

# К вопросу о точности расчёта программ электродинамического моделирования СВЧ-устройств

Александр Курушин (Москва)

В статье обсуждаются вопросы точности расчётов на примерах программ моделирования СВЧ-устройств. Рассматриваются и сравниваются результаты расчёта на программах MWO и HFSS ряда тестовых структур, включая широкополосный фильтр.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время проектирование СВЧ-частей радиолокационных, радио-приёмных, оптических систем немислимо без широкого применения современного программного обеспечения. Однако не менее актуальным является тестирование и верификация этих программ. Поэтому разработчик, одновременно с актуальной задачей выбора программы для решения конкретной задачи, сталкивается с проблемой точности решения. Обычный ответ, что программа считает точно, на уровне физического эксперимента не всегда верен. Поэтому в статье рассматриваются такого рода вопросы и ответы.

Широкое внедрение в практику проектирования электродинамических программ универсального назначения можно считать естественным процессом развития современного подхода к проектированию антенн и СВЧ-устройств. Однако всегда стоит иметь в виду, что использование даже самой современной программы не означает, что расчёт будет производиться путём численного решения системы уравнений, описывающих всю анализируемую систему, хотя только этим метод гарантирует совпадение результатов расчёта с реальностью. Дело в том, что

такое решение требует таких вычислительных мощностей, что даже на самых мощных современных компьютерах он будет занимать недопустимо долгое время в подавляющем большинстве случаев за исключением самых простых. В результате разработчики программ вынуждены использовать упрощённые модели рассчитываемой системы.

Но на практике важными являются и точность, и скорость расчёта. Проектирование СВЧ-структуры произвольной формы остро ставит задачу описания, выбора и подтверждения достоверности модели. Построение достоверной модели связано с задачей анализа характеристик физической системы, реализуемой на этом устройстве. Это первый важный вопрос, решаемый в процессе проектирования, и умение построить модель, адекватную реальной задаче, является крайне важным для разработчика, которое можно (и стоит) развивать эмпирическим путём посредством самостоятельных исследований.

Второй важный момент проектирования – это всё большее разнообразие показателей качества, используемых при оценке проектируемого устройства.

В условиях высокого темпа производства современный исследователь, перед которым ставится задача проектирования части или всей системы, должен однозначно получить ответ на вопрос, какой метод нужно выбрать для решения конкретной задачи с заданной степенью точности. Другими словами, какое программное обеспечение предпочесть?

Общий ответ, и самый логичный, звучит так: для каждой задачи есть своя лучшая программа. Однако путь достижения цели идёт через поиск приоритетов.

В программе Microwave Office [2] основным методом расчёта нелинейных СВЧ-схем является метод гармонического баланса.

При использовании этого метода нелинейные устройства (транзисторы, диоды), а также отдельные части распределённых структур представляются в виде сосредоточенных компонентов с портами. Распределённые структуры при этом описываются моделями, которые называются моделями в замкнутой форме closed form. Общая модель системы в этом случае называется schematic (схема), хотя она включает, фактически, разветвлённые сложные СВЧ-структуры.

Однако модели в замкнутой форме рассчитываются на основании метода Олинера [1], что подразумевает наличие аналитических выражений, связывающих электрические и геометрические характеристики элементов СВЧ-тракта.

Поставим перед собой задачу выяснить, существует ли разница между рассчитанными и реальными характеристиками, насколько она велика и что следует сделать — отбросить дающие ошибку методы либо ввести корректирующие поправки (например, изменить диэлектрическую проницаемость).

Для начала проанализируем простейшие типовые элементы СВЧ-устройств — отрезок микрополосковой линии, разветвление линий, неоднородность в виде скачка ширины. При этом в качестве эталона будем использовать программу HFSS фирмы ANSYS [4], в которой для расчётов применяется метод конечных элементов — численный метод решения полной системы уравнений, описывающих электромагнитные поля. Эта программа была выбрана вместо использования экспериментальных измерений, так как измерительные приборы на высоких частотах могут вносить слишком большую собственную погрешность. Как уже говорилось, использовать её для расчёта сложных конструкций нереально из-за слишком большого времени вычислений. Сравнить же эталон мы будем

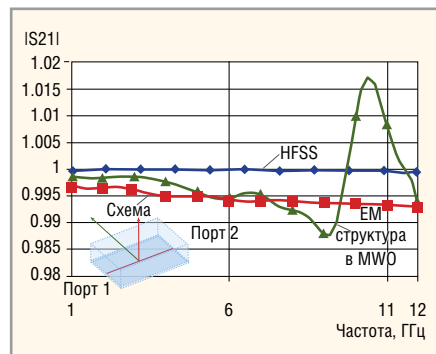


Рис. 1. Частотные характеристики отрезка линии, рассчитанные несколькими способами

с результатами работы программы Microwave Office фирмы AWR [3].

