

Дифференциальная передача сигнала: преимущества при обеспечении ЭМС и выбор конструкции линии СВЯЗИ

Антон ЕРЕМИН,
ae@crels.ru

Требования назначения к электронным системам предусматривают все большую скорость передачи данных между отдельными модулями. Передача однополярных сигналов, обратный ток которых протекает по «общему» проводнику, является причиной не только повышения уровня излучаемых помех, но и увеличения чувствительности канала к внешним наводкам. Таким образом, высокочастотные гармоники однополярных интерфейсных сигналов могут стать причиной отрицательного результата при испытаниях на соответствие требованиям к уровню излучаемых помех.

Различают два режима протекания токов в сигнальном канале – дифференциальный и синфазный (рис. 1). Поскольку инженерам-схемотехникам дифференциальный режим протекания тока наиболее понятен, они часто упускают из виду наличие синфазных токов. Наоборот, инженеры по ЭМС, решая проблемы с помехами, вызванными синфазными токами, иногда недооценивают влияние токов дифференциального режима. Однако оба режима критически важны для понимания и механизма генерации помех от кабельных линий, и наводки на эти линии. Поэтому в процессе обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) необходимо понимать условия возникновения каждого из указанных режимов и степень их влияния в разных случаях.

Дифференциальные токи текут от источника сигнала к приемнику по одному проводнику и возвращаются по другому проводнику, входящему в состав того же кабеля или жгута, как показано на рис. 1а. Токи в этих проводниках при идеальном дифференциальном режиме должны

быть равны по модулю и противоположны по направлению. Вклад дифференциальных токов в уровни эмиссии помех и чувствительности невелик, а соответствующий им ток в экране кабеля близок к нулю.

Синфазные токи, сгенерированные схемой или наведенные извне, протекают по всем проводникам кабеля в одном направлении, как показано на рис. 1б. Это значит, что на линии прямого тока происходит суммирование наведенного тока помехи и сигнального тока, а на линии обратного тока – наоборот, вычитание. Таким образом, синфазные токи могут быть определены как половина разности токов в сигнальном и обратном проводниках.

Сигнальный синфазный ток может быть частью дифференциального тока, которая стекает через паразитную емкость на окружающие заземленные конструкции и возвращается через них к источнику. Поскольку, таким образом, обратный путь сигнальных синфазных токов обычно пролегает через заземляющие конструкции, образуемый ими контур имеет достаточно большую и не всегда точно известную площадь. В результате синфазный ток даже небольшой амплитуды может породить излучаемую помеху значительного уровня и, наоборот, малая внешняя помеха – значительный синфазный ток наводки [1].

Основной источник сигнальных синфазных токов – разность потенциалов между опорной точкой подключения сигнального кабеля и системой сигнального заземления. Поэтому считается правильным минимизировать напряжение шума в системе заземления, особенно возле интерфейсного соединителя. Зачастую синфазные токи представляют собой производный побочный эффект, вызванный некачественным заземлением и недостаточной симметричностью двухпроводной сигнальной линии или ее драйверов. Идеально симметричный канал передачи сигнала не генерирует синфазных токов помехи сам и нечувствителен к синфазным наводкам извне. Кроме того, импульсные синфазные токи могут возникать в результате перекоса двух составляющих дифференциального сигнала или, другими словами, сдвига их по фазе друг относительно друга.

Лучший инструмент для определения параметров синфазных токов – токовые пробники, которые охватывают весь кабель. После

