

УДК 621.391.31

Р.С. Суровцев

Методика предварительного моделирования целостности сигналов в межсоединениях печатных плат бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата в системе TALGAT

Кратко изложена методика предварительного моделирования целостности сигналов в межсоединениях печатных плат бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата. Методика продемонстрирована на примере фрагмента реальной печатной платы макета приемного модуля блока системы автономной навигации космического аппарата. Показан уровень перекрестных помех 5% от уровня сигнала в активной линии.

Ключевые слова: имитационное моделирование, печатная плата, целостность сигналов, перекрестная помеха, TALGAT.

С каждым годом неуклонно растет плотность монтажа печатных плат (ПП) бортовой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) космических аппаратов (КА). Этот рост и увеличение верхней граничной частоты спектра используемых сигналов заставляют разработчика уделять особое внимание электромагнитной совместимости (ЭМС) бортовой РЭА. Неучёт требований ЭМС может привести к выходу из строя бортовой РЭА и утрате КА, что влечёт за собой большие финансовые потери и подрыв репутации предприятия-разработчика.

Одной из самых актуальных в ЭМС является проблема целостности сигналов (ЦС) в ПП бортовой РЭА, которая особенно обостряется с ростом электрической длины и плотности монтажа межсоединений [1]. Сигналы, проходящие по межсоединениям, подвержены задержке по времени, отражению от неоднородностей, затуханию из-за потерь в проводниках и диэлектриках. Также немаловажно влияние других межсоединений. На пути практической реализации уменьшения искажений сигналов в межсоединениях часто стоят физические и технологические ограничения.

Решению данной проблемы способствует предварительное имитационное моделирование целостности сигналов. При строгом подходе применяется электродинамический анализ. Однако необходимые для этого вычислительные затраты часто высоки даже для относительно простых конфигураций. Примечательно, что при допущении распространения в межсоединениях только поперечной волны могут получаться довольно точные результаты [2]. Своевременное квазистатическое моделирование целостности сигналов позволяет выявить критические участки межсоединений ПП и устранить нежелательные связи в ЛП на этапе лабораторно-отрабочных испытаний (ЛОИ), а не на этапе изготовления летного образца. Для этого разработана система TALGAT [3], однако методика моделирования с её помощью ПП бортовой РЭА не рассматривалась.

Цель данной работы – представить методику моделирования ЦС в ПП бортовой РЭА КА в системе TALGAT. Для этого необходимо:

- выбрать моделируемый фрагмент реальной ПП бортовой РЭА КА;
- продемонстрировать методику проведения предварительного моделирования ЦС на примере выбранного фрагмента;
- обобщить и кратко изложить методику проведения предварительного моделирования ЦС в реальных ПП.

Для демонстрации методики выбран фрагмент (с максимальной плотностью трассировки) реальной ПП макета приемного модуля блока системы автономной навигации (САН) КА. Выбранный фрагмент ПП блока САН представлен на рис. 1, а.

Моделирование любой ЛП начинается с анализа исходных данных, выявляющих особенности прохождения печатных трасс по ПП. Рассматриваемая ЛП расположена на двух слоях: сначала она проходит на верхнем слое (Top) и через переходное отверстие переходит на внутренний слой ПП (Middle 2). Один из внутренних слоёв (Middle 1) является землей для проводников на слоях Top и Middle 2. Примечательно, что на участке ЛП, проходящей на слое Middle 2, присутствует второй

слой земли (Bottom). При строгом подходе к моделированию необходим учет всех изломов печатных трасс, а также такого важного элемента ПП как переходное отверстие. Однако при предварительном моделировании такими особенностями ПП можно пренебречь.

Также важна оценка сложности диэлектрического заполнения стека ПП. В данном случае оно является типовым [4] и включает в себя четыре проводящих слоя, два прокладочных слоя (каждый состоит из препрегов марок 1080 и 7628) и слой основы (рис. 1, б). Печатные проводники на верхнем слое ПП для защиты покрыты иммерсионным золотом.

