СОГЛАСОВАНИЕ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ

СЕРГЕЙ КРАСНОВ, инженер

В статье [1] было показано, что импеданс соединительных проводников является наиболее критичным показателем высокоскоростных схем на печатных платах. К сожалению, импеданс источника сигнала, как правило, ниже импеданса линии передачи (10–35 Ом), что осложняет решение задачи по передаче энергии и в большинстве случаев приводит к отражениям и электромагнитному излучению. Распространяющийся по линии передачи сигнал отражается в тех ее участках, где меняется импеданс, что сказывается на целостности сигнала. Понимание причин возникновения отражений и устранение их источника обеспечивает надежную работу устройства. В этой публикации мы рассмотрим вопросы согласования линий передачи.

В идеальном случае энергия, поступающая от источника сигналов (выходного каскада цифровой ИС), проходит по линии передачи печатной платы и полностью поглощается нагрузкой. Однако если она поглощается не полностью, оставшаяся часть отражается на соединительных проводниках и возвращается к своему источнику. Вместе с поступающей отраженная энергия создает стоячую волну, ослабляет или усиливает сигнал, вызывая звон. На основной частоте сигнала может появиться резонанс или гармоники, из-за которых возникают многочисленные высокочастотные колебания и, как следствие, излучаются электромагнитные помехи. Так происходит, когда задержка при прохождении сигнала в оба конца межсоединения превышает длительность переднего фронта импульса.

Даже если многослойная печатная плата была разработана с учетом контролируемого импеданса, его величина может меняться, что обусловлено емкостью затвора, ответвлениями, неиспользуемыми частями переходных отверстий и тестовыми контактными площадками. К другим причинам изменения импеданса относятся изменение диэлектрической проницаемости в переходных отверстиях, разность фаз в дифференциальной паре, а также щели в тракте обратного тока. Как правило, уровень отраженного шума не должен превышать 10% от размаха напряжения, но это зависит от допусков. При более жестких условиях данный параметр не может превышать 5%.

Известно немало методов согласования линий передачи, но наиболее общие из них относятся к трем видам: согласование с помощью последовательного резистора, или т. н. «последовательное согласование»; оконечное согласование; согласование дифференциальных пар.

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОГЛАСОВАНИЕ

Последовательное согласование используется для двухточечных соединений с одной нагрузкой на каждую цепь. Это согласование хорошо подходит для электрически коротких проводников и применяется для такого разветвления нескольких нагрузок веером от общего источника сигналов, при котором отсутствует воздействие на другие цепи (см. рис. 1).

Благодаря последовательному согласованию замедляется время нарастания и спада импульсов, а также уменьшается звон (положительные или отрицательные выбросы) формирователей тактовых сигналов. С помощью делителя напряжения, образованного импедансом источника сигналов, последовательным согласующим сопротивлением и линией передачи, в нее поступает только половина амплитуды напряжения источника сигналов. Достигнув нагрузки, этот импульс мгновенно отражается в проводник. Отраженный импульс суммируется с исходным, в результате

