

УДК 621.382.3

К ВОПРОСУ ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ДИНАМИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА SDR-ПРИЕМНИКА

К. т. н. К. Я. Мамедов, В. В. Корна, А. А. Пухов

Одесский национальный политехнический университет
Украина, г. Одесса
ya.neoroznanui@yandex.ua

Показано, что концепция определения динамического диапазона цифрового приемника по параметру IP_3 некорректна. Предложен простой универсальный способ определения динамического диапазона цифровых SDR-устройств.

Ключевые слова: АЦП, интермодуляционные искажения, динамический диапазон, гармонические составляющие.

Актуальным направлением развития современных телекоммуникационных систем является применение технологии Software Defined Radio (SDR). SDR представляют собой приемо-передающие устройства, свойства которых определяются программными методами. Одним из основных параметров, характеризующих качество таких устройств, является динамический диапазон по интермодуляционным составляющим 3-го порядка (ДД₃).

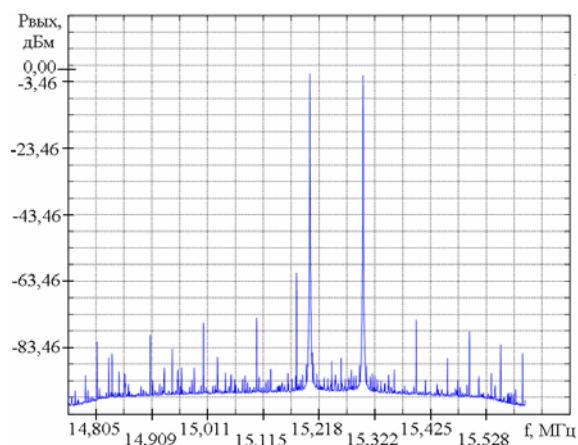
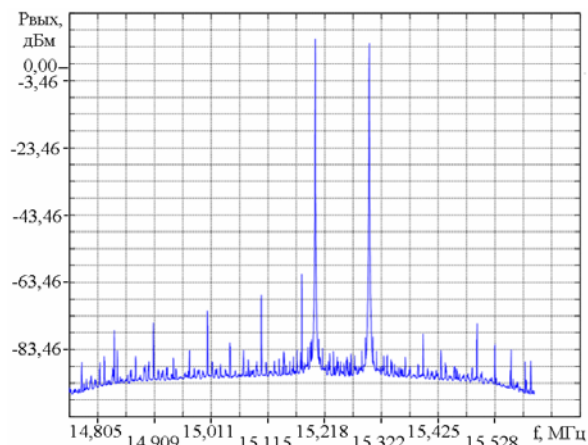
Целью исследований является разработка метода определения ДД₃ применительно к SDR-аппаратуре.

Для этого были проведены измерения интермодуляционных искажений, возникающих в тракте радиоприемного устройства типа USRP1 с 12-разрядным аналого-цифровым преобразователем (АЦП) типа AD9862 и прямой оцифровкой сигнала.

При этом исследования проводились по методу, применяемому для определения интермодуляционных искажений аналоговых приемников [1].

Уровни двух входных гармонических сигналов с частотами $f_1 = 15,2$ МГц и $f_2 = 15,3$ МГц изменялись, в соответствии с паспортными данными АЦП, в диапазоне от 100 до 850 мВ. При максимальных амплитудах уровни интермодулирующих сигналов заведомо выходили за верхнюю границу динамического диапазона АЦП. Шаг изменений входного сигнала был выбран равным 100 мВ.

В процессе эксперимента проводились измерения динамического диапазона по интермодуляционной составляющей третьего и высших порядков, а также фазовых шумов. Результаты измерений в виде спектрограмм изображены на рис. 1—3.

