

# Выявление электромагнитных помех с помощью осциллографов R&S®RTO и R&S®RTE

## Указания по применению

### Изделия:

- l R&S®RTO
- l R&S®RTE

В настоящих указаниях по применению приведено подробное описание метода анализа электромагнитных помех (ЭМП) с помощью осциллографов R&S®RTO и R&S®RTE. Рассматриваются основные механизмы возникновения нежелательного ВЧ излучения, описывается метод анализа ЭМП. В качестве иллюстрации в конце приводится практический пример анализа ЭМП.

# Содержание

<b>1</b>	<b>Введение .....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Основы электромагнитного излучения .....</b>	<b>5</b>
2.1	Источники помех.....	5
2.1.1	ВЧ излучение дифференциального режима.....	6
2.1.2	ВЧ излучения синфазного режима.....	7
2.1.3	Кондуктивное излучение .....	10
2.1.4	Источник помех, связанный с целостностью сигнала.....	11
2.2	Механизмы связи.....	12
2.3	Излучающие элементы (Антенны).....	12
<b>3</b>	<b>Методы измерения, используемые при выявлении ЭМП .....</b>	<b>14</b>
3.1	Введение: поля ближней и дальней зоны.....	14
3.2	Измерения тока и напряжения РЧП .....	15
3.2.1	Взаимосвязь между токами высокочастотных помех в соединительных линиях и составляющими излучаемого поля в дальней зоне .....	15
3.2.2	Проведение измерений тока РЧП .....	15
3.2.3	Измерение напряжения РЧП на линиях питания .....	16
3.2.4	Токовые пробники для измерения токов РЧП .....	17
3.3	Анализ ЭМП с помощью пробников поля ближней зоны.....	18
3.3.1	Пробники электрического и магнитного поля ближней зоны.....	18
3.3.2	Применение пробников поля ближней зоны .....	20
3.3.3	Набор пробников поля ближней зоны R&S® HZ-15 .....	22
<b>4</b>	<b>Практические аспекты выявления ЭМП с помощью цифрового осциллографа R&amp;S® RTO.....</b>	<b>23</b>
4.1	Основная процедура выявления ЭМП в лабораториях разработчиков .....	23
4.2	Использование осциллографа R&S® RTO для выявления ЭМП .....	24
4.2.1	Основные настройки осциллографа.....	24
4.2.2	Специальные функции осциллографа R&S® RTO для выявления ЭМП .....	25
4.2.3	Советы по выявлению ЭМП с помощью осциллографа R&S® RTO .....	30
4.3	Практический пример: выявление ЭМП на IP-телефоне .....	31
4.3.1	Результаты анализа поля дальней зоны .....	32
4.3.2	Измерения тока РЧП в соединительных линиях .....	33
4.3.3	Анализ поля ближней зоны.....	37
4.3.4	Итоги выявления ЭМП .....	44

<b>5</b>	<b>Заключение .....</b>	<b>45</b>
<b>6</b>	<b>Библиография .....</b>	<b>46</b>
<b>7</b>	<b>Информация для заказа.....</b>	<b>47</b>

# 1 Введение

В некоторой степени все электрические, а также электронные устройства излучают нежелательные электромагнитные поля и передают нежелательные помеховые напряжения и токи через свои соединительные кабели. Чтобы минимизировать влияние таких электромагнитных помех на работу или приемники других устройств, в каждой экономической области законом оговариваются допустимые пределы для излучения.

Испытания на электромагнитную совместимость используются для проверки соответствия установленным пределам. В случае нарушения пределов обычно требуется проводить затратное по времени выявление ЭМП. Быстрый анализ ЭМП на этапе разработки – это ключевой фактор успеха для изделий, которые необходимо выпустить на рынок в срок.

Мощная функция БПФ анализа цифровых осциллографов R&S®RTO и R&S®RTE компании Rohde & Schwarz позволяет проводить анализ ЭМП прямо на рабочем месте разработчика. Благодаря чувствительности в 1 мВ/дел, полосе пропускания до 4 ГГц и очень низкому входному шуму эти осциллографы прекрасно подходят для рассматриваемой задачи. Для локализации и анализа нежелательного излучения и токов радиочастотных помех (РЧП) и создания эффективного решения для их подавления разработчики могут использовать пробники поля ближней зоны и токовые пробники.

Настоящие указания по применению содержат простые инструкции, которые помогут разработчикам аппаратного обеспечения провести анализ ЭМП с помощью пробников поля ближней зоны и цифровых осциллографов. Сам процесс анализа продемонстрирован на практическом примере с использованием осциллографа R&S®RTO.

## 2 Основы электромагнитного излучения

Для возникновения электромагнитного излучения необходимо выполнение следующих условий:

- а) Наличие источника помех, создающего возмущения достаточно высокого уровня в диапазоне частот ВЧ сигналов (например, прямоугольные импульсы с быстрым нарастанием фронтов);
- б) Наличие механизма связи, передающего сигнал помехи от источника к излучающему элементу;
- в) Наличие некоторого излучающего элемента, способного передать энергию источника помех в поле дальней зоны (например, соединительный кабель, разъемы в корпусе или печатные платы, которые могут выступать в качестве антенны).

В следующих разделах будут рассмотрены все три условия.

### 2.1 Источники помех

Современные цифровые цепи для передачи информации используют высокочастотные прямоугольные импульсы с очень короткими временами нарастания и спада. Обычно между компонентами используется односторонняя (несимметричная) передача сигналов (например, параллельные шины адреса или данных), хотя, в случае очень высоких тактовых частот также используются дифференциальная (симметричная) передача (например, дифференциальные тактовые линии). Эти устройства генерируют способную к излучению электромагнитную энергию в высокочастотном спектре. Из-за используемой технологии, компоненты цепей имеют низкое напряжение питания и поэтому обладают высокой чувствительностью к внешним электромагнитным помехам, например, от сети питания.

Некоторые элементы цепей, такие как импульсные преобразователи напряжений, работают на быстрых переключениях, которые также могут быть источниками помех с рядом высокочастотных гармоник.

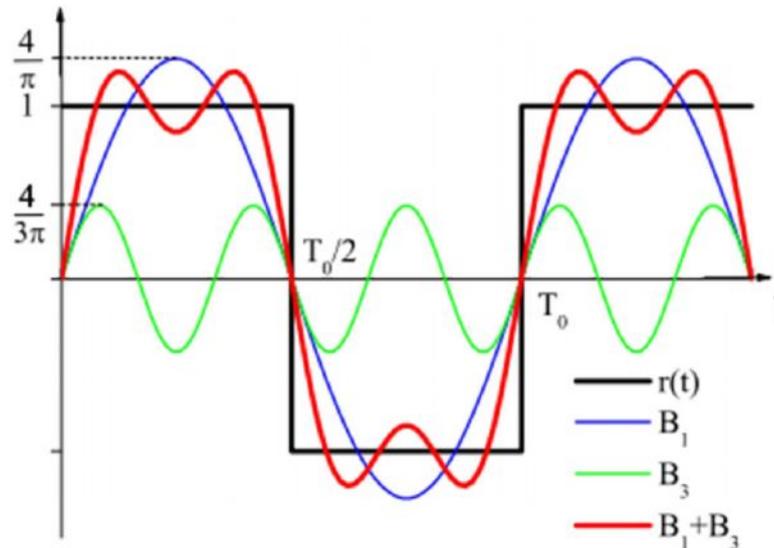


Рис. 2-1 – Прямоугольный сигнал с нечетными гармониками.

Несмотря на то, что амплитуда гармоник падает с увеличением их частоты (20 дБ на декаду для прямоугольных сигналов, 40 дБ на декаду после некоторой частоты среза для сигналов с конечным временем нарастания фронтов), они играют важную роль при формировании нежелательного излучения. На высоких частотах помеховые сигналы излучаются более эффективно, так как проводящие структуры, используемые в электронных системах, оказываются сопоставимы с длиной волны помеховых сигналов (см. раздел 2.1.2). Поэтому, например, если в устройстве используются импульсные источники питания, в качестве помехового спектра в поле дальней зоны обычно рассматривают высокие гармоники.

В случае неэкранированных систем помеховое излучение в поле дальней зоны возникает, например, непосредственно на подводящих дорожках или компонентах печатной платы. В случае экранированных систем нежелательное ВЧ излучение может возникать на щелях в корпусе или из-за тока РЧП, который втекает в соединительный кабель.

### 2.1.1 ВЧ излучение дифференциального режима

ВЧ излучение дифференциального режима возникает на печатных платах из-за протекания тока ( $I_{DM}$ ) через сигнальные тракты, в которых прямой и обратный проводники не разведены вместе, формируя проводящий контур. В этом случае источником помех является результат выполнения основной функции платы, т.е. передача данных между двумя компонентами платы. ЭМП связаны с неправильной трассировкой платы. Итоговое магнитное поле от проводящего контура пропорционально току  $I_{DM}$ , площади контура и квадрату частоты тока РЧП.

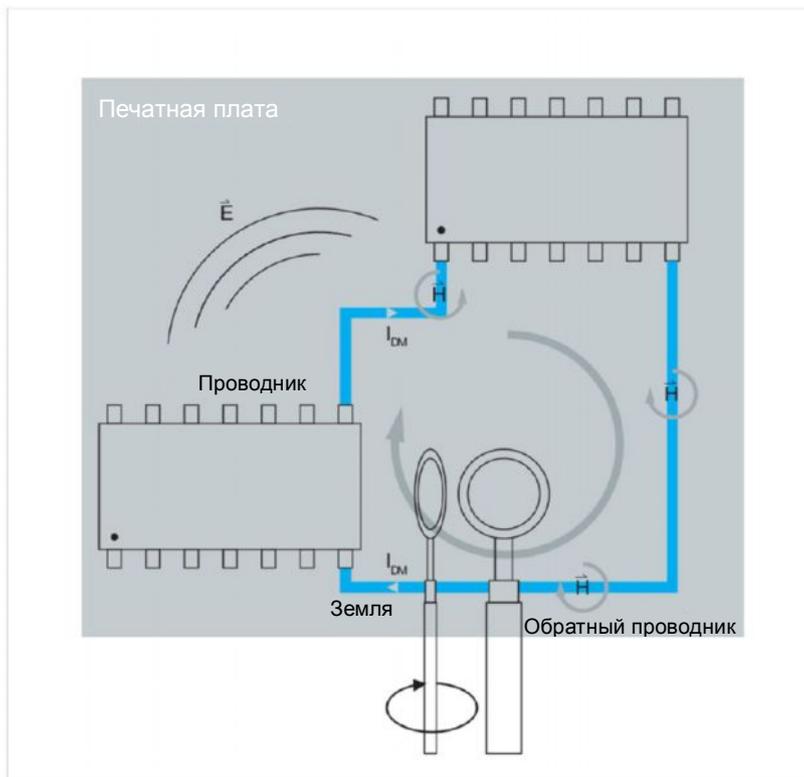


Рис. 2-2 – ВЧ излучение дифференциального режима от печатной платы и размещение петлевых пробников поля ближней зоны для измерения такого излучения.

Для обнаружения источников ВЧ излучения дифференциального режима можно использовать испытательное оборудование для измерения поля ближней зоны. В рассматриваемом примере используются рамочные (петлевые) антенны подходящей направленности, которые необходимо вращать во время измерений для обнаружения максимального значения ВЧ излучения. Это особенно полезно при сравнении результатов измерения до и после принятия мер по устранению помех, так как эти меры могут повлиять на диаграмму направленности излучения. Кроме того, магнитное поле ближней зоны резко слабеет с увеличением расстояния. Поэтому важно регистрировать измеренные значения точно в одном и том же месте.

Для снижения ВЧ излучения дифференциального режима можно уменьшить площадь контура (т.е. сблизить прямой и обратный проводник), либо уменьшить амплитуду тока в проводящем контуре, если это не повлияет на работу цепи. Кроме того, можно, например, уменьшить время нарастания/спада для передаваемых сигналов или использовать фильтрацию для подавления высокочастотных составляющих сигнала, ограничив спектр помехи.

### 2.1.2 ВЧ излучения синфазного режима

ВЧ излучения синфазного режима возникает из-за нежелательных паразитных эффектов, например, из-за индуктивности на обратном тракте тока или из-за не симметрии во время передачи сигнала. Эта проблема часто возникает в многослойных печатных платах, где отверстия или другие неоднородности в земляном слое не позволяют обратному току передаваемых сигналов протекать вблизи сигнальной дорожки. Это приводит к паразитной индуктивности в тракте обратного сигнала и, таким образом, к нежелательной разнице напряжений между различными точками земляного слоя. Если подключить кабель к такой печатной плате, он будет работать

как антенна и позволит протекать синфазному току  $I_{cm}$ . В диапазоне частот, характерном для ВЧ излучения, сигнальные дорожки и линии питания могут работать как очень эффективные антенны. Можно использовать следующее практическое правило: если длина дорожки не превосходит  $\lambda/10$ , она не критична, в то время как более длинные дорожки (например,  $\lambda/6$ ) необходимо учитывать как потенциальные источники ВЧ излучения.

