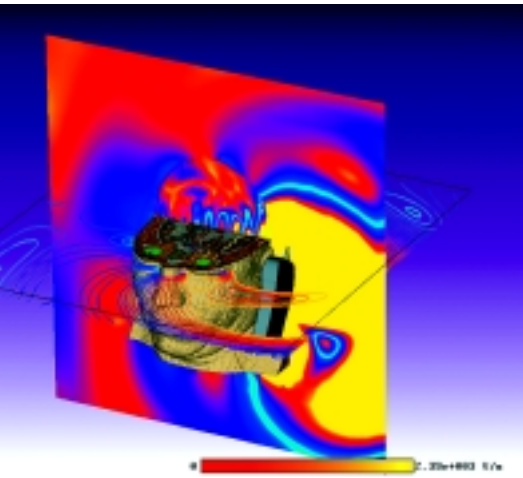


# Ощутить вселенную трехмерной

(По материалам компании CST)



**ПРОГРЕСС НЕ СТОИТ НА МЕСТЕ. ПРОШЛИ ВРЕМЕНА, КОГДА ПОЛНОЕ ТРЁХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ИНТЕРЕСОВАЛО ТОЛЬКО СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ АНТЕНН И ФИЛЬТРОВ НА ОБЪЁМНЫХ РЕЗОНАТОРАХ. СОВРЕМЕННАЯ ТЕНДЕНЦИЯ ПРИМЕНЕНИЯ БОЛЕЕ ВЫСОКИХ ЧАСТОТ, А ТАКЖЕ КОМПАКТНОСТЬ УСТРОЙСТВ ВЫНУЖДАЮТ ИНЖЕНЕРОВ УЧИТЫВАТЬ ЭФФЕКТЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН И ПОЛЕЙ РАССЕЯНИЯ В ЗАДАЧАХ, КОТОРЫЕ РАНЕЕ РЕШАЛИСЬ ТОЛЬКО ТРАДИЦИОННЫМИ СРЕДСТВАМИ МОДЕЛИРОВАНИЯ СХЕМ.**

Программный пакет CST Microwave Studio версии 3.4 производства немецкой компании COMPUTER SIMULATION TECHNOLOGY ([www.sct.de](http://www.sct.de)) является самой современной системой трёхмерного электромагнитного моделирования. Великолепная комбинация интуитивного пользовательского интерфейса, мощных функций построения полностью параметризованных геометрических моделей и чрезвычайно производительного вычислительного ядра позволяет значительно ускорить процесс проектирования и сократить время выхода изделия на рынок. В нашей статье приведён подробный обзор возможностей пакета CST MWS и его новых функций.

## ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В основе пакета CST MWS лежит метод определённых интегралов (FI), позволяющий найти решение уравнений Максвелла в дискретном пространстве без использования различных упрощений и допущений. Следовательно, этот метод применим как к электромагнитным, так и к другим физическим феноменам. Изначально метод определённых

интегралов был призван решать задачи, связанные с ускорением элементарных частиц, но на протяжении последних 25 лет динамично развивался. Метод позволяет определить различные физические характеристики электромагнитных полей в узлах пространственной сетки и получить информацию, например, об энергии поля. Таким образом, пользователь получает в руки чрезвычайно мощный математический аппарат, гарантирующий получение физического решения.

Метод определённых интегралов базируется на структурированной, но вовсе не обязательно ортогональной сетке. Хотя здесь есть некоторое сходство с методом конечных разностей (FD), фундаментальный подход, реализованный методом определённых интегралов, уникален.

## ПРОСТОТА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ CST MWS

Программа CST MWS имеет традиционный пользовательский интерфейс Windows, обеспечивающий пользователя всеми необходимыми инструмен-

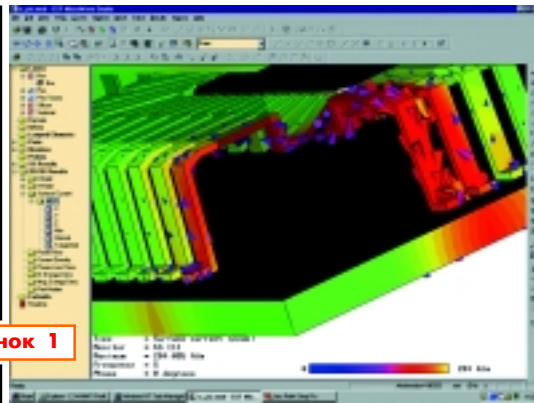


Рисунок 1

### Трёхмерное отображение распределения тока вдоль выводов интегральной микросхемы на частоте 5 ГГц

тами подготовки проекта, проведения моделирования. Использование мощных графических возможностей системы Windows позволяет реализовать как привычные, так и принципиально новые способы отображения результатов моделирования, как это показано на рис. 1 для случая трёхмерного распределения тока.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕМНЫХ СТРУКТУР