Рис. 1. Спектрограмма при $U_{вх} = 200$ мВРис. 2. Спектрограмма при $U_{вх} = 700$ мВ

Из спектрограмм на рис. 1, 2 видно, что характер распределения спектральных составляющих (возникновение новых комбинационных составляющих) при изменении уровней входных сигналов от 100 до 700 мВ не меняется. Следует отметить, что даже при малых амплитудах входных сигналов, уровень интермодуляционных составляющих третьего порядка (ИМС3) достигает -75 дБм, что ограничивает динамический диапазон приемника снизу.

Значительный рост комбинационных составляющих наблюдается при амплитудах входных сигналов выше 700 мВ. В последнем случае АЦП действует в качестве жесткого ограничителя, поэтому на спектрограмме наблюдается появление интермодуляционных составляющих ИМС3, ИМС5, ИМС7 значительных амплитуд, а также других комбинационных продуктов меньших уровней (рис. 3). Возрастание искажений, обусловленных амплитудным ограничением АЦП, наглядно видно на участке III, рис. 4.

Заметный уровень интермодуляционных составляющих третьего порядка наблюдается также и при меньших входных сигналах (участок II, рис. 4). Этот эффект объясняется проявлением дифференциальной нелинейности передаточной функции АЦП. Такая нелинейность АЦП порождает гармоники и комбинационные составляющие, которые зависят не только от амплитуды сигнала, но и от положения участка дифференциальной нелинейности на передаточной функции АЦП.

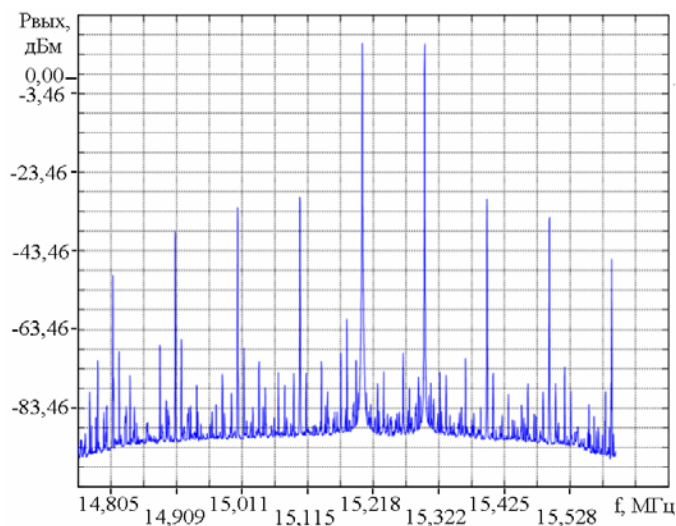


Рис. 3. Спектрограмма при $U_{\text{вх}} = 800$ мВ

Приведенные выше спектрограммы, соответствующие различным амплитудам входного сигнала (рис. 1—3), позволяют оценить динамический диапазон d_3 USRP-приемника. Однако следует отметить, что значение d_3 не является универсальной обобщающей характеристикой, как, например, параметр IP_3 .

Известно, что для аналоговых радиоприемников, а также усилителей радиопередатчиков параметр «точка пересечения третьего порядка» (IP_3) является одним из важнейших параметров, характеризующих динамический диапазон ДД₃ радиоаппаратуры связи. Методика определения этого параметра регламентирована в Рекомендациях МСЭ-R SM.1134-1 [2]. Однако концепция определения показателя качества с помощью параметра IP_3 неприменима к радиоприемным устройствам (РПУ), построенным на основе SDR-технологий. Это связано с тем, что одним из основных узлов SDR-устройств, включая USRP1 РПУ, определяющих величину динамического диапазона радиоэлектронного устройства, является АЦП. В случае, когда входные сигналы превышают его ДД, АЦП действует в качестве жесткого ограничителя сигналов. Это приводит к резкому возрастанию уровней интермодуляционных составляющих третьего порядка и других комбинационных компонент.

Для сигналов, которые значительно меньше, чем предельно допустимые значения на входе АЦП, уровень ИМС3 остается постоянным (участок I, рис. 4).

Передаточная характеристика АЦП, в итоге, является определяющей при формировании проходной характеристики приемника USRP1.

