

## Пересечение низкочастотных цепей и высокочастотного тракта в приёмно-передающих модулях X-диапазона частот

О.А. Бабушкина<sup>1</sup>, Д.М. Косьмин<sup>2</sup>, М.А. Левшиновский<sup>2</sup>, Б.П. Попов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

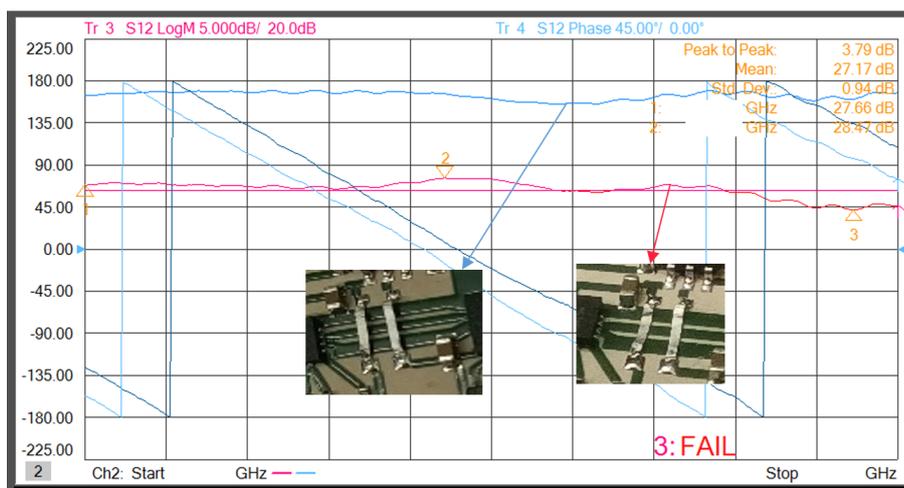
<sup>2</sup>АО «ЗАСЛОН»

**Аннотация:** в представленной работе исследовалось влияние топологического пересечения низкочастотных цепей (перемычек) и высокочастотного тракта (копланарной линии) на параметры как самого тракта, так и параметры приёмно-передающего модуля X-диапазона частот. Произведены электромагнитное моделирование пересечения для различных вариантов исполнения перемычек и их сравнение, а также экспериментальная проверка описанного в работе технического решения.

**Ключевые слова:** СВЧ тракт, копланарная линия передачи, линия передачи, перемычка, X-диапазон частот.

### 1. Описание проблемы

При разработке СВЧ гибридных схем рекомендуется избегать топологического пересечения участков СВЧ тракта и проводников низкочастотных цепей управления [1]. Несмотря на это, бывают случаи, когда без него обойтись не удаётся. Гарантированным решением проблемы может служить разнесение СВЧ и НЧ частей схемы в разные слои печатной платы, как, например, было успешно реализовано при создании линейки фазовращателей диапазона частот 2-30 ГГц [2] на основе четырёхслойных печатных плат. Однако фазовращатели в приведённом примере изготавливались для единичных образцов экспериментальных фазированных антенных решёток (ФАР), содержащих порядка 100 излучателей. При серийном производстве антенн, содержащих тысячи излучателей, такое «многослойное» решение приводит к значительному удорожанию конечного изделия. Другим, менее затратным, решением является применение перемычек, представляющих собой отформованную П-образную ленту из металлической фольги и смонтированную на двухслойной печатной плате устройства над СВЧ линией передачи (фото вставки на рисунке 1). Видно, что в такой конструкции не предусмотрено никакой поддержки перемычки, которая препятствовала бы возможной деформации из-за внешних воздействующих факторов во время технологического процесса при производстве устройства. Деформированная перемычка хоть и не имеет непосредственный механический контакт с линией передачи (препятствует защитная маска печатной платы), но за счёт токов смещения образуется электромагнитная связь высокочастотных и низкочастотных цепей. На рисунке 1 на примере экспериментального макета X-диапазона частот показано изменение частотной характеристики коэффициента усиления при замыкании перемычек на печатной плате: уменьшается по абсолютному значению вплоть до не соответствующего техническим условиям (СТУ) («FAIL» на снимке экрана анализатора цепей), неравномерность (значение «peak to peak» на снимке экрана анализатора цепей) начинает превышать 3 дБ, что также не допустимо.

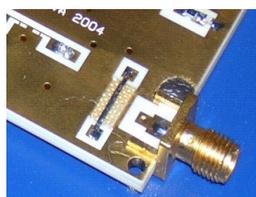


**Рисунок 1.** Изменение ЧХ при замыкании перемычек на примере экспериментального макета. КУ при замыкании перемычек уменьшается по абсолютному значению вплоть до не СТУ («FAIL» на снимке экрана анализатора цепей), неравномерность (значение «peak to peak» на снимке экрана анализатора цепей) начинает превышать 3 дБ.

