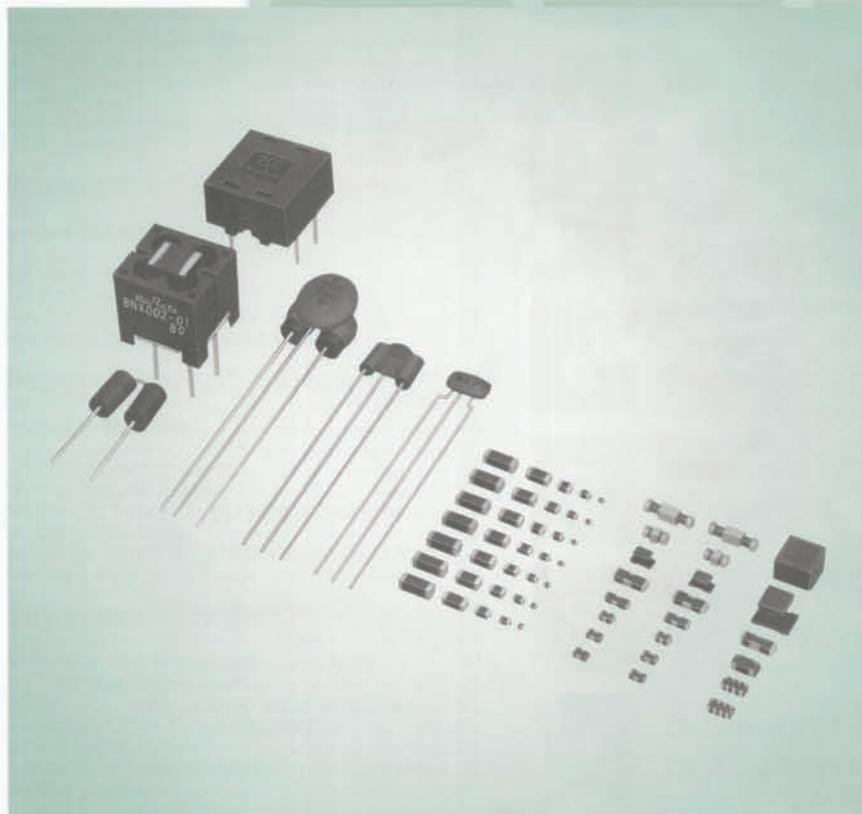


# Подавление помех с помощью фильтров EMIFIL® Цифровая аппаратура



## Руководство пользователя

***muRata*** *Innovator  
in Electronics*

**Murata  
Manufacturing Co. Ltd.**

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	1	<b>3</b> <b>Выбор и применение ЕМИ-фильтров</b> .....	33
<b>1</b> <b>Источники помех в цифровой аппаратуре</b> .....	2	Связь между эффективностью подавления помех ЕМИ-фильтром и искажениями формы сигнала (1) . . .	33
1. Цифровые сигналы и их гармонические составляющие .....	3	Связь между эффективностью подавления помех ЕМИ-фильтром и искажениями формы сигнала (2) . . .	34
Пример измерения спектра цифрового сигнала . . . . .	4	Связь между эффективностью подавления помех ЕМИ-фильтром и искажениями формы сигнала (3) . . .	35
Помехи на шине питания микросхем .....	5	<b>1. Импеданс схемы и эффективность подавления помех ЕМИ-фильтрами</b> .....	36
<b>2. Излучение помех печатными платами цифровой аппаратуры</b> .....	6	<b>2. Выбор между емкостными и индуктивными ЕМИ-фильтрами</b> .....	36
Микросхемы как источники помех .....	6	<b>3. Примеры включения ЕМИ-фильтров вблизи от источника помех</b> .....	37
Излучение помех печатными проводниками .....	7	1. Линия передачи тактового сигнала .....	37
Результат применения помехоподавляющего фильтра . . .	8	2. Шины .....	37
<b>3. Излучение помех проводами</b> .....	9	<b>4. Примеры включения ЕМИ-фильтров в цепях прохождения помех</b> .....	38
Излучение помех проводами (1) .....	9	1. Место подключения сигнального кабеля .....	38
Пример подавления помех, излучаемых проводами (1) .....	10	2. Место подключения кабеля питания (1) .....	38
Излучение помех проводами (2) .....	11	3. Место подключения кабеля питания (2) .....	39
Излучение помех проводами (3) .....	12	<b>4</b> <b>Влияние длины линии передачи на эффективность подавления помех</b> .....	40
Пример подавления помех, излучаемых проводами (2) .....	13	<b>1. Пример зависимости подавления помех от длины линии передачи</b> .....	40
Излучение помех проводами (4) .....	14	Экспериментальная печатная плата и метод измерения .....	40
Пример подавления помех, излучаемых проводами (3) .....	15	Измерение излучаемых помех .....	41
<b>4. Причины возникновения синфазных помех</b> .....	16	<b>2. Анализ причин изменения эффективности подавления помех</b> .....	42
<b>5. Заключение</b> .....	16	Распределение напряжения и тока в линии передачи . . .	42
<b>2</b> <b>Подавление электромагнитных помех</b> .....	17	Распределение тока после установки ферритовой бусины .....	43
<b>1. Методы подавления электромагнитных помех</b> .....	17	Анализ причин изменения эффективности подавления помех .....	44
Идеализированная модель подавления помех .....	17	Зависимость потерь пикового тока от длины линии передачи .....	45
<b>2. Помехоподавляющие фильтры</b> .....	18	Влияние длины линии передачи на эффективность подавления помех ферритовой бусиной .....	46
Применение помехоподавляющих фильтров .....	18	<b>3. Способы повышения эффективности подавления помех</b> .....	47
Эффективность помехоподавляющих фильтров .....	19	Способы повышения эффективности подавления помех. Способ № 1: Выбор места установки ферритовой бусины .....	47
Применение индуктивных ЕМИ-фильтров .....	20	Результаты измерений при перемещении ферритовой бусины .....	48
Применение емкостных ЕМИ-фильтров (1) .....	20	Корректировка способа № 1: Подавление помех несколькими ферритовыми бусинами .....	49
Применение емкостных ЕМИ-фильтров (2) .....	21	Способы повышения эффективности подавления помех. Способ № 2: Применение конденсатора .....	50
Применение емкостных ЕМИ-фильтров (3) .....	22	Результаты применения конденсатора .....	51
<b>3. Конфигурация земляной шины</b> .....	23	<b>4. Причины изменения эффективности подавления помех и способы его повышения</b> .....	52
Влияние конфигурации земляной шины .....	24		
Улучшение качества земляной шины при помощи заземленного экрана .....	25		
<b>4. Расположение компонентов и печатных проводников</b> .....	26		
Частота сигнала .....	27		
Длина линии передачи .....	28		
<b>5. Ширина печатных проводников</b> .....	29		
<b>6. Толщина печатной платы</b> .....	30		
<b>7. Экранирование</b> .....	31		
Экранирующий корпус .....	31		
Отверстия в экранирующем корпусе .....	32		

## Введение

Подавление электромагнитных помех (Electro-Magnetic Interference — EMI) — непростая задача, поскольку процесс возникновения, передачи и излучения помех электронными схемами очень сложен. Для того чтобы повысить эффективность подавления помех, мы должны тщательно изучить методы, которые для этого применяются, и знать, когда и как именно следует их применять.

В первой части этого руководства на основе экспериментальных данных будет показано, как возникают, распространяются и излучаются помехи в электронных схемах. Мы также покажем приемы подавления помех. Во второй части этого руководства перечислены ошибки, которых следует избегать при применении помехоподавляющих фильтров (EMI-фильтров), и даны примеры схемных реализаций помехоподавляющих фильтров в типичных электронных схемах.

Мы предлагаем вам использовать рекомендации этого руководства при рассмотрении мер, предпринимаемых для подавления помех.

EMIFIL® и CERALOCK® — зарегистрированные торговые марки компании Murata Manufacturing Co., Ltd.

<b>Источники помех в цифровой аппаратуре</b>	<b>1</b>
<b>Подавление электромагнитных помех</b>	<b>2</b>
<b>Выбор и применение EMI-фильтров</b>	<b>3</b>
<b>Влияние длины линии передачи на эффективность подавления помех</b>	<b>4</b>

# 1

## Источники помех в цифровой аппаратуре

Электронные схемы состоят из множества интегральных схем (ИС), поэтому механизм возникновения помех крайне сложен. В этой главе на примере макетов, состоящих всего из двух или трех ИС, будет показано, как возникают электромагнитные помехи в несложных электронных схемах.

# 1. Цифровые сигналы и их гармонические составляющие

Считается, что причиной возникновения помех в электронных схемах является присутствующий в них цифровой сигнал.

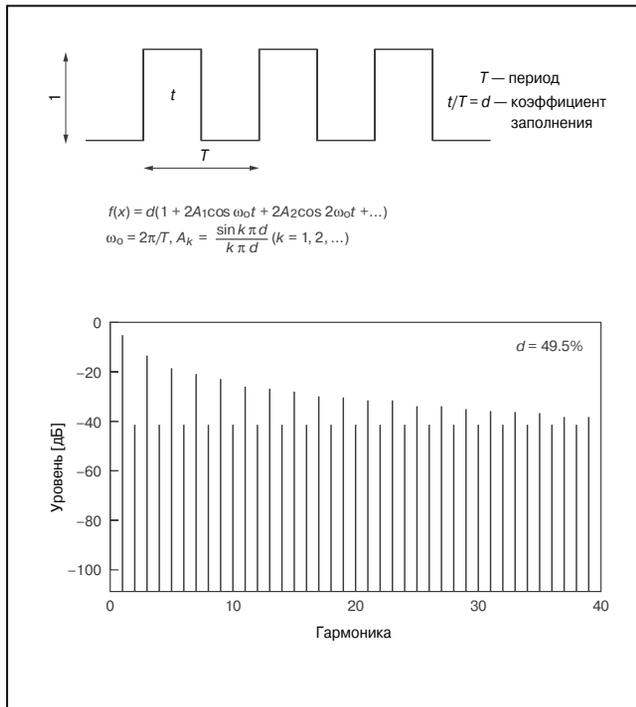
Цифровой сигнал представляет собой импульсы прямоугольной формы, образованные сложением множества гармоник — синусоидальных сигналов, частоты которых в целое число раз больше частоты повторения цифрового сигнала. Гармоника с частотой, равной частоте повторения, называется основной, а с частотой, в *n*

*n*-го порядка. Из рисунка видно, что по мере того как к основной гармонике добавляются гармоники более высокого порядка форма сигнала постепенно приближается к прямоугольной.

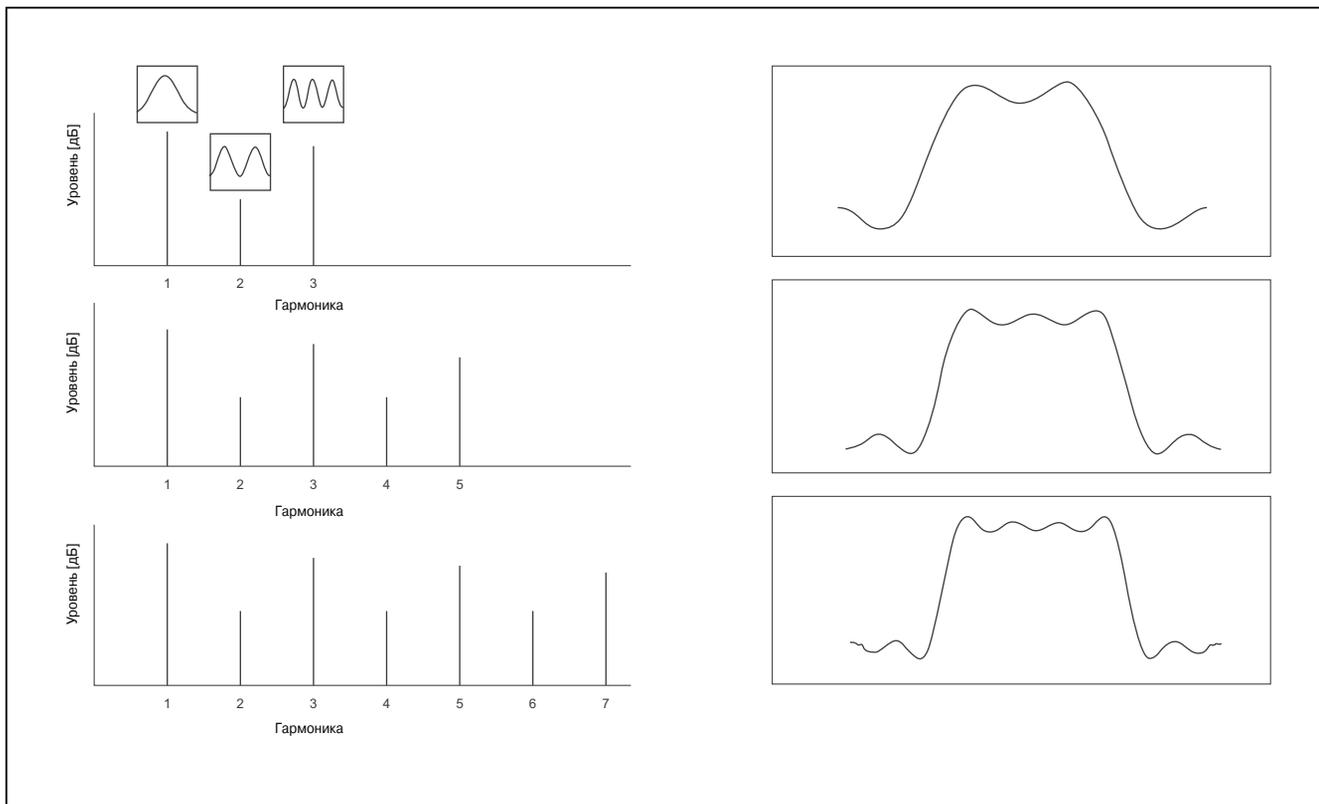
И наоборот, сигнал с более крутыми фронтами и спадами содержит гармоники более высоких порядков, то есть составляющие с более высокими частотами.

Цифровой сигнал с коэффициентом заполнения, равным 50%, состоит из гармоник только с нечетными номерами. Если коэффициент заполнения будет отличаться от 50, то в сигнале будут появляться и четные гармоники.

## Разложение цифрового сигнала на высокочастотные гармоники



## Связь между гармониками и формой сигнала

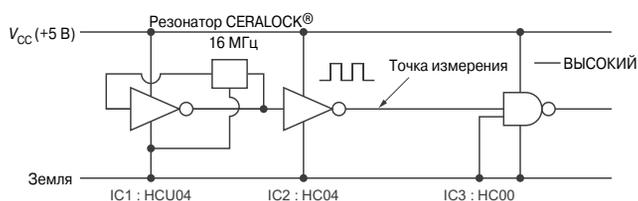


## Пример измерения спектра цифрового сигнала

На приведенных рисунках показаны измеренные анализатором спектра гармоники, присутствующие в реальном цифровом сигнале. Этот цифровой сигнал содержит гармоники, порядок которых составляет несколько десятков и даже больше. Видно, что частоты этих сигналов достигают нескольких сотен мегагерц.

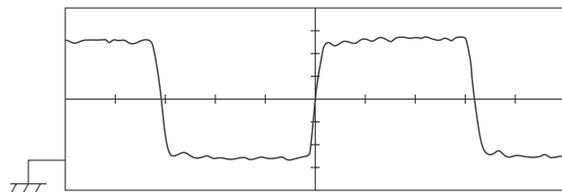
Считается, что основной причиной возникновения помех в электронных схемах являются гармоники, составляющие цифровой сигнал. Высокая частота гармоник приводит к тому, что они легко излучаются. Если частота гармоники находится вблизи от частоты сигнала радио или ТВ вещания, то гармоника накладывается на радиосигнал, и в приемнике возникают помехи.

### Схема измерений



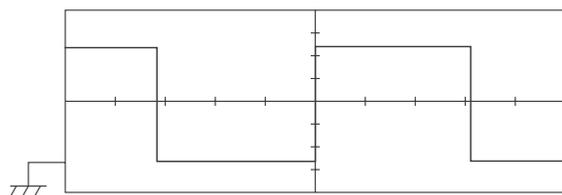
Форма сигнала

Измеренная форма



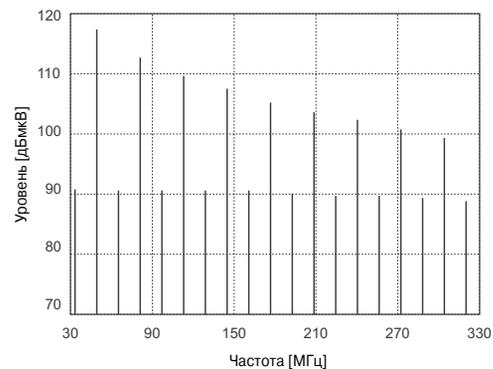
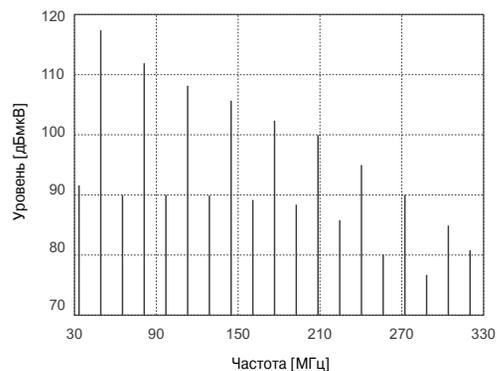
По горизонтали: 10 нс/деление  
По вертикали: 1 В/деление

Вычисленная (идеальная) форма



По горизонтали: 10 нс/деление  
По вертикали: 1 В/деление

Спектр сигнала

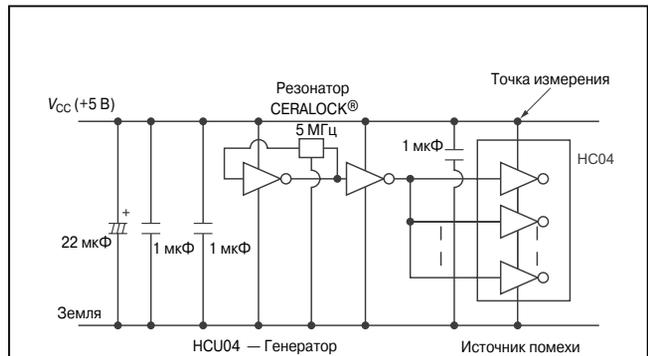


## Помехи на шине питания микросхем

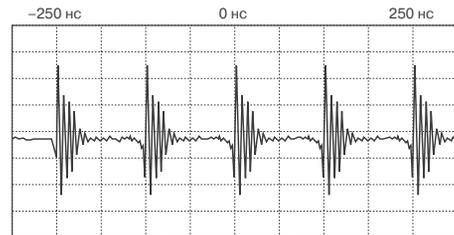
Помехи в цепях питания считаются еще одной причиной возникновения электромагнитных помех в электронных схемах. Цифровые микросхемы питаются от источника постоянного напряжения, и ток на выводе питания будет изменяться скачками в соответствии с характером работы цифровых микросхем. Такого рода хаотические изменения тока приводят к появлению помех.

На приведенных рисунках показаны напряжения, измеренные осциллографом и анализатором спектра на выводе питания микросхемы, работающей на частоте 5 МГц. В ответ на каждое переключение микросхемы на ее выводе питания появляется сигнал в виде затухающих колебаний, а спектральный анализ этого сигнала показывает, что в нем есть гармоники. Эти гармонические составляющие и служат причиной возникновения помех.

### Схема измерений



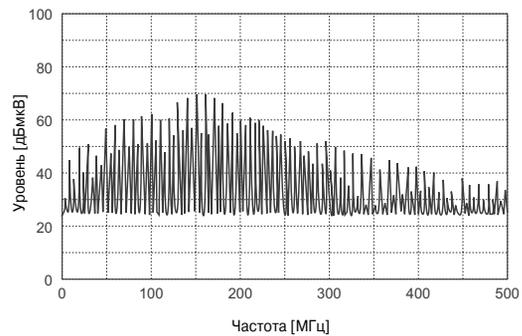
### Форма сигнала на выводе питания



Канал 1 = 200.0 мВ/деление  
Время = 50.0 нс/деление

Смещение = 5.200 В  
Задержка = 0.00000 с

### Спектр помехи



## 2. Излучение помех печатными платами цифровой аппаратуры

### Микросхемы как источники помех

В предыдущих разделах мы показали, как возникают помехи в результате работы цифровой микросхемы. Теперь, используя в качестве примера макеты нескольких цифровых устройств, мы поясним, как эти помехи распространяются в цифровых схемах и излучаются ими.

В качестве простейшего примера цифрового устройства мы взяли собранный на печатной плате генератор и измерили помеху, излучаемую этой печатной платой.

Рассматриваемая печатная плата — односторонняя. Часть лицевой стороны платы занята деталями схемы, а вся остальная поверхность представляет собой сплошную заземленную область металлизации. На этой печатной плате микросхема IC1 выполняет функцию генератора частоты 16 МГц, а выход микросхемы IC2, на вход которой приходит сигнал с генератора, никуда не подсоединен.

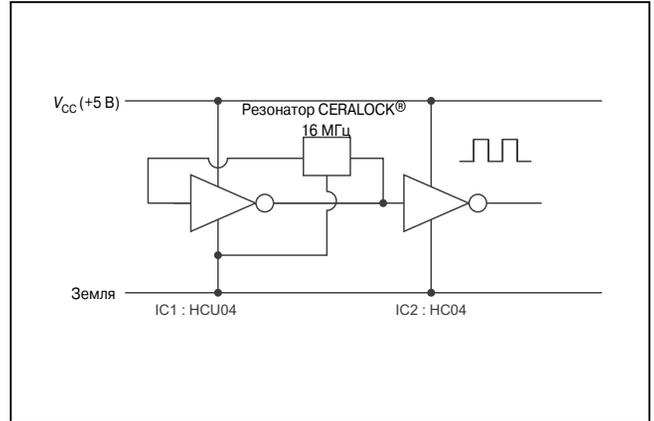
К выводам питания обеих микросхем подключены помехоподавляющие компоненты, так что излучение помех от выводов питания хорошо подавлено.

На приведенном рисунке показана помеха, излучаемая этой печатной платой и измеренная на расстоянии 3 м. Видно, что уровень помехи существенно ниже предельной величины, установленной стандартом CISPR<sup>1)</sup>, публ. 22.

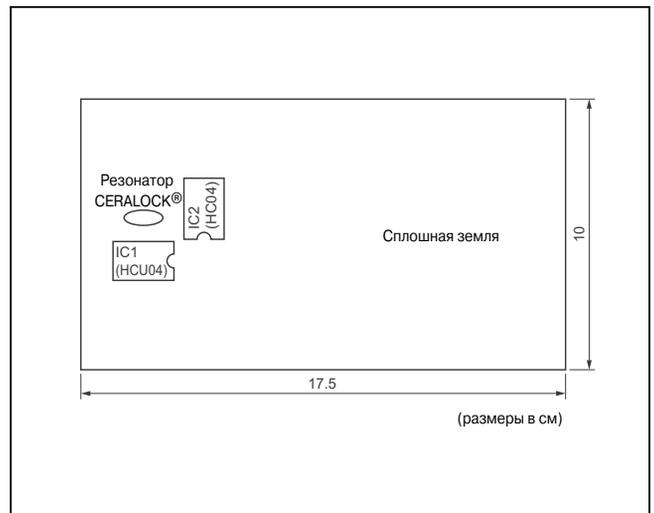
Для излучения помехи требуется как источник помехи, так и излучающая ее антенна. Поскольку на описанной печатной плате нет излучающей антенны, мы видим, что, хотя микросхема и служит источником помехи, величина помехи, излучаемой этой печатной платой, мала.

В некоторых выпускающихся в настоящее время больших ИС сами их корпуса могут служить антеннами для помех. В таких случаях излучаемую корпусом ИС помеху нельзя считать пренебрежимо малой.

