

TRANSMISSION LINES. By Atar Mittal, General Manager of the Design & Assembly Division.

Перевод с английского выполнен Лагаевой А.И.

Линия передачи на печатной плате

Содержание:

1. Что такое линия передачи печатной платы?
 - 1.1. Примеры линий передач
 - 1.2. Пример коаксиального кабеля
 - 1.3. Когда соединение следует рассматривать как линию передачи?
2. Скорость сигнала и задержка распространения в линии передачи
 - 2.1 Скорость сигнала
 - 2.2 Задержка распространения сигнала
3. Критическая длина, контролируемый импеданс, время нарастания/падения сигнала в линиях передач
 - 3.1 Критическая длина
 - 3.2 «Короткая» линия
 - 3.3 Расчет времени нарастания/падения по скорости передачи данных (DTR) или тактовой частоте
 - 3.4 Пропускная способность 3 дБ
4. Анализ линии передачи печатной платы
 - 4.1 Характеристическое сопротивление однородной линии передачи
 - 4.2 Однородная линия передачи без потерь
 - 4.3 Вычисление L и C, при известных Z_C и t_{pd}
5. Выводы

1. Что такое линия передачи печатной платы?

Линия передачи на печатной плате представляет собой тип соединения, применяемый для перемещения сигналов от их передатчиков к приемникам (или от места их передачи к приему сигнала) на печатной плате. Линия передачи на печатной плате состоит из двух проводников: сигнальной трассы и возвратного пути сигнала, который обычно является слоем земли. Пространство между двумя проводниками состоит из диэлектрического материала печатной платы.

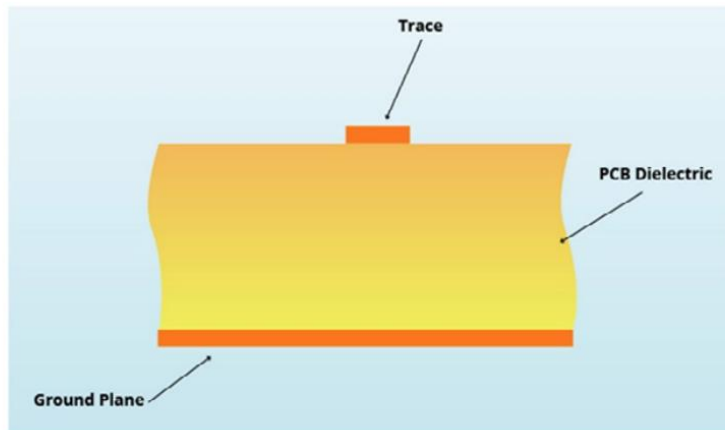
Переменный ток, идущий по линии передачи, обычно имеет достаточно высокую частоту, что обусловлено распространением волн. Ключевым аспектом распространения электрических сигналов по линии передачи является то, что линия обладает импедансом в каждой точке вдоль ее длины, и если геометрия линии остается одинаковой вдоль ее длины, то импеданс остается однородным. Такую линию обычно называют линией с контролируемым импедансом. Неравномерное сопротивление приводит к отражению и искажению сигнала. Это означает, что на высоких частотах линии передач должны иметь контролируемый импеданс, чтобы предсказать поведение сигналов.

Крайне важно не игнорировать эффекты линии передачи, чтобы избежать отражений сигнала, перекрестных помех, электромагнитных помех и других проблем, которые могут серьезно повлиять на качество сигнала и привести к ошибкам.

