

# ВЫШЕ СКОРОСТЬ, БОЛЬШЕ ИНФОРМАЦИИ — ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИЕМНИКОВ ЭМП НА ОСНОВЕ БПФ ДЛЯ ОЦЕНКИ СООТВЕТСТВИЯ ТРЕБОВАНИЯМ К ЭМП

## MORE SPEED, MORE INSIGHT — USE OF FFT-BASED EMI TEST RECEIVERS FOR EMI COMPLIANCE MEASUREMENTS

Йенс Медлер (Jens Medler), Rohde & Schwarz

### ВВЕДЕНИЕ

Обычные измерительные приемники ЭМП анализируют сигнал в полосе пропускания на промежуточной частоте в течение заданного времени измерения. Такой подход приводит к продолжительному периоду сканирования для всего частотного диапазона, так как время измерения для одной точки на оси частот должно быть достаточно велико для захвата прерывистого излучения. Приемники на основе БПФ проводят измерения сигналов в полосе частот, намного превышающей полосу пропускания на промежуточной частоте. Полоса пропускания на промежуточной частоте достигается благодаря использованию блока фильтров и блока взвешивающих детекторов БПФ. Такой подход дает следующие преимущества:

- Значительно снижается время, необходимое на анализ электромагнитного излучения, приблизительно в число фильтров, используемых в блоке фильтров БПФ плюс время, требуемое приемнику для переключения частоты. Это позволяет на несколько порядков уменьшить период сканирования без потери точности.
- Имеется возможность увеличить время измерения, например, для анализа прерывистых сигналов.
- Появляется возможность использовать расширенные измерительные функции, такие как спектрограммы и измерение спектра в режиме послесвечения.

С введением первой поправки к третьей редакции стандарта CISPR 16-1-1 [1] в июне 2010 появилась возможность для оценки соответствия требованиям к ЭМП использовать измерительные приборы на основе БПФ. Изменения в базовом стандарте требовались для возможности использования данных методов в стандартах на изделия. Они уже используются для измерения излучения звуковых и телевизионных вещательных приемников и связанного оборудования (CISPR 13:2006), а также мультимедийного оборудования (CISPR 32:2012). Следующими будут стандарты для осветительного (CISPR 15) и автомобильного оборудования (CISPR 25). Более подробная информация приведена в разделе III Как базовый стандарт вступает в силу.

Выбору времени измерения при использовании измерительных приемников ЭМП на основе БПФ следует уделить особое внимание в случае анализа широ-



**RONDE & SCHWARZ**

кополосных помех и прерывистых сигналов. Более того, настоятельно рекомендуется использовать предварительную ВЧ-фильтрацию (фильтры преселекции) для достижения максимального динамического диапазона и предотвращения перегрузок. В частности, это справедливо для квазипиковых измерений слабых импульсных сигналов на фоне сигналов с большой амплитудой. Руководство приведено в разделе IV Замечания о временном и динамическом диапазоне при использовании измерительных приемников ЭМП на основе БПФ.

### КОНЦЕПЦИЯ СТАНДАРТА CISPR 16-1-1

В настоящее время для определения требований к измерительной аппаратуре стандарт CISPR 16-1-1 используется по методу «черного ящика». Это означает, что для того, чтобы считаться пригодной для измерений по стандартам CISPR, измерительная аппаратура должна удовлетворять всем требованиям, перечисленным в стандарте CISPR 16-1-1, вне зависимости от выбранного исполнения или технологий.

Для отражения такого подхода в по-

правке 1:2010-06 к стандарту CISPR 16-1-1:2010-01 [1] добавлено новое определение термина «измерительный приемник», в котором говорится: «прибор, такой как перестраиваемый вольтметр, приемник ЭМП, анализатор спектра или измерительный прибор на основе БПФ, с использованием предварительной селекции или без нее, удовлетворяющий соответствующим частям данного стандарта».

В результате появилась возможность для оценки соответствия требований к ЭМП использовать измерительные приборы на основе БПФ, удовлетворяющие требованиям стандарта CISPR 16-1-1:2010 и его поправки 1:2010. Обычно это требования к входному импедансу, детекторам, полосе пропускания, коэффициенту перегрузки, КСВН, абсолютной погрешности синусоидального напряжения, импульсной характеристике, общей избирательности, интермодуляционным эффектам, шуму приемника и экранированию.

