

Как бороться с перекрестными помехами в высокоскоростных печатных платах

Перекрестные помехи (Crosstalk) возникают, когда из-за краевых электрических и магнитных полей высокоскоростные сигналы одного канала создают непреднамеренную связь с другими — внутренними или внешними — сигналами. Сигнал-«агрессор», имеющий большую амплитуду, воздействует на трассу-«жертву» с меньшей амплитудой, что приводит к ряду проблем на печатных платах, включая выбросы напряжения (перенапряжение), сбой в работе логических элементов и временные задержки (задержки синхронизации). В статье рассматриваются основные причины возникновения перекрестных помех и технические приемы для их устранения. Публикация будет интересна разработчикам печатных плат и инженерам производств, выполняющим подготовку конструкторской документации проектов перед изготовлением плат.

Перевод:
Сергей Шихов

sergey@aconf.ru

Ключевые положения:

- Перекрестные помехи возникают вследствие связи через общий импеданс и электромагнитной связи (емкостной и индуктивной).

- Для обнаружения помех используются осциллографы, глазковые диаграммы, рефлектометры во временной области (TDR) и анализ S-параметров.
- Для предотвращения помех применяются следующие стратегии: правило «3W» при трассировке, защитные (экранирующие) дорожки и сплошной слой заземления.

На рис. 1 представлена инфографика с шестью основными принципами проектирования для минимизации перекрестных помех в печатных платах.

Почему перекрестные помехи создают шум в системе

Перекрестные помехи подразделяются на связь через общий импеданс и электромагнитную связь. Связь через общий импеданс возникает, когда несколько сигналов используют общий обратный путь. Электромагнитная связь, в свою очередь, делится на емкостную и индуктивную — именно эти факторы представляют наибольшую проблему (рис. 2).

Каждый электрический сигнал создает вокруг себя уникальное электромагнитное поле. Когда поля от соседних проводников перекрываются, возникает емкостная и индуктивная связь. Она приводит к тому, что сигнал-«агрессор» воздействует на сигнал-«жертву», даже если они не имеют физического контакта, но близко расположены.

Классический анализ перекрестных помех «на бумаге» не только сложен, но и чрезвычайно трудоемок. Практический подход заключается в оценке связи через эквивалентные элементы цепи: связь, обусловленную краевыми электрическими полями, аппроксимируют с помощью конденсатора (взаим-



Рис. 1. Шесть принципов снижения перекрестных помех в проектах печатных плат

ная емкость), а связь, вызванную краевыми магнитными полями, — с помощью катушки индуктивности (взаимная индуктивность).

Емкостная связь, обусловленная изменением электрического поля

Две трассы, расположенные параллельно в одной плоскости, функционируют как обкладки конденсатора, разделенные диэлектриком. Изменение электрического поля между линией-«агрессором» и линией-«жертвой» моделируется в виде конденсатора. Известно, что при изменении напряжения на конденсаторе изменяется и его электрическое поле, что приводит к возникновению тока смещения. В данном случае этот емкостной связанный ток и представляет собой перекрестную помеху, а сам эффект известен как паразитная емкость (рис. 3).

Индуктивная связь через концентрические магнитные поля

Магнитная (индуктивная) связь определяется тем, как концентрические магнитные поля, создаваемые линией-«агрессором», охватывают трассу-«жертву». Изменение магнитного поля между «агрессором» и «жертвой» вызывает изменение тока проводимости. Согласно закону электромагнитной индукции Фарадея, это изменение индуцирует напряжение на линии-«жертве». Данное наведенное напряжение создает ток, который проявляется в виде перекрестной помехи.

Паразитная связь между слоями (Broadside Coupling)

Обычно перекрестные помехи возникают между двумя соседними трассами на одном слое. Помимо этого, к помехам также приводит расположение параллельных трасс на соседних слоях, разделенных тонким диэлектриком. Этот эффект называется паразитной связью между слоями, или поперечным взаимодействием (broadside coupling).

Типы перекрестных помех

Перекрестные помехи классифицируют по нескольким признакам.

Классификация по направлению распространения помехи относительно сигнала-«агрессора» (рис. 4)

- Прямая помеха (Forward crosstalk): распространяется в том же направлении, что и сигнал-«агрессор».
- Обратная помеха (Backward crosstalk): распространяется в направлении, противоположном сигналу-«агрессору».

Классификация по зоне измерения на линии-«жертве»

- Помеха на ближнем конце (Near-End Crosstalk, NEXT): шум, измеряемый со стороны источника (драйвера) линии-«жертвы».
- Помеха на дальнем конце (Far-End Crosstalk, FEXT): возмущение, измеряемое со стороны приемника (ресивера) линии-«жертвы».