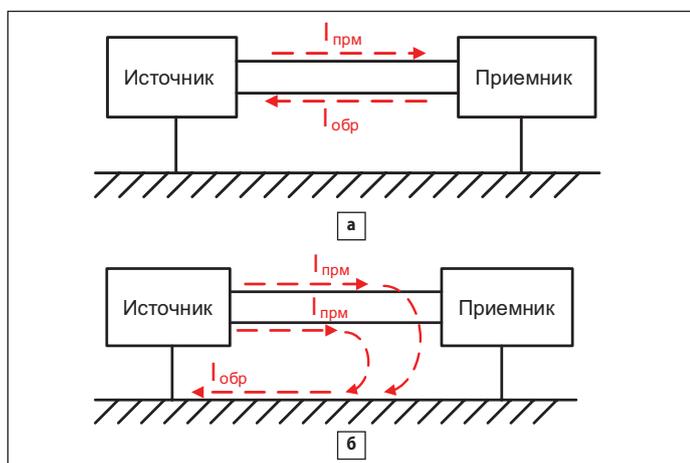


Рис. 1. Режимы протекания токов в межблочных кабелях: а) дифференциальный; б) синфазный

закрывающего пробника его подключают к анализатору спектра, с помощью которого измеряют спектр синфазного сигнала в кабеле.

Дифференциальная передача сигналов

В идеальном случае обратный провод должен быть расположен на минимальном расстоянии от соответствующего ему «прямого провода» относительно линии питания и сигнальной линии, чтобы минимизировать связь с внешней средой через магнитное поле. Совмещение обратных проводов сигнальных линий и линий питания строго запрещено, а лучше такого совмещения избегать и внутри этих групп.

При наличии альтернативных путей постоянный обратный ток растекается по ним в соответствии с присущей этим путям активной проводимостью. Однако с повышением частоты ситуация меняется, так как взаимная индуктивность близко расположенных проводников повышает полную проводимость пути через ближайший проводник по сравнению с другими альтернативными путями и, следовательно, представляет собой маршрут, по которому протекает наибольшая доля обратного тока. Причем, таким низкоимпедансным трактом может служить и второй провод в паре или наружный проводник коаксиального кабеля, и экран кабеля или даже расположенная поблизости металлическая конструкция.

Эффект увеличения проводимости соседнего проводника объясняется тем, что суммарное магнитное поле двух равных по силе токов, протекающих в противоположных направлениях по одной траектории, равно нулю. Тогда, по определению, индуктивность этого пути тоже нулевая.

На практике, конечно же, невозможно создать линию связи, в которой траектория прямого тока точно совпадает с траекторией обратного тока, но можно максимально приблизить эти тракты с помощью витой пары или коаксиального кабеля. Для качественной витой пары коэффициент связи проводов превышает 0,95. Это значит, что индуктивность тракта обратного тока по второму проводнику в паре не превысит 5% от индуктивности такого же одиночного проводника.

Симметричные дифференциальные каналы

Использование симметричных линий, в которых обратный провод свит с сигнальным проводом, позволяет существенно снизить уровень излучаемых помех и повысить помехоустойчивость системы. По сравнению с простой параллельно прокладкой повив проводов образует множество «противоположно направленных» контуров, в которых токи помехи противоположны по знаку, что позволяет ослабить магнитные наводки на величину от 20 дБ и выше в зависимости от шага скрутки в кабеле.

Основное свойство симметричных линий связи – равенство амплитуд синфазной помехи в прямом и обратном проводах. Такую наведенную помеху можно легко удалить при помощи дифференциального усилителя. Коэффициент ослабления синфазного сигнала современных операционных усилителей достигает 120 дБ.

Симметричные линии также имеют ощутимые преимущества с точки зрения минимизации эмиссии помех. Например, в кабеле 5-й категории для передачи сигнала по стандарту Ethernet синфазный ток порядка 5 мкА генерирует помеховое поле, которое сравнимо с полем, порождаемым рабочим дифференциальным током 100 мА.

При нарушении симметрии канала наведенные синфазные помехи преобразуются в дифференциальную помеху, которую невозможно удалить дифференциальным усилителем. Таким образом, для обеспечения качественного симметричного режима передачи сигнала необходимо, чтобы кабель имел стабильный шаг скрутки, стабильную толщину изоляции и даже диэлектрическую постоянную пигмента в составе полимера. Для повышения помехозащищенности симметричной линии следует также увеличить калибр проводников и уменьшить толщину изоляции [2].