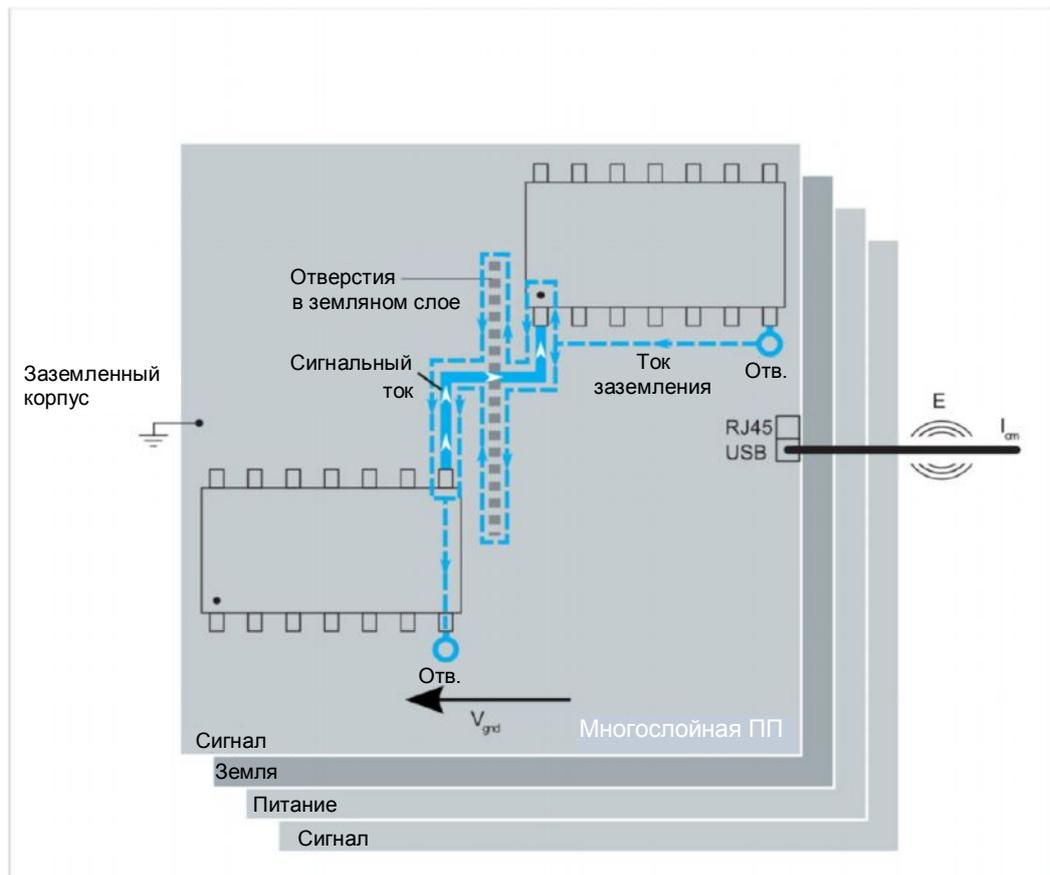


Рис. 2-3 – ВЧ излучение синфазного режима печатной платы. Его источником является отверстия в земляном слое, которые приводят к паразитной индуктивности в обратном проводнике. Это приводит к падению напряжения между различными точками земляного слоя.

Величина падения напряжения на земляном слое, а, следовательно, амплитуда синфазного тока, протекающего через соединительные линии, определяется паразитной индуктивностью и крутизной фронтов сигнала. Поэтому уменьшить ВЧ излучение синфазного режима можно, ограничив времена нарастания и спада (т.е., частотный спектр) и уменьшив импеданс на земляном слое. Так как обычно нет возможности достаточно сильно уменьшить крутизну фронтов для высокоскоростных цифровых сигналов без потери функциональности, важно особое внимание при разработке устройства уделять обратному току (создавать тракты с наименьшей возможной индуктивностью).

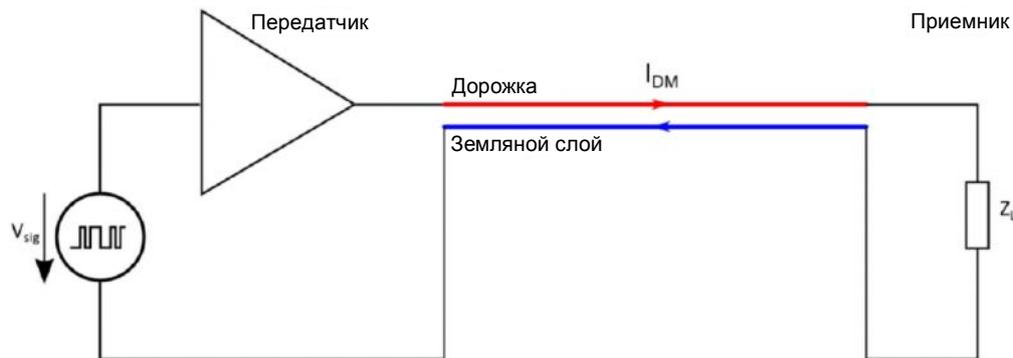


Рис. 2-4 – Идеальная передача в дифференциальном режиме: Прямой и обратный проводник расположены близко друг к другу, а генерируемое магнитное поле практически полностью нейтрализуется в дальней зоне.

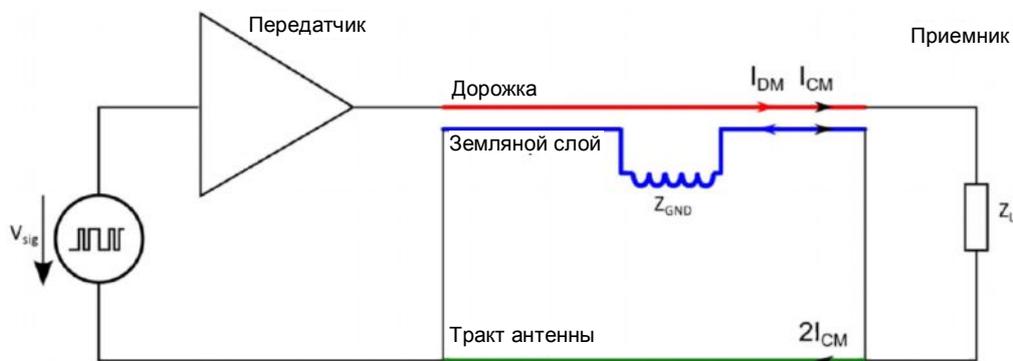


Рис. 2-5 – Формирование обратного тока синфазного режима в тракте антенны из-за паразитной индуктивности в земляном слое. Здесь "трактом антенны", как правило, является внешний проводник, который выступает в роли антенны, например, кабель питания.

На практике, ВЧ излучение синфазного режима также может возникнуть из-за передачи сигнала в дифференциальном режиме. Если паразитный импеданс нагрузки тракта передачи в дифференциальном режиме значительно отличается, помимо полезного дифференциального тока  $I_{DM}$  через земляной слой, соединяющий приемник и передатчик, также потечет синфазный ток заземления  $I_{CM}$ . Этот нежелательный ток заземления  $I_{CM}$  может затем потечь в соединительные кабели платы и вызвать излучение в дальней зоне.

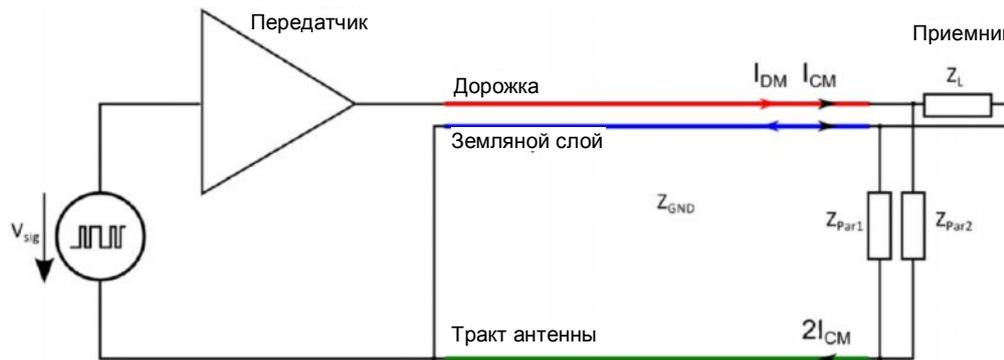


Рис. 2-6 – Несогласованный (паразитный) импеданс нагрузки линии передачи дифференциального сигнала, вызывающий нежелательный синфазный ток  $I_{CM}$ . Проводник, подключенный к земляному слою может, таким образом, функционировать как антенна, если он может захватить часть синфазного тока  $I_{CM}$ .

На практике синфазные токи являются одной из основных причин возникновения нежелательного ВЧ излучения. Для обнаружения источника ВЧ излучения синфазного режима можно использовать испытательное оборудование для измерения поля ближней зоны. Для этой цели подходят магнитные пробники поля ближней зоны, способные обнаружить синфазный ток (или его итоговое поле). При использовании компактных пробников поля ближней зоны, таких как RS-N 2.5-2, поставляемых в наборе для измерения поля ближней зоны R&S®HZ-15 (см. раздел 3.3.3), для определения тока в отдельных дорожках имеется возможность вычислить значение самого тока РЧП с помощью коэффициента преобразования. Разумеется, измерения поля ближней зоны необходимо проводить вместе с измерением синфазного тока вдоль соединительного кабеля.

Следующие действия помогут уменьшить ВЧ излучение синфазного режима:

- 1 Уменьшить ток РЧП  $I_{CM}$  с помощью оптимизации трассировки, уменьшения импеданса земляного слоя или перестановкой компонент платы
- 1 Уменьшить высокочастотные составляющие сигнала с помощью фильтрации или уменьшения времен нарастания и спада цифровых сигналов
- 1 Использовать экранирование (кабелей, корпуса и т.д.)
- 1 Оптимизировать целостность сигнала, чтобы уменьшить нежелательные выбросы («звон»), см. также раздел 2.1.4

### 2.1.3 Кондуктивное излучение

Первоисточником ВЧ излучения, как правило, являются кабели, подключенные к устройству. Электромагнитные волны в диапазоне частот от 30 МГц до 1 ГГц имеют длину волны от 10 м до 30 см. Таким образом, кабели могут эффективно излучать ток РЧП (см. раздел 2.1.2), так как их длина в стандартных испытательных установках для измерения поля дальней зоны находится в диапазоне этих длин волн.

Наиболее эффективно излучаются синфазные токи. Хотя поля, возникающие вдоль кабеля из-за дифференциальных токов, частично нейтрализуются, для синфазных токов это не так. Напряженность излучаемого поля прямо пропорциональна синфазному току.

Для определения источников помех можно использовать измерение поля ближней зоны. С помощью измерения тока РЧП в кабелях, подключенных к ИУ можно установить, являются ли эти кабели источником ВЧ излучения в поле дальней зоны.

Токовые ВЧ пробники, используемые для измерения синфазного тока, доступны в различных модификациях (для различных диаметров кабеля и диапазонов частот). Во время этих измерений необходимо учитывать, что ток РЧП распределяется по кабелю неравномерно.

### 2.1.4 Источник помех, связанный с целостностью сигнала

При передаче сигналов с очень крутыми фронтами нельзя пренебрегать скоростью распространения сигналов, т.е. временем, необходимым для передачи сигнала от передатчика к приемнику. Несогласованность импедансов в тракте передачи вызывает отражения, из-за которых часть сигнальной волны возвращается к источнику и накладывается на исходный сигнал.

При передаче цифровых сигналов это приводит к эффекту «звона» и, как следствие, к формированию помеховых сигналов, способных к излучению. Все компоненты в тракте передачи (например, передатчик, дорожка, разъем, приемник) должны иметь согласованные импедансы для обеспечения требуемой целостности сигнала, которая является важным условием достижения электромагнитной совместимости.

Если целостность сигналов нарушена, можно провести анализ с помощью измерения сигналов, например, на выходе передатчика или входе приемника. После перевода сигнала в частотную область с помощью БПФ итоговый спектр можно сравнить с результатом измерения поля дальней зоны и определить соответствующий источник помех.

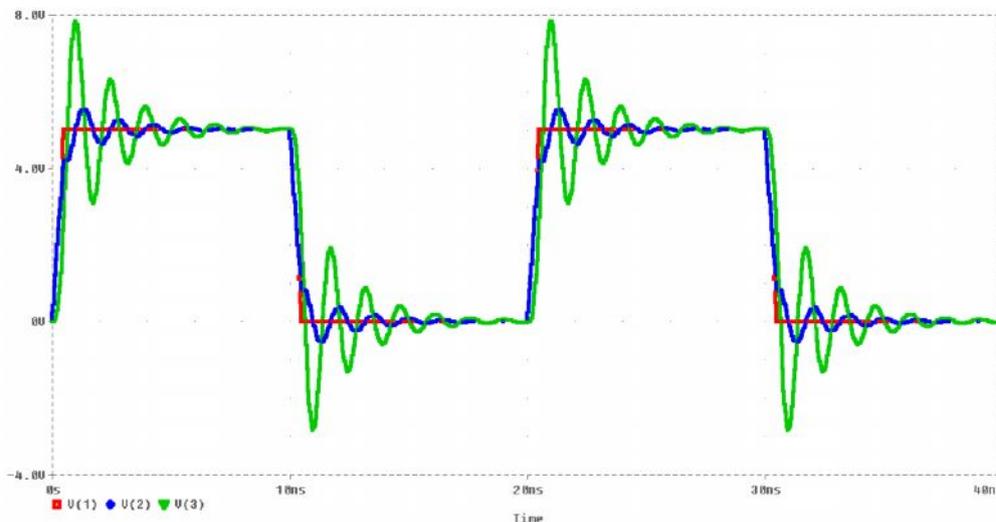


Рис. 2-7 – Моделирование эффекта «звона» в среде PSpice: передача тактового сигнала со временем нарастания/спада 0,5 нс и длительностью импульса 20 нс по 100 Ом ненагруженной линии; время распространения по линии: 0,1 нс; импеданс передатчика: 10 Ом.  
 Красный цвет – передаваемый тактовый сигнал;  
 Синий цвет – сигнал на выходе передатчика;  
 Зеленый цвет – сигнал на входе приемника.

## 2.2 Механизмы связи

Для излучения помехи, генерируемой печатной платой, мощность РЧП должна быть передана от источника на излучающий элемент. Тракт передачи называют "трактом связи", а такой тип передачи называют "механизмом связи".

В этом разделе будут рассмотрены следующие типы трактов связи:

1. Непосредственное ВЧ излучение источника, например, дорожки или отдельного компонента
2. ВЧ излучение через подключенные кабели питания, шины данных или сигнальные линии
3. Кондуктивное излучение через подключенные кабели питания, шины данных или сигнальные линии

Существуют следующие потенциальные механизмы связи:

1. Связь через общий импеданс

В этом случае источник помехи и излучающий элемент связаны через общий импеданс.

Такая ситуация встречается часто, так как в электронных системах, как правило, существует непосредственное соединение между источником помехи и излучающим элементом (например, общая земля соответствующих цифровых цепей (источник помех) и экраном кабеля или проводником заземления подключенного сигнального кабеля (антенны)).

2. Связь через поля

- а. Электрическое поле

В этом случае генерируемое электрическое поле ближней зоны излучается источником помехи. Это поле связывается с соседней цепью или излучающим элементом (например, теплоотводом) и затем передается в поле дальней зоны или излучается кондуктивно. Паразитная связывающая емкость между источником и приемником помехи влияет на передачу энергии как функция частоты.

