

Электромагнитная совместимость и ограничения при конструировании печатных плат

Публикуется по: *Electromagnetic Compatibility and Printed Circuit Boards Constraints, Philips Semiconductors Application Note ESG 89001* (<http://www.semiconductors.philips.com/acrobat/applicationnotes/U89001.pdf>).

Перевод Владимира Семёнова (г. Великий Новгород)

В последнее время всё большее внимание уделяется обеспечению электромагнитной совместимости радиоэлектронных устройств. В Руководстве по применению, перевод которого публикуется с согласия фирмы Philips, предпринята попытка численно оценить уровень излучения радиоэлектронного устройства, смонтированного на печатной плате, и даны рекомендации по уменьшению уровня такого излучения. В первой части перевода Руководства рассматривается построение соединений на плате как линий передачи, состоящих из прямого и обратного сигнальных проводников с известными параметрами.

ВВЕДЕНИЕ

Трассировка печатной платы оказывает значительное влияние на электромагнитную совместимость устройства, в котором эта плата применяется, как в отношении электромагнитного излучения самой схемой, так и её чувствительности к электромагнитным полям. Также большое влияние оказывают кабели, соединяющие печатную плату с другими компонентами системы, например, генератором сигнала, розеткой кабельного телевидения, источником питания постоянного тока или сетью.

Для обеспечения требований по ЭМС необходимо в соответствии с рекомендациями, данными в этой статье, оптимизировать трассировку печатных проводников, расположение разъёмов и элементов развязки по питанию.

Для получения экономичного, но функционального проекта печатной платы следует обеспечить:

- правильный выбор *формата печатной платы* (односторонняя, двусторонняя, многослойная);

- свой *обратный проводник* для каждого сигнального проводника, проходящий как можно ближе к последнему;
- необходимую *развязку по питанию* для каждой интегральной схемы или группы схем;
- *ограничение длины* проводников и *площади* контуров до допустимых значений;
- правильное *размещение соединителей* (разъёмов);
- правильный *выбор кабелей* и соединителей для них;
- правильное использование и размещение *фильтров*.

Ниже эти положения будут рассмотрены подробнее. *Главной задачей проектировщика является установление полного контроля над протеканием токов по печатной плате.*

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Проводники

Одиночные проводники имеют индуктивность порядка 1 мкГн/м (в предположении, что обратные провода и поверхности удалены настоль-

ко, что их влиянием можно пренебречь. – *Прим. перев.*). На частотах ниже 1 кГц учитывается только сопротивление постоянному току. В соответствии с законом Ома, разность потенциалов между некоторыми точками определяется полным сопротивлением (импедансом) между этими точками и током, протекающим через это сопротивление. Для уменьшения разности потенциалов нужно уменьшать импеданс и (или) ток.

В типичных цифровых схемах разность потенциалов не зависит от частоты. Ток прямоугольной формы, возникающий в резистивной нагрузке при прямоугольном выходном напряжении, может быть описан как сумма гармоник (синусоидальных волн), где амплитуда гармоники уменьшается пропорционально частоте (см. рис. 1а). Импеданс индуктивности увеличивается пропорционально частоте (см. рис. 1б), поэтому разность потенциалов остаётся постоянной (см. рис. 1в).

Когда ток имеет треугольную форму, например, вследствие ёмкостной нагрузки, амплитуда гармоник обратно пропорциональна квадрату частоты, а разность потенциалов на индуктивности уменьшается прямо пропорционально.

Линии передачи

Обозначив индуктивность одиночного провода как L_i , взаимную индуктивность – M , а ёмкость между дорожками – C_i (используются погонные параметры, т. е. отнесённые к единице длины. – *Прим. перев.*), можно определить характеристический импеданс линии передачи, показанной на рисунке 2:

$$Z_0 = \sqrt{L_{\text{eff}} / C},$$

где $L_{\text{eff}} = L1 + L2 - 2M$; $k = \sqrt{(L1 + L2) / M}$ и $C = C1 + C2$.

