

# Расчёт квадрифилярной антенны

Сергей Банков, Александр Давыдов,  
Александр Курушин (Московская обл.)

Описывается методика строгого электродинамического моделирования квадрифилярной антенны с использованием коммерческого программного обеспечения HFSS, CST MWS и MWO.

В настоящее время для проектирования антенн и других СВЧ-устройств широкое распространение получили системы компьютерного электродинамического моделирования, такие как HFSS [1], Microwave Office [2], Microwave Studio [5] и др. Применение численных методов решения задач электродинамики, являющихся основой указанных систем, существенно расширило круг решаемых инженерных задач. Появилась возможность анализировать с их помощью весьма сложные электродинамические устройства, например, антенные системы со схемой питания.

Может показаться, что использование мощных программных пакетов позволяет не думать о законах дифракции электромагнитных волн и теории цепей СВЧ, поскольку всё это заложено в программы САПР. До известной степени это верно. Однако применение численных систем моделирования порождает новые проблемы, требующие корректного решения.

Квадрифилярная спиральная антенна (КСА) является многоэлементной антенной системой, состоящей из нескольких излучателей. Эти излучатели могут быть соединены со схемой питания, которая формирует на входах элементарных излучателей возбуждающие напряжения с требуемыми амплитудами и фазами.

Электродинамический анализ такой антенной системы как единого целого требует больших затрат компьютерных ресурсов. Прямое решение задачи анализа с помощью таких программ, как HFSS, может потребовать длительных вычислений (несколько суток). Поскольку для оптимизации конструкции антенной системы требуется совершить большое число шагов, на каждом из которых решаются задачи анализа, такой путь часто не устраивает разработчика. Поэтому разумным

приёмом является декомпозиция устройства на отдельные части и анализ каждой из них соответствующими программными средствами.

В случае многоэлементной антенны естественно разделить её на схему питания и излучающую систему. Каждая из составных частей может рассматриваться как СВЧ-многополюсник, к матрице рассеяния которого предъявляются свои требования. Одним из них является согласование входов многополюсника. Например, необходимо обеспечить согласование всех входов излучающей системы с выходами схемы питания. Ситуация усложняется тем, что разные входы не развязаны друг с другом и питающие напряжения подаются на все входы одновременно.

Компьютерная модель позволяет определить все параметры матрицы рассеяния такого многополюсника, однако формулировка целевой функции, выражающей требование согласования, является задачей пользователя компьютерной программы. Одна из целей статьи заключается в корректной формулировке условий согласования, которую можно использовать для оптимизации, в частности, в системе HFSS.

Особенностью проектирования многоэлементных антенн является то, что части антенной системы удобно разрабатывать в различных системах проектирования. Например, время моделирования системы питания в программе Microwave Office значительно меньше, чем в программе HFSS. В то же время излучающую систему удобно моделировать в других САПР. Использование различных программных средств порождает проблему объединения их результатов для расчёта параметров устройства в целом. Далее мы покажем, как эта задача может быть решена с помощью аппарата матриц рассеяния.

В статье приводятся общие соотношения для расчёта ряда параметров многоэлементных антенн. Рассмотрен пример проектирования квадрифилярной антенны с полосковой схемой питания с использованием трёх разных систем электродинамического моделирования: HFSS, Microwave Office и EDEM [4].

## Входное сопротивление многоэлементной антенны

Для «обычной» однопортовой антенны входное сопротивление  $Z_{вх1}$  равно единственному элементу матрицы – элементу  $Z_{11}$ . Всё усложняется для многопортовой антенны, для которой входное сопротивление не равно элементу  $Z_{11}$  матрицы  $[Z]$ . В этом случае выражение для входного сопротивления  $Z_{вх,n}$  получаем, используя известное соотношение, связывающее коэффициент отражения в линии передачи,  $R_n$ , с входным сопротивлением:

$$Z_{вх,n} = Z_0 \frac{1 + R_n}{1 - R_n}, \quad (1)$$

где  $Z_0$  – характеристическое сопротивление линии передачи.

Отметим следующие моменты. При отсутствии взаимодействия входов антенны через свободное пространство все элементы матрицы рассеяния  $[S]$ , кроме диагональных  $S_{n,n}$ , равны нулю. Тогда коэффициенты отражения не зависят от соотношения между амплитудами падающих волн и равны диагональным элементам матрицы рассеяния [4]:

$$R_n = S_{n,n}. \quad (2)$$

Таким образом, полученные формулы необходимо применять только тогда, когда эффекты взаимной связи элементов сложной антенны становятся существенными.

