

УДК 621.396:61

КОРРЕЛЯЦИОННАЯ ОЦЕНКА УРОВНЯ ИНТЕРМОДУЛЯЦИОННЫХ ИСКАЖЕНИЙ СВЧ-СИГНАЛОВ В УСИЛИТЕЛЯХ МОЩНОСТИ

Л. А. Белов, профессор Национального исследовательского университета «МЭИ», к.т.н.; belovla@gmail.com

А. С. Кондрашов, заместитель начальника отдела ОАО «Российские космические системы», к.т.н.; ak-rks@mail.ru

С. В. Петушков, старший инженер ОАО «Российские космические системы», mudvaayne07@list.ru

Рассматриваются вопросы оценки уровня интермодуляционных искажений при усилении сигналов СВЧ-диапазона в радиопередающих устройствах наземных и спутниковых ретрансляторов, базовых станций и клиентских терминалов сотовой радиосвязи. Сопоставляются критерии оценки этих искажений, показано, что имеется существенная разница в количественных значениях. Проводится анализ причин таких расхождений. Предложен корреляционный метод измерения интермодуляционных искажений, дающий более точные результаты и требующий меньших вычислительных ресурсов.

Ключевые слова: усилитель мощности, пик-фактор, интермодуляционные искажения, распределение амплитуд, амплитудная компрессия, амплитудно-фазовая конверсия.

Введение. Усиление мощности сигналов СВЧ-диапазона в радиопередающих устройствах наземных и спутниковых ретрансляторов, базовых станций и клиентских терминалов сотовой радиосвязи сопровождается появлением интермодуляционных искажений (ИМИ) в рабочей полосе частот и возрастанием уровня мешающих излучений в примыкающих полосах частот, нарушающих требования электромагнитной совместимости (ЭМС) [1]. Для выполнения нормативов ИМИ и ЭМС снижают выходную мощность на 6–8 дБ по сравнению с энергетически эффективным режимом насыщения, а также применяют линейризацию каскадов усилителей мощности (УМ) [2–3].

Использование радиосигналов с повышенной информационной насыщенностью в заданной полосе частот и увеличенным пик-фактором мощности приводит к ужесточению противоречия между энергетической и спектральной эффективностью радиопередающих устройств, включая требования ЭМС. Для измерения уровня ИМИ применяют критерии, которые дают существенные различия в количественных оценках.

Цель работы — анализ причин таких расхождений и разработка способов более точных измерений ИМИ.

Модели сигналов и усилителя мощности. Простейшей является оценка искажений [1] по двухтоновому тестовому сигналу

$$u_{2T}(t) = U_{2T}[\sin(2\pi f_1 t) + \sin(2\pi f_2 t)], \quad (1)$$

где U_{2T} — амплитуда каждого из синусоидальных входных сигналов; f_1 и f_2 — их близко расположенные частоты. Средняя мощность сигнала (1) на сопротивлении $R_{вх}$ составляет $P_{2Tcp} = (U_{2T})^2/R_{вх}$; его усредненная за период несущей частоты мощность пульсирует с разностной частотой $F_p = f_2 - f_1$ по закону

$$P_{2T}(t) = P_{2Tcp}[1 + \cos(2\pi F_p t)]. \quad (2)$$

В соответствии с (2) значение пик-фактора мощности (Peak-to-Average Power Ratio — PAPR) сигнала составляет $\Pi_2 = 2$.

Критерием оценки ИМИ по двухтоновому тесту $IM_{2T} = 10\lg(I_3/C)$ служит выраженное в децибелах отношение суммарной мощности I_3 интермодуляционных составляющих 3-го порядка с частотами $2f_1 - f_2$ и $2f_2 - f_1$ к суммарной мощности C этого сигнала на частотах f_1 и f_2 в выходном сигнале УМ (рис. 1, а).