Классификация по способу количественной оценки (суммарные помехи)

- Суммарная мощность помех на ближнем конце (Power-Sum NEXT, PS-NEXT): параметр PS-NEXT определяет суммарную помеху от всех соседних пар проводников и измеряет совокупную мощность всех парных взаимодействий. Представляет собой абсолютную или относительную мощность NEXT.
- Суммарная мощность помех на дальнем конце (Power-Sum FEXT, PS-FEXT): параметр PS-FEXT определяет абсолютную или относительную суммарную мощность FEXT.
- Суммарная мощность равноуровневых помех (Power-Sum Equal-Level Crosstalk, PS-ELFEXT): определяется как сумма PS-NEXT и PS-FEXT.

Внешняя помеха (Alien Crosstalk)

Это явление возникает, когда на сигнал-«жертву» воздействуют множественные мешающие сигналы разных частот (рис. 5). Ситуация усугубляется с увеличением полосы пропускания для обеспечения более быстрого отклика. Экранирования не всегда хватает для предотвращения таких помех. Для анализа внешних помех можно использовать рефлектометр во временной области (TDR).

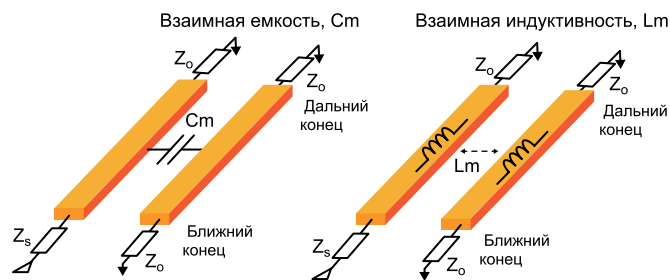


Рис. 2. Причиной перекрестных помех являются взаимная емкость и взаимная индуктивность

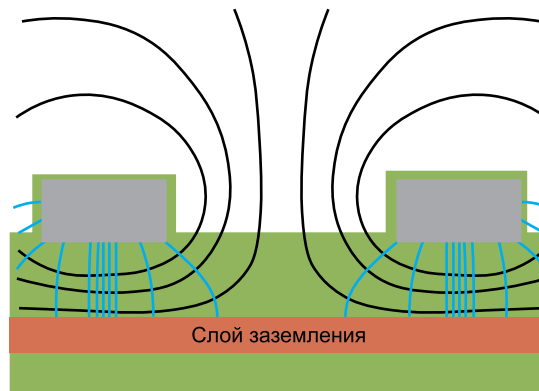


Рис. 3. Емкостная связь, обусловленная изменением электрического поля

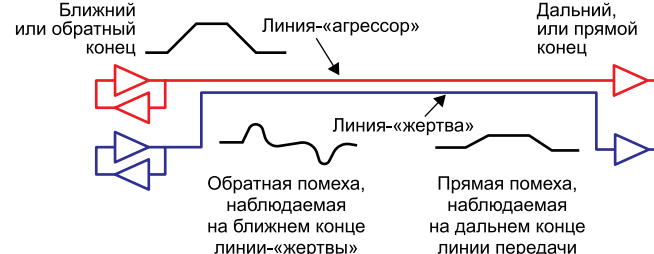


Рис. 4. Прямая и обратная помеха на ближнем и дальнем конце

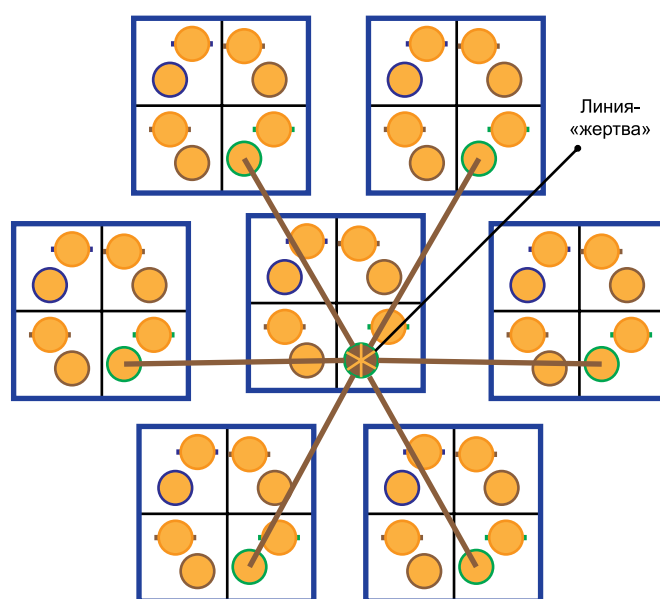
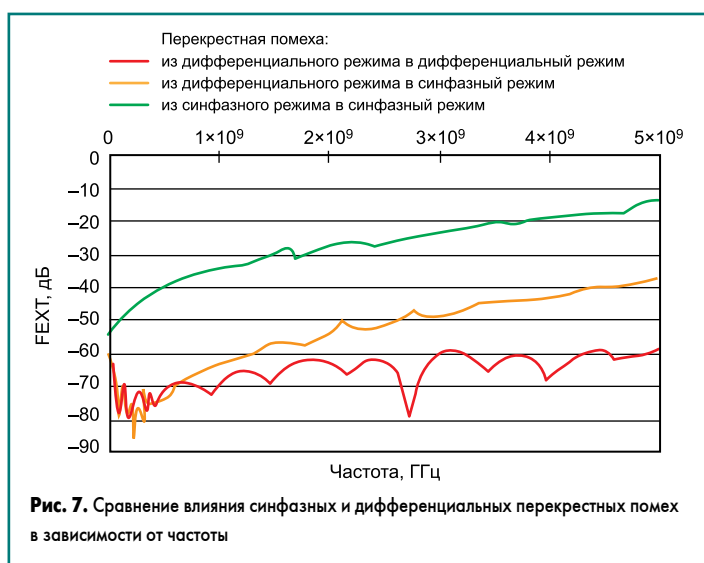
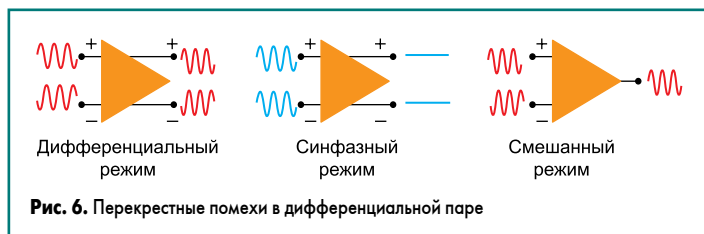