К недостаткам такой конструкции перемычек, которые приводят к увеличению времени проверки и выпуска устройства, можно отнести следующие: неодинаковость перемычек по форме и размеру, возникающая при их ручном изготовлении и монтаже, а также обрыв перемычек в результате механического повреждения как на различных операциях ТП, так и при эксплуатации СВЧ модулей. Неодинаковость перемычек увеличивает разброс характеристик устройства, а их обрыв требует операции диагностики неисправности при проверке с последующей ремонтной операцией и повторными испытаниями устройства.

## 2. Предлагаемое решение

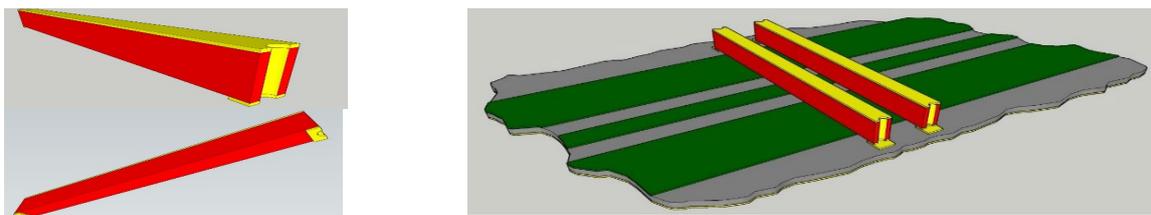
Ранее, при разработке модуля управления фазой и амплитудой сигнала L-S диапазонов частот [3] для предотвращения замыкания перемычки, авторы использовали диэлектрическую вставку между перемычкой и печатной платой (рисунок 2), которая совершенно не повлияла на СВЧ характеристики устройства.



**Рисунок 2.** Диэлектрическая вкладка между перемычкой и печатной платой модуля управления фазой и амплитудой сигнала L-S диапазонов частот.

На основе данного успешного опыта авторами предложено совместить два подхода, указанных в части 1 доклада и изготавливать перемычки по стандартной технологии печатных плат. Конструктивно отдельная перемычка будет представлять собой диэлектрический брусок верхний слой металлизации которого выполняет функцию перемычки, а на нижнем слое располагаются контактные площадки для монтажа перемычки на печатную плату ППМ пайкой. Гальваническая связь верхнего слоя металлизации и контактных площадок обеспечивается за счёт металлизированных отверстий по торцам «платки». Эскизы перемычки и фрагмента печатной платы ППМ с установленными отдельно-стоящими перемычками показаны

на рисунке 3.



**Рисунок 3.** Эскизы переключки и фрагмента печатной платы ППМ с установленными отдельно-стоящими переключками.

Предложенное решение реализует преимущества многослойных печатных плат с одной стороны, а с другой является экономически целесообразным и не потребует внесения изменений в уже разработанную печатную плату ППМ, улучшит техпроцесс с точки зрения оптимизации монтажа – ручной монтаж переключки может быть заменён монтажом на автоматической линии.

Однако, упомянутый успешный опыт с применением диэлектрической вкладки не соответствует рассматриваемому X-диапазону частот. Это потребовало исследования влияния предлагаемого конструктивного решения на параметры копланарной линии передачи, используемой в устройстве.

### 3. Электродинамическое моделирование

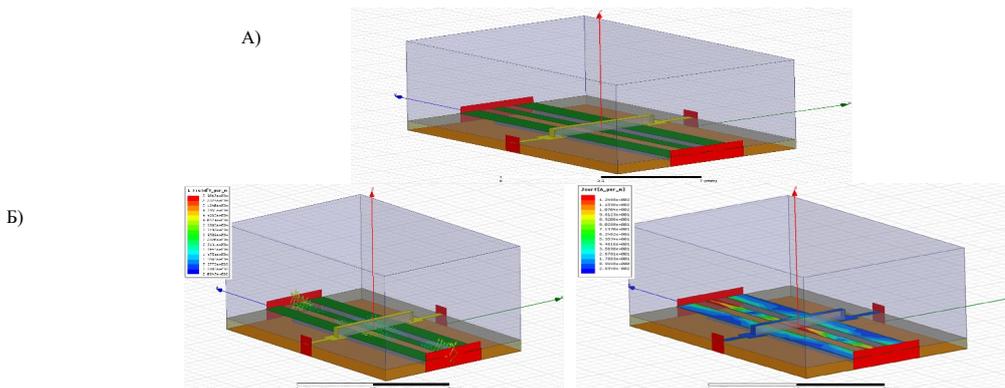
Сегодня сложно себе представить какую-либо разработку и исследование в различных областях науки и техники без компьютерного моделирования. В следствии этого идёт интенсивное развитие различных систем автоматизированного проектирования (САПР), в том числе и радиоэлектронной аппаратуры. Компьютерное моделирование может быть реализовано на схемотехническом, функциональном, электродинамическом и других уровнях.

