

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»**

Радиофизический факультет

**Реферат по специальной дисциплине
03.04.03 «Радиофизика»**

**МЕТОД КОМПЕНСАЦИИ НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ УСИЛИТЕЛЯ
МОЩНОСТИ ДЛЯ СТАНДАРТА МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ 5G NR**

Выполнил:

_____ Шиков А.П.

Нижний Новгород
2022 год

Введение

Развитие стандарта мобильной связи 5G New Radio (NR), разрабатываемого консорциумом 3GPP (*Англ. - 3rd Generation Partnership Project*), тесно связано с развитием технологии Интернета Вещей (*Англ. - IoT - Internet of Things*). Высокая скорость, надежность сети, малая задержка, а также возможность массового подключения ”умных” устройств являются важнейшими параметрами, определяющими производительность системы в целом.

Одни из последних релизов стандарта 5G NR - релизы 15 и 16 обеспечивают поддержку несущих частот до 52.6 ГГц. С целью расширить поддержку текущего частотного диапазона FR2 (*Англ. - Frequency Range 2*) до 52.6 - 71 ГГц с минимальными вносимыми изменениями в систему [1] [2], группа RAN проекта 3GPP уже исследовала требования для диапазона 52.6 - 114.25 ГГц [3]. Помимо этого, была также исследована возможность расширения частотного диапазона до миллиметровых волн 71-114 ГГц. Однако в этом диапазоне появляется такое ограничение, как нелинейный искажения, вызванные работой усилителя мощности (УМ). Несмотря на значительное продвижение в технологии разработки и проектирования УМ с использованием новых материалов, все ещё наблюдаются значительные нелинейные искажения сигнала при использовании стандартной мощности передатчика [4]. В данном диапазоне частот УМ может внести значительные искажения, кардинально снизив производительность системы. Это особенно заметно для высокоэффективных модуляций, например, 64-QAM и 256-QAM.

Данным эффектом искажения сигнала можно пренебречь в низких диапазонах частот, таких как FR1 и частично FR2. Рабочую точку УМ в этих диапазонах можно выбрать таким образом, что на выходе усилителя будет достигаться необходимая выходная мощность, и при этом УМ будет работать в линейной области своей характеристики, что минимизирует вносимые в передаваемый сигнал искажения.

Проблема искажения сигнала на высоких частотах наиболее актуальна при рассмотрении использования стандарта связи 5G NR в применении к технологии Интернета Вещей. В данном случае система имеет огромное количество небольших и простых передающих устройств, таких как датчики, сенсоры, а также прочие устройства, используемые для обеспечения тесно связанного окружения. Подобные элементы часто имеют низкокачественные передающие и усилительные цепи ввиду необходимости общей низкой стоимости прибора. Также данные устройства должны быть энергоэффективными и минимизировать общее потребление электроэнергии для возможности создания инфраструктуры из большого количества отдельных компонент. Эти факторы являются ключевыми при выборе метода компенсации вносимых нелинейных искажений, поскольку вспомогательная обработка на передатчике может внести дополнительные энергозатраты, нежелательные для дешевого, энергоэффективного

устройства.

Проблема компенсации нелинейных искажений, вносимых УМ, рассматривалась во многих работах, в том числе для низких диапазонов частот [5—11]. Рассматривались различные подходы, в основе которых лежали предварительное искажение (*Англ. - Pre-Distortion (PD), Digital Pre-Distortion (DPD)*) сигнала на передатчике с целью ”выпрямления” амплитудной характеристики усилителя. Однако такие методы требуют дополнительной сигнальной обработки на передатчике, что негативно влияет на энергоэффективность устройства. В основе другого метода лежит обработка сигнала на приемнике, когда принятый сигнал подвергается обработке на стороне принимающего устройства с целью компенсации искажений, внесенных на УМ передатчика. В качестве методов компенсации используют обратную характеристику УМ, статистические подходы для определения усредненного искажения и его дальнейшей компенсации, последовательный метод Монте-Карло и другие. Также важно отметить необходимость в определенных случаях знать на приемнике параметры УМ, который расположен на передатчике.

Также важно отметить, что характеристики УМ в миллиметровом диапазоне частот 100-200 ГГц значительно отличаются от характеристик усилителей в диапазоне 30-70 ГГц. На более высоких частотах, характеристики значительно хуже, это означает необходимость применения определенного метода компенсации искажения для повышения качества передачи информации.