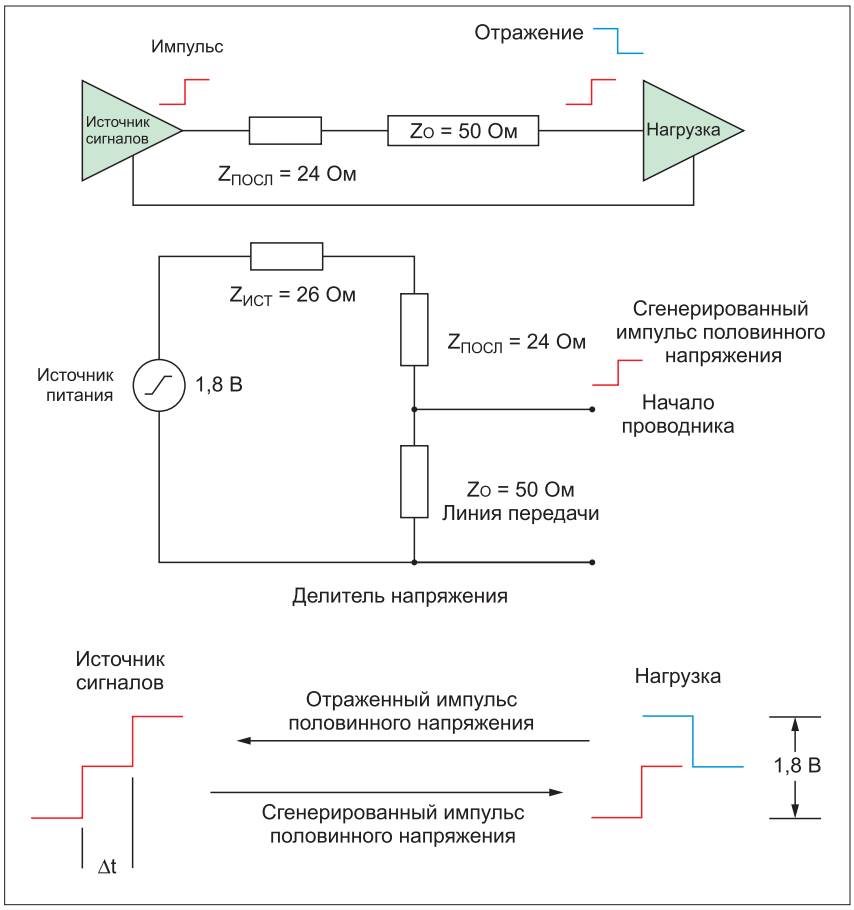

Рис. 1. **Последовательное согласование**

чего напряжение сигнала становится полным, т. е. таким, которое требуется нагрузке.

Отраженный импульс распространяется в сторону источника сигнала. Достигнув последовательного согласующего сопротивления, импульс «видит» последовательный резистор величиной 24 Ом и импеданс источника 26 Ом, что в сумме дает 50 Ом. Поскольку импеданс линии передачи тоже 50 Ом, рассогласование отсутствует, и отражения не возникают. Сигнал полностью поглощается согласующим резистором и импедансом источника, благодаря чему предотвращается звон.

В приемник, установленный в самом конце проводника, поступает сигнал почти с идеальным фронтом. Но если бы приемник был установлен посередине линии передачи или рядом с резистором, в него сначала поступила бы половина сигнала, а затем весь сигнал. По этой причине последовательное согласование применяется при наличии только одного приемника или нагрузки, и этот приемник устанавливается в самый конец линии передачи. Чтобы определить величину последовательного согласующего резистора, необходимо вычесть импеданс источника сигналов с помощью IBIS-модели микросхемы. Результатом вычитания этого импеданса из характеристического импеданса проводника является требуемая величина последовательного согласующего резистора (см. рис. 2).

При использовании выходного каскада LVCMOS на 12 мА/1,8 В ПЛИС Spartan 6 в предыдущем примере необходим последовательный резистор величиной 18,7 Ом для согласования источника сигнала с 51,67-Ом проводником на внешнем слое. Эта величина была получена с помощью модели IBIS и планировщика iCD Termination. На рисунке 3 показан звон (красным цветом) в несогласованной линии передачи. Этот звон, представленный также положительными и отрицательными выбросами, стал значительно меньше после согласования линии передачи с помощью последовательного резистора величиной 18,7 Ом (синим цветом).