Можно отметить также, что входные сопротивления со стороны отдельных входов многопортовой антенны могут быть различными даже при одинаковых  $S_{n,n}$ . Это имеет место, когда амплитуды падающих волн не равны друг другу.

При проектировании многоэлементных антенн с помощью систем численного моделирования следует обращать внимание на то, что при сходстве обозначений в программах их физический смысл может различаться. Например, HFSS рассчитывает матрицу рассеяния анализируемого устройства, поэтому параметры  $S_{n,m}$  доступны пользователю. Эта программа рассчитывает также входные сопротивления, причём для их расчёта используются коэффициенты отражения  $S_{n,n}$  а не  $R_n$ , определяемые соотношением (2). Поэтому результаты расчёта в программе HFSS должны быть скорректированы в соответствии с полученными выше результатами.

### ПРОЕКТИРОВАНИЕ КВАДРИФИЛЯРНОЙ СПИРАЛЬНОЙ АНТЕННЫ

Квадрифилярная спиральная антенна (КСА), показанная на рисунке 1, является четырёхэлементной антенной. Каждый её элемент – спиральный проводник, который возбуждается от вывода полосковой схемы питания. В идеальном случае схема питания создаёт падающие волны с одинаковой амплитудой и со сдвигом фаз на 90 градусов:

$$U_{\Pi 1} = 1, U_{\Pi 2} = e^{i\frac{\pi}{2}},$$

$$U_{\Pi 3} = e^{i\pi}, U_{\Pi 4} = e^{i\frac{3\pi}{2}}. \quad (3)$$

Применим формулы, полученные в работе [4], для рассматриваемой квадрифилярной антенны. С учётом соотношений между падающими волнами (3) запишем простое, но важное выражение:

$$S_{11\_com} = S_{11} + S_{12}e^{i\frac{\pi}{2}} + S_{13}e^{i\pi} + S_{14}e^{i\frac{3\pi}{2}} = S_{11} - S_{13}, \quad (4)$$

из которого получаем скорректированное значение входного импеданса антенны:

$$Z_{вх\_korr} = Z_0 \frac{1 + S_{11\_com}}{1 - S_{11\_com}}. \quad (5)$$

КСА обладает симметрией поворота. Кроме того, это устройство взаимное, так как оно не содержит взаимных сред, таких как ферриты. Именно симметрия и взаимность антенны позволяют уменьшить число элементов матрицы рассеяния и упростить проектирование.

Коэффициенты отражения по входам КСА не равны диагональным элементам матрицы рассеяния, но они одинаковы, что позволяет согласовывать любой из четырёх входов КСА. Остальные входы будут согласованы автоматически.

Численный анализ СВЧ-устройств основан на применении электродинамических методов, используемых в различных коммерческих программах: метод конечных элементов (HFSS), метод моментов (Momentum, MWO EMSight), метод интегральных уравнений (FEKO, EDEM), метод FDTD (CST).

Сначала рассмотрим особенности проектирования КСА без учёта схемы питания в системе HFSS. Первый этап проектирования заключается в вычерчивании антенны и разбиении модели на ячейки. Отметим трудности, которые свойственны программам электродинамического моделирования искривлённых объектов: при разбиении пространства анализа на тетраэдры возможно пересечение рёбер искривлённых соприкасающихся объектов, что может привести к значительному увеличению времени вычислений.

После черчения вибраторов и линий, связывающих всю конструкцию антенны, её необходимо охватить боксом, на поверхностях которого установлены граничные условия излучения. Решение электродинамической задачи по определению поля в каждой точке внутри бокса даёт возможность рассчитать соотношения между падающими и отражёнными волнами в сечениях дискретных портов и найти параметры  $S_{11}$  (см. рис. 2),  $S_{12}$ , и т.д. Приведённая на рисунке 2 характеристика соответствует КСА с воздушным заполнением. Выведем на график (см. рис. 3) реальные и мнимые части входного импеданса антенны.