В качестве тестового используют также многочастотный или стандартизованный шумовой сигналы с измерительной зоной в середине рабочей полосы частот [4] (Noise Power Ratio — NPR). В качестве критерия уровня ИМИ по этой методике используют выраженное в децибелах отношение спектральной плотности мощности (СПМ) шума

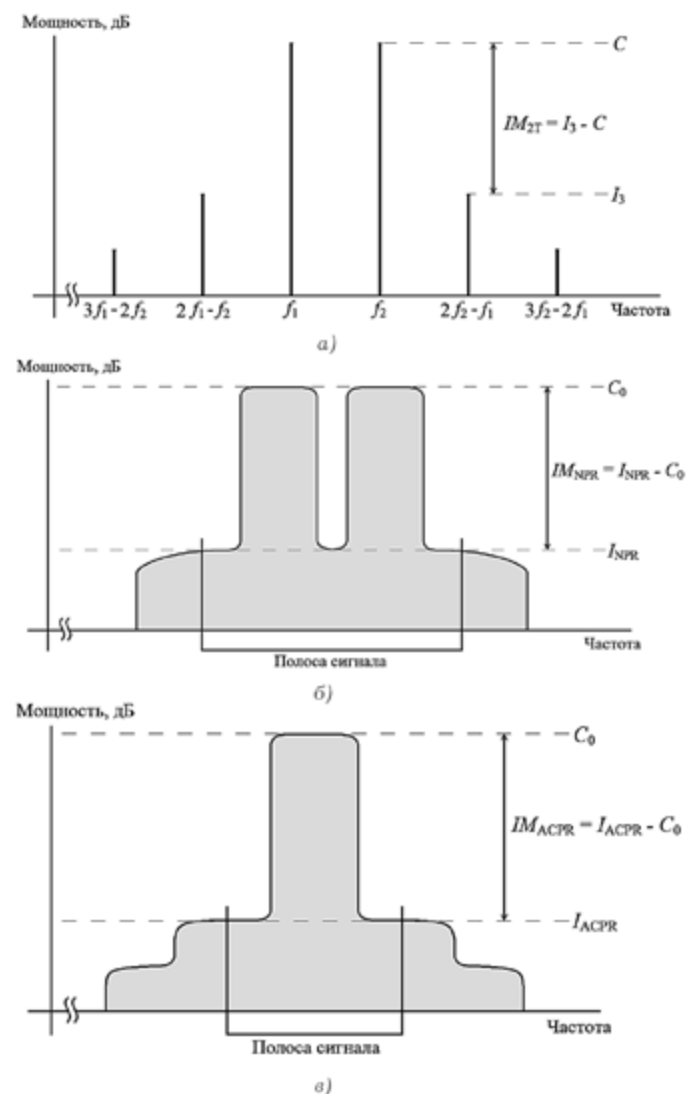


Рис. 1

в измерительной зоне I_{NPR} к СПМ сигнала C_0 в основной полосе частот (рис. 1, б).

Для рабочих сигналов со сплошным полосовым спектром применяют критерий ИМИ в виде относительного уровня мощности в боковой полосе частот (Adjacent Channel Power Ratio — АСРR) $IM_{АСРR} = 10 \lg (I_{АСРR}/C_0)$ — отношение $I_{АСРR}$ средней СПМ сигнала в боковых полосах к СПМ сигнала C_0 в основной полосе частот (рис. 1, в).

Перечисленные критерии являются частотными. При их применении, кроме выполнения вычислительных задач преобразования Фурье с высоким разрешением, необходимо решать вопросы: а) суммирования малых мешающих мощностей в верхней и нижней (по отношению к рабочей) полосах частот. Это характерно для УМ, в которых заметно проявляется амплитудно-фазовая конверсия; б) учета искажений 5-го, 7-го и т.д. порядков; в) влияния перераспределения мощности сигнала в частотные полосы кратных частот и в базовую полосу.

Для учета нелинейных инерционных преобразований сигнала в УМ будем использовать характеристики амплитудной компрессии и амплитудно-фазовой конверсии (АМ/ФМ) для комплексных огибающих входного сигнала [5] (рис. 2) в виде:

$$\begin{aligned} G(U_{вх}) &= 2U_{вх}/(1 + U_{вх}^2); \\ \Psi(U_{вх}) &= c U_{вх}^2/(1 + d U_{вх}^2), \end{aligned} \quad (3)$$

где $U_{вх} = \sqrt{P_{вх}/P_{вх\text{нас}}}$ — нормированная к значению при насыщении амплитуда входного сигнала; $P_{вх}/P_{вх\text{нас}} = IBO$ — нормированная к значению в точке насыщения входная мощность (Input Power Back-Off); $G(U_{вх}) = \sqrt{P_{вых}/P_{вых\text{нас}}}$; $P_{вых}/P_{вых\text{нас}} = OBO$ — нормированная к значению в точке насыщения выходная мощность (Output Power Back-Off); $\Psi(U_{вх})$ — амплитуднозависимый фазовый сдвиг; c и d — параметры АМ/ФМ преобразования, $|c| < \pi/2$.