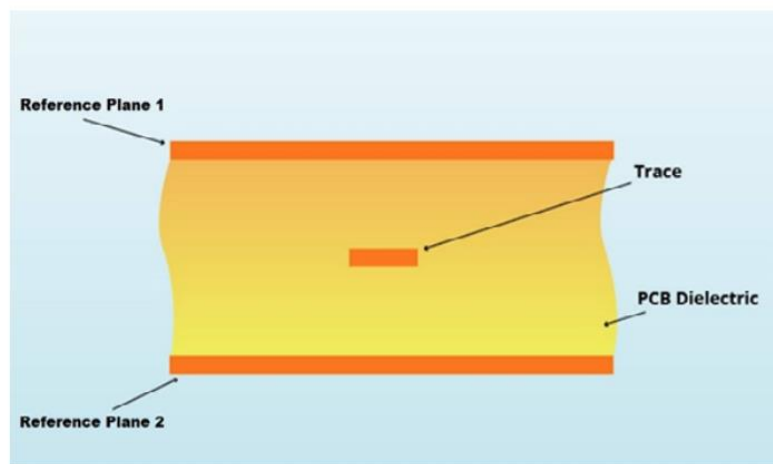
1.1 Примеры линий передач

Существует два основных типа линий передач, применяющихся в печатных платах: микрополосковые и полосковые линии. Также существует третий тип – копланарные без опорного слоя (опорный слой находится на том же слое, что и сигнальный проводник), но такой тип применяется не очень часто.

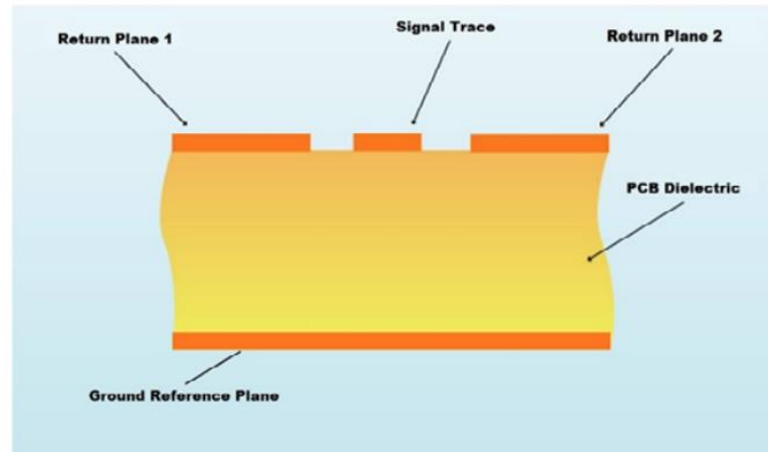
Микрополосковая линия состоит из единого однородного проводника для сигнала, расположенного на внешнем слое печатной платы, и параллельно ей располагается полигон земли (как правило в ближайшем слое), который обеспечивает возвратный путь для сигнала. Сигнальный проводник и полигон земли разделены соответствующей высотой диэлектрика печатной платы. Ниже представлена микрополосковая линия без покрытия:



Полосковая линия состоит из однородного сигнального проводника, расположенного во внутреннем слое печатной платы. Дорожка с каждой стороны отделена параллельными слоями диэлектрика печатной платы, а также полигоном земли. Поэтому в данном случае наблюдаются два возвратных пути сигнала – опорный слой 1 и опорный слой 2 (на рисунке изображены reference plane 1 reference plane 2 соответственно).