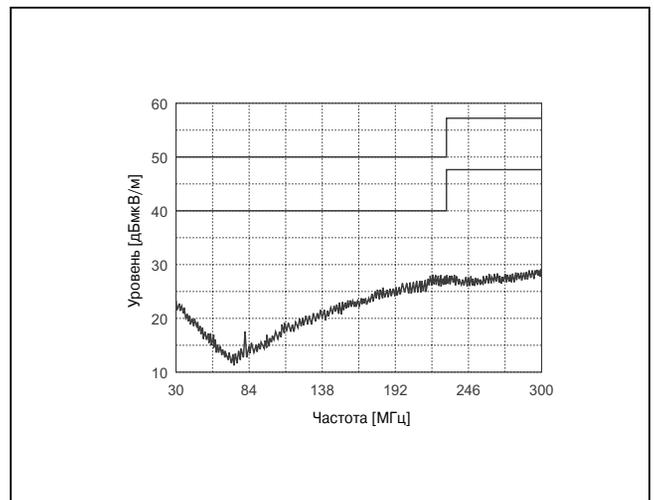
Схема измерений



Чертеж платы



Излучаемые помехи



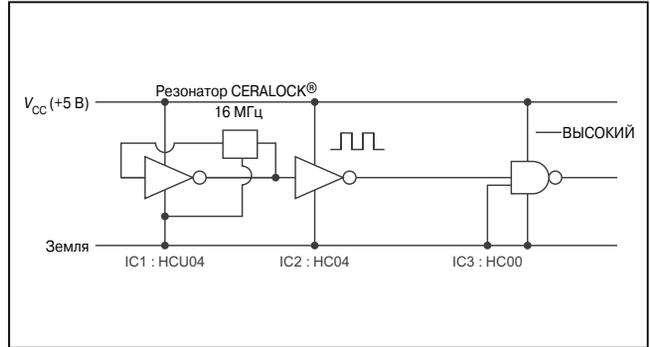
<sup>1)</sup> Специальный Международный комитет по борьбе с радиопомехами (аббревиатура CISPR образована из французского названия организации, *Comite international special des perturbations radioelectriques*).

### Излучение помех печатными проводниками

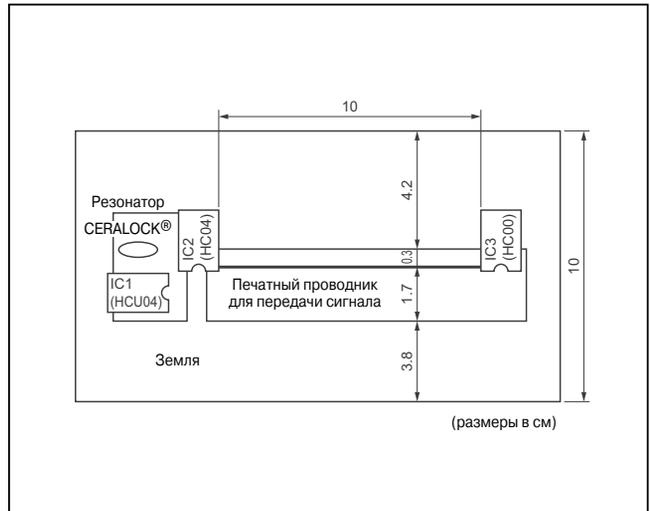
Теперь мы рассмотрим макет схемы, в которой источник помехи присоединен к печатному проводнику, служащему передающей антенной. Как видно из приведенной схемы, выходной вывод микросхемы IC2, не подключенный в предыдущем эксперименте, теперь подключен к печатному проводнику длиной приблизительно 10 см, и этот печатный проводник проложен до микросхемы IC3. Результат измерения помехи, излучаемой такой печатной платой, показан на приведенном рисунке. Обратите внимание на гармоники частоты генератора, равной в нашем случае 16 МГц. Можно видеть, что уровни помех на некоторых частотах превышают предельные значения, оговоренные стандартом CISPR, публ. 22. Это явление наблюдается, по всей вероятности, потому, что при подключении выходного вывода микросхемы к печатному проводнику образовалась антенна для помехи.

Антенна для помехи формируется следующей сигнальной цепью: IC2 → печатный проводник → IC3 → земля → IC2. Токи помехи, текущие по сигнальному и земляному печатным проводникам, равны, но направлены в противоположные стороны. Такая помеха называется дифференциальной. В этом примере направление и путь распространения помехи и сигнала совпадают.

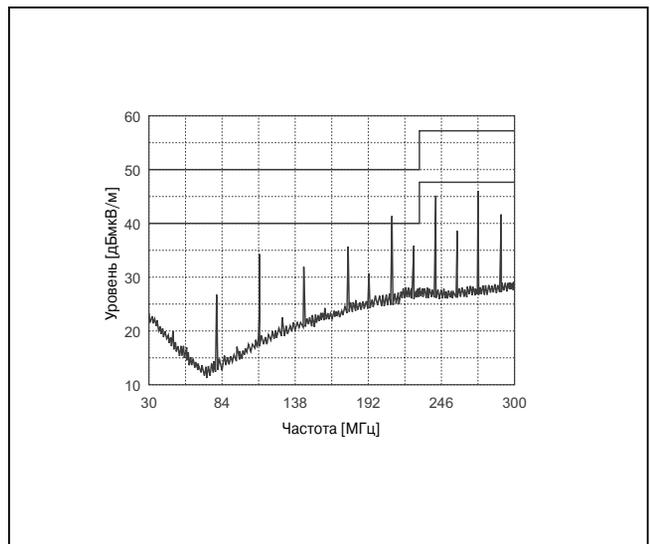
### Схема измерений



### Чертеж платы



### Излучаемые помехи

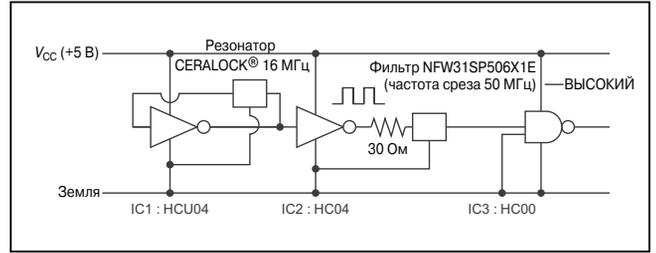


## Результат применения помехоподавляющего фильтра

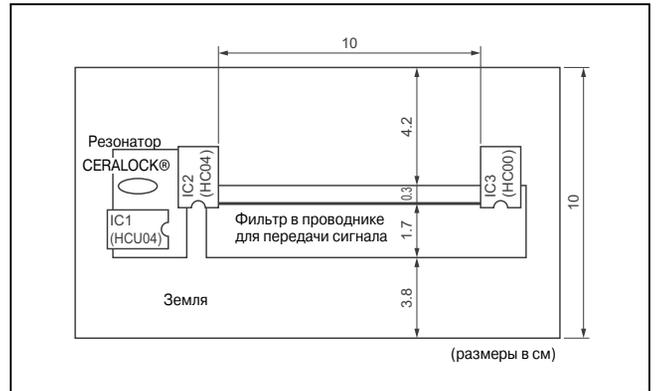
На рисунках показаны результаты эксперимента по подавлению помехи, излучаемой сигнальным печатным проводником, который служит антенной для помехи (дифференциальной помехи).

EMI-фильтр, установленный между выходом микросхемы IC2 и сигнальным печатным проводником, может значительно снизить уровень помехи. EMI-фильтр, примененный в этом эксперименте, представляет собой комбинацию из чип-фильтра EMIFIL® для сигнальных линий и 30-омного резистора, что позволяет свести искажения формы цифрового сигнала к минимуму.

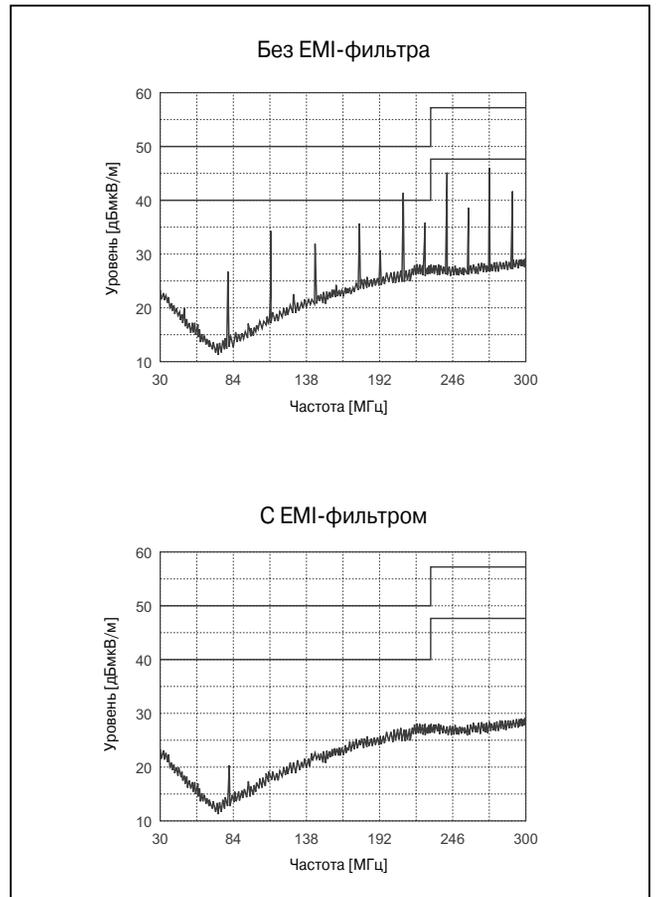
### Схема измерений



### Чертеж платы



### Излучаемые помехи



### 3. Излучение помех проводами

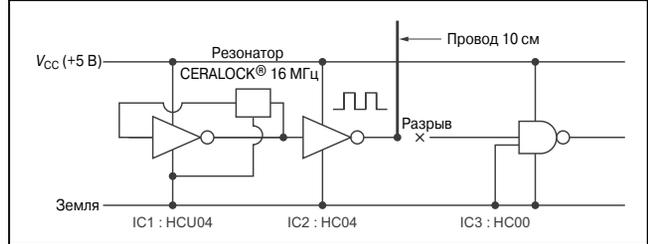
#### Излучение помех проводами (1)

Теперь мы проведем эксперимент, в котором микросхема IC2, или источник помехи, вместо печатного проводника будет подключена к отрезку многожильного провода.

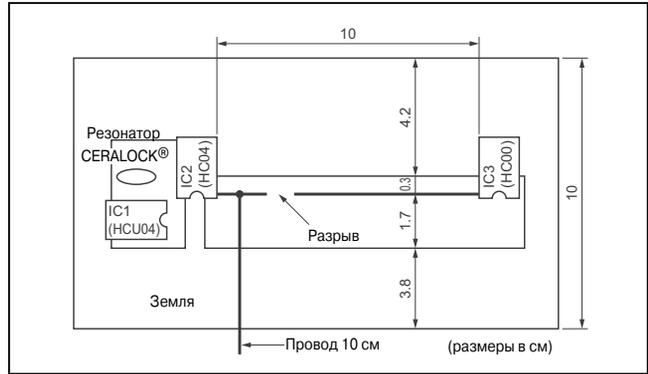
Как видно из схемы, выход микросхемы IC2 отсоединен от сигнального печатного проводника и подключен к 10-сантиметровому отрезку многожильного провода, который имеет точно такую же длину, как и печатный проводник. Помеха, излучаемая этой схемой, показана на приведенных рисунках. По сравнению с предыдущей конструкцией, в которой использовался печатный проводник, в этом эксперименте максимальное значение уровня помехи увеличилось приблизительно на 10 дБ. Видно, что провод является более эффективной антенной для помехи, чем печатный проводник.

Когда сигналы, как в этом примере, передаются по проводам, следует учитывать, что эти провода будут создавать сильные помехи.

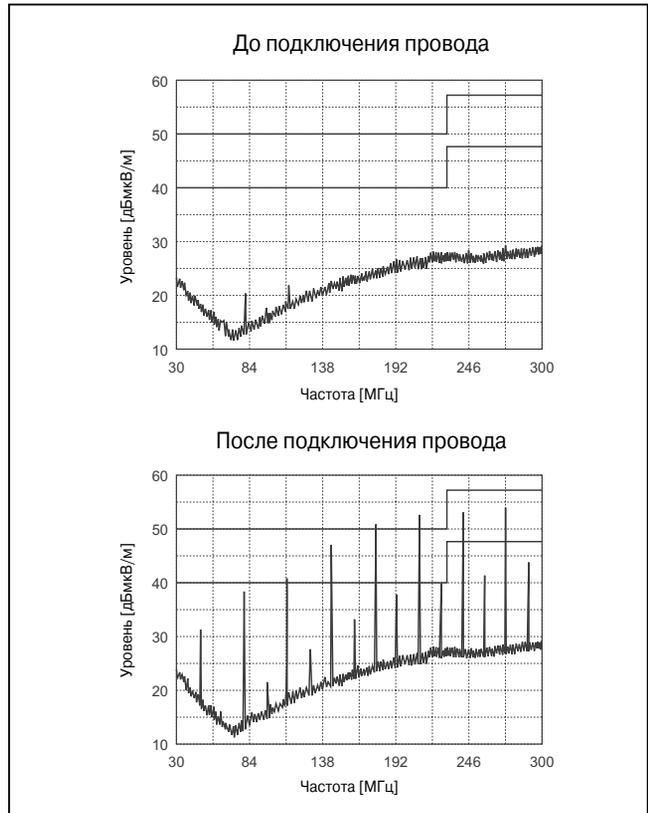
Схема измерений



Чертеж платы



Излучаемые помехи

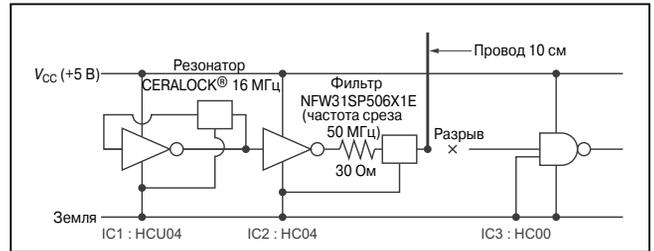


## Пример подавления помех, излучаемых проводами (1)

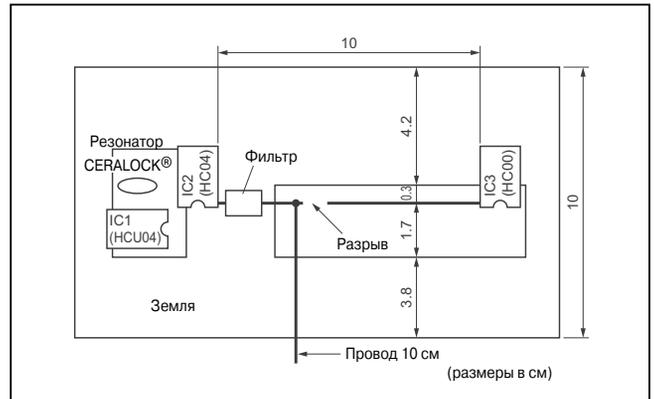
На рисунках показаны результаты эксперимента по подавлению помех, излучаемых отрезком провода, который служит антенной. Как и в случае, когда в этой роли выступал печатный проводник, включение помехоподавляющего фильтра между выходом микросхемы IC2 и проводом в значительной степени снижает уровень помехи.

В случаях, когда источник помехи подключен непосредственно к излучающей помеху антенне, как это показано на схеме, включение ЕМI-фильтра между источником помехи и антенной дает большой подавляющий эффект.

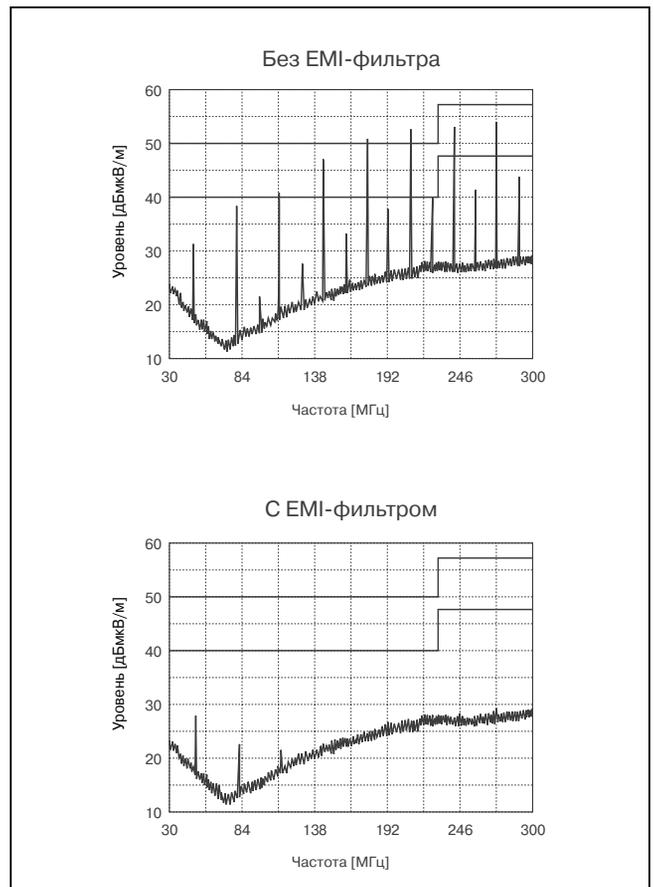
### Схема измерений



### Чертеж платы



### Излучаемые помехи



## Излучение помех проводами (2)

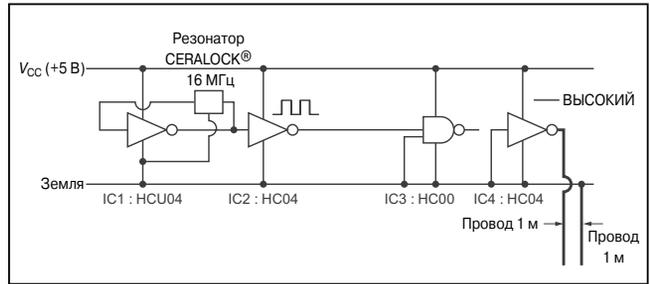
В качестве следующего примера рассмотрим случай, когда излучающей помехи антенной, служит подключенный к печатной плате кабель, состоящий из двух проводов. Как видно из схемы, печатный проводник для передачи сигнала включен между установленными на печатной плате микросхемами IC2 и IC3, у края печатной платы установлена микросхема IC4, к выходу которой и к земле подключен кабель длиной 1 м. Под словом «кабель» подразумевается интерфейсный кабель. Пусть в этом примере IC4 не работает (предполагается, что интерфейсная схема не задействована). Следовательно, ток сигнала через кабель не течет.

На рисунках показаны уровни излучаемых помех, измеренные до и после подключения кабеля. Можно видеть, что после подключения кабеля уровень помех существенно увеличивается. В частности, на частотах около 80 МГц он увеличивается на 30 дБ.

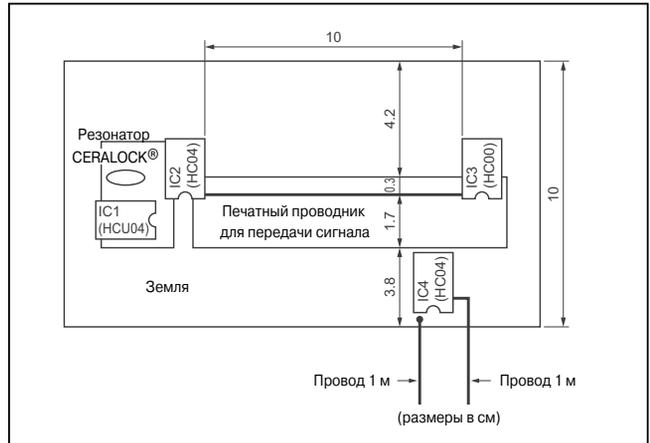
Это явление, по всей вероятности, объясняется тем, что помеха, создаваемая микросхемой IC2, передается на микросхему IC4 через шину питания или через земляную шину и излучается микросхемой IC4 через кабель, который служит для помехи антенной. Можно также предположить, что причиной существенного увеличения уровня помехи на частотах порядка 80 МГц является то, что на этой частоте такая антенна становится четвертьволновой.

При работе с реальным электронным оборудованием, подключенным к другим устройствам, мы часто наблюдаем похожее явление, когда на интерфейсную схему наводится помеха от внутренних схем устройства, а интерфейсный кабель служит антенной, через которую эта помеха излучается.

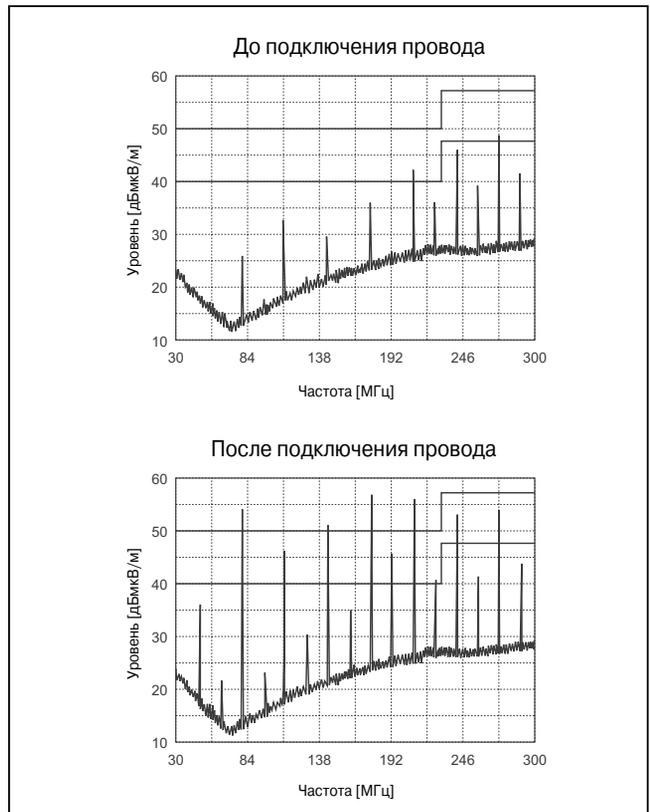
### Схема измерений



### Чертеж платы



### Излучаемые помехи

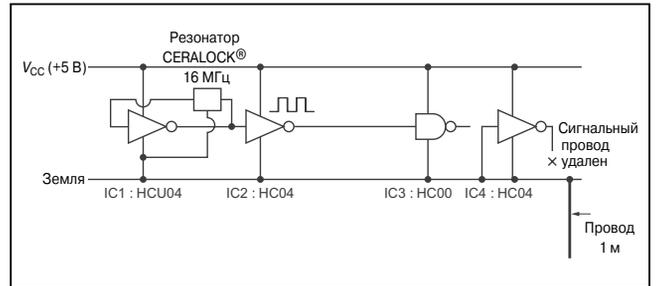


### Излучение помех проводами (3)

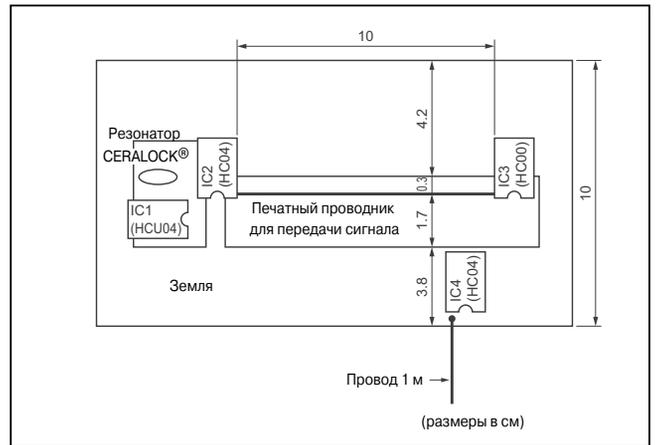
Следующий эксперимент ставится для того, чтобы выяснить, какой именно провод кабеля — сигнальный или земляной — излучает помеху в предыдущем эксперименте. Мы будем измерять уровень помехи, подключая только сигнальный, либо только земляной провод. Уровни помех в обоих случаях оказываются практически равными уровню помехи при подключении обоих проводов. На рисунках показаны результаты измерений с подключенным земляным проводом, проведенных после отключения сигнального провода.