Часто в инженерной среде смешиваются понятия дифференциальных и симметричных каналов передачи сигнала. Часто считается

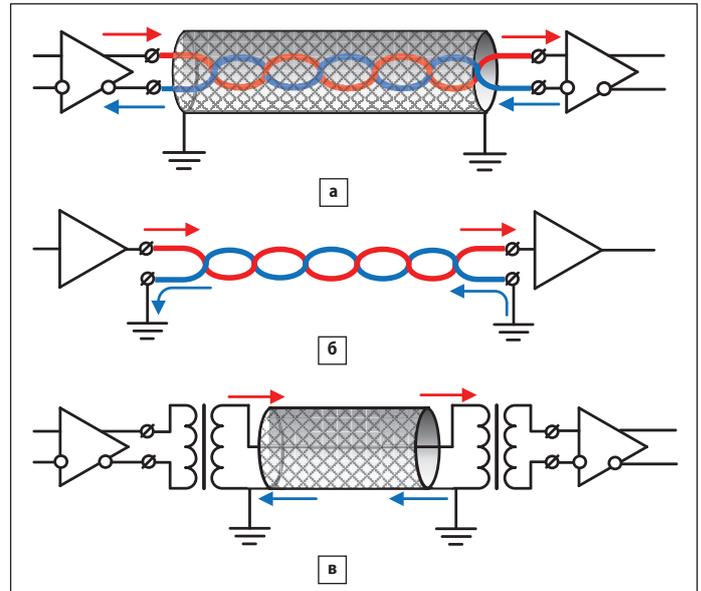


Рис. 2. Виды дифференциальных каналов передачи сигнала: а) дифференциальный симметричный канал; б) и в) дифференциальные каналы с нарушением симметрии

также, что использование для передачи сигнала витой пары автоматически означает образование симметричного канала. Для разделения понятий дифференциальной и симметричной линий рассмотрим несколько вариантов схемотехнической реализации сигнального канала (рис. 2).

Как было показано выше, смысл дифференциальной передачи электрического сигнала в том, чтобы расположить линию обратного тока как можно ближе к сигнальной линии, снизив тем самым внешние помеховые наводки на передаваемый сигнал или уменьшив эмиссию помех от линии. Таким образом, все приведенные на рис. 2 примеры представляют собой дифференциальные каналы передачи сигнала.

При этом в качестве источника дифференциального сигнала может использоваться несимметричный усилитель в соответствии с рис. 2б. Средой передачи служит как витая пара, так и коаксиальный кабель, в которых обратный ток протекает в непосредственной близости от прямого (рис. 2в). Если в качестве среды передачи дифференциального сигнала применяются несимметричные драйверы и витая пара, емкостные синфазные наводки на сигнальный провод и обратный провод различаются несмотря на то, что емкость проводников по отношению к источнику помех, а, следовательно, и шумовые токи можно считать равными.

Причина этого различия в том, что каждая из линий имеет разный импеданс по отношению к сигнальной земле и протекание равных шумовых токов приводит к образованию разности шумовых потенциалов. Эта разность потенциалов образует уже дифференциальную помеху, которую невозможно удалить дифференциальным усилителем на приемной стороне.

Таким образом, дифференциальную передачу сигнала можно осуществлять и с использованием несимметричной линии, однако при этом не реализуются все возможности по защите от синфазных помех.

Симметричный канал, пример которого показан на рис. 2а, строится на основе полностью дифференциальных усилителей, имеющих дифференциальный вход и выход. В этих каналах второй проводник несет сигнал, являющийся «зеркальным» отражением сигнала в первом проводнике, и оба проводника имеют одинаковый импеданс по отношению к «сигнальной земле». Следовательно, синфазные наводки в каждой линии канала равны по амплитуде.

Однако дополнительным требованием в этом случае является использование витой пары, так как ввод сигнала от дифференциального

усилителя в коаксиальный кабель нарушает симметрию наводимых шумовых токов при равенстве импедансов по отношению к сигнальной земле. Пример такого нарушения симметрии в физической среде линии передачи приведен на рис. 2в.