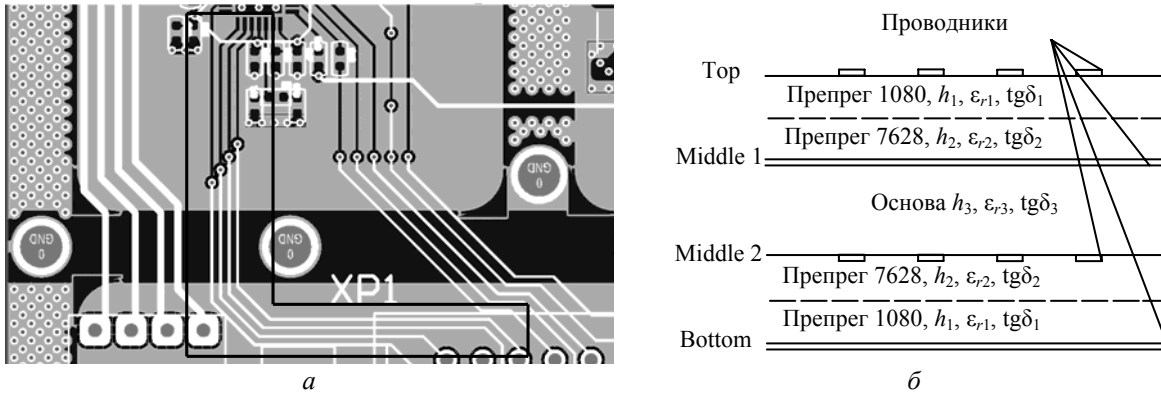


Рис. 1. Фрагмент (а) и стек (б) печатной платы блока САН

Толщина слоёв стека ПП: препрега марки 1080 – 274 мкм, препрега марки 7628 – 180 мкм, основы – 510 мкм. Параметры печатных проводников: ширина $w = 200$ мкм, расстояние между проводниками $s = 400$ мкм, толщина фольги $t = 35$ мкм, толщина покрытия иммерсионным золотом $t_G = 5$ мкм. Относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь соответственно: препрега марки 1080 – 3,58 и 0,016; препрега марки 7628 – 4,6 и 0,012, основы из материала FR-4 (вычисленная на частоте 1,55 ГГц) – 4,52 и 0,0162. На поверхности ПП отсутствуют покрывающие диэлектрические слои, такие как паяльная маска и влагозащитное покрытие.

Одним из начальных и наиболее важных этапов моделирования многопроводных линий передачи (МПЛП) является построение геометрической модели поперечного сечения по заданным параметрам. Важность этого этапа заключается в точности получения результатов последующего моделирования. Поперечные сечения линии на слоях Top и Middle 2 в системе TALGAT [3] представлены на рис. 2.

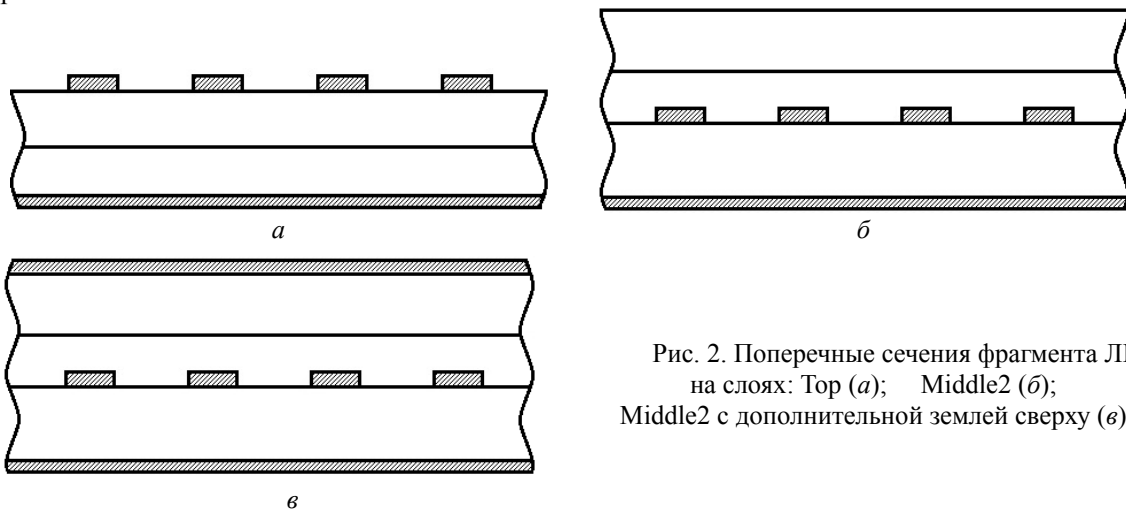


Рис. 2. Поперечные сечения фрагмента ЛП на слоях: Top (а); Middle2 (б); Middle2 с дополнительной землей сверху (в)