Помимо возможного несоответствия действительности используемых в тестируемой программе моделей рас- пределённых пассивных структур следует иметь в виду возможные ошибки из-за неадекватности портов, служащих в программе моделями соединений отдельных компонентов схемы. Этот вопрос в настоящей работе рассматриваться не будет, а для исключения влияния портов применим операцию разгерметизации, т.е. удаление неоднородности в местах портов от регулярной части структуры.

### Анализ отрезка микрополосковой линии

Рассмотрим отрезок микрополосковой линии, заключённый в экранирующий корпус (см. рис. 1). Диэлектрическая проницаемость подложки ( $\epsilon = 9,8$ ), толщина подложки 1 мм и ширина линии специально подобраны так, что характеристическое сопротивление такой линии близко к 50 Ом.

Коэффициент отражения зависит от соотношения характеристическо-

го сопротивления линии и импеданса порта. Если эта разница велика, то можно считать, что отрезок линии является резонатором. Поэтому выберем режим равенства опорного сопротивления порта и характеристического сопротивления линии. Рассчитаем частотные характеристики коэффициента передачи линии.

На рисунке 1 приводятся частотные характеристики коэффициента передачи отрезка линии, представленной в виде схемы, в виде EM-структуры, а также в виде 3D-модели в HFSS. Видно, что расчёт в EM-представлении даёт ошибку расчёта ( $|S_{21}| > 1$ ). Ещё большее различие между результатами обчёта электродинамической структуры и её схемной модели, создаваемой из неё путем декомпозиции, можно увидеть при анализе перекрещиваемых микрополосковых линий (см. рис. 2 и 3).

На рисунке 2 приводится представление этой конструкции при расчёте её электродинамическим методом моментов в MWO (утилита EMSigt), а на рисунке 3 приведена полученная для неё схема, которая рассчитывается методом Олинера.

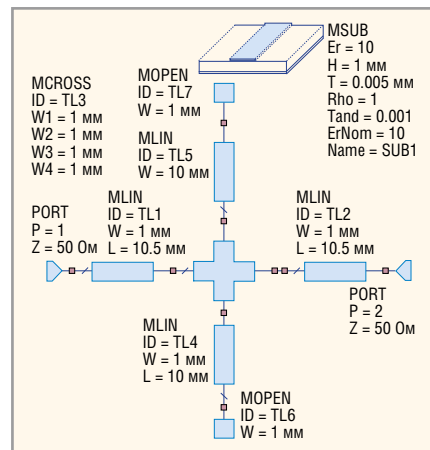


Рис. 2. Топологическое представление отрезка линии с двумя шлейфами в EMSigt

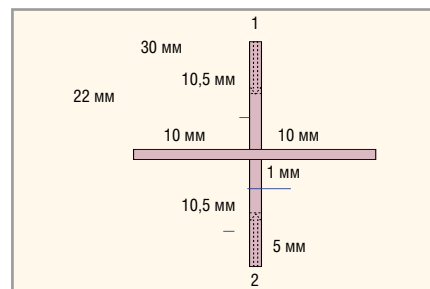


Рис. 3. Схема, представляющая в виде символов отрезок микрополосковой линии с двумя разомкнутыми на концах шлейфами

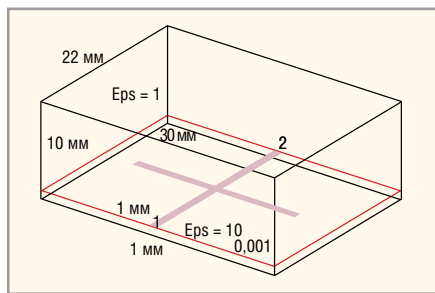


Рис. 4. Трёхмерное представление отрезка линии с двумя шлейфами

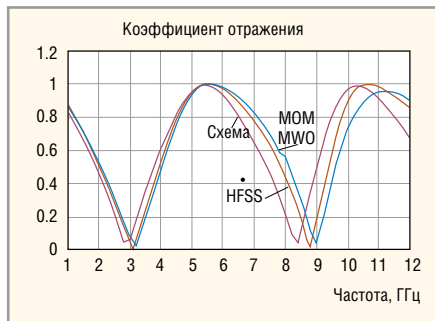


Рис. 6. Частотные характеристики отрезка микрополосковой линии со шлейфом, рассчитанные несколькими методами (включая расчёт на HFSS)