Система твердотельного моделирования трёхмерных объектов базируется на графическом ядре ACIS версии 6.2. Сложные трёхмерные структуры могут быть легко созданы из набора простых объектов посредством использования булевых операций, а также операций сопряжения поверхностей. Кроме того, имеется возможность выполнять экструзию двумерных профилей любой сложности в произвольно заданном направлении.

Использование графического ядра ACIS делает пакет CST MWS совместимым с популярными механическим САПР. Обмен информацией осуществляется через двунаправленные трансляторы двумерных (GERBER, DXF, GDSII) и трёхмерных (SAT, IGES, STEP, STL) форматов представлений проекта. Для облегчения этих операций в пакете существует набор специальных процедур восстановления формы объёмных объектов.

## СОВРЕМЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ РАЗБИЕНИЯ

Структурированная ортогональная решётка даёт возможность точно повторения геометрии объектов и расчёта электромагнитных полей при мини-

мальных затратах памяти. Современные вычислительные средства без труда позволяют выполнять моделирование с числом узлов сетки, равным нескольким миллионам. Эффективная организация обмена информацией позволяет получить во временной области быстрое решение в широком диапазоне частот.

Собственно процесс разбиения выполняется специальной экспертной системой, которая для получения точного представления модели-

руемой структуры использует только три основных типа данных: пространственную частоту отсчётов электромагнитной волны, геометрическую точность разбиения и максимально допустимую неоднородность сетки разбиения. Использование параметров по умолчанию обеспечивает хорошие результаты моделирования.

Хотя пользователь может легко изменить сетку разбиения для получения более точного описания объекта в критических областях моделируемой структуры, в общем случае это выполняется автоматически с помощью специального адаптивного метода, выполняющего оптимальное разбиение.

## ПРЕДСТАВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ В ВИДЕ ТОНКИХ СЛОЕВ

Вполне очевидно, что основным недостатком метода конечных разностей и подобных ему является плохое представление объёмной структуры. Уникальная технология аппроксимации для идеальных граничных условий (*Perfect Boundary Approximation*, PBA) позволяет исправить положение и получить точное решение при сравнительно грубой сетке разбиения. Метод PBA делает возможным моделирование криволинейных поверхностей произвольной формы без необходимости использования мельчайшей сетки разбиения и исключения погрешности ступенчатого приближения. Метод также позволяет учитывать толщину металлических слоёв или микрополосковых линий внутри ячейки решётки без явного её разбиения. Учёт сингулярности электромагнитного поля на кромках даёт возможность дополнительно снизить число узлов сетки, необходимое для получения точного значения импеданса и напряжённости поля.

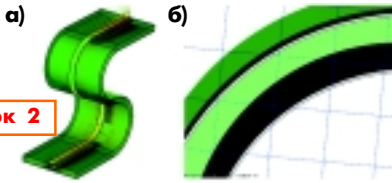


Рисунок 2

**Распределение тока и магнитного поля на частоте 15 ГГц полосковой линии в виде меандра (а) и распределение материала в ячейке решётки разбиения (б)**

Технология РВА обеспечивает точное представление металлических слоёв, ориентированных вдоль плоскостей решётки. Это достижение получило название тонкослойной техники (TST), так как позволяет получить решение для произвольно расположенных тонких металлических слоёв при значительном сокращении числа узлов сетки разбиения. На рис. 2 показано моделирование полосковой линии толщиной 10 мкм в форме меандра с применением технологии TST. Метод РВА учитывает точную кривизну объекта. Тонкие проводящие дорожки разрезают существующие ячейки разбиения сетки, но, несмотря на это, технология TST позволяет точно рассчитать поля.

## РАБОТА ВО ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ

Самым главным преимуществом метода определённых интегралов является точное вычисление характеристик электромагнитных полей во временной области. Моделирование в широком диапазоне частот может быть выполнено в ходе всего одного запуска решающей программы, при этом частотные характеристики системы будут получены быстро и точно, включая резкие резонансные выбросы. Потери могут быть введены для диэлектрических материалов посредством учёта тангенса угла диэлектрических потерь или проводимости, а для проводников — через модель поверхностного импеданса.