Следующим этапом моделирования является вычисление матриц первичных погонных параметров (L , C , R , τ) для поперечных сечений отрезков ЛП, которыми представлен исследуемый фрагмент. Далее из первичных параметров вычисляются вторичные – погонные задержки и матрица волновых сопротивлений, дающая понимание о согласовании ЛП. Также важно знать четверти суммы $((K_C + K_L)/4)$ и разности $((K_C - K_L)/4)$ ёмкостной и индуктивной связей и их произведение на погонную задержку (τ) и длину отрезка ЛП (L). Это позволяет оценить вклад каждого отрезка в уро-

вень перекрестных помех на концах ЛП без вычисления временного отклика сигнала. Эти значения сведены в таблицу.

Параметры отрезков ЛП

i	L_i , мм	τ , нс/м	Z , Ом	$(K_C+K_L)/4$	$\tau(K_C+K_L)/4$	$L_i\tau(K_C+K_L)/4$	$(K_C-K_L)/4$	$\tau(K_C-K_L)/4$	$L_i\tau(K_C-K_L)/4$
1	7,5	5,14	103,5	0,105	0,540	4,05	0,0160	0,0822	0,615
2	3,5	6,52	84,4	0,142	0,926	3,24	0,0122	0,0795	0,280
3	5,0	6,76	60,4	0,058	0,392	1,96	0,0037	0,0250	0,125
4	14,0	6,52	84,4	0,142	0,926	12,96	0,0122	0,0795	1,113

Из таблицы следует, что наибольший вклад в уровень перекрестных помех на ближнем и дальнем концах фрагмента вносит четвертый отрезок. Примечательно, что именно он имеет наибольшую протяженность.

Заключительным этапом моделирования перекрестных помех в МПЛП является вычисление временного отклика сигнала [5]. Для этого предварительно составляется схема включения МПЛП с заданием нагрузок на концах проводников и параметров источника(ов) воздействия. Рассматриваемый фрагмент состоит из четырех отрезков (два отрезка с одинаковыми поперечными сечениями – Tl_2 и Tl_4 ; два отрезка с разными поперечными сечениями – Tl_1 и Tl_3), как показано на рис. 3. Общая протяженность фрагмента $L=30$ мм, длина первого отрезка со структурой рис. 2, a – $L_1 = 7,5$ мм, второго со структурой рис. 2, b – $L_2 = 3,5$ мм, третьего со структурой 2, b – $L_3 = 5$ мм, четвертого со структурой рис. 2, b – $L_4 = 14$ мм.

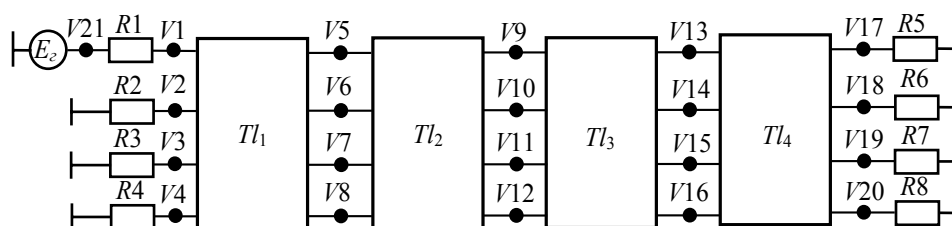


Рис. 3. Эквивалентная схема исследуемого фрагмента

При составлении эквивалентной схемы необходимо корректно учесть реальные параметры воздействий, а также входной и выходной импедансы приемника и передатчика. Если они неизвестны, можно выбрать одну из эквивалентных схем с одним источником воздействия. В качестве воздействия можно использовать тестовый сигнал, например импульс в виде трапеции с уровнем, длительностями фронта/спада и плоской вершины, приближенными к реальным. Если неизвестны реальные нагрузки ЛП, полезно моделирование нескольких типовых случаев: 50 Ом в начале и конце ЛП, псевдосогласование в начале и рассогласование в конце (большое входное сопротивление приёмника) ЛП, рассогласование в начале (малое выходное сопротивление передатчика) и рассогласование в конце ЛП. Для предварительной оценки ЦС в ЛП выбрано моделирование для случая 50 Ом, имитирующего измерительный тракт.