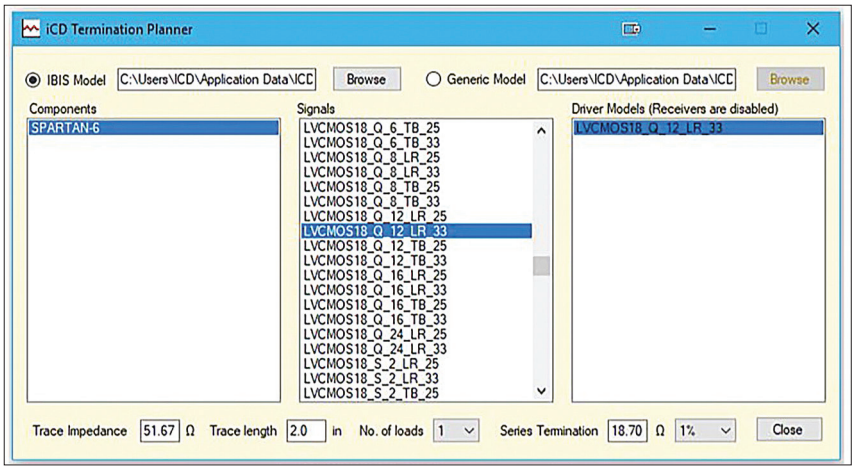

Рис. 2. **Согласование выходного каскада ПЛИС Spartan 6 с линией передачи (окно планировщика iCD Termination)**

ОКОНЕЧНОЕ СОГЛАСОВАНИЕ

Многоточечным шинам требуется согласование с помощью параллельно установленных резисторов или оконечное согласование, чтобы предотвратить отражения на концах линии передачи. Например, управляющие сигналы запоминающих устройств DDR3/4 должны проходить как можно ближе к выводам памяти, а в конце линии передачи необходимо использовать параллельные согласующие резисторы (см. рис. 4). Значения этих сопротивлений должны в два раза превышать импеданс линии передачи, поскольку они установлены параллельно, если смотреть со стороны источника сигналов.

Для последовательного соединения сигнального проводника с каждым запоминающим устройством можно использовать короткие ответвления. При этом следует учитывать, что чем они длиннее, тем выше емкость, которая наряду с паразитной входной емкостью вывода приемника ухудшает согласующую цепь.

На рисунке 4 показана типовая сквозная топология DDR3, в которой согласующие резисторы установлены рядом с конечной нагрузкой. Кроме того, проводник сигнала адресации соединен с выводами приемника без помощи ответвлений. В этом идеальном случае отражения не возникают, что видно по характеристикам сигналов.

СОГЛАСОВАНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ПАРЫ

Достигнув открытого конца дифференциальной линии, сигнал «натыкается» на высокий импеданс и отражается. Чтобы уменьшить отражения, на конце пары, как правило, устанавливается резистивная нагрузка, которая обеспечивает согласование дифференциального импеданса линии передачи.

Однако согласование дифференциальной пары с помощью одного резистора (см. рис. 5а) действует в отношении

