

Моделирование системы антенна – обтекатель в пакете программ FEKO

Наталья Кисель

В статье приведены результаты моделирования характеристик антенны, укрытой обтекателем. Представлены численные результаты, полученные с помощью специализированного программного продукта FEKO, который предназначен для электромагнитного моделирования СВЧ-техники. Метод решения, положенный в основу этого пакета, позволяет эффективно оптимизировать структуры больших электрических размеров.

ВВЕДЕНИЕ

Разработки бортовых и наземных антенн, укрытых обтекателем, в настоящее время невозможны без использования современных технологий проектирования, учитывающих разнообразную топологию структуры, включая возможности синтеза и оптимизации формы обтекателя и взаимное расположение обтекателя и антенной системы.

Основными задачами проектирования обтекателя является обеспечение высокой радиопрозрачности, сохранение формы и ориентации диаграммы направленности антенны при всех углах сканирования. Например, самолётные антенные обтекатели должны обеспечить высокую прозрачность для радиоизлучения в угловом диапазоне $\pm 85^\circ$ от носового направления на обтекатель, одновременно являясь частью силового корпуса фюзеляжа. Даже качественно выполненные обтекатели уменьшают дальность действия антенных систем, поскольку коэффициент радиопрозрачности находится в пределах 0,7...0,85, а угловые ошибки определения направления на цель достигают десятков угловых минут.

При проектировании обтекателей требуется учёт элементов силовых конструкций на обтекателе и аэродинамических требований к форме обтекателя [1, 2]. Необходимость совпадения поверхности обтекателя с обводами самолёта, наличие силовых элементов на поверхности обтекателя приводят к искажению диаграммы направленности [3]. Поскольку обтекатель находится в ближней зоне по отношению к размерам антенны, наибольшие изменения диаграммы проявляются в области боковых лепестков, что связано с влиянием обтекателя на распределение поля в апертуре антенны.

Электродинамические модели обтекателей должны предусматривать возможность расчёта их характеристик в широкой полосе частот, обеспечивая требования малой радиолокационной заметности. Основной вклад в эффективную поверхность рассеяния (ЭПР) вносят зеркальные отражения электромагнитных волн от поверхности обтекателя, рассеяния волн на оконечности обтекателя большой кривизны («носике»), возбуждение поверхностной волны на диэлектрической стенке и её отражения от неоднородностей

материала, стыков, сочленения обтекателя и металлического корпуса. Как указано в [2], наибольшие значения ЭПР имеют место, когда «блестящая» точка на поверхности обтекателя находится в области её малой кривизны при нормальном падении волны на носовую часть обтекателя. За счёт нарушения электрической однородности в местах соединения материала обтекателя с корпусом самолёта образуются «блестящие» точки с уровнем ЭПР 0,1...1 м². Это совершенно неприемлемо для летательных аппаратов пятого поколения, для которых уровень ЭПР должен находиться в пределах 0,01...0,1 м². Кроме того, электродинамические модели обтекателей должны предусматривать возможность расчёта их характеристик в широкой полосе частот, обеспечивая требования малой радиолокационной заметности.

В работах [3–10] рассмотрены различные подходы к моделированию частных случаев антенн, укрытых обтекателем. В качестве метода решения использованы конечно-разностный метод [2], метод физической оптики [10] и метод моментов. Особое внимание уделено расхождению диаграмм направленности антенны с обтекателем в носовой части обтекателя.

Алгоритмы, применяемые для анализа характеристик модели, базируются на методах геометрической оптики без учёта многократных отражений от стенки обтекателя. Данный подход может быть адаптирован для любого типа антенны, при любом способе сканирования лучом, для любой поверхности обтекателя, образующая (обвод) ко-