Для оценки уровня перекрестных помех в четырехпроводной ЛП проведено моделирование по схеме рис. 3 для случая, когда первый от края структуры проводник активный, а остальные – пассивные, при $R_1 = R_2, \dots, = R_8 = 50$ Ом. В качестве воздействия выбран импульс в виде трапеции с ЭДС $E_0 = 6$ В, длительность фронта/спада импульса $t_r = t_f = 1$ нс, длительность плоской вершины импульса $t_d = 8$ нс. В результате получены сигналы на концах ЛП (рис. 4).

Из полученных результатов видно, что в начале активного проводника амплитуда сигнала ($V1$) равна 3 В и фронт сигнала не искажен, но наблюдается выброс амплитудой 0,5 В, тогда как на конце активного проводника выброса нет. Перекрестные помехи имеют максимальный уровень на ближайшем от активного пассивном проводнике. Уровень перекрестной помехи достигает 0,15 В на ближнем конце и 0,06 В на дальнем конце, что составляет приблизительно 5 и 2% от сигнала в активной линии соответственно. Такой уровень ближней перекрестной помехи может быть критичен для бортовой РЭА КА. По мере удаления пассивного проводника от края структуры уровень ближней и дальней перекрестной помех снижается и стремится к одному значению. Примечательно, что на последнем пассивном проводнике уровень ближней и дальней перекрестной помех практически одинаковый и составляет приблизительно 0,02 В.