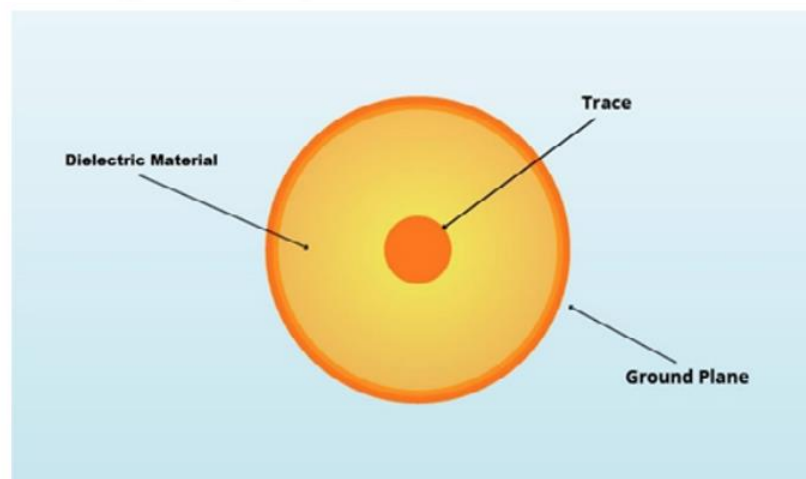


В дополнение к стандартным микрополосковым и полосковым линиям, описанным выше, микрополосковый копланарный волновод состоит из сигнального проводника и проводниками (или полигонами) для возвратного тока на том же слое печатной платы. Сигнальный проводник расположен в центре и окружен двумя смежными внешними полигонами земли. Данный тип получил название «копланарная линия передачи», так как три плоские структуры находятся на одном и том же слое. Диэлектрик печатной платы расположен внизу. Микрополосковые и полосковые линии могут обладать копланарной структурой. Ниже представлен микрополосковый копланарный волновод с полигоном земли.



1.2. Пример коаксиального кабеля

Коаксиальная линия имеет круглую форму и не является линией передачи печатной платы. Данный круглый кабель состоит из центрального кабеля для прохождения сигнала и внешнего круглого кабеля для возвратного пути. Пространство между двумя проводниками заполнено материалом диэлектрика. Внешний кабель полностью охватывает сигнальный провод. Коаксиальные линии в основном используются в качестве кабелей для высокочастотных областей, таких как телевидение и т.д. Коаксиальный кабель должен иметь однородную геометрию проводников, а свойства диэлектрического материала должны быть однородными по всей его длине.



Важно помнить, что линия передачи печатной платы состоит не только из сигнальной трассы, но также из возвратного пути сигнала, который обычно представляет собой прилегающую плоскость заземления (ground plane), копланарный проводник, или их комбинацию.

1.3 Когда соединение следует рассматривать как линию передачи?

Совокупность проводников (как было указано выше, требуются как минимум два проводника: один для сигнала и другой для возвратного пути, который обычно представлен как полигон земли), используемая для соединения сигнала между его источником и приемником, называется линией передачи (а не просто соединением), если невозможно игнорировать время, необходимое прохождению сигнала от источника до приемника, по сравнению с периодом времени, составляющим одну четверть длины волны высокочастотного компонента.

Двумя важными свойствами линии передачи являются волновое сопротивление (импеданс) и задержка распространения сигнала на единицу длины. Если импеданс не контролируется по всей длине, или линия не согласована, то в таком случае возникнут отражения сигнала, перекрестные и электромагнитные помехи. Ухудшение качества сигнала может быть достаточно серьезным, что может привести к ошибкам в передаваемой и получаемой информации.

Когда частота сигналов (в случае аналоговых сигналов) или скорость передачи данных (в случае цифровых сигналов) низкая (менее 50 МГц или 20 Мбит/с), время прохождения сигнала от источника до приемника на печатной плате будет очень маленькой (<10%) по сравнению с периодом времени, составляющим четверть длины волны сигнала или самым быстрым временем нарастания/спада времени цифрового импульсного сигнала. В данном случае возможно приблизительно определить взаимосвязь, предположив, что сигнал в приемнике совпадает с сигналом в его источнике. В таких условиях низкой скорости сигнал печатной платы можно проанализировать обычными методами сетевого анализа, и мы можем игнорировать любые отражения линии передачи, время распространения сигнала и т.д.

Однако при работе с сигналами на более высоких частотах или при более высоких скоростях передачи данных, нельзя игнорировать время распространения сигнала по проводникам печатной платы между источником и приемником, по сравнению с периодом времени, составляющим одну четверть длины волны или самым быстрым временем нарастания/падения импульса. Поэтому анализ поведения таких высокоскоростных сигналов в соединениях печатной платы с использованием обычных методов сетевого анализа невозможен. Соединения необходимо рассматривать как линии передачи и анализировать их соответствующим образом.

2. Скорость сигнала и задержка распространения в линии передачи

На высоких частотах линии передачи должны иметь контролируемое сопротивление, чтобы предсказать поведение сигналов и избежать отражений сигнала, перекрестных помех, электромагнитных помех и т.д., которые могут ухудшить качество сигнала и привести к ошибкам.

Именно по этой причине необходимо знать, при каких скоростях распространяются сигналы на линиях передачи и сколько времени для этого требуется. Мы приведем несколько уравнений для расчета скорости сигнала и задержки распространения для полосковых и микрополосковых линий.