В дополнении к перечисленным выше основным требованиям измерительные приборы на основе БПФ должны во время измерения непрерывно осуществлять дискретизацию и обработку сигнала. Это особенно важно для захвата импульсных помех и сигналов. Данное требование не позволяет для оценки соответствия требованиям к ЭМП использо-

Таблица 1

### ДАТИРОВАННЫЕ ССЫЛКИ НА СТАНДАРТ CISPR 16-1-1

Стандарт на изделие	Ссылка на CISPR 16-1-1	Срок действия
CISPR 11:2010 (Ред. 5.1) — стандарт на изделия для промышленного, научного и медицинского оборудования (ISM)	CISPR 16-1-1:2006 и его поправки 1:2006 и 2:2007	2014
CISPR 12:2009 (Ред. 6.1) — стандарт на изделия для транспорта, судов и двигателей внутреннего сгорания (защита внебортовых приемников)	CISPR 16-1-1:2006	2014
CISPR 13:2009 (Ред. 5.0) — стандарт на изделия для звуковых и телевизионных вещательных приемников и связанного оборудования	CISPR 16-1-1:2006 и его поправки 1:2006 и 2:2007	2014
CISPR 14-1:2011 (Ред. 5.2) — стандарт на изделия для бытовой техники и электроинструментов	CISPR 16-1-1:2003	2014
CISPR 15:2009 (Ред. 7.2) — стандарт на изделия для электрического освещения и схожего оборудования	CISPR 16-1-1:2003	2013
CISPR 22:2008 (Ред. 6.0) — стандарт на изделия для оборудования информационных технологий (ITE)	CISPR 16-1-1:2006 и его поправки 1:2006 и 2:2007	2017
CISPR 25:2008 (Ред. 3.0) — стандарт на изделия для транспорта, судов и двигателей внутреннего сгорания (защита бортовых приемников)	CISPR 16-1-1:2006 и его поправки 1:2006 и 2:2007	2014
CISPR 32:2012 (Ред. 1.0) — стандарт на изделия для мультимедийного оборудования	CISPR 16-1-1:2010 и его поправка 1:2010	2015
IEC 61000-6-3:2010 (Ред. 2.1) — групповой стандарт для жилищных, коммерческих сред и сред легкой промышленности	CISPR 16-1-1:2010	2014
IEC 61000-6-4:2010 (Ред. 2.1) — групповой стандарт для промышленных сред	CISPR 16-1-1:2010	2014

вать запоминающие цифровые осциллографы из-за наличия периодов простоя.

#### КАК БАЗОВЫЙ СТАНДАРТ ВСТУПАЕТ В СИЛУ

Базовые стандарты вступают в силу при наличии датированных или недатированных нормативных ссылок в стандартах на изделия:

- Если ссылка недатированная, следует использовать самую последнюю редакцию базового стандарта.
- Если ссылка датированная, следует использовать указанную редакцию базового стандарта.

Стандарт CISPR 13:2006 (Ред. 4.2) содержит недатированные ссылки на базовый стандарт CISPR 16-1, тогда как все остальные стандарты на изделия CISPR и групповые стандарты ИЕС для измерений излучения имеют датированные ссылки (см. таблицу 1).

Таким образом, пользователи стандартов CISPR 13:2006 (Ред. 4.2) и CISPR 32:2012 (Ред. 1.0) уже могут использовать для оценки соответствия требованиям к ЭМП измерительные приборы на основе БПФ, если указанные приборы соответствуют требованиям стандарта CISPR 16-1-1:2010 и его поправки 1:2010 (Ред. 3.1). Ссылки в стандарте CISPR 15 будут обновлены в 2013 году.

Все остальные стандарты на изделия будут оставаться более или менее неизменными до 2014 года. Стандарт CISPR 22 изменяться больше не будет, и его заменят стандартом CISPR 32 в 2017 году. По этой причине измерительные приборы только на основе БПФ еще в течение довольно длительного времени не будут подходить для оценки соответствия требованиям к ЭМП.

