

Анализ и расчет линий задержки в печатных платах цифровых устройств

В статье анализируются зигзагообразные линии задержки типа меандра, широко применяемые в печатных платах высокоскоростных цифровых устройств. Разработана методика расчета параметров линий в зависимости от фронта входного сигнала, допустимого искажения сигнала, стека платы, что позволяет спроектировать линию задержки с минимальной площадью, контролировать задержку и искажение сигнала. Полученная методика расчета помогает «вручную» рассчитать параметры линии задержки, а также создать программный калькулятор для инженерного расчета.

Виктор Гахария

vkg0101@yandex.ru

Людмила Гахария

lgg2806@gmail.com

Введение

В печатных платах (PCB) для высокоскоростных цифровых устройств используются линии задержки, предназначенные для синхронизации сигналов. Наиболее популярным решением для линий задержки является включение в линию связи зигзагообразного участка, называемого серпантин (меандром). Цикличность таких структур позволяет достаточно просто добиваться необходимой задержки сигналов.

При проектировании серпантина для увеличения помехозащищенности применяют шаблонные решения, например, расстояние между секциями серпантина проектируется в 3–4 раза больше ширины сигнальной линии, что приводит к неэффективному использованию площади печатной платы. В современной тенденции, предусматривающей увеличение плотности монтажа и уменьшение размеров печатных плат, решение проблем, связанных с сокращением площади, занимаемой линией задержки, очень важно.

Уплотнение зигзагообразных линий, количество изгибов и их размер влияют на задержку и качество передаваемого сигнала. Проверку и тонкую настройку

линии задержки можно выполнить с помощью систем моделирования электромагнитных полей: квазистатического или полноволнового 3D-моделирования. Наиболее точными и полными являются последние системы — они требуют больших вычислительных ресурсов, правильного понимания результатов для исследуемых цепей и достаточно дорогостоящи.

Для того чтобы использовать системы моделирования, нужно в качестве входных данных иметь геометрические параметры исследуемой линии задержки. Отход от шаблонов приводит к необходимости предварительного инженерного расчета такой линии.

В данной работе предлагается инженерный метод расчета линии задержки для печатных плат в форме зигзагообразной линии — серпантина (меандра).

Анализ и методика расчета выполняются исходя из следующих условий и требований к линии задержки:

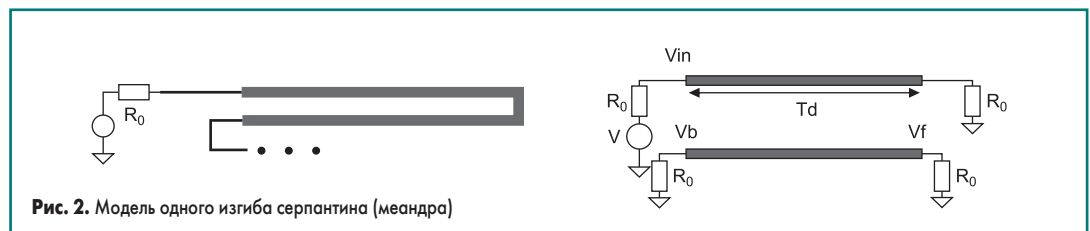
- входной сигнал — перепад напряжений (ступенька, трапеция) с временем нарастания фронта T_r ;
- минимальная площадь серпантина при заданном стеке платы;
- требуемое время задержки и допустимое искажение сигнала.

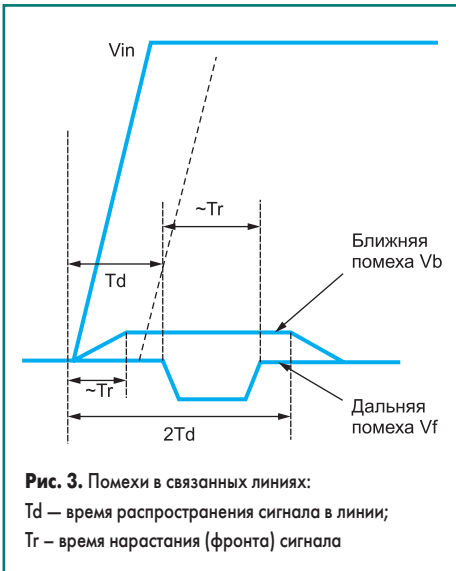
Помехи в связанных линиях передачи

При прохождении сигнала по зигзагообразным линиям задержки (рис. 1) между секциями линии (1–7) возникают перекрестные помехи.

Изгиб в серпантине можно рассматривать как две связанные линии, имеющие идеальное согласование на концах (рис. 2), когда характеристический импеданс сегмента равен нагрузке на обоих концах, то есть $Z_0 = R_0$.

При возбуждении активной линии (агрессора) входным сигналом V_{in} в связанной пассивной





линии (жертве) возникают наведенные помехи за счет емкостной и индуктивной связи линий (рис. 3).

Различают помехи на ближнем конце пассивной линии — V_b и на дальнем конце — V_f .

Выражения для вычисления коэффициента ближних помех K_b получены в работе Феллера [1]:

$$K_b = (1/4tpd)(Lm/Zo + Cm/Zo),$$

или, подставив выражения для $Zo = \sqrt{Lo/Co}$ и $tpd = \sqrt{Lo \times Co}$:

$$K_b = 1/4(Lm/Lo + Cm/Co) = 1/4(Kl + Kc),$$

где tpd — постоянная задержки распространения; Cm — погонная взаимная емкость; Co — собственная погонная емкость; Lm — погонная взаимная индуктивность; Lo — собственная погонная индуктивность; Zo — характеристический импеданс линии; Kl — индуктивный коэффициент связи; Kc — емкостной коэффициент связи.