Расчёт КСА в системе HFSS является достаточно трудоёмкой задачей, требующей нескольких часов компьютерного времени. Поэтому в качестве альтернативного средства моделирования нами была рассмотрена система EDEM [5], использующая метод моментов. Расчёт КСА в этой системе занимает существенно меньшее время (несколько минут). Однако программа EDEM не позволяет анализировать конструкции, содержащие диэлектрические тела. Поэтому представляет интерес сравнение результатов расчётов, полученных с помощью двух разных САПР.

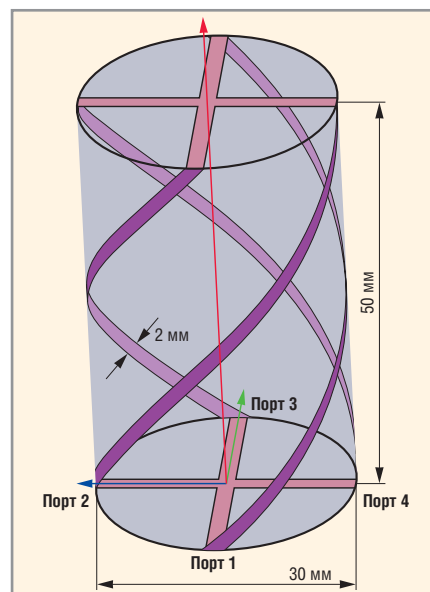


Рис. 1. Конструкция КСА, состоящая из четырёх вибраторов, питаемых со стороны четырёх портов

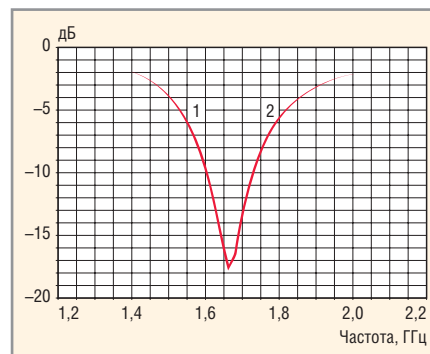


Рис. 2. Частотная характеристика квадрифилярной антенны

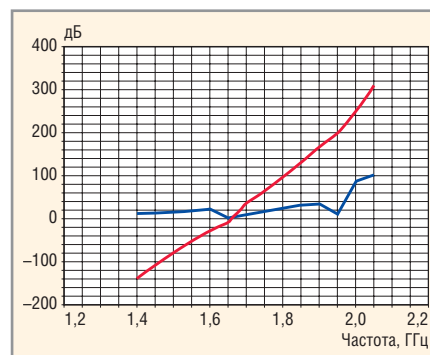


Рис. 3. Входной импеданс КСА, рассчитанный при помощи HFSS

На рисунке 4 показаны зависимости действительной и мнимой частей входного импеданса КСА от частоты. Отметим, что в обоих представленных случаях речь идет об импедансе, полученном без учёта взаимной связи вибраторов КСА. Сравнение рисунков 3 и 4 показывает, что расчёты дали очень близкие результаты, что служит косвенным доказательством достоверности решения.

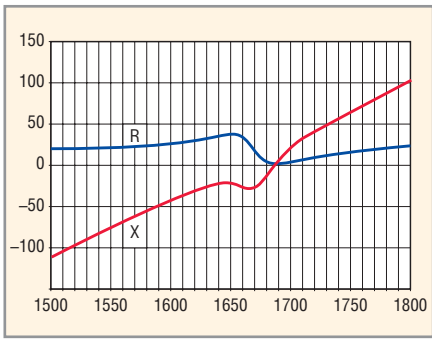


Рис. 4. Входной импеданс quadriplanar антенны, рассчитанный при помощи EDEM

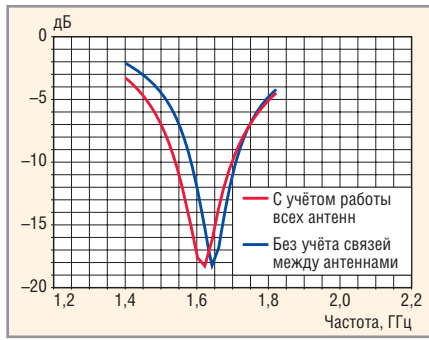


Рис. 5. Зависимости коэффициента отражения S11 без учёта взаимной связи и с учетом её