- б. Магнитное поле

В этом случае электрические цепи формируют магнитное поле ближней зоны, которое связывается с соседним проводящим контуром или магниточувствительным компонентом. Итоговая передача энергии определяется коэффициентом связи между цепями и током в источнике помехи.

- в. Электромагнитное поле

В этом случае источник и потребитель помехи находятся далеко друг от друга, как минимум на одну  $\lambda$  или более. Генерируется как электрическое, так и магнитное поле. Источник излучает помеху непосредственно в дальнюю зону.

## 2.3 Излучающие элементы (Антенны)

Излучающими элементами в случае ЭМП чаще всего являются непредусмотренные (случайные) антенны.

Эффективность таких антенн (сопротивление излучения, коэффициент антенны) зависят от их геометрии. Основным определяющим фактором является длина антенны по сравнению с длиной волны помехи.

Антенны, длина которых составляет всего долю длины волны помехи, например,  $\lambda/6$ , уже могут эффективно излучать электромагнитное поле. На практике можно не учитывать антенны, длина которых меньше  $\lambda/10$ .

Ниже перечислены наиболее распространенные типы непредусмотренных антенн в электронном оборудовании:

- ┆ Соединительные линии (кабели питания, шины данных, сигнальные и управляющие линии)
- ┆ Дорожки и слои печатных плат
- ┆ Внутренние кабели между компонентами системы
- ┆ Компоненты и теплоотводы
- ┆ Разъемы и щели в корпусах

## 3 Методы измерения, используемые при выявлении ЭМП

### 3.1 Введение: поля ближней и дальней зоны

При испытаниях на электромагнитную совместимость анализируют только излучение ИУ в поле дальней зоны. Термин «поле дальней зоны» используется, если электрическая и магнитная составляющие поля находятся в фазе и направлены перпендикулярно направлению распространения и сформирован плоский волновой фронт. Электромагнитная волна отделилась от антенны и теперь зависит от условий распространения в среде (не зависит от характеристик источника). Для излучателей, размер которых мал по отношению к длине волны, дальняя зона начинается на расстояниях около  $\lambda / 2\pi$ , а для антенн, размер которых намного больше длины волны, дальняя зона не начинается до расстояний  $2 D^2 / \lambda$ . Здесь  $D$  означает диаметр апертуры антенны.

Измерения поля дальней зоны, которые требуются в соответствии с правилами проведения испытаний на электромагнитную совместимость, реально провести только в специализированных лабораториях (испытательные камеры или полигоны на открытом воздухе), и они являются дорогими и занимают много времени. При возникновении проблем с электромагнитной совместимостью ограничения бюджета и времени, как правило, не позволяют несколько раз посещать испытательные лаборатории для разработки и анализа улучшений конструкции. Однако существуют и другие методы измерения для анализа проблем с электромагнитной совместимостью. Измерения поля ближней зоны и тока РЧП являются привлекательной альтернативой для использования в лабораториях разработчиков.

Поле ближней зоны состоит из электрической и магнитной составляющих, которые с расстоянием уменьшаются пропорционально  $1 / r^2$  или  $1 / r^3$ . При испытаниях на электромагнитную совместимость важно лишь поле дальней зоны, которое с расстоянием уменьшается пропорционально  $1 / r$ . В поле ближней зоны характеристики электрической и магнитной составляющих еще не соответствуют волновому сопротивлению свободного пространства (377 Ом). Волна еще не отделилась от передатчика и составляющие поля все еще зависят от характеристик источника. По этой причине нельзя делать какие-либо заключения о поле дальней зоны (и, таким образом, об электромагнитной совместимости) по уровням, измеренным в поле ближней зоны.

Однако, может быть сделано обратное заключение: если мы можем измерить электромагнитные волны в дальней зоне, эти электрические и магнитные составляющие поля должны присутствовать в поле ближней зоны. Например, если испытания на электромагнитную совместимость показали, что ИУ генерирует недопустимый уровень излучения, можно использовать пробник поля ближней зоны для определения источника такого излучения.

При трактовке результатов, полученных с помощью пробника поля ближней зоны, необходимо всегда проверять наличие подходящей антенной системы (например, соединительные кабели или длинные дорожки), которая излучает в дальнюю зону. Высокие амплитуды поля ближней зоны не обязательно приводят к сильному излучению в поле дальней зоны.

В дополнении к измерению поля ближней зоны для анализа причин ВЧ излучения необходимо также проводить измерения тока РЧП, которые протекает, например, через подключенные кабели питания или сигнальные кабели ИУ.

В большинстве случаев перед анализом с помощью пробников поля ближней зоны рекомендуется провести измерения поля в дальней зоне для определения критических частот. Источник помех можно затем локализовать с помощью измерений поля ближней зоны. После обнаружения механизма связи с полем дальней зоны можно принять корректирующие меры для устранения проблемы.

## 3.2 Измерения тока и напряжения РЧП

### 3.2.1 Взаимосвязь между токами высокочастотных помех в соединительных линиях и составляющими излучаемого поля в дальней зоне

Обычно в механизме излучения участвует синфазный ток РЧП, протекающий внутри проводника или по экрану подключенных к ИУ кабелей. Так как такие кабели, как правило, имеют в длину как минимум метр, они являются эффективными антеннами в диапазоне частот от 30 МГц до 1 ГГц, который важен для электромагнитной совместимости. По существу, чаще всего они являются наиболее критическими излучающими элементами. Итоговая напряженность поля в дальней зоне прямо пропорциональна току высокочастотных помех; поэтому для достижения электромагнитной совместимости необходимо уменьшить этот ток. Следующая формула [1]

$$E[\mu V/m] = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot f[Hz] \cdot l[m] \cdot I_{cm}[\mu A] \cdot \sin(\theta) / r$$

дает простую оценку максимально допустимого синфазного тока РЧП в соединительных линиях (на основе дипольной антенны). Здесь  $l$  – длина кабеля,  $r$  – расстояния между источником и приемной антенной,  $I_{cm}$  – синфазный ток РЧП, а  $\theta$  – угол по отношению к диполю.

Для угла  $\theta = 90^\circ$ , измерения на расстоянии 3 м, частоты 100 МГц, длины кабеля 1 м и тока высокочастотных помех 2,5 мкА уровень напряженности поля ВЧ излучения составит порядка 100 мкВ/м (= 40 дБмкВ/м). Это, например, соответствует пределу класса В согласно EN55022. Таким образом, ясно, что даже ток РЧП в 2,5 мкА может привести к нарушению пределов электромагнитной совместимости.

### 3.2.2 Проведение измерений тока РЧП

С помощью измерения синфазного тока РЧП в соединительных линиях ИУ можно определить, является ли какая-либо линия источником излучения в дальней зоне и если да, то какая. Если ток радиочастотного излучения пренебрежимо мал во всех соединительных линиях, за ВЧ излучение ответственен другой механизм (например, ВЧ утечка из корпуса из-за недостаточного экранирования).

Более того, сравнивая спектр тока радиочастотного излучения со спектром поля, измеренного в дальней зоне, можно определить основной источник помех на печатной плате. Например, если в поле дальней зоны присутствует широкополосная помеха с максимальным значением в 100 МГц и помеха с похожим спектром наблюдается в поле ближней зоны, очевидно, что источник помехи можно найти в поле ближней зоны. Источники непрерывных помех можно найти аналогичным способом. Например, если в поле дальней зоны присутствует гармоника 25 МГц и в поле ближней зоны обнаружен источник помех с похожим спектральным составом, наиболее вероятно, что именно он является искомым источником помех.

Так как излучаемая электромагнитная волна в дальней зоне пропорциональна току РЧП, можно легко предложить меры по ее подавлению.

Условия повторяемости измерений являются важной составляющей таких сравнительных измерений. Важно не забывать, что ток РЧП распределен по линии неравномерно. Из-за отражения на соединительной линии может образоваться стоячая волна, которая приведет к различным токам РЧП в различных точках линии. Для возможности сравнить поле дальней зоны до и после корректирующих мер необходимо использовать токовый пробник (см. раздел 3.2.4) для определения максимального значения тока РЧП на линии (например, линии питания). Во время измерения нельзя менять длину линии. Кроме того, мешающую стоячую волну, при необходимости, можно ослабить с помощью поглощающих клещей (ферритов) на конце линии.



Рис. 3-1 – Поглощающие клещи R&S®EZ-24 для ослабления стоячих волн при измерении тока РЧП.

Обычно при измерении помехового излучения в лабораториях разработчиков важно убедиться, что измеренное излучение не является внешней помехой. Рекомендуется провести предварительные измерения с выключенным ИУ для выявления и измерения внешней помехи.

### 3.2.3 Измерение напряжения РЧП на линиях питания

Измерение напряжения РЧП также используется для определения тока РЧП, протекающего по соединительным линиям. Такие измерения проводятся на линиях питания с применением сетей стабилизации импеданса линии (line impedance stabilization networks, LISN), например, V-LISN на линиях питания переменного/постоянного тока и T-LISN на телекоммуникационных линиях. Сети стабилизации импеданса линии предназначены для моделирования импеданса сети питания или кабеля, фильтрации внешних ЭМП от подключенной сети питания и подачи ВЧ помехи, создаваемой ИУ, на измеряемый выход.



Рис. 3-2 – Двухпроводная V-сеть R&S®ENV216 для измерения кондуктивного излучения

Измерение напряжения РЧП можно использовать вместо измерения тока РЧП, а также для выявления помех при чрезмерном помеховом излучении. Важно напомнить, что сети стабилизации импеданса линии обычно используются в более низких диапазонах частот, чем стандартные токовые пробники.

### 3.2.4 Токовые пробники для измерения токов РЧП

Токовые ВЧ пробники используются для измерения токов РЧП, имеются модификации для различных диаметров кабелей и диапазонов частот. Важно учитывать следующие аспекты при выявлении ЭМП:

- 1 Внутренний диаметр пробника должен обеспечивать хорошую индуктивную связь и потому должен совпадать с диаметром кабеля.
- 1 Амплитудно-частотная характеристика должна быть максимально плоской в исследуемом диапазоне частот.
- 1 Передаточный импеданс токового пробника  $Z$  должен быть как можно выше для отображения измеренного тока как «усиленного» выходного напряжения  $V$ . Измеренный ток можно затем легко вычислить следующим образом:  

$$I_{cm} [dV\mu A] = U [dBuV] - Z [dB\Omega].$$
- 1 Токовый пробник должен иметь защелку, чтобы его можно было легко прикрепить к линии.
- 1 Примером подходящего устройства для измерения тока РЧП является токовый пробник компании Rohde & Schwarz R&S®EZ-17 с полосой пропускания от 20 Гц до 100 МГц и передаточным импедансом 10 дБОм (модель 02) или 17 дБОм (модель 03).



Рис. 3-3 – Токовый пробник R&S®EZ-17 с передаточным импедансом 10 дБом (модель 02) или 17 дБом (модель 03) и полосой пропускания от 20 Гц до 100 МГц является хорошим примером устройства, подходящего для измерений тока РЧП. Большой внутренний диаметр в 30 мм позволяет измерять кабельные бухты.

Для измерений тока можно также использовать поглощающие клещи, такие как R&S®MDS-21, или ферритовые клещи, такие как R&S®EZ-24 без измерительного выхода, вместе с токовым пробником с соответствующей чувствительностью, полосой пропускания и подходящим диаметром.

### 3.3 Анализ ЭМП с помощью пробников поля ближней зоны

Основной целью использования пробников поля ближней зоны является измерение электрического или магнитного поля, создаваемого ИУ в точно заданной области возле пробника с наивысшей чувствительностью. В таких пробниках для подавления нежелательных полей с других направлений используются специальные методы экранирования. Кроме того, пробники поля ближней зоны разработаны для измерения либо электрического, либо магнитного поля и максимального подавления второй составляющей поля. Это позволяет провести детальный анализ соответствующего поля ближней зоны и точно определить источник помехи. Существуют, например, специальные пробники поля ближней зоны, которые можно использовать для изолирования и детектирования излучения от отдельных дорожек печатной платы. Это позволяет определить дорожку, ответственную за излучения. Другие типы пробников предназначены для измерения токов утечки через выводы ИМС или развязывающие конденсаторы.

#### 3.3.1 Пробники электрического и магнитного поля ближней зоны

Пробники электрического поля ближней зоны подавляют магнитную составляющую поля и выдают выходной сигнал, пропорциональный напряженности электрической составляющей поля ( $E$ ) ближней зоны. Используя частотно-зависимый коэффициент преобразования ( $K_e$ ), можно вычислить напряженность электрического поля в ближней зоне пробника следующим образом:

$$E[\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}] = U[\text{dB}\mu\text{V}] + K_e[\text{dB}/\text{m}].$$

Пробники магнитного поля ближней зоны подавляют электрическую составляющую поля и выдают выходной сигнал, пропорциональный напряженности магнитной составляющей поля (H) ближней зоны. Используя частотно-зависимый коэффициент преобразования ( $K_h$ ), можно вычислить напряженность магнитного поля в ближней зоне пробника следующим образом:

$$H[dB\mu A/m] = U[dB\mu V] + K_h[dBA/(Vm)]$$

Магнитное поле ближней зоны вызвано ВЧ током. Используя еще один коэффициент преобразования ( $K_i$ ), так же частотно-зависимый, можно получить следующую оценку тока, вызывающего поле:

$$I[dB\mu A] = U[dB\mu V] + K_i[dBA/V]$$

Коэффициенты преобразования, как правило, предоставляются производителями пробника. Однако их также можно определить независимо, с помощью постоянного опорного поля.

Пробники магнитного поля ближней зоны обычно не являются изотропными, т.е. измеренная напряженность поля зависит от направления поля, выбранного положения пробника и, конечно, расстояния до источника. Поэтому пробник необходимо расположить непосредственно возле соответствующего источника помехи (например, дорожки) и вращать до получения максимального измеренного значения для поля. Такая процедура позволит увеличить воспроизводимость при повторе измерений, например, после применения мер по устранению помехи.