Другими словами, совместное использование дифференциальных драйверов и витой пары является обязательным условием симметричного сигнального канала. В несимметричном дифференциальном канале дифференциальные драйверы могут вводить сигнал в несимметричную линию, а витая пара может использоваться совместно с несимметричным усилителем.

Симметричные витые пары в экране

Симметричные кабели на основе витых пар широко применяются не только для передачи сигналов данных, но и для передачи сигналов малой амплитуды, которые очень чувствительны к помехам, например сигналов с термодатчиков или тензодатчиков.

Экранирование витой пары симметричного канала передачи может потребоваться в случае, если превышено максимальное значение синфазного напряжения для приемника, либо уровень подавления синфазной наводки оказался недостаточным для фактической частоты помехи, либо фактический уровень асимметрии канала привел к появлению дифференциальной помехи недопустимой амплитуды.

Наличие экрана поверх витой пары не только снижает воздействие электромагнитного поля помехи на проводники, но и повышает симметрию кабеля, снижая влияние окружающих металлических конструкций. С другой стороны, если нарушение симметрии в канале вызвано заземлением одного из проводников на одной из сторон, то разумно сначала повысить симметрию канала путем уравнивания импедансов каждого из проводников относительно земли и только затем дополнительно увеличить симметрию с помощью экранирования.

В условиях воздействия низкочастотного электрического поля оптическая плотность экрана должна быть как можно выше. При воздействии магнитного поля помехи экран должен быть электрически толстым на фактической частоте помехи, а значит, иметь достаточную площадь поперечного сечения и толщину как минимум несколько десятых долей миллиметра.

Поскольку, однако, наличие экрана на витой паре одновременно увеличивает удельные потери амплитуды полезного сигнала в линиях передачи данных, использование экранированной витой пары на больших расстояниях не всегда является приемлемым решением. При этом амплитуда вихревых токов, а значит и магнитного поля компенсации, в плетеном экране меньше, чем в сплошном трубчатом или фольговом экране из-за повышенного сопротивления между проволоками. Таким образом, дополнительные потери, привносимые плетеным экраном, меньше, чем в фольговом или трубчатом экранах [3].

В экранированной витой паре экран представляет собой потенциальный путь для протекания обратных токов обоих проводников. Расстояние между проводниками в паре при этом определяется, по большей части, толщиной их изоляции. Подав переменный сигнал на один проводник относительно экранирующей плетенки, можно обнаружить, что обратный ток в экране стремится повторить спиральную траекторию прямого проводника, то есть протекать от него на минимальном расстоянии. Если экран находится достаточно близко к проводникам, то любое смещение пары относительно оси экрана приведет к появлению нескомпенсированных обратных токов в экране и значимому изменению импеданса канала. Однако при увеличении расстояния между экраном и проводником эффект от смещения сигнальных проводников снижается.

Как видно из рис. 3, дифференциальный импеданс существенно изменяется в левой части характеристики приблизительно с 73 Ом при плотном прилегании экрана к изоляции до 93 Ом. Эта зависимость соответствует миниатюрной витой паре, состоящей из проводников с сечением около 0,12 мм² в изоляции толщиной порядка 0,1 мм.

При радиусе экрана R, равном удвоенному расстоянию между проводниками, дифференциальный импеданс практически стабилизиру-

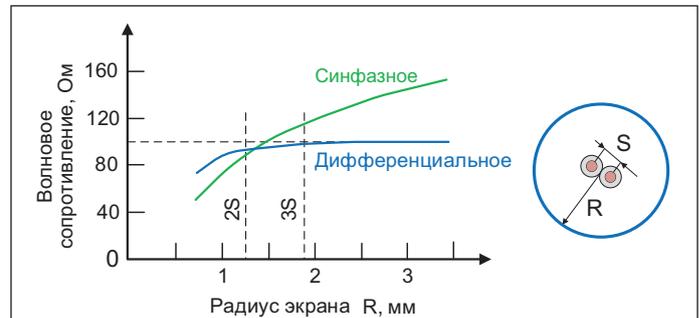


Рис. 3. Изменение волнового сопротивления витой пары в зависимости от радиуса экрана