В данной работе предлагается метод компенсации нелинейных искажений внесенных усилителем мощности на приемнике. Основа метода компенсации заключается в использовании обратной характеристики УМ, однако перед этим сигнал определенным образом обрабатывается. Предлагаемый метод может быть использован для разных типов сигналов (CP-OFDM, DFT-s-OFDM), в зависимости от рассматриваемой задачи. Также, в рамках данной работы были исследованы характеристики современных твердотельных УМ в миллиметровом диапазоне. На основе проведенного исследования, была создана модель для диапазона частот 100-200 ГГц, которая в дальнейшем использовалась в математическом моделировании для проверки работоспособности предлагаемого метода.

1 Описание искажений вносимых нелинейным усилителем мощности

Для описания искажения амплитуды и фазы при использовании твердотельных УМ широко используется модель Раппа (*Англ. - Rapp*) [12] [13]. Также существует модифицированная модель Раппа, приведенная в выражении 1. Данная модель УМ включена в список моделей в спецификации 3GPP [14].

$$F_{AM/AM}(x) = \frac{Gx}{\left(1 + \left|\frac{Gx}{V_{sat}}\right|^{2p}\right)^{1/2p}}, \quad F_{AM/PM}(x) = \frac{Ax^q}{\left(1 + \left(\frac{x}{B}\right)^q\right)}, \quad (1)$$

где $F_{AM/AM}$, $F_{AM/PM}$ - амплитудные и фазовые характеристики соответственно, G - КУ слабого сигнала, V_{sat} - амплитуда насыщения, p - показатель гладкости характеристики. Параметры A , B , q - параметры кривой искажения фазы.

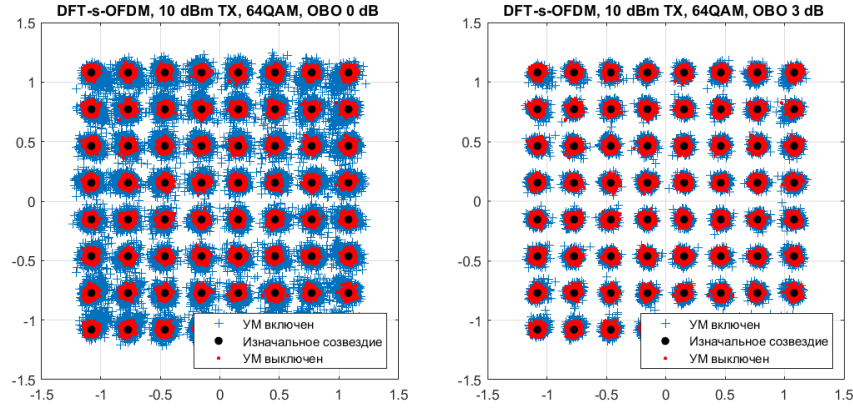


Рисунок 1.1 — Демонстрация искажения созвездий на приемнике в результате использования нелинейного УМ с выходной мощностью 10 dBm в LLS. На левом графике $OBO = 0$ dB, на правом - $OBO = 3$ dB.

На приемнике, в результате внесенных изменений наблюдаются искажения полученных созвездий. Пример таких искажений в случае использования сигнала DFT-s-OFDM при $P_{TX}^{dBm} = 10$ dBm, $OBO = 0, 3$ dB, $SNR = 30$ dB и использовании модуляции 64-QAM приведен на рис. 1.1. В качестве модели УМ использовалась модель Раппа 1, с параметрами приведенными в [15].

Сравниваются созвездия при выключенном (идеальном) УМ — красные точки, и при включенном УМ — синие кресты. Искажения совпадают с теоретически ожидаемыми, наблюдается увеличение общего разброса точек, а также централизованный сдвиг облаков в зависимости от амплитуды модуляции — чем больше амплитуда, тем больше искажение. Из приведенных графиков можно сделать вывод о прямом влиянии величины ОВО на степень искажения полученного сигнала. Чем меньше значение ОВО, тем ближе средняя мощность сигнала к точке насыщения, тем больше проявляется нелинейность, и тем больше искажается сигнал.

2 Обзор существующих методов борьбы с нелинейными искажениями усилителя мощности

На текущий момент были исследованы несколько основных подходов для компенсации нелинейных искажений, они разделяются на два основных направления — обра-

ботка на передатчике, либо приемнике.

2.1 Обработка сигнала на передатчике

Первый метод заключается в предварительном искажении сигнала перед подачей на УМ на передатчике. Сигналу придаются свойства, которые минимизируют влияние нелинейного искажения от УМ, эффективно "выпрямляя" его АХ. Существует множество вариантов обработки для данного подхода, однако многие из них имеют слабый эффект на общей производительности системы, а подход с применением предварительного искажения сигнала имеет низкую эффективность при низких значениях ИВО, при которой достигается максимальная эффективность усилителя [5] [6] [7]. Также, использование PD на передатчике нежелательно на малогабаритных устройствах, поскольку в таком случае увеличивается сложность устройства, объем сигнальной обработки и энергопотребление.