Из результатов эксперимента видно, что уровень помехи не зависит от того, через какой провод передается помеха — через сигнальный или через земляной. И сигнальный, и земляной провода ведут себя как излучающая помеху антенна. Помеха, создаваемая токами одинаковой величины, текущими по всем проводам в одном направлении, называется синфазной.

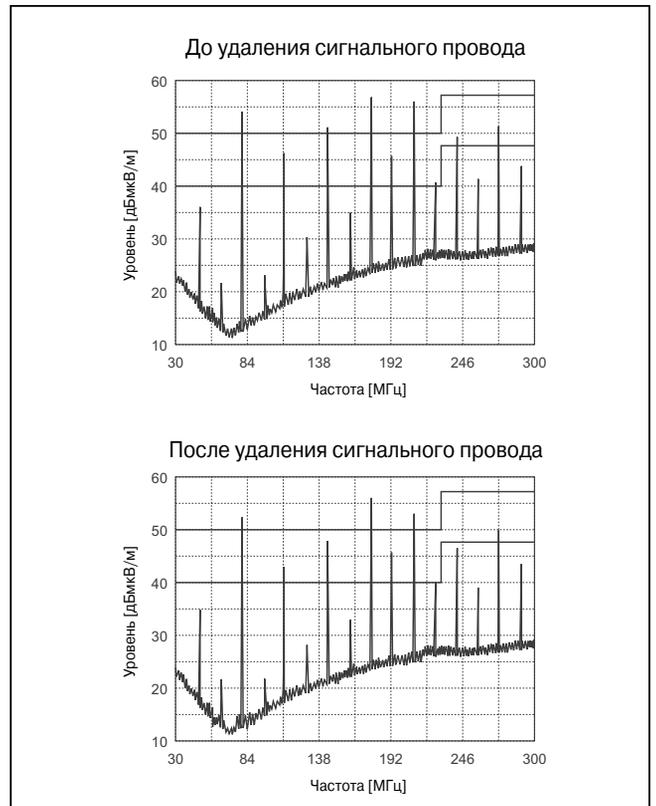
Схема измерений



Чертеж платы



Излучаемые помехи



### Пример подавления помех, излучаемых проводами (2)

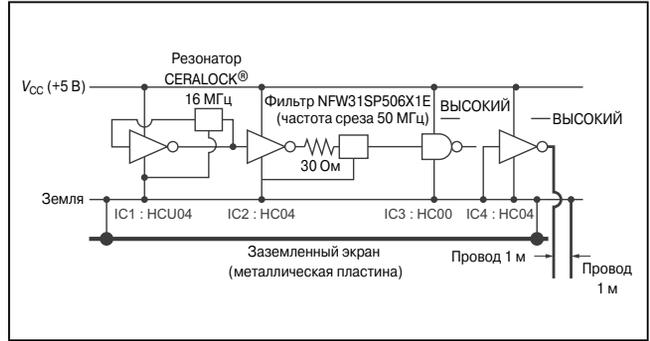
На этом рисунке показан пример схемы подавления помех от отрезка кабеля, который служит антенной для синфазной помехи, как это было описано в предыдущем эксперименте. В этом эксперименте для улучшения качества земляной шины используется заземленный экран, что позволяет снизить уровень помехи, проникающей через шину земли. Затем к выходу микросхемы IC2 подключается ЕМI-фильтр, что позволяет снизить уровень помехи, излучаемой сигнальным печатным проводником.

Такие меры помехоподавления позволяют значительно снизить уровень излучаемых помех.

Заземленный экран выполнен в виде металлической пластины, имеющей практически такие же размеры, как и сама печатная плата. Эта металлическая пластина помещается под печатной платой, и земляная шина печатной платы соединяется с ней в нескольких местах. Применение заземленного экрана для подавления синфазной помехи, которая передается через земляную шину, очень эффективно.

В дополнение к улучшению заземления для подавления синфазной помехи можно использовать также и специальные дроссели для подавления синфазных помех.

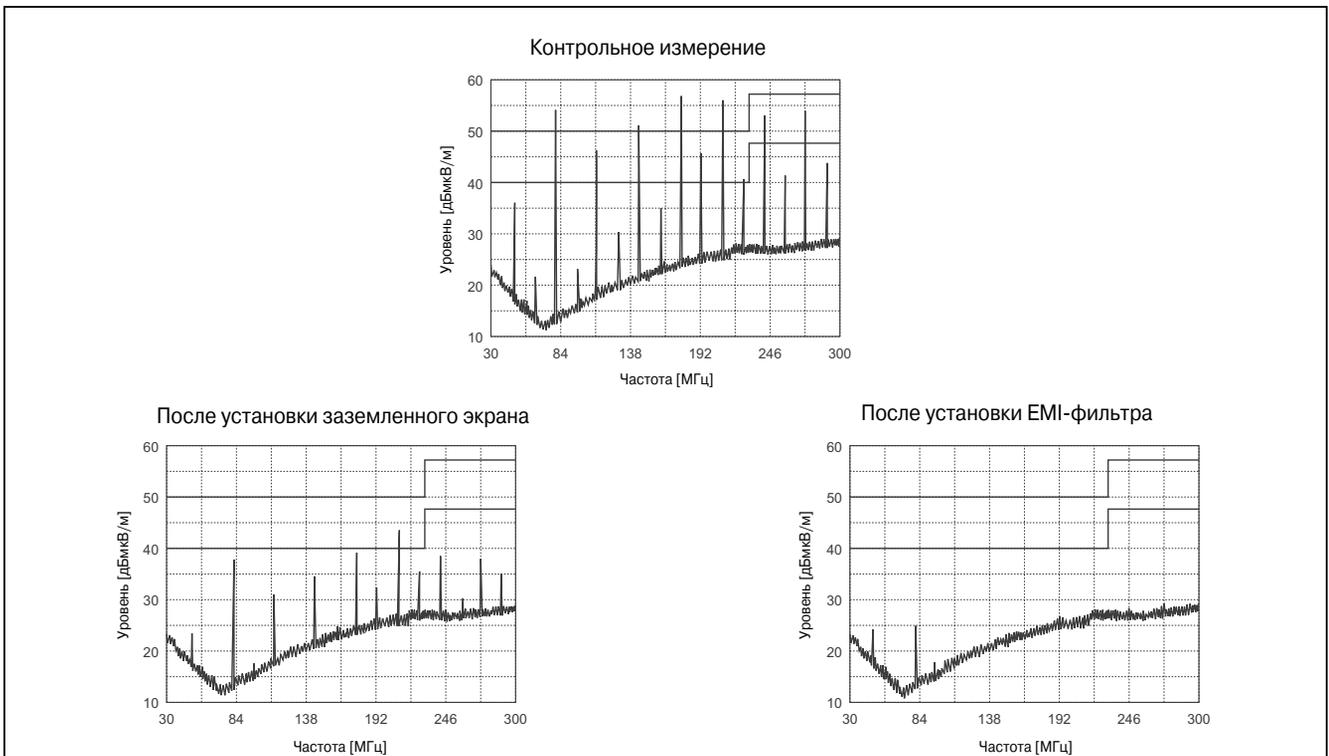
#### Схема измерений



#### Чертеж платы



### Излучаемые помехи



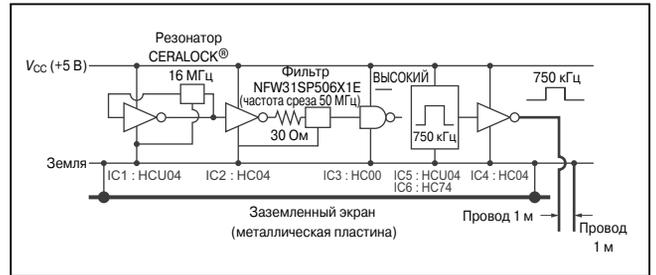
### Излучение помех проводами (4)

Теперь рассмотрим случай, когда интерфейсная схема задействована.

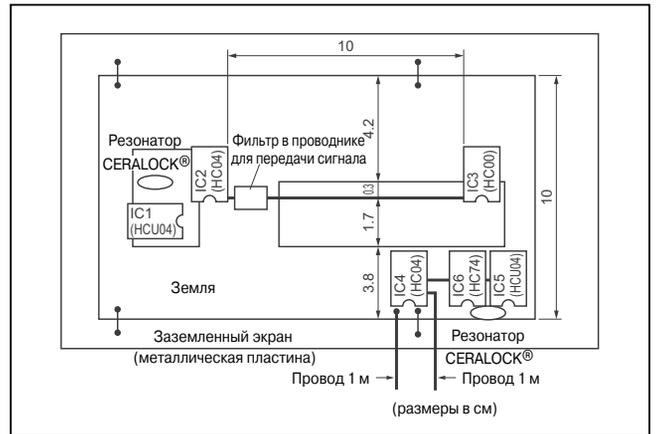
На макетной печатной плате со всеми установленными в предыдущем разделе помехоподавляющими элементами смонтирован генератор цифрового сигнала частотой 750 кГц. Этот сигнал подается на микросхему IC4, так что сигнал частотой 750 кГц присутствует и на ее выходе. На рисунках показана помеха, излучаемая такой печатной платой. Когда 750-килогерцовый сигнал поступает в кабель, кабель излучает гармоники этого сигнала.

Можно видеть, что сигналы, проходящие через соединительный кабель, способны стать причиной излучения помех.

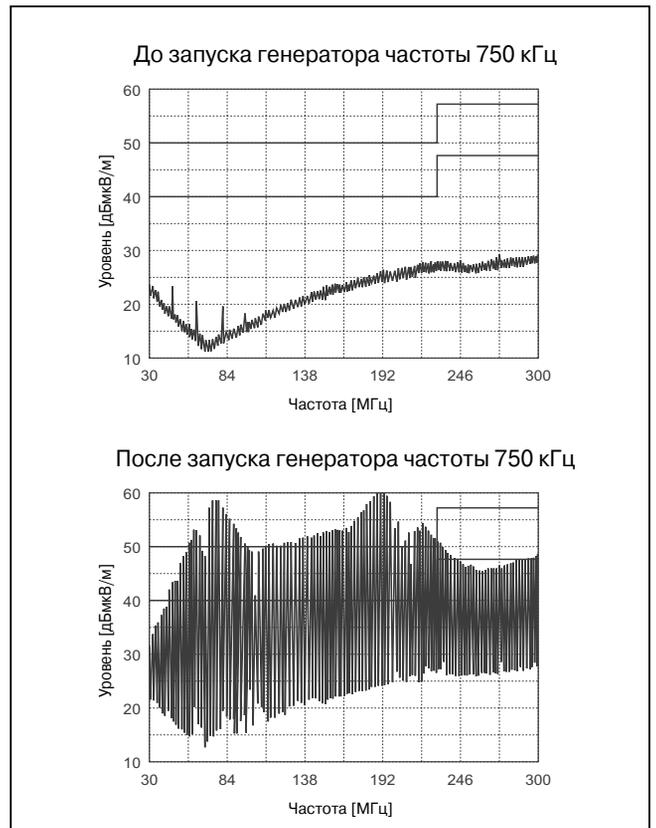
### Схема измерений



### Чертеж платы



### Излучаемые помехи

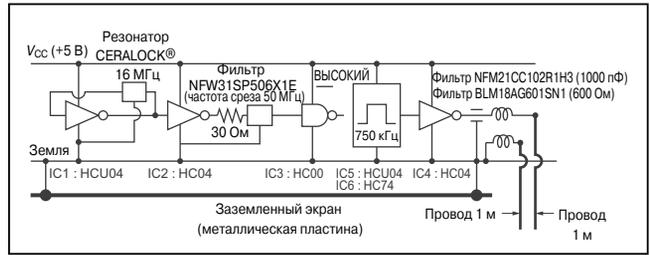


**Пример подавления помех, излучаемых проводами (3)**

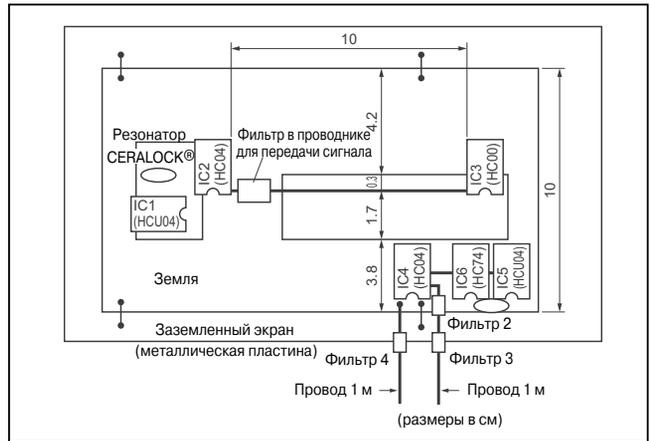
На этом рисунке показан пример схемы для подавления помех, излучаемых, когда сигнал передается через кабель. В этом эксперименте ЕМІ-фильтр включается между кабелем и микросхемой IC4, которая служит новым источником помех. Во-первых, в сигнальную линию включается комбинация из чип-фильтра EMIFIL® и чип-дросселя в виде ферритовой бусины. В результате этого излучение помехи подавляется почти полностью. Затем еще одна ферритовая чип-бусина включается в земляную шину, благодаря чему эффект подавления помехи дополнительно усиливается.

Видно, что установкой помехоподавляющих компонентов одновременно и в сигнальную линию, и в земляную шину можно добиться более сильного подавления помех.

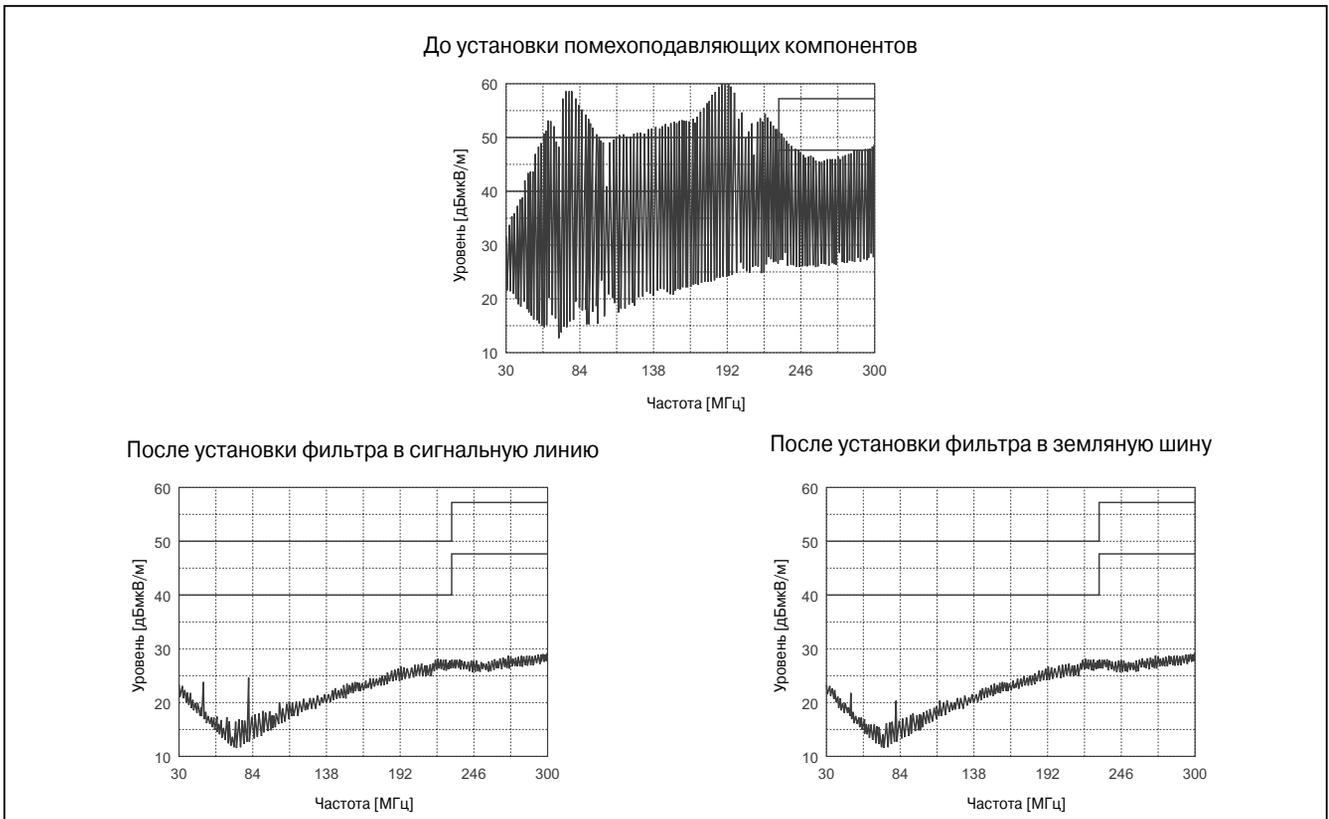
**Схема измерений**



**Чертеж платы**



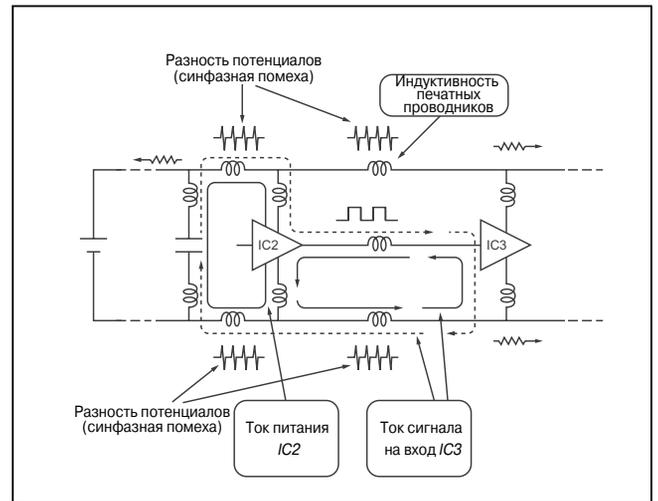
**Излучаемые помехи**



#### 4. Причины возникновения синфазных помех

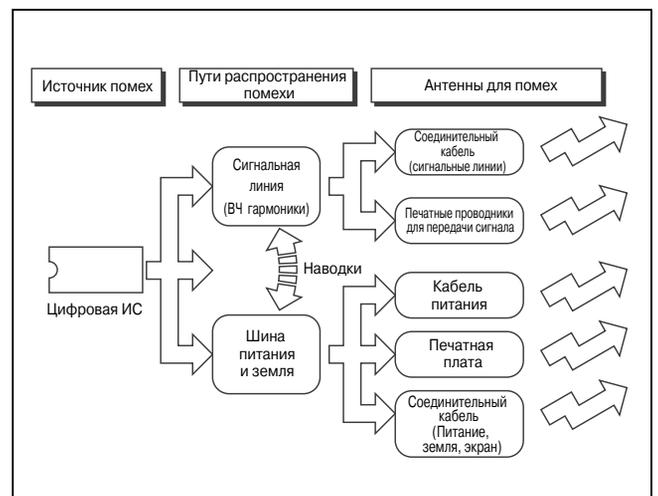
Теперь обсудим причины возникновения синфазных помех, наблюдавшихся в описанном ранее экспериментальном макете электронной схемы. В этой экспериментальной схеме цифровой сигнал частотой 16 МГц генерировался микросхемой IC2 и передавался микросхеме IC3. Если в таком устройстве земляная шина идеальна, то на земляном выводе не должно быть напряжения, и соответственно не должно быть и синфазной помехи. Однако, поскольку земляная шина на экспериментальной печатной плате имеет относительно малые размеры, «земля» обладает некоторой индуктивностью, из-за чего на земляном выводе появляется напряжение, создаваемое возвратным током сигнала. Оно приводит к появлению синфазной помехи. Ток, текущий от источника питания к микросхемам, также вызывает падение напряжения на земляной шине и служит источником синфазной помехи.

Синфазная помеха эффективно подавляется путем снижения импеданса земляной шины (прокладки хорошей земли) или за счет включения ЕМI-фильтров в сигнальную линию и в шину питания, что позволяет снизить возвратный ток.



#### 5. Заключение

На диаграмме сведено воедино все, о чем рассказывалось в предыдущих разделах. Цифровые ИС служат источником помех, которые распространяются через сигнальные линии, шины питания и земляные шины. Когда эти помехи излучаются печатной платой или через кабели ввода/вывода и кабели питания, служащие антеннами, возникают электромагнитные помехи. ЕМI-фильтры снижают уровень излучаемых помех, подавляя помехи в линиях передачи.



# 2

## Подавление электромагнитных помех

В этой главе описаны способы применения ЕМI-фильтров для подавления помех, излучаемых печатными платами.

В качестве рекомендаций по разработке печатных плат мы представим вам результаты измерений уровня помех, полученные при различном

расположении компонентов, топологии печатной платы или при улучшении заземления. Кроме того, в качестве рекомендаций по экранированию печатных плат мы представим результаты измерений уровня помех, полученные при различных размерах отверстий в экране.

### 1. Методы подавления электромагнитных помех

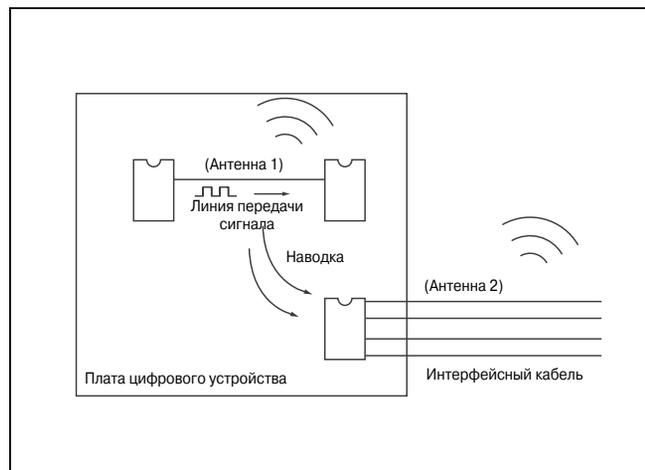
#### Идеализированная модель подавления помех

На рисунках представлена идеализированная модель подавления помех, излучаемых печатной платой, с помощью ЕМI-фильтров. Помеха, создаваемая цифровой ИС, излучается линией передачи сигнала, которая служит антенной, или передается на интерфейсную схему, а затем излучается соединительным кабелем, который также служит антенной.

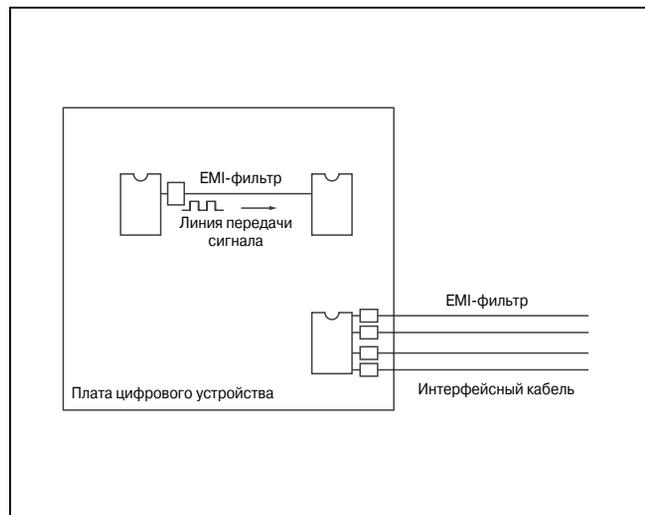
Такая помеха эффективно подавляется включением помехоподавляющего фильтра в сигнальную линию, послужившую источником этой помехи.

