

СИМПТОМЫ СИНФАЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И СПОСОБЫ ЕГО УСТРАНЕНИЯ

АНДРЕЙ ПЕРЕСАДИН, инженер

Электромагнитное излучение от цифровых схем может возникать либо в дифференциальном, либо в синфазном режиме. В дифференциальном режиме, как правило, в результате сложения равных и противоположно направленных токов поля нейтрализуют друг друга. И, наоборот, поскольку излучения в синфазном режиме от двух связанных проводников идентичны, они складываются.

К сожалению, дифференциальные токи могут трансформироваться в синфазные из-за паразитной емкости или любого дисбаланса, вызванного рассинхронизацией сигналов, несоответствием времени нарастания и спада или асимметрией в канале. Кроме того, разрывы импеданса в обратном тракте могут стать причиной возникновения большой синфазной петли, из-за которой увеличивается последовательная индуктивность и электромагнитное излучение. Мы рассмотрим признаки синфазного излучения и несколько способов его нейтрализации.

Излучение в дифференциальном режиме является результатом протекания тока в контуре обратного тракта, образованного проводниками печатной платы (см. рис. 1). Контур из микрополосковых линий (внешний слой) работает как небольшие антенны, которые, главным образом, излучают магнитные поля, тогда как контуры полосковой линии (внутренний слой) являются источниками полей на краях печатной платы. Размеры и площади этих сигнальных контуров должны контролироваться в процессе проектирования, чтобы минимизировать излучение.

К счастью, нет необходимости анализировать каждый отдельный контур – достаточно ограничиться наиболее важными из них. Контроль над остальными контурами осуществляется путем использования хорошо зарекомендовавших себя способов проектирования [1].

Как правило, наиболее критичными контурами являются те, где распространяется высокочастотный периодический сигнал. В синхронной схеме тактовый сигнал представляет собой последовательность импульсов, при прохождении которой возникают наибольшие

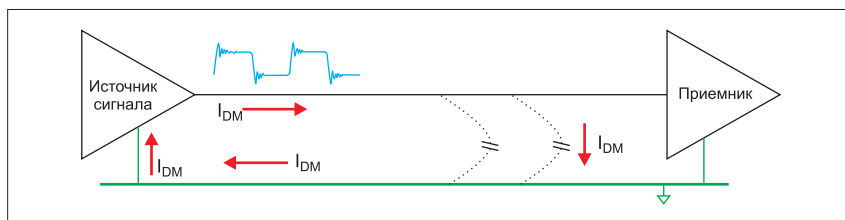


Рис. 1. Протекание тока по обратному тракту в дифференциальном режиме

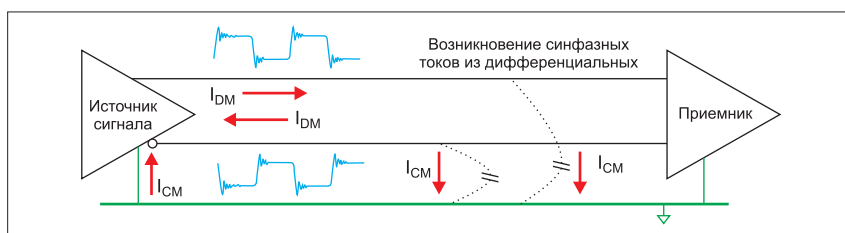


Рис. 2. Дифференциальный режим сигналов может трансформироваться в синфазный режим

помехи. К тому же, несинусоидальная форма сигнала порождает гармонические составляющие. В первую очередь, осуществляется трассировка тактовых сигналов. При этом возникающие контуры должны иметь минимально возможную площадь. Длина проводника, по которому проходит тактовый сигнал, должна быть минимальной, как и число переходных отверстий. В многослойной печатной плате тактовые сигналы должны проходить по полосковой линии (внутреннему слою) рядом со сплошным опорным слоем, что позволяет уменьшить излучение.

Зазор между проводником с тактовым сигналом и обратным трактом должен быть минимально возможным, чтобы емкостная связь увеличилась и уменьшилась площадь контура. Кроме того, во избежание наводки от тактового сигнала на подключенные к плате кабели цепь с синхросигналом устанавливается достаточно далеко от разъемов системы ввода/вывода и кабелей.

Информационная и адресная шины наряду с соответствующими сигналами управления и команд занимают второе место в списке самых важных контуров. Эти шины обычно нагружены и могут работать при больших пиковых токах, при прохождении которых возникают пропорционально большие помехи. Токи питания в переходных процессах – еще один немаловажный источник дифференциальных помех. Хотя площадь этих контуров достаточно мала, по ним проходят достаточно большие токи при коммутации.

