**

Приведены результаты моделирования для сигнала ОФДМ модели усилителя 30-70 ГГц. Рассматривались три случая – идеальный усилитель, нелинейный усилитель без компенсации и усилитель с компенсацией.

Из приведенных результатов следует, что при введении нелинейности усилителя вероятность блоковой ошибки значительно увеличивается в большинстве случаев. При введении компенсации на приемнике с помощью описанного метода, наблюдается улучшение результата - кривая сдвигается на несколько дБ. Исключение составляет случай низкого кодрейта, что ожидаемо, поэтому в дальнейшем мы его опустим.

**Слайд 18**

Для дфтс сигнала получены похожие результаты, однако отметм что из-за меньшего пик-фактора, нелинейность меньше искажает сигнал. Предложенный метод компенсации также улучшает результат для двух модуляций.

**Слайд 19**

Для модели 100-200 ГГц наблюдается еще большее искажение сигнала, что свидетельствует о ухудшении параметров усилителя. Разработанный метод также улучшает результаты для ОФДМ сигнала, однако в при высокой модуляции из-за высокого пик-фактора возможна потеря данных.

**Слайд 20**

Для дфтс сигнала имеем похожую картину искажения более значительны и разработанный метод компенсации также демонстрирует улучшение результата.

**Заключение**

В результате данной работы были исследованы влияние нелинейности усилителя на сигналы, используемые в стандарте мобильной системы связи 5го поколения 5g NR

Была создана модели усилителя мощности для диапазона 100-200 ггц

Также был разработан и реалтизован метод компенсации нелинейных искажений на приемнике, который затем был протестирован в симуляторе канального уровня. Компенсация выполняется на приемнике, позволяя базовой станции обрабатывать данные с простых передающих устройств.

Разработанный метод продемонстрировал возможность улушить результат работы системы по сравнению со случаем отсутствия компенсации.