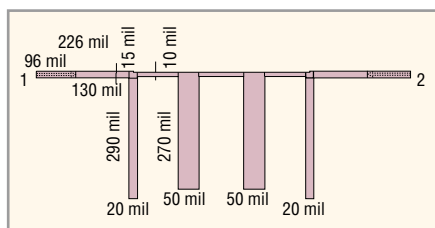


Рис. 7. Геометрия полосового фильтра

Структура состоит из двух слоёв: диэлектрической подложки с проницаемостью  $\epsilon = 10$  и вакуума сверху. Разбиение на ячейки топологии (формы) в EMSight программы MWO [2] выполним так, чтобы в районе сливания шлейфов разбиение на сетку было значительно (в 3 раза) плотнее. При этом обсчёт электродинамической структуры позволяет при расчёте поля учесть такие физические явления, как концентрация поля в месте перекрытия, возникновение и затухание высших типов волн в неоднородной структуре.

Моделирование, параметрическая оптимизация и синтез структуры выполняются в современных программах очень разнообразно. В процессе оптимизации можно изменять и ширину, и длину, а в общем случае – и отдельные координаты структур, превращая их в сложную полоско-щелевую линию с изменяемой конфигурацией и сечением. В антенной структуре современного сотового телефона, например, невозможно выделить отдельные шлейфы, перекрытия, линии.

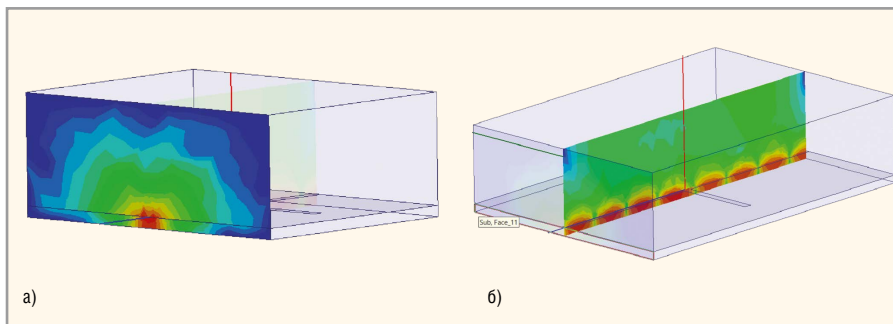


Рис. 5. Ближнее поле в сечении порта (а) и в сечении структуры в программе HFSS (б)

Исследуемой конструкции в программе HFSS соответствует структура, показанная на рисунке 4. Принципиальным отличием методики HFSS от метода Олинера можно считать порты, реализованные в HFSS как волноводный порт, который охватывает диэлектрический и верхний слой (см. рис. 5а).

Качественно картину распространения поля в пространстве анализа можно исследовать с помощью ближнего поля. Ближнее поле в сечении длинной линии показывают пучки электромагнитных волн (см. рис. 5б).

Данные расчёта, полученные в HFSS, в виде S-параметров экспортируем в MWO в виде файла, а затем отобразим в графическом виде вместе с рассчитанными в самом MWO частотными характеристиками (см. рис. 6).

Рассчитанные частотные характеристики показывают, что имеется значительная разница в результатах расчёта даже для таких простейших структур, как пересечение двух микрополосковых линий. Разница резонансных частот (точек, где коэффициент отражения достигает минимального значения) достигает 20%. Из таких погрешностей в итоге может складываться картина, далёкая от реальных характеристик СВЧ-структур. Покажем это на примере полосового фильтра.

### Анализ полосового фильтра

Проведём анализ широкополосного полосового фильтра, используя три метода расчёта в MWO (пример входит в список примеров MWO [3] и поэтому используется как тестовый).

Традиционные модели, рассчитываемые по формулам, были разработаны, чтобы работать в широком диапазоне изменений геометрических и электрических параметров (ширине линии, высоте подложки, относительной диэлектрической проницаемости микрополосковой линии) и частот, однако всегда стоит помнить о наличии границ применимости этих

формул. Выполним моделирование фильтра (см. рис. 7), используя модели XModels [3], модели Олинера, а также с помощью полной EM-модели (Full Model), полученной на основе выделения модели из схемы (см. рис. 8).