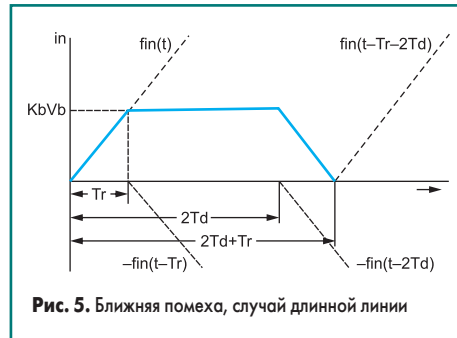
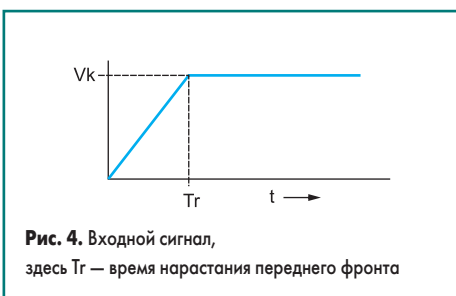
Коэффициент ближней помехи K_b определяет отношение амплитуды ближней помехи к величине сигнала на активной линии $K_b = V_b/V_{in}$, а форма помехи зависит от фронта входного сигнала.

Рассмотрим помеху для входного сигнала $V_{in}(t)$ — перепада напряжений (ступеньки) на рис. 4.

Введем функцию:

$$fin(t) = Vk/Tr(t),$$

где V_k — максимальное значение входного сигнала.



Тогда напряжение V_{in} входного сигнала будет:

$$V_{in}(t) = fin(t) - fin(t - Tr). \quad (1)$$

Напряжение ближней помехи V_b для ступенчатого сигнала (рис. 5) будет:

$$V_b(t) = K_b[V_{in}(t) - V_{in}(t - 2Td)], \quad (2)$$

где T_d — время распространения сигнала в линии длиной l , определяемое выражением:

$$T_d = tpd \times l,$$

где tpd — время задержки, зависящее от относительной диэлектрической проницаемости ϵ_r диэлектрика в стеке платы.

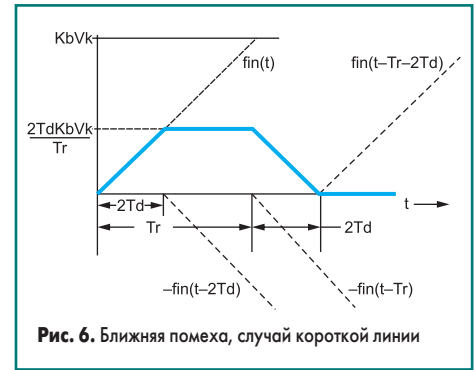
Подставив (1) в (2), получим выражение для ближней помехи по заданному входному сигналу:

$$V_b(t) = K_b[fin(t) - fin(t - Tr) - fin(t - 2Td) + fin(t - Tr - 2Td)]. \quad (3)$$

Если длина взаимосвязанной области больше критической длины (случай длинной линии), на линии-жертве ближняя помеха по величине достигает максимума (рис. 5).

Максимальная величина ближней помехи в этом случае не зависит от длины взаимодействия и равна:

$$V_{bmax} = K_b \times V_{in}.$$



Критерием для критической длины линии является отношение:

$$l_{cr} = Tr/2Td.$$

В случае короткой линии выражение для напряжения ближней помехи остается таким же (3), но максимум амплитуды зависит от времени нарастания переднего (заднего) фронта входного сигнала и длины взаимодействия линий (рис. 6):

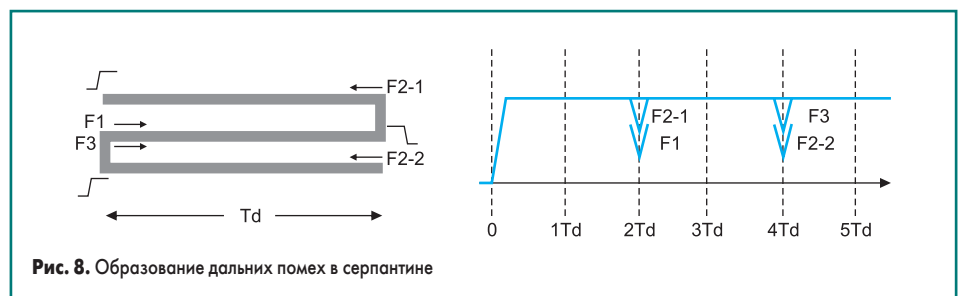
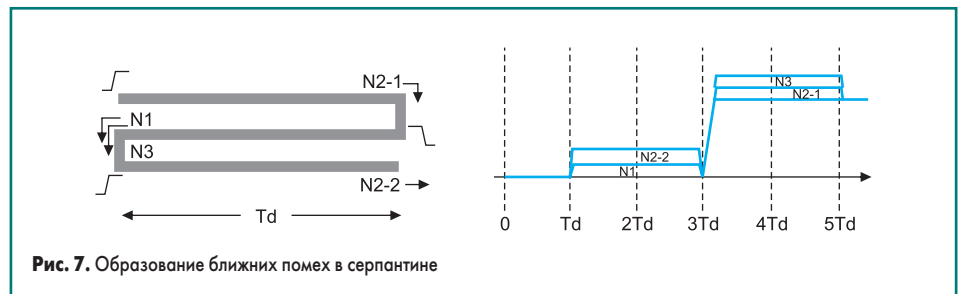
$$V_{bmax} = V_k \times K_b \times (2Td/Tr). \quad (4)$$

Если фронт сигнала не меняется, то амплитуда помехи для короткой линии прямо пропорциональна длине линии.