Излучение в дифференциальном режиме, пропорциональное квадрату частоты, можно контролировать, уменьшая импеданс схемы разводки питания, минимизируя площадь контура, нейтрализуя поля с помощью дифференциальных сигналов и применяя дизайн тактовых сигналов. При этом происходит расширение спектра помехи и ослабление пиковых составляющих спектра, что позволяет уменьшить излу-

чение. Использование метода тактирования с расширенным спектром (spread spectrum clocking) уменьшает излучение до 15 дБ.

Если дифференциальная пара хорошо сбалансирована, хорошая связь между ее проводниками позволяет нейтрализовать поле помехи. В противном случае (см. рис. 2) степень нейтрализации поля определяется не зазором, а синфазным балансом дифференциальной пары. Поскольку у большинства цифровых источников сигнала – плохой синфазный баланс, часто излучение дифференциальных пар намного больше в синфазном режиме, чем в дифференциальном. В таком случае не достигается ожидаемый эффект от более тесной связи проводников дифференциальной пары. На рисунке 3 показаны результаты симуляции протекания обратного тока в синфазном режиме по опорному слою несбалансированной дифференциальной пары.

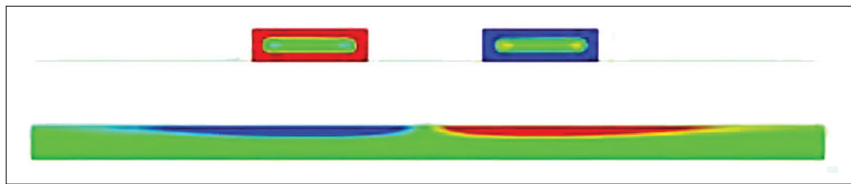


Рис. 3. Связанная микрополосковая дифференциальная пара

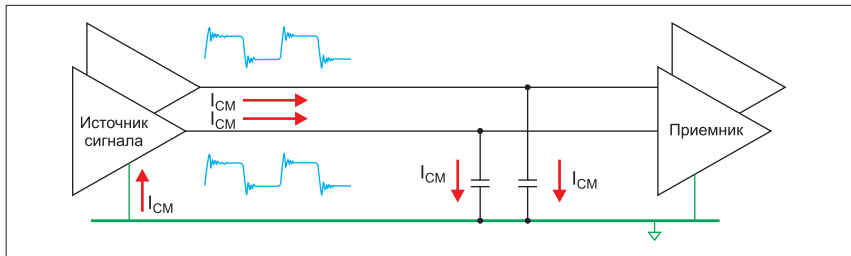


Рис. 4. Обратный тракт синфазного сигнала

Хорошо связанные дифференциальные сигналы передаются, главным образом, в дифференциальном режиме с некоторой долей синфазного излучения в результате несбалансированности между сигналами. Если два проводника разделить так, чтобы предотвратить связь между ними, оба начнут вести себя как несимметричные сигнальные линии. Следовательно, 100-Ом дифференциальная пара превращается в две отдельные 50-Ом несимметричные линии. Если площадь контура мала и импеданс не изменяется на пути прохождения сигналов, такая трансформация не грозит нежелательными последствиями.

Напротив, синфазное излучение возникает из-за паразитных элементов в цепи при нежелательных перепадах напряжения на проводниках. По мере прохождения сигнала по линии передачи емкостная связь между проводниками печатной платы образует контур, и возникает ток смещения через емкость, который возвращается к источнику (см. рис. 4). Синфазный ток, который протекает через импеданс земляной шины, вызывает перепад напряжения и порождает магнитное поле.

Ситуацию ухудшает еще и то обстоятельство, что изменение потенциала земли сказывается на подключенных к печатной плате кабелях. Например, если величина синфазного тока составит всего 3 мкА в кабеле длиной 1 м со 100-МГц сигналом, перестанут выполняться требования по электромагнитной совместимости. Если излучение в дифференциальном режиме еще можно предусмотреть на этапе проектирования многослойной платы и ее трассировки, то синфазное излучение трудно оценить и проконтролировать

из-за непреднамеренных ошибок при практической реализации системы.

По одной только схеме невозможно понять, как на практике поведут себя токи, а это необходимо знать для анализа параметров сигнала, перекрестных помех и электромагнитного излучения. Чаще всего синфазное излучение исходит от кабелей, которые ведут себя как дипольные или монопольные антенны. Для ограничения синфазного тока применяют следующие меры:

- уменьшают амплитуду тока и напряжение источника сигнала;
- уменьшают длительность переднего фронта импульса, спектральный и гармонический спектр тока;
- уменьшают длину антенны;
- последовательно кабелю устанавливают синфазный дроссель и изолируют кабель от печатной платы с помощью трансформатора или оптопары;
- экранируют кабель.

Слои питания печатной платы не должны заходить в область заземления разъемов системы ввода/вывода, поскольку эти слои, как правило, содержат ВЧ-шум, который может попасть в сигналы системы ввода-вывода и в заземляющий слой. Чтобы не допустить этого, обеспечивается очень малый импеданс соединения только в одной точке – между заземлением системы ввода/вывода и заземлением корпусом/шасси.