Существует достаточно большое количество численных методов (ЧМ), которые применяются для электродинамического моделирования [4, 5]. Каждый из них имеет свои преимущества и недостатки, и выбор того или иного метода определяется его эффективностью для конкретной задачи. Корректное использование любого ЧМ даёт хорошее совпадения результатов компьютерного моделирования и эксперимента. Одним из популярных, универсальных и трёхмерных ЧМ электродинамики является метод конечных элементов, который применяют во многих САПР. Программный продукт, который использовался авторами для моделирования, как раз и использует метод конечных элементов, реализуемый в частотной области. При использовании этого метода для получения точных результатов необходимо уделить большое внимание корректной дискретизации модели устройства на конечные элементы (тетраэдры) и процессу сходимости. Используемая САПР уже зарекомендовала себя с лучшей стороны, обладая интуитивно понятным интерфейсом, она позволяет помимо получения частотных характеристик устройств, построить распределение электромагнитного поля в модели.

Для оценки влияния переключки с диэлектриком на ЧХ линии передачи были построены и проанализированы следующие модели: отрезок копланарной линии передачи без переключки; отрезок копланарной линии передачи с воздушной переключкой; отрезок копланарной линии передачи с «замятой» переключкой (будут представлены в докладе); копланарная линия с переключкой на диэлектрическом основании (рисунок 4А).

Были рассчитаны параметры матрицы рассеяния для моделей, а также распределение электрических полей и протекание токов. В случае с воздушной

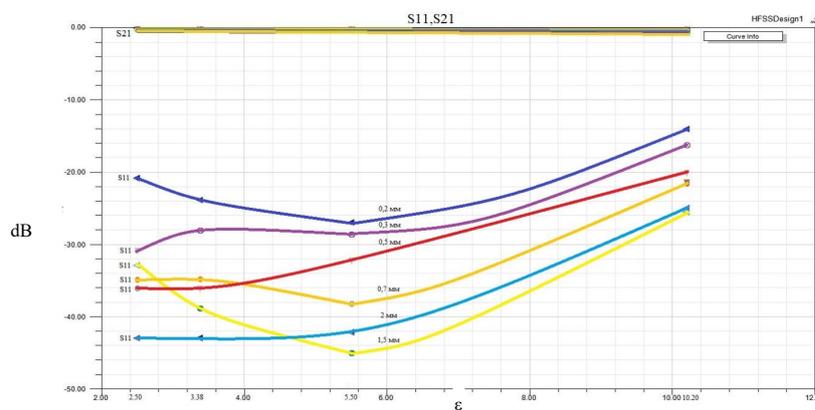
перемычкой матрица рассеяния была такая же, как в модели без перемычки. Электрическое поле сосредоточено в линии передачи, а токи протекают по линии и не затекают в перемычку. При замыкании же перемычки значительно снижается коэффициент передачи в линии, появляется электрическое поле вдоль перемычки и токи начинают протекать по перемычке. Полученный результат соответствует экспериментальному результату, показанному на рисунке 1 и говорит об адекватности построенной электродинамической модели, а также возможности применения её для оценки влияния диэлектрика в конструкции перемычки на частотные характеристики линии.



**Рисунок 4.** Модель отрезка копланарной линии с перемычкой на диэлектрическом основании и результаты электродинамического моделирования для диэлектрика FR4

Моделирование модернизированной перемычки для диэлектрика FR4 (рисунок 4Б) для различных толщин показало, что такая перемычка не будет способствовать уходу сигнала из СВЧ тракта и не приведет к значительному изменению частотных характеристик линии.

Помимо FR4 перемычка с различной толщиной была смоделирована на основе следующих материалов: AD1000 –  $\epsilon = 10.2$ ,  $\tan \delta = 0.0023$ ; F4BM255 –  $\epsilon = 2.5$ ,  $\tan \delta = 0.0015$ ; WL-CT338 –  $\epsilon = 3.38$ ,  $\tan \delta = 0.0029$ . Результаты моделирования на центральной частоте (рисунок 5) так же показали, допустимость применения их в качестве материала для изготовления перемычки.