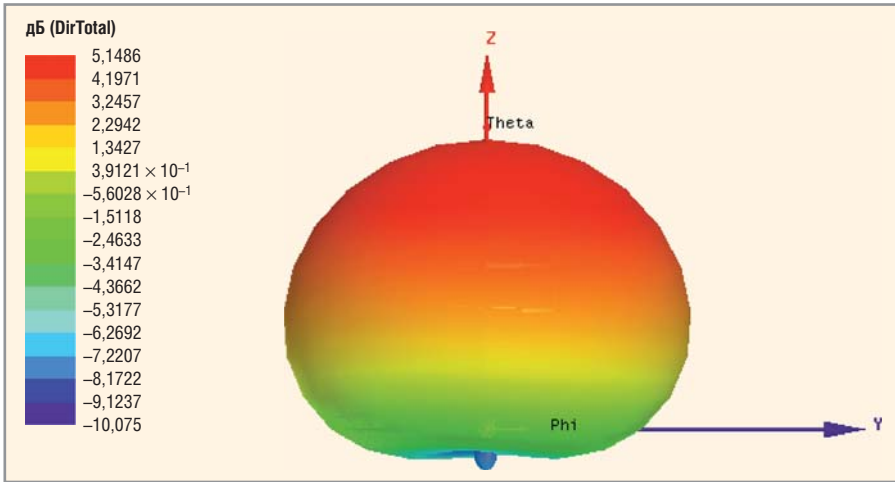


Рис. 6. Диаграмма направленности quadriplanar антенны

Следующий этап проектирования КСА – учёт взаимного влияния элементов антенны с помощью соотношения (5). На рисунке 5 показаны частотные зависимости коэффициента отражения КСА с учётом и без учёта взаимодействия её элементов через свободное пространство. Видно, что учёт взаимной связи привёл к сдвигу резонансной частоты КСА примерно на 50 МГц, что является заметной величиной для антенн этого класса. Коэффициент отражения на центральной частоте остался практически неизменным.

На рисунке 6 представлена диаграмма направленности КСА, показывающая, что несмотря на сравнительно небольшие электрические размеры, КСА обладает хорошей направленностью. В верхнее полупространство антенна излучает значительно интенсивнее, чем в нижнее. Говоря о параметрах КСА, следует также отметить её поляризационные характеристики. Коэффициент эллиптичности КСА близок к единице в верхнем полупространстве. Таким образом, антенна излучает волны с поляризацией, близкой к круговой.

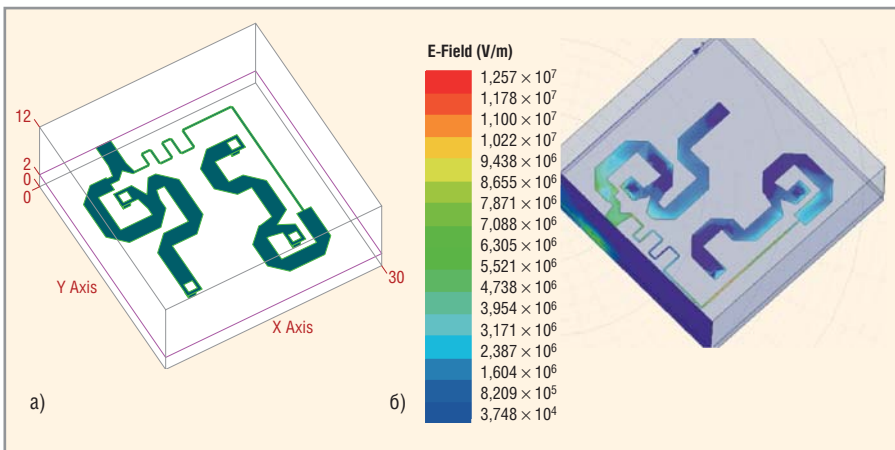


Рис. 7. (а) Схема питания в MWO; (б) схема питания в HFSS

### ПРОЕКТИРОВАНИЕ СПИРАЛЬНОЙ АНТЕННЫ С ПОЛОСКОВОЙ СХЕМОЙ ПИТАНИЯ В СИСТЕМАХ MICROWAVE OFFICE И HFSS

Программа MWO [1] использует два метода для расчёта СВЧ-устройств: метод Олинера, который даёт аналитические выражения для матриц рассеяния неоднородностей тракта, и метод моментов, реализующий электродинамический анализ полосковой схемы. Мы использовали программу EMSight, реализующую в системе MWO метод моментов. Структура полосковой схемы питания, начерченной в MWO, показана на рисунке 7а.