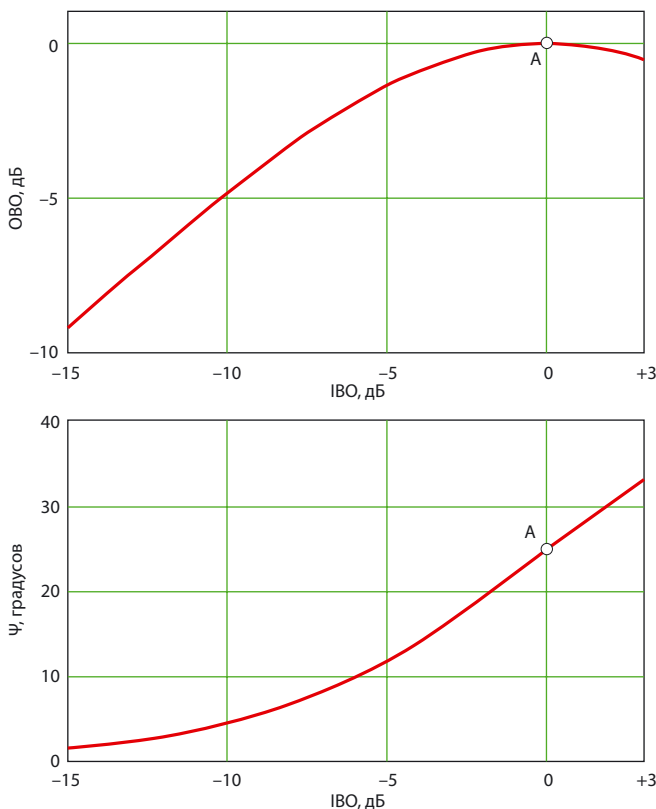


Рис. 2

Характеристики, показанные на рис. 2, соответствуют УМ СВЧ на лампе бегущей волны при $c = \pi/4$ рад, $d = 1$, А — точка насыщения. Для твердотельных УМ характеристику $G(U_{вх})$ можно использовать на монотонном участке $U_{вх} \leq 1$ и принять $G(U_{вх}) = 1$ для $U_{вх} > 1$, а в $\Psi(U_{вх})$ положить $c < 0$.

Сопоставление оценок ИМИ. Для сопоставления оценок уровня искажений наряду со стандартизованными тестовыми используем: а) сигнал с четырехпозиционной фазовой манипуляцией ФМ4 по закону псевдослучайной М-последовательности со сглаживанием фронтов информационных символов по Найквисту [6] ($\alpha = 0,35$); б) сигнал с ортогональным 10-частотным мультиплексированием OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) при псевдослучайной бинарной фазовой манипуляции в каналах [7]. Такие сигналы близки по статистическим свойствам к сигналам спутниковой и мобильной связи, спутникового цифрового телевидения по протоколам IEEE 802.11 (WiFi), IEEE 802.16 (WiMax), DVB-SH (цифровое спутниковое телевидение), 3GPP LTE (мобильная связь 4G). Предполагаем, что занимаемая сигналами полоса частот мала по сравнению с несущей частотой f_0 .

На рис. 3 показаны полученные имитационным моделированием частотные спектры указанных сигналов на выходе УМ при одинаковом снижении средней выходной мощности по сравнению с мощностью насыщения до $OBO = -3$ дБ и $|c| < 0,1$ в зависимости от нормированной расстройки относительно несущей частоты $(f - f_0)T$, где T — длительность информационного бита. При таком же значении $OBO = -3$ дБ оценка ИМИ при двухтоновом сигнале составляет -16 дБ, а при соответствующем сигнале по NPR-