Если трудно локализовать источник помехи или ЕМI-фильтр невозможно включить в сигнальную линию из-за требований, предъявляемых к форме сигнала, то помехоподавляющий фильтр следует установить в месте подключения интерфейсного кабеля.

#### Без ЕМI-фильтра



#### С ЕМI-фильтром



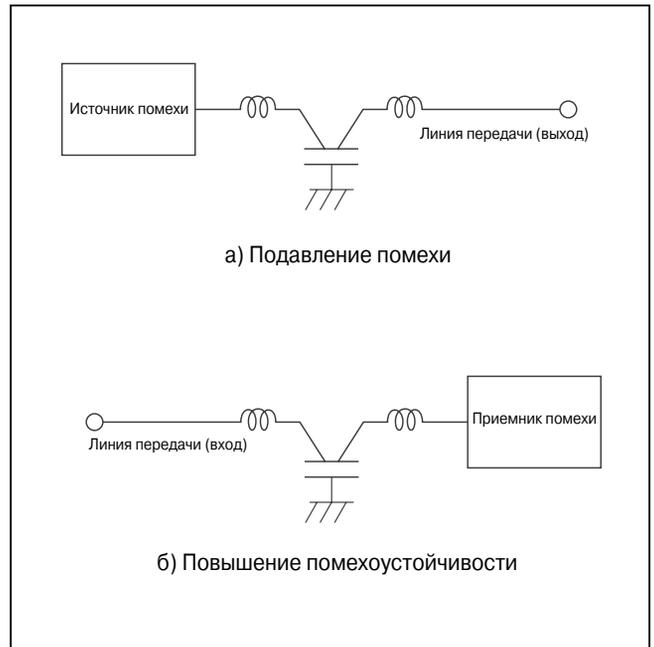
## 2. Помехоподавляющие фильтры

### Применение помехоподавляющих фильтров

Помехоподавляющие фильтры включаются в линии передачи для ликвидации как помех, создаваемых источником помехи, так и помех, наведенных внешним устройством. Следовательно, ЕМИ-фильтры можно использовать для решения обеих задач помехоподавления — и для снижения уровня излучаемых помех, и для повышения помехоустойчивости.

Для того чтобы помехи на входе и на выходе фильтра не могли смешаться друг с другом, ЕМИ-фильтры для подавления создаваемых помех следует располагать вблизи от источника помехи, а ЕМИ-фильтры для повышения помехоустойчивости — вблизи от устройства, подверженного воздействию внешних помех.

Если вы намереваетесь применить помехоподавляющий фильтр для кабельного соединения, его следует располагать в месте подключения кабеля.



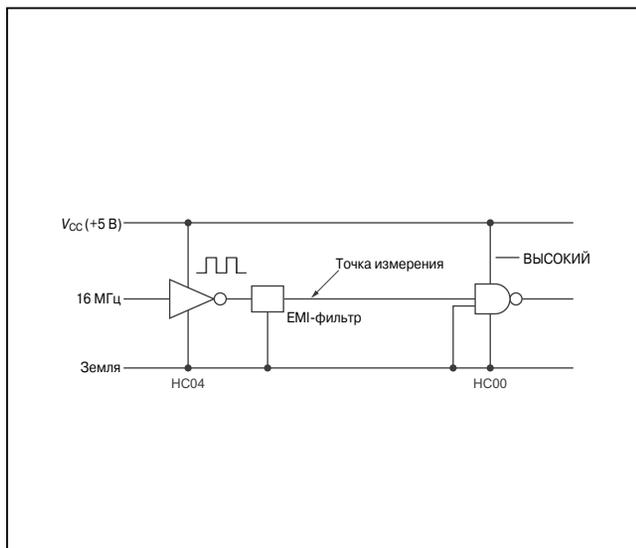
### Эффективность помехоподавляющих фильтров

Помехоподавляющие фильтры обычно разделяют на две группы — индуктивные фильтры и емкостные фильтры. Чип-дроссели в виде ферритовых бусин — это ЕМI-фильтры индуктивного типа, а чип-фильтры EMIFIL® — емкостного. Оба типа фильтров являются фильтрами нижних частот, убирающими нежелательные гармоники из цифровых сигналов.

Индуктивные ЕМI-фильтры включаются в линию передачи сигнала последовательно, чтобы уменьшить токи нежелательных гармоник. Емкостные ЕМI-фильтры включаются между сигнальной линией и земляной шиной, чтобы токи нежелательных гармоник отводились на землю через шунтирующий конденсатор.

В последующих разделах мы поясним, как следует применять эти помехоподавляющие фильтры.

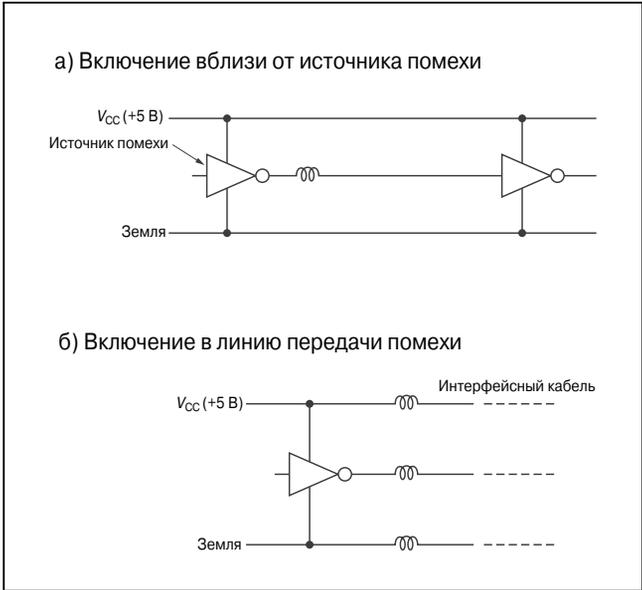
Схема измерений



Помехоподавляющий фильтр	Форма сигнала	Спектр сигнала
<p>Без фильтра</p>	<p>По горизонтали: 10 нс/деление По вертикали: 1 В/деление</p>	<p>Уровень [дБмкВ/м] Частота [МГц]</p>
<p>Ферритовая чип-бусина</p> <p>BLM18AG221SN1 (220 Ом/100 МГц)</p>	<p>По горизонтали: 10 нс/деление По вертикали: 1 В/деление</p>	<p>Уровень [дБмкВ/м] Частота [МГц]</p>
<p>Чип-фильтр EMIFIL</p> <p>NFM21CC470U1H3 (47 пФ)</p>	<p>По горизонтали: 10 нс/деление По вертикали: 1 В/деление</p>	<p>Уровень [дБмкВ/м] Частота [МГц]</p>

### Применение индуктивных ЕМI-фильтров

Индуктивные ЕМI-фильтры (помехоподавляющие фильтры, основным элементом которых является индуктивность, например, ферритовая бусина) следует включать в линию передачи помехи последовательно. Когда такой фильтр располагается вблизи от источника помехи, его следует включать только в сигнальную линию. Когда такой фильтр располагается на некотором удалении от источника помехи, его следует включать во все линии передачи, поскольку помеха может распространяться через шину питания и земляную шину точно так же, как и через линию передачи сигнала.

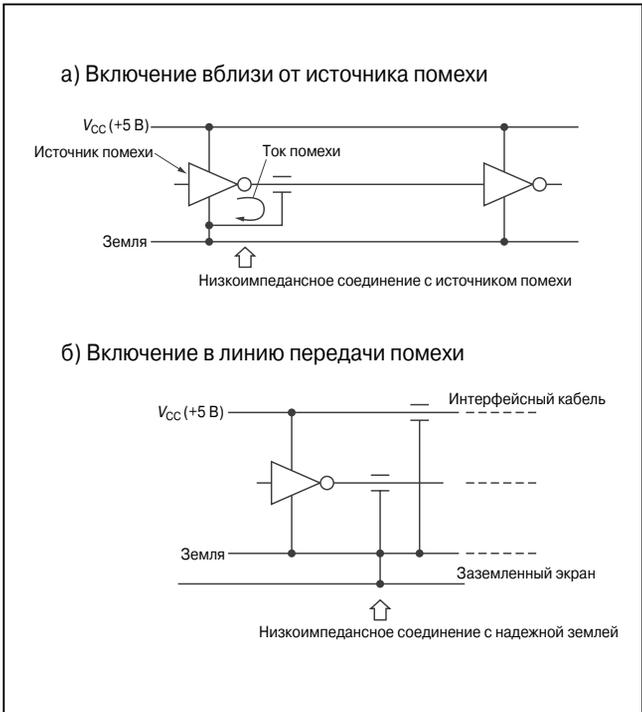


### Применение емкостных ЕМI-фильтров (1)

Емкостные ЕМI-фильтры (помехоподавляющие фильтры, в которых имеется встроенный конденсатор, например, трехвыводные конденсаторы и помехоподавляющие фильтры для сигнальных цепей), следует включать в линии передачи сигнала последовательно, а также подключать к земляной шине.

Когда такой фильтр располагается вблизи источника помехи, его следует подключать к земле как можно ближе к земляному выводу источника помехи, чтобы путь возвратного тока помехи от фильтра емкостного типа до источника помехи был возможно более коротким, то есть наиболее предпочтительным.

Когда такой фильтр располагается на некотором удалении от источника помехи, то для повышения качества заземления в дополнение к помехоподавляющим компонентам следует применять заземленный экран, поскольку помеха может распространяться через земляную шину точно так же, как и через линию передачи сигнала.



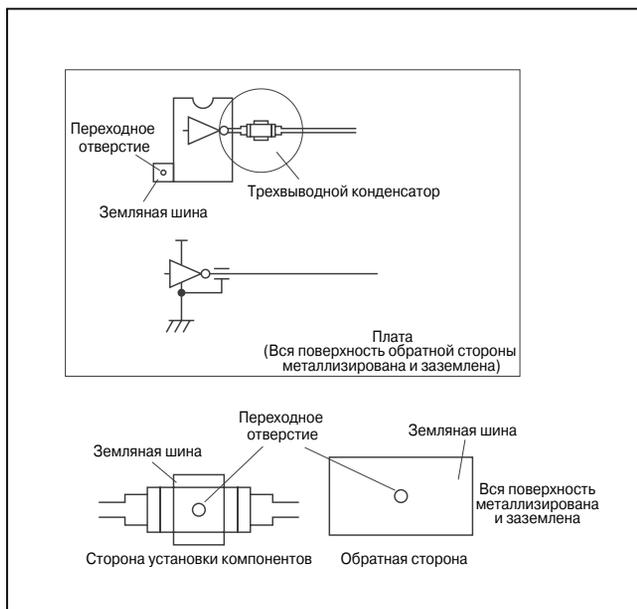
## Применение емкостных ЕМI-фильтров (2)

На приведенных ниже иллюстрациях показаны конфигурации печатных проводников для размещения емкостного ЕМI-фильтра вблизи от источника помехи. Земляной вывод помехоподавляющего фильтра и земляной вывод микросхемы — источника помехи следует соединять с заземленной сплошной металлизацией, покрывающей всю обратную сторону печатной платы, чтобы образовался возможно более короткий, то есть наиболее предпочтительный путь для возвратного тока помехи.

### Правильно

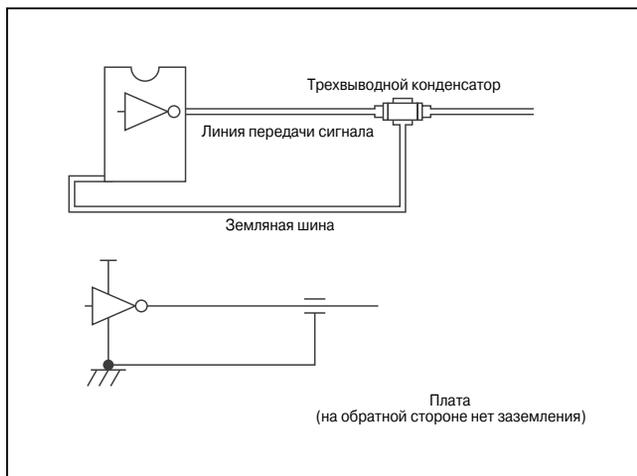
Земляной вывод фильтра подключается через переходное отверстие к заземленной сплошной металлизации на обратной стороне платы.

1. Импеданс такого заземления на высоких частотах мал.
2. Длина петли, образованной сигнальной линией и земляной шиной, минимальна.



### Неправильно

1. Импеданс соединения земляного вывода фильтра с земляным выводом ИС велик (малая часть тока помехи течет в землю).
2. Длина петли, образованной сигнальной линией и земляной шиной, велика (эта петля может излучать помеху).



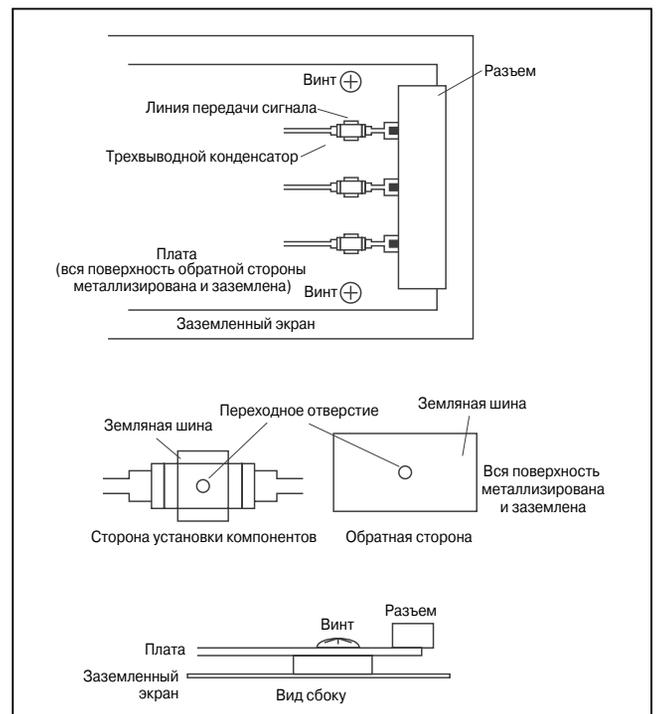
### Применение емкостных ЕМI-фильтров (3)

На иллюстрациях показана конфигурация печатных проводников для размещения емкостного ЕМI-фильтра вблизи от разъема для соединительного кабеля.

Помехоподавляющий фильтр следует установить как можно ближе к разъему, а земляной вывод фильтра заземлить на обратной стороне печатной платы. Земляной вывод фильтра для улучшения качества заземления следует соединить и с заземленным экраном.

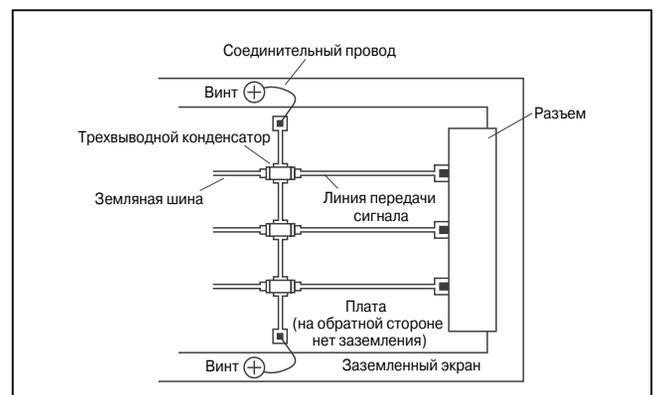
#### Правильно

1. Длина сигнальных печатных проводников между трехвыводным конденсатором и разъемом минимальна (при такой конфигурации проводников наведенные помехи меньше).
2. Земляной вывод фильтра подключается через переходное отверстие к заземленной сплошной металлизации на обратной стороне платы (импеданс такой земляной шины на высоких частотах мал).
3. Земляная шина печатной платы и заземленный экран соединяются винтами.



#### Неправильно

1. Длина сигнальных печатных проводников между трехвыводным конденсатором и разъемом велика (на сигнальные проводники будут наводиться помехи).
2. Печатные проводники земляной шины обладают повышенным импедансом на высоких частотах.
3. Повышен импеданс на высоких частотах между земляной шиной платы и надежной землей (заземленным экраном).

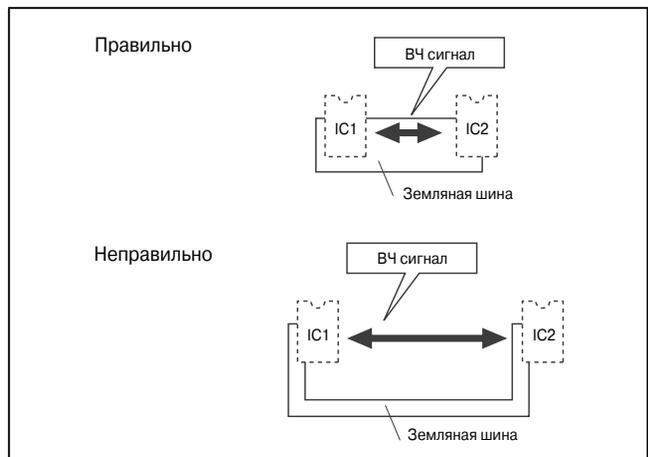


### 3. Конфигурация земляной шины

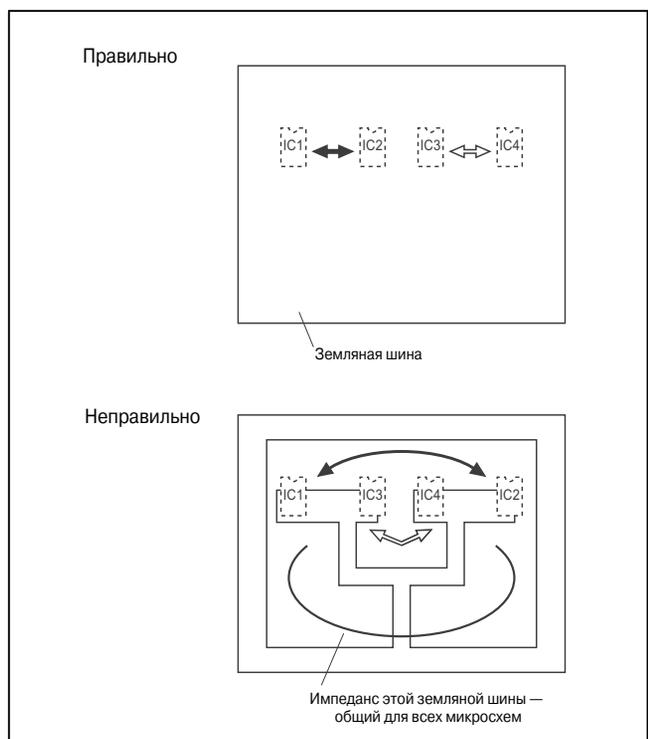
В качестве одного из приемов подавления синфазной помехи рассмотрим улучшение заземления. Когда возвратный ток сигнала течет через земляную шину, напряжение, появляющееся на земляном выводе, становится причиной синфазной помехи. Для того чтобы уменьшить напряжение на земляном выводе, мы должны уменьшать импеданс земляной шины между передающими и принимающими сигнал микросхемами, учитывая, что сигналы в схеме передаются с высокой скоростью.

Для того чтобы уменьшить взаимное проникновение помех между различными схемными блоками, мы должны уменьшать импеданс земляной шины, соединяющей блоки, чтобы токи, текущие по земляной шине от каждого из блоков, не влияли друг на друга.

1. Импеданс земляной шины уменьшается, если делать земляные печатные проводники, по которым сигналы передаются с выходов одних ИС на входы других, широкими и короткими. При этом напряжение относительно надежной земли становится минимальным.



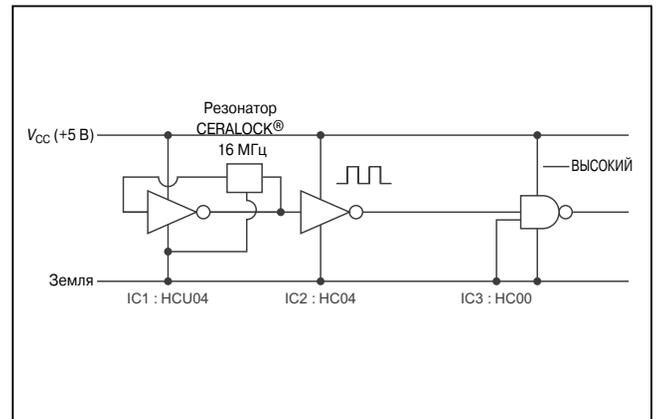
2. Общий для всех ИС импеданс земляной шины уменьшается при увеличении ее ширины. При этом уменьшаются и перекрестные помехи в линиях передачи сигналов.



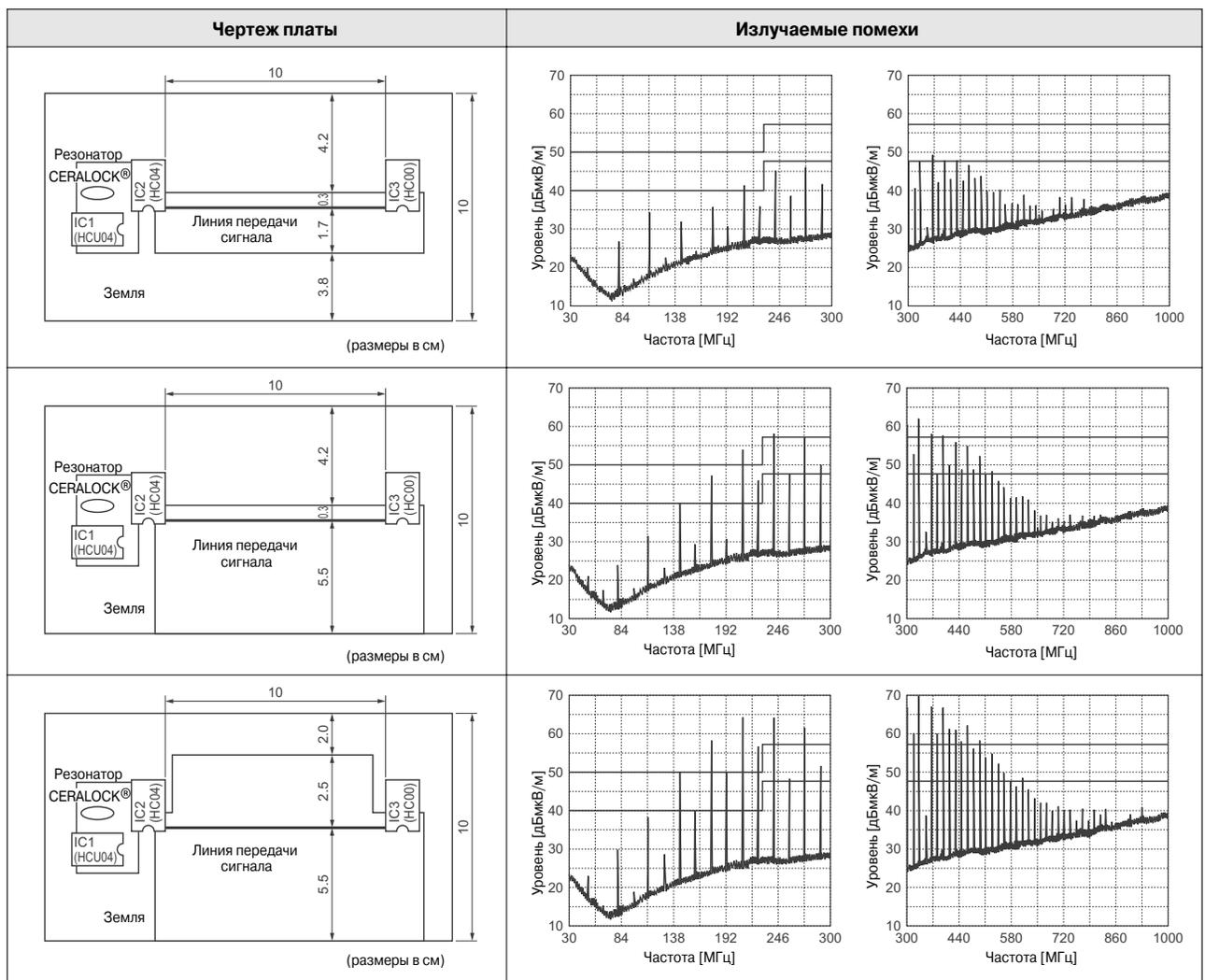
## Влияние конфигурации земляной шины

Мы провели эксперимент, подтверждающий, что уровень излучаемых помех изменяется при изменении ширины земляной шины. Результаты эксперимента показаны на рисунках. Если земляная шина проложена только с лицевой стороны печатной платы, то уровень излучаемых платой помех становится выше на 10 дБ или более. Если затем уменьшать ширину земляной шины на лицевой стороне печатной платы и увеличивать расстояние между ней и линией передачи сигнала, то уровень излучаемой помехи увеличивается еще приблизительно на 10 дБ. Можно видеть, что чем меньше ширина земляной шины, тем выше уровень излучаемых помех. Излучаемые такой печатной платой помехи эффективно подавляются, как будет показано на следующей странице, путем включения ЕМI-фильтров в линию передачи сигнала и применения заземленного экрана.