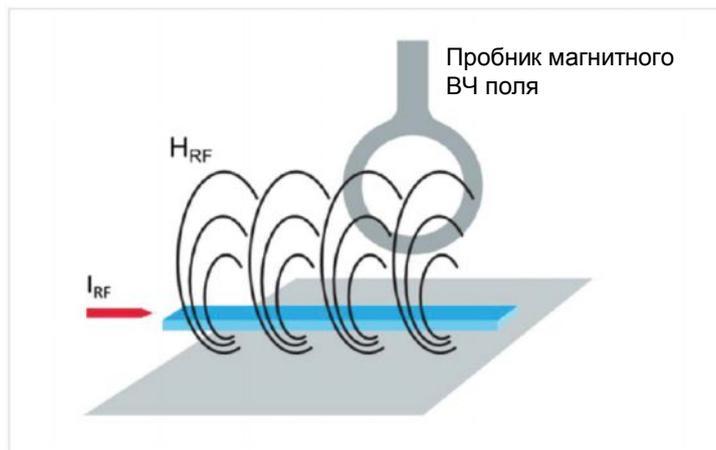


Рис. 3-4 – Формирование / ориентация магнитного поля, вызванного ВЧ током, протекающим через проводник.

Как правило, пробники магнитного поля ближней зоны имеют лучшую устойчивость к помехам, чем пробники электрического поля ближней зоны, что облегчает работу с ними. Более того, и дифференциальные, и синфазные токи РЧП вызывают преимущественно магнитное поле ближней зоны и могут быть обнаружены с помощью магнитных пробников. По этим причинам для диагностики предпочтительнее использовать пробники магнитного поля ближней зоны (вместе с измерением тока РЧП в соединительных линиях).

Пробники электрического поля ближней зоны можно использовать для проведения измерений электрического поля методом сравнения, анализа и обнаружения механизмов связи и измерения фронтов на сигнальных линиях и в системах питания постоянного тока. Они особенно полезны, когда излучение, в основном, обусловлено изменением электрического потенциала (в отличие от электрических токов). Кроме того, они часто оказываются полезны при поиске утечек в экране корпуса.

### 3.3.2 Применение пробников поля ближней зоны

Пробники поля ближней зоны полезны для детального анализа ЭМП на печатных платах. Основным их применением является локализация источников помех и поиск механизмов устранения связи.

#### 1 Локализация источников помех на печатных платах

В зависимости от конкретного используемого пробника поля ближней зоны пространственная область, в которой пробник способен обнаружить электрическое или магнитное поле, неизбежно мала. Перемещая пробник поля ближней зоны вдоль печатной платы ИУ можно обнаружить место, в котором анализируемый спектр помехи имеет максимальное значение. Таким образом, часто можно обнаружить источник помехи, вызывающие проблемы в дальней зоне. Им может оказать отдельная дорожка, системы шин, слои питания, металлические корпуса, теплоотводы и даже переключающиеся транзисторы.

Пробник поля ближней зоны можно также использовать для изучения распределения тока в земляном слое. Таким способом можно определить, протекает ли обратный ток по намеченному пути или имеет непреднамеренное распределение из-за неоднородностей в земляном слое.

Анализ развязывающих конденсаторов позволяет оценить эффективность мер по развязке питания. Используя пробник магнитного поля ближней зоны, такой как RS-N 2.5 из набора пробников ближней зоны R&S®HZ-15, можно измерить ток через развязывающий конденсатор и определить, насколько хорошо он подавляет излучение. При высоких значениях тока, развязка, как правило, работает более эффективно. Выбирая тип развязывающего конденсатора, изменяя его значение и, при необходимости, схему подключения к линии питания, можно максимизировать измеренный ток через конденсатор и таким образом определить его развязывающий эффект.

#### 1 Поиск механизмов устранения связи

Вместе с измерением тока РЧП в соединительных линиях пробники поля ближней зоны можно использовать для проверки наличия механизма связи между измеренным полем ближней зоны и полем дальней зоны соединительных линий. Если такого механизма нет, пробник поля ближней зоны можно использовать на разъемах корпуса, чтобы проверить, не является ли плохое экранирование источником нежелательного излучения в дальней зоне.

После обнаружения источника помех и механизма устранения связи необходимо найти способ решить проблему. К этим способам относятся (например):

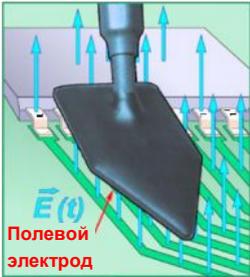
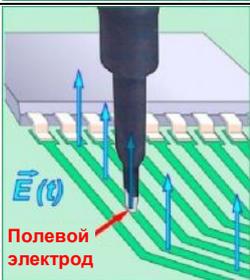
- 1 Проверка целостности сигнала в критических трактах передачи ИУ. Здесь типичной проблемой является «звон», вызванный, например, несогласованной нагрузкой на линии передачи.
- 1 Уменьшение крутизны фронтов или фильтрация передаваемого сигнала для понижения амплитуд гармоник. Гармоники выше определенного порядка, как правило, не оказывают существенного влияния на целостность сигнала, но более легко излучаются из-за своей высокой частоты
- 1 Изменение трассировки, например, оптимизация разводки обратного тока при использовании односторонней (несимметричной) передачи сигнала

- l Доработка способа подачи питания на критические компоненты (конструкции шины питания)
- l Экранирование и фильтрация линий, например, с использованием ферритов с поверхностным монтажом, синфазных дросселей или кабельных ферритов
- l Улучшение экранирования корпуса

### 3.3.3 Набор пробников поля ближней зоны R&S®HZ-15

Набор различных пробников поля ближней зоны может быть очень полезным при выявлении ЭМП. Набор R&S®HZ-15 состоит из двух пробников электрического и трех пробников магнитного поля ближней зоны различных размеров, идеально подходящих для поиска ЭМП.

Таблица 3-1 – Набор пробников поля ближней зоны R&S®HZ-15.

<p><b>RS-E 02:</b> Крупный пробник поля ближней зоны для измерения электрических полей объектов, имеющих большую площадь поверхности (например, шины адреса или данных, теплоотводы, участки печатных плат). Электрические поля измеряются нижней частью пробника, верхняя часть экранирована. При возможности пробник следует полностью разместить на ИУ. Это поможет уменьшить погрешность измерений, возникающую из-за неопределенного расстояния между пробником и источником (или излучающим элементом).</p>	
<p><b>RS-E 10:</b> Пробник поля ближней зоны с очень высокой пространственной избирательностью для измерения электрических полей. Экранирование пробника подавляет поля от соседних структур. Пространственное разрешение примерно в 0,2 мм позволяет обнаружить в шине дорожку с наибольшим уровнем помех.</p>	
<p><b>RS-H 400-1:</b> Пробник магнитного поля ближней зоны, обладающий высокой чувствительностью, но сравнительно низкой пространственной избирательностью. Он очень полезен для проведения начального анализа в случаях, требующих грубых измерений и локализации помех. Этот пробник обладает направленностью, поэтому во время измерений его необходимо вращать до получения максимального значения поля.</p>	
<p><b>RS-H 50-1:</b> Пробник магнитного поля ближней зоны, обладающий значительно более высоким разрешением, чем RS-H 400-1, но также и значительно более низкой чувствительностью. Этот пробник обладает направленностью, поэтому во время измерений его необходимо вращать до получения максимального значения поля.</p>	
<p><b>RS-H 2.5:</b> Пробник магнитного поля ближней зоны с высоким пространственным разрешением; особенно полезен для измерения ВЧ токов внутри и вдоль проводящих дорожек, компонентов и их выводов, а также для обнаружения помех в системах шин. Может также использоваться для измерения тока на поверхности корпуса или через конденсаторы. Состоит из стержня со щелью в 0,5 мм. Магнитное поле детектируется на щели (белая линия). Щель пробника располагают непосредственно на источнике помех. Этот пробник обладает направленностью, поэтому во время измерений его необходимо вращать до получения максимального значения поля.</p>	

## 4 Практические аспекты выявления ЭМП с помощью цифрового осциллографа R&S®RTO

### 4.1 Основная процедура выявления ЭМП в лабораториях разработчиков

Следующая блок-схема демонстрирует основную процедуру выявления ЭМП. Как правило, весь процесс основан на результатах измерения поля дальней зоны, которые содержат согласованную со стандартом информацию о критических частотах.



Сам процесс выявления ЭМП начинается после получения результатов измерения поля в дальней зоне. Рекомендуется следующая процедура:

1. Опорные измерения с выключенным ИУ для идентификации внешнего излучения

Перед выявлением ЭМП в лаборатории разработчика рекомендуется провести измерения с выключенным ИУ. Благодаря этому ВЧ излучение от другого оборудования в лаборатории или от радиослужб не будет ошибочно принято за ВЧ излучение ИУ. Это ключевой этап при измерениях с помощью пробников электрического поля ближней зоны, а также при измерениях тока РЧП в линиях. Пробники магнитного поля ближней зоны обычно не чувствительны к внешнему ВЧ излучению.

2. Измерение тока РЧП в подключенных устройству кабелях

Часто подключенные к устройству кабели оказываются искомыми излучающими элементами. Измерение тока РЧП используется для определения кабеля, излучающего помеховый сигнал в дальнюю зону. После обнаружения источника на печатной плате можно проследить механизм связи от источника помех на плате к излучающему элементу. Механизм связи играет важную роль при снижении ВЧ излучения.

3. Измерение поля ближней зоны с использованием различных пробников для определения источника помех

На этом этапе рекомендуется начать поиск источника помех на печатной плате с использованием большого пробника магнитного поля ближней зоны, такого как рамочная антенна RS-H 400-1 (R&S®HZ-15). Затем, переключившись на рамочные антенны меньшего размера, такие как RS-H 50-1 и RS-H 2.5, можно локализовать источник помех (см. стр. 22).

Рекомендуется использовать пробники магнитного поля ближней зоны, так как они обладают меньшей чувствительностью к нежелательному излучению по сравнению с пробниками электрического поля ближней зоны.

4. Анализ возможных мер по устранению помех

После определения источников помех, механизмов связи и излучающих элементов можно разработать и реализовать меры по их устранению. Для изучения эффекта предложенного решения на ВЧ излучения можно использовать пробники поля ближней зоны или даже токовые пробники для измерений тока РЧП. Таким образом, проводить измерения методом сравнения с помощью пробника поля ближней зоны важно всегда в одной и той же точке, сам пробник необходимо вращать до обнаружения максимального значения. Необходимость в этом возникает из-за того, что возможные решения могут изменить поляризацию ВЧ излучения. Аналогично, во время измерений тока РЧП в соединительных линиях важно всегда определять локальный максимум тока.

## 4.2 Использование осциллографа R&S®RTO для выявления ЭМП

### 4.2.1 Основные настройки осциллографа

С помощью следующих коротких этапов настройки можно настроить осциллограф R&S®RTO для выявления ЭМП:

- l Нажать PRESET для восстановления стандартных настроек
- l Подключить токовый пробник (для измерения тока РЧП) или пробник поля ближней зоны к любому входному каналу
- l Выбрать вертикальное разрешение в диапазоне от 1 мВ/дел до 5 мВ/дел для максимальной чувствительности
- l Выбрать связь по 50 Ом (для согласования с выходным импедансом используемого токового пробника или пробника поля ближней зоны)
- l Установить строчную развертку порядка 50 мкс/дел. Это позволит обнаружить помехи, возникающие по крайней мере один раз на интервале записи сигнала 0,5 мс
- l Включить режим БПФ (выбрать символ БПФ на панели инструментов и нажать на требуемый входной сигнал)
- l Включить цветовую таблицу для отображения БПФ спектра (меню: Display – Signal Colors – Enable Color Table)

Эти базовые настройки обеспечат возможность удобного измерения ВЧ излучения с высокой чувствительностью. В то же самое время автоматически активируется функция наложения БПФ с большим числом отдельных спектров. С помощью цветовой таблицы можно легко наблюдать изменения во времени спектра ВЧ излучения.

#### 4.2.2 Специальные функции осциллографа R&S®RTO для выявления ЭМП

##### Широкая полоса захвата и удобная навигация в диапазоне частот

Важным преимуществом использования осциллографа R&S®RTO при анализе ЭМП является широкая полоса захвата вместе с функцией анализа спектра. Благодаря этому можно за один раз измерить весь спектр входного сигнала (ширина ограничена только полосой пропускания осциллографа). В отличие от работы с анализатором спектра, при локализации ВЧ излучения на печатной плате нет необходимости включать функцию поиска и удержания максимума и ожидать завершения обработки всего спектра. Пробник поля ближней зоны можно без задержки перемещать вдоль печатной платы, постоянно наблюдая весь спектр.

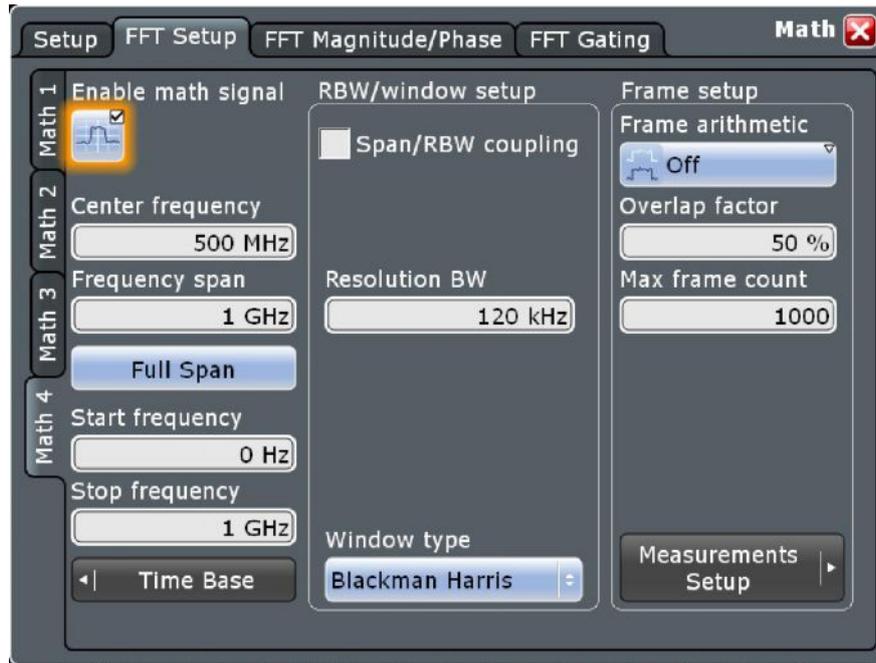


Рис. 4-1 – Диалоговое окно настройки параметров БПФ: доступные настройки схожи с настройками анализатора спектра.