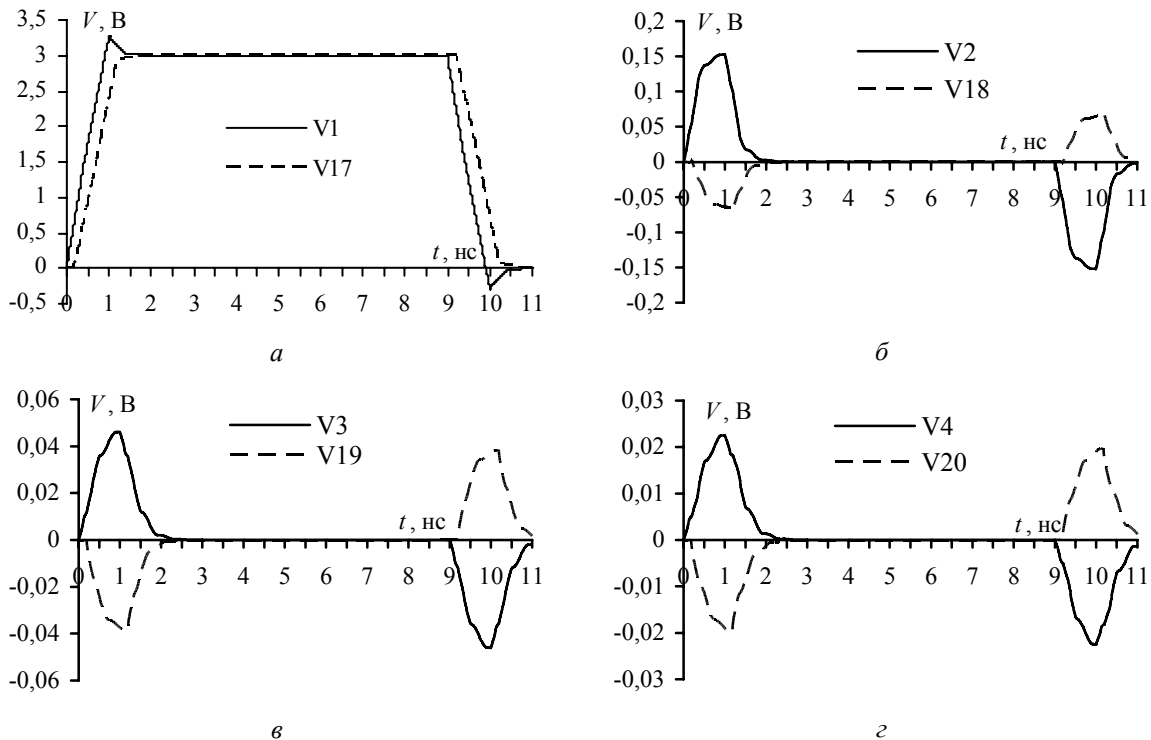


Рис. 4. Формы сигналов в начале (—) и конце (---) проводников: активного (а), первого пассивного (б), второго пассивного (в), третьего пассивного (г)

Таким образом, методика предварительного моделирования целостности сигналов фрагмента ПП включает: подробный анализ прохождения печатных трасс в многослойных ПП; оценку сложности диэлектрического заполнения стека ПП; составление поперечного сечения ПП с учётом всех особенностей диэлектрического заполнения; вычисление погонных параметров ЛП; оценку вклада каждого из отрезков ЛП в уровень перекрестных помех; получение эквивалентной схемы фрагмента; вычисление временного отклика; анализ полученных результатов. В случае получения неудовлетворительных результатов на этапе предварительного моделирования принимаются меры по устранению сильных взаимовлияний между проводниками и уменьшению уровня перекрестных помех (например, с помощью разнеса печатных проводников по ПП).

В работе на примере фрагмента реальной ПП показана методика проведения предварительного моделирования целостности сигналов в системе TALGAT. Выполнена качественная и количественная предварительная оценка уровня перекрестных помех в четырехпроводной ЛП, состоящей из четырех отрезков со сложным диэлектрическим заполнением. Выявлено, что максимальный уровень перекрестной помехи (на ближнем конце первого пассивного проводника) составляет приблизительно 5% от уровня сигнала в активной линии. Подобные оценки позволяют принять необходимые меры по уменьшению перекрестных помех на этапе лабораторно-отрабочных испытаний, таким образом уменьшая затраты на их повторное проведение.

Автор благодарит Т.Р. Газизова за помощь в написании статьи.

Работа выполнена по договору от 16.11.2012 №96/12 ТУСУРа и ОАО «ИСС» им. акад. М.Ф. Решетнева» в рамках реализации Постановления Правительства РФ от 09.04.2010 г. №218, договор от 12.02.2013 г. №02.G25.31.0042.

Литература

1. Газизов Т.Р. Уменьшение искажений электрических сигналов в межсоединениях / Под ред. Н.Д. Малютина. – Томск: Изд-во НТЛ, 2003. – 212 с.
2. Орлов П.Е. Квазистатическое и электродинамическое моделирование модальных явлений в многопроводных структурах / П.Е. Орлов, Е.С. Долганов, Т.Р. Газизов // Инфокоммуникационные технологии. – 2011. – Т. 9, №4. – С. 96–100.

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012660373. TALGAT 2011. Авторы: Газизов Т.Р., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Т. и др. Заявка №2012618426. Дата поступления 5 октября 2012 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 16 ноября 2012 г.

4. PSelectro, группа предприятий по производству печатных плат [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.pselectro.ru/>, свободный (дата обращения 5.09.2013).

5. Заболоцкий А.М. Временной отклик многопроводных линий передачи / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов. – Томск: Том. гос. ун-т, 2007. – 152 с.

Суворцев Роман Сергеевич

Аспирант, каф. телевидения и управления ТУСУРа

Тел.: 8 (382-2) 41-34-39

Эл. почта: surovtsevrs@gmail.com

Surovtsev R.S.

The technique of preliminary modeling of signal integrity in the printed-circuit board interconnections of the radioelectronic spacecraft equipment in the TALGAT system

The technique of preliminary modeling of signal integrity in the printed-circuit board interconnections of the radioelectronic spacecraft equipment is briefly described. The technique is demonstrated on the example of real printed-circuit board fragment of the receiver module prototype of the spacecraft block of an autonomous navigation system. Crosstalk level of 5% from signal level in the active line is demonstrated.

Keywords: imitating modeling, printed-circuit board, signal integrity, crosstalk, the TALGAT system.