**Рисунок 5.** Результаты моделирования коэффициентов матрицы рассеяния копланарной линии с перемычками из различных материалов и различной толщины на центральной частоте.

#### 4. Экспериментальный результат

Для экспресс-проверки теоретического подхода к решению рассматриваемой проблемы был поставлен следующий эксперимент.

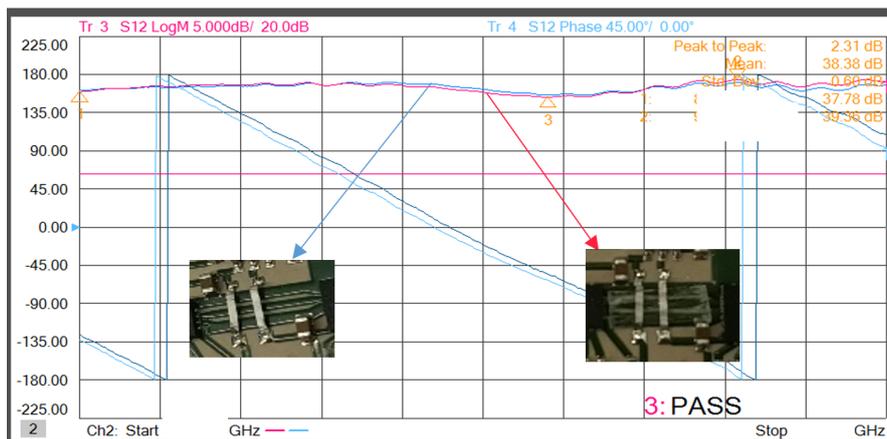
Между печатной платой и перемычками выборки из 10 макетов были установлены

диэлектрические вставки из полиэтилена (проницаемость  $\sim 1.29$ ,  $h=0.45$  mm) – рисунок 6. После установки вставок перемычки заминались до предела, на который позволяла их замять толщина вставок.



**Рисунок 7.** Установленные между печатной платой и перемычками экспериментального макета диэлектрические вставки.

В ходе эксперимента фиксировались частотные характеристики макета на анализаторе цепей до установки вставок и сравнивались с частотными характеристиками того же модуля со вставками и замятыми перемычками. На рисунке 8 приведены типичные результаты эксперимента для одного макета из выборки, рассмотренного в части I доклада для иллюстрации влияния замятия перемычек на ЧХ макета. Как видно из рисунка 8 КУ и неравномерность при замятии перемычек в этом случае практически не изменяется.



**Рисунок 8.** Типичное изменение ЧХ для макета из выборки 10 макетов при замятии перемычек в присутствии диэлектрических вставок. КУ и неравномерность при замятии перемычек практически не изменяется.

Для всех исследованных образцов отмечены практически отсутствие влияния диэлектрической вставки и замятия перемычек на ЧХ. Кроме того, ширина и длина вставок были намеренно сделаны разными для качественной оценки влияния геометрических размеров вставки на ЧХ макета устройства. Какого-либо значительного влияния геометрии вставок не было обнаружено.

## 5. Заключение

На момент написания доклада на основе полученных результатов производится подготовка изготовления серии экспериментальных перемычек из разного материала и различной высотой. После завершающих экспериментов с ними будет дана окончательная рекомендация по использованию рассмотренного подхода в технологических процессах серийного производства СВЧ устройств радиотехнической промышленности.

### Список литературы

1. Clyde F. Coombs. Coombs' Printed Circuits Handbook. McGraw-Hill Professional; 5<sup>th</sup> Edition (2001); 17.2.3
2. Д.М. Косьмин, И.В.Котельников, В.Н. Осадчий, В.В. Лучинин, А.Б. Козырев. Фазовращатели для связанных фазированных антенных решеток диапазона частот 2 ÷ 30 ГГц. Всероссийская конференция Микроэлектроника СВЧ. Санкт-Петербург. СПбГЭТУ. 4-7 июня 2012. Сборник трудов Т.2.,102-105.
3. Kozurev, A. B., Osadchy, V.N., & Kosmin, D. M. (2005). L-S Band module for phase/amplitude processing. 2005 European Microwave Conference. Doi: 10.1109/eumc.2005.1610373
4. Григорьев А.Д. Методы вычислительной электродинамики. – М. : Физматлит, 2012.
5. Гринев А.Ю. Численные методы решения прикладных задач электродинамики. Учеб. пособие. – М.: Радиотехника, 2012.