Для того чтобы значительно повысить эффективность измерения с помощью приемников на основе БПФ, рекомендуется использовать измерительный приемник ЭМП, который в одном устройстве сочетает стандартный подход приемников ЭМП и основанную на БПФ функцию сканирования во временной области. Даже если стандарт на изделия еще не позволяет использовать измерения на основе БПФ, данный метод можно использовать для



Рис. 1. Оценка соответствия требованиям к ЭМП с использованием сканирования во временной области в случае, если стандарты изделия не ссылаются на стандарт CISPR 16-1-1:2010 и его поправку 1:2010

предварительных оценочных измерений, за которыми следуют измерения на основе обычных методов аналоговых приемников на тех частотах, которые в результате предварительного анализа были отмечены как критические (см. рис. 1).

#### ЗАМЕЧАНИЯ О ВРЕМЕННОМ И ДИНАМИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИЕМНИКОВ ЭМП НА ОСНОВЕ БПФ

Существуют два возможных подхода к реализации приемников на основе БПФ:

- Использование осциллографа, который производит прямую оцифровку ВЧ-сигнала с помощью АЦП с широким динамическим диапазоном.
- Использование приемника с широкой полосой ПЧ, который производит оцифровку сигнала на промежуточной частоте.

Использование осциллографа ограничивается АЦП, который должен обладать очень высокой разрядностью и частотой дискретизации, чтобы удовлетворить требованиям к динамическому диапазону, задаваемым стандартом CISPR 16 и полосой пропускания. С учетом некоторого запаса на входную фильтрацию для приемника с частотой 1 ГГц необходим АЦП с частотой дискретизации 2,5 ГГц. Для соответствия требованиям стандарта CISPR 16 требуется разрядность не хуже 14 бит. В настоящее время таких АЦП не существует. Поэтому для приближения к требованиям стандарта приходится применять автоматическую подстройку диапазона и программные меры.

Более правильный подход, обеспечивающий требуемую производительность, состоит в сочетании обоих типов устройств в одном приборе, например, прямая оцифровка сигналов с частотой до 30 МГц и использование обычного приемника с переносом на промежуточную частоту 30 МГц. Таким образом, полоса частот, подвергаемая оцифровке, ограничивается 30 МГц, что устанавливает более низкие и выполнимые требования к АЦП.

Такой подход обладает следующими преимуществами:

- Широкий динамический диапазон благодаря ограниченной полосе частот и доступность 16 битных АЦП с высоким разрешением и широким динамическим диапазоном.
- Верхняя частота приемника не ограничена частотой дискретизации АЦП.
- Полосовые фильтры и взвешивающие детекторы могут работать в режиме реального масштаба времени, например, полные спектры кондуктивного и обычного излучения можно отобразить без каких-либо искажений или временных задержек.
- Диапазон частот, превышающий 30 МГц, разделяется на несколько сегментов, например, по 25 МГц, которые последовательно анализируются.
- Большое максимальное время пребывания из-за низкой частоты дискретизации, например, до 100 с.

- Благодаря ограниченной полосе частот для БПФ появляется возможность использовать предварительную ВЧ-фильтрацию. Она защищает вход приемника от перегрузки из-за мощных внеполосных сигналов и обеспечивает корректное измерение слабых помех на фоне сильных сигналов.

В результате, измерительный приемник ЭМП на основе БПФ сочетает в себе блок фильтров с N параллельными фильтрами и ступенчатое сканирование частоты, причем ширина шага согласуется с шириной БПФ. Для этого исследуемый частотный диапазон разделяется на несколько сегментов, которые анализируются последовательно (см. рис. 2). Время сканирования Tscan вычисляется следующим образом:

$$T_{scan} = T_m \cdot N_{seg} \quad (1)$$

где:  $T_m$  — время измерения для каждого сегмента,  $N_{seg}$  — число сегментов.

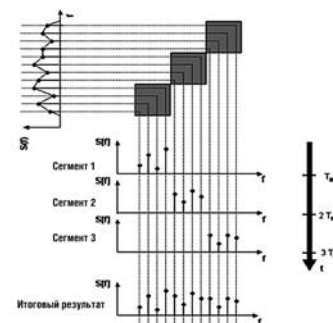


Рис. 2. Последовательное БПФ-сканирование, источник: CISPR 16-2-3 [2]

Для обеспечения корректности измерений время измерения  $T_m$  следует выбирать большим, чем период повторения импульсной помехи. Если время измерения слишком мало, часть импульсов будет пропущена, что может привести к значительной погрешности измерений. В наихудшем случае измерительный приемник может вообще пропустить помеховый сигнал. Это особенно опасно, если размер сегмента достаточно велик, например, 25 МГц и более.