Рис. 5. Внешняя перекрестная помеха (Alien Crosstalk)

Ключевые выводы

- Емкостная связь возникает из-за изменения электрического поля между параллельными трассами и моделируется как конденсатор.
- Индуктивная связь обусловлена изменением магнитного поля вокруг трасс, которое наводит напряжение на линии-«жертве» в соответствии с законом электромагнитной индукции Фарадея.
- Прямая помеха распространяется в направлении сигнала-«агрессора», а обратная помеха — в противоположном.
- Помеха на ближнем конце (NEXT) возникает со стороны источника, а помеха на дальнем конце (FEXT) — со стороны приемника сигнала-«жертвы».

**Методика расчета помех на ближнем и дальнем конце**

Помеха на ближнем конце (NEXT) определяется как отношение напряжения, измеренного на ближнем конце (со стороны передатчика) линии-«жертвы», к напряжению в линии-«агрессоре».

Для расчета NEXT можно использовать следующую формулу:

$$\text{NEXT} = V_b/V_a = 1/4(C_m L/CL + L_m L/LL),$$

где V_b — напряжение на ближнем конце (со стороны драйвера) линии-«жертвы»; V_a — напряжение в линии-«агрессоре»; $C_m L$ — взаимная емкость на единицу длины; $L_m L$ — взаимная индуктивность на единицу длины; CL — собственная емкость линии на единицу длины; LL — собственная индуктивность линии на единицу длины.

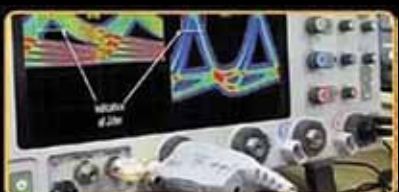
Помеха на дальнем конце (FEXT) определяется как отношение напряжения на дальнем конце (со стороны приемника) линии-«жертвы» к напряжению в линии-«агрессоре». Ее величина зависит от времени распространения сигнала в линии-«агрессоре» (v), длины трассы (Len), времени нарастания сигнала (RT), а также от взаимной емкости и индуктивности. Коэффициент K_f в формуле называется коэффициентом FEXT.

$$\text{FEXT} = V_f/V_a = (Len/RT) \times K_f = (Len/RT) \times (1/(2v)) \times (C_m L/CL - L_m L/LL),$$

где $K_f = (1/(2v)) \times (C_m L/CL - L_m L/LL)$ — коэффициент FEXT.

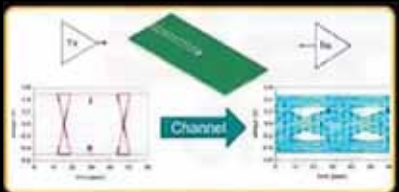
Возникновение перекрестных помех в дифференциальной паре

При возникновении любого дисбаланса в дифференциальной системе поля перестают полностью компенсироваться и начинают излучаться пропорционально этой асимметрии. Аналогично, внешние электромагнитные поля могут наводить в дифференциальной паре токи, не равные по амплитуде и не противоположные по фазе. Результирующий ток называется синфазным током. Синфазная перекрестная помеха оказывает более негативное влияние на работу системы, чем помеха в дифференциальном режиме (рис. 6, 7).