Помехи в серпантине

На рис. 7 и 8 приведена схема образования помех на примере серпантина, состоящего из трех секций.

Когда ступенчатый сигнал появляется на входе первой секции, фронт сигнала индуцирует опережающую ближнюю помеху N_1 на левом конце второй секции (рис. 7). Эта помеха-предвестник появится на выходе серпантина раньше выходного сигнала на время T_d и имеет протяженность $2Td$. При появлении сигнала на правом конце второй секции индуцируется опережающая помеха N_2-2 , которая складывается с помехой N_1 , и помеха-отзвук N_2-1 появится на выходе вместе



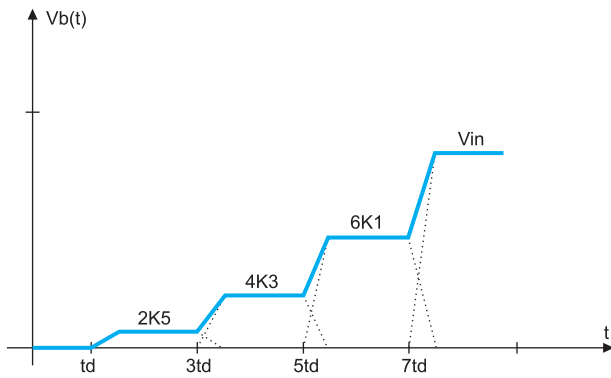


Рис. 9. Форма помех-предвестников в точке В для ступенчатого входного сигнала

с сигналом и имеет протяженность $2Td$. При появлении сигнала на третьей секции индуцируется помеха-отзвук $N3$, которая складывается с помехой $N2-1$.

Аналогичным образом индуцируются дальние помехи (рис. 8).

В серпантине ближняя помеха распространяется вдоль серпантина к выходу.

Дальняя помеха распространяется к источнику входного сигнала.

Если считать согласование серпантина на входе и выходе идеальным (то есть отсутствуют отражения от источника входного сигнала), то дальнюю помеху в расчете серпантина можно не учитывать — она поглощается согласующим сопротивлением на входе серпантина (точка А на рис. 1).

Таким образом, в серпантине, содержащем три секции, выходной сигнал будет содержать лидирующую суммарную помеху-предвестник амплитудой $Vb \times 2$ и сумму сигнала и помехи-отзвука $Vb \times 2$.

Ближние помехи возникают не только от соседних секций серпантина, но и от секций, расположенных дальше, и имеют форму ступенек, предшествующих основному сигналу из лидирующих помех (рис. 9) и помех, следующих за фронтом сигнала [2].

Графическая форма выходного сигнала для серпантина (рис. 1) с учетом ближних помех-предвестников приведена на рис. 9. Помехи-отзвуки имеют такие же «ступеньки», но в обратном порядке и накладываются на выходной сигнал в момент его прихода в точку В (рис. 1).

Для линии, содержащей $2N+1$ ($2N$) секций, число ступенек равно числу изломов N серпантина, длительность каждой ступени равна $2Td$ (рис. 9).

Уровень ступенек-помех определяется формулой [3]:

$$Vbi = 2i \times Kb(p) \times Vin; \quad (5)$$

$$p = (2(N-i)+1) \text{ для } i \text{ от } 1 \text{ до } N, \quad (6)$$

где $Kb(p)$ — коэффициент обратной перекрестной помехи между секциями серпантина, расположенными на расстоянии $p \times s$, где s — расстояние между смежными секциями.

Форма, величина, длительность ближней помехи влияют на качество выходного сигнала в серпантине.

Уравнения выходного сигнала серпантина

Когда сигнал распространяется вдоль серпантина, на выходе он появляется раньше ожидаемого времени прихода [6]. Это происходит вследствие суммирования помех и входного сигнала.

На рис. 10 сумма фронтов помехи-предвестника (b), помехи-отзвука (c) и входного сигнала (d) дает результирующий выходной сигнал (a), который появляется на выходе с опережением (t).

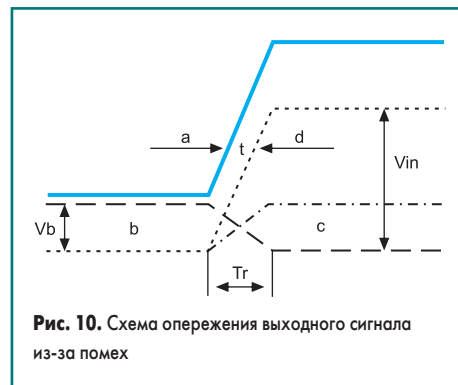


Рис. 10. Схема опережения выходного сигнала из-за помех

При исследовании линий задержек показано, что, если в серпантине секции являются электрически длинными линиями, фронт выходного сигнала сильно разрушен [5]. Линия задержки с секциями небольшой длины «улучшает» фронт выходного сигнала — он становится более крутым, что может компенсировать «завал» фронта сигнала вследствие резистивных и диэлектрических потерь в линии связи. По этим причинам длину секции следует выбирать меньше lcr (critical) [5].