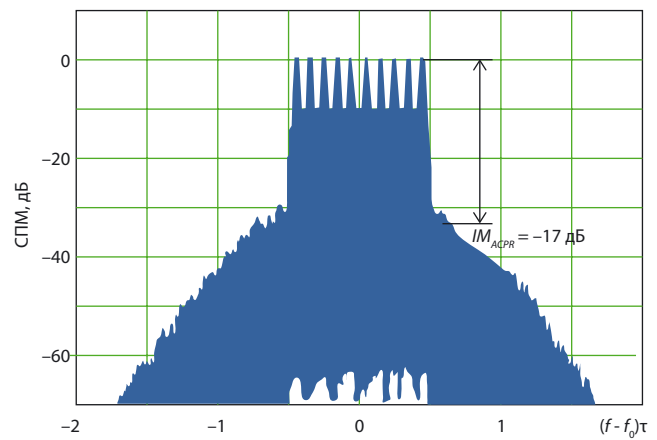
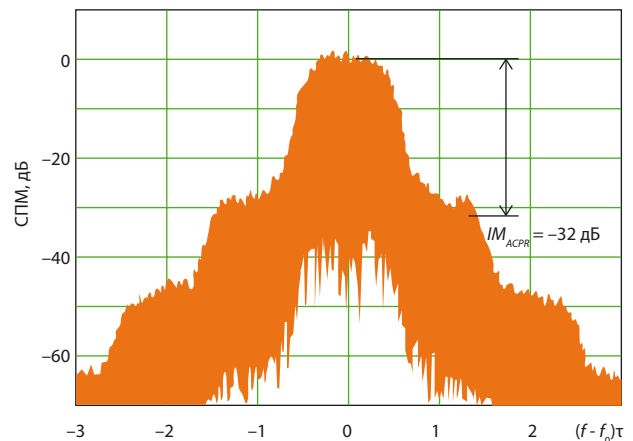


Рис. 3

методике равна -21 дБ. Подобные результаты получаются при учете заметной АМ/ФМ конверсии.

Из анализа представленных результатов следует, что причиной расхождения количественных оценок уровня ИМИ по нескольким стандартизованным в определенных условиях методикам при одинаковом запасе по ОВО является существенное различие в характере построенных на рис. 4 функций плотности распределения вероятности (ПРВ) амплитуд входного сигнала. Для двухтонового входного сигнала аналитическое выражение для ПРВ амплитуд имеет вид

$$w_{2T}(U_{\text{вх}}) = 1/\pi[1 - (2U_{\text{вх}}/\pi)^2]^{1/2}.$$

Зависимости на рис. 4 показывают, что при одинаковом математическом ожидании графики ПРВ амплитуд для сигналов ФМ4 и OFDM имеют значительную дисперсию по сравнению с двухтоновым сигналом. Причем при нелинейных характеристиках УМ вида (3) вариации амплитуды, превышающие среднюю, приводят к заметному увеличению ИМИ при одинаковом ОВО. Важно отметить, что только значение пик-фактора мощности сигнала PAPR не может дать достоверной оценки уровня ИМИ, так как не учитывает закон распределения ПРВ амплитуд.

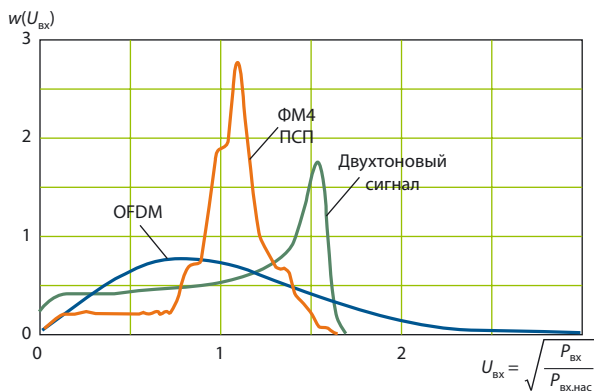


Рис. 4

Корреляционный критерий уровня искажений. Для уточнения и упрощения процедуры автоматизированного измерения уровня искажений без применения двухтонового теста предлагается вычислять максимальное значение R_{12} нормированного коэффициента взаимной корреляции отсчетов входного $u_{\text{вх}}(n)$ и выходного $u_{\text{вых}}(n+m)$ сигналов в моменты дискретизации $t = nT_d$ при компенсации временного запаздывания на время $\tau_{\text{зап}}(m) = mT_d$ между ними:

$$R_{12}(m) = \sum_{n=-N}^N \frac{u_{\text{вх}}(n)u_{\text{вых}}(n+m)}{[u_{\text{вх}}]^2 [u_{\text{вых}}]^2}, \quad (4)$$

где T_d — период дискретизации; N — количество учитываемых отсчетов; $[u_{\text{вх}}]$, $[u_{\text{вых}}]$ — нормы массивов отсчетов входного $u_{\text{вх}}(n)$ и выходного $u_{\text{вых}}(n+m)$ сигналов. Оценку уровня ИМИ по корреляционному критерию находят как отклонение коэффициента взаимной корреляции от единичного значения $IM_{\text{корр}} = 20 \lg [1 - \max_m R_{12}]$. На рис. 5 приведены графики значений $IM_{\text{корр}}$ в зависимости от ОВО для указанной выше модели.