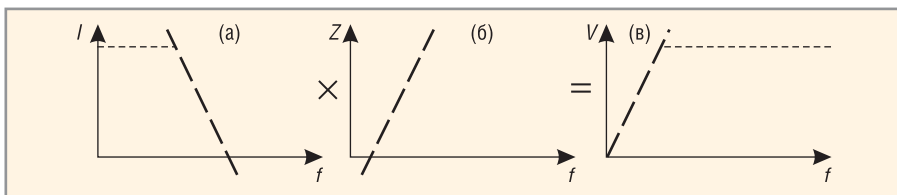


Рис. 1. Разность потенциалов как произведение тока и импеданса в функции частоты

С ростом коэффициента связи k между проводниками линии передачи эффективная индуктивность L_{eff} будет быстро уменьшаться. Коэффициенты электромагнитной связи для некоторых линий передачи приведены в таблице 1.

Вид сигнальных проводников, проведённых произвольно (см. рис. 3а), должен быть преобразован к виду линии передачи (см. рис. 3б). Это снижает эффективную индуктивность L_{eff} линии связи между двумя микросхемами, что приведёт к уменьшению разности потенциалов между их общими точками.

Емкостная и индуктивная электромагнитная связь

Если сигнальная линия и её обратный проводник всё же не образуют эффективную линию передачи, можно отдельно использовать емкостные и индуктивные величины (см. рис. 2) для вычисления перекрёстной связи между соседними дорожками. Емкостная связь в виде наведённого тока:

$$I_{C_k} = C_k \times dV / dt ,$$

где C_k – ёмкость между соседними проводниками (на практике – 100 пФ/м; зависит от близости других проводников; см. Приложение).

Индуктивная связь в виде наведённого напряжения:

$$V_{mk} = M_k \times dI / dt ,$$

где M_k – взаимоиндуктивность между двумя проводниками (более подробно см. в разделе «Сигнальный и обратный проводники»).

В большинстве случаев такая связь между проводниками оказывается существенной.

Выбор параметров печатной платы

Правильно выбрав материал и осуществив грамотную разводку печатной платы, можно создать хорошие линии передачи, имеющие слабую электромагнитную связь с другими дорожками. Слабая перекрёстная связь может быть получена, когда расстояние между двумя проводниками линии передачи d меньше, чем расстояние от них до других соседних проводников (см. рис. 4).

При использовании этих примеров геометрии дорожек параметры связи

между S1, S2, S_{ij} и (S2) GND, V_{ee} и/или V_{cc} легко определяемы, а электромагнитная связь между проводниками S2 и S1 является слабой. Наиболее экономичный формат (число слоёв) печатной платы должен выбираться с учётом:

- нормативных и/или функциональных требований к электромагнитной совместимости изделия;
- допустимой плотности дорожек;
- возможностей сборочного производства;
- возможностей системы CAD;
- расходов на проект;
- количества печатных плат;
- стоимости экранов электромагнитного излучения.

Особое внимание необходимо обратить на совокупную стоимость (монтаж компонентов + формат печатной платы + защита от электромагнитного излучения + конструкция + сборка) в том случае, когда рассматривается вариант изделия с неэкранированным корпусом. Во многих случаях выбор соответствующего формата печатной платы может исключить необходимость использования металлического экрана внутри пластмассового корпуса.

Для того чтобы уменьшить нежелательное излучение (или улучшить защиту от него), целесообразно, особенно для сигналов с крутыми фронтами, создание линий передачи между S ↔ V_{cc}, S ↔ V_{ee} и V_{ee} ↔ V_{cc}, как показано на рисунке 5.

Сигнальный ток определяется симметрией выходного каскада интегральной схемы. Для КМОП (CMOS) I_{OL} = I_{OH}, в то время как для ТТЛ I_{OL} > I_{OH}.

Выбранное семейство логических микросхем и функциональные моменты определяют типичный характеристический импеданс Z₀ для линий передачи, перечисленных в таблице 2.

Для двух соседних проводников применяется следующая формула:

$$Z_0 = 120 \ln(\pi b / (b + c)) / \sqrt{\epsilon_r} ,$$

где b – расстояние между проводниками; b – ширина проводника; c – его толщина (типичное значение 17 мкм).

Для двух проводников, расположенных один над другим:

$$Z_0 = 120 \pi (b / (b + b)) / \sqrt{\epsilon_r} ,$$

где b – толщина диэлектрика (типичное значение 1,5 мм).