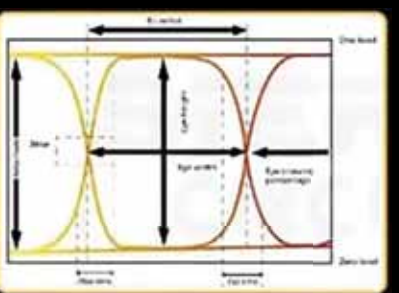
Для чего нужна глазковая диаграмма?

- Это графическое представление поведения электрического сигнала во времени.
- Используется для оценки параметров целостности сигнала, таких как джиттер тактового сигнала, межсимвольная интерференция (ISI), перекрестные помехи и отношение сигнал-шум (SNR).



Как формируется глазковая диаграмма

- Устройство, проходящее испытание, подключается к осциллографу через пробники для захвата исследуемого сигнала.
- Множественные выборки сигнала последовательно подаются на вход осциллографа.
- Глазковая диаграмма захватывается с помощью инструмента моделирования и сравнивается с паттерном, отображаемым на осциллографе.
- Большее раскрытие «глаза» указывает на лучшее качество сигнала и более высокую устойчивость к шуму и другим помехам.



Измерение параметров качества сигнала

- Ширина «глаза» (Eye width): указывает на величину джиттера тактового сигнала. Временные отклонения фронтов нарастания и спада от их идеального положения в точке пересечения представляют собой джиттер.
- Высота «глаза» (Eye height): указывает на отношение сигнал-шум (SNR).
- Процент пересечения «глаза» (Eye-crossing, %): относится к искажению скважности в высокоскоростных сигналах и дает четкое указание на симметрию импульсов данных в системе.
- Eye crossing % = $100 \times [\text{уровень пересечения} - \text{нулевой уровень}] / [\text{уровень «1»} - \text{нулевой уровень}]$.
- Время нарастания (Rise time): время перехода от 10% до 80% уровня сигнала.
- Межсимвольная интерференция (ISI): явление, которое возникает, когда сигнал от одного символа перекрывается с сигналом другого. Наличие ISI искажает форму

Рис. 8. Анализ целостности сигнала в проектах печатных плат с помощью глазковой диаграммы

Методы выявления перекрестных помех в проектах печатных плат

Обнаружение перекрестных помех в конструкции печатной платы требует использования специализированных инструментов и методик для измерения и анализа паразитной связи между соседними трассами.

Построение глазковой диаграммы с помощью осциллографа

Осциллограф является одним из ключевых инструментов для выявления перекрестных помех. Ниже описана методика его применения для обнаружения и анализа данного явления.

- 1. Расположите пробники.** Используйте высококачественные пробники, подключенные к каналам осциллографа. Установите пробники в конкретных точках платы, где предполагается наличие перекрестных помех.
- 2. Сконфигурируйте каналы.** Настройте каналы осциллографа для одновременного отображения сигналов с трассы-«жертвы» и трассы-«агрессора». Для легкого визуального различия назначьте сигналам разные цвета или стили отображения.
- 3. Одиночные и дифференциальные измерения.** Для работы с дифференциальными сигналами применяйте дифференциальные пробники. Это позволяет корректно измерять разностное напряжение между двумя линиями пары и получать более точные результаты для дифференциально-управляемых сигналов.
- 4. Глазковые диаграммы.** Используйте функцию осциллографа для построения глазковых диаграмм высокоскоростных цифровых сигналов. Глазковая диаграмма дает визуальное представление о качестве сигнала. Перекрестные помехи искажают ее форму, вызывая частичное или полное «закрытие глаза». Закрытая диаграмма свидетельствует о низкой целостности сигнала, вызванной помехами.

На рис. 8 представлена инфографика, демонстрирующая, как глазковая диаграмма используется для анализа целостности сигнала.

Использование TDR для выявления неоднородности импеданса, вызванной перекрестными помехами

Когда импульс, посылаемый рефлектометром (TDR), встречает изменение импеданса, вызванное перекрестной помехой, часть импульса отражается обратно к источнику. Эти отражения создают выбросы на временной диаграмме TDR (рис. 9).

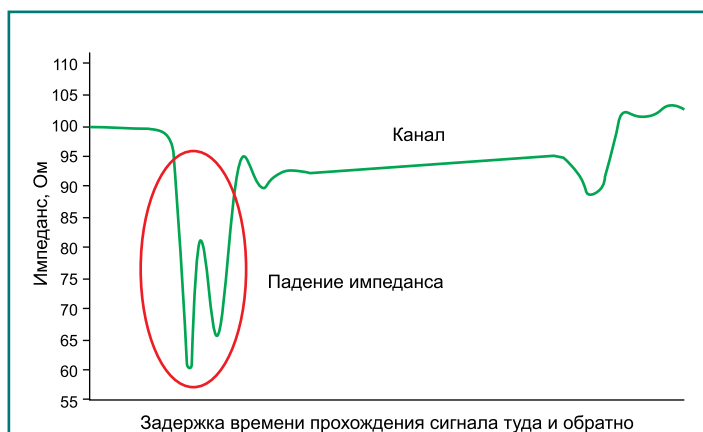


Рис. 9. Измерение неоднородности импеданса на печатных платах с помощью TDR

Амплитуда отраженного сигнала указывает на степень влияния перекрестных помех. Кроме того, временная задержка между исходным импульсом и отраженным несет информацию о расстоянии от точки подключения прибора до источника помехи. Зная скорость распространения сигнала в линии передачи, можно рассчитать физическое расстояние до места возникновения перекрестной помехи.