2.2 Обработка сигнала на приемнике

Второй основной подход заключается в компенсации нелинейных искажений на приемнике. Например, в работе [8] используется статистическая обработка принятого сигнала для определения степени искажения, на основе которой в дальнейшем производится компенсация. Многие работы [5; 6; 9—11; 16; 17] рассматривают теоретический подход для компенсации на приемнике в очень обобщенном случае. Несколько методов компенсации были предложены для OFDM сигнала [11; 16; 17], где влияние нелинейности представляется комплексным множителем, а также Гауссовой шумовой компонентой. Основной задачей в таком случае является определение параметров УМ (они могут быть как известны изначально, так и определены с помощью пилотных сигналов) для компенсации нелинейного искажения. Несколько методов были исследованы для сигнала SC с одной несущей (*Англ. - SC - Single Carrier*) [5; 6; 9; 10], в частности использовалась обратная характеристика УМ и последовательные методы Монте-Карло. В нескольких случаях [9—11], значения параметров УМ считаются известными на приемнике, что позволяет произвести компенсацию искажения. В случаях, когда параметры УМ оцениваются, производительность такая же либо хуже.

3 Краткое описание и содержание работы

В работе изучается влияние нелинейности УМ на производительность системы. Для описания работы усилителя использовалась модель Раппа для диапазона 30-70 ГГц. Также была разработана усредненная модель для диапазона 100-200 ГГц.

Использование нелинейного УМ приводит к значительным искажениям сигналов CP-OFDM и DFT-s-OFDM. В результате при декодировании принятого сигнала воз-

никают ошибки, понижающие эффективность работы системы. При использовании модели 100-200 ГГц искажения носят более сильный характер. Возникает необходимость компенсации внесенных искажений. Обработка возможна на передатчике или приемнике, однако для минимизации нагрузки на передающее устройство использование компенсации на приемнике предпочтительнее.

В работе описывается новый метод компенсации нелинейных искажений внесенных усилителем мощности на приемнике для двух типов сигнала - CP-OFDM и DFT-s-OFDM. Основа метода заключается в применении обработки, эквивалентной обработке на передатчике для переноса сигнала во временную область, где сигнал искажался усилителем, а также применении ограниченной обратной амплитудной характеристики усилителя на основе известных параметров для компенсации искажений. Рассматривается применение метода для различных типов сигнала.

4 Результаты

Усилитель и разработанный метод компенсации были реализованы в симуляторе канального уровня. В работе описываются результаты моделирования системы при различных параметрах (тип сигнала, модель усилителя, SCS, модуляция и другие) для оценки влияния нелинейности усилителя и эффективности предложенного метода. Пример полученных результатов для модели 30-70 ГГц приведен на рис. 4.1 и для модели 100-200 ГГц на рис. 4.2.

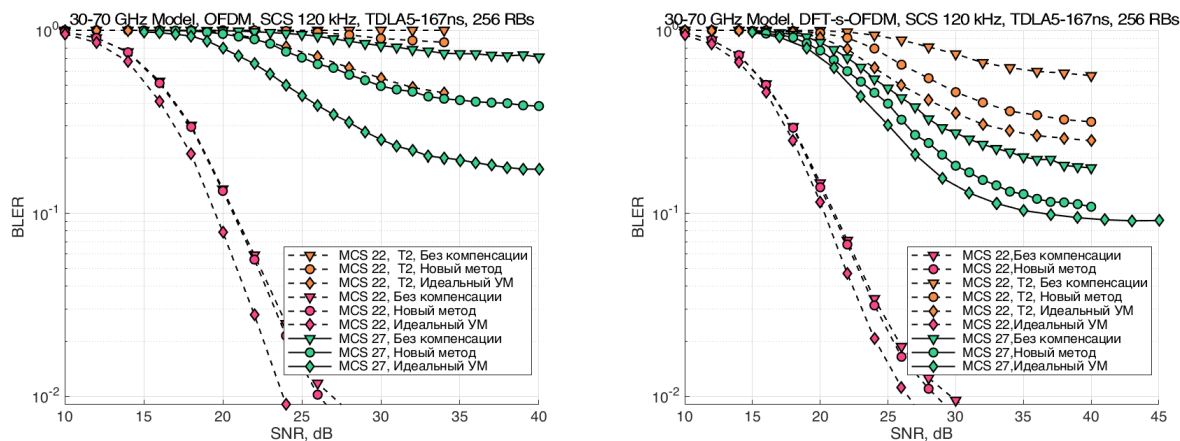


Рисунок 4.1 — BLER для SCS 120 кГц, 64-QAM/256 QAM для OFDM (слева) для DFT-s-OFDM(справа)