Результирующий график экспериментальной зависимости уровня интермодуляционных составляющих ИМСЗ от уровня двух гармонических сигналов на входе USRP1-приемника показан на рис. 4.

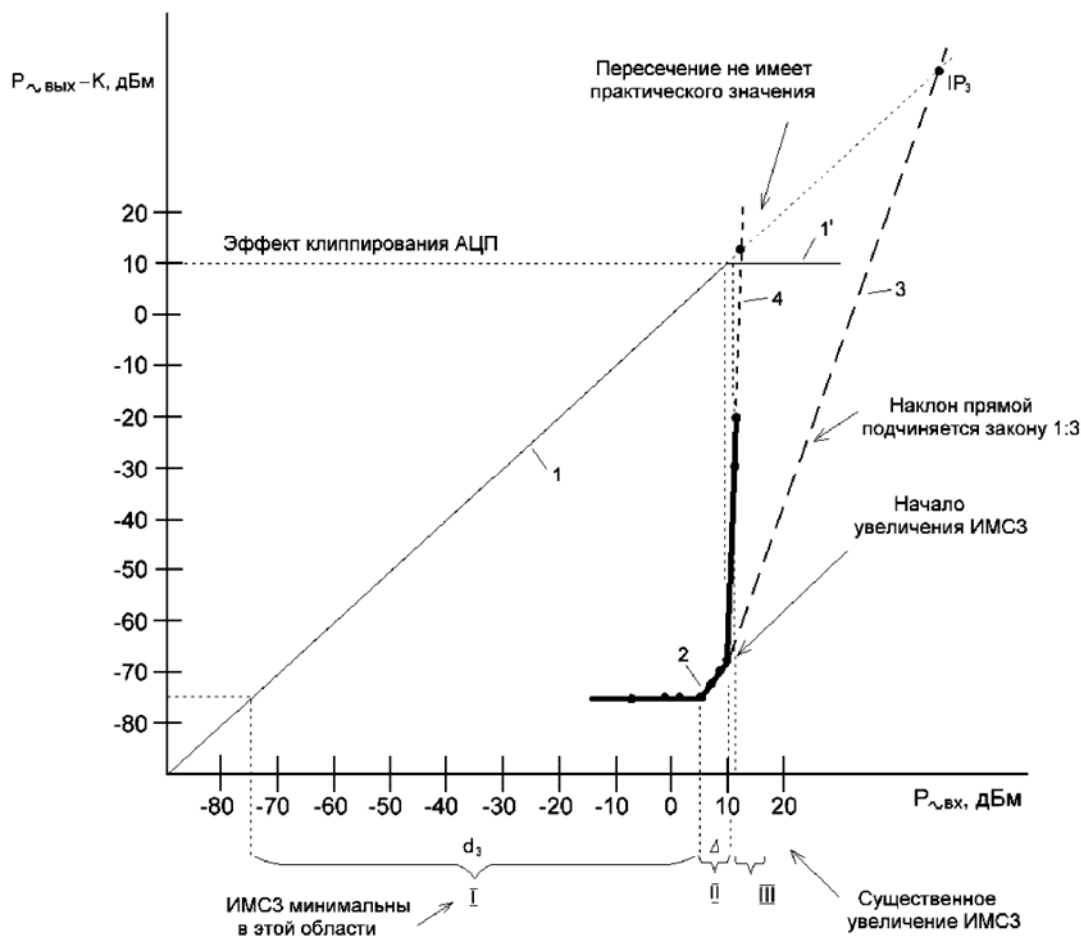


Рис. 4. Экспериментальный график динамического диапазона по ИМСЗ USRP1-радиоприемника

Здесь I — идеализированная передаточная характеристика USRP1-приемника, построенная с учетом коэффициента усиления K ;

I' — прямая жесткого ограничения в АЦП, которая формирует область III, где возникают большие интермодуляционные искажения;

2 — линия, представляющая характеристику динамического диапазона по ИМСЗ при различных амплитудах входного сигнала, которая разделяет режимы работы приемника на три области:

I область, где d_3 — динамический диапазон, определяется характеристиками АЦП;

II область, где Δ — динамический диапазон, определяется свойствами АЦП и аналоговых каскадов (усилителей высокой и промежуточной частот, преобразователей частот) при воздействии сигналов высокого уровня.