## Схема измерений

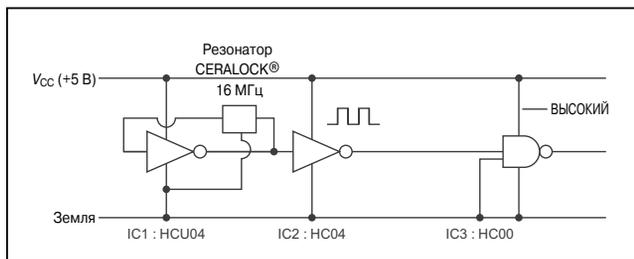


## Чертежи плат и излучаемые помехи



Улучшение качества заземления при помощи заземленного экрана

Схема измерений



Чертежи плат и излучаемые помехи

	Чертеж платы	Излучаемые помехи	
Контрольное измерение	<p>(размеры в см)</p>	<p>Уровень [дБмВ/м]</p> <p>Частота [МГц]</p>	<p>Уровень [дБмВ/м]</p> <p>Частота [МГц]</p>
Только усиление земли	<p>(размеры в см)</p>	<p>Уровень [дБмВ/м]</p> <p>Частота [МГц]</p>	<p>Уровень [дБмВ/м]</p> <p>Частота [МГц]</p>
Только EMI-фильтр	<p>(размеры в см)</p>	<p>Уровень [дБмВ/м]</p> <p>Частота [МГц]</p>	<p>Уровень [дБмВ/м]</p> <p>Частота [МГц]</p>
EMI-фильтр и усиление земли	<p>(размеры в см)</p>	<p>Уровень [дБмВ/м]</p> <p>Частота [МГц]</p>	<p>Уровень [дБмВ/м]</p> <p>Частота [МГц]</p>

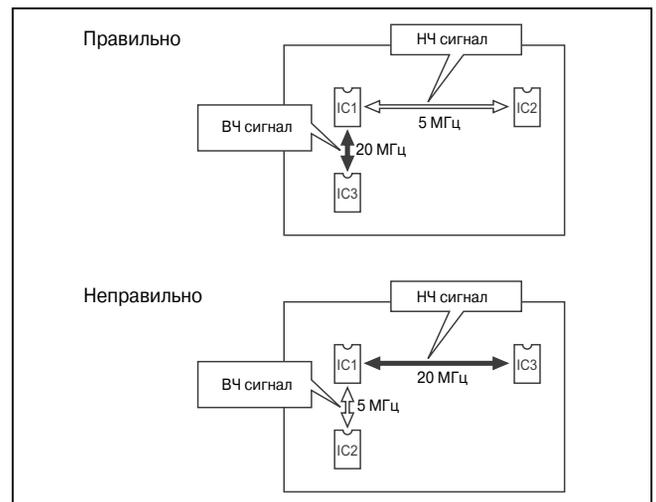
#### 4. Расположение компонентов и печатных проводников

Одна и та же схема (выполняющая одни и те же функции) может излучать помехи разного уровня в зависимости от расположения компонентов и токопроводящих дорожек на ее печатной плате. На основании экспериментальных данных в последующих разделах будет показано, что уровень помех увеличивается при повышении частоты сигнала и при увеличении длины линии передачи сигнала. Следовательно, мы можем уменьшать помехи, уменьшая длину линий, в которых сигналы передаются с высокими скоростями. Таким линиям при разводке печатной платы должен отдаваться более высокий приоритет по сравнению с сигнальными линиями, в которых скорости передачи низкие.

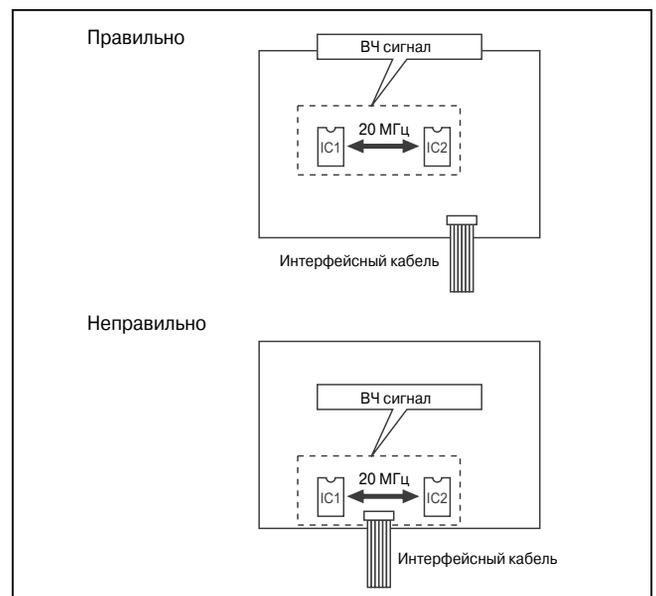
Если схема, способная создавать сильные помехи, расположена рядом с интерфейсным кабелем, то создаваемые схемой помехи могут наводиться на кабель, что приведет к излучению помех кабелем. Чтобы исключить излучение таких помех, высокочастотные схемы, способные создавать сильные помехи, должны располагаться как можно дальше от интерфейсного кабеля.

2

1. Укорачивайте линию передачи высокочастотного сигнала, чтобы уменьшить помехи, излучаемые линией передачи, и синфазные помехи.



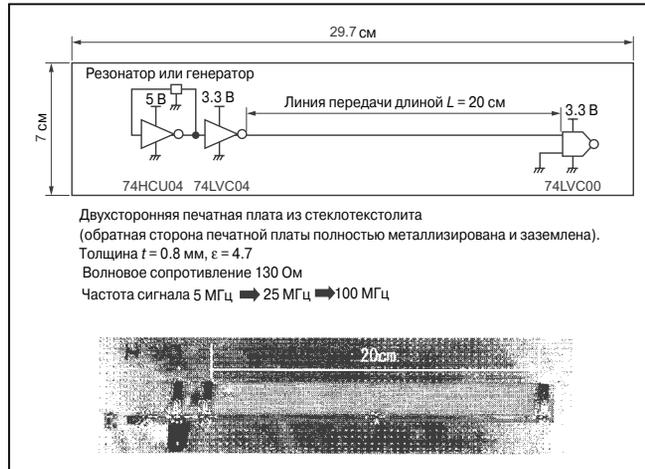
2. Следует разместить схемы, создающие сильные помехи, на некотором расстоянии от кабеля, чтобы уменьшить связь между ними.



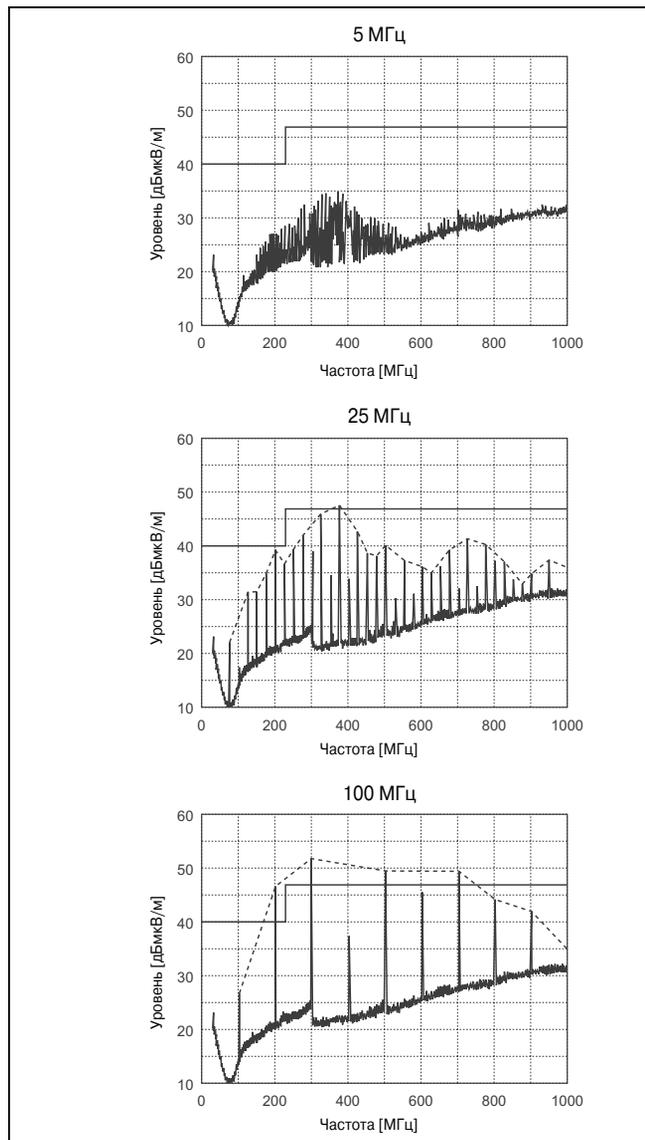
### Частота сигнала

На рисунках показано, как меняется уровень излучаемых помех при изменении частоты сигнала. При увеличении частоты сигнала увеличивается интервал между спектральными компонентами, а также и уровень помех. Диапазон частот, в котором наблюдаются помехи, расширяется в область более высоких частот.

### Экспериментальная печатная плата



### Излучаемые помехи (экспериментальные данные)



## Длина линии передачи

На рисунках показано, как меняется уровень излучаемых помех при изменении длины линии передачи сигнала и неизменной частоте сигнала.

Видно, что с увеличением длины линии передачи сигнала уровень излучаемых помех, в особенности в области низких частот, увеличивается.

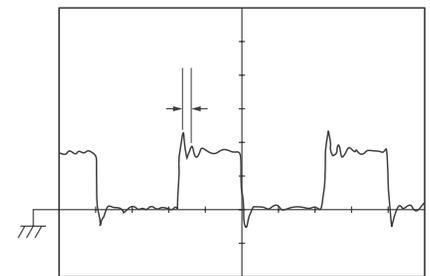
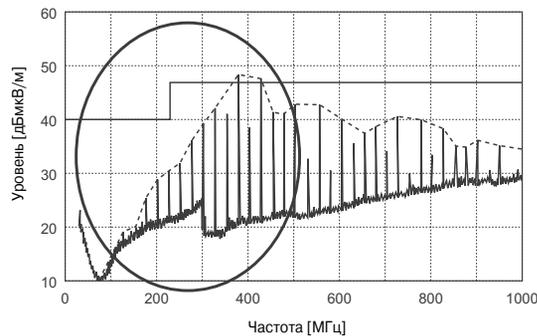
## Экспериментальная печатная плата



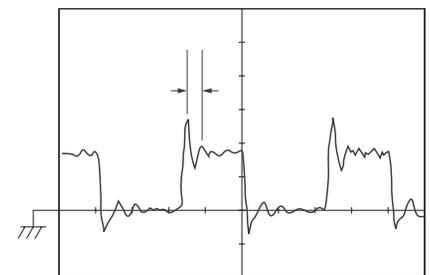
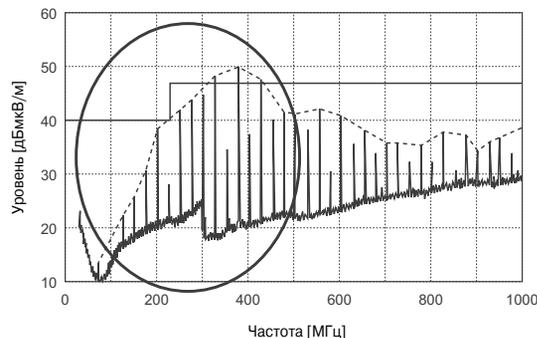
## Излучаемые помехи и форма сигнала (экспериментальные данные)

2

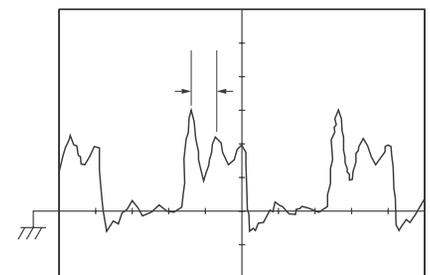
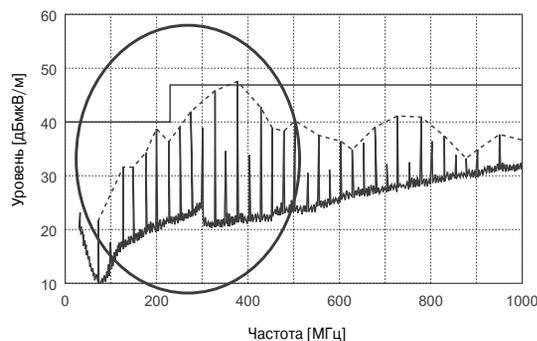
Длина линии передачи  
 $L = 5$  см



Длина линии передачи  
 $L = 10$  см



Длина линии передачи  
 $L = 20$  см



## 5. Ширина печатных проводников

На рисунках показано, как изменяется уровень излучаемых помех и форма сигнала при изменении ширины печатных проводников, образующих линию передачи сигнала. При уменьшении ширины печатных проводников уровень излучаемых помех уменьшается. Это явление, по всей вероятности, объясняется тем, что при увеличении волнового сопротивления линии уменьшается ток, текущий в линии передачи.

Что касается формы сигнала, то можно видеть, что «звон» сигнала становится меньше с увеличением ширины линии. Это, скорее всего, происходит потому, что при увеличении ширины линии уменьшается ее волновое сопротивление, и когда оно снижается до величины выходного сопротивления ИС (в нашем случае около 20 Ом), отражение сигнала становится минимальным.

Волновое сопротивление  $Z$ :

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}},$$

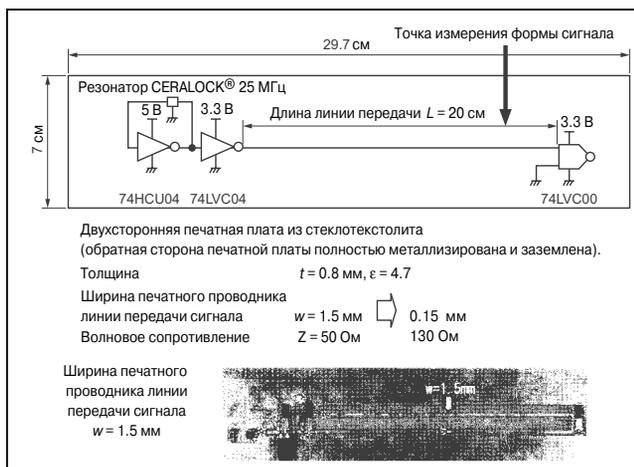
где  $L$  — погонная индуктивность;  
 $C$  — погонная емкость.

Ток  $I$ :

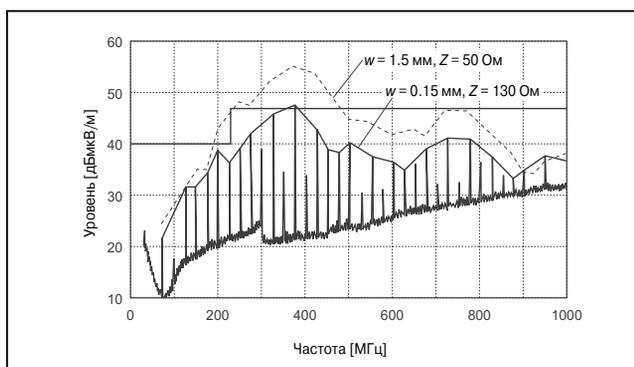
$$I = \frac{V_i}{Z} - \frac{V_r}{Z},$$

где  $V_i$  — напряжение падающей волны;  
 $V_r$  — напряжение отраженной волны.

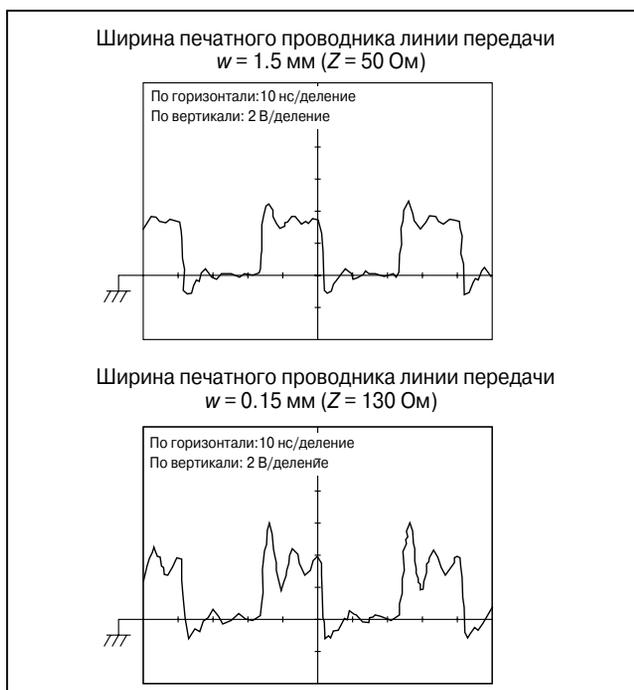
### Экспериментальная печатная плата



### Излучаемые помехи (экспериментальные данные)



### Форма сигнала (экспериментальные данные)

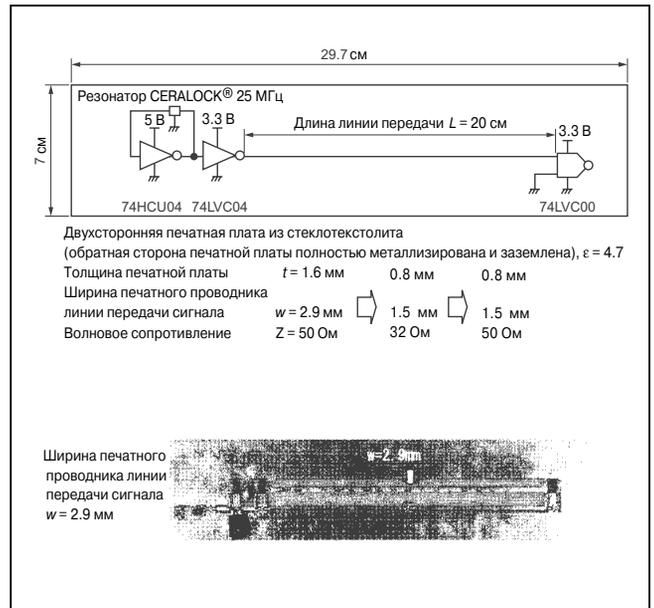


## 6. Толщина печатной платы

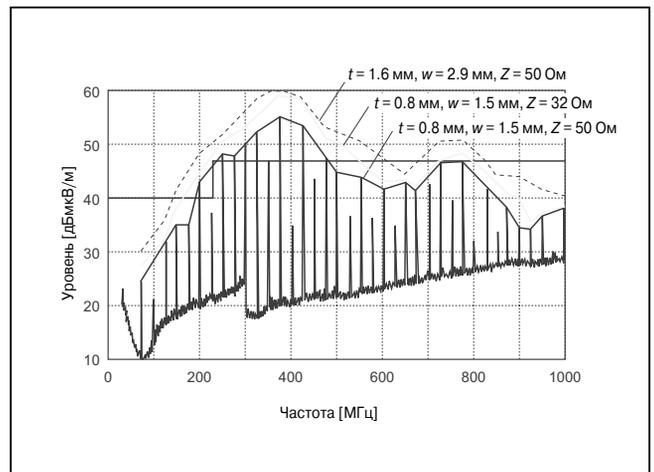
На рисунках показано, как меняется уровень излучаемых помех при изменении толщины печатной платы.

Если толщину печатной платы и ширину печатных проводников одновременно менять так, чтобы волновое сопротивление оставалось постоянным, уровень излучаемых помех будет уменьшаться при уменьшении толщины печатной платы.

### Экспериментальная печатная плата



### Излучаемые помехи (экспериментальные данные)



## 7. Экранирование

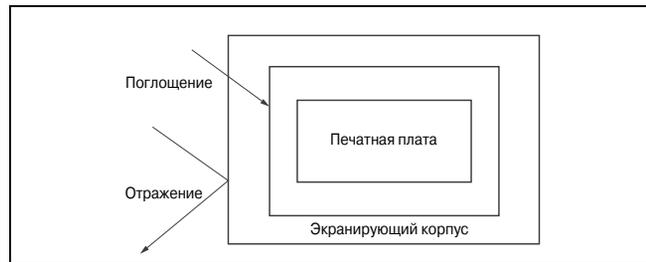
### Экранирующий корпус

Рассмотрим правила, которые следует соблюдать при экранировании печатных плат. В общем случае экранирующий эффект достигается за счет отражения и поглощения. На частотах свыше 30 МГц, где уровень помех от цифровой аппаратуры регламентируется нормирующими документами, отражение преобладает над поглощением, и экранировать печатную плату следует проводящим материалом, таким как железо или алюминий.

Ключевым моментом в достижении наилучшего экранирующего эффекта является выбор конфигурации отверстий и зазоров между контактирующими частями экранирующего корпуса. Для повышения экранирующего эффекта мы должны увеличивать контактную площадь между частями экранирующего корпуса, чтобы щели и зазоры имели минимальную длину.

Соединения контактирующих частей экранирующего корпуса должны иметь низкий импеданс, а части прилегать друг к другу без просветов. Проследите за тем, чтобы металлические поверхности экранирующего корпуса в местах соединений не были покрыты изоляционным материалом.