Для модели УМ в диапазоне 30-70 ГГц улучшение наблюдается в основном только для модуляций высокого порядка и при высоких значениях SCS. Однако можно наблюдать улучшение результатов — кривые BLER в случае компенсации смещаются на несколько dB по сравнению со случаем отсутствия компенсации. Для модели 100-200 ГГц, влияние нелинейности увеличивается, что связано с общим ухудшени-

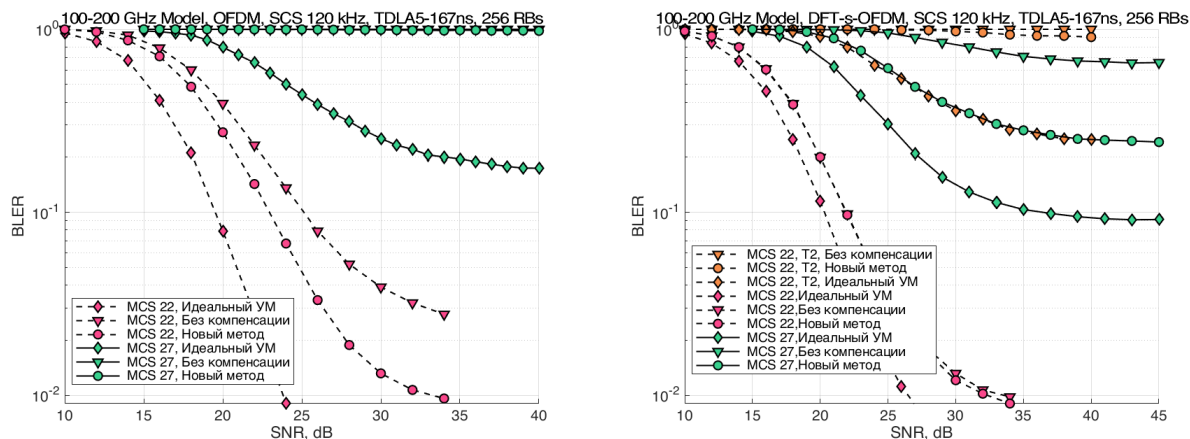


Рисунок 4.2 — BLER для SCS 120 кГц, 64-QAM/256 QAM для OFDM (слева) для DFT-s-OFDM(справа)

ем характеристик усилителя в данном диапазоне. В некоторых случаях, искажения настолько сильные, что восстановление информации практически невозможно.

Предложенный метод компенсации демонстрирует улучшение результата как для сигнала DFT-s-OFDM, так и для сигнала CP-OFDM. В большинстве случаев, при отсутствии эффекта насыщения кривой BLER, разработанный метод улучшает результат на несколько dB. Например, для сигнала OFDM SCS 120 кГц при MCS 22 рис. (4.2), компенсация улучшила результат на 2-3 dB.

Разработанный метод компенсирует искажения на стороне приемника, такой подход эффективен в системе с большим количеством простых, дешевых передатчиков с низким энергопотреблением, такой как инфраструктура IoT. Это позволит устройству передачи снизить общее потребление энергии, поскольку отсутствует необходимость в предварительной обработке сигнала на передатчике.

5 Заключение

В работе было изучено влияние искажений нелинейного усилителя на эффективность работы системы. Так же была разработана модель усилителя для диапазона 100-200 ГГц. Описан и протестирован метод компенсации искажений на приемнике, адаптируемый в зависимости от используемого сигнала. Метод продемонстрировал возможность улучшить результат работы системы для числа случаев, основное преимущество метода заключается в обработке на приемнике, что минимизирует нагрузку на передатчик.