S-параметры

S-параметры описывают сложное поведение сигналов в высококачественных цепях. Каждый элемент их матрицы характеризует перекрест-

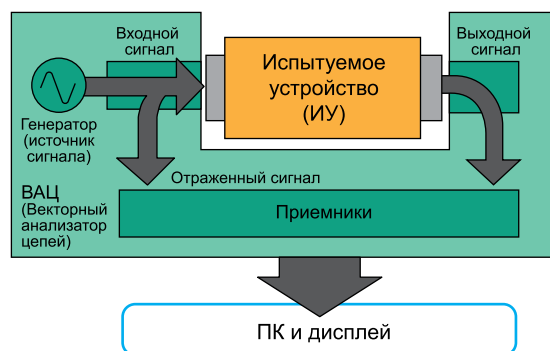
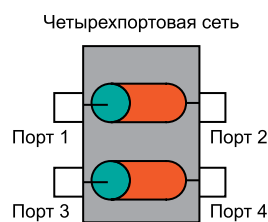


Рис. 10. Анализ S-параметров с помощью VNA



Матрица S-параметров для 4-портовой сети			
S11 [RL]	S12 [IL]	S13 [NEXT]	S14 [FEXT]
S21 [IL]	S22 [RL]	S23 [FEXT]	S24 [NEXT]
S31 [NEXT]	S32 [FEXT]	S33 [RL]	S34 [IL]
S41 [FEXT]	S42 [NEXT]	S43 [IL]	S44 [RL]

Расшифровка аббревиатур:

- RL — Return Loss (Коэффициент отражения)
- IL — Insertion Loss (Потери при передаче/Вносимые потери)
- NEXT — Near-End Crosstalk (Перекрестные помехи на ближнем конце)
- FEXT — Far-End Crosstalk (Перекрестные помехи на дальнем конце)

Рис. 11. 16 S-параметров для четырехпортовой сети

ную связь между любой парой портов. Их измерение выполняется с помощью векторного анализатора цепей (VNA) (рис. 10).

Четырехпортовое устройство (ИУ) имеет в общей сложности 16 S-параметров, разделенных на четыре квадранта. Параметры в правом верхнем квадранте 2 и левом нижнем квадранте 3 описывают связь на ближнем и дальнем конце между портами. Нежелательная связь на ближнем конце передающего порта называется перекрестной помехой на ближнем конце (NEXT), а связь на дальнем конце — перекрестной помехой на дальнем конце (FEXT) (рис. 11).

На примере анализатора целостности сигналов Le Croy (рис. 12) видно, что хотя параметры S31 и S41 измеряют помеху на одной и той же линии-«жертве» от одного и того же «агрессора», их значения различаются.

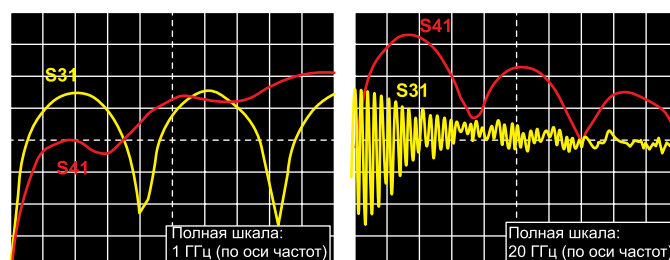


Рис. 12. Результаты измерений VNA (Le Croy). Источник изображения: EDN

Слой	Тип	Толщина (mil)	Масса меди (oz)
Верхний (1.1)	паяльная маска	0,5	1,5
	сигнальный	1,9	
	препрег	2,7	
Слой 2	«земля»	1,2	1
	ядро	4	
Слой 3	сигнальный	1,2	1
	препрег	5	
Слой 4	«земля»	1,2	1
	ядро	4	
Слой 5	сигнальный	1,2	1
	препрег	12	
Слой 6	«земля»/питание	2,4	2
	ядро	3	
Слой 7	«земля»/питание	2,4	2
	препрег	12	
Слой 8	сигнальный	1,2	1
	ядро	4	
Слой 9	«земля»	1,2	1
	препрег	5	
Слой 10	сигнальный	1,2	1
	ядро	4	
Слой 11	«земля»	1,2	1
	препрег	2,7	
Нижний (1.12)	сигнальный	1,9	1
	паяльная маска	0,5	

Единицы измерения:

- Толщина — толщина указана в милах (mil). 1 mil = 0,001 дюйма = 25,4 мкм.
- Масса меди — масса меди на квадратный фут, указана в унциях (oz). 1 oz меди соответствует толщине ~1,37 mil (34,8 мкм).