Функция БПФ осциллографа R&S®RTO работает так же, как у анализатора спектра. Т.е. можно напрямую установить начальную и конечную частоту (или центральную частоту), полосу пропускания и полосу разрешения. Настройки временной области (требуемая длина выборки) подстраиваются автоматически. Это значительно упрощает навигацию в диапазоне частот.

При активации функции "Span/RBW coupling" появляется диалоговое окно ввода для установки фиксированного соотношения между полосой обзора и полосой разрешения. Этим гарантируется, что при изменении полосы обзора полоса разрешения подстроится соответствующим образом, обеспечивая корректное отображение на экране.

Группа параметров "Frame setup" используется для настройки функции наложения результатов БПФ (см. ниже).

#### Наложение результатов БПФ с цветовым кодированием отображения спектральных составляющих

Еще одной ключевой особенностью функции БПФ осциллографа R&S®RTO является наложение результатов БПФ. Эта автоматически активирующаяся функция позволяет просматривать временные характеристики спектра. Полученный сигнал разбивается на последовательность сегментов, и спектр вычисляется для каждого сегмента. Число сегментов вычисляется автоматически на основе заданных настроек (полоса обзора и требуемая полоса разрешения). Так, меньшая полоса разрешения требует большей длины сегмента и, соответственно, меньшее число сегментов (в случае фиксированной длины записи).

Итоговые спектры затем при отображении накладываются с использованием схемы цветового кодирования. Часто встречающиеся частотные составляющие отображаются разными цветами, чтобы их можно было отделить от более редко встречающихся частотных составляющих.

Таким образом, можно сразу сказать, вызвано ли данное излучение тактовой линией с постоянной частотой или связано с единичным возмущением.

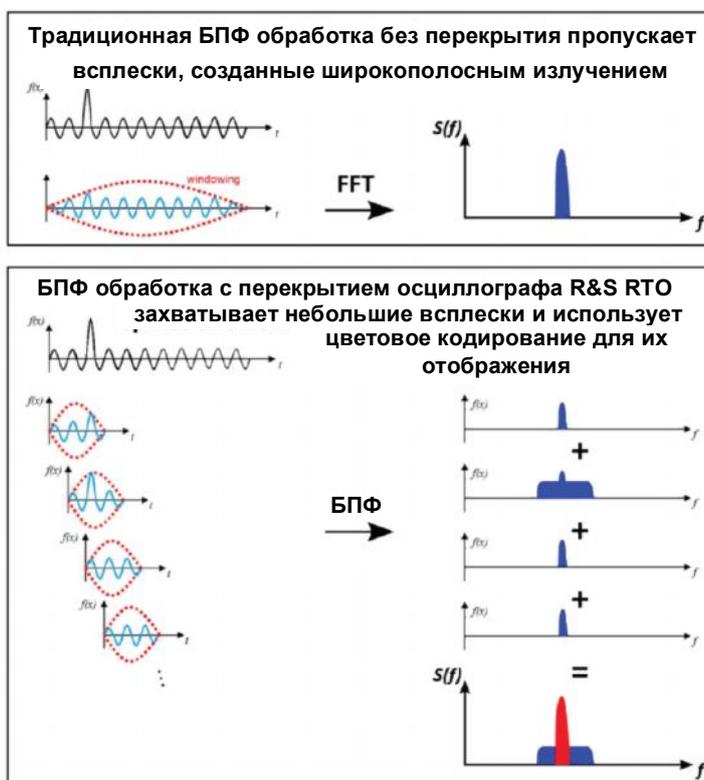


Рис. 4-2 – Работа БПФ с перекрытием: часто встречающиеся частотные составляющие отображаются цветом, отличным от цвета более редко встречающихся частотных составляющих, относящихся к одиночным сигналам.

Группа параметров "Frame Setup" (см. Рис. 4-1) используется для установки параметров функции перекрытия БПФ. Термин "Frame" (кадр) относится к автоматически сгенерированным сегментам временной функции. С помощью параметра "Frame Arithmetic" можно задать одновременное отображение спектров всех отдельных сегментов сигнала (выбрано "Off") или отображение одного усредненного спектра. Параметр "overlap factor" (коэффициент перекрытия) задает величину перекрытия отдельных сегментов сигнала. Обычно достаточно установить значение 50 %, чтобы детектировались и отображались даже те спектральные составляющие, которые возникают в зоне перекрытия. При необходимости, этому параметру можно задать любое значение в диапазоне от 0 до 99 %.

Параметр "maximum frame count" (максимальное число кадров) ограничивает максимальное число генерируемых сегментов. Благодаря этой функции даже в случае очень большой полосы разрешения (и, соответственно, очень маленькой длины сегмента или очень большого числа сегментов) не возникает чрезмерного числа обрабатываемых сегментов. Максимальное значение параметра равно 10000 сегментов, что обеспечивает быстрое отображение спектра. Если ограничить число сегментов, в диалоговом окне настроек БПФ, появится предупреждающее сообщение ("Maximum frame count reached! Frame coverage 19 %") (Максимальное число кадров! Перекрытие 19%). Процент показывает часть сигнала, которая все еще используется для вычисления спектра (начиная с начала захвата).

### Стробирование (ограничение по времени) БПФ для коррелированного анализа во временной области

Функция стробирования "gated FFT" позволяет использовать для спектрального анализа только указанную часть сигнала. Она дает возможность получать точную корреляцию между редко встречающимся спектром и сигналами во временной области. Параметры функции задаются в диалоговом окне настройки БПФ (см. ниже).

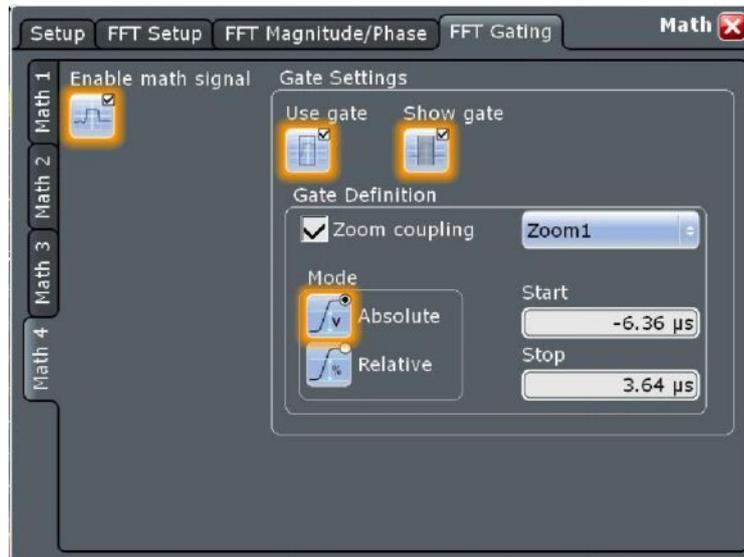


Рис. 4-3 – Функция стробирования БПФ: Настройки задаются в диалоговом окне FFT. Опция связи с масштабированием "Zoom Coupling" позволяет автоматически связать область стробирования с областью в окне масштабирования.

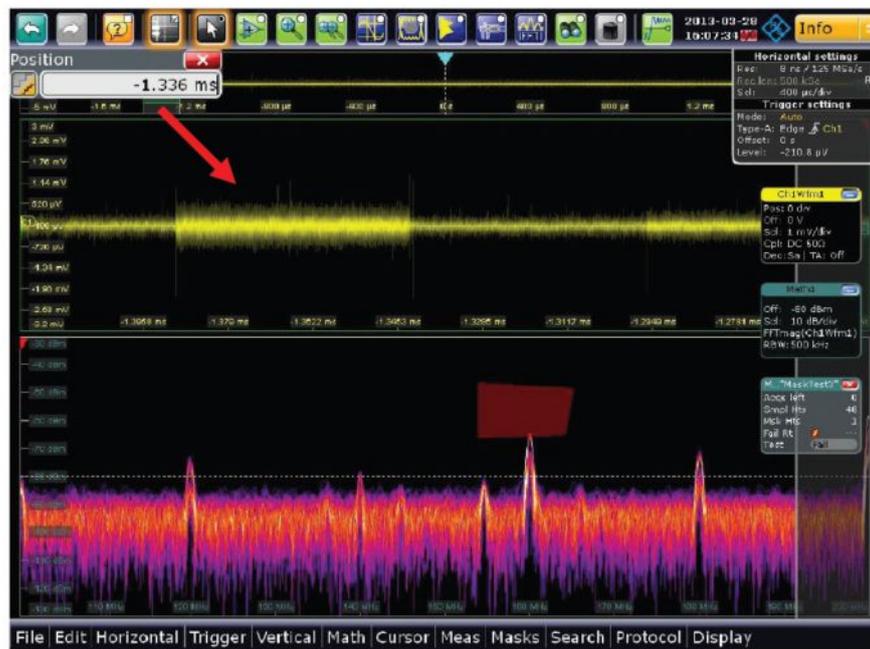


Рис. 4-4 – Стробирование БПФ по окну масштабирования: отображаемый спектр автоматически ограничивается сигналом в окне масштабирования. Медленно сдвигая окно можно точно определить, какая спектральная составляющая присутствует в окне масштабирования.

### Частотные маски для детектирования редких событий по запуску

Функция маскирования осциллографа R&S®RTO можно использовать как в частотной, так и во временной области. С помощью функции "Stop-On-Violation", которая задается в диалоговом окне настроек маски, можно легко обнаружить редко встречающиеся спектральные составляющие. Осциллограф автоматически останавливает захват данных, если спектральная составляющая попадает в маску. Таким образом, можно легко провести подробный анализ редко встречающегося излучения.

Так как спектр вычисляется по сохраненным сигналам временной области с помощью БПФ, изменить такие параметры, как полоса обзора или полоса разрешения, можно даже после завершения захвата данных. Единственное требование в данном случае, чтобы частота дискретизации и длина выборки соответствовали требуемой полосе обзора и полосе разрешения.

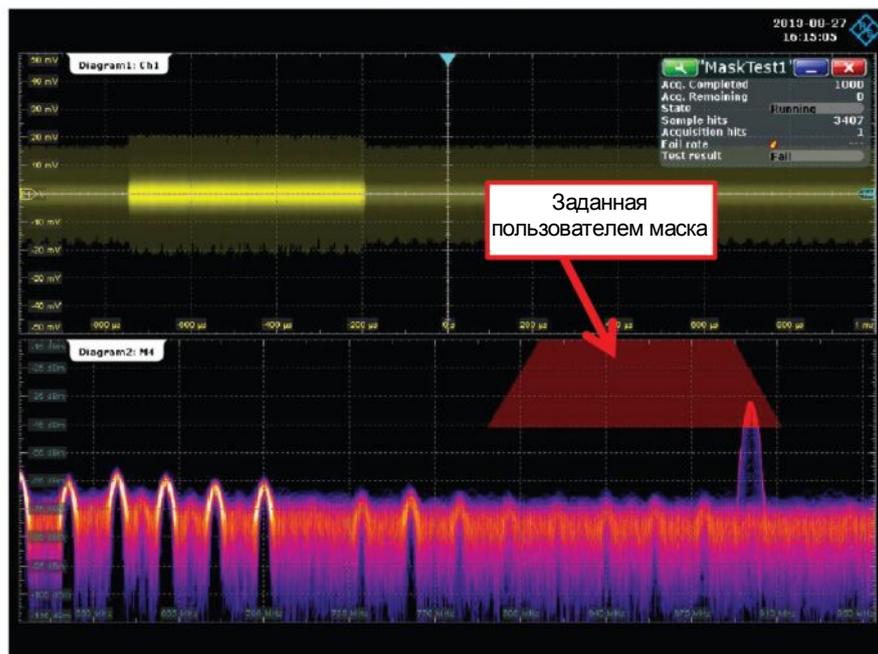


Рис. 4-5 – Захват редко встречающейся спектральной линии: Нарушение границ маски останавливает захват данных для детального изучения сигнала.

### Увеличение максимальной длины записи БПФ экрана для измерения длительных сигнальных последовательностей

Иногда необходимо увеличить максимальную длину записи для вычисления БПФ. Это можно сделать с помощью параметра "Record length limit" (предельное значение длины записи) диалогового окна настройки горизонтальной оси. По умолчанию, он равен 1 млн. отсчетов для быстрого вычисления БПФ. При использовании четырехканального осциллографа R&S®RTO с расширением памяти R&S®RTO-B101 этот параметр можно увеличить до 25 млн. отсчетов.

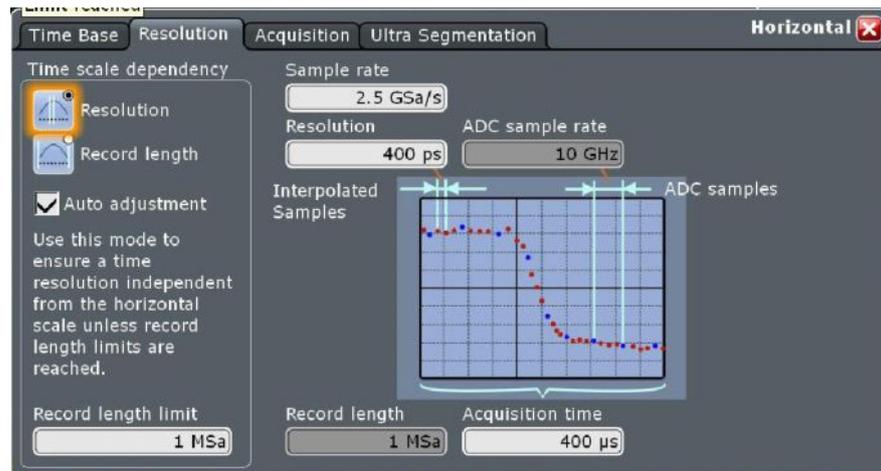


Рис. 4-6 – Установка максимальной длины записи.