ется. Поскольку на отрезке от удвоенного до утроенного расстояния S дифференциальный импеданс растет с 93 до 99 Ом, при дальнейшем увеличении радиуса экрана его наличие почти не влияет на значение импеданса и с точки зрения этого параметра неэкранированная витая пара и витая пара с экраном большого радиуса равнозначны. Таким образом, можно считать, что никаким проводником не повлияет на дифференциальный импеданс витой пары, если он находится от центра пары на расстоянии, вдвое превышающем расстояние между проводниками [4].

Эффективность же приема скручивания проводов зависит от импеданса канала и степени его симметрии. Поскольку емкостные наводки на условно несимметричные высокоимпедансные каналы преобладают над индуктивными, общее влияние скручивания невелико. Симметричные каналы позволяют удалить большую часть емкостной наводки, и уровень шума в них определяется, в основном, индуктивными наводками, зависящими от равномерности скрутки. Соответственно, при снижении импеданса цепи роль емкостных наводок снижается, и растет роль индуктивных, то есть влияние скрутки прямого и обратного проводников в паре. Отсюда можно сделать простой вывод, что, например, скручивание проводников на вводе питания с импедансом канала в несколько Ом станет очень эффективным приемом защиты.

Однако в реальных каналах передачи электрических сигналов всегда присутствует некоторое нарушение симметрии, обусловленное несимметричностью источника, нагрузки или среды передачи сигнала (то есть кабеля). В свою очередь, несимметричность кабеля складывается из резистивной несимметричности (величина которой обычно пренебрежимо мала), емкостной несимметричности, составляющей порядка 3–5% от амплитуды дифференциального сигнала, и индуктивной несимметричности, определяемой типом заделки экрана.

Круговая заделка экрана минимизирует индуктивную несимметричность, а использование отвода — увеличивает. При использовании круговой заделки экрана до частоты 100 кГц индуктивную компоненту несимметричности можно считать пренебрежимо малой.

Эффективность витой пары на прием помехи

Витые пары часто считают «универсальным средством» решения проблем с эмиссией от кабельной линии и ее чувствительностью к внешним помехам. На практике же эффект от скрутки проявляется в значительной мере для магнитных полей низкой и средней частоты, а эффективность использования витой пары в значительной мере зависит от схемы передачи сигнала.

В первую очередь, скручивание проводов уменьшает эффективную площадь токового контура на излучение и прием помехи. По этой причине введение скрутки часто только незначительно улучшает общие характеристики ЭМС системы по сравнению с параллельной плотной укладкой проводников. На рис. 4 схематически показан второй эффект от витой пары — механизм компенсации ЭДС наводки в смежных контурах, находящихся во внешнем поле помехи.

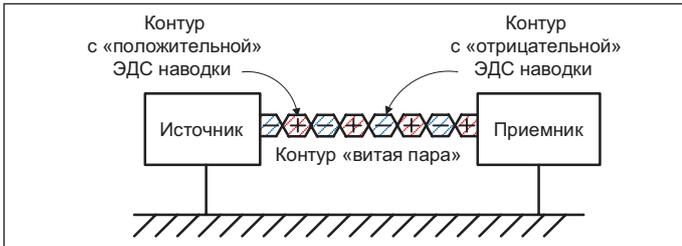


Рис. 4. Схема компенсации ЭДС наводки при воздействии магнитного поля помехи

При четном количестве контуров и идеально равномерной скрутке суммарная наводка нулевая. В этом случае наводка на линию связи определяется только местами заделки проводников в соединители на обоих концах, где скрутка нарушена в той или иной степени.