Рис. 13. Симметричная структура стека печатной платы

В обоих случаях вертикальный масштаб составляет 40 дБ на всю шкалу, тогда как горизонтальный масштаб для левого графика — 1 ГГц на всю шкалу, а для правого — 20 ГГц.

Ключевые выводы

- Частично или полностью закрытая глазковая диаграмма указывает на наличие перекрестных помех и низкую целостность высокоскоростных цифровых сигналов.
- Рефлектометр во временной области (TDR) обнаруживает изменения импеданса, вызванные перекрестными помехами.

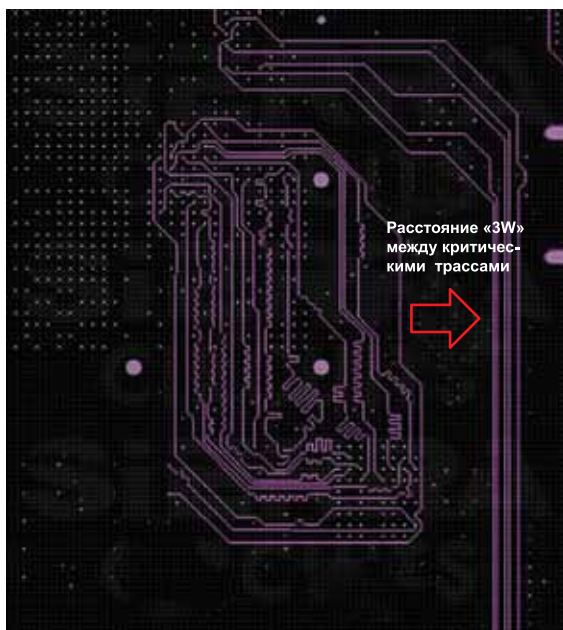


Рис. 14. Расстояние «3W» между критическими трассами

- Помехи на ближнем (NEXT) и дальнем (FEXT) конце определяются по значениям конкретных элементов матрицы S-параметров (например, S31 и S41).

Семь правил проектирования для снижения перекрестных помех в печатных платах

1. Заземляющий слой должен быть соседним с сигнальными и силовыми слоями

При проектировании стека платы соблюдайте следующие правила:

- Заземляющие слои чередуются (располагаются на ближайших проводящих слоях) с сигнальными и силовыми слоями.
- Всегда обеспечивайте симметричность структуры (рис. 13).
- Размещайте силовые слои между двумя заземляющими слоями. Это обеспечит равномерное распределение силовых цепей по всей толщине стека.

2. Обеспечьте оптимальное расстояние между трассами и компонентами

Расстояния, разделяющие как соседние трассы, так и трассы и близлежащие компоненты, должны быть достаточно большим, чтобы исключить риск возникновения перекрестных помех. Общее правило гласит, что такое расстояние должно быть равно трем ширинам трассы (правило «3W», (рис. 14)).

3. Размещайте трассы под прямым углом к трассам на соседних слоях

Слои печатной платы должны быть организованы таким образом, чтобы трассы на смежных слоях были перпендикулярны друг другу, что предотвращает паразитную связь между слоями (broadside coupling). Конкретнее: если трассы на одном слое ориентированы в направлении «север-юг», трассы на прилегающих слоях должны быть ориентированы «восток-запад».

4. Добавляйте защитные (экранирующие) трассы для защиты критических сигналов от перекрестных помех

Защитные трассы создают физический барьер между уязвимой трассой (например, тактовой) и соседними сигнальными трассами (рис. 15). Они защищают сигнальную линию от нежелательной электромагнитной связи и подавляют излучаемые помехи от тактовой цепи. Защитные трассы должны быть подключены к плоскости заземления или выделенному опорному напряжению. Кроме того, необходимо обеспечить расстояние не менее 3W–5W между подобными трассами.

5. Размещайте критические сигналы на внешних слоях

Критические сигналы, такие как РЧ-трассы, следует разводить на внешних слоях (верхнем и нижнем), где обычно размещаются компоненты. Это позволяет избежать прохождения сигналов через лишние переходные отверстия, сокращает длину шлейфов переходных отверстий и снижает риск возникновения перекрестных помех.

