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**

Стандарт мобильной связи пятого поколения тесно связан с технологией Интернета Вещей - в частности, высокая скорость, надежность сети и возможность массового подключения «умных» устройств являются ключевыми требованиями для создания надежной системы.

Стандарт поддерживает несущие частоты до 52.6 ГГц, также уже ведутся исследования с целью расширения в миллиметровый диапазон до 114 ГГц.

Одной из основных проблем в данном диапазоне является более выраженная нелинейность усилителя мощности, которая искажает сигнал и понижает производительность системы в целом.

Картина усугубляется при рассмотрении случая интернета вещей, где важна низкая стоимость конечного продукта, из-за чего понижается качество используемых элементов, в частности, усилителей мощности.

Также устройства должны быть максимально энергоэффективны, поэтому необходимо минимизировать сигнальную обработку на передатчике – в частности, выполнять компенсацию искажений, внесенных нелинейным усилителем 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 – Отступы**

Для уменьшения степени искажения среднюю входную мощность уменьшают. Называют по разному в зависимости от того, от чего делают отступ - OBO и IBO. …

**Слайд 7 – Модель Раппа**

Для дальнейшего описания и моделирования искажения сигналов усилителем была выбрана модель Раппа, включенная в спецификацию 3GPP.

Функция Famam описывает амплитудное искажение, х – входная амплитуда, famam – выходная амплитуда. G – коэффициент усиления слабого сигнала, V\_sat – напряжение насыщения

Fampm описывает фазовые искажения, а именно сдвиг фазы выходного сигнала относительно входного в зависимости от амплитуды.

Для примера здесь показан график амплитудной характеристики в зависимости от параметра р. Чем больше значение р, тем ближе усилитель к линейному.

В качестве базовых параметров модели были выбраны предложенные Нокиа в одном из исследований для диапазона 30-70 ГГц.

Соответствующие значения параметров приведены на слайде.

**Слайд 8 – модель 100-200**

В связи с расширением в миллиметровый диапазон, модель Нокиа не покрывает все интересующие нас частоты. Необходима модель для 100-200 ГГц. Соответственно, нами были проанализированы последние работы в области создания твердотельных усилителей мощности.

На графике приведены характеристики усилителей для различных значений несущей частоты из разных работ.

Характеристики были аппроксимированы моделью Раппа, после чего полученные параметры были усреднены, а полученные средние параметры были использованы в качестве модели для 100-200 ГГц.

Характеристики в этом диапазоне хуже чем для 30-70 ГГц, в частности, мы имеем более низкое значение амплитуды насыщения, а также меньшее значение точки децибельной компрессии, что означает что нелинейность наступает быстрее.

**Слайд 9 – LLS**

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

Симулятор состоит из блоков предварительной подготовки, в том числе прекодинг, формирование сигналов и обратное фурье преобразование для офдм сигнала. Далее сигнал пропускается через канал, обрабатывается на приемнике и декодируется. Симулятор соответствует требованиям стандарта и соответствующим образом откалиброван.

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

**Слайд 10 - Сигналы**

Для симуляций были выбраны два основных сигнала – OFDM и DFT-s-OFDM. Принципиальная схема генерации этих сигналов приведена на слайде. Дфтс отличается от офдм сигнала наличием предварительного кодирования при помощи дискретного фурье преобразования на ограниченном количестве поднесущих. Благодаря этому у дфтс сигнала меньший пик фактор, что 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, т.е. сигналу придаются определенные свойства, чтобы минимизировать влияние нелинейности усилителя. 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. Сигнал в соответствии с его типом приводится к состоянию, в котором он пропускался через усилитель, потом применяется обратная функция, и затем сигнал возвращается в частотную область, уже компенсированный.

**Слайд 15 – Блок схема метода компенсации**

Приведены блок схемы разработанного метода компенсации в зависимости от типа используемого сигнала. В основе метода как сказано раньше лежит обратная характеристика усилителя. Фурье преобразования и нормировки мощности необходимы для приведения сигнала к форме, в которой он взаимодействовал с усилителем, и соответственно, обратно.

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

**Слайд 16 - Симуляции**

Разработанный метод был протестирован на полноценных симуляциях канального уровня в ллс. Параметры симуляций приведены в таблице. Моделирование проводилось для двух моделей усилителя и для двух типов сигнала -офдм, дфтс. В качестве результатов были получены кривые зависимости блоковых ошибок от отношения сигнал шум.

**Слайд 17 – Результаты симуляций**

Приведены результаты моделирования для сигнала дфтс модели усилителя 30-70 ГГц, для различных схем кодирования и скорости кода. 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.

**Слайд 18**

Для офдм сигнала были получены похожие результаты, однако стоит отметить что из-за высокого пик-фактора офдм сигнала, нелинейность сильнее искажает сигнал. Предложенный метод компенсации также улучшает результат в большинстве случаев.

**Слайд 19**

Для модели 100-200 ГГц наблюдается еще большее искажение сигнала, что свидетельствует о ухудшении параметров усилителя. Разработанный метод также улучшает результаты как для дфтс сигнала,

**Слайд 20**

Так и для офдм сигнала. Однако стоит заметить что в случае офдм сигнала появляются случаи, когда искажения настолько большие, что восстановление информации бывает невозможным, что еще раз подтверждает необходимость применения какой-либо компенсации нелинейности.

**Заключение**

В результате данной работы были исследованы влияние нелинейности усилителя на сигналы офдм и дфтс

Были подобраны параметры модели раппа для диапазона 100-200 ггц

Также был разработан и реалтизован метод компенсации нелинейных искажений на приемнике. Компенсация на приемнике позволяет уменьшит объем предварительной обработки на передатчике, что экономит потребляемую энергию.

Разработанный метод продемонстрировал возможность улушить результат работы системы при определенных параметрах системы,