Список литературы

1. *Intel Corporation*. New SID: Study on supporting NR from 52.6GHz to 71 GHz : tex. отч. / 3rd Generation Partnership Project (3GPP). — 12.2019. — RP—193259. — TSG RAN Meeting №86.
2. *Qualcomm*. New WID on extending current NR operation to 71 GHz : tex. отч. / 3rd Generation Partnership Project (3GPP). — 12.2019. — RP—193229. — TSG RAN Meeting №86.
3. *3GPP*. Study on NR beyond 52.6 GHz : Technical Report (TR) / 3rd Generation Partnership Project (3GPP). — 10.2019. — № 38.807. — Version 1.0.0.
4. A 120–150 GHz Power Amplifier in 28-nm CMOS Achieving 21.9-dB Gain and 11.8-dBm Psat for Sub-THz Imaging System / J. Zhang, T. Wu, L. Nie, S. Ma, Y. Chen, J. Ren // IEEE Access. — 2021. — Т. 9. — С. 74752—74762. — DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3080710.
5. *Sharath M.* Analysis and Compensation of Power Amplifier Distortions in Wireless Communication Systems : PhD thesis / Sharath Manjunath. — 2015. — Electronic Thesis and Dissertation Repository.
6. *Shabany M., Gulak P. G.* Efficient Compensation of the Nonlinearity of Solid-State Power Amplifiers Using Adaptive Sequential Monte Carlo Methods // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. — 2008. — Т. 55, № 10. — С. 3270—3283. — DOI: 10.1109/TCSI.2008.925376.
7. Adaptive Compensation of Nonlinearity in High Power Amplifier by Support Vector Machine / T. Eda, T. Ito, H. Ohmori, A. Sano // IFAC Proceedings Volumes. — 2001. — Т. 34, № 14. — С. 243—248. — ISSN 1474-6670. — DOI: [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)41629-6](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)41629-6). — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667017416296> ; IFAC Workshop on Adaptation and Learning in Control and Signal Processing (ALCOSP 2001), Cernobbio-Como, Italy, 29-31 August 2001.
8. *Ermolaev G. A., Bolkhovskaya O. V., Maltsev A. A.* Advanced Approach for TX Impairments Compensation Based on Signal Statistical Analysis at the RX Side // 2021 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). — 2021. — С. 1—5. — DOI: 10.1109/WECONF51603.2021.9470687.
9. *Bhat S., Chockalingam A.* Compensation of power amplifier nonlinear distortion in spatial modulation systems // 2016 IEEE 17th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). — 2016. — С. 1—6. — DOI: 10.1109/SPAWC.2016.7536802.

10. *Qi J., Aissa S.* Analysis and Compensation of Power Amplifier Nonlinearity in MIMO Transmit Diversity Systems // IEEE Transactions on Vehicular Technology. — 2010. — T. 59, № 6. — C. 2921—2931. — DOI: 10.1109/TVT.2010.2049594.
11. Receiver Cancellation Technique for Nonlinear Power Amplifier Distortion in SDMA-OFDM Systems / F. Gregorio, S. Werner, T. I. Laakso, J. Cousseau // IEEE Transactions on Vehicular Technology. — 2007. — T. 56, № 5. — C. 2499—2516. — DOI: 10.1109/TVT.2007.899965.
12. *Rapp C.* Effects of HPA-nonlinearity on 4-DPSK/OFDM-signal for a digital sound broadcasting system //. — 10.1991. — C. 179—184.
13. Comparison of Power Amplifier Non-Linearity Impact on 60 GHz Single Carrier and OFDM Systems / A. Maltsev, A. Lomayev, A. Khoryaev, A. Sevastyanov, R. Maslennikov // 2010 7th IEEE Consumer Communications and Networking Conference. — 2010. — C. 1—5. — DOI: 10.1109/CCNC.2010.5421601.
14. 3GPP. Study on new radio access technology: Radio Frequency (RF) and co-existence aspects : Technical Report (TR) / 3rd Generation Partnership Project (3GPP). — 09.2017. — № 38.803. — Version 14.2.0.
15. *Nokia.* Realistic power amplifier model for the New Radio evaluation : тех. отч. / 3rd Generation Partnership Project (3GPP). — 05.2016. — R4—163314. — TSG-RAN WG4 Meeting №79.
16. Receiver Technique for Detection and Correction of Nonlinear High Power Amplifier Distortion Errors in OFDM Systems / H. Bouhadda, R. Zayani, H. Shaiek, D. Roviras, R. Bouallegue // 2015 IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring). — 2015. — C. 1—5. — DOI: 10.1109/VTCSpring.2015.7146044.
17. Receiver based compensation of nonlinear distortion in MIMO-OFDM / P. Drotar, J. Gazda, M. Deumal, P. Galajda, D. Kocur // 2010 IEEE International Microwave Workshop Series on RF Front-ends for Software Defined and Cognitive Radio Solutions (IMWS). — 2010. — C. 1—4. — DOI: 10.1109/IMWS.2010.5440998.