Методы исключения влияния анализатора спектра на результаты измерения гармоник

Флориан РАМИАН
(Florian RAMIAN)

В статье рассматриваются способы минимизации нелинейных гармонических искажений, вносимых анализатором спектра при измерении параметров гармоник.

Введение

Одной из ключевых особенностей нелинейных элементов в любой электронной схеме является генерация гармонических сигналов (гармоник). С одной стороны, гармоники, возникающие из-за нелинейных характеристик заданного компонента, например полупроводникового диода, используются для реализации важнейших в современной радиотехнике функций, таких как функции смесителей на гармониках. С другой стороны, не каждая гармоника, формируемая испытуемым устройством (ИУ), действительно полезна. В идеальном случае усилители не формируют никаких гармоник, а просто усиливают входной сигнал. Поэтому одной из задач в реальности является максимальное приближение устройства к его идеалу, то есть использования только полезных гармоник (например, 3-го порядка) и подавления нежелательных гармоник (например, 2-го порядка).

Когда дело доходит до измерения параметров гармоник, оказывается, что не только ИУ содержит нелинейные элементы. Измерительный прибор — как правило, анализатор спектра — содержит усилители и смесители, которые также могут формировать гармоники и, следовательно, влиять на результаты измерения. Поэтому при проверке ИУ на соответствие показателям гармоник необходимо приложить дополнительные усилия, чтобы отличить гармоники, создаваемые ИУ, от гармоник, формируемых измерительным прибором.

Измерение гармоник

Принцип измерения

Для измерения гармоник ИУ требуется частотно-избирательный измерительный прибор, позволяющий отделить сигнал основной частоты от гармоник. Чтобы не использовать сложную систему фильтров и измерителей мощности, гармоники чаще всего измеряются с помощью анализаторов спектра. Эти приборы позволяют одновременно отобразить сигнал основной частоты и его гармоники — в зависимости от диапазона частот анализатора.

Схема работы анализатора спектра зависит от диапазона частот. Так называемый ВЧ-тракт (тракт 1 на рис. 1) используется для частот, например до 3,6, 7 или 8 ГГц, в зависимости от модели анализатора. На частотах выше этого диапазона (тракт 2) для подавления зеркальных частот предназначены настраиваемые фильтры предварительной селекции, в большинстве случаев использующие ЖИГ-технологию (железо-иттриевый гранат). В [1] подробно описаны применяемые архитектуры анализаторов спектра.

Поскольку диапазон частот тракта 2, как правило, доходит до 13 ГГц и выше, этот тракт нередко именуют СВЧ-трактом. Анализатор R&S FSW переключается между трактом 1 и трактом 2 на частоте 8 ГГц. В следующих двух разделах необходимо помнить, что основным элементом, создающим самые сильные гармоники, является первый смеситель (нелинейный элемент) в сигнальном тракте. Этим смесителем становится либо преобразователь с повышением частоты до IF1 в тракте 1, либо преобразователь с понижением частоты до IF2 в тракте 2. Последующие смесители на блок-схеме рис. 1 практически не вносят вклад в гармонические нелинейные искажения, поскольку работают как смесители с фиксированной частотой (частота гетеродина LO всегда оди-