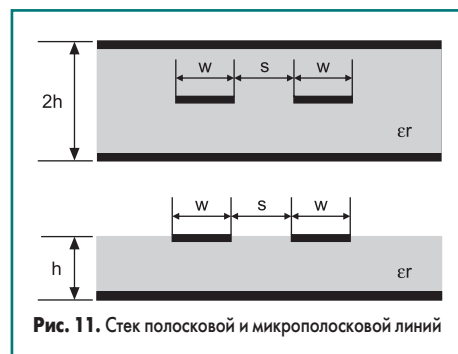


Рис. 11. Стек полосковой и микрополосковой линий

Рассмотрим подробнее, как складываются «короткие» помехи с основным сигналом на выходе серпантина. На рис. 11 приведен стек полосковой и микрополосковой печатных линий связи. Здесь h — толщина диэлектрика, w — ширина печатного проводника, s — расстояние между проводниками.

Когда стек печатной платы выбран, варьировать можно только расстояние между секциями. Реальное соотношение амплитуд помеховых «ступенек» отличается от изображенного на рис. 9. Максимальная энергия — 95% — сосредотачивается в «ступеньках» с коэффициентом $K1$, а включение «ступенек» с коэффициентом $K3$ позволяет практически учесть все 100% помехового шума в зигзагообразных линиях задержки [6].

Такое распределение энергии помех связано с двумя основными причинами:

- помеховый шум между секциями обратно пропорционален квадрату расстояния между ними [12];
- количество суммируемых помех в каждой «ступеньке» тем меньше, чем меньше ее коэффициент связи (то есть меньше i).

По указанной выше причине при получении уравнения выходного сигнала серпантина не будем учитывать помехи от несмежных секций. Их можно принимать во внимание тогда, когда между сегментами существует сильная взаимосвязь, например, если расстояние между секциями равно или меньше ширины линии связи.

На рис. 12 показана суперпозиция ближних помеховых ступенек и входного сигнала в случае, когда секции серпантина составляют короткие линии:

$$2td < Tr.$$

На временной оси точка 0 соответствует моменту появления на выходе серпантина

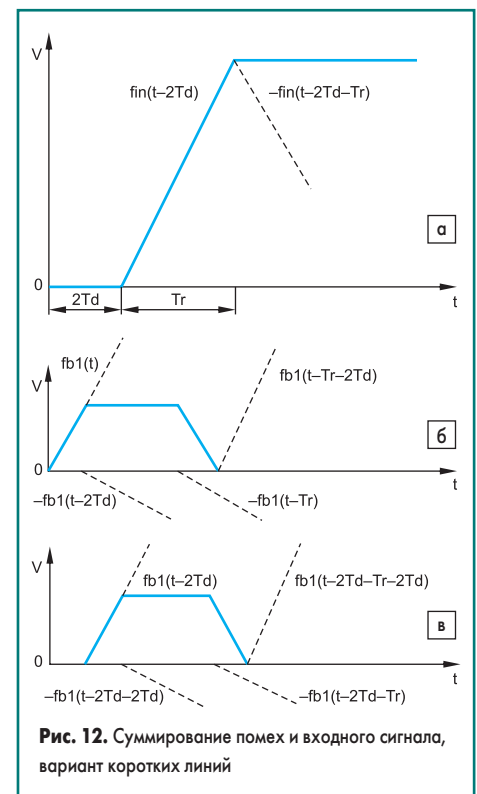


Рис. 12. Суммирование помех и входного сигнала, вариант коротких линий

суммарной соседней помехи-предвестника $V1pr$ (рис. 12б), через $2Td$ появляется основной сигнал Vin (рис. 12а) и суммарная помеха-отзвук Vpo (рис. 12в). Длительность каждой помехи равна Tr , поскольку сегменты — короткие линии.

Результирующий сигнал будет равен:

$$Vout = V1pr + V1po + Vin, \quad (7)$$

где

$$Vin = fin(t-2Td) - fin(t-2Td-Tr);$$

$$V1pr = fb1(t) - fb1(t-2Td) - fb1(t-Tr) + fb1(t-2Td-Tr);$$

$$V1po = fb1(t-2Td) - fb1(t-2Td-2Td) - fb1(t-2Td-Tr) + fb1(t-2Td-Tr-2Td).$$

Эти уравнения можно дополнить помеховой «ступенькой» для $Kb3$, сместив точку отсчета влево по оси времени еще на $2Td$:

$$Vout = V3pr + V3po + V1pr + V1po + Vin. \quad (8)$$

Учет остальных ступенек не влияет на результат из-за очень маленьких коэффициентов связи.

Когда форма входного сигнала — перепад напряжений или трапеция (передний фронт), то fin , $fb1$ можно заменить соответствующими коэффициентами наклона прямых: $fin = Kin = Vinmax/Tr$ — для входного сигнала; $fb1 = K1$.

Определим коэффициент суммарной помехи ближней, соседней «ступеньки» $K1$.