2.1 Скорость сигнала

Вначале рассмотрим скорости, при которых линии передачи распространяются на печатной плате.

Электромагнитные сигналы перемещаются в вакууме или в воздухе со скоростью, равной скорости света:

$$V_c = 3 \times 10^8 \text{ М/с} = 186,000 \text{ in/sec} = 11,8 \text{ in/ns}$$

Сигнал движется по линии передачи печатной платы на более низкой скорости, на которую влияет диэлектрическая постоянная (Er) материала печатной платы – ниже приведены соотношения для расчета скорости сигнала на печатной плате:

$$\text{Скорость сигнала в полосковой линии: } V_{p(inner)} \approx \frac{V_c}{\sqrt{Er}} \approx \frac{11.8 \text{ in/ns}}{\sqrt{Er}} \quad (1a)$$

$$\text{Скорость сигнала в микрополосковой линии: } V_{p(outer)} \approx \frac{V_c}{\sqrt{Er_{eff}}} \approx \frac{11.8 \text{ in/ns}}{\sqrt{Er_{eff}}} \quad (1b)$$

Где:

V_c – это скорость света в вакууме или в воздухе.

Er – диэлектрическая постоянная материала печатной платы.

Er_{eff} – является эффективной диэлектрической постоянной для микрополосковых линий; ее значение лежит между 1 и Er , и приблизительно задается уравнением:

$$Er_{eff} \approx (0.64 Er + 0.36) \quad (1c)$$

Таким образом, скорости сигналов на печатной плате меньше, чем в воздухе. Если $Er \approx 4$ (как для типовых материалов F4), то скорость сигнала на полосковой линии вдвое меньше, чем в воздухе, т.е. около 6 in/ns.

В дальнейшем мы можем использовать V_p для обозначения скорости сигналов на печатной плате.

2.2 Задержка распространения сигнала (t_{pd})

Задержка распространения – это время, которое требуется сигналу для распространения на единицу длины линии передачи:

$$t_{pd} = \frac{1}{V} \quad (2a)$$

Где:

V – это скорость сигнала в линии передачи.

В вакууме или в воздухе она равна 85 ps/in.

Задержка распространения на линиях передачи печатной плате следующая:

$$t_{pd} \approx 85\sqrt{Er} \text{ ps/in} \text{ в полосковых линиях (2b)}$$

$$t_{pd} \approx 85\sqrt{Er_{eff}} \text{ ps/in} \text{ в микрополосковых линиях (2c)}$$

Скорости сигнала и задержки распространения для некоторых материалов печатной платы приведены в таблице ниже:

Материал	Er	Er_{eff}	V	t_{pd}	
				V полосковая линия	микрополосковая линия
Вакуум или воздух	1	1	11.8 in/ns	11.8 in/ns	85 ps/in
Isola 370HR	4.0	2.92	6.90 in/ns	5.9 in/ns	145 ps/in
Isola I-SPEED	3.64	2.69	7.20 in/ns	6.18 in/ns	139 ps/in
Isola I- META	3.45	2.57	7.36 in/ns	6.35 in/ns	136 ps/in
Isola Astra MT77 или Tachyon 100G или	3.0	2.28	7.8 in/ns	6.8 in/ns	128 ps/in
					147 ps/in

Rogers 3003						
Rogers 4000 series	3.55-3.66	2.63-2.7	~7.20 in/ns	~ 6.20 in/ns	~139 ps/in	~161 ps/in

3. “Критическая” длина, контролируемый импеданс, время нарастания/падения сигнала в линиях передач

Когда длину соединения следует рассматривать как линию передачи с контролируемым импедансом? Для высокоскоростных или высокочастотных сигналов необходимо учитывать влияние линии передачи. Мы можем использовать несколько эмпирических правил (или правило большого пальца).

В случае высокочастотных аналоговых сигналов пусть максимальное содержание частоты в сигнале будет равно f_m Гц.