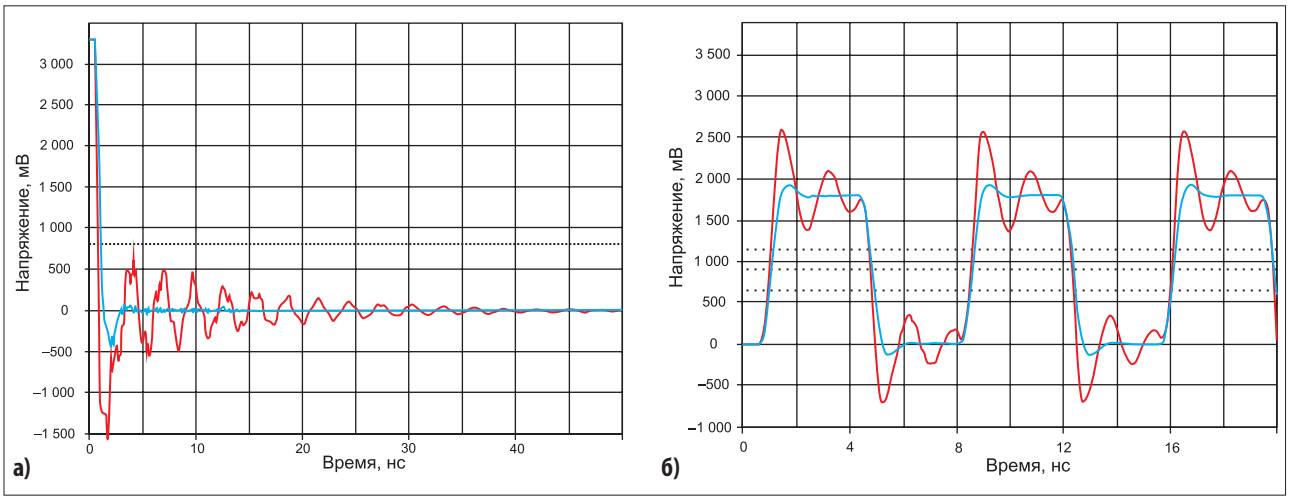

Рис. 3. **Звон стал существенно меньше после добавления в схему последовательного согласующего резистора (симуляция в HyperLynx)**