### Ограничения использования осциллографов для выявления ЭМП

Осциллограф с мощной функцией спектрального анализа является очень полезным прибором для выявления ЭМП. Тем не менее, осциллограф не является заменой тестовому приемнику. Поэтому нельзя забывать об ограничениях, возникающих при использовании осциллографа. К ним относятся:

- I Ограниченный динамический диапазон
 

Осциллографы, как правило, используют АЦП со значительно меньшим разрешением, чем тестовые приемники, а, следовательно, обладают значительно меньшим динамическим диапазоном. Обычно при выявлении ЭМП это не играет роли, так как в большинстве случаев интересуются только максимальным излучением.
- I Отсутствует преселекция
 

Осциллографы не оснащены преселекторами. Поэтому сильные помехи за пределами анализируемого диапазона частот могут привести к нежелательным интермодуляционным составляющим, попадающим в исследуемую полосу частот. При выявлении ЭМП с помощью пробников поля ближней зоны это обычно не является ограничивающим фактором, так как пространственная избирательность таких пробников гарантирует, что ВЧ излучение измеряется лишь в непосредственной близости от местоположения пробника.
- I Отсутствие детекторов, соответствующих стандартам
 

Не смотря на то, что осциллограф R&S®RTO рассчитывает усредненное значение и имеет среднеквадратичный детектор, он не совместим со стандартом международного специального комитета по радиопомехам (CISPR). Тем не менее, при выявлении ЭМП, как правило, детектор, совместимый со стандартом CISPR, не требуется.

### 4.2.3 Советы по выявлению ЭМП с помощью осциллографа R&S®RTO

- I Избегать перегрузок
 

Чтобы функция спектрального анализа обеспечивала корректные результаты, необходимо убедиться, что осциллограф не перегружен. Перегрузка возникает, если измеряемый сигнал больше не может целиком отображаться на экране. Это очень важно при работе с пробниками поля ближней зоны, так как возникает большая разница в амплитудах, что легко может вызвать перегрузку. Помимо ложных спектральных составляющих, в случае перегрузки можно также

получить ложные результаты для спектральной плотности мощности. Чтобы избежать подобной ситуации, вместе со спектром на экране всегда необходимо отображать временную осциллограмму сигнала. При перегрузке необходимо уменьшить вертикальную чувствительность осциллографа.

- 1. Единицы измерения, отображаемые на экране БПФ спектра, можно изменить в диалоговом окне настройки спектрального анализа на дБмкВ, как принято при испытаниях на электромагнитную совместимость.

### 4.3 Практический пример: выявление ЭМП на IP-телефоне

В этом разделе приведен практический пример, иллюстрирующий использование осциллографа R&S®RTO для анализа ЭМП. Начиная с результатов испытаний на электромагнитную совместимость, будет показано, как провести анализ ЭМП с помощью измерений тока РЧП, используя пробник поля ближней зоны прямо на рабочем месте разработчика.



Рис. 4-7 – Испытательная установка для выявления ЭМП на современном IP-телефоне. В этом примере подключен токовый пробник для измерения синфазного тока РЧП в соединительных линиях.

В качестве ИУ выступает IP-телефон, состоящий из базовой станции и блока расширения. Каждое из этих двух устройств имеет блок управления и экран. Устройства не экранированы и соединены между собой неэкранированным кабелем. Базовая станция подключена к двум линиям LAN (Gigabit Ethernet, Power-over-Ethernet), а также к внешней сети питания. Кроме того, есть кабельное подключение к экрану и трубке.

Базовая станция содержит процессор с памятью DDR2, Ethernet-коммутатор 2 уровня, два модуля Gigabit Ethernet PHY для работы через LAN интерфейс, различные преобразователи постоянного напряжения, драйвер управления экраном, интерфейс SPI для блока расширения, а также аналоговые цепи для громкоговорителя и микрофона (режим гарнитуры). Блок расширения состоит из драйвера экрана, модуля интерфейса SPI и декодера ключа.

### 4.3.1 Результаты анализа поля дальней зоны

Целью проведения испытаний на электромагнитную совместимость, проведенных в испытательной лаборатории (измерение поля дальней зоны), является выявление критических частот и абсолютного значения разницы с допустимыми пределами.

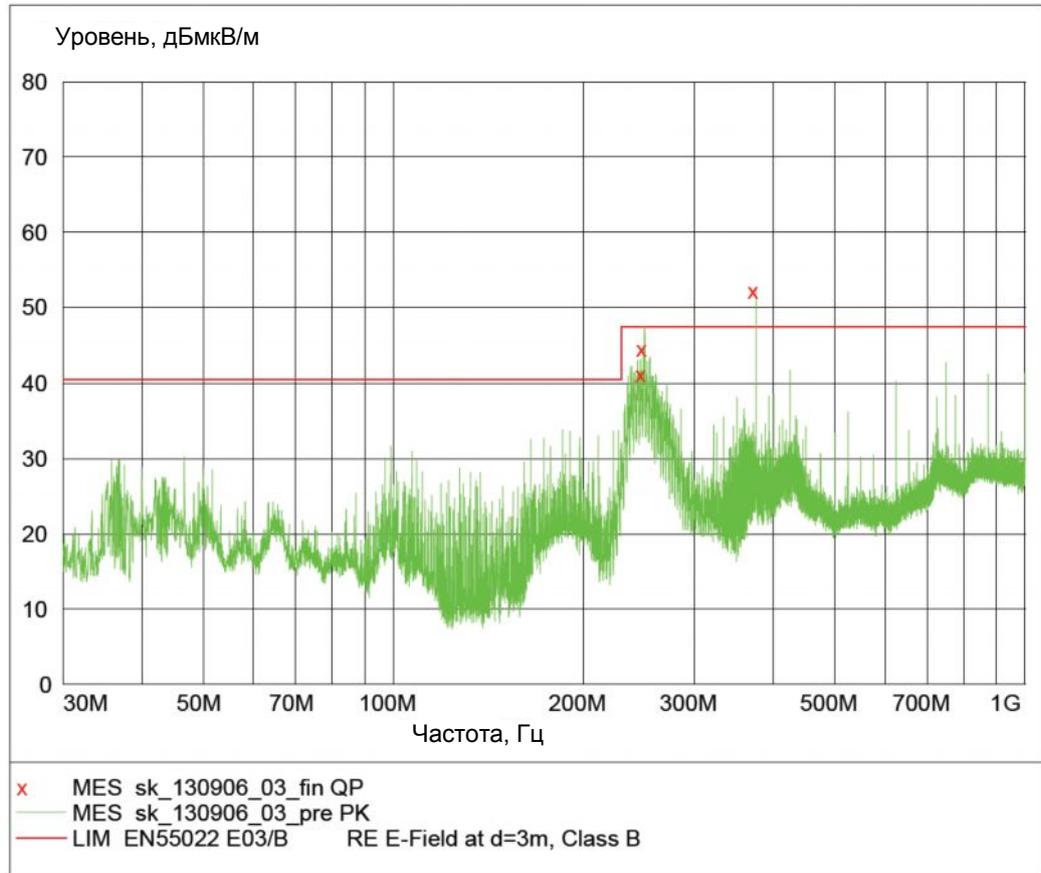


Рис. 4-8 – Результаты испытаний на электромагнитную совместимость.

Таблица 4-1 – Сводная таблица результатов измерения поля дальней зоны. Есть три критических частоты. Кроме того, есть широкополосный помеховый сигнал на частоте 250 МГц, который не превышает пределов, но с уровнем излучения лишь немногим меньше пределов.

Частота	Уровень	Преобр.	Предел	Разница	Высота	Азимут	Поляризация
МГц	дБмкВ/м	дБ	дБмкВ/м	дБ	см	град	
248,68	41,20	17,50	47,50	6,30	0,0	157,00	Горизонтальн.
250,00	44,50	18,00	47,50	3,00	0,0	293,00	Горизонтальн.
375,00	52,30	20,30	47,50	-4,80	0,0	359,00	Горизонтальн.

Результаты испытаний на электромагнитную совместимость показывают, что необходимо определить источники узкополосных помех на частотах 250 МГц, 375 МГц и других гармониках частоты 125 МГц. Кроме того, так же важно провести анализ источника широкополосной помехи на частоте 250 МГц. При определенных условиях, широкополосная помеха, пока еще не превышающая пределы, может легко сгенерировать излучение, превосходящее пределы при новом измерении поля дальней зоны в испытательной лаборатории.

Для более полного решения проблемы важно также определить механизм связи с дальней зоной. Полезно провести следующий предварительный анализ:

Длина волны самой высокой критической частоты (375 МГц) равна 80 см. На такой частоте длина эффективной антенны должна быть по крайней мере  $\lambda/6$ , т.е. порядка 13,3 см. Учитывая, что на печатной плате нет дорожки такой длины, можно предположить, что ВЧ излучение вызывает кабель, подключенный к прибору. Тем не менее, важно не забывать о других потенциальных излучателях, таких как теплоотводы и механические компоненты. Помеховые сигналы могут связываться с этими элементами, вызывая ВЧ излучение.

#### 4.3.2 Измерения тока РЧП в соединительных линиях

На первом этапе проводится измерение уровня помех во всех соединительных линиях и определение максимума. Наибольший ток РЧП протекает через синий кабель LAN (см. рис. 4-9). Этот кабель является критической антенной для устранения связи с дальней зоной. Для измерений использовался токовый пробник с передаточным импедансом 20 дБом. Предусилитель не использовался. Таким образом, уровень тока РЧП можно вычислить напрямую как отображаемый на экране осциллографа уровень напряжения (в дБмкВ) минус 20 дБ. В описанном ниже примере вычисленный ток равнялся 14 дБмкА (или 5 мкА), исходя из отображаемого уровня напряжения в 34 дБмкВ на 375 МГц. Это уже критический уровень, согласно оценке, приведенной в разделе 3.2.1.

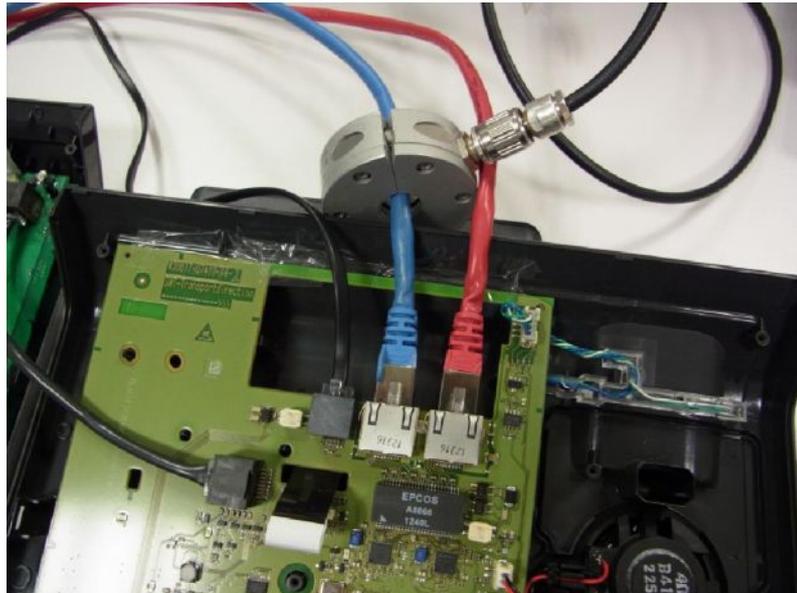


Рис. 4-9 – Измерение тока РЧП в кабеле LAN с помощью специального токового пробника.

Помимо излучений на частоте 250 МГц и 375 МГц, которые были обнаружены в поле дальней зоны, можно также наблюдать и другие излучения, такие как широкополосная помеха на частоте 360 МГц. Последняя, однако, не является проблемой для электромагнитной совместимости (см. измерения поля в дальней зоне) и поэтому в дальнейшем не учитывается.

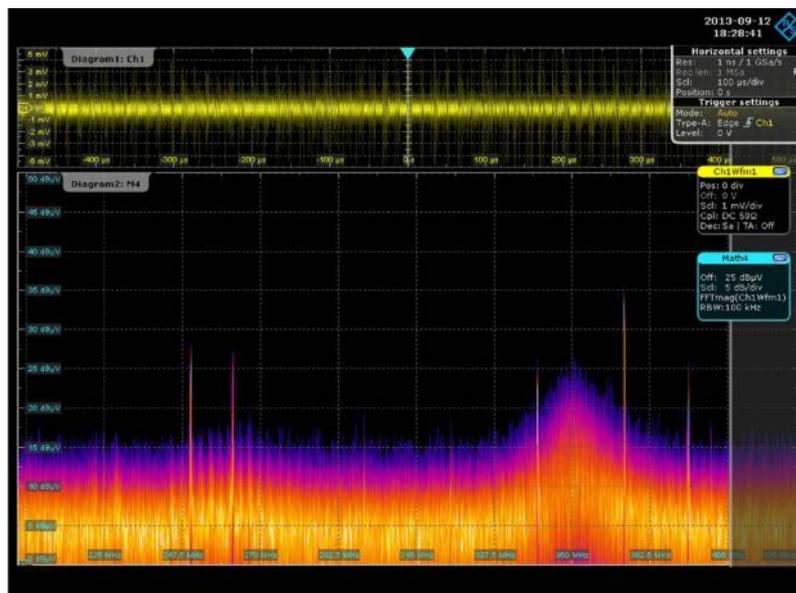


Рис. 4-10 – Результаты измерения тока РЧП в синем кабеле LAN в диапазоне частот от 200 МГц до 425 МГц. Ясно видны максимумы на частотах 250 МГц, 262 МГц, 350 МГц, 375 МГц и 400 МГц вместе с очевидной широкополосной помехой на частоте 360 МГц.

Если ожидается присутствие как одиночной, так и постоянной помехи (либо если одиночная помеха была обнаружена во время измерения поля дальней зоны), можно использовать детектор удержания максимума (см. раздел 4.2) для измерения и отображения также и этого типа помехи. Так как ток РЧП распределен по кабелю неравномерно, во время измерений токовый пробник смещался вдоль кабеля; максимальное значение было затем получено с помощью функции удержания максимума. Для текущего ИУ, тем не менее, новых одиночных помех с помощью функции удержания максимума получено не было.

Однако, хорошо видно, что максимальный ток РЧП (красная спектральная линия) значительно отличается от измеренного в текущем местоположении токового пробника (спектр с цветовым кодированием).