В новой версии пакета CST MWS появится возможность учёта частотно-зависимых свойств гироэлектрических и гиромагнитных материалов.

## ВОЗБУЖДЕНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ СТРУКТУРЫ

Для проведения анализа во временной области должен быть опреде-

лён один из трёх возможных способов возбуждения структуры: падающая плоская волна, источник тока (может быть произвольным образом расположен внутри области анализа) или волноводный вход. Если используется последний из названных способов, да ещё и для волновода, образованного несколькими проводниками, например, для копланарной линии, то новая функция описания многовыводного входа допускает использование произвольного распределения токов.

По умолчанию в качестве сигнала возбуждения используется синусоидальный сигнал с огибающей в форме гауссовой кривой, но пользователи могут определить собственные функции возбуждения. Использование прямоугольных импульсов позволяют смоделировать в исследуемой структуре прохождение и отражение цифровых сигналов.

## S-ПАРАМЕТРЫ

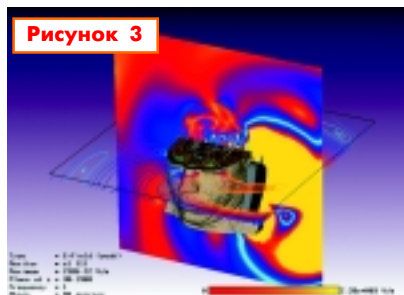
Первичным результатом моделирования являются обобщённые параметры матрицы рассеяния (S-параметры) для произвольного числа мод на каждом входе. Метод исключения (*de-embedding*) при расчёте S-параметров позволяет сократить объём вычислений, принимая во внимание только наиболее важную с электромагнитной точки зрения часть структуры.

Расчитанные S-параметры могут быть отображены различными способами на графиках и в таблицах, а также сохранены во внешний файл в формате Touchstone, что даёт возможность использовать их в программах моделирования схем. Более того, пакет CST Design Studio (CST DS), последняя разработка компании CST, позволяет легко объединять результаты расчётов, полученные с помощью программы CST MWS. Кроме того, здесь возможно комбинирование результатов, полученных для более высоких мод, аналитическими методами или любыми иными способами.

Помимо S-параметров, программа CST MWS даёт возможность получить экстракцию широкополосной многокаскадной схемы замещения в формате SPICE. Качество полученной модели может быть проверено тут же, внутри программы CST MWS.

## ТРЕХМЕРНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ

В ходе анализа на экран монитора могут быть выведены диаграммы



**Рисунок 3**  
**Распределение электрического поля в модели человеческой головы, облучаемой мобильным телефоном, работающим на частоте 1 ГГц**

поля в ближней и дальней зонах для произвольного числа частот. Возможности анимационного просмотра электрического и магнитного полей, поверхностных токов и потока мощности обеспечивают “взгляд изнутри” на моделируемое устройство, что способствует дополнительному пониманию его функционирования. Благодаря наличию функции возбуждения структуры плоской волной, появилась возможность вычисления эффективной площади отражения (RCS). Значительный интерес представляет расчёт коэффициента удельного поглощения (SAR) с учётом удельного поглощения и электрических особенностей живых тканей, таких как кожа, кости и мозг (рис. 3).

Эффективность использования памяти при анализе методом определённых интегралов даёт возможность моделирования структур, которые являются большими, по сравнению с длиной рабочей волны, особенно для расчёта полей в дальней зоне и эффективной площади отражения. Проблема представления мелких деталей на печатных платах решается комбинацией метода аппроксимации для идеальных граничных условий и метода определённых интегралов, что позволяет справляться с задачами с большим числом ячеек разбиения. Кроме перспективы исследования проблем электромагнитной совместимости (EMC), открываются новые области применения, такие как моделирование

фотонных частотно-запирающих структур (PBG) и частотно-селективных поверхностей.

## ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ

Производительность — это главная характеристика, делающая пакет CST MWS мощным инструментом инженерных расчётов. Эффективность этой системы моделирования была наилучшим образом продемонстрирована в ходе тестового сравнения, проведённого популярным изданием Microwave Engineering Europe в ноябре 2000 года, когда антенна Вивальди (рис. 4) была исследована с помощью программного обеспечения различных производителей. С помощью пакета CST MWS были получены более точные результаты в более широком диапазоне частот, что лишь один раз подчеркнуло превосходство временных методов анализа над частотными по затратам аппаратных и временных ресурсов. Время вычисления для широкополосного возбуждения от 0 до 10 ГГц составило 15 минут, что почти в 9 раз быстрее и в 8 раз экономичнее для ресурсов памяти, чем у других коммерческих продуктов на основе метода конечных элементов (FE).