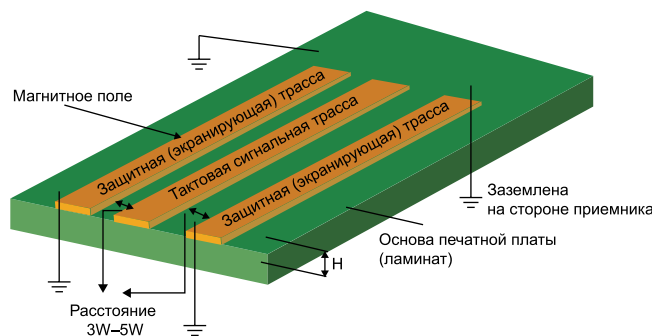


Рис. 15. Защитные трассы экранируют критические сигнальные трассы

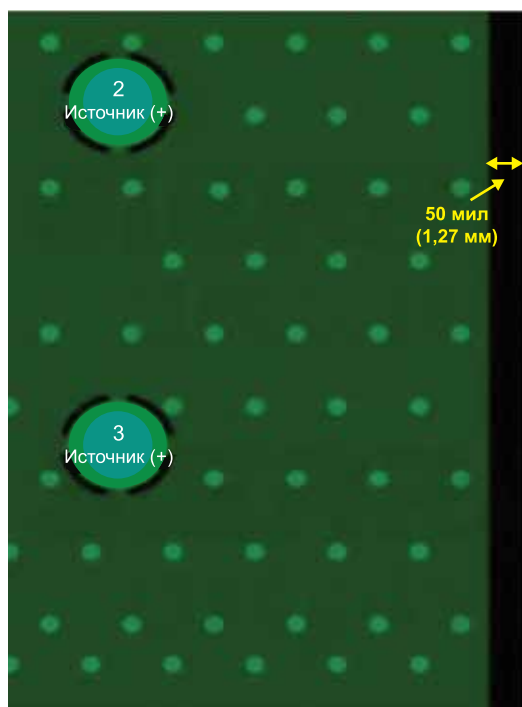


Рис. 16. Зазор между силовой трассой и краем платы

6. Размещайте силовые цепи не менее чем в 50 милах (1,27 мм) от края платы

Размещение силовых полигонов или трасс вблизи краев платы может вызвать перекрестные помехи в соседних слоях. Необходимо обеспечить зазор не менее 50 мил (1,27 мм) между силовой цепью и краем платы (рис. 16). Это пространство действует как барьер, ослабляет влияние электромагнитных полей и снижает риск помех.

7. Не разрывайте сплошные плоскости земли

Для снижения перекрестных помех необходимо соблюдать следующие методы заземления:

- Делайте обратные пути и площади контуров как можно меньше. Меньшая площадь контура означает меньшую площадь, через которую изменяющиеся магнитные поля могут связываться с соседними трассами, что минимизирует помехи.
- Никогда не выполняйте разрывы в сплошных плоскостях заземления (рис. 17). Такое разделение плоскости может создать множественные контуры заземления, это лишние пути для протекания паразитных токов. Контуры заземления приводят к наводкам, помехам и нестабильной работе схемы.

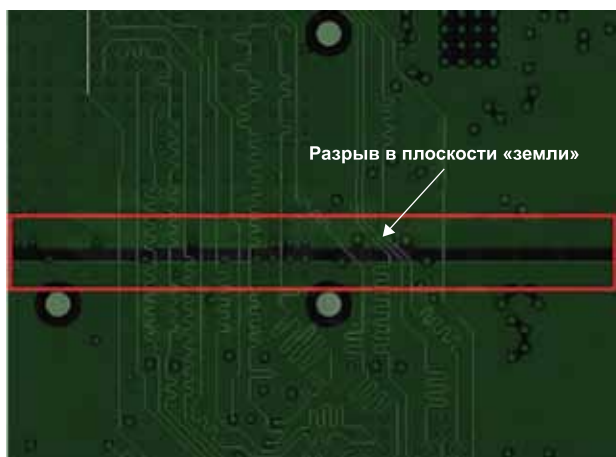


Рис. 17. Не должно быть разрывов в плоскости «земли»



Рис. 18. Переходные отверстия рядом с сигнальными переходными отверстиями

- При смене опорного (референсного) слоя для сигнала размещайте переходные (заземленные) переходные отверстия в непосредственной близости от сигнальных переходных отверстий (рис. 18). Это минимизирует индуктивность в пути возврата тока. Более короткий путь снижает индуктивность, обеспечивая низкоимпедансный обратный путь для сигнала.
- Создавайте выделенные опорные плоскости для высокоскоростных и критических сигналов. Сплошная опорная плоскость поглощает краевые электрические и магнитные поля.
- Заполняйте все неиспользуемые области платы заземленными медными полигонами.
- Применяйте сшивание переходами (via stitching), при котором множественные переходные отверстия соединяют медные области на разных заземляющих и силовых слоях (рис. 19). Этот метод обеспечивает кратчайший путь возврата с минимальным импедансом для многослойных структур и сокращает площадь контура. Расстояние между переходами должно составлять не более 1/10 длины волны максимальной частоты, от которой требуется защита.