Структура фильтра включает 4 шлейфа, формирующих два отличных резонансных контура. Поэтому этот фильтр является фильтром второго порядка. Схема этого же фильтра, составленного из традиционных элементов (линий, разветвителей и шлейфов), показана на рисунке 8.

Каждому схемному элементу (см. рис. 8) в MWO соответствует конструктивный аналог (топологический элемент Layout), что удобно для параллельного создания структуры в виде схемы и в виде топологии, позволяя сразу преобразовывать синтезированную схему в реальную плату (см. рис. 9), в том числе многослойную.

Отдельные элементы (например, перемычки, которые связывают слои и сильно влияют на характеристики интегральных схем или нестандартные электродинамические структуры, элементов которых нет в библиотеке моделей) при этом можно рассчитывать электродинамическим методом. Включение модели SPICE [2] позволяет выполнить анализ переходного процесса во временной области. Результаты расчёта фильтра (см. рис. 9) различными методами, используемыми в MWO, приводятся на рисунке 10.

Расчёты показывают, что электродинамический метод моментов, реализованный в MWO, даёт большую точность по сравнению с методом Олинера. На точность расчёта влияет как плотность сетки разбиения, так и выбор типа портов. Важным является также то, что электродинамические методы позволяют визуализировать поля в пространстве и токи на поверхностях (см. рис. 11), что позволяет исследователю анализировать физические явления в структуре.

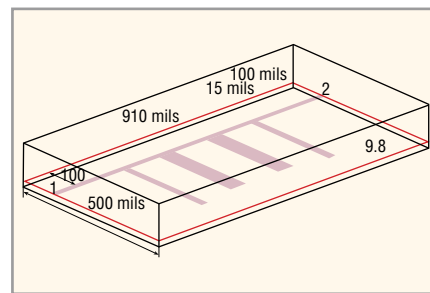
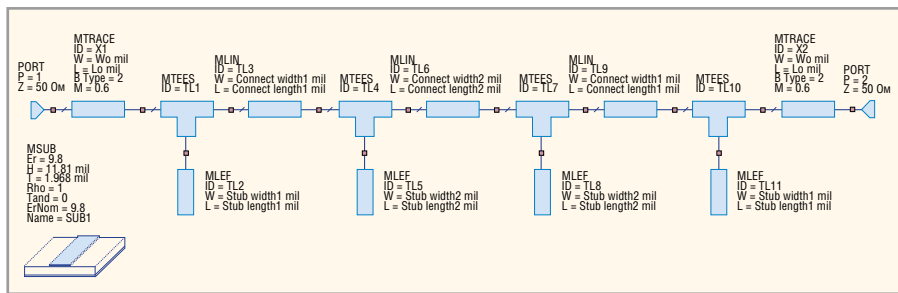


Рис. 8. Схемное представление фильтра, построенного на отрезках микрополосковых линий (в MWO)

Рис. 9. Структура фильтра в корпусе

На рисунке 12 показаны амплитудно-частотные характеристики, полученные с помощью расчёта несколькими методами, в том числе методом конечных элементов на программе HFSS с использованием дискретных (Lumped port) и волновых портов (Wave port). Результаты, полученные при описании портов этими двумя методами, сближаются, если выполнить разгерметизацию портов [2, 4], т.е. отдалить дискретные порты от стенок. На этом же рисунке отображены характеристики, полученные расчётом методами MWO. Из рисунка видно, что наибольшее отклонение от рассчитанных электродинамическими методами истинных характеристик даёт расчёт методом Олинера.

### Выводы

Метод Олинера на протяжении десятилетий с момента его предложения [1] использовался очень активно. Реализация этого метода в MWO [3] ускорила процесс проектирования СВЧ-микросхем, в том числе усилителей, смесителей и генераторов. Особенно полезен был этот метод для расчёта нелинейных СВЧ-схем. Однако с появлением современных мощных компьютеров и программного обеспечения, реализующего электродинамические методы точного решения для электромагнитного поля, наступает время для исключения его из арсенала разработчиков.

Сравнение расчёта тестовых структур на современных программах показывает, что погрешности расчёта этим методом могут достигать 20%. Из этого следует, что метод Олинера сыграл свою роль и его применение целесообразно только на этапе эскизного проектирования.