Если серпантин содержит N изгибов, то ближняя ступенька — это ступенька с номером N . Для этой ступеньки $p = 1$ (из уравнения 6), коэффициент обратной перекрестной помехи — $Kb1$. Коэффициент суммарной помехи, образующей ближнюю ступеньку (из уравнения 5), равен $2N \times Kb1$. В уравнении (3) для функции ближней помехи коэффициент при каждом члене уравнения равен $Kb \times fin$. Подставив соответствующие замены, получим выражение для $K1$:

$$K1 = 2N \times Kb1 \times Kin.$$

Для ступеньки с номером $N-1$ получим коэффициент $K3$, равный:

$$K3 = 2(N-1) \times Kb3 \times Kin.$$

Подставив коэффициенты Kin , $K1$ в выражение (7), получим уравнения для случая входного сигнала типа ступеньки (передний фронт трапеции):

$$Vin = Kin(t-2Td) - Kin(t-2Td-Tr); \quad (9)$$

$$V1pr = K1(t) - K1(t-2Td) - K1(t-Tr) + K1(t-2Td-Tr); \quad (10)$$

$$V1po = K1(t-2Td) - K1(t-2 \times 2Td) - K1(t-2Td-Tr) + K1(t-2 \times 2Td-Tr). \quad (11)$$

Члены уравнений с множителем $(t-x)$ равны нулю, если $t < x$.

Аналогичным образом можно получить уравнения для выражения (8) с коэффициентами $K1$ и $K3$.

Определение расстояния s и коэффициента связи между соседними секциями

При проектировании линий задержки, когда стек платы определен и изменять можно только расстояние между секциями линии, для выбора s используют либо шаблонные решения, например $s = 4 \times w$ или $s = 5 \times h$, либо предыдущий опыт собственного проектирования, либо опыт других компаний.

Рассмотрим возможность вычисления расстояния между секциями по заданному стеку, фронту входного сигнала и допустимому искажению выходного сигнала. Чтобы вычислить s , необходимо еще знать требуемый коэффициент связи $Kb1$.

Как было показано выше, секции серпантина следует проектировать короткими линиями. В этом случае можно отметить следующие зависимости.

Пусть требуемой задержке Δt соответствует прямая линия длиной L . Будем ссылаться на эту длину как на эталонную. Разделив эталонную длину L на критическую длину секции lcr , получим число секций серпантина, соответствующих критической длине секции — $Nscr$:

$$Nscr = L/lcr.$$

Критическое число изгибов равно неполному частному от деления:

$$Ncr = Nscr/2.$$

Ортогональные элементы серпантина пока не учитываем, считая, что их длина значительно меньше длины секции. Максимальная помеха с коэффициентом связи $Kb1$ (максимальная «ступенька») возникает от смежных секций, остальные помехи ($Kb3$, $Kb5$ и т. д.) намного меньше и дальше расположены от фронта сигнала. Суммарная помеха-отзвук с коэффициентом $Kb1$ определяет превышение амплитуды Vb выходного сигнала по отношению ко входному (рис. 10).

Уровень суммарной соседней помехи-отзвука для Ncr изгибов серпантина будет равен:

$$Vb = Vb1 = Vin \times (2 \times Ncr) \times Kb1.$$

Если фронт входного сигнала не меняется, то при уменьшении длины секции пропорционально уменьшается уровень помехи между секциями (4), но во столько же раз увеличивается число секций серпантина, соответствующего «эталонной» длине L . При сокращении длины секции в x раз уровень суммарной помехи будет:

$$Vb1 = Vin \times (2 \times Ncr \times x) \times (Kb1/x).$$

Таким образом, коэффициент превышения амплитуды выходного сигнала Kb за счет помех в серпантине будет равен:

$$Kb = 2 \times Ncr \times Kb1. \quad (12)$$

С целью упрощения дальнейшего анализа будем рассматривать линии без потерь.

Исследования, проведенные в [7], показали, что при моделировании линий задержки без потерь и с потерями разница в результатах составляет около 2%.

Суммарная ближняя помеха-отзвук, приходящая вместе с фронтом сигнала, вызывает выброс амплитуды сигнала Vb , что может повлиять на работу нагрузочных логических схем. Величина выброса должна быть ограничена помехоустойчивостью нагрузочных схем, например 15% от амплитуды входного сигнала.

Этот допуск определяет значение Kb для проектируемого серпантина:

$$Kb = Vb/Vin.$$

Зная Kb и число критических секций, для заданного времени задержки определим величину коэффициента связи между соседними секциями:

$$Kb1 = Kb/Ncr. \quad (13)$$

По значению $Kb1$ и заданному стеку платы можно определить соответствующее расстояние s между секциями серпантина.

Аналитические выражения для определения расстояния s

Нижеприведенные выражения для вычисления расстояния s между секциями серпантина взяты из стандартов IPC 2251 [8]. В работе [6] был проведен анализ формул для вычисления коэффициентов связи из этого стандарта и результатов моделирования помех в больших коммерческих системах моделирования. Точность формул составляет 10%. Такая же точность получена авторами статьи при сравнении данных формул с результатами HyperLinx LineSim от Mentor Graphics.