III область, где наблюдается клиппирование входного сигнала и существенное возрастание ИМСЗ.

В области I для низкого уровня входных сигналов компоненты ИМСЗ остаются относительно постоянными и находятся в пределах -75 дБ.

В области II увеличение входных сигналов приводит к заметному увеличению ИМСЗ на выходе. В этой области динамический диапазон уменьшается с -75 дБ до -65 дБ при увеличении уровня входного сигнала на 5 дБ. То есть, в отличие от аналоговых приемников, наблюдается рост уровня ИМСЗ по закону 1:2 от амплитуды входного сигнала.

В области III, начиная с амплитуд $U_{\text{вх}} = 700$ мВ ($P_{\sim\text{вх}} = 9,91$ дБм при $R = 50$ Ом) входных сигналов, приближающихся к предельно допустимым значениям по входу АЦП, интермодуляционные искажения существенно возрастают. Так, например, при $U_{\text{вх}} = 850$ мВ (при $P_{\sim\text{вх}} = 11,59$ дБм, $R = 50$ Ом) уровни ИМСЗ увеличиваются до -20 дБ относительно интермодулирующих сигналов. Это связано с эффектом жесткого клиппирования сигнала во входных цепях АЦП.

Пунктирная прямая 3, имеющая гипотетический характер, отображает экстраполяцию характеристики по продуктам интермодуляции третьего порядка для аналоговых приемников. Наклон пунктирной линии 3 подчиняется закону 1:3. Прямая 4 характеризует катастрофический рост ИМСЗ из-за жесткого ограничения сигнала в АЦП.

Сравнение хода прямых 3 и 4 указывает, что возрастание ИМСЗ от изменения уровня входных сигналов в SDR-приемниках, в отличие от аналоговых устройств, не подчиняется кубическому закону. По этой причине параметр IP_3 не может однозначно характеризовать линейность SDR-приемника.

Для объективной оценки интермодуляционных искажений в SDR-устройствах следует использовать параметр $ДД_3$, рассчитанный при таких значениях амплитуд входных сигналов, когда уровень ИМСЗ составит -20 дБ относительно интермодулирующих компонент. В большинстве случаев при таком уровне ИМСЗ искажения полезного сигнала еще не превышают допустимой величины.

Таким образом, учитывая симметрию построения графика (рис. 4) по осям координат, нами предлагается определять динамический диапазон SDR-приемника, используя соотношение $ДД_3 = d_3 + \Delta$. В исследуемом нами USRP1 приемнике аналоговые каскады отсутствуют, поэтому величина Δ зависит от свойств применяемого АЦП типа AD9862.

Экспериментально измеренное значение динамического диапазона USRP1 составило $ДД_3 = 75 + 7 = 82$ дБ.

Предложенный простой универсальный способ определения динамического диапазона SDR-радиоприемников можно применять не только в устройствах с прямой оцифровкой сигнала, но также для цифровых устройств, в которых сигнал обрабатывается на некоторой промежуточной частоте.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. ГОСТ Р 52016-2003. Приемники магистральной радиосвязи гектометрового-декаметрового диапазона волн. Параметры. Общие технические требования и методы измерений.
2. МСЭ-R SM.1134-1. Расчет интермодуляционных помех в сухопутной подвижной службе.

К. Ya. Mamedov, W.W. Korna, A. A. Pukhov

On the issue of determination of the SDR receiver dynamic range.

It is shown that the concept of determination of the digital receiver dynamic range by the IP_3 parameter is incorrect. The authors propose a simple versatile way to determine the dynamic range of digital SDR devices.

Keywords: *ADC, intermodulation distortion, dynamic range, harmonic components.*