Наряду с MWO, для расчёта схемы питания КСА мы также использовали HFSS. Структура, рассчитываемая методом конечных элементов в HFSS, показана на рисунке 7б. Использование разных программ для решения одной и той же задачи позволяет контролировать достоверность решения. При этом следует отметить существенно большее быстродействие MWO по сравнению с HFSS.

В силу жёстких требований к габаритам антенны, элементы полосковой схемы расположены весьма близко друг к другу (см. рис. 8). Поэтому их взаимное влияние через реактивные поля и поля излучения становится весьма существенным. В этом случае декомпозиция устройства на элементарные полосковые неоднородности, являющаяся основой метода Олинера, не может правильно описать сложную картину взаимодействия электромагнитных волн в такой структуре. Это определило выбор электродинамических методов в качестве основных для проектирования схемы питания КСА.

Основная задача схемы питания КСА – равное деление по мощности и

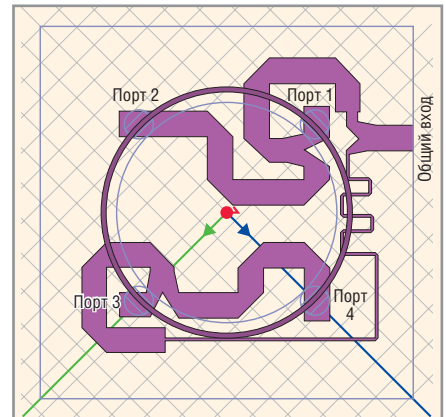


Рис. 8. Подключение quadriplanar антенны



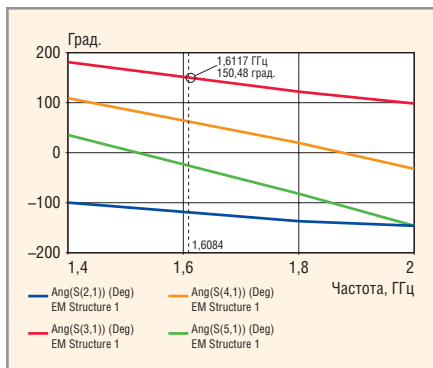


Рис. 9. ФЧХ элементов матрицы рассеяния схемы питания КСА

создание разности фаз в 90 градусов в диапазоне частот. Качество решения этой задачи в системе MWO можно оценить из рисунков 9 и 10, на которых представлены частотные зависимости модулей и фаз коэффициентов передачи с центрального входа схемы питания на входы, соединённые с портами КСА. Возможности программы MWO позволяют эффективно оптимизировать конструкцию делителя мощности и получить равноамплитудное деление мощности на входах схемы питания.

Программа трёхмерного моделирования также позволяет оптимизировать устройство по заданному критерию качества. В качестве целевой функции можно задать отличие разностей фаз на выходах схемы питания от требуемых значений 0°, 90°, 180° и 270°. В результате оптимизации получаем близкие зависимости амплитудных и фазовых характеристик, рассчитанных посредством MWO и HFSS.

На рисунке 11 показаны фазочастотные зависимости коэффициентов передачи схемы питания, полученные с помощью HFSS. Они весьма близки к зависимостям, приведённым на рисунке 9.

Задачу моделирования КСА вместе со схемой питания стимулировали экспериментальные исследования макета КСА. Измеренная зависимость коэффициента стоячей волны (КСВ) от частоты показана на рисунке 12. Оказалось, что результаты расчётов заметно отличаются от экспериментальных данных. В первую очередь это относится к ширине полосы КСА, которая определяется по заданному уровню КСВ. Интересно, что экспериментальная полоса рабочих частот оказалась почти в полтора раза шире расчётной. Для выяснения причин этого расхождения была построена полная модель КСА, объединяющая данные EDEM (HFSS) расчёта