Для полосковой линии расстояние между секциями вычисляется по формуле:

$$s = -([\ln(Kc/0,55) \times h + B1 \times w]/A1).$$

Для микрополосковой линии значение s находится численной минимизацией функции $F(s)$:

$$Kb1 = 1/4(KL + Kc); \\ F(s) = KL + Kc - 4Kb1;$$

где

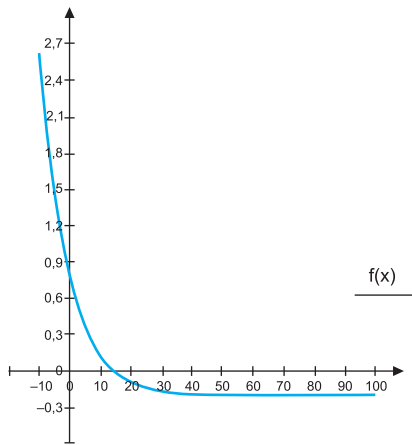
$$KL = 0,55e^{-(A2(s/h) + B2(w/h))}; \\ Kc = 0,55e^{-(A1(s/h) + B1(w/h))}.$$

Вычислить значения s можно в одном из математических пакетов R, Matlab, Mathcad и других или написать соответствующую несложную программу.

На рис. 13 приведено решение уравнения в пакете Mathcad для микрополосковых линий со стеком:

$$Er = 3,9; h = 10 \text{ мил (mil — миллидойм)}; \\ w = 8 \text{ мил}; Kb1 = (K0) = 0,05.$$

$$f(s) = Kl(s) + Kc(s) - K0 \quad x = -10, -9,99...100$$



$$x0 = 20 \quad \text{root}(f(x0), x0) = 14,773$$

Рис. 13. Пример расчета *s* для микрополосковой линии в Mathcad

Вычисленное расстояние между секциями $s = 14,77$ мил.

Рассчитанное расстояние между секциями предопределяет минимальную площадь, которую будет занимать проектируемый серпантин.

Выбор длины секции

Существуют разные рекомендации для выбора длины секции серпантина. Есть работы, в которых рекомендуют выбирать длину секции из условия $ls < 15h$ и $ls < 1/3Tr$ [9].

Для серпантина с короткими секциями максимальную длину следует выбирать, учитывая также искажения входного сигнала при передаче его по серпантину. Поэтому она должна удовлетворять следующим условиям:

- $ls < lcr$ (улучшение фронта сигнала);
- длина секции должна соответствовать полосе пропускания входного сигнала.

Линия передачи уменьшает полосу пропускания сигнала, затягивая его фронт.

Для того чтобы снизить эти потери, изгиб меандра проверяется на stop-band (частота среза), которая должна быть не меньше максимальной частоты в спектре сигнала [6].

Максимальная частота определяется половиной пропускания входного сигнала:

$$BWin \text{ (Гц)} = 0,35/Tr \text{ (нс)}$$

Частота среза (stop-band) серпантина зависит от длины изгиба и равна [10]:

$$BWs = 3 \times 10^8 / ((2ls + s) / \sqrt{\epsilon r}),$$

где l и s в метрах, частота в герцах.

В [8] рекомендуется брать частоту среза с запасом, например:

$$BWs = 2 \times BWin.$$

Выполнение этих соотношений определяет максимальную длину секции серпантина.

Минимальную длину секции серпантина следует также ограничить. Слишком короткий сегмент приводит к увеличению суммарной помехи, и токи начинают протекать вне серпантина, значительно ускоряя появление сигнала.

На рис. 14 приведены данные программы, вычисляющей выходной сигнал серпантина по суперпозиции ближайшей суммарной помехи-предвестника, входного сигнала и суммарной помехи-отзвука.

При очень маленькой длине секции может наступить момент, когда сумма сигнала и помех будет больше запланированных $Vin + Vb$ (рис. 14б,г).

Когда длина секции равна или меньше половины lcr , сумма помех предвестника и отзвука удваивается по амплитуде и остается на этом уровне при дальнейшем уменьшении длины секции. В результате сложения фронта сигнала и удвоенного уровня помех, в некоторый момент их сумма начинает превышать $Vin + Vb$. Определим минимально допустимую $lmin$ длину секции, при которой помеха превышает запланированный уровень.

Для входного сигнала (1) сумма помех предвестников и отзвуков является трапецией, верхнее основание которой пересекает наклонную прямую, составляющую фронт сигнала (рис.14в,г). Максимальная сумма фронта сигнала и верхнего основания трапеции помех будет в точке начала спада помехи предвестника (правая боковая сторона трапеции). Эта точка соответствует моменту $t = Tr - 2Td$. Составим для этого момента уравнение, когда сумма входного сигнала и удвоенной помехи превысят уровень $Vin + Vb$.

$$\begin{aligned} (Vin/Tr) \times t + 2Vb &= Vin + Vb; \\ t &= ((Vin - Vb)/Vin) \times Tr; \\ t &= Tr - Tr \times Kb \text{ или } Tr - t = Tr \times Kb \\ \text{или } 2Tdmin &= Kb \times Tr = 2(tpd \times lmin). \end{aligned}$$

Зная $2Tdmin$, определим минимальную длину секции $lmin$:

$$\begin{aligned} 2(tpd \times lmin) &= Kb \times Tr; \\ lmin &= (Kb \times Tr) / 2tpd. \end{aligned}$$