В наихудшем случае, когда количество контуров нечетное, наводка в линии связи определяется векторной суммой наводок в месте заделки и одного малого контура. Очевидно, что более плотное скручивание уменьшает площадь единичного контура и, соответственно, наведенную помеху в наихудшем случае. Теоретически уменьшение шага скрутки увеличивает защищенность витой пары, однако рост механических напряжений при более плотном скручивании может привести к такому нежелательному эффекту как неоднородность формы контуров по длине.

Неоднородность скрутки, то есть отличие формы и размеров одного «витка» от другого, означает меньшую защищенность канала от помех. Оптимальный шаг зависит от диаметра проводника, его гибкости, толщины изоляции и в большинстве случаев находится в диапазоне 1–10 см.

Эффективность использования витой пары на прием помехи определяется так называемым «коэффициентом применения скрутки» K_s , характеризующим снижение чувствительности витой пары по сравнению с параллельной плотной укладкой (1):

$$K_s, \text{ дБ} = -20 \lg \left[\left(\frac{1}{2nl + 1} \right) \cdot \left(1 + 2nl \sin \frac{\pi}{n\lambda} \right) \right] \quad (1)$$

где n – количество поворотов проводников на 180° на 1 м длины; l – длина витой пары, м; λ – длина волны на исследуемой частоте.

На рис. 5 приводятся наборы кривых зависимости эффективности использования скрутки от общего количества оборотов проводников в линии связи. Разные кривые соответствуют разным значениям комбинированного параметра $n\lambda$. Уровень несимметричности витой пары зависит от длины волны помехи таким образом, что при увеличении длины волны можно обеспечить лучший уровень снижения синфазной помехи.

Приведенная на рисунке группа кривых фактически представляет собой зависимости коэффициента подавления синфазной составляющей от количества полных оборотов проводов вдоль линии связи, то есть произведения количества оборотов, приходящихся на 1 м длины, на фактическую длину витой пары.

Грубое правило определения шага скрутки гласит, что этот шаг не должен превышать $1/20$ от длины волны верхней границы диапазона помехи. Например, шаг скрутки 25 мм эффективен до частоты 500 МГц.

Как видно из рис. 5, увеличение количества оборотов на метр длины и снижение частоты помехи способствуют эффективному подавлению помехи за счет скручивания проводов.

Из этого рисунка можно сделать несколько практических выводов. Первый: значения более 60 дБ недостижимы для любого шага скрутки. Второй вывод состоит в том, что предельное значение начинает снижаться, когда частота помехи превышает 100 кГц [5].

Например, параметр $n\lambda = 5000$ соответствует частоте 1 МГц и шагу скрутки 20 мм. Соответствующая этому значению кривая на рис. 5 выделена зеленым цветом. Тогда при длине кабеля более 20 м, на которой умещается более 1000 скруток, эффективность ослабления

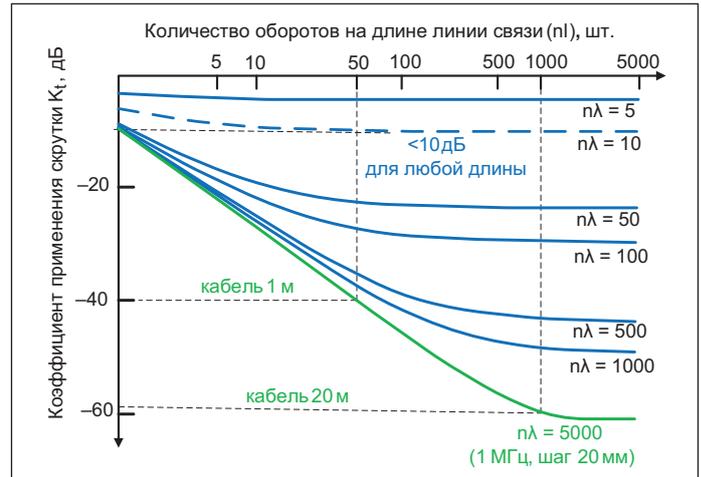


Рис. 5. Изменение эффективности скрутки от общего количества оборотов проводников и длины волны помехи

наводки составит около -60 дБ. Однако для кабеля длиной 2 м, на которой уместится только 100 скруток с тем же шагом, эффект от введения скручивания ухудшается почти на 20 дБ.