Период времени 1 длины волны: $t_\lambda = \frac{1}{f_m}$ (3a)

Длина волны: $\lambda = \frac{V}{f_m} = \frac{t_\lambda}{t_{pd}} = \frac{1}{t_{pd} f_m}$ (3b)

3.1 “Критическая” длина l_c

Для аналоговых сигналов критическая длина l_c определяется как одна четверть длины волны самой высокой частоты сигнала.

Критическая длина: $l_c = \frac{\lambda_m}{4} = \frac{1}{4 t_{pd} f_m}$ (4a)

В случае цифровых сигналов важнейшим параметром является наиболее быстрое время нарастания/падения импульса сигнала, так как оно определяет время перехода с одного логического уровня на другой – главным образом, время перехода бита данных. Для цифровых сигналов критическая длина l_c определяется как как длина линии, время распространения сигнала по которой составляет половину самого короткого времени нарастания/падения импульса сигнала.

Если t_r = кратчайшее время нарастания/падения цифрового сигнала, то время распространения сигнала на длину l_c это $t_{pd} l_c = \frac{t_r}{2}$ (по определению l_c).

$$\text{Критическая длина: } l_c = \frac{t_r}{2t_{pd}} = \frac{t_r V}{2} \quad (4b)$$

Это определение (уравнение) подразумевает, что сигнал должен иметь возможность перемещаться от источника по длине l_c линии, а затем возвращаться по той же длине l_c линии обратно в исходную точку за общее время, равное времени нарастания/падения сигнала t_r .

Уравнения 4a и 4b, приведенные выше, взаимосвязаны, если рассматривать наибольшую частоту во времени нарастания/падения цифрового сигнала.

Самое высокое содержание частоты в цифровом сигнале во времени нарастания/падения времени t_r дается ниже (согласно анализу Фурье):

$$f_m = \frac{0.5}{t_r} \quad (5a)$$

$$\text{Следовательно, длина волны 1 цикла } f_m: \lambda_m = \frac{1}{f_m t_{pd}} = \frac{1}{0.5 t_{pd}} \quad (5b)$$

Таким образом, критическая длина волны:

$$l_c = \frac{t_r}{2t_{pd}} = \frac{10.5\lambda_m}{2} = \frac{\lambda_m}{4} = \frac{1}{4t_{pd}f_m} \quad (5c)$$

Что совпадает с уравнением 4a, приведенным выше.

3.2 «Короткая» линия

Если длина линии $l < \frac{l_c}{1.5} \equiv \frac{\lambda_m}{6}$, то она является «короткой» линией. В таком случае нет необходимости рассматривать ее влияние на линию передач, а также проектировать ее как линию с контролируемым импедансом.

Но если длина линии $> \frac{l_c}{1.5} \equiv \frac{\lambda_m}{6}$, в этом случае необходимо учитывать эффекты линии передачи и проектировать их, как линии с контролируемым импедансом.

Пример:

Если самое короткое время нарастания/падения сигнала составляет $t_r = 1 \text{ ns}$, предполагаем, что диэлектрическая постоянная $\epsilon_r = 4$, $V_p = \frac{1}{t_{pd}} \approx 6 \text{ in/ns}$, а критическая длина $l_c = \frac{t_r V_p}{2} = 3 \text{ in}$. Таким образом, сигнальные дорожки

длиннее чем $\frac{3}{1.5} = 2 \text{ in}$ необходимо проектировать как линии с контролируемым импедансом. Обратите внимание, что время t_r 1 ns соответствует максимальной частоте сигнала: = 500 МГц.

3.3 Расчет времени нарастания/падения по скорости передачи данных (DTR) или тактовой частоте.

Скорость передачи данных измеряется в битах в секунду (бит/с), а тактовая частота (F_{clock}) в Гц.