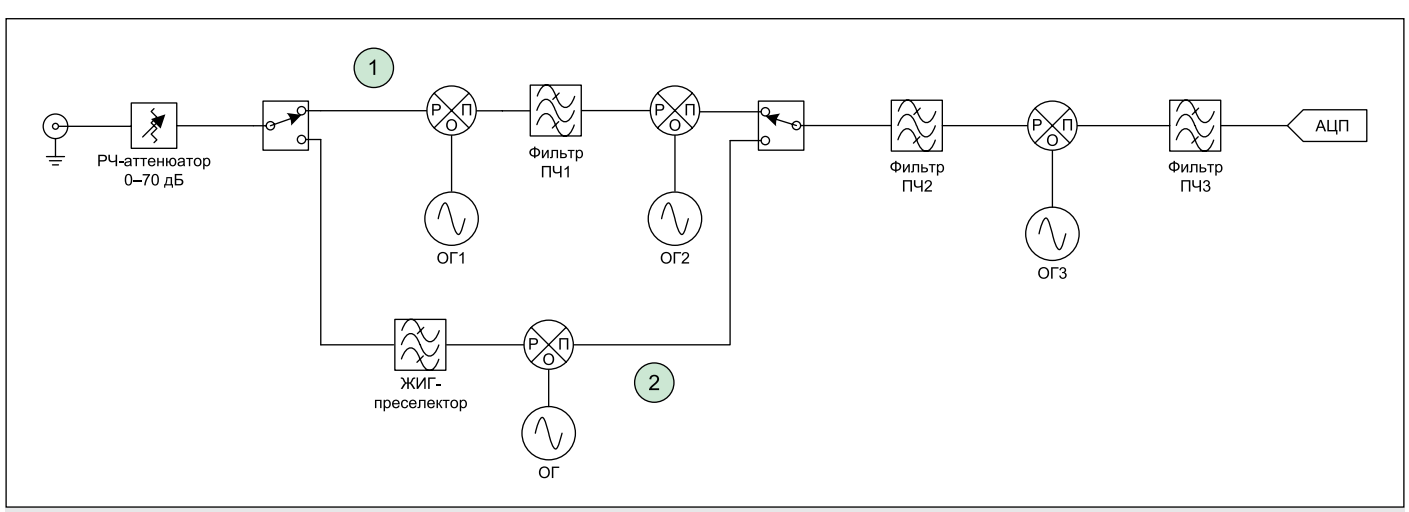

Рис. 1. Упрощенная блок-схема гетеродинного анализатора спектра с ВЧ-трактом 1 и СВЧ-трактом 2