На частоте 1 ГГц коэффициент эффективности скручивания падает ниже 20 дБ при практически достижимом шаге. Например, тонкий сигнальный провод можно скрутить с шагом 1 см без существенного нарушения формы витков. Тогда на частоте 3 ГГц параметр $n\lambda$ составит всего 10 ед. Эта характеристика выделена синей штриховой линией. В таком случае любой длине кабеля соответствует коэффициент применения скрутки не более 10 дБ.

Приведенная формула справедлива для случая, когда место заделки, в котором нарушена скрутка проводов, защищено экраном, например хвостовиком экранированного соединителя. Если же место заделки витой пары не экранировано, то шаг скрутки станет играть вторичную роль, так как общая наводка в канале или его уровень помех будут определяться конфигурацией нескрученного участка.

Если же помеха воздействует на кабель локально, на ограниченном участке его длины с равномерным скручиванием, то, безусловно, уменьшение шага скрутки будет способствовать улучшению характеристик ЭМС для этого канала.

Ошибки при использовании витой пары

Нарушение правил скручивания может иметь неожиданные негативные последствия. Одним из самых распространенных дефектов неравномерности является спиральная накрутка одного провода вокруг другого, прямолинейно проложенного, провода. Эта конфигурация, схематически показанная на рис. 6, приводит к появлению в такой линии дифференциальной помехи в тех случаях, когда линии переменного магнитного поля проходят параллельно дефектной паре или под малым углом к ее оси [6].

Однако недостаточно только обеспечить правильную форму скрутки проводов в витой паре. Необходимо также, чтобы весь обратный сигнальный ток протекал исключительно по обратному проводнику в паре.

На рис. 7 приводятся два случая, в которых витая пара не обеспечивает эффективное подавление помехи, несмотря на высокое качество скрутки и защищенность мест заделки в соединитель.

На рис. 7а показана схема несимметричного дифференциального канала. При прохождении низкочастотного сигнала в этом канале обратный ток может частично протекать по поверхности заземления,

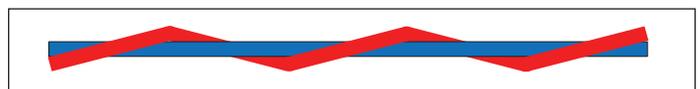


Рис. 6. Дефект скрутки при изготовлении витой пары

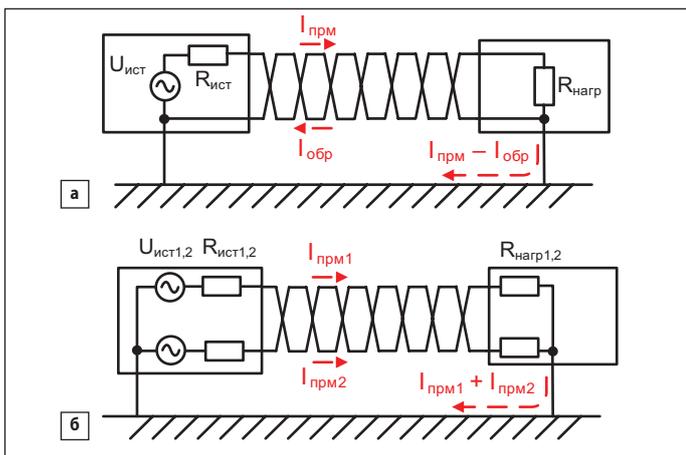


Рис. 7. Ошибки при использовании витой пары: а) нарушение симметричности канала; б) два однонаправленных тока в проводниках витой пары

образуя токовую петлю значительных размеров. Как показано на рисунке, ток в поверхности заземления в этом случае равен разности тока в прямом и обратном проводниках витой пары.

Повив проводов в этом случае имеет небольшое влияние, потому что синфазный контур тока большой площади генерирует излучение на несколько порядков интенсивнее, чем основной дифференциальный контур. В этой конфигурации только высокочастотный обратный ток протекает по второму проводнику в паре, игнорируя поверхность заземления как путь с более высоким полным импедансом.