Скорость передачи данных (DTR) обычно $\geq 2F_{clock}$. В дальнейшем будет безопасно использовать следующее правило:

$$DTR = 2F_{clock} \quad (6a)$$

Если время нарастания/падения сигнала нам неизвестно, мы можем применить следующее правило:

Время нарастания/падения сигнала:

$$t_r = 70\% \text{ периода } F_{clock} = 14\% \text{ от ширины одного бита}$$

т.е.:

$$t_r = \frac{0.07}{F_{clock}} = \frac{0.14}{DTR} \quad (6b)$$

Критическая длина: $l_c = \frac{t_r V}{2} = \frac{0.035V}{F_{clock}} = \frac{0.07V}{DTR} \quad (6c)$

Или: $l_c = \frac{t_r}{2t_{pd}} = \frac{0.035}{t_{pd}F_{clock}} = \frac{0.07}{t_{pd}F_{clock}} \quad (6d)$

Пример:

Для $F_{clock} = 1 \text{ ГГц}$ или $DTR = 2 \text{ Гбит/с}$, а для материала печатной платы $\epsilon_r = 4$, получаем:

$$t_r = \frac{0.07}{1 \text{ ГГц}} = 0.07 \text{ ns} = 70 \text{ ps}$$

И $l_c = 0.07 \text{ ns} \times \frac{0.07 \text{ ns} \times 6 \text{ in/ns}}{2} = 0.21 \text{ inches}$

3.4 Пропускная способность 3 дБ

Для времени t_r нарастания/падения сигнала пропускная способность 3 дБ задается следующим правилом:

$$BW_{3dB} = \frac{0.35}{t_r} \quad (7a)$$

Таким образом, для тактовой частоты F_{clock} мы получаем:

$$BW_{3dB} = \frac{0.35}{0.07} F_{clock} = 5F_{clock} \quad (7b)$$

Или
$$BW_{3dB} = \frac{0.35}{0/14} DTR = 2.5 DTR \quad (7c)$$

4. Анализ линии передачи печатной платы

Как правило, высокоскоростные или высокочастотные сигналы генерируют электромагнитные поля вокруг них во время их перемещения по линии передачи, и их поведение лучше всего анализировать с помощью электромагнитных уравнений Максвелла и теории распространения электромагнитных волн. В этом методе мы сталкиваемся с электрическими и магнитными полями, а не с привычным напряжением и током. Напряжение между сигнальной линией и возвратным путем создает электрическое поле и ток в проводниках, что, в свою очередь, создает магнитное поле вокруг них. Таким образом, напряжение, ток, а также электрическое и магнитное поля движутся как волны вдоль линии передачи.

Существует тесная аналогия между распространением электромагнитных волн и распространением напряжений и токов по линии передачи. Поскольку легче представить себе привычные напряжение и ток, чем электрические и магнитные поля, то анализ напряжения/тока линии передачи следует использовать в следующей трактовке.

Линия передач представляет собой большое количество сегментов бесконечно малой длины, и каждый сегмент может быть проанализирован с использованием метода сетевого анализа в определенной точке пространства и времени, игнорируя время прохождения в бесконечно малом сегменте, так как его длина чрезвычайно мала.

В этом методе анализа мы будем рассматривать такие величины, как напряжение и ток, а также параметры линии, такие как сопротивление, индуктивность, емкость и проводимость. Мы будем моделировать бесконечно

малый сегмент линии передачи печатной платы с точки зрения следующих параметров линии передачи:

R = сопротивление линии передачи на единицу длины (**R** в Омах на единицу длины).

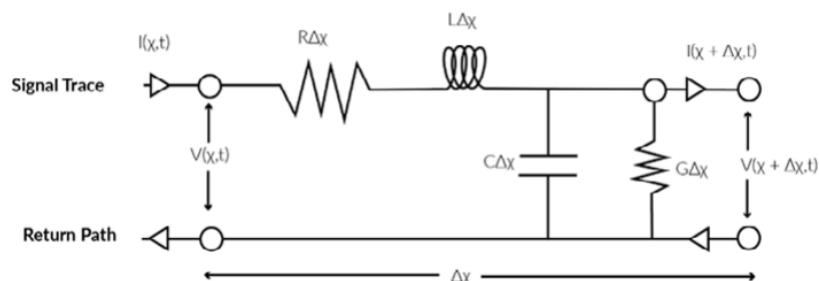
L = индуктивность линии передачи (**L** в Гн на единицу длины).

C = емкость линии передачи (**C** в Фарадах на единицу длины).

G = проводимость линии передачи (**G** в См на единицу длины).