Ключевые выводы

- Размещайте заземляющие слои на слоях, соседних с сигнальными и силовыми.
- Соблюдайте правило «3W» для расстояния между соседними трассами.
- Вводите защитные трассы для физического разделения критических сигналов.
- Критические сигналы (например, РЧ) разводите на внешних слоях.
- Избегайте разрывов в плоскостях земли для предотвращения появления лишних контуров заземления.
- Используйте переходные отверстия рядом с сигнальными для минимизации индуктивности в пути возврата тока.
- Применяйте сшивающие переходы из множества отверстий, соединяющих заземляющие и силовые полигоны на разных слоях.

Сшивающие переходные отверстия

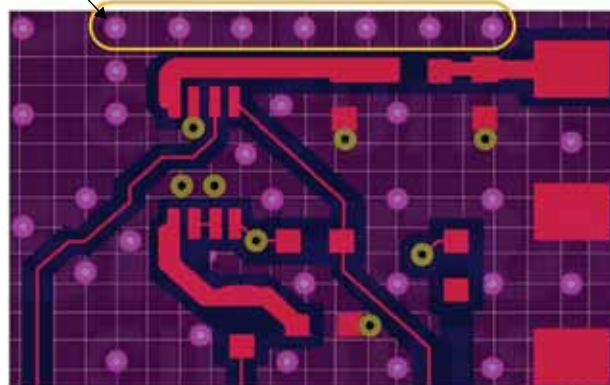
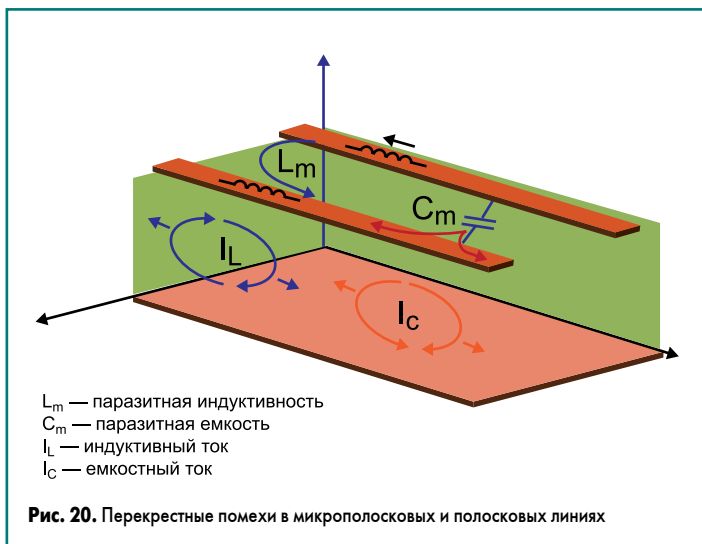


Рис. 19. Сшивающие переходы (Шитье переходами — Via stitching)



Перекрестные помехи в микрополосковых и полосковых линиях

Емкостно связанный ток распространяется как в прямом, так и в обратном направлении. Импульс тока в прямом направлении по времени совпадает с сигналом-«агрессором», в результате чего помеха на дальнем конце (FEXT) усиливается за счет емкостной связи. Обратный ток циркулирует в линии, создавая длительную помеху на ближнем конце (NEXT) той же величины. В обоих направлениях эти импульсы напряжения являются положительными.

Индуктивно связанный ток циркулирует по часовой стрелке. Процессы на ближнем и дальнем конце аналогичны емкостной связи за исключением того, что импульс напряжения, создающий помеху на дальнем конце в прямом направлении, является отрицательным.

На рис. 20 схематично изображены перекрестные помехи в микрополосковых и полосковых линиях.



Комментирует Сергей ШИХОВ,
директор по управлению проектами,
«А-КОНТРАКТ»

В статье приведена лишь часть проблем, связанных с обеспечением целостности сигналов и способами борьбы с перекрестными помехами. Разработчикам высокочастотных и высокоскоростных устройств следует обратить пристальное внимание на углубленное изучение данного вопроса.

В симметричной полосковой линии (stripline) среда выше и ниже сигнального проводника однородна. Поэтому результирующие помехи на дальнем конце от емкостной и индуктивной связи взаимно компенсируются. В случае же микрополосковой линии (microstrip) над проводником находится воздух, а под ним — диэлектрик. Эта неоднородность среды приводит к увеличению уровня помех на дальнем конце. Поскольку диэлектрик является основной причиной электрической связи, уменьшение емкостной связи в микрополосковой линии может, как ни парадоксально, привести к росту FEXT.

Заключение

Перекрестные помехи могут вызывать ряд проблем в печатных платах: выбросы напряжения, логические сбои и временные задержки. Для их обнаружения применяются осциллографы, рефлектометры во временной области (TDR) и анализ S-параметров. Для подавления помех необходимо оптимизировать расстояния между трассами, использовать защитные экранирующие трассы и обеспечивать корректную организацию заземления. Понимание особенностей возникновения помех в микрополосковых и полосковых линиях позволяет принимать более обоснованные проектные решения для минимизации наводок и сохранения целостности сигнала.