### Принцип экранирования



### Конструкция экрана

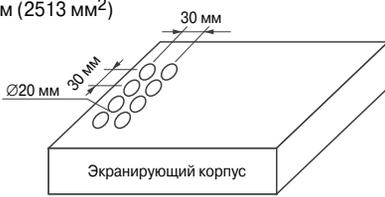
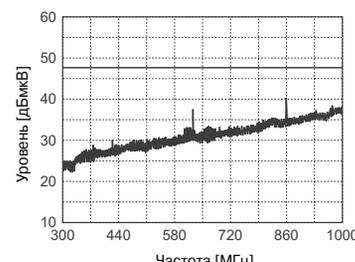
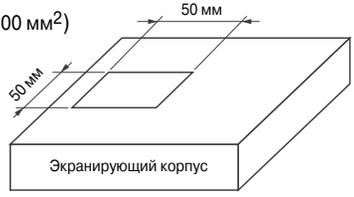
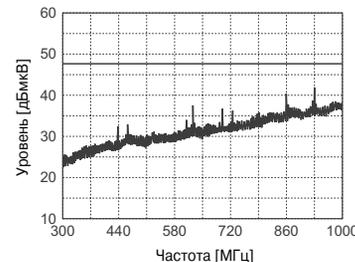
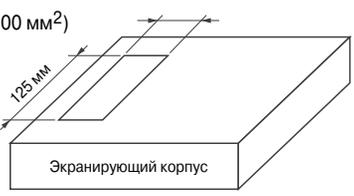
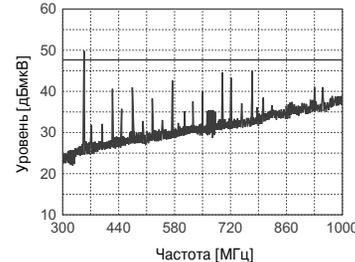
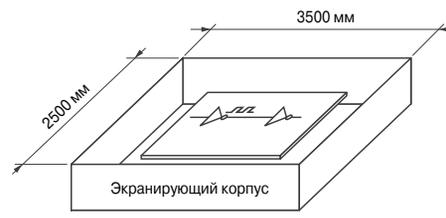
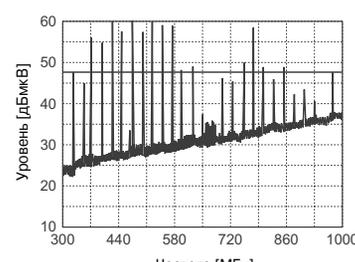
	Правильно	Неправильно
Корпус с отверстиями	<p>Экранирующий корпус</p> <p>Равномерно распределите небольшие отверстия</p>	<p>Экранирующий корпус</p>
Корпус с крышкой	<p>Экранирующий корпус</p> <p>Экранирующий корпус</p> <p>Делайте более короткие интервалы для уменьшения импеданса соединения</p>	<p>Экранирующий корпус</p> <p>Экранирующий корпус</p>

## Отверстия в экранирующем корпусе

На рисунках показано, как меняется уровень излучаемых цифровой схемой помех при изменении условий экранирования. При неизменной суммарной площади отверстий, равной приблизительно  $2500 \text{ мм}^2$ , размеры отверстий изменялись так, как показано на рисунке. Из результатов измерений можно видеть, что экранирующий эффект выше, если вся указанная площадь разбита

на множество маленьких отверстий. Напротив, экранирующий эффект существенно снижается, если в экранирующем корпусе есть одно большое прямоугольное отверстие.

Тестовая схема помещалась в экранирующий корпус, после чего измерялся уровень излучаемых помех (частота сигнала 25 МГц).

Форма отверстия	Излучаемые помехи
<p>8 отверстий <math>\varnothing 20 \text{ мм}</math> (<math>2513 \text{ мм}^2</math>)</p>  <p>Экранирующий корпус</p>	 <p>Уровень [дБμкВ]</p> <p>Частота [МГц]</p>
<p><math>50 \text{ мм} \times 50 \text{ мм}</math> (<math>2500 \text{ мм}^2</math>)</p>  <p>Экранирующий корпус</p>	 <p>Уровень [дБμкВ]</p> <p>Частота [МГц]</p>
<p><math>125 \text{ мм} \times 20 \text{ мм}</math> (<math>2500 \text{ мм}^2</math>)</p>  <p>Экранирующий корпус</p>	 <p>Уровень [дБμкВ]</p> <p>Частота [МГц]</p>
<p><math>3500 \text{ мм} \times 2500 \text{ мм}</math></p>  <p>Экранирующий корпус</p>	 <p>Уровень [дБμкВ]</p> <p>Частота [МГц]</p>

# 3 Выбор и применение EMI-фильтров

В этой главе на примере типичных схем будет показано, как выбирать помехоподавляющие фильтры и как применять эти фильтры наиболее эффективно.

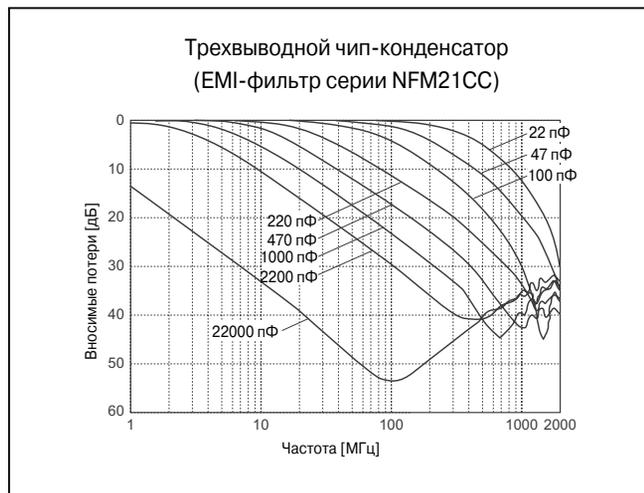
## Связь между эффективностью подавления помех EMI-фильтром и искажениями формы сигнала (1)

В общем случае EMI-фильтры — это фильтры нижних частот, которые, подавляя помехи, искажают форму сигнала. Следовательно, выбирая помехоподавляющий фильтр, следует обращать внимание также и на качество сигнала.

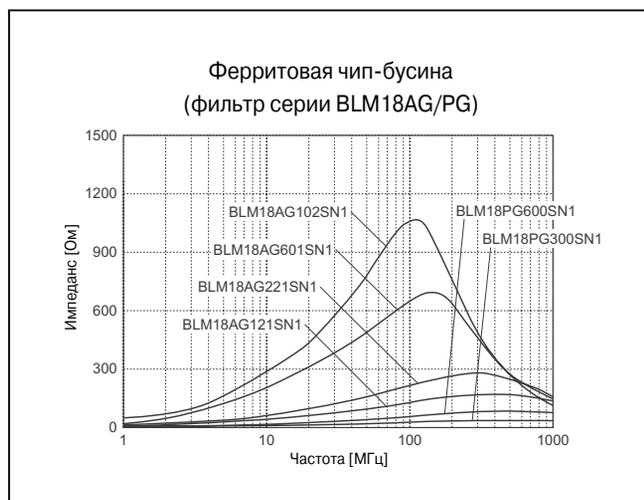
Подавление помехи емкостными и индуктивными фильтрами усиливается с увеличением емкости и импеданса соответственно. Однако, чем сильнее подавление помехи, тем больше искажения формы сигнала.

Компания Murata предлагает всевозможные типы EMI-фильтров, так что вы можете подобрать оптимальный фильтр для любой намеченной вами разработки.

## Примеры частотных характеристик емкостных EMI-фильтров (зависимость вносимых потерь от частоты)



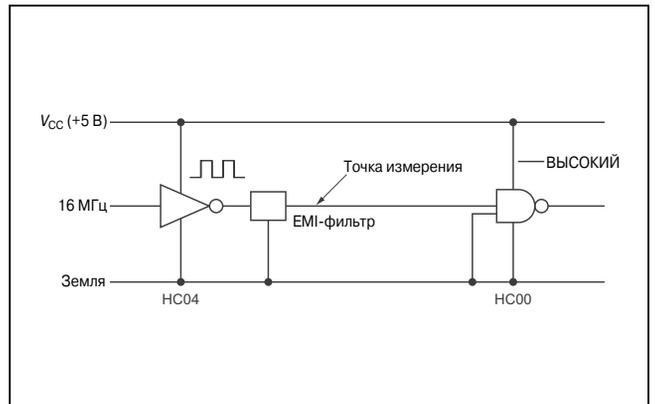
## Примеры частотных характеристик индуктивных EMI-фильтров (зависимость импеданса от частоты)



### Связь между эффективностью подавления помех EMI-фильтром и искажениями формы сигнала (2)

На рисунках приведены примеры осциллограмм сигнала и его спектров, или гармонических составляющих (причины помех), которые наблюдаются в схеме с трехвыводным конденсатором для линий передачи цифровых сигналов. Из результатов измерений можно видеть, что при увеличении емкости трехвыводного конденсатора подавление помех увеличивается, но это сопровождается сильными искажениями формы сигнала.

Схема измерений



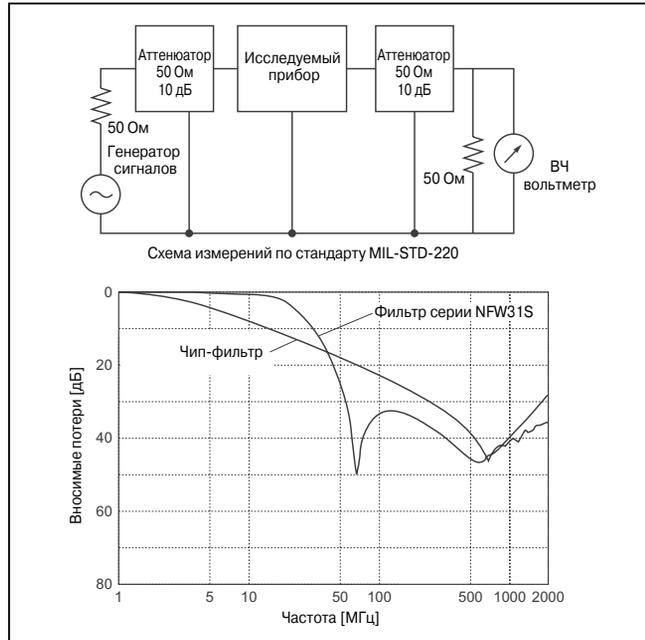
### Связь между эффективностью подавления помех EMI-фильтром и формой фронтов сигнала

Помехоподавляющий фильтр	Форма сигнала	Спектр
<p>Без фильтра</p>	<p>По горизонтали: 10 нс/деление По вертикали: 1 В/деление</p>	
<p>Чип-фильтр</p> <p>NFM21CC470U1H3 (47 пФ)</p>	<p>По горизонтали: 10 нс/деление По вертикали: 1 В/деление</p>	
<p>Чип-фильтр</p> <p>NFM21CC101U1H3 (100 пФ)</p>	<p>По горизонтали: 10 нс/деление По вертикали: 1 В/деление</p>	

### Связь между эффективностью подавления помех EMI-фильтром и искажениями формы сигнала (3)

Помехоподавляющие фильтры для сигнальных линий имеют частотные характеристики с крутыми спадами, благодаря чему возникающие при подавлении помех искажения сигнала могут быть сведены к минимуму. Мы сняли осциллограммы сигнала и исследовали его спектр (гармонические составляющие) в схеме с EMI-фильтром для линий передачи цифровых сигналов. Результаты измерений в сравнении с такими же данными, полученными для трехвыводного конденсатора, приведены на рисунках. Из результатов измерения видно, что при применении EMI-фильтра для сигнальных линий уменьшаются искажения формы сигнала и обеспечивается более эффективное подавление помех.

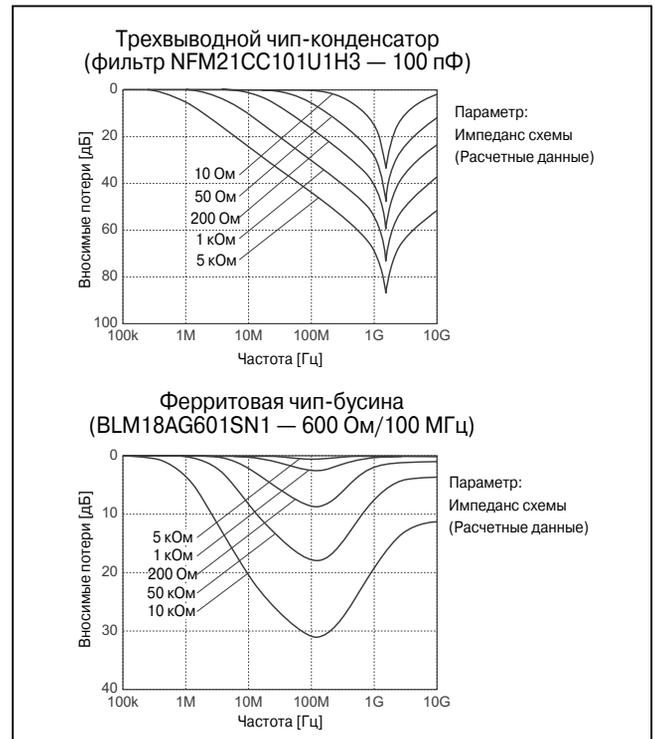
#### Частотная характеристика EMI-фильтра (зависимость вносимых потерь от частоты)



Помехоподавляющий фильтр	Форма сигнала	Спектр
<p>EMI-фильтр для линий передачи сигнала</p> <p>30 Ом + NFW31SP506X1E (Частота среза 50 МГц)</p>	<p>По горизонтали: 10 нс/деление По вертикали: 1 В/деление</p>	<p>Уровень [дБмкВ]</p> <p>Частота [МГц]</p>
<p>Чип-фильтр</p> <p>NFM21CC470U1H3 (47 пФ)</p>	<p>По горизонтали: 10 нс/деление По вертикали: 1 В/деление</p>	<p>Уровень [дБмкВ]</p> <p>Частота [МГц]</p>
<p>Чип-фильтр</p> <p>NFM21CC101U1H3 (100 пФ)</p>	<p>По горизонтали: 10 нс/деление По вертикали: 1 В/деление</p>	<p>Уровень [дБмкВ]</p> <p>Частота [МГц]</p>

## 1. Импеданс схемы и эффективность подавления помех EMI-фильтрами

Эффективность подавления помех EMI-фильтром зависит от импеданса схемы, в которую он установлен. В общем случае емкостные и индуктивные EMI-фильтры более эффективно подавляют помехи в высокоимпедансных и низкоимпедансных схемах соответственно. Применение емкостных фильтров позволяет легко получить относительно большие коэффициенты подавления. С другой стороны, индуктивные EMI-фильтры обеспечивают стабильное подавление помех и проще в разводке печатной платы, поскольку их не требуется подключать к земляной шине.



## 2. Выбор между емкостными и индуктивными EMI-фильтрами

1. Вблизи от источника помехи.

а) Емкостной EMI-фильтр в качестве основного элемента:

- Линия, в которую включены устройства с высокими входными и выходными импедансами.
- Линия с высоким уровнем помех (например, линия передачи тактового сигнала, линия шины управления).

б) Индуктивный EMI-фильтр в качестве основного элемента:

- Линия, в которую включены устройства с низкими входными и выходными импедансами (например, шина питания, к которой подключен контроллер какой-либо шины).
- Линия с относительно низким уровнем помех (поскольку не требуется заземления и монтаж фильтра проще).
- Линия, в которой требуется ограничивать ток (например, множество линий с одновременным переключением, в которых большие токи протекают на землю, — шины адреса и данных, шина управления).

2. В цепях передачи помехи.

Применяйте сочетание емкостных и индуктивных EMI-фильтров.

- Для того чтобы подавить помехи в линии передачи, например в разъеме интерфейсного кабеля, следует применять индуктивный помехоподавляющий фильтр в сочетании с емкостным фильтром, поскольку в такой линии требуется высокий коэффициент подавления, и, в большинстве случаев, нет хорошей земли. Применяя комбинацию из большого числа конденсаторов и дросселей, убедитесь в том, что компоненты различного типа чередуются друг с другом (то есть конденсаторы и дроссели включены друг за другом попеременно).

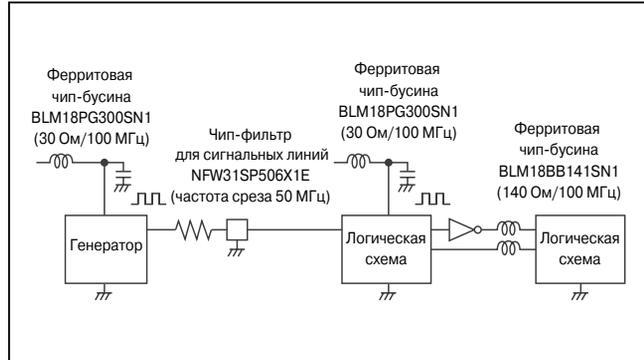
### 3. Примеры включения EMI-фильтров вблизи от источника помех

#### 1. Линияи тактового сигнала

Тактовый сигнал имеет самую высокую частоту в схеме. Если линия передачи этого сигнала имеет большую длину, то тактовый сигнал может создавать сильные помехи. Кроме того, поскольку частота сигнала близка к частоте помехи, трудно отфильтровать помеху из линии передачи сигнала, не исказив при этом его формы. Это означает, что следует применять EMI-фильтры для сигнальных линий, имеющие частотную характеристику с крутыми спадами, или чип-дрозсели в виде ферритовых бусин для высокоскоростных линий передачи сигнала, чтобы исключить помехи от линий тактового сигнала.

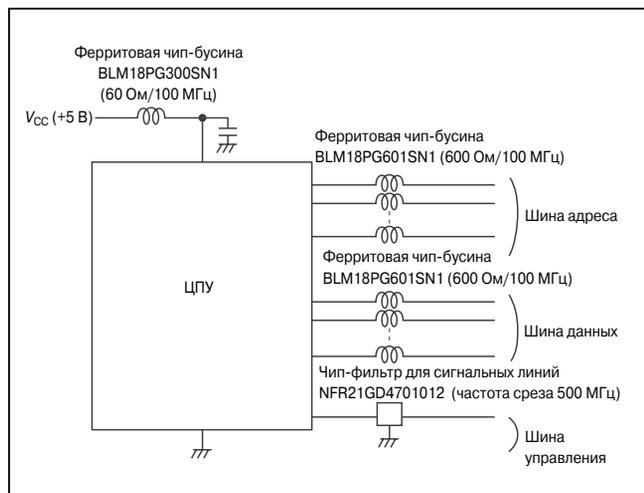
Если линию тактового сигнала можно сделать короче, вы можете использовать только ферритовые бусины, поскольку для таких линий достаточно относительно невысокого подавления помех.

Для того чтобы подавить помехи, создаваемые на шине питания микросхем, передающих тактовый сигнал, вам следует применять ферритовые чип-бусины в комбинации с шунтирующими конденсаторами.



#### 2. Шины

Поскольку в шинах одновременно переключается большое количество сигналов, в цепях питания и земли текут большие мгновенные токи, создающие помехи. Чтобы эффективно подавить эти помехи, необходимо ограничить ток, протекающий в шине питания и в земляной шине, за счет ограничения тока в сигнальной линии. Для этого следует установить ферритовые бусины в каждую сигнальную линию. Если требуется более сильное подавление помех, следует использовать чип-фильтры EMIFIL® с встроенным резистором для сигнальных линий.

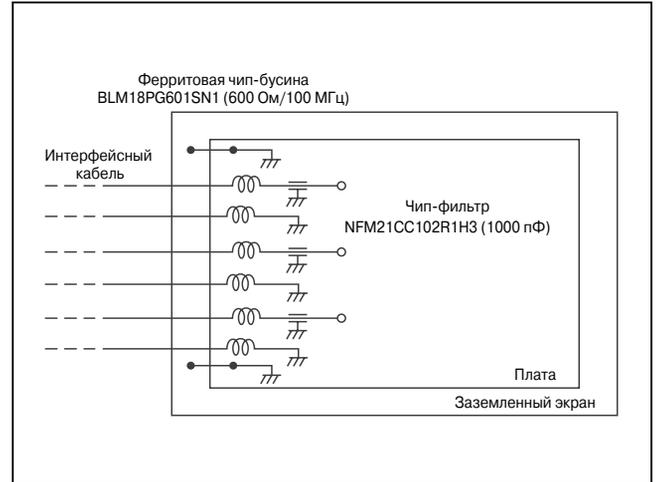


## 4. Примеры включения EMI-фильтров в цепях прохождения помех

### 1. Место подключения сигнального кабеля

Если требуется сильное подавление помех, то следует применять чип-фильтры EMIFIL® или емкостные EMI-фильтры в комбинации с ферритовыми чип-бусинами. Если для линии достаточно относительно небольшого подавления помех, то можно ограничиться одной лишь ферритовой чип-бусиной.

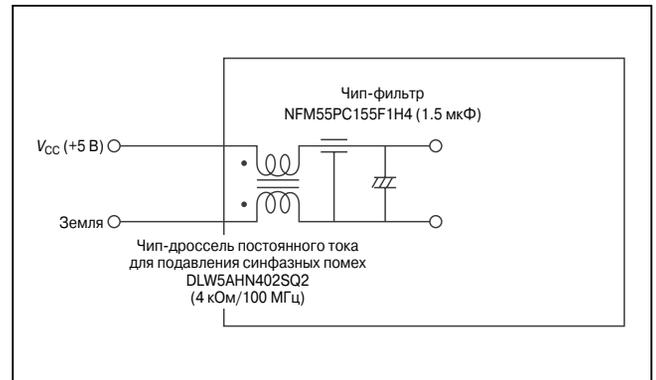
Для того чтобы использовать емкостной помехоподавляющий фильтр более эффективно, вы должны подключить его земляной вывод к надежной земле. Если хорошей земли нет, следует предусмотреть заземленный экран, чтобы улучшить качество заземления.



### 2. Место подключения кабеля питания (1)

Для подавления помех в шинах питания требуется определить, какого типа помеха распространяется по этим шинам и применить EMI-фильтр именно для этого типа помехи. Если земля в схеме достаточно хорошая, то преобладать будет дифференциальная помеха. В схемах с плохой землей будет также присутствовать и синфазная помеха.

Когда присутствуют и дифференциальные, и синфазные помехи, необходимо принимать меры для подавления помех обоих типов.



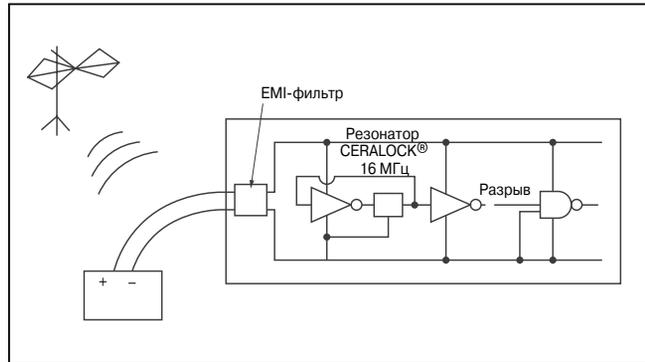
### 3. Место подключения кабеля питания (2)

На макетной плате, описанной в главах 1 и 2, были измерены помехи, излучаемые кабелем питания. На этой макетной плате первоначально и дифференциальные, и синфазные помехи были подавлены при помощи следующих EMI-фильтров, позволяющих снизить излучение помех кабелем питания:

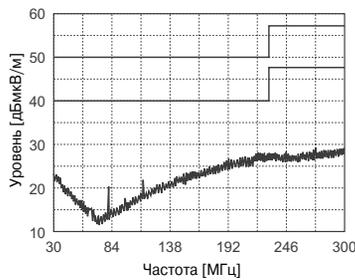
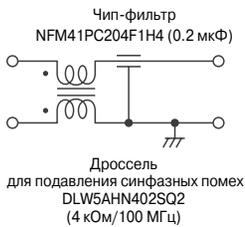
- Против дифференциальных помех — трехвыводной конденсатор (чип-фильтр).
- Против синфазных помех — дроссель для подавления синфазных помех.

В ходе измерений исключался один из этих EMI-фильтров, результаты измерений представлены на рисунках. Эти результаты показывают, что кабель питания такой платы излучает как дифференциальные, так и синфазные помехи.

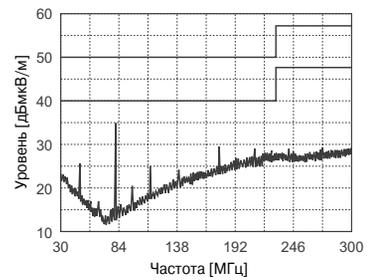
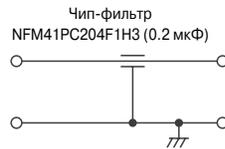
Макетная плата



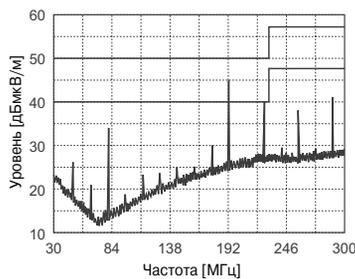
● С фильтрами против дифференциальных и синфазных помех



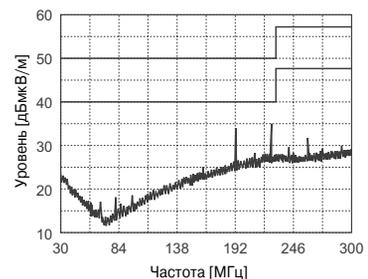
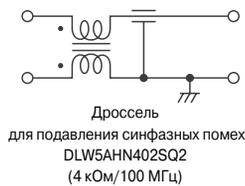
● С фильтром только против дифференциальных помех



● Без фильтра



● С фильтром только против синфазных помех



# 4

## Влияние длины линии передачи на эффективность подавления помех

Эффективность подавления помех ЕМI-фильтрами в значительной степени зависит от характеристик линии, соединяющей источник и приемник сигнала. В этой главе будет показано, как изменяется подавление помех дроселями (ферритовыми бусинами) при изменении длины линии передачи, и проанализированы возможные причины этих изменений.