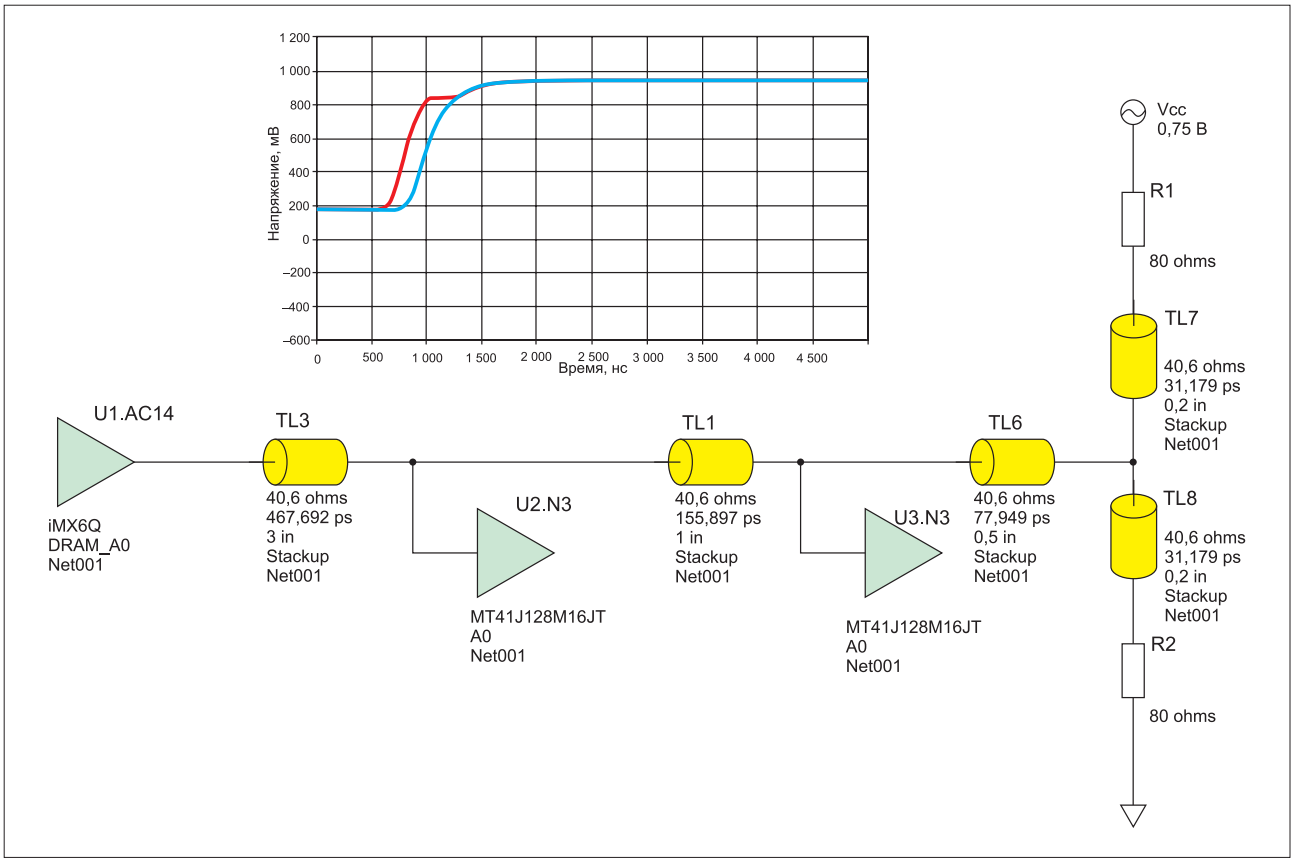

Рис. 4. **Сквозная топология DDR3 с согласованием за конечной нагрузкой (симуляция в HyperLynx)**

только дифференциального, а не синфазного сигнала. Любой синфазный сигнал переходного процесса, распространяющийся по дифференциальной паре, отражается в направлении источника из-за большого импеданса в ее конце. Генерируемый шум можно увидеть в верхней и нижней частях глазковой диаграммы.

Согласование дифференциальной пары не действует на синфазные сигналы – они продолжают отражаться от концов линии передачи. Поскольку согласующий резистор никогда в точности не соответствует импедансу источника сигналов, имеется некоторое постоянное рассогласование. Из-за любой асимметрии в дифференциальной паре ее сигнал преобразуется в синфазный.

Дифференциальная пара с отводом от средней точки позволяет согласовать и дифференциальные, и синфазные сигналы, что хорошо видно по глазку диаграммы (см. рис. 5б).