При длине секции меньше, чем $lmin$, суммарная помеха значительно возрастает, а токи могут протекать вне сегментов серпантина [9]. Таким образом, длина секции серпантина ls должна быть в пределах:

$$lcr > ls > (Kb \times Tr) / 2tpd. \quad (14)$$

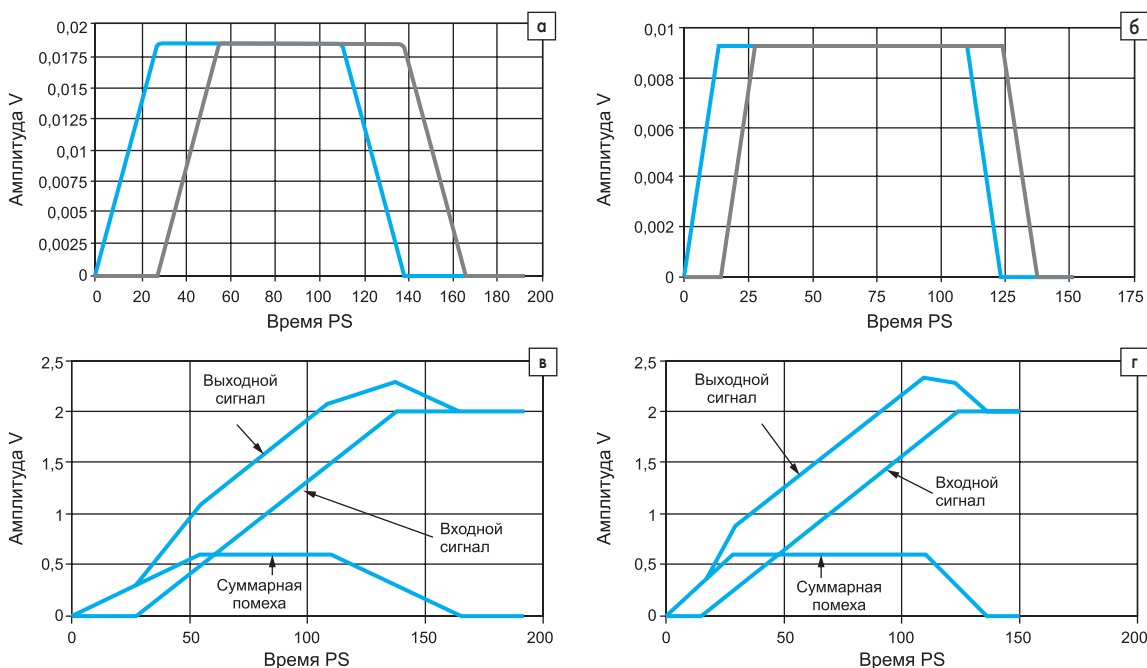


Рис. 14. Выходной сигнал серпантина с учетом только соседних помех: а, б); передняя и задняя помеха в конце первого изгиба; в, г) сигнал, сумма сигнала и помех, сумма помех на выходе меандра

Конкретную длину секции можно выбирать исходя из размеров площадки, предназначенной для размещения серпантина.

Расчет времени опережения выходного сигнала за счет помех

Обычно опережение определяется по уровню 0,5 входного сигнала.

Аналитически опережение выходного сигнала можно получить из уравнений (9–11) и рис. 12. Уровень 0,5 входного сигнала для точки отсчета 0 на рис. 12 соответствует времени:

$$t_{0.5} = 2Td + 0,5Tr \quad (15)$$

Суммарный выходной сигнал будет иметь амплитуду, равную 0,5 входного сигнала через некоторое время t . Определим это время из уравнений для выходного сигнала.

Если члены уравнений с множителем $(t-x)$ равны нулю и $t \leq x$, то в уравнение для вычисления выходного сигнала включим только те члены, которые находятся в диапазоне времени (15).

$$V_{out} = K1(t) + Kin(t-2Td) - K1(t-2Td) + K1(t-2Td) - K1(t-Tr) - K1(t-2 \times 2Td)$$

или

$$0,5 = K1(t) + Kin(t-2Td) - K1(t-Tr) - K1(t-2 \times 2Td) \quad (16)$$

Коэффициент $K1$ вычисляем из (12) и (13):

$$K1 = 2 \times N \times Kin \times Kb1 = 2 \times Ncr \times Kin \times (Kb/Ncr)$$

В уравнении (16) оставляем слагаемое $K1(t-Tr)$, если $Tr < (2Td + 0,5Tr)$, и слагаемое:

$$K1(t-2 \times 2Td),$$

если

$$2 \times 2Td < (2Td + 0,5Tr)$$

Из результирующего уравнения вычисляем t , а затем время опережения Δt :

$$\Delta t = (2Td + 0,5Tr) - t$$

Для определения опережения на любом уровне лучше построить суммарную кривую, например с помощью несложной программы, и по ней определять опережение (рис. 14).

Окончательный расчет линии задержки

После определения s , длины ls секции и числа секций Ns , следует пересчитать общую длину серпантина Ls . Для Ns секций она будет равна:

$$Ls = Ns \times (ls + s)$$

Таблица. Сравнение времени опережения для серпантина

Исходные данные стека: полосковая линия, $eg = 4$, $w = 4$, $h = 1/2(h1+h2) = 1/2(8,6+3) = 5,8$ Конфигурация серпантина: число сегментов $Ns = 16$, число углов = 32^{**} Входной сигнал – ступенька с $Tr = 100ps$													
Длина сегмента ls / Длина серпантина L	$s = w = 4$ $Kb = 0,101$			$s = 2w = 8$ $Kb = 0,0435$			$s = 3w = 12$ $Kb = 0,018$			$s = 4w$ $Kb = 0,008$			
	Параметры	№	Эт. ps	Рез. ps	№	Эт. ps	Рез. ps	№	Эт. ps	Рез. ps	№	Эт. ps	Рез. ps
$ls = 1,27$ мм $L = 20,32$ мм	1	40		41	4	23	23,3	7	12	9,6	10	8	4,5
$l = 2,54$ мм $L = 40,54$ мм	2*	62		$51+14 = 51,6$	5	33	34,3	8	17	18,6	11	9	8,58
$l = 5,08$ мм $L = 81,08$ мм	3*	105		$72+26 = 98$	6	44	48	9	22	23	12	12	13

Примечание. * В этих вариантах учитывалась также помеха с $Kb3$ из-за сильной взаимосвязи.

