#### УДК 621.3.018.783

Н.Н. Воронин, А.Ю. Абраменко, Г.Г. Гошин

# Измерительный комплекс для анализа искажений, возникающих при прохождении полосовых сигналов через нелинейные устройства

Представлены итоги разработки и экспериментального тестирования измерительного комплекса, позволяющего анализировать искажения, возникающие при прохождении полосовых сигналов через нелинейные устройства. Приведены экспериментальные данные, полученные для двух видов зондирующих сигналов, а также перспективы развития комплекса и программного обеспечения к нему.

Ключевые слова: полоса сигнала, усилитель, векторный генератор, преобразование Фурье.

В последнее время широкое распространение получила беспроводная передача данных, увеличились скорость и объёмы передачи. Всё это вызвало усложнения информационных сигналов, а соответственно и возрастающих требований к передающему и приёмному трактам. Произошёл переход от ламповых усилителей к усилителям на транзисторах, от аналоговых сигналов – к цифровым.

В любом передающем тракте используются нелинейные устройства, такие как усилители, смесители и умножители. При прохождении сигналов через эти устройства возникают нелинейные искажения информационного сигнала, а именно обогащение спектра за счёт интермодуляционных составляющих и появления гармонических составляющих, кратных несущей частоте. Всё это приводит к ухудшению качества передачи сигнала и уменьшению возможности использования сигналов, несущих больший объём информации, но при этом менее защищённых от различных искажений. Эта проблема заставляет обратить на неё внимание. Разработаны различные подходы для измерения и анализа нелинейных искажений сигналов, например: «горячие» S-параметры [1], Load-Pull-измерения [2], X-параметры [3]. Данные методы имеют свои недостатки и сложности при их аппаратной реализации. Основным недостатком названных методик является то, что зондирующие сигналы в них далеки от тех сигналов, с которыми устройство будет работать в реальности, что не позволяет в полной мере оценить поведение устройства.

Теоретические предпосылки. Ввиду несовершенства используемых в настоящий момент методов возникает необходимость построения измерительного комплекса, использующего в качестве зондирующего сигналы, близкие к реальным, что даст возможность в полной мере оценить поведение нелинейных устройств в рабочем режиме. Отсюда вытекает необходимость применения векторного генератора для создания сигналов с цифровыми видами модуляции (PSK, QAM и т.д.).

Помимо уже давно привычных характеристик нелинейности устройства, таких как точка компрессии на 1 дБ, точка пересечения с гармоникой третьего порядка (IP3), применение нашли упомянутые ранее, более детальные методы характеризации нелинейных устройств: «горячие» S-параметры, Load-Pull-измерения, Х-параметры. Основным недостатком «горячих» S-параметров является их узкая применимость и во многих случаях высокий уровень неточности. Load-Pull-измерения позволяют оценить поведение нелинейного устройства при изменении рабочей точки, т.е. для различных нагрузочных кривых. Но при этом не позволяют оценить сами нелинейные искажения, возникающие при прохождении через устройство. Х-параметры, среди приведённых методов, наиболее полно отражают нелинейные искажения, возникающие при прохождении через нелинейные устройства; а если их измерение дополнить Load-Pull-измерениями, то будет получена максимальная информация о характеристиках нелинейного устройства. Однако даже такой мощный методический аппарат имеет свои недостатки. Х-параметры не отражают нелинейные искажения в полосе сигнала, они отражают лишь уровень интермодуляционных составляющих вне его полосы. По причине того, что в качестве зондирующего сигнала используется гармонический сигнал, полученные характеристики могут не в полной мере отражать нелинейное искажение тех сигналов, с которыми в конечном итоге будет работать устройство. Также к недостатку данной методики можно отнести сложность аппаратной реализации.

Основным прибором как в вышеуказанных, так и в других методиках характеризации, служит векторный анализатор цепей (ВАЦ) [2, 4]. Связано это с тем, что векторный анализатор цепей позволяет получать не только амплитудные, но и фазовые характеристики сигнала. А при использовании векторных анализаторов цепей, построенных по канонической схеме с использованием ответвителей, которые позволяют сравнивать принятый и излучённый сигналы, можно снизить требования к линейности генератора. Поскольку, если известен исходный сигнал, мы можем оценивать, как он искажается в результате прохождения через нелинейное устройство.