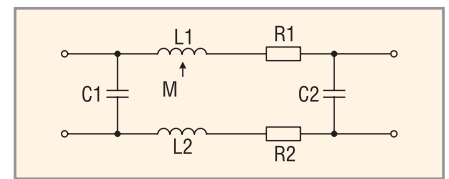


Рис. 2. Отрезок линии передачи

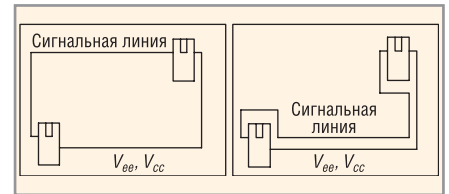


Рис. 3. Варианты проведения сигнальных линий на печатной плате:

а) линия передачи сигнала, проведённая произвольно; нет связи S ↔ V_{ee}, V_{cc}; б) хорошая линия передачи сигнала; есть связь S ↔ V_{ee}, V_{cc}

Когда дорожка находится над заземлённой плоскостью, применяется следующая формула:

$$Z_0 = 87 \ln(6b / (0,8b + c)) / (\sqrt{\epsilon_r} + \sqrt{2}) .$$

И наконец, в случае, когда проводник расположен между двумя (заземлёнными) плоскостями, применяется формула:

$$Z_0 = 60 \ln(4K / (0,67 \pi b (0,8 + c / b))) / \sqrt{\epsilon_r} ,$$

где K – расстояние между плоскостями.

Таблица 1. Коэффициенты электромагнитной связи между проводниками линии передачи

Линия передачи	Коэффициент связи
Параллельные провода	0,5...0,7
Двусторонняя печатная плата	0,6...0,9
Многослойная печатная плата	0,9...0,97
Коаксиальные кабели	0,8...1,0
Коаксиальный кабель RG-58	0,996

Таблица 2. Импедансы линий передач Z₀ (для некоторых случаев)

Функция/логическое семейство	Z ₀ , Ом
Линии питания	<< 10
Сигнал ЭСЛ (ECL)	50
Сигнал ТТЛ (TTL)	100
Сигнал НС(Т)	200

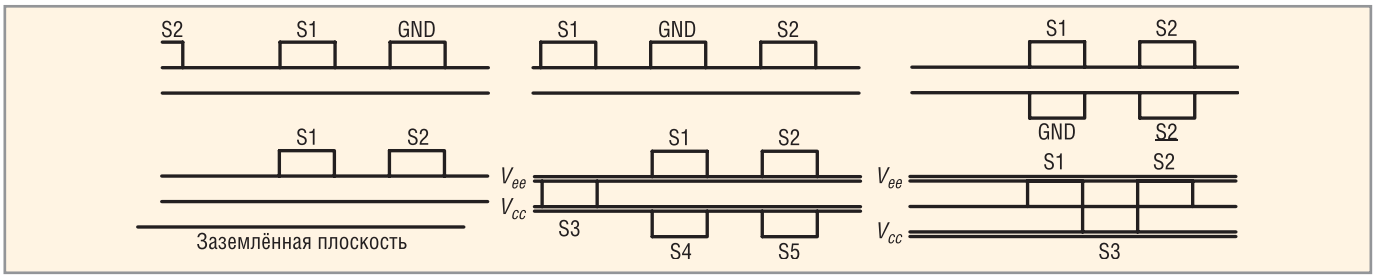


Рис. 4. Типичные форматы печатной платы:

один слой (а, б) $d(S1 \leftrightarrow GND) < d(S2 \leftrightarrow S1)$; два слоя (в) $d(S1 \leftrightarrow GND) < D(S2 \leftrightarrow S2)$; (г) $d(S1 \leftrightarrow GND)$ и $d(S2 \leftrightarrow GND) < d(S1 \leftrightarrow S2)$; несколько слоёв (д, е) $d(S_i \leftrightarrow V_{ee})$ или $d(S_i \leftrightarrow V_{cc}) < d(S_i \leftrightarrow S_j)$; $l < i, j < \text{число проводников}$

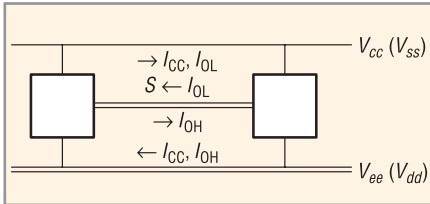


Рис. 5. Типичная схема с двумя цифровыми интегральными схемами, на которой показано три специфических линии передачи.