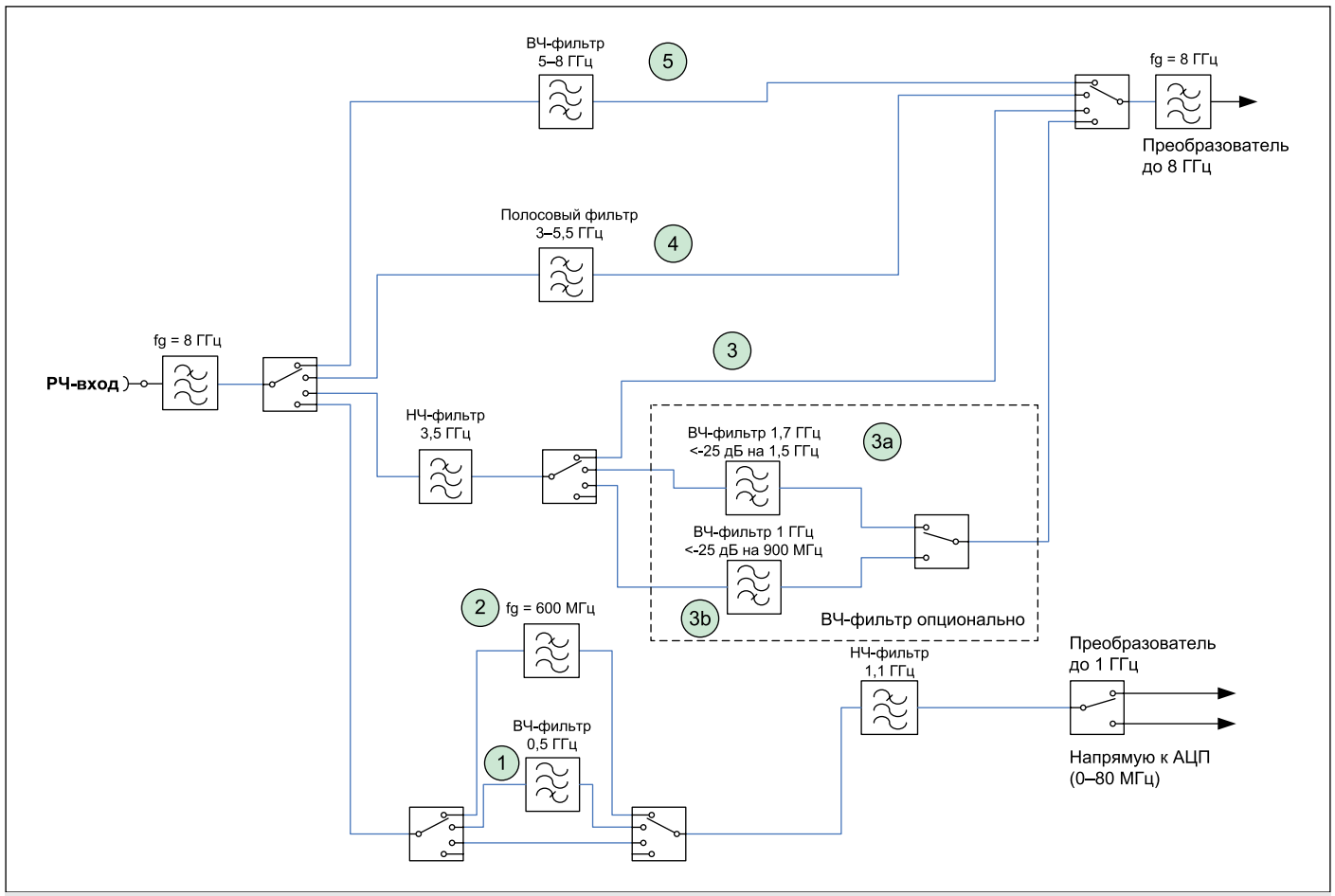

Рис. 2. Путь прохождения сигнала для частот f ≤8 ГГц

накова), за которыми расположены полосовые фильтры, подавляющие их гармоники.

С точки зрения гармоник разница между ВЧ- и СВЧ-трактом заключается в наличии ЖИГ-фильтра перед первым нелинейным элементом на пути следования сигнала.

Гармоники в СВЧ-диапазоне

Как уже упоминалось, для подавления зеркальных частот в диапазоне СВЧ используется настраиваемый фильтр предварительной селекции. Он перестраивается в интересующем диапазоне частот и позволяет попасть в смеситель только узкой полосе частот. Типичная ширина полосы пропускания фильтров предварительной селекции составляет 30–50 МГц.

ЖИГ-фильтр предварительной селекции обеспечивает преимущество СВЧ-тракта передачи сигнала при измерении гармоник. При измерении гармонических искажений на частотах 8 ГГц и выше с помощью 30-МГц полосового фильтра сигнал основной частоты, например 4 ГГц, будет подавлен в фильтре и, таким образом, не сможет создать никаких гармоник. Фактически, если анализатор настроен на измерение мощности гармоник на частоте 8 ГГц, сигнал основной частоты с входного ВЧ-порта (4 ГГц) не попадет на нелинейный элемент, так как ЖИГ-фильтр предварительной селекции его подавит. Таким образом, влияние анализатора спектра на измерение мощности гармоник будет незначительным.

Гармоники на частотах ниже СВЧ-диапазона

В отличие от СВЧ-тракта передачи сигнала ВЧ-тракт анализатора спектра, как правило, не содержит настраиваемых фильтров предварительной селекции. Следовательно, это означает, что без дополнительных мер мощность сигнала во всем диапазоне частот (например, 0–8 ГГц) подается на первый смеситель. Считая, что входной гармонический сигнал имеет частоту 1,2 ГГц, первый смеситель в тракте 1 (рис. 2) также «увидит» 1,2-ГГц сигнал при измерении мощности гармоники на частоте 2,4 ГГц. Соответственно, гармоники, созданные в смесителе, будут отображаться на экране анализатора в виде части измеряемого сигнала.

Для того чтобы улучшить рабочие характеристики в ВЧ-диапазоне, в анализаторах используется несколько сигнальных трактов, каждый из которых оптимизирован для работы в своем диапазоне частот.

С точки зрения измерения гармоник идеальный анализатор спектра должен иметь отдельный тракт для каждой октавы, чтобы сигнал основной частоты и его гармоники всегда проходили по разным сигнальным трактам. Несмотря на то что такой подход выглядит достаточно простым, число точек переключения напрямую влияет на скорость перестройки, так как каждая точка переключения требует дополнительного времени установления перед продолжением измерений. Поскольку на практике принцип «одна октава на тракт» невозможно применить на низких частотах, анализаторы обычно начинают использовать его на частотах порядка 350 МГц.