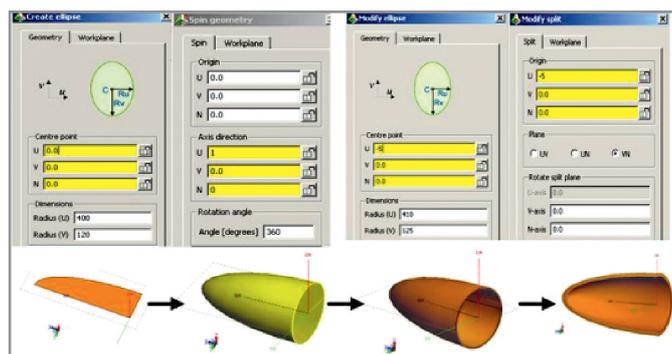


Рис. 1. Этапы моделирования системы антенного обтекателя в пакете программ FEKO

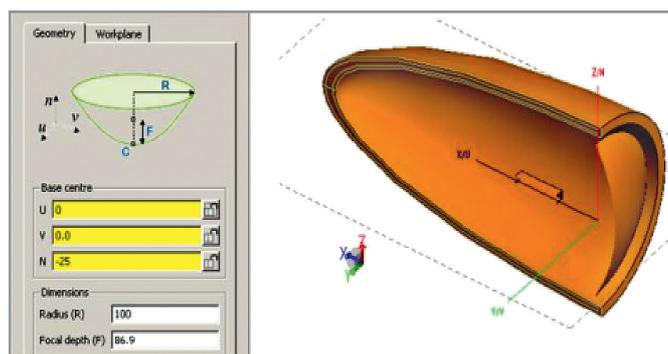


Рис. 2. Моделирование системы антенна – обтекатель в пакете программ FEKO

того задана аналитически, и любой конструкции стенки, выполненной из изотропных (силовые слои) и анизотропных (сотовый наполнитель) материалов.

Дополнительным источником погрешностей существующих методов анализа является аппроксимация плоскостью фронта волны, падающей на внутреннюю стенку обтекателя. В реальных условиях фронт падающей волны не является плоским, поскольку обтекатель находится в ближней зоне излучающих антенн.

При численном моделировании электродинамических характеристик антенн в присутствии диэлектрической оболочки одной из важнейших задач является адекватное моделирование системы. В резонансной области наибольшее распространение получили методы, использующие строгую постановку задачи, например метод интегральных уравнений (ИУ) [7]. При больших линейных электрических размерах обтекателя обычно применяют метод геометрической оптики, а для моделирования систем с электрическими параметрами $10 \dots 100$ длин волн используют методы физической оптики.

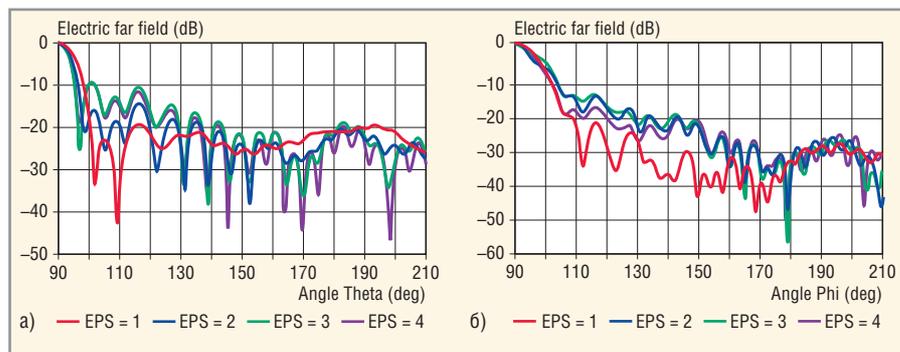


Рис. 3. Диаграммы направленности системы антенна – обтекатель при различных значениях диэлектрической проницаемости

а) в Е-плоскости, $\varphi = 0^\circ$; б) в Н-плоскости, $\theta = 90^\circ$

Применение каждого из этих методов имеет границы целесообразности (например, при больших размерах обтекателя для строгих подходов) или приводит к существенным погрешностям расчёта поля в определённых угловых направлениях (например, в области носовой части обтекателя для методов физической и геометрической оптики). Наиболее интересным представляется сочетание методов геометрической и физической оптики и метода ИУ при анализе влияния обтекателей на характеристики антенн, что позволяет выполнить более точ-

ный анализ характеристик больших обтекателей во всём угловом диапазоне.

Таким образом, различные подходы к анализу характеристик системы антенна – обтекатель имеют ряд существенных ограничений, и, кроме того, в их рамках можно реализовать частные случаи геометрии как обтекателя, так и типа антенны. Наиболее широкие возможности для решения рассматриваемой задачи предоставляют специализированные программные пакеты электромагнитного проектирования FEKO, HFSS и CST Microwave Studio.