Мы можем обозначить длину бесконечно малой линии передачи с помощью Δx .

Затем мы изобразим этот отрезок линии передач следующим образом:



Где:

$V(x,t)$ = напряжение сигнала в точке x в момент времени t

$I(x,t)$ = ток сигнала в точке x в момент времени t

Проведем анализ этой схемы в частотной области. Здесь мы предполагаем, что сигналы изменяются во времени синусоидально с угловой частотой ω , так что варьирующаяся во времени часть $V(x,t)$ и $I(x,t)$ может быть показана с коэффициентом $e^{j\omega t}$ соответственно, теперь мы имеем:

$$V(x, t) = V(x)e^{j\omega t} \quad (8a)$$

И
$$I(x, t) = I(x)e^{j\omega t} \quad (8b)$$

Используя законы Кирхгофа по вышеуказанному сегменту, мы получаем следующие связи (отношения):

$$\frac{dV(x)}{dx} = -(R + j\omega L) I(x) \quad (9a)$$

$$\text{И} \quad \frac{dI(x)}{dx} = -(G + j\omega C)V(x) \quad (9b)$$

Из этих уравнений, путем дифференциации, мы получаем:

$$V(x) = V(0)e^{-\alpha x} \quad (11a)$$

$$\text{Из уравнения 9,} \quad I(x) = \frac{\alpha V(0)e^{-\alpha x}}{(R+j\omega L)} = \sqrt{\frac{G+j\omega C}{R+j\omega L}} V(x) \quad (11b)$$

$$\text{Где:} \quad \alpha = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \alpha + j\beta \quad (11c)$$

α принимает значение на единицу длины.

Если мы умножим уравнение 11a на $e^{j\omega t}$, чтобы заново ввести изменения времени синусоидальных напряжений (временные изменения) и тока, то увидим, что теперь эти уравнения представляют собой волны сигнала напряжения и тока, идущие в положительном x направлении по линии передачи:

$$V(x) = V(0)e^{-\alpha} e^{j(\omega t - \beta x)} \quad (11d)$$

4.1 Характеристическое сопротивление однородной линии передачи

Из приведенного выше уравнения 11 мы получим следующее соотношение между $V(x)$ и $I(x)$:

$$Z(x) = \frac{V(x)}{I(x)} = \sqrt{\frac{R+j\omega L}{G+j\omega C}} \quad (12a)$$

Оно определяется как импеданс линии передачи в точке x . Единицами Z являются Ом.

Параметры R , L , G и C зависят от геометрии (формы, ширины и т.д.) соответствующих проводников печатной платы, образующих линию передачи, а также от свойств проводников и диэлектрических материалов, используемых в печатной плате.

Если предполагается, что материал и геометрические свойства одинаковы по всей длине линии передачи, а материалы печатной платы являются однородными, то R , L , G и C будут иметь одно и то же значение в каждой точке вдоль длины линии передачи.

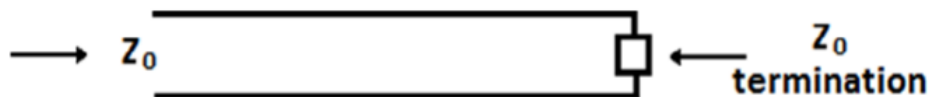
Это означает, что вышеуказанное сопротивление имеет одинаковое значение для всех значений x вдоль линии передачи. Такой тип линии передачи называется однородной линией передачи и ее импеданс равен:

$$Z = \sqrt{\frac{R+j\omega L}{G+j\omega C}} \quad (12b)$$

Этот характеристический импеданс однородной линии передач и является ее важнейшим свойством с точки зрения целостности сигнала. В промышленном производстве печатных плат обычно волновой импеданс называется просто "импедансом" линии передачи.

Если в процессе производства печатной платы будет возможность контролировать геометрию линии передачи платы в рамках установленных допусков, мы сможем добиться значений импеданса линии передачи в каждой точке вдоль ее длины в пределах указанного допуска желаемого значения. Таким образом, линия передачи на печатной плате будет иметь контролируемый импеданс и называться линией передачи с контролируемым волновым сопротивлением.