На рис. 2 показан принцип предварительной селекции анализатора на частотах ниже 8 ГГц. На схеме все параллельные тракты для разных диапазонов частот пронумерованы в порядке 1–». Блок-схема изображена упрощенно, но содержит все основные фильтры предварительной селекции.

На рис. 2 сигнальные тракты 1, 4 и 5 охватывают меньше октавы. Ограничение диапазона частот для каждого тракта задается фильтрами нижних или верхних частот, как показано на рисунке.

Сигнальный тракт 2 используется для частот ниже 600 МГц. Как уже обсуждалось выше, принцип разделения сигнала основной частоты и гармоник не используется для этого тракта.

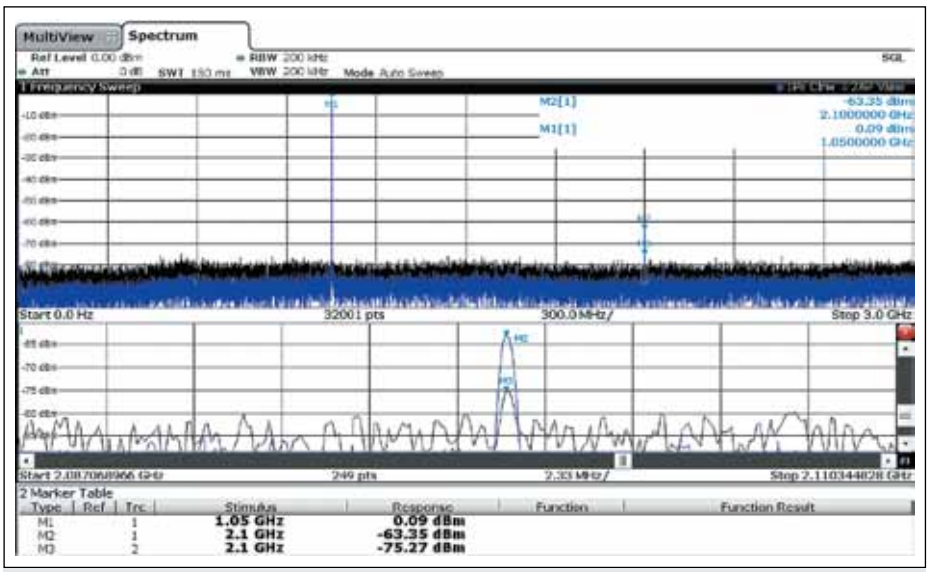

Рис. 3. Сигнал основной частоты и вторая гармоника, черная кривая с ВЧ-ослаблением 10 дБ, синяя кривая — 0 дБ. На нижней диаграмме показана увеличенная область вблизи второй гармоники

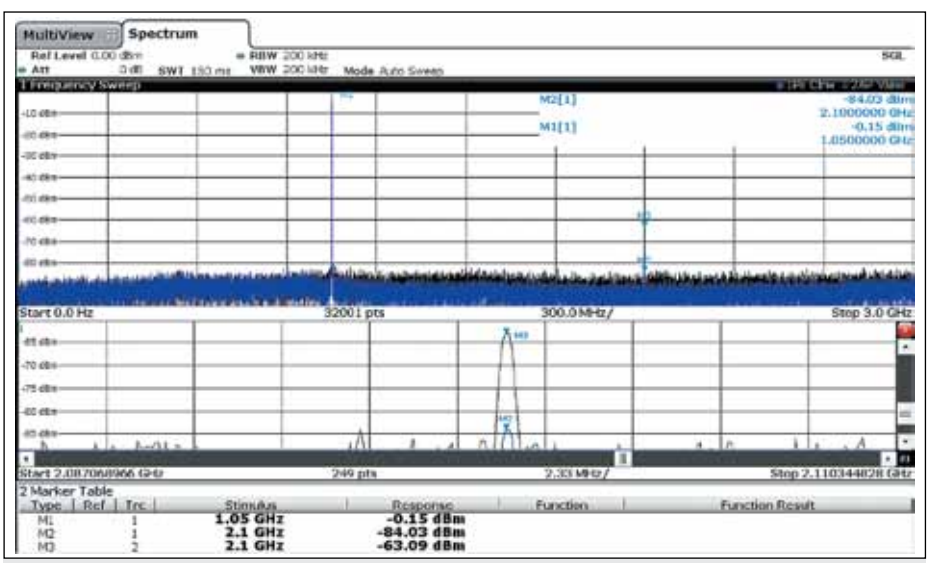

Рис. 4. Сигнал основной частоты и вторая гармоника, черная кривая с ВЧ-ослаблением 10 дБ, синяя кривая — 0 дБ. На нижней диаграмме показана увеличенная область вблизи второй гармоники