На рис. 7б показана витая пара с двумя синфазными сигналами, обратные токи которых протекают исключительно по поверхности заземления. Скручивание проводников с током одного направления не оказывает какого-либо влияния на уровень синфазных кондуктивных помех, возникающих как результат разности потенциалов в системе заземления, и порождаемых ими излучаемых помех, хотя и приводит к значительному снижению уровня помех от дифференциального сигнала [7].

Эффект от скручивания отсутствует во всем частотном диапазоне, а площадь токовой петли велика, так как определяется длиной кабеля и расстоянием от проводников до поверхности заземления. Эта схема включения не предоставляет каких-либо преимуществ с точки зрения ЭМС – скорее, она даже повышает уровень перекрестных наводок между линиями при уменьшении шага скрутки.

Выводы

Использование дифференциальных симметричных каналов для передачи электрических сигналов одновременно обеспечивает требуемые параметры ЭМС системы и сохраняет форму сигнала. Однако идеальная симметрия в канале недостижима, и часто возникает задача минимизации остаточных помех, порожденных преобразованием дифференциальных токов в синфазные и в обратном направлении. Таким образом, в ходе разработки систем с жесткими требованиями к ЭМС необходимо придерживаться принципа ступенчатого ослабления помехи на пути ее прохождения от источника к приемнику. ■

Подробнее изучить вопросы обеспечения электромагнитной совместимости, качества питания и сохранения формы сигналов в электронных системах предлагается на тематических семинарах и вебинарах ООО «КРЭЛС» (<https://crels.ru/course>).

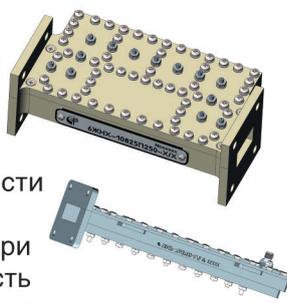
Литература

1. Tim Williams. EMC for Product Designers. Fourth Edition. Newnes. 2007.
2. William G. Duff. Designing Electronic Systems for EMC. SciTech Publishing. 2011.
3. IEEE Std 1143–2012. IEEE Guide on Shielding Practice for Low Voltage Cables. IEEE Power and Energy Society. 2013.
4. Eric Bogatin. Signal and Power Integrity Simplified. Third Edition. Prentice Hall. 2018.
5. J. L. Norman Violette. Electromagnetic Compatibility Handbook. Springer Science+Business Media. NY. 1987.
6. Van Deursen. A. P. J. Electromagnetic Compatibility. Part 5. Installation and Mitigation Guidelines. Section 3. Cabling and Wiring. Eindhoven University of Technology. 1993.
7. Elya B. Joffe, Kai-Sang Lock. Grounds for Grounding. A Handbook from Circuits to System. Second Edition. John Wiley & Sons. 2023.

Качество высокое Цены низкие

Волноводные фильтры

- Диапазон частот
1,0 – 40,0 ГГц
- Полоса пропускания
до 40%
- Высокий уровень
рабочей мощности



- Малые вносимые потери
- Радиационная стойкость
- Хорошая избирательность
- Надежность конструкции



Любые виды заказов:
ОКР • единичные
• срочные • крупносерийные
filin-rf@radiocomp.ru



ФИЛИН
Filter Innovations
www.radiocomp.ru

ГРАНИТ
ВТ

Электронная аппаратура для ответственных применений

Реклама

- Контрактная разработка и инженерное сопровождение
- Контрактное производство высокотехнологичной электроники, в т.ч. монтаж BGA с рентген-контролем

- Париленовое влагозащитное покрытие
- Серийное производство электронных модулей и приборов



www.granit-vt.ru e-mail: mail@granit-vt.ru

АО «ГРАНИТ-ВТ» тел/факс: 8 (812) 274-04-48
191014, Санкт-Петербург, ул. Госпитальная 3