** В статье каждому сегменту серпантина соответствует 2 угла.

Задержка ΔtLs эталонной прямой линии длиной Ls :

$$\Delta tLs = Ls \times tpd$$

Задержка на одну секцию будет равна:

$$\Delta ts = \Delta tLs / Ns$$

Разница в задержках эталонной линии L и Ls серпантина $\Delta t1$ составит:

$$\Delta t1 = \Delta t - \Delta tLs$$

Для компенсации $\Delta t1$ нужно добавить или уменьшить число секций в серпантине на $nadd$:

$$nadd = \Delta t1 / \Delta ts$$

Изменение числа секций должно соответствовать допустимой погрешности рассогласования времен для сигналов.

В сегодняшней практике не делают серпантин по всей длине линии задержки — только несколько небольших серпантинчиков вдоль предполагаемой линии задержки. К этому прибегают исходя из малого места и уменьшения излучения серпантина на соседние линии передачи.

Наилучшее решение — разбить серпантин с N изгибами на небольшие «серпантинчики» с числом изгибов 3–5 и углами изгиба — под 45° [9].

Сравнение разработанного метода проектирования серпантина с результатами моделирования

Для сравнения результатов была выбрана работа [11], в которой очень обстоятельно исследованы линии задержки типа серпантин. Исследования проводились с использованием коммерческих систем 3D-моделирования электромагнитных полей (3D FEM EM simulation tool). В этой работе приведены зависимости времени опережения серпантина от таких параметров, как входной сигнал, расстояние между секциями, длина секций, количество изгибов. Выбран именно этот показатель, так как на его определение влияют все параметры линии задержки и входного сигнала. Результаты приведены в таблице.

В таблице в графах «Эт. ps» приведены результаты работы [11], в графах «Рез. ps» приведены результаты расчетов по методике данной статьи в пикосекундах.

Пример расчета раскладки серпантина по методике статьи приведен на сайте (www.supercompri.ru).

Выводы

Проведенный анализ зигзагообразных линий задержки показал возможность инженерного расчета для определения геометрических параметров линии задержки исходя из заданного стека платы, фронта входного сигнала и требуемой задержки. Для ясности анализа были введены некоторые упрощения по форме сигнала, учета количества помех.

В условиях большой плотности монтажа и ограниченной площади платы наилучший вариант раскладки серпантина (меандра, аккордеона) достигается при длине секции меньше критической длины для заданного фронта входного сигнала.

При этом по допустимому искажению сигнала вычисляется коэффициент связи и расстояние между секциями, что определяет минимальную площадь проектируемого серпантина. Приведены расчеты пределов вариаций длины секции серпантина, формулы для вычисления времени опережения серпантина.

Полученная в работе методика расчета позволяет «вручную» рассчитать параметры линии задержки, а также разработать программный калькулятор для инженерного расчета.

Литература

1. Feller A., Kaupp H. R., Digiacoimo J. J. Crosstalk and Reflections in High-Speed Digital Systems. www.computer.org/csdl/proceedings/afips/1965/5066/00/50660511.pdf
2. Wu R.-B., Chao F.-L. Laddering Wave in Serpentine Delay Line. IEEE Trans. on Components, Packaging and Manufacturing Technology. 1995. Vol. 18. No. 4.
3. Guo W.-D. et al. Comparison between Flat Spiral and Serpentine Differential Delay Lines on TDR and TDT. IEEE 13th Topical Meeting. Electrical Performance of Electronic Packaging. 2004.

4. Brooks D. Crosstalk effects in serpentine traces. Adjusting Signal Timing (Part 2). UltraCAD Design, Inc. January 2004.
5. Kerinami M. H., Ramahi O. M. Effects of segment length and number of turns on design-ing a precise meander delay line. IEEE International Symposium on Electro-magnetic Compatibility. 2003. Vol. 2.
6. Bogatin E. Signal and Power Integrity-simplified. Prentice Hall, 2003.
7. Rubin B. J. Study of Meander Line Delay in Circuit Boards. IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 2000. Vol. 48. No. 9.
8. IPC-2251 A standard developed by IPC-2003.
9. Soh W.-S., See K.-Y., R. W.-Y. Chang, Oswal M., Wang L.-B. Comprehensive analysis of serpentine line design. Microwave Conference, 7–10 Dec. 2009. Asia Pacific. APMC 2009.
10. Lee H., Kim J. Unit Cell Approach to Full-Wave Analysis of Meander Delay Line Using FDTD Periodic Structure Modeling Method. IEEE transactions on advanced packaging. May 2002. Vol. 25, No. 2.
11. Shin J., Michalka T. Comprehensive, Scalable Design Guidance for Serpentine Time Delay Variation in Digital System. Electronic Components and Technology Conference (ECTC), 2012.
12. Грехэм Д. Г. Высокоскоростная передача цифровых данных. Высший курс черной магии. М.: 2005.