Если период повторения импульсов неизвестен, для определения формы огибающей спектра необходимо провести многократное сканирование с различным временем измерения и функцией «maximum hold» (запоминание максимума). Для импульсных сигналов с малым периодом повторения необходимо выполнить несколько (например, от 10 до 50) сканирований, чтобы полностью восстановить форму огибающей спектра широкополосных компонент. Необходимое время измерения можно также определить, увеличивая его до тех пор, пока разница между максимальной запомненной кривой и текущей не составит менее, например, 2 дБ.

Как правило, измерительный приемник ЭМП необходимо оснащать фильтрами преселекции для обеспечения достаточного динамического диапазона при квазипиковых измерениях импульсных сигналов с низкой частотой повторе-

ния импульсов и, особенно, для защиты входных цепей прибора от перегрузки или повреждения при измерении слабых помех на фоне сильных сигналов или сильных широкополосных сигналов с полосой частот намного большей, чем полоса измерений прибора (см. рис. 3).

Такой фильтр преселекции должен обеспечивать ослабление как минимум в 30 дБ на частоте сильного сигнала. Число фильтров должно быть достаточным для перекрытия частотного диапазона от 9 кГц до 6 ГГц.

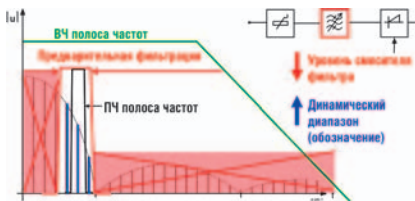


Рис. 3. Принцип предварительной фильтрации (преселекции)

Снизу динамический диапазон ограничен уровнем собственного шума прибора на требуемой полосе разрешения, например, 120 кГц в диапазоне CISPR от 30 МГц до 1000 МГц. Верхний предел определяет точка компрессии 1 дБ первого смесителя. Максимальный динамический диапазон можно использовать только для измерения непрерывных сигналов (узкополосных сигналов). При измерении сильного широкополосного сигнала из-за нелинейности смесителя возникнут большие искажения.

В результате максимальный входной уровень без интермодуляции (максимальный отображаемый диапазон) снижается на коэффициент расширения полосы частот (см. рис. 4).



Рис. 4. Динамический диапазон и коэффициент расширения полосы частот

Пример. Коэффициент расширения полосы частот без преселекции составляет порядка 26 дБ при использовании полосы частот ПЧ-фильтра BIF = 50 МГц и в предположении, что полоса частот широкополосного сигнала совпадает с ВЧ-полосой частот измерительного приемника ЭМП BRF = 1 ГГц. При использовании фильтра преселекции с полосой пропускания BPRE = 100 МГц коэффициент расширения полосы частот равен примерно 6 дБ, таким образом, максимальный отображаемый диапазон на 20 дБ выше, чем при отсутствии преселекции.

**УВЕЛИЧЕНИЕ СКОРОСТИ ПРИ СКАНИРОВАНИИ ВО ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ В РЕЖИМЕ ПОСЛЕСВЕЧЕНИЯ**

Компания Rohde & Schwarz представляет новое поколение измерительных при-

емников ЭМП на основе БПФ для оценки соответствия требованиям к искажениям согласно стандарту CISPR 16, приемники R&S®ESR [3]. Сканирование во временной области на основе БПФ способно обеспечить скорость измерения в 6000 раз выше, чем можно достигнуть при стандартном подходе с фильтрацией в одном канале.

Частотное сканирование в диапазонах CISPR с использованием пикового детектора может быть выполнено всего лишь за несколько миллисекунд, и даже при использовании квазипикового и усредняющего детекторов оно занимает лишь несколько секунд, что делает предварительные измерения с помощью пикового детектора ненужными. Высокая скорость измерений нужна, в частности, если испытуемое оборудование может работать только в течение короткого периода времени, например, стартер в автомобиле. Часть сэкономленного времени можно использовать для увеличения времени измерения и надежного обнаружения прерывистых узкополосных сигналов или одиночных импульсов.