I_{cc} – ток потребления; I_{OL} – выходной ток низкого уровня; I_{OH} – выходной ток высокого уровня

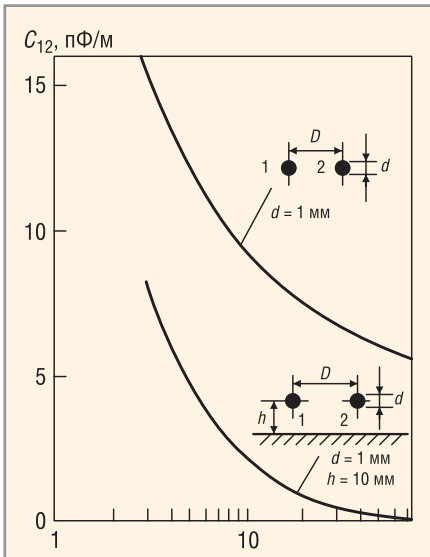


Рис. 6. Емкостная связь двух проводников в свободном пространстве и двух проводников, находящихся над заземлённой плоскостью

Типичное значение диэлектрической проницаемости диэлектрика $\epsilon_r = 4,7$.

Сигнальный и обратный проводники

Необходимо, чтобы обратные проводники находились как можно ближе к сигнальным для того, чтобы предотвратить излучение с площади контура между этими проводниками и уменьшить магнитную восприимчивость к напряжениям, которые мо-

гут быть наведены в этом контуре, например, от радиочастотных передатчиков или посредством электростатического разряда (ESD).

Обычно когда расстояние между двумя проводниками равно ширине проводников, коэффициент электромагнитной связи равен 0,5...0,6, а эффективная индуктивность проводников падает от 1 мГн/м до 0,4...0,5 мГн/м. Это значит, что от 40 до 50% возвратного тока может свободно проходить через другие проводники печатной платы.

Для каждого сигнального пути между двумя микросхемами, как аналоговыми, так и цифровыми, необходимо наличие трёх правильно спроектированных линий передач с импедансами, приведёнными в табл. 2 и показанными на рис. 5.

В схемах ТТЛ вытекающий ток при переходе от высокого состояния к низкому выше, чем вытекающий ток. В этом случае линию передачи следует определять между V_{cc} и S , в отличие от общепринятого V_{ee} и S .

Взаимоиндуктивность между двумя параллельными проводниками может быть рассчитана из двойного интеграла:

$$M_k = \mu / (4\pi) \int \int \frac{ds_1 ds_2 dr}{l_1 l_2 |r|}$$

где l_1, l_2 – длина проводников 1 и 2; r – относительное расстояние между линейными сегментами; ds_1, ds_2 каждого проводника.

Подставляя для геометрии двух параллельных линий, получаем:

$$M_k = 200 \left[l \ln \left\{ \left(1 + \sqrt{l^2 + b^2} \right) / b \right\} + \sqrt{l^2 + b^2} + b \right] \text{ [нГн]}$$

где l – длина двух параллельных проводников; b – расстояние между проводниками (толщина и ширина проводников не учитываются).

Если взаимоиנדуктивность между двумя проводниками линии передачи слишком низкая, её увеличит до ≈ 1 ферритовый тороид с несколькими витками ($\mu_r > 200$ (-5000)). Используя ферритовые тороиды, можно получить полный контроль над сигнальными и обратными токами.

Если проводники параллельны, феррит может повлиять на характеристический импеданс такой линии передачи. Если применяется коаксиальный кабель, присутствие феррита отразится только на внешних параметрах кабеля.

Выводы:

1. Используйте самые тонкие, насколько это возможно, проводники и располагайте их рядом, а не один над другим (т.к. расстояние между ними удастся сделать меньше 1,5 мм – толщины диэлектрика двухслойной печатной платы).
2. Создайте трассу, где каждая сигнальная линия имеет свой обратный проводник как можно ближе друг к другу (применяется как к сигнальным проводникам, так и к проводникам питания).
3. Если взаимоиנדуктивность между проводниками линии передачи недостаточна, можно использовать ферритовый тороид.