Используя оцифрованный сигнал на входе исследуемого устройства (ИУ) A(t) и оцифрованный сигнал на выходе ИУ B(t), можем провести их сравнение. Сравнив входной и выходной сигналы на тех участках, где амплитуда сигнала не выходит за пределы линейного закона преобразования, можно вычислить линейный коэффициент усиления (КУ). Сравнивая между собой сигналы, можно вычислить изменение фазы ( $\Delta \varphi$ ). Используя полученные данные, можно определить прогнозируемый сигнал  $A^*(t)$ , т.е. сигнал, который получился бы в случае линейного преобразования:

$$A^{*}(t) = A(t) \cdot KV \cdot e^{i\Delta\phi}.$$
(1)

Нелинейные искажения (НИ) определяются как разность между выходным сигналом B(t) и прогнозируемым сигналом  $A^*(t)$ . Применив быстрое преобразование Фурье (БПФ) (2) и (3), получим характеристики сигналов в частотной области. В качестве оконной функции используем функцию Хемминга (4):

$$A(f) = \sum_{t=0}^{N-1} A(t) \cdot W(t) \cdot e^{\frac{-j2\pi \cdot f \cdot t}{N}},$$
(2)

$$B(f) = \sum_{t=0}^{N-1} B(t) \cdot W(t) \cdot e^{\frac{-j2\pi \cdot f \cdot t}{N}},$$
(3)

$$W(t) = 0,53836 - 0,46164 \cdot \cos(\frac{2 \cdot \pi \cdot t}{N - 1}). \tag{4}$$



Рис. 1. Структурная схема измерительного комплекса

Полученные данные дадут возможность оценить искажения сигнала во временной и частотной областях.

Особенностью измерительного комплекса является использование векторного генератора полосовых сигналов. Для построения комплекса выбрана приведенная на рис. 1 схема, в которой векторный генератор сигналов реализован посредством использования генератора зондирующей частоты ВАЦ и квадратурного модулятора сигналов [5]. Исследуемое устройство (ИУ) включается между измерительными портами ВАЦ. Управление комплексом осуществляется с помощью персонального компьютера (ПК).

Результаты экспериментальных исследований. Основой измерительного комплекса является ВАЦ Р4М-18 производства НПФ «Микран». Его структурная схема с внешними блоками (ИУ и МОД) приведена на рис. 2. Исследуемым устройством являлся широкополосный усилитель с коэффициентом усиления 10 дБ. Сигнал с внутреннего источника зондирующего сигнала ВАЦ (Г1) подаётся на квадратурный модулятор (МОД), с которого модулированный сигнал поступает обратно в ВАЦ. Часть энергии модулированного сигнала ответвляется и с помощью второго генератора (Г2) и смесителя переносится на промежуточную частоту 25 МГц с последующей дискретизацией в АЦП опорного канала (А2). Другая часть сигнала через активный измерительный порт №2 подается на исследуемое устройство (ИУ). Прошедший через ИУ сигнал подаётся на измерительный порт №1, где переносится на промежуточную частоту и подвергается дискретизации АЦП измерительного канала (В1). Управление установкой осуществлялось с помощью специального программного обеспечения НПФ «Микран».



Рис. 2. Структурная схема векторного анализатора цепей с внешними блоками

Модули огибающих полученных сигналов приведены на рис. 3. В качестве зондирующего сигнала использовался полосовой сигнал QAM-16 с несущей частотой 3 ГГц и шириной 250 кГц. Спектры зондирующего и выходного сигналов показаны на рис. 4, *а*. Прогнозируемый сигнал и нелинейные искажения в частотной области приведены на рис. 4, *б*. Для того чтобы расширить функционал методики и подтвердить её правильность, получена точка компрессии на 1 дБ [7]. Производитель ИУ для данной схемы включения усилителя приводит значение точки компрессии 2 дБм. Используя данный измерительный комплекс и методику, получено значение точки компрессии на 1 дБ, равное 0 дБм.