## ВЫСОКОРЕЗОНАНСНЫЕ СТРУКТУРЫ

Преимущества вычисления нерезонансных структур во временной области вполне очевидны. Для моделирования высокорезонансных структур были разработаны дополнительные инструменты для повышения достоверности результатов. Автоматический авторегрессивный (AR) фильтр определяет частоты и добротности резонансов и прогнозирует будущее поведение сигнала. Если фильтр удовлетворяет нескольким критериям качества, то моделирование во временной области останавливается, а выигрыш во времени анализа может быть значительным. Авторегрессивный фильтр может также применяться и для последующей обработки результатов расчёта.

В противном случае, структура может быть разбита на нерезонансные части, которые можно промоделировать отдельно, а полученные результаты объединить в программе CST Design Studio, где принимается в расчёт взаимодействие даже самых незначительных мод.



**Рисунок 4**

**Представление антенны Вивальди в программе CST MWS (а) и рассчитанная диаграмма направленности в дальней зоне на частоте 10 ГГц (б)**

## ДОПОЛНЕНИЯ К АНАЛИЗУ ВО ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ

Программа CST MWS включает также дополнительное вычислительное ядро на собственных модах (*Eigenmode Solver*), предназначенное для моделирования фильтров на объёмных резонаторах. Алгоритм анализа мод позволяет разделить широкополосные S-параметры и собственные моды. На рис. 5 показана диаграмма поля одной из мод восьмиполосного фильтра в поперечном сечении. Кроме того, программа CST MWS включает решающее устройство в частотной области.

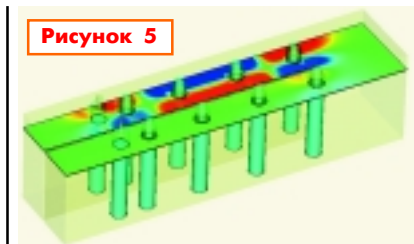


Рисунок 5

**Восьмиполосный фильтр,  
про моделированный модулем CST  
MWS Eigenmode**

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ С ПОМОЩЬЮ CST MWS

Программа CST MWS помогает в проектировании новых устройств, благодаря таким функциям, как параметризация, оптимизация и автоматизация, входящим в состав стандартной конфигурации.

Полное параметрическое описание элементов структуры позволяет легко выполнять изменения в проекте. Параметризация может быть проведена в любое время даже для готовых структур. Результаты расчёта для разных значений параметров отображаются на графиках в простой и наглядной форме.

Кроме того, программа CST MWS включает возможность автоматической оптимизации по произвольно заданным целям оптимизации и целевой функции.

## ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИЕ ФУНКЦИИ

Программа CST MWS использует язык Visual Basic for Applications (VBA) в качестве внутреннего командного языка. Это позволяет легко адаптировать программу к нуждам разработчика. Например, в VBA могут быть созданы любые диалоговые окна на на-

циональных языках, данные могут быть экспортированы в произвольной форме, а любые внешние данные загружены в программу и визуализированы. Через VBA-интерфейс доступно большое число настроек программы.

С использованием языка VBA может быть произведена вторичная обработка результатов анализа, как например, моделирование отражений сигналов на платах, анимация поля и создание специальных отчётов.

Программа CST MWS полностью поддерживает технологии, заложенные в операционную систему Windows, например, OLE-автоматизацию. Благодаря этому, пользователь может управлять программой CST MWS из пакета Microsoft Excel, задавать различные параметры, запускать расчёт, получать и обрабатывать результаты.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Программа CST Microwave Studio является на сегодняшний день самой производительной и точной системой полного трёхмерного моделирования СВЧ-устройств. Пакет включает мощные средства подготовки проекта, разнообразные методы анализа, возможность параметрического управления данными и оптимизации. Пакет полностью интегрируется в среду Windows и допускает тесное взаимодействие с другими приложениями.

Распространением программы MWS на территории СНГ и стран Балтии занимается компания ЭлектронТрейд ([www.electrade.ru](http://www.electrade.ru)). Любую дополнительную информацию о программе можно получить в офисе компании по телефону (095) 243-7250 или адресу [info@electrade.ru](mailto:info@electrade.ru).