Чтобы проследить связь между измеренным распределением тока и эффективностью подавления помех ферритовыми бусинами, мы измерили распределение тока в линии передачи.

В конце этой главы мы покажем, каким образом можно повысить эффективность подавления помех в случаях, когда одна только ферритовая бусина не способна обеспечить достаточного подавления помех.

### 1. Пример зависимости подавления помех от длины линии передачи

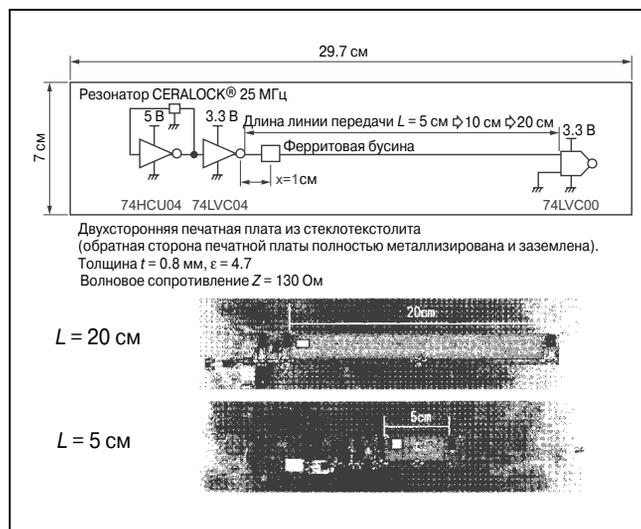
#### Экспериментальная печатная плата и метод измерения

Печатная плата и условия измерения помех в этом эксперименте показаны на рисунках. Мы генерировали цифровой сигнал с частотой 25 МГц и исследовали форму сигнала и уровень помех при прохождении этого цифрового сигнала через линию передачи (микрополосковую линию).

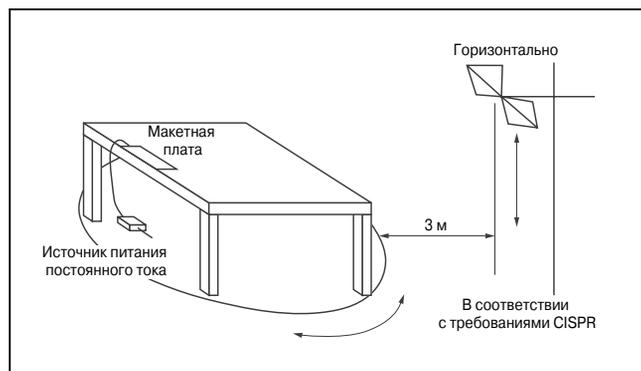
Когда в такую линию передачи включается ферритовая бусина, уменьшение излучаемых линией помех считается помехоподавляющим эффектом бусины.

Мы провели этот эксперимент для того, чтобы оценить изменения эффективности подавления помех при изменении длины линии с 5 до 20 см.

#### Экспериментальная печатная плата



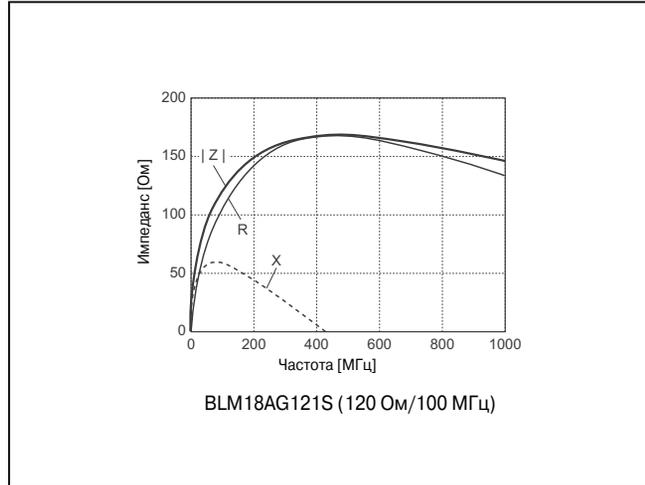
#### Расположение оборудования при эксперименте



**Измерение излучаемых помех**

На рисунках изображены зависимость импеданса используемой в качестве фильтра ферритовой бусины от частоты и результаты измерений излучаемой помехи при различной длине линии передачи. Хотя до установки фильтра минимальные уровни излучаемых помех несколько меняются с изменением длины линии, пиковые уровни остаются практически постоянными. После установки ферритовой бусины уровень излучаемых помех начинает зависеть от длины линии значительно сильнее. В частности, большие изменения наблюдаются на частоте 375 МГц, где обнаруживается пиковый уровень помехи. Для 5-см линии этот уровень снижается не менее чем на 13 дБ. Для 20-см линии, как оказалось, он снижается всего лишь на 2 дБ. Видно, что эффективность подавления помех существенно меняется при изменении длины линии передачи, даже при использовании одного и того же дросселя.

**Зависимость импеданса ферритовой бусины от частоты**



**Зависимость эффективности подавления помех от длины линии передачи (экспериментальные данные)**

	До установки ферритовой бусины	После установки ферритовой бусины
<b>L = 5 см</b>		
<b>L = 10 см</b>		
<b>L = 20 см</b>		

## 2. Анализ причин изменения эффективности подавления помех

### Распределение напряжения и тока в линии передачи

Для того чтобы проанализировать вероятные причины изменений эффективности подавления помех ферритовой бусиной при изменении длины линии передачи, мы измерили распределение тока и напряжения в линии передачи.

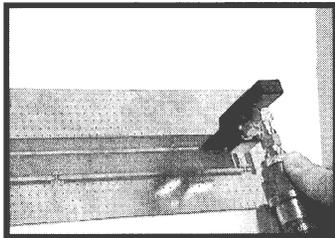
Для измерения тока мы использовали датчик магнитного поля и анализатор спектра и изготовили калибровочную печатную плату, чтобы определить коэффициент коррекции тока.

Для измерения напряжения мы использовали датчик напряжения и анализатор спектра.

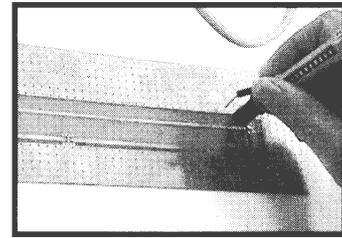
На приведенных рисунках показаны процесс и результаты измерений распределения тока и напряжения в 20-см линии передачи до установки в нее ферритовой бусины. Как видно из этого примера, ток и напряжение в линии передачи изменяются при перемещении точки измерения вдоль линии, а распределение тока и напряжения изменяется также и при изменении рабочей частоты.

### Метод измерений распределения напряжения и тока

Распределение тока: датчик магнитного поля  
(частотный диапазон 1 МГц... 1 ГГц)  
(Для определения коэффициента коррекции  
была изготовлена калибровочная печатная плата)

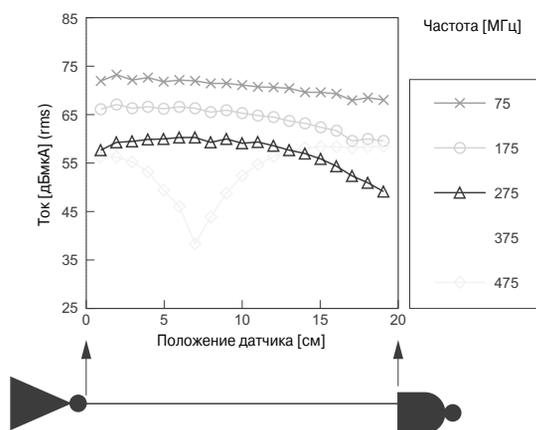


Распределение напряжения: датчик напряжения  
(частотный диапазон 2.5 ГГц)

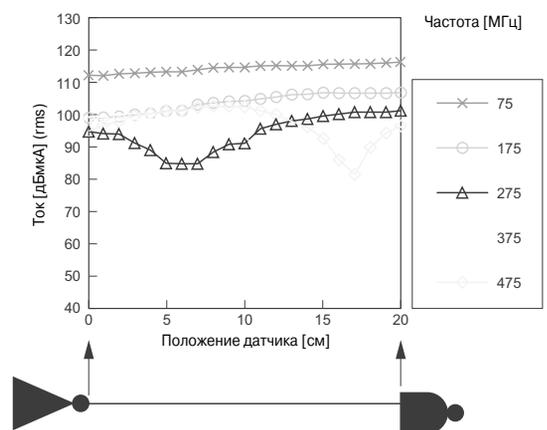


### Примеры распределения напряжений и токов в линии (при длине линии 20 см)

Распределение тока (экспериментальные данные)



Распределение напряжения (экспериментальные данные)



Измеренное значение напряжения и тока в линии передачи изменяется при перемещении точки измерения вдоль линии. Распределение напряжения и тока, кроме того, изменяется при изменении рабочей частоты.

### Распределение тока после установки ферритовой бусины

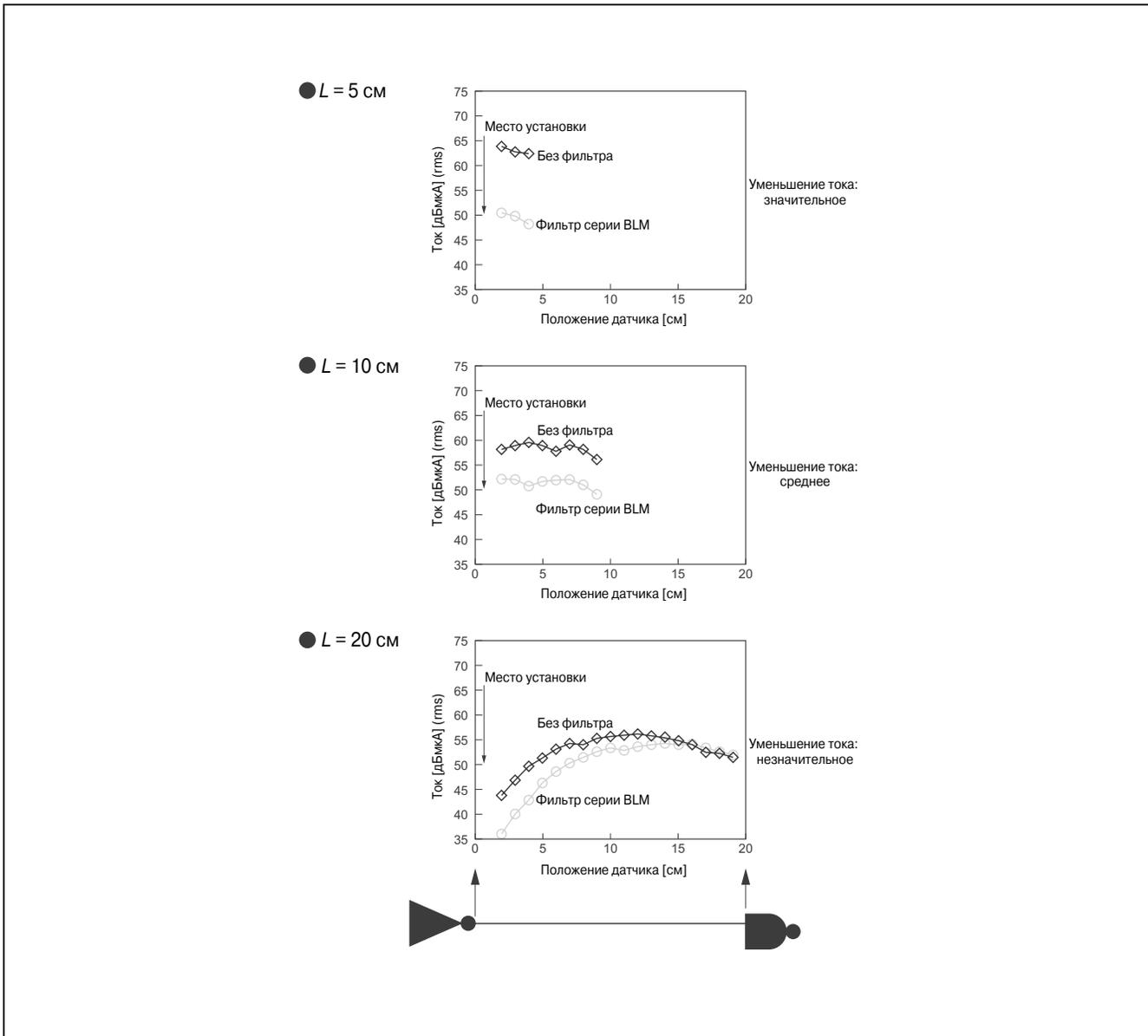
Теперь сравним распределение тока в линии до установки ферритовой бусины с данными, полученными после ее установки. Будем сравнивать распределения тока для частоты 375 МГц, так как мы наблюдали существенную разницу в подавлении помех таким фильтром при изменении длины линии передачи на макетной печатной плате именно на частоте 375 МГц. На приведенных рисунках показаны результаты измерений распределения тока для различной длины линии передачи.

Из результатов измерений видно, что распределение тока, так же как и излучаемая помеха на

частоте 375 МГц, уменьшается при укорачивании линии передачи. При 5-см линии передачи измеренный ток в целом становится меньше, а пиковое значение тока уменьшается на 13 дБ, что хорошо согласуется с результатами измерений излучаемых помех.

При 20-см линии передачи, однако, значительного уменьшения тока не наблюдается, и пиковое значение тока уменьшается только на 2 дБ, что также совпадает с результатами измерений излучаемых помех.

**Распределение тока для частоты 375 МГц (экспериментальные данные). На этой частоте наблюдается существенная разница в эффективности подавления помех**



### Анализ причин изменения эффективности подавления помех

Мы установили, что существует связь между изменением распределения тока и изменением излучаемых помех. Теперь мы сравним распределения тока для каждой из длин линии передачи, измеренные до подключения ферритовой бусины.

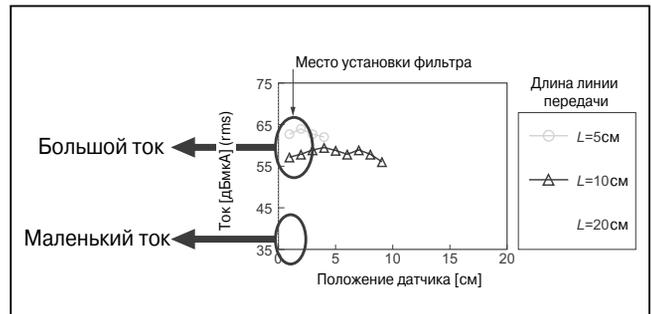
Сравнив величины тока в местах установки ферритовых бусин, можно заметить, что в линиях длиной 5 и 10 см, где ферритовая бусина дает существенный помехоподавляющий эффект, наблюдается и значительный ток. И наоборот, в линии длиной 20 см, где помехоподавляющий эффект ферритовой бусины мал, ток в месте установки ферритовой бусины имеет минимальное значение, а его пиковое значение наблюдается на некотором расстоянии от места установки фильтра, несколько ближе к нагрузке.

Теперь вычислим импеданс, разделив измеренное напряжение на измеренный ток. Импеданс 5-см и 10-см линий в местах установки ферритовых бусин получается меньше 100 Ом. Импеданс 20-см линии в месте установки ферритовых бусин, как оказалось, равен приблизительно 1 кОм, что существенно больше предыдущей величины.

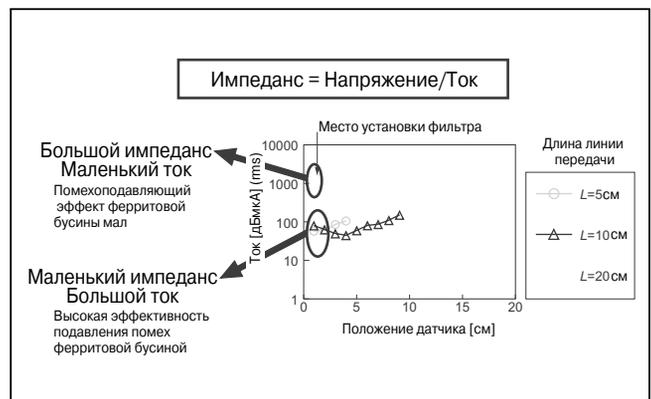
Поскольку ферритовые бусины — это компоненты, добавляющие в линию некоторый импеданс, существенный помехоподавляющий эффект достигается тогда, когда импеданс линии в месте установки фильтра мал. Если же, наоборот, импеданс в месте установки фильтра будет большим, они не смогут обеспечить значительного помехоподавляющего эффекта. В эксперименте с 20-см линией передачи импеданс в месте установки фильтра достигал 1 кОм, в то время как импеданс ферритовой бусины был равен только 166 Ом.

Следовательно, мы приходим к заключению, что ферритовая бусина не способна обеспечить существенного подавления помех в линии передачи длиной 20 см.

### Сравнение токов в месте установки фильтра (до установки фильтра)



### Сравнение импедансов в месте установки фильтра (до установки фильтра)



### Зависимость потерь пикового тока от длины линии передачи

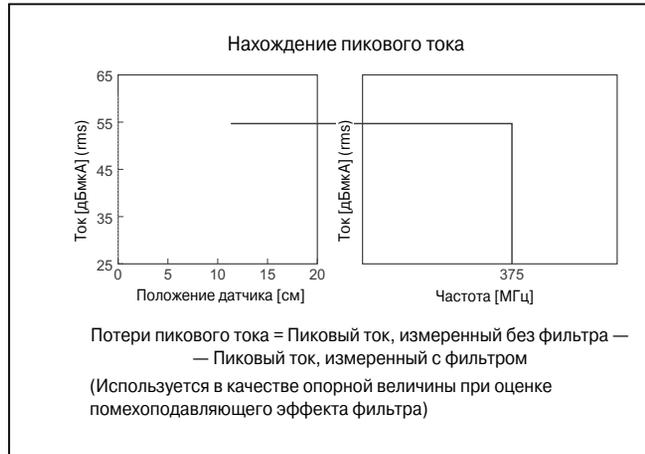
В предыдущих разделах мы выяснили, что значения тока и напряжения в линии передачи изменяются при перемещении точки измерения, а распределение тока и напряжения изменяются при изменении рабочей частоты. Кроме того, мы установили, что различия в распределении тока и напряжения сказываются на помехоподавляющем эффекте ферритовой бусины.

В предыдущих экспериментах наше внимание было сфокусировано на частоте 375 МГц, теперь же мы исследуем, как помехоподавляющий эффект зависит от рабочей частоты.

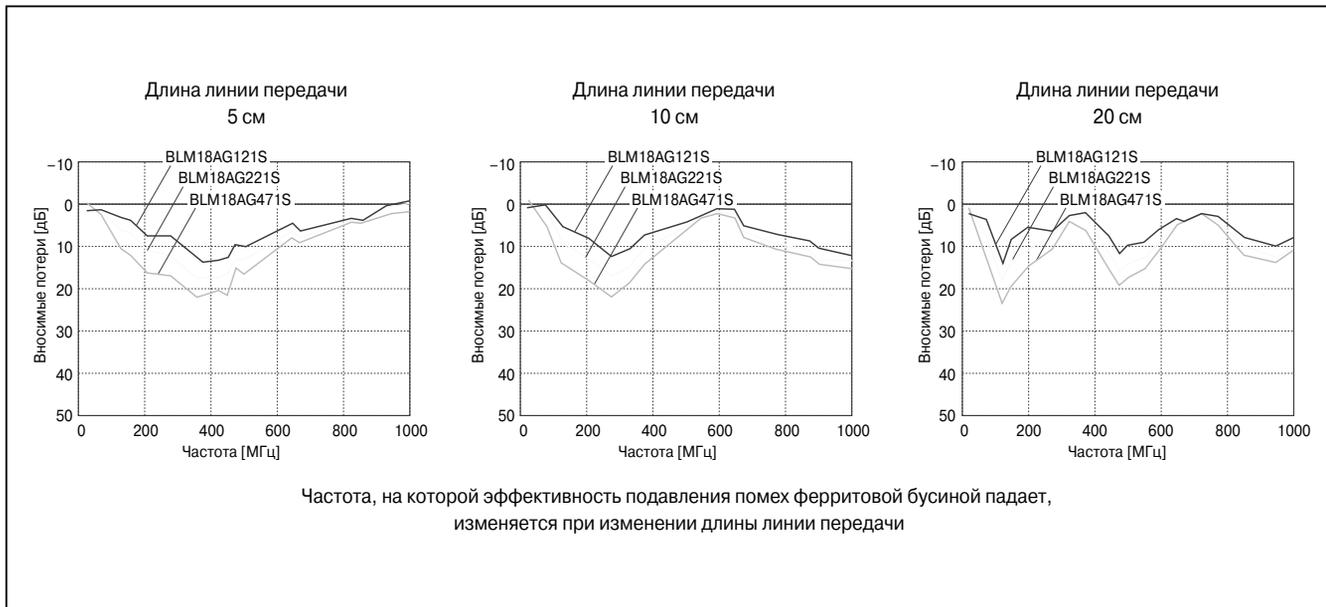
Наше исследование будет основано на понятии потерь пикового тока, которые получаются вычитанием пикового тока, измеренного в линии передачи с фильтром, из пикового тока, измеренного в линии передачи без фильтра, на каждой из рабочих частот. Потери пикового тока можно использовать в качестве опорной величины при оценке помехоподавляющего действия фильтра на излучаемые помехи.

На приведенных рисунках показаны результаты измерения потерь пикового тока в линиях передачи длиной 5, 10 и 20 см. Из этих рисунков видно, что частота, на которой снижается эффективность подавления помех ферритовой бусиной, изменяется при изменении длины линии передачи.

### Потери пикового тока (определение)



### Результаты измерения потерь пикового тока



### Влияние длины линии передачи на эффективность подавления помех ферритовой бусиной

В таблице приведены частоты, на которых ферритовая бусина перестает обеспечивать достаточное подавление помех на используемой в эксперименте макетной печатной плате.

Учитывая то, что ферритовая бусина применялась в КМОП цифровой схеме, из результатов измерений можно заключить, что такой дроссель с

большой вероятностью обеспечит существенное подавление помех на частотах 1 ГГц и ниже в линиях передачи длиной до 5 см. Если же линия передачи становится длиннее, то можно отчетливо наблюдать частоты, на которых ферритовая бусина не способна обеспечить существенное подавление помех.

#### Частоты, на которых подавление помех ферритовой бусиной падает

Длина линии передачи		
5 см	10 см	20 см
1 ГГц	600 МГц	350 МГц 700 МГц

(Для случая, когда ферритовая бусина используется в КМОП цифровой схеме)



### 3. Способы повышения эффективности подавления помех

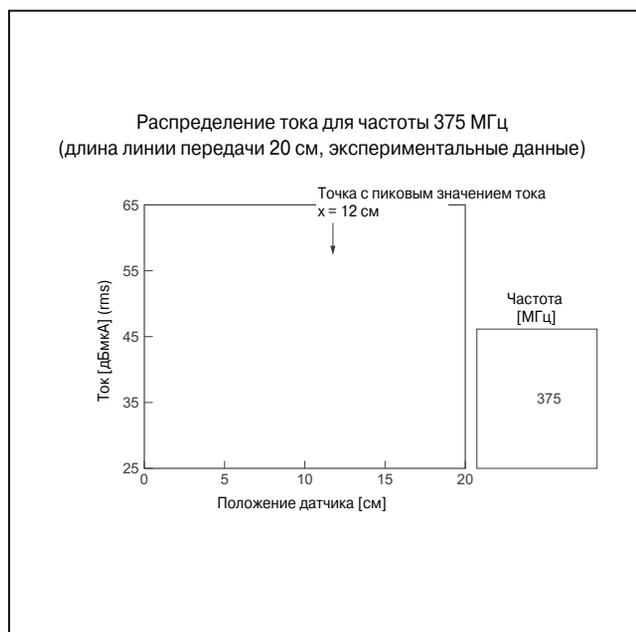
#### Способы повышения эффективности подавления помех.