Рис. 3. Модуль комплексной огибающей сигналов во временной области



Рис. 4. Частотные характеристики: а – измеренных сигналов; б – рассчитанных сигналов

**Выводы.** Анализируя полученные данные, можно увидеть, что нелинейные искажения в полосе сигнала превышают уровень минус 20 дБм, «боковые» интермодуляционные составляющие превышают уровень минус 30 дБм. Если определять уровень нелинейных искажений по «боковым» интермодуляционным составляющим, то была бы допущена ошибка в 10 дБ. Анализируя сигналы во временной области, можно увидеть сжатие сигнала большого уровня и отсутствие изменений в огибающей для малого уровня. Эта разница как раз и вызвана нелинейными искажениями (рис. 5).



Рис. 5. Динамические характеристики исследуемого устройства

Расхождение полученных значений, точки компрессии на 1 дБ связано с тем, что ВАЦ по прямому назначению не предназначен для точного измерения абсолютной мощности и допускает погрешность <u>+</u> 2 дБ. На стадии проведения экспериментов отсутствовала методика калибровки ВАЦ для точного измерения мощности. Реализация методики калибровки является следующим шагом, который позволит уменьшить инструментальную погрешность.

В результате проделанной работы создан макет измерительного комплекса, позволяющий оценивать искажения, возникающие при прохождении полосовых сигналов через нелинейные устройства. Комплекс позволяет оценивать уровень искажений как в полосе сигнала, так и за её пределами. Помимо измерительного комплекса, были созданы алгоритмы для обработки и анализа экспериментальных данных.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по договору № 02.G25.31.0091.

#### Литература

1. Hot S-Parameter Techniques: 6 = 4 + 2 [Электронный ресурс] / J. Verspecht, D. Barataud, J.-P. Teyssier, J.-M. Nébus. – Режим доступа: http://www.janverspecht.com/pdf/arftg\_66th\_hots\_verspecht.pdf, свободный (дата обращения: 15.05.2013).

2. Teyssier J.-P. Characterization of high power microwave transistors // Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2010. – № 2 (22), ч. 1. – С. 127–136.

3. Vye D. Fundamentally Changing Nonlinear Microwave Design // Microwave Journal. – 2010. – № 3 (53). – P. 22–39.

4. Guillaume P. Nonlinear Extensions for VNAs: Quid Pro Quo? / P. Guillaume, F. Verbeyst, M.V. Bossche // Microwave Journal. – 2009. – № 9 (52). – P. 66–79.

5. Абраменко А.Ю., Гошин Г.Г. Структура универсального генератора сигналов // Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники . – 2013. – № 3 (29). – С. 5–9.

6. Контрольно-измерительное оборудование. Каталог [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.micran.com/sites/micran\_eng/tmpl/default/p/files/Micran%20MTME.pdf, свободный (дата обращения: 10.10.2013).

7. Основные параметры компонентов РЧ блоков [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.rfdesign.ru/parameters/param-p1db.htm, свободный (дата обращения: 15.05.2013).

### Воронин Николай Николаевич

Аспирант каф. сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники (СВЧиКР) ТУСУРа Тел.: +7 (382-2) 90-00-37 Эл. почта: Voronin@micran.ru

## Абраменко Александр Юрьевич

Аспирант каф. СВЧиКР Тел.: +7 (382-2) 90-00-37 Эл. почта: abramenkoay@gmail.com

#### Гошин Геннадий Георгиевич

Д-р физ.-мат. наук, профессор каф. СВЧиКР Тел.: +7 (382-2) 70-15-18 Эл. почта: Goshingg@svch.tusur.ru

#### Voronin N.N., Abramenko A.Y., Goshin G.G. Measurement systems for the analysis of distortions caused by the passage band signals through nonlinear devices

The measurement system is represented. It allows to analyze the distortions arising in the passing band signals through nonlinear devices. The experimental data obtained for the two types of probe signals are given. Prospects of development of the complex and the software for it are announced.

Key words: band signal, amplifier, vector signal generator, Fourier transform.