Сигнальный тракт 3 требует особого внимания примерно от 1 до 3,5 ГГц, поскольку охватывает наиболее популярные частоты для стандартов мобильной связи, такие как GSM, WCDMA или LTE. Без дополнительных мер этот сигнальный тракт охватывает более одной октавы.

Контрольно-измерительное решение

Во время измерения гармоник важно убедиться, что измеренные сигналы формируются ИУ, а не измерительным прибором.

Итак, первый смеситель вносит наибольший вклад в гармонические искажения, создаваемые анализатором спектра. Эта часть искажений зависит от мощности, которая приходит на смеситель, а следовательно, на нее влияет ВЧ-ослабление, применяемое к сигналу. Таким образом, добавление ВЧ-аттенюатора на входе анализатора позволит уменьшить остаточные гармонические искажения.

Гармонические искажения, вызванные ИУ, не зависят от уровня сигнала на входе первого смесителя анализатора спектра. ВЧ-ослабление не повлияет на разницу уровней между сигналом основной частоты и гармоник ИУ.

Такое отличие в поведении гармоник можно использовать для минимизации влияния гармонических искажений анализатора спектра. При усилении ВЧ-ослабления уровни гармонических сигналов, сформированных первым смесителем, будут уменьшаться, в то время как внешние гармонические сигналы не изменят свой уровень на экране, потому что анализатор спектра численно компенсирует добавленное ослабления с помощью смещения уровня сигнала.

Благодаря такому механизму работы, с помощью настраиваемого ВЧ-аттенюатора анализатора спектра легко отличить гармоники, формируемые ИУ, от гармоник, созданных анализатором спектра. На рис. 3 маркер M2 показывает уровень гармоник при ослаблении 0 дБ, а маркер M3 — при ослаблении 10 дБ. Разница в уровнях очевидна, это означает, что значительную часть мощности гармоники формирует анализатор спектра.

Компания Rohde & Schwarz предлагает контрольно-измерительное решение на базе анализатора спектра R&S FSW и опции R&S FSW-B13. Случай, показанный на рис. 3, позволяет в полной мере продемонстрировать преимущество дополнительных фильтров верхних частот (ФВЧ), которые добавляет в прибор опция R&S FSW-B13. Для данного случая фильтры позволяют добиться подавления гармоник более чем на 20 дБ (рис. 4) без необходимости повышать ВЧ-ослабление.

В отличие от рис. 3 минимальный уровень шума не увеличивается, так как дополнительное ослабление не используется. Внимательное изучение показывает чуть более низкий минимальный уровень шума из-за дополнительных усилителей в трактах фильтров верхних частот. Очевидно, что применение ФВЧ вместо дополнительного ослабления позволяет выполнять более чувствительные измерения гармоник с помощью анализатора R&S FSW.

Заключение

Когда дело доходит до измерения гармоник с помощью анализатора спектра, важно убедиться, что уровень гармоник, формируемых испытуемым устройством, значительно превышает уровень гармоник, создаваемых анализатором.

Повышение ВЧ-ослабления является приемлемым способом минимизации уровня гармоник, формируемых анализатором, но за счет повышения минимального уровня шума и, следовательно, уменьшения чувствительности измерений.

В анализаторе R&S FSW используется подход, основанный на применении фильтров верхних частот в ВЧ-тракте передачи сигналов с частотой до 8 ГГц, который позволяет минимизировать влияние собственных гармоник анализатора спектра. Для измерения гармоник в диапазоне 1–3,5 ГГц опция R&S FSW-B13 разрешает добавить еще два ФВЧ, что позволяет проводить измерения гармоник, не жертвуя чувствительностью.

Литература

1. Rauscher C. Fundamentals of Spectrum Analysis. 1st edition. Rohde & Schwarz, 2001.