В режиме послесвечения приемник R&S®ESR отображает непрерывающийся спектр на одной диаграмме (см. рис. 5).

Цвет каждого пикселя отображает частоту появления конкретного значения амплитуды на заданной частоте. Наиболее часто встречающиеся значения можно отобразить, к примеру, красным, а одиночные — синим цветом. Если указанное значение амплитуды больше не встречается на указанной частоте, соответствующий пиксель исчезает после заданного пользователем времени послесвечения. Это позволяет пользователю различить непрерывные и импульсные помехи, которые появляются лишь на очень короткое время. Кроме того, различные импульсные помехи можно легко отличить друг от друга.

Пример. Изображенный на рисунке 5 спектр помехи вызван электромотором с плохим подавлением ЭМП. Можно отчетливо увидеть вторую импульсную помеху, в то время как в обычном режиме анализатора она оказывается скрыта широкополосной помехой (см. рис. 6).

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Измерительные приемники ЭМП на основе БПФ можно использовать для оценки соответствия требованиям к ЭМП согласно первой поправке к третьей редакции стандарта CISPR 16-1-1, если данный

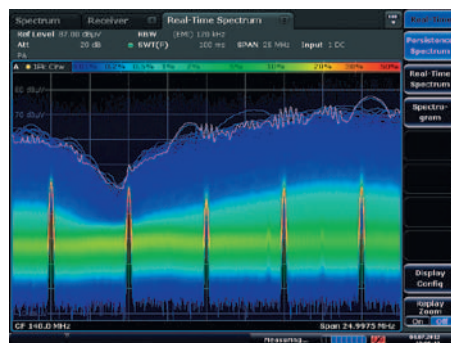


Рис. 5. Приемник R&S®ESR, режим послесвечения

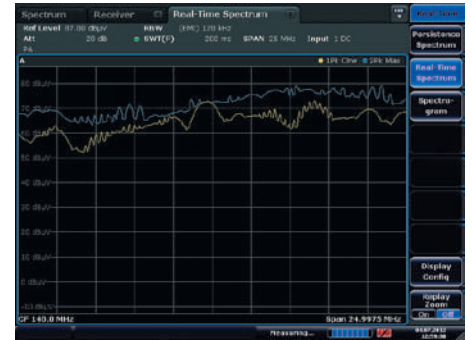


Рис. 6. Приемник R&S®ESR, режим измерения спектра в реальном масштабе времени. Желтая кривая представляет текущий спектр, синяя кривая — запомненные максимумы (режим Max Hold)

стандарт указан в стандарте на изделия, либо если ссылка на него недатированная. Поэтому пользователи стандартов CISPR 13:2006 (Ред. 4.2) и CISPR 32:2012 (Ред. 1.0) уже могут использовать для оценки соответствия требованиям к ЭМП измерительные приборы на основе БПФ. Пользователи других стандартов могут использовать быстрое сканирование во временной области, чтобы ускорить длительные предварительные измерения.

Использование измерительных приемников ЭМП на основе БПФ позволяет на несколько порядков уменьшить период сканирования и получить больше информации благодаря возможности увеличить время измерений и использовать расширенные измерительные функции, такие как измерение спектра в режиме послесвечения.

Для повышения точности и повторяемости измерений настоятельно рекомендуется использовать предварительную фильтрацию (фильтры преселекции).

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Amendment 1:2010-06 to CISPR 16-1:2010-01 (Edition 3) Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods — Part 1-1: Radio disturbance and immunity measuring apparatus — Measuring apparatus.
2. Amendment 1:2010-06 to CISPR 16-2:2010-04 (Edition 3) Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods — Part 2-3: Methods of measurement of disturbances and immunity — Radiated disturbance measurements.
3. R&S®ESR EMI Test Receiver, Product Brochure Version 01.01, [www.rohde-schwarz.com](http://www.rohde-schwarz.com).

*FFT-based EMI test receivers can be used for EMI compliance measurements in accordance with Amendment 1 to 3<sup>rd</sup> Edition of CISPR 16-1-1 if this standard is referenced in the product standard. The use is motivated by reducing the scan time by several orders of magnitude and to get more insight due to the possibility of applying longer measurement times and enhanced measurement functions like spectrum in persistence mode. For precise and reproducible measurements the use of preselection filters is highly recommended.*