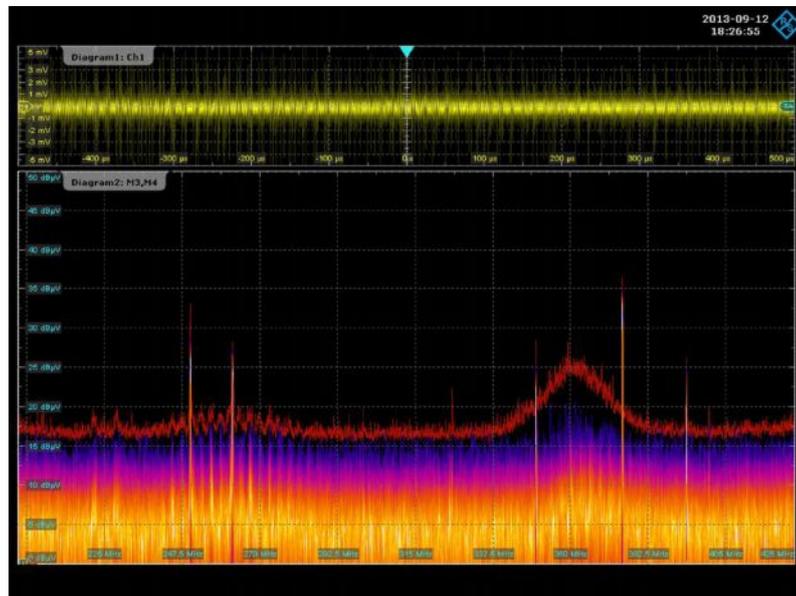


Рис. 4-11 – Спектральный анализ с помощью осциллографа R&S®RTO с двумя спектрами на одной диаграмме: текущий измеренный спектр с цветовым кодированием отображения (желтый-красный-синий) и спектр, полученный при использовании функции удержания максимума (красная огибающая).

Можно получить четкое визуальное различие между широкополосной и узкополосной помехой, увеличивая полосу измерения. На основе цветового кодирования, изображение спектра с постоянным присутствием будет отличаться от одиночного спектра. В приведенном ниже примере белая линия на частоте 375 МГц представляет постоянный спектр, создаваемый тактовым сигналом с постоянной частотой. Синие спектральные составляющие на интервале анализа возникают редко.

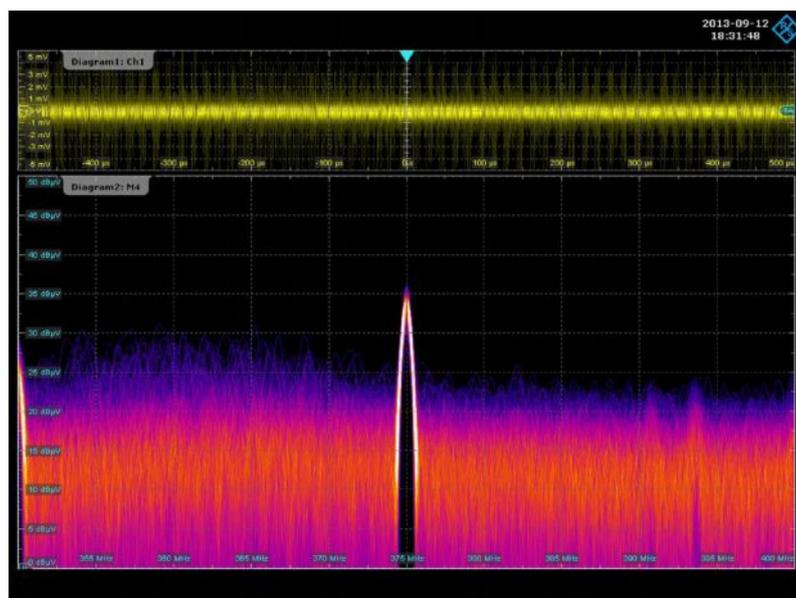


Рис. 4-12 – Постоянная помеха на частоте 375 МГц: белая линия показывает, что эта спектральная составляющая присутствует постоянно. Гармоники этого типа часто возникают из-за тактовых сигналов.



Рис. 4-13 – Ток РЧП, измеренный в кабеле телефонной трубки.

Измерения тока РЧП в кабеле телефонной трубки выявили сильный ток РЧП на 375 МГц; также видна широкополосная помеха на 250 МГц. Таким образом, кабель трубки также является важным излучающим элементом. Так как широкополосная помеха на 250 МГц не видна в других кабелях, очевидно, что она излучается кабелем трубки.

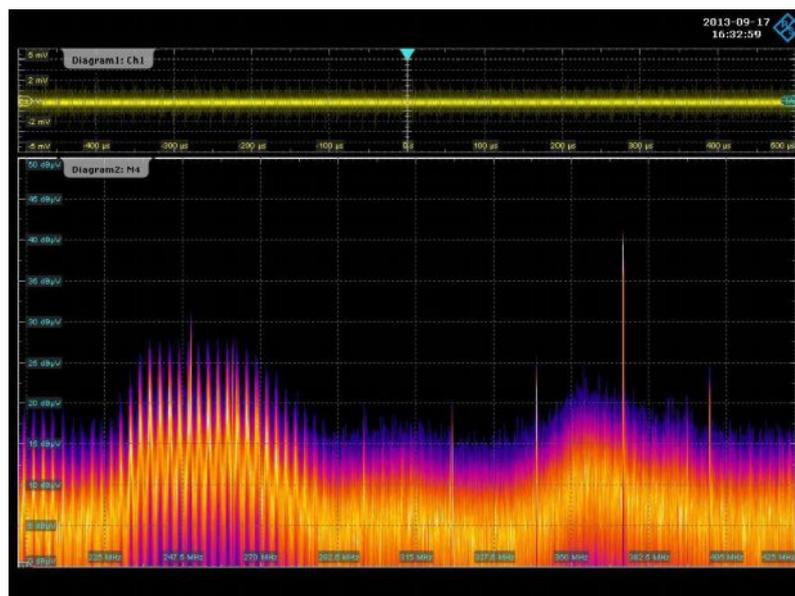


Рис. 4-14 – Результат измерения тока РЧП в кабеле трубки: помимо постоянной помехи на 375 МГц также ясно видна широкополосная помеха на 250 МГц.

При использовании рассмотренных измерений тока РЧП удалось показать, что соединительные линии являются одним из основных источников ВЧ излучения в дальнюю зону. Это следует из амплитуды измеренных токов РЧП (пример: рис. 4-13; измеренное напряжение в точке подключения токового пробника на 375 МГц равно 40 дБмкВ; исходя из передаточного импеданса в 20 дБом это приводит к току РЧП в 20 дБмкА или 10 мкА).

### 4.3.3 Анализ поля ближней зоны

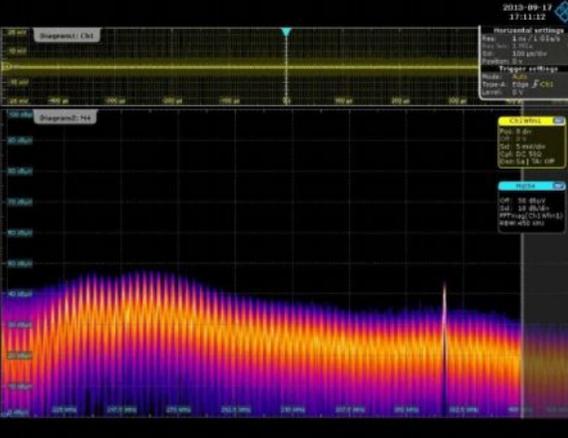
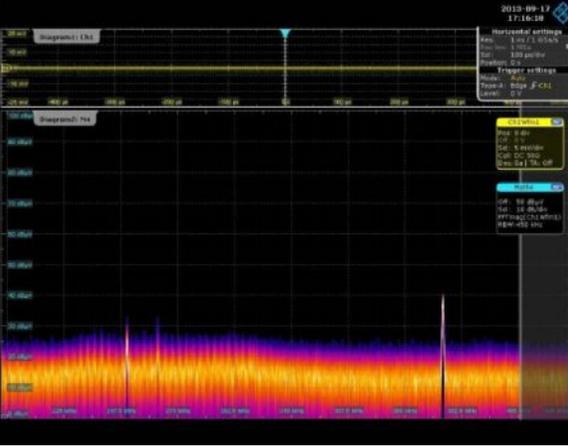
При помощи пробника поля ближней зоны были выявлены источники помех и механизмы связи. Для этого были слегка изменены настройки осциллографа, особенно следующие:

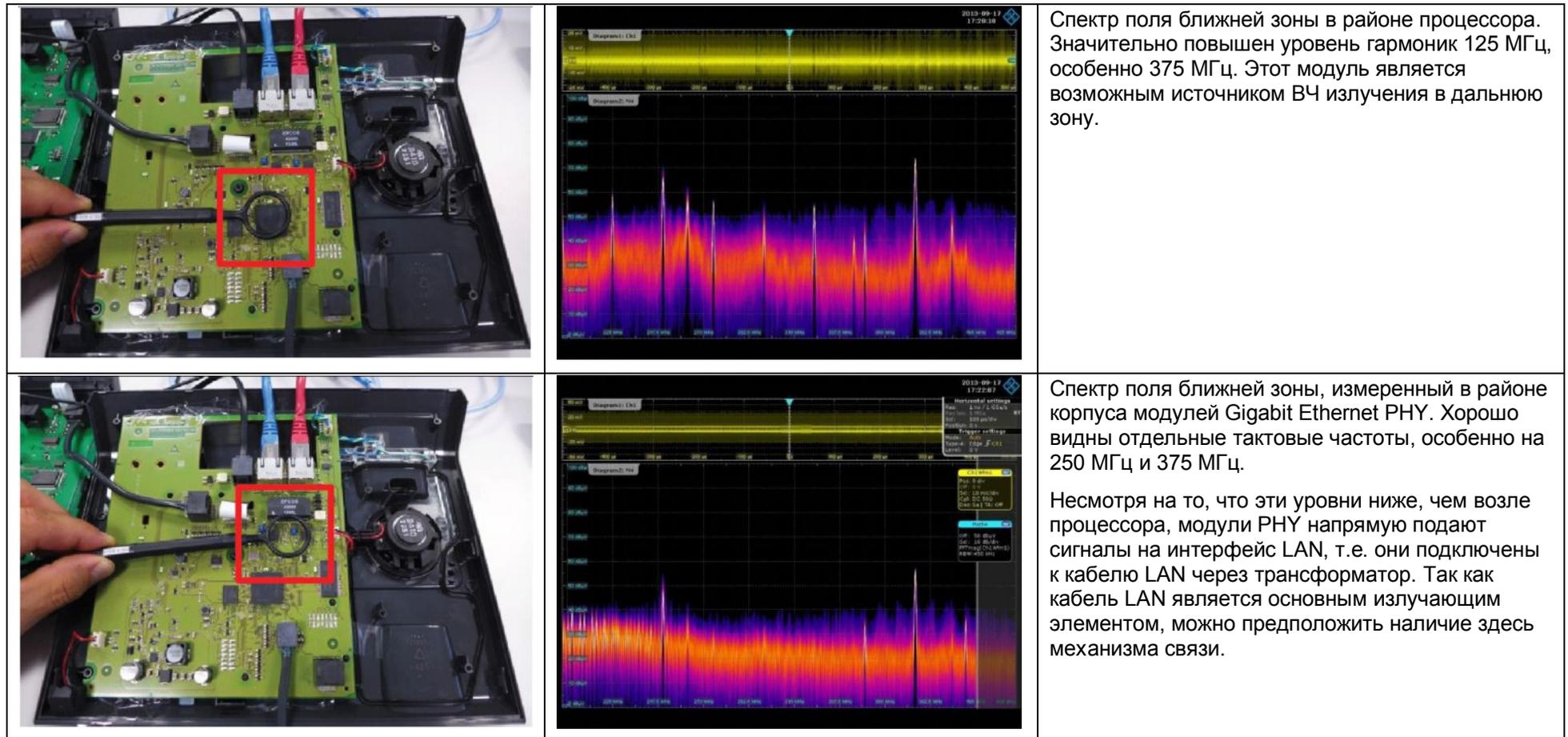
- ┆ Снижена чувствительность: 5 мВ/дел вместо 1 мВ/дел. Во время измерения с помощью пробников поля ближней зоны возникают относительно высокие уровни. Чтобы избежать перегрузки необходимо понизить чувствительность
- ┆ Изменен масштаб по вертикали: в диалоговом окне настроек БПФ был изменен масштаб вертикальной оси с помощью опции "manual range", чтобы БПФ спектр полностью отображался на экране и был более читабелен

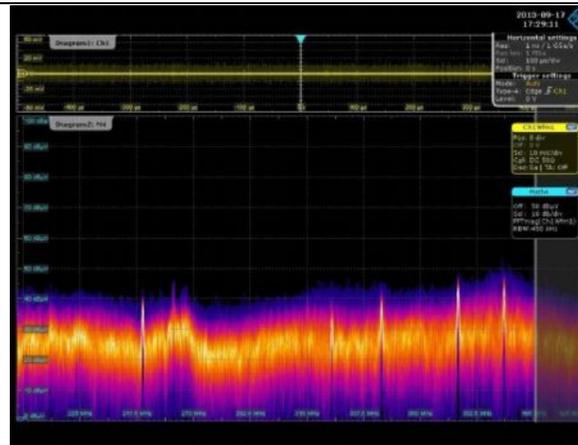
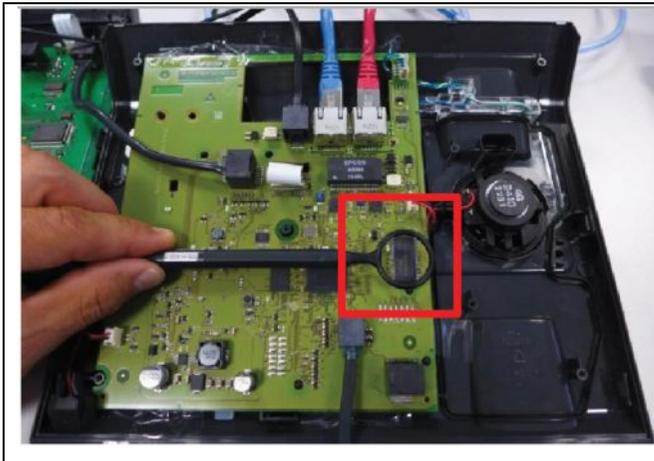
На следующих страницах приведены фотографии, снимки экрана и пояснения, показывающие способы работы с пробниками поля ближней зоны и обнаружения источников помех.