Если мы посмотрим на бесконечную линию передачи с импедансом Z_0 в любой точке с левой стороны, то увидим импеданс равный Z_0 . Следовательно, если взять линию передачи конечной длины с импедансом Z_0 и прервать ее с правой стороны со значением импеданса Z_0 , затем посмотреть на линию передачи конечной длины слева, то она будет выглядеть как бесконечная линия передачи импеданса Z_0 с учетом импеданса:



4.2 Однородная линия передачи без потерь

Как показывает уравнение $Z = \sqrt{\frac{R+j\omega L}{G+j\omega C}}$, импеданс Z является функцией частоты сигнала ω .

С практической точки зрения, $R \ll L$ и $G \ll \omega C$ при интересующих нас сигнальных частотах. Если мы будем игнорировать R и G в этой формуле, то получим линию передачи без потерь.

Импеданс однородной линии передач без потерь задается:

$$Z_C = \sqrt{\frac{L}{C}} ; \quad (\text{так как } R = 0 \text{ и } G = 0) \quad (12c)$$

Сопrotивление линии передачи без потерь больше не является прямой функцией частоты, что означает, что оно имеет одинаковое значение $\sqrt{\frac{L}{C}}$ для всех частот. Обратите внимание, что для $\sqrt{\frac{L}{C}}$ единицами измерения является Ом.

В линии передачи без потерь ($R = 0$, $G = 0$),

$$\alpha = j\omega\sqrt{LC} \quad (13)$$

Приводятся напряжения и токи с учетом уравнения 11:

$$V(x, t) = V(0)e^{j\omega(t-\sqrt{LC}x)} \quad (14a)$$

$$I(x, t) = \frac{V(0)}{Z_C} e^{j\omega(t-\sqrt{LC}x)} \quad (14b)$$

Эти соотношения представляют собой волны напряжения и тока, движущиеся в положительном x направлении со скоростью $V = \frac{x}{t}$ и задержкой распространения t_{pd} на заданную длину единицы измерения:

4.3 Вычисление L и C , при известных Z_C и t_{pd}

Параметры V и t_{pd} зависят от диэлектрической проницаемости материала печатной платы. Эти параметры могут быть рассчитаны отдельно, как мы описывали выше в разделе о скорости сигнала и задержке распространения в линии передачи. Поэтому, если нам известны t_{pd} и Z_C , то из соотношений Уравнения 12 и Уравнения 15 можно вычислить значения L и C на единицу длины следующим образом:

$$C = \frac{t_{pd}}{Z_C} \frac{\Phi}{\text{единицу длины}} \quad (16a)$$

$$\text{И } L = t_{pd} Z_C \frac{\Gamma_H}{\text{единицу длины}} \quad (16b)$$

Пример:

Для микрополосковой линии передачи на материале FR4, обладающим $\epsilon_r = 4$, при $Z_C = 50$ Ом и $t_{pd} = 145$ psec/inch, мы имеем:

$$C = \frac{145}{50} = 2.9 \frac{pF}{inch}$$

$$\text{И } L = 145 \times 50 = 7250 \frac{pH}{inch} = 7.25 \frac{nH}{inch}$$

5. Выводы

Линия передачи состоит, как минимум, из двух проводников. Один предназначен для сигнала, а другой для возвратного пути сигналов.

При высокоскоростных или высокочастотных сигналах мы не можем игнорировать эффекты линии передачи. На линии передачи, меняющиеся во времени электрические сигналы - напряжения и токи, распространяются в виде волн, сопровождающихся аналогичным распространением их электрических и магнитных полей.

Для однородной линии передачи мы исследовали два ее важнейших параметра – волновое сопротивление и задержку распространения / скорость сигнала.

Принимая во внимание время нарастания/спада цифровых сигналов, тактовую частоту/скорость передачи данных или максимальную частоту аналогового сигнала, а также диэлектрическую проницаемость материала (или среды), в которой проходит линия передачи, мы определили понятие, называемое “критической” длиной l_c , которое явно помогает нам в реальной ситуации спроектировать линии передачи на печатной плате с контролируемым импедансом.