##### Способ № 1: Выбор места установки ферритовой бусины

Мы установили, что в произвольной КМОП цифровой схеме ферритовая бусина не может обеспечить существенного подавления помех в линии передачи произвольной длины. Теперь мы обсудим, какими способами в таком случае можно повысить эффективность подавления помех.

Из результатов, полученных в предыдущих разделах, мы выяснили, что низкая эффективность подавления помех ферритовой бусиной обусловлена малым током в месте ее установки. Теперь сделаем еще один эксперимент в предположении, что перемещение ферритовой бусины в то место, где протекает наибольший ток, увеличит подавление помехи.

В этом эксперименте мы использовали линию передачи длиной 20 см и проводили измерение на частоте 375 МГц.

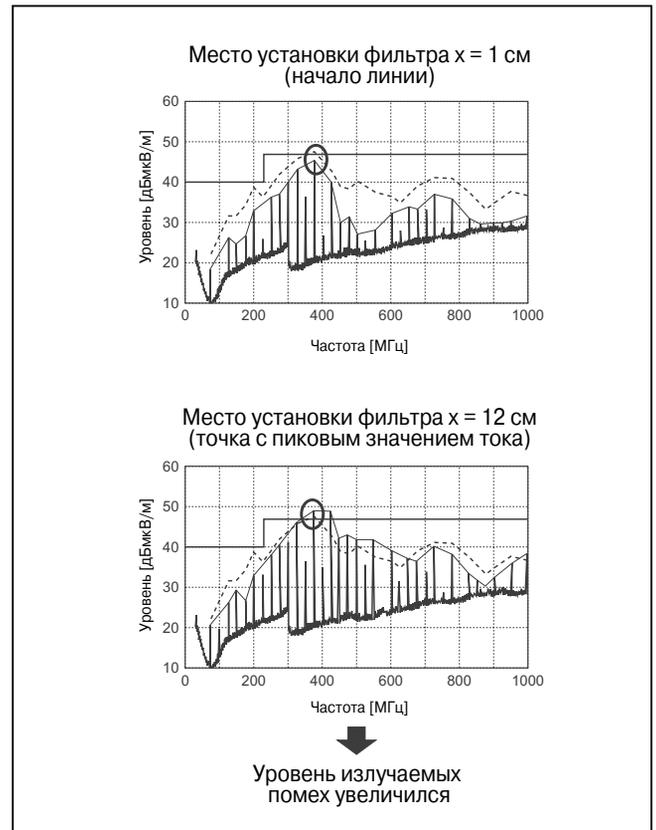


## Результаты измерений при перемещении ферритовой бусины

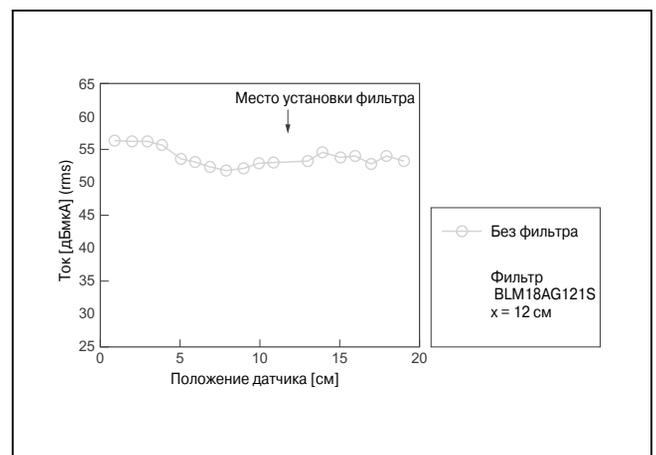
На рисунках показаны результаты измерений уровня излучаемых помех, выполненных при перемещении ферритовой бусины в точку с пиковым значением тока на частоте 375 МГц. Вопреки нашим ожиданиям, уровень излучаемых помех на частоте 375 МГц стал выше, чем был в начале. Для того чтобы исследовать причину этого явления, мы измерили распределение тока для частоты 375 МГц. На рисунках показаны также и результаты измерений распределения тока. При удалении ферритовой бусины от начала линии передачи ток, текущий в линии передачи между ее началом и ферритовой бусиной, возрастает, что и служит, по нашему мнению, причиной увеличения уровня излучаемых помех.

Принимая во внимание это явление, мы должны, в большинстве случаев, устанавливать ферритовую бусину как можно ближе к началу линии передачи, чтобы получить лучшее подавление помех.

### Излучаемые помехи (длина линии передачи 20 см, экспериментальные данные)



### Распределение тока для частоты 375 МГц (длина линии передачи 20 см, экспериментальные данные)



**Корректировка способа № 1:**

**Подавление помех несколькими ферритовыми бусинами**

Когда ферритовая бусина устанавливается в точку с пиковым значением тока (на расстоянии 12 см от начала линии передачи), чтобы подавить ток с частотой 375 МГц, ток, текущий в линии передачи до ферритовой бусины, увеличивается. Чтобы уменьшить этот возросший ток, точно такая же ферритовая бусина помещается в начало линии передачи в дополнение к бусине, установленной в точке с пиковым значением тока. Распределение тока, измеренное в такой схеме, показано на рисунке. Пиковый ток стал на 7 дБ меньше по отношению к величине, полученной в схеме без фильтра.

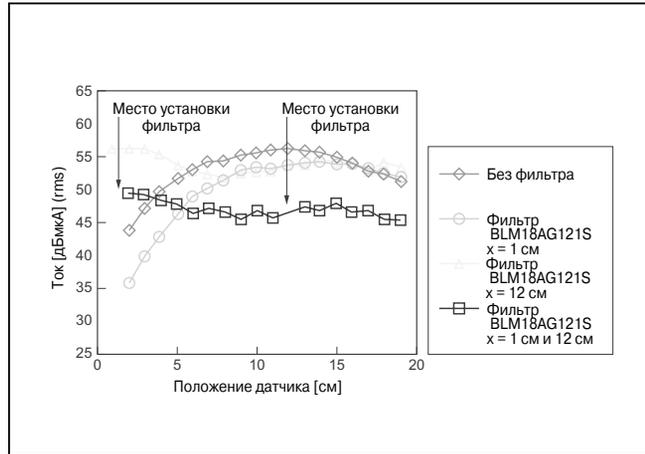
Оценим помехоподавляющий эффект также и по уровню излучаемых помех. Видно, что, когда ферритовые бусины установлены и в начале линии передачи, и в точке с пиковым значением тока, уровень излучаемых помех на частоте 375 МГц уменьшается на 7 дБ по сравнению с величиной, полученной в схеме без бусин.

Уровень излучаемых помех получается на 3 дБ меньше, чем в схеме, где ферритовая бусина, импеданс которой приблизительно вдвое больше, установлена лишь в начале линии передачи.

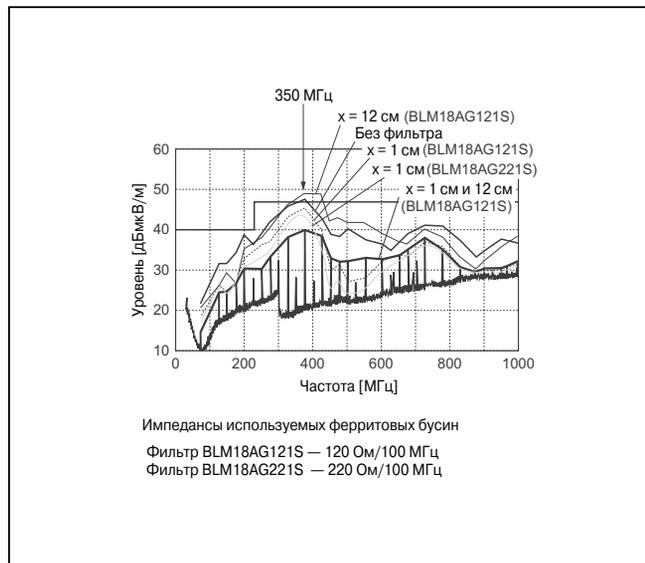
Из результатов этих измерений видно, что установка ферритовых бусин в двух точках (в начале линии передачи и в точке с пиковым значением тока) способна обеспечить достаточное подавление помех, даже если одна ферритовая бусина с более высоким импедансом не может этого обеспечить.

Такой усовершенствованный способ не может быть рекомендован для всех случаев, поскольку он требует выполнения дополнительного шага — нахождения точки с пиковым значением тока. Он, однако, может применяться тогда, когда из-за ограничений на потребляемый ток можно использовать только индуктивные компоненты (конденсаторы использовать не допускается).

**Распределение тока для частоты 375 МГц (длина линии передачи 20 см, экспериментальные данные)**



**Излучаемые помехи (длина линии передачи 20 см, экспериментальные данные)**



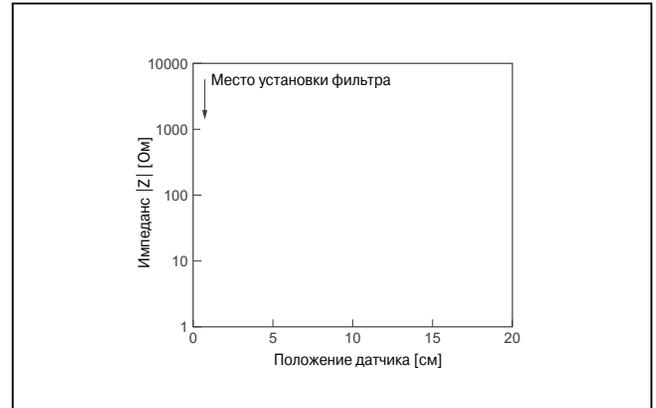
## Способы повышения эффективности подавления помех.

### Способ № 2: Применение конденсатора

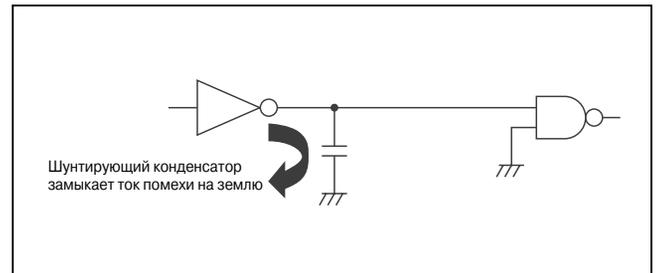
Обсудим теперь второй способ.

На частоте 375 МГц, упоминавшейся ранее, ферритовая бусина не обеспечивает достаточного подавления помех из-за большого импеданса в месте установки фильтра. В таких случаях эффективным оказывается шунтирующий конденсатор, замыкающий ток помехи из линии передачи на землю за счет уменьшения импеданса между линией передачи и землей. Рассмотрим применение такого конденсатора.

### Импеданс на частоте 375 МГц (длина линии передачи 20 см, без фильтра)



### Действие шунтирующего конденсатора



**Результаты применения конденсатора**

Из схемы была исключена ферритовая бусина и установлен конденсатор относительно небольшой емкости (10 пФ). Подавление помех этим конденсатором на некоторых частотах наблюдалось, а на некоторых отмечено не было.

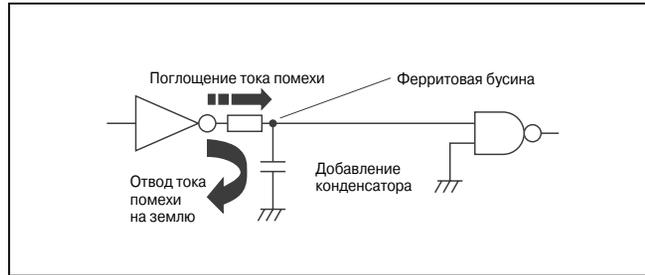
Ферритовая бусина обеспечивает существенное подавление помех, если импеданс в месте ее установки мал. Конденсатор, напротив, обеспечивает существенное подавление помех, если импеданс в месте его установки большой. Поэтому в следующем эксперименте мы установили ферритовую бусину в комбинации с конденсатором там, где они способны обеспечить существенное подавление помех в широком диапазоне частот.

Уровень излучаемых помех на частоте 375 МГц был при этом снижен по отношению к величине, измеренной без этих фильтров, на 18 дБ.

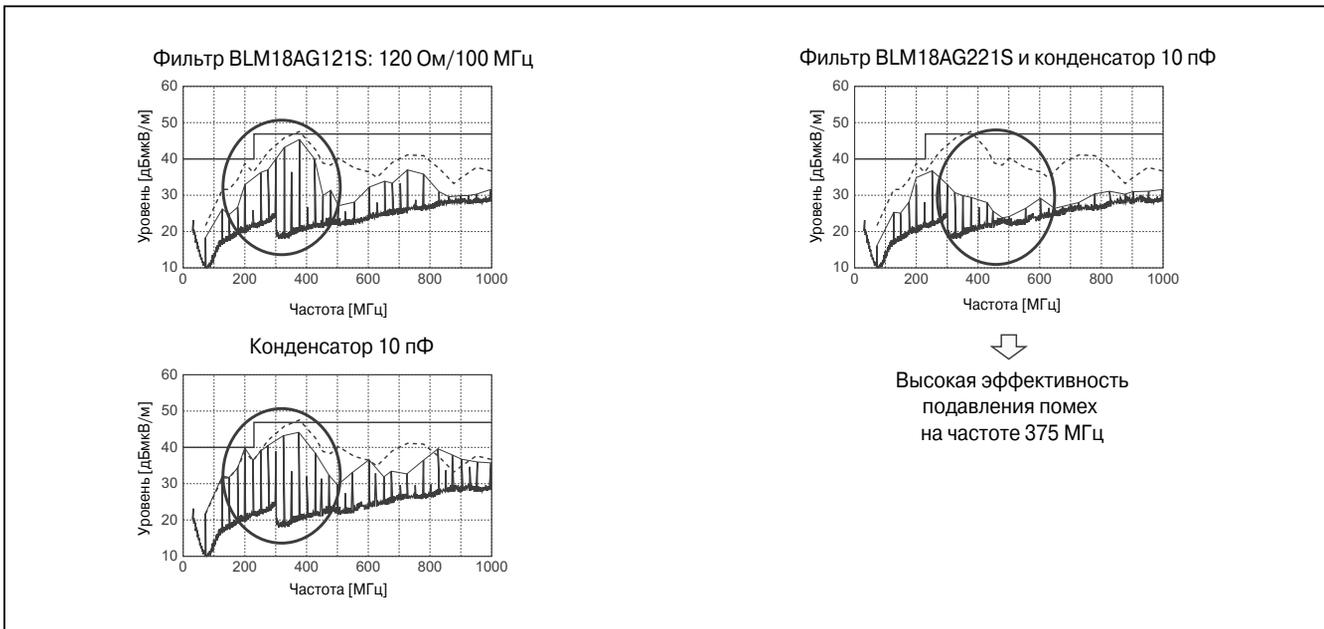
Таким образом, видно, что сочетание ферритовой бусины и конденсатора способно обеспечить

существенное подавление помех там, где применение одной только ферритовой бусины недостаточно. Мы также исследовали форму сигнала в схеме с ферритовой бусиной и конденсатором и сравнили ее с формой сигнала в схеме с одной только бусиной.

Поскольку емкость дополнительного конденсатора относительно невелика (10 пФ), он слабо влияет на форму сигнала на частоте 25 МГц.

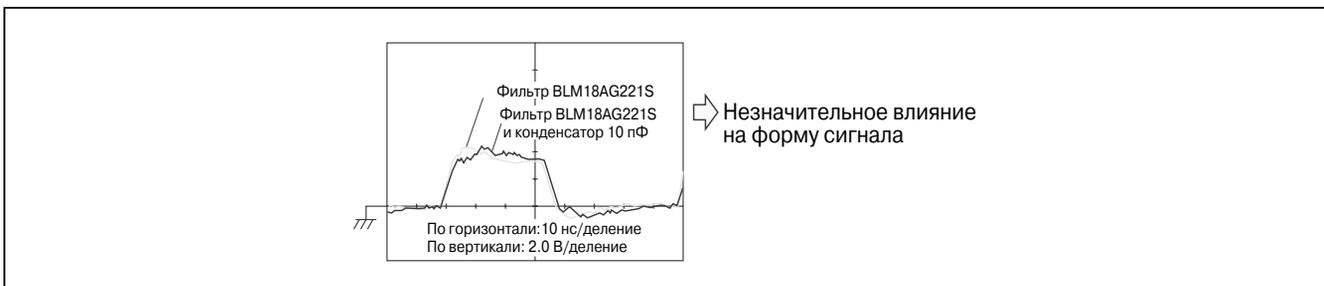


**Излучаемые помехи (длина линии передачи 20 см, экспериментальные данные)**



4

**Форма сигнала на нагрузке (длина линии передачи 20 см, экспериментальные данные)**



#### 4. Причины изменения эффективности подавления помех и способы ее повышения

В этой главе было показано, как изменяется эффективность подавления помех ферритовой бусиной при изменении длины линии передачи, и проанализированы вероятные причины этих изменений. Было измерено распределение тока в линии передачи для выяснения связи между распределением тока и подавлением помех ферритовой бусиной. Из результатов этих измерений видно, что ток и напряжение в линии передачи изменяются при изменении точки измерения, а распределение тока и напряжения также изменяется при изменении характеристик линии, например, ее длины.

Сравнивая распределения тока для различных частот и подавление помех ферритовой бусиной, было установлено, что ферритовая бусина не способна обеспечить достаточное подавление помех на тех частотах, на которых токи в месте установки ферритовой бусины имеют минимумы. Для решения этой проблемы было предложено два способа, позволяющих в значительной степени повысить эффективность подавления помех:

1. Устанавливать ферритовые бусины как в начале линии передачи, так и в точке с пиковым значением тока.
2. Устанавливать ферритовые бусины в комбинации с конденсаторами.

## ПРИМЕЧАНИЯ

1. Контроль за экспортом.  
Продукция компании Murata не должна использоваться или продаваться для использования в разработке, производстве, накоплении или утилизации любых видов обычных вооружений или оружия массового поражения (ядерного оружия, химического или биологического оружия, а также реактивных снарядов) или любого другого оружия.
2. Пожалуйста, свяжитесь с нашими торговыми представителями или инженерами по применению продукции, прежде чем применять изделия, упомянутые в этом каталоге, в перечисленных ниже областях, где требуется чрезвычайно высокая надежность для предотвращения дефектов, которые могут представлять непосредственную угрозу для жизни, здоровья или имущества третьих лиц, или если предполагается применять эти изделия в областях, отличных от упомянутых в данном каталоге.
  1. Авиационная техника
  2. Космическая техника
  3. Подводная техника
  4. Оборудование для электростанций
  5. Медицинская техника
  6. Транспорт (автомобильный, железнодорожный, морской и т.п.)
  7. Оборудование для регулирования уличного движения
  8. Системы охраны и сигнализации
  9. Системы обработки данных
  10. Аппаратура с аналогичными перечисленным выше требованиями по сложности и/или надежности
3. Технические характеристики изделий, упомянутых в этом каталоге, соответствуют состоянию на март 2004 года. Они могут изменяться или выпуск изделий может быть прекращен без предварительного уведомления. Просьба проверить это у наших торговых представителей или инженеров по применению продукции, прежде чем сделать заказ. По любым вопросам обращайтесь к нашим торговым представителям или инженерам по применению продукции.
4. Пожалуйста, внимательно прочитайте разделы, где указаны предельные значения электрических параметров, а также предупреждения, помеченные знаком «ВНИМАНИЕ!» (условия хранения, эксплуатации, пайки, монтажа и использования), чтобы избежать задымления и/или возгорания, и т.п.
5. В этом каталоге приведены только типовые значения параметров. Поэтому прежде чем заказывать интересующие вас изделия, необходимо изучить соответствующую техническую документацию.
6. Просьба иметь в виду, что, если не оговорено иное, мы не принимаем на себя каких бы то ни было обязательств в случае любых конфликтов или споров, могущих возникнуть в связи с действием прав на нашу интеллектуальную собственность или интеллектуальную собственность третьих лиц и другими смежными правами, и связанных с использованием наших изделий и/или информации, упомянутой или содержащейся в наших каталогах. В этой связи не будет делаться никаких заявлений в пользу того, что каким-либо третьим лицам разрешается пользоваться вышеупомянутыми правами на основании лицензий, выданных без нашего согласия.
7. При производстве нашей продукции не используются какие-либо разрушающие озоновый слой вещества (ODS), указанные в Монреальском протоколе.

Издательский дом «Додэка-XXI»  
ОКП 95 3000  
105318 Москва, а/я 70  
Тел./факс: (495) 366-24-29, 366-81-45  
E-mail: books@dodeca.ru; red@dodeca.ru

Формат 60x90/8. Тираж 6500 экз. Заказ № 793.  
Отпечатано в ОАО «Типография Новости».  
105005 Москва, ул. Ф. Энгельса, 46



**Murata Manufacturing Co., Ltd.**

<http://www.murata.com>

**Головной офис:**

Япония, 617-8555, Киото, Тендзин Нагаокакио-ши, 2-26-10  
(2-26-10, Tenjin Nagaokakyo-shi, Kyoto 617-8555, Japan)  
Тел.: 81-75-951-9111

**Международное отделение:**

Япония, 150-0002, Токио, Шибуйа, Шибуйа-ку, 3-29-12  
(3-29-12, Shibuya, Shibuya-ku, Tokyo, 150-0002, Japan)  
Тел. 81-3-5469-6123  
Факс: 81-3-5469-6155  
E-mail: intl@murata.co.jp

**Россия**

**АЛКОН**

193171 Санкт-Петербург, ул. Седова, д. 55, корпус 2, офис 117  
Тел.: (812) 749-4930, 560-0321  
Факс: (812) 560-7178  
E-mail: mail@alkon.net  
<http://www.alkon.net>

**ПЛАТАН**

121351 Москва, ул. Ивана Франко, д. 40, стр. 2  
Тел./факс: (495) 970-0099  
E-mail: platan@aha.ru  
<http://www.platan.ru>

**РТК Компонент**

129075 Москва, ул. Калибровская, д. 31  
Тел.: (495) 615-9706, 615-7313  
Факс: (495) 616-2308  
E-mail: Moscow@rtkcomponent.com  
<http://www.rtkcomponent.com>

**СИММЕТРОН Электронные Компоненты**

195196, Санкт-Петербург, ул. Таллинская, д. 7  
Тел.: (812) 449-4000, 449-4005  
Факс: (812) 449-4704  
E-mail: npo@symmetron.ru  
<http://www.symmetron.ru>

**Белоруссия**

**РТК Компонент**

220005, Беларусь, г. Минск, ул. Гикало, д. 1  
Тел: (017) 290-2410, 290-2411,  
Факс: (017) 290-2413  
E-mail: minsk@rtkcomponent.com  
<http://www.rtkcomponent.com>

**Украина**

**Симметрон-Украина**

02002, Киев  
ул. М.Расковой, д. 13, офис 903  
Тел.: (044) 239-2065  
Факс: (044) 239-2069  
E-mail: info@symmetron.com.ua  
<http://www.symmetron.ua>

**VD MAIS**

01033, Киев, ул. Жилианская, д. 29  
Тел.: (044) 227-2262, 227-1356  
Факс: (044) 227-3668  
E-mail: info@vdmiais.kiev.ua  
<http://www.vdmiais.kiev.ua>