Приложение. Емкостная связь между проводниками

В этом приложении дано графическое представление емкостной связи двух проводников в свободном пространстве и двух проводников, находящихся над заземлённой плоскостью.

График (см. рис. 6) показывает, что для уменьшения емкостной связи между проводниками необходимо располагать их ближе к заземлённой плоскости.

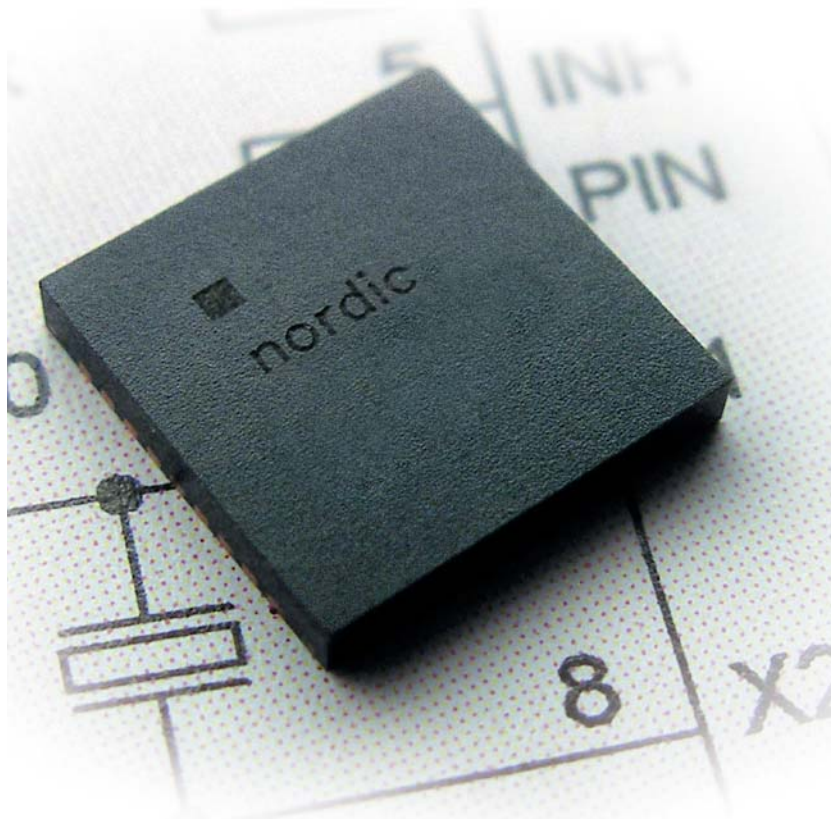
Продолжение следует.



Твой шаг в мир без проводов:



однокристальные трансиверы Nordic Semiconductor со встроенным микроконтроллером и АЦП



ОСНОВНЫЕ ДОСТОИНСТВА

- Малые габариты (корпус 6 × 6 мм)
- Сверхнизкое потребление тока в режиме покоя
- Аппаратнореализованные помехоустойчивые протоколы обмена
- Встроенные АЦП и микроконтроллер
- Не требуется стабилизированного питания

Основные характеристики	nRF9E5	nRF24E1
Диапазон частот	433/868/915 МГц	2,4 ГГц
Микроконтроллер	встроенный 8051-совместимый	встроенный 8051-совместимый
Встроенный АЦП 10 бит	4-канальный	8-канальный
Расширенный диапазон питающих напряжений	1,9...3,6 В	1,9...3,6 В
Скорость передачи	до 100Кбит/с	до 1Мбит/с
Диапазон рабочих температур	индустриальный	индустриальный
Количество внешних компонентов	минимальное	минимальное
Сверхнизкое потребление тока в режиме покоя	2,5 мкА	2 мкА
Защита от коллизий	аппаратные схемы	аппаратные схемы
Области применений	системы сбора данных	- компьютерная периферия
	- охранные системы	- бытовая электроника
	- телеметрия	- спортивное оборудование
	- автоматизация зданий	- медицинское оборудование
	- устройства удаленного контроля и управления	- телеметрия
		- системы контроля доступа
	- промышленная и домашняя автоматика	
	- автомобильная электроника	
Дополнительные характеристики		возможность одновременного приема по двум каналам