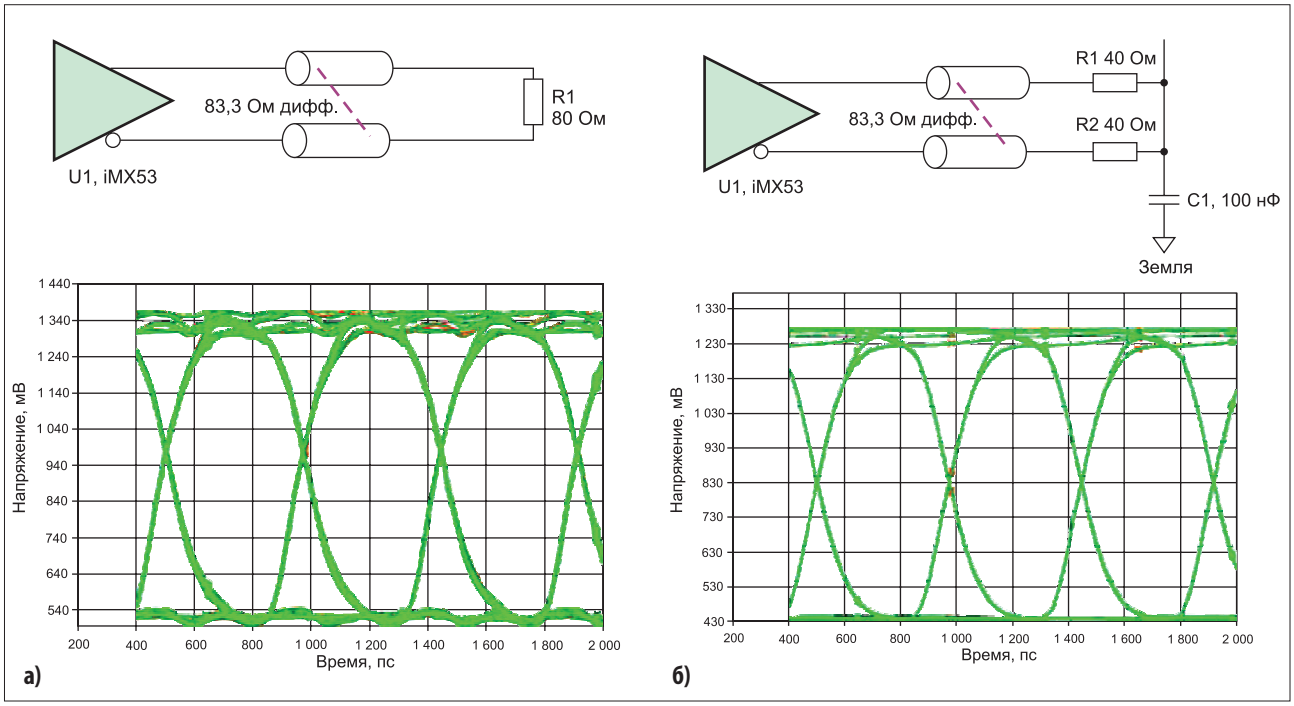

Рис. 5. **а) согласование дифференциальной линии: а) с помощью одного резистора; б) с отводом от средней точки**

На заметку

- Импеданс источника сигналов (выходного каскада цифровой ИС), как правило, ниже импеданса линии передачи, что приводит к появлению отражений и к электромагнитным помехам.
- Всякий раз, когда сигнал проходит участки с меняющимся импедансом, возникают отражения, которые влияют на целостность сигнала.
- Причинами изменения импеданса являются емкость затвора, ответвления, неиспользуемые части переходных отверстий, тестовые контактные площадки, вариации диэлектрической проницаемости материалов, разность фаз в дифференциальной паре, а также щели в тракте обратного тока.
- Последовательное согласование используется для двухточечных соединений с одной нагрузкой на каждую цепь. Оно эффективно в случае электрически коротких проводников и применяется для разветвления нескольких нагрузок веером от общего источника сигналов.
- Благодаря последовательному согласованию замедляется время нарастания и спада импульсов, а также уменьшается звон (положительные или отрицательные выбросы) формирователей тактовых сигналов.
- Последовательное согласование применяется при наличии только одного приемника или нагрузки, которые устанавливаются в самый конец линии передачи.
- Требуемая величина последовательного согласующего резистора рассчитывается путем вычитания импеданса источника сигналов из характеристического импеданса проводника.
- Многоточечным шинам необходимо согласование с помощью параллельно установленных резисторов или оконечное согласование, чтобы предотвратить отражения на концах линии передачи.
- Значения сопротивлений при оконечном согласовании должны вдвое превышать импеданс линии передачи, поскольку они установлены параллельно, если смотреть со стороны источника сигналов.
- Чтобы уменьшить отражения, на конце пары, как правило, устанавливается резистивная нагрузка, которая обеспечивает согласование дифференциального импеданса линии передачи.
- Согласование дифференциальной пары с помощью одного резистора действует только в отношении дифференциального, а не синфазного сигнала.
- Образовавшиеся синфазные сигналы отражаются от концов линии передачи.
- Дифференциальная пара с отводом от средней точки позволяет согласовать и дифференциальные, и синфазные сигналы. Лучше всего применять этот способ в тех случаях, когда у источника сигналов низкий импеданс, а линия передачи имеет большую длину.
- Даже в коротких линиях передачи имеются отражения, но они перекрываются передними и задними фронтами импульсов и потому не вызывают проблем.

Лучше всего применять этот способ в тех случаях, когда у источника сигналов низкий импеданс, а линия передачи имеет большую длину. Благодаря такому подходу смещение по постоянному току меньше. Блокировочный конденсатор по постоянному току позволяет отрегулировать уровень балансируемых цепей постоянного тока, которые, например, используются для тактовых сигналов, кодирования 8B10B и т. д.

КОГДА ТРЕБУЕТСЯ СОГЛАСОВАНИЕ?

Даже в коротких линиях передачи имеются отражения, но они перекрываются передними и задними фронтами импульсов и потому не вызывают проблем. Однако даже при использовании проводника малой длины может потребоваться согласование во избежание звона в тех случаях, когда нагрузка имеет емкостной характер или большую индуктивность. Как правило, согласование необходимо, если длина проводника превышает 1/6 электрической длины переднего фронта. Как бы то ни было, тракты критически важных и обратных сигналов всегда должны быть как можно короче.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сергей Краснов. Согласование линий передачи// Электронные компоненты. №3. 2020.