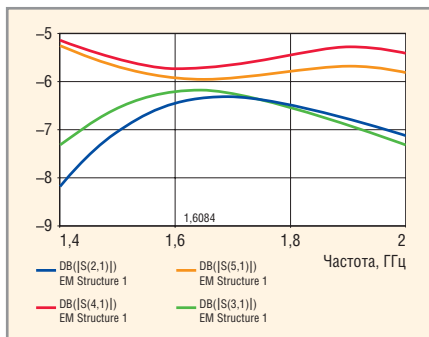


Рис. 10. АЧХ элементов матрицы рассеяния схемы питания КСА

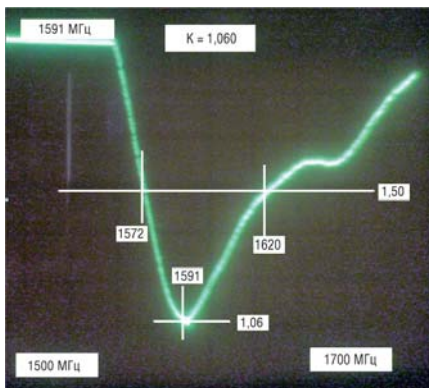


Рис. 12. Экспериментальная зависимость КСВ квадрифилярной антенны от частоты

собственно КСА и данные MWO расчёта схемы питания.

На рисунке 13 показана расчётные зависимости КСВ проектируемой КСА (линия 1) вместе с полосковой схемой питания от частоты (линия 2).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ужесточение требований к характеристикам современных излучающих систем приводит к усложнению их конструкций. Такие сложные антенны имеют один вход, но могут иметь большое количество излучающих элементов. Одной из распространённых конструкций такого типа можно считать регулярную антенную решётку. Задачи, решаемые в процессе разработки для получения характеристики антенны в дальнем поле, а также частотных зависимостей входного импеданса, моделируются при помощи современных коммерческих программных пакетов.

При решении поставленной нами задачи было выявлено, что:

- современные программы позволяют эффективно рассчитывать многопортовые антенны с различными сигналами на входах;
- взаимное влияние отдельных излучателей (объясняемое близостью линий и синхронностью текущих токов) определяет условия согласо-

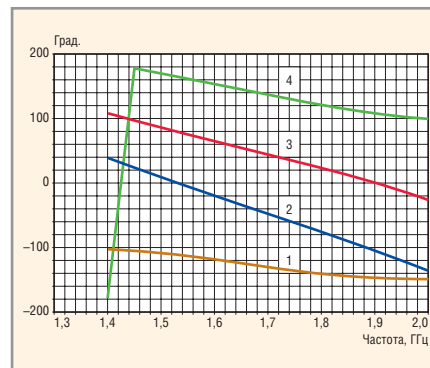


Рис. 11. ФЧХ элементов матрицы рассеяния схемы питания КСА, полученные при помощи HFSS

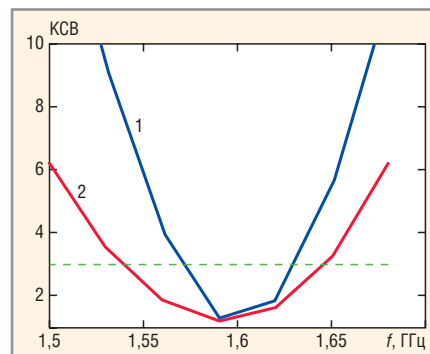


Рис. 13. КСВ квадрифилярной антенны

вания и характеристики многопортовых антенн.

В результате исследования, в многопортовых антеннах выявлена зависимость линейных параметров антенны от мощностей, подаваемых на отдельные входы, что делает её похожей на параметрические цепи.

Формулы, приведённые в статье, можно использовать при проектировании многопортовых антенн. Компьютерное моделирование показывает, что в результате учёта влияния всех портов резонансная частота квадрифилярной антенны приближается к экспериментальному значению на 20...30 МГц.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Разевиг В.Д., Потатов Ю.В., Курушин А.А. Проектирование СВЧ-устройств с помощью Microwave Office. Под ред. В.Д. Разевига. М.: СОЛОН-Пресс, 2003.
2. Сазонов Д.М., Гридин А.Н., Мишустин Б.А. Устройства СВЧ. М.: Высшая школа, 1981.
3. Банков С.Е., Курушин А.А., Разевиг В.Д. Анализ и оптимизация трёхмерных СВЧ-структур с помощью HFSS. Под ред. С.Е. Банкова. М.: СОЛОН-Пресс, 2004.
4. Банков С.Е., Давыдов А.Г., Курушин А.А. Проектирование многопортовых излучаемых структур. EDA Express. 2007. № 15.
5. <http://www.cst.de/>.
6. <http://www.edem3d.ru>.