Корреляционный критерий учитывает компоненты искажений, которые в частотных версиях игнорировались, так как соответствовали кратным частотам и базовой полосе. Расчет по этому критерию выполняется быстрее, чем по частотным критериям, поскольку не требует выполне-

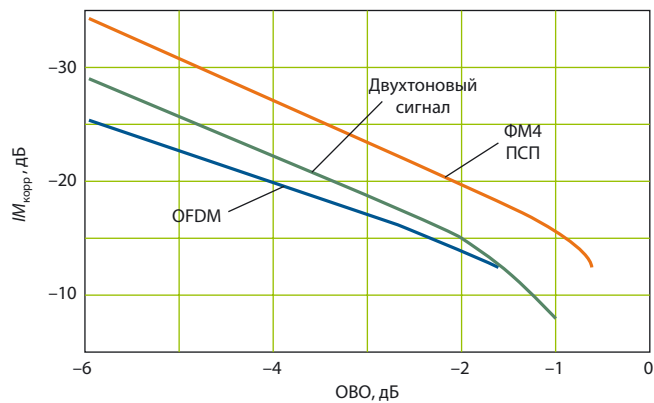


Рис. 5

ния многоточечного преобразования Фурье, может производиться [8] в автоматизированном режиме по текущему потоку передаваемой информации.

Рассмотрение графиков на рис. 5 показывает, что при заданном типе сигнала и допустимом уровне ИМИ имеется возможность повысить энергетическую эффективность УМ, работая в режимах, приближающихся к насыщению. Модуляция типа ФМ4 со сглаживанием по Найквисту обеспечивает получение на 1,5–2 дБ более высокой выходной мощности по сравнению с OFDM при одинаковом уровне ИМИ.

Заключение. При выборе режима работы усилителя мощности для достижения его наибольшей энергетической эффективности при допустимом уровне нелинейных искажений необходимо учитывать не пик-фактор усиливаемого сигнала, а функцию распределения вероятности его амплитуд. В качестве критерия оценки интермодуляционных искажений целесообразно использовать корреляционный метод, который дает более точные результаты и требует меньших вычислительных ресурсов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Pedro J. C., Carvalho N. B.** The Intermodulation Distortion in Microwave and wireless circuits.— Boston — London, Artech House, 2003.— 437 p.
2. **Wood J.** Behavioral Modeling and Linearization of RF Power Amplifiers.— Boston — London, Artech House, 2014.— 360 p.
3. **Wang Z.** Envelope Tracking Power Amplifiers for Wireless Communications.— Boston — London, Artech House, 2014.— 362 p.
4. Measurement Procedure for Noise Power Ratio / Standards Society of Cable Telecommunications Engineers — SCTE 1192011 [электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.scte.org> (дата обращения 20.07.2014).
5. **Белов Л. А., Кондрашов А. С., Петушков С. В.** Оценка уровня интермодуляционных искажений сложного СВЧ-сигнала в усилителе мощности с учетом его амплитудного распределения / Сб. трудов науч.-техн. конф. «СИНХРОИНФО-2014».— С. 60–64.
6. **Мартыросов В. Е.** Теория и техника приема дискретных сигналов ЦСПИ.— М.: Радиотехника, 2005.— 138 с.
7. **Назаров Л. Е., Зудилин А. С.** Оценка мощности интермодуляционных помех для сигналов с ортогональным частотным мультиплексированием.— М.: ИРЭ РАН // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jul11/2/text.pdf>.— 2011.— № 7.— С. 1–13 (дата обращения 20.07.2014).
8. Патент РФ 128426, U1, МПК H04B 7/005. Радиопередающее устройство с адаптивной коррекцией линейности / Л. А. Белов, А. С. Кондрашов, М. А. Немаев, К. В. Ромашенко. Приоритет от 27.12.2012.