1 Измерения с помощью крупной рамочной антенны RS N 400-1 в различных положениях

Цель: определить источник, формирующий спектр в ближней зоне, сопоставимый с помеховым спектром, полученным во время измерения поля дальней зоны, или помеховым спектром в соединительных линиях.

		<p>Спектр поля ближней зоны в области основного преобразователя постоянного напряжения. Хорошо видны многочисленные гармоники, формируемые импульсным преобразователем. Эти частоты также наблюдаются в поле дальней зоны (широкополосная помеха на 250 МГц).</p>
		<p>Спектр поля ближней зоны в области следующего преобразователя постоянного напряжения. Здесь значительно более низкие уровни по сравнению с измерениями возле основного преобразователя. Таким образом, этот преобразователь напряжения не является критическим и, вероятно, не является источником помех.</p>



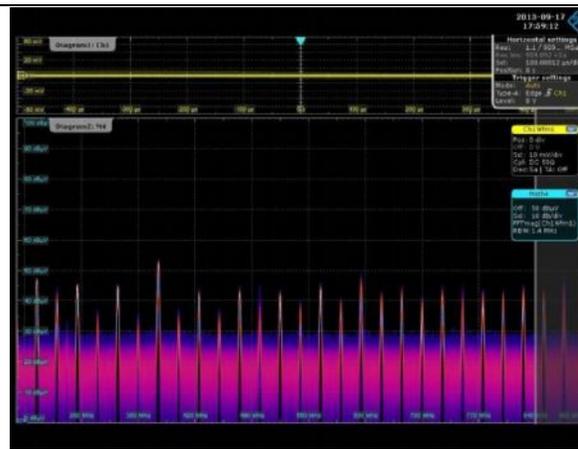


Спектр поля ближней зоны, измеренный в районе микросхемы памяти. Здесь наблюдаются значительно более низкие уровни по сравнению с остальными местами измерений (или в помеховом спектре дальней зоны такие уровни отсутствуют). Поэтому эта микросхема не является критической.

I Измерения с помощью малой магнитной рамочной антенны RS H 50-1

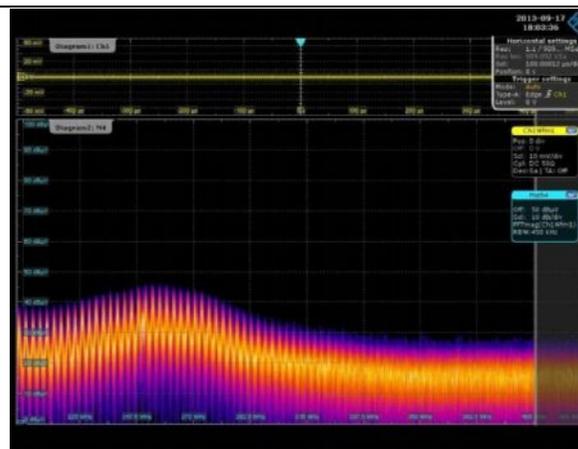
С помощью малой рамочной антенны можно более точно локализовать источники, обнаруженные на первом этапе.

		<p>Измерения возле процессора:</p> <p>Ясно видны гармоники 125 МГц. Кроме того, здесь присутствует дополнительное излучение на частоте 262 МГц и ее гармониках.</p> <p>Гармоники 125 МГц также соответствуют частотам, присутствующим в поле дальней зоны. Поэтому эти частоты являются критическими.</p> <p>Кроме того, максимальное излучение наблюдается в верхней левой части процессора, т.е. в районе интерфейса Reduced Gigabit Media Independent Interface (RGMI). Таким образом, удалось локализовать источник помех.</p>
		<p>Измерение в районе модуля Gigabit Ethernet PHY:</p> <p>Здесь хорошо виден источник гармоник частотой 125 МГц. Высокие уровни этих частот также наблюдаются в поле дальней зоны, поэтому они являются критическими.</p>



Измерения в районе тактового генератора (25 МГц):

Ясно виден источник, создающий высокоуровневые гармоники частотой 25 МГц. Однако, т.к. в поле дальней зоны присутствуют гармоники 125 МГц (а не 25 МГц), тактовый генератор, вероятно, не является источником помех.

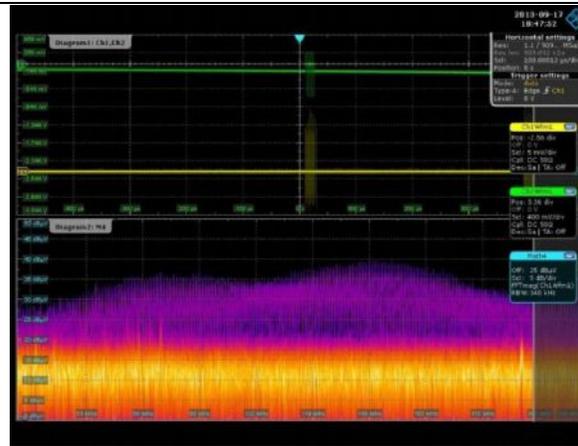
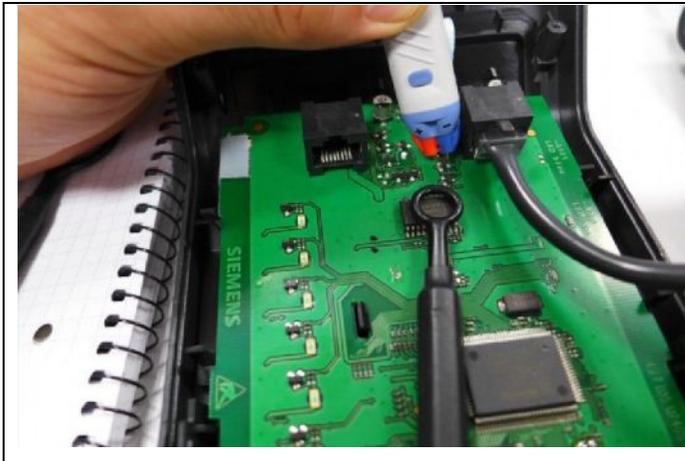


Измерения на основном преобразователе постоянного напряжения (DC/DC 36/3,3 В); на выходе диодный выпрямитель:

Четко виден спектр, состоящий из множества гармоник с максимальной частотой около 250 МГц. Это соответствует широкополосной помехе на частоте 250 МГц в поле дальней зоны. Похожая спектральная сигнатура говорит о том, что этот преобразователь напряжения, вероятно, является искомым источником помехи. Это подтверждается при анализе сигнала во временной области. В рассматриваемом примере использовалась функция стробирования БГФ для отображения спектра только в моменты активации переключающего транзистора для корреляции с временной областью.

### I Совместное измерение в частотной и временной областях

С помощью малой рамочной антенны RS-H 50-1 и дифференциального пробника можно легко отобразить временное соотношение между частью наблюдаемого ВЧ излучения и SPI данных, передаваемых между телефоном и блоком расширения.



Измерения во временной области на SPI интерфейсе (Clk, зеленая кривая) + измерения с помощью пробника поля ближней зоны на модуле SPI интерфейса (желтая кривая):

Наблюдаемый помеховый спектр соответствует активности по SPI интерфейсу (Clk). Поэтому можно утверждать, что тактовый сигнал SPI (или сам интерфейс) формирует помеху, наблюдаемую в поле дальней зоны. И снова, используется функция стробирования БПФ для отображения только помехового спектра, возникающего в момент передачи по SPI.

#### 4.3.4 Итоги выявления ЭМП

- 1 На основе результатов измерения поля в дальней зоне с помощью анализа поля ближней зоны и тока РЧП удалось обнаружить источники помех и определить механизмы связи
- 1 Были обнаружены следующие источники помех: процессор (интерфейс RGMII), модули LAN PHY и основной преобразователь напряжения. Дальнейший анализ показал, что синфазные помехи связываются через питание модулей LAN PHY, а также через конвертер сети LAN на кабеле LAN. Связь с кабелем трубки возникает через процессор или как гальваническая связь из-за трассировки платы
- 1 На основе проведенного анализа можно предложить меры по значительному снижению ВЧ излучения, например, фильтрация и согласованная нагрузка, изменения в трассировке платы в районе интерфейса RGMII (обратный тракт для синфазного тока), улучшения заземляющего соединения для экрана кабеля LAN, улучшения системы шины питания (с более низким импедансом) для модулей LAN PHY и процессора, а также улучшения трассировки и изменения в цепи в районе основного преобразователя напряжения

## 5 Заключение

В прошлом осциллографы были плохо приспособлены для выявления ЭМП из-за медленной и сложной в реализации функции расчета БПФ. К тому же они не обладали достаточной чувствительностью для надежного измерения ВЧ излучения.

Ситуация изменилась с появлением цифровых осциллографов R&S® RTO компании Rohde & Schwarz. С чувствительностью 1 мВ/дел, полосой пропускания до 4 ГГц и очень низким уровнем собственного шума, вместе с пробниками поля ближней зоны или токовыми пробниками они идеально подходят для измерения ЭМП. При известных результатах испытаний на электромагнитную совместимость, осциллограф является очень полезным лабораторным прибором, который может помочь быстро распознать и найти причину нежелательного излучения. Теперь в широкий диапазон применения осциллографа, который является стандартным инструментом разработчика, добавилась возможность выявления ЭМП.

Больше всего новых возможностей дает комбинация анализа во временной и частотной областях. Кроме того, при анализе ЭМП помогает цветное кодирование, которое отражает частоту появления спектральных составляющих.

В настоящих указаниях по применению описаны теория и практика выявления ЭМП, проиллюстрированные примером из реальной жизни. Этот документ должен помочь разработчикам с анализом проблем электромагнитной совместимости – главным образом, на их собственном рабочем месте и без дополнительного испытательного оборудования.

## 6 Библиография

- [1] Henry W. Ott, "Noise Reduction Techniques in Electronic Systems", John Wiley & Sons Inc (May 19, 1976)
- [2] Henry W. Ott, "Electromagnetic Compatibility Engineering", John Wiley & Sons; 1st edition (September 11, 2009), ISBN-13: 978-0470189306
- [3] Clayton R. Paul, "Introduction to Electromagnetic Compatibility", John Wiley & Sons; 2nd edition (February 10, 2006), ISBN-13: 978-0471755005

## 7 Информация для заказа

Наименование	Тип	Код заказа
<b>Осциллографы</b>		
1 ГГц, 2 канала, 10 млрд. отсчетов / с, 20 / 40 млн. отсчетов на канал	R&S®RTO1012	1316.1000.12
1 ГГц, 4 канала, 10 млрд. отсчетов / с, 20 / 80 млн. отсчетов на канал	R&S®RTO1014	1316.1000.14
1 ГГц, 2 канала, 5 млрд. отсчетов / с, 10/20 млн. отсчетов на канал	R&S®RTE1102	1317.2500.02
1 ГГц, 4 канала, 5 млрд. отсчетов / с, 10/40 млн. отсчетов на канал	R&S®RTE1104	1317.2500.04
<b>Дополнительные принадлежности</b>		
Набор компактных пробников для измерения E и H полей ближней зоны, от 30 МГц до 3 ГГц	R&S®HZ-15	1147.2736.02
Предусилитель 3 ГГц, 20 дБ, адаптер сети питания от 100 В до 230 В, для R&S®HZ-15	R&S®HZ-16	1147.2720.02
Пробник 1,5 ГГц, активный, дифференциальный, 1 МОм    0,6 пФ, R&S®ProbeMeter, микрокнопка	R&S®RT-ZD20	1410.4409.02

## О компании Rohde & Schwarz

Rohde & Schwarz представляет собой независимую группу компаний, специализирующуюся на производстве электронного оборудования. Rohde & Schwarz является ведущим поставщиком контрольно-измерительных систем и приборов, оборудования для теле- и радиовещания, систем радиомониторинга и радиопеленгации, а также систем профессиональной радиосвязи специального назначения. Rohde & Schwarz успешно работает уже 75 лет, представительства и сервисные центры компании находятся в более чем 70 странах. Головной офис компании расположен в Мюнхене, Германия.

## Представительство в Москве:

115093 Москва, ул. Павловская, 7, стр.1, этаж 5  
тел. +7 (495) 981 35 60, факс +7 (495) 981 35 65  
[info.russia@rohde-schwarz.com](mailto:info.russia@rohde-schwarz.com)  
[www.rohde-schwarz.ru](http://www.rohde-schwarz.ru)

## Контакты в регионах

Европа, Африка, Ближний Восток  
+49 89 4129 12345

[customersupport@rohde-schwarz.com](mailto:customersupport@rohde-schwarz.com)

Северная Америка  
1-888-TEST-RSA (1-888-837-8772)  
[customer.support@rsa.rohde-schwarz.com](mailto:customer.support@rsa.rohde-schwarz.com)

Латинская Америка  
+1-410-910-7988  
[customersupport.la@rohde-schwarz.com](mailto:customersupport.la@rohde-schwarz.com)

Азия/Тихий океан  
+65 65 13 04 88  
[customersupport.asia@rohde-schwarz.com](mailto:customersupport.asia@rohde-schwarz.com)

Китай  
+86-800-810-8228 /+86-400-650-5896  
[customersupport.china@rohde-schwarz.com](mailto:customersupport.china@rohde-schwarz.com)

## Обязательства по охране окружающей среды

- Энергосберегающие изделия
- Постоянное улучшение экологической устойчивости
- Сертифицированная система экологического менеджмента ISO 14001



Данный документ и поставляемые программы могут применяться только при соблюдении условий, изложенных в области загрузки веб-сайта Rohde & Schwarz.

R&S® является зарегистрированным товарным знаком компании Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG. Товарные знаки и торговые марки принадлежат соответствующим владельцам.

**Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG**

Mühlendorfstraße 15 | D - 81671 München

Тел. + 49 89 4129 - 0 | Факс + 49 89 4129 - 13777

[www.rohde-schwarz.com](http://www.rohde-schwarz.com)