Различные электродинамические методы — конечных элементов, метод моментов и метод конечных разностей во временной области — дают характеристики, совпадающие с экспериментальными, а рост вычислительной

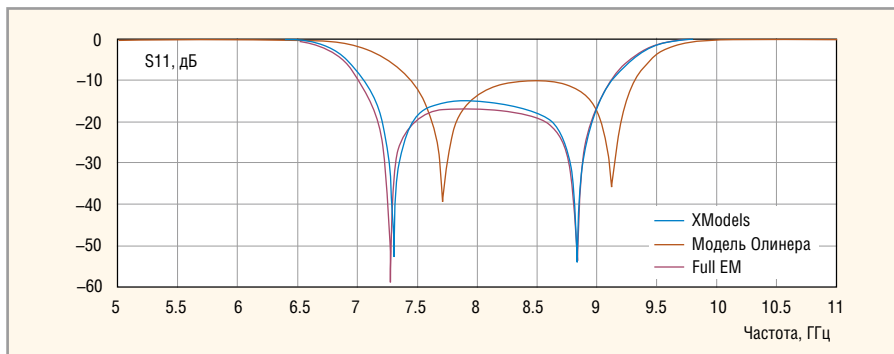


Рис. 10. Частотные характеристики полосового фильтра, рассчитанные с помощью MWO: формулы в замкнутой форме (метод Олинера), XModel – модели с коррекцией моделей Олинера, Full EM-расчёт методом моментов (используя EMSight)

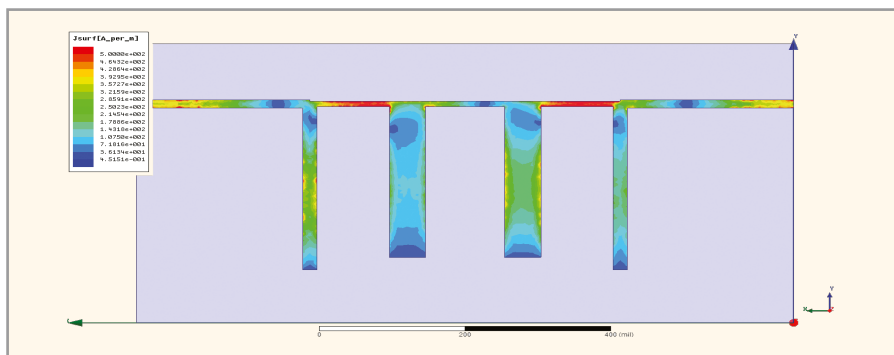


Рис. 11. Картина тока на поверхности фильтра

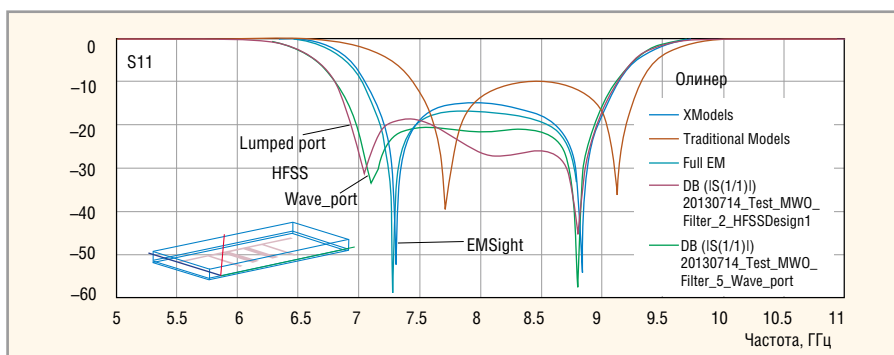


Рис. 12. Частотные характеристики полосового фильтра, рассчитанные несколькими методами

мощности современных компьютеров позволяет с лёгкостью и удобством использовать для анализа и синтеза СВЧ-устройств именно их.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Oliner A.A. Equivalent Circuits for Discontinuities in Balanced Strip Transmission Line. IRE Trans. Microwave Theory Tech. Vol. 25. P.134–143. 1955.

2. Разевиг В.Д., Потапов Ю.В., Курушин А.А. Проектирование СВЧ-устройств с помощью Microwave Office. Москва: СОЛОН-Пресс. 2003. С. 496. (Серия «Системы проектирования»).
3. [www.awrcorp.com/products/microwave-office](http://www.awrcorp.com/products/microwave-office) (сайт компании AWR)
4. <http://www.ansys.com/> (сайт компании ANSYS – разработчика программы HFSS Ansoft).