Кроме того, если длина микрополосковых шлейфов на печатной плате составляет четверть длины волны, они могут работать как антенны. Чтобы такие короткие шлейфы не становились передатчиками, их не следует использовать. С этой целью в многоточечных шинах DDR3/4, например со «сквозной» архитектурой, применяется такая трассировка сигналов, чтобы они последовательно и напрямую проходили через

каждую контактную площадку запоминающего устройства.

Для уменьшения синфазного излучения необходимо минимизировать напряжение заземления, вызванное протеканием синфазных токов, которое управляет антеннами у источника сигналов. Шум в схеме разводки питания вносит основной вклад в излучение. Минимизация этого шума осуществляется путем блокирования его утечки от процессора в слои питания и заземления, а также путем проектирования такой схемы разводки питания, у которой импеданс по переменному току ниже заданного значения импеданса во всей ширине полосы пропускания.

Низкий импеданс схемы разводки питания реализуется путем минимизации расстояния между слоями питания и заземления, а также использования низкоимпедансных развязывающих конденсаторов с малой индуктивностью, установленных на этих слоях. Для эффективного анализа сложных требований к схеме разводки питания рекомендуется применять средство планирования.

Кроме того, хорошее заземление позволяет свести к минимуму влияние источников шума, обеспечив низкоимпедансный тракт для синфазных токов. Использование нескольких заземляющих слоев в многослойной печатной плате – очень эффективный способ достичь этой цели. Не следует переоценивать роль щелей или зазоров в сплошных слоях. Если обратный тракт синфазного тока находится далеко от сигнального тракта, излучение этого тока не компенсируется. Однако если расположить обратный тракт рядом с током источника, площадь контура станет небольшой, и протекание синфазного тока не приведет к возникновению больших помех. Таким образом, излучают не все микрополосковые проводники, а только плохо рассчитанные.

ВЫВОДЫ

- Поскольку дифференциальные токи равны по величине и противоположно направлены, излучения от них взаимно уничтожаются.
- Синфазные излучения от двух связанных проводников идентичны. Суммарное излучение больше исходных излучений.
- Микрополосковые контуры работают как небольшие антенны, которые, главным образом, являются источниками магнитных полей.
- Полосковые контуры являются источниками только полей на краях печатной платы.
- Наиболее критичными контурами являются те, по которым проходят высокочастотные периодические сигналы.
- Чтобы уменьшить излучение, проводники с синхросигналами размещаются на полосковой линии рядом со сплошным опорным слоем.
- Расстояние между проводником с синхросигналом и обратным трактом должно быть как можно меньше, чтобы увеличить связь и уменьшить площадь контура.
- Излучение в дифференциальном режиме можно контролировать, уменьшая импеданс схемы разводки питания, минимизируя площадь контура, нейтрализуя поля с помощью дифференциальных сигналов и изменяя дизайн тактовых сигналов.
- Если дифференциальная пара плохо сбалансирована, степень нейтрализации поля определяется не зазором, а синфазным балансом дифференциальной пары.
- Хорошо связанные дифференциальные сигналы передаются, главным образом, в дифференциальном режиме с некоторой долей синфазного излучения в результате несбалансированности между сигналами.
- Если два проводника разделить так, чтобы предотвратить связь между ними, оба начнут вести себя как несимметричные сигнальные линии.
- Синфазное излучение возникает из-за паразитных элементов цепи при нежелательных перепадах напряжения на проводниках.
- Изменение потенциала земли сказывается на подключенных к печатной плате кабелях.
- Слои питания не должны заходить в область заземления разъемов системы ввода-вывода, поскольку шум может проникнуть в сигналы этой системы и в заземление.
- Если длина микрополосковых шлейфов составляет четверть длины волны, они могут работать как антенны.
- Во избежание использования микрополосковых шлейфов сигналы разводятся так, чтобы они последовательно и напрямую проходили через каждую контактную площадку запоминающего устройства.
- Для уменьшения синфазного излучения необходимо минимизировать напряжение земляной шины, вызванное протеканием синфазных токов.
- Низкий импеданс схемы разводки питания реализуется путем минимизации расстояния между слоями питания и заземления и использования низкоимпедансных развязывающих конденсаторов с малой индуктивностью, установленных на этих слоях. 

ЛИТЕРАТУРА

1. Barry Olney. *Beyond Design columns: Return Path Discontinuities, Uncommon Sense-Differential Pairs, Stackup Planning. Parts 1–4.*
2. Henry Ott. *Electromagnetic Compatibility Engineering.*
3. Ron Brewer. *What is Differential and Common-Mode Current?*
4. Pulse Electronics. *Understanding Common-Mode Noise.*
5. Howard Johnson. *High-Speed Signal Propagation.*