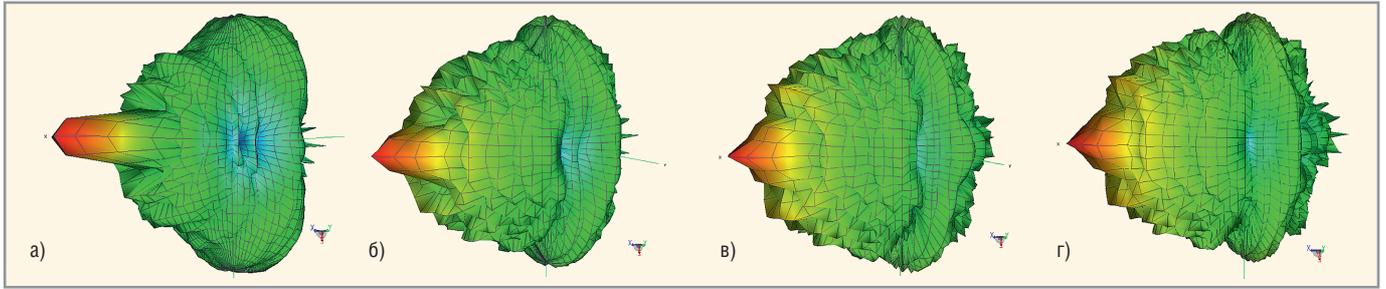


Рис. 4. Трёхмерные диаграммы направленности системы антенна – обтекатель при различных значениях диэлектрической проницаемости
а) $\epsilon = 1$; б) $\epsilon = 2$; в) $\epsilon = 4$; г) $\epsilon = 6$

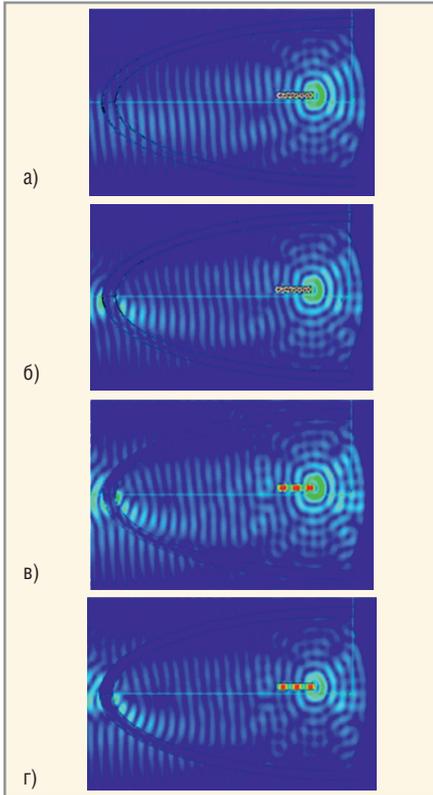


Рис. 5. Распределение напряжённости электрического поля в ближней зоне для системы антенна – обтекатель в Е-плоскости при различных значениях диэлектрической проницаемости
а) $\epsilon = 1$; б) $\epsilon = 2$; в) $\epsilon = 4$; г) $\epsilon = 6$

В настоящей работе моделирование характеристик системы антенна – обтекатель выполнено на основе пакета

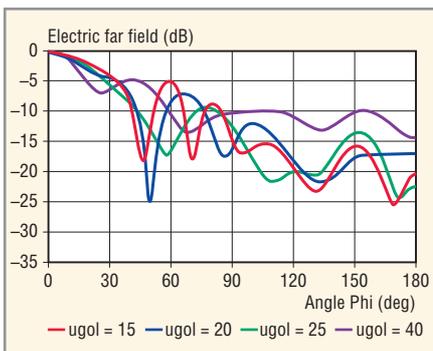


Рис. 9. Диаграммы направленности в Н-плоскости системы антенна – обтекатель при различных значениях угла раскрытия обтекателя

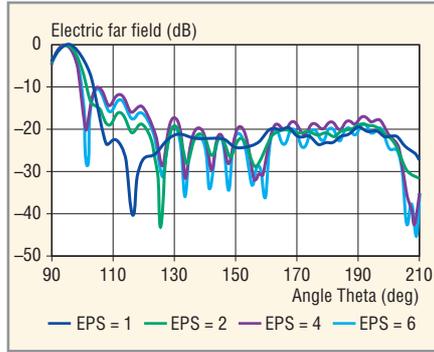


Рис. 6. Диаграммы направленности системы антенна – обтекатель при линейных фазовых искажениях в Е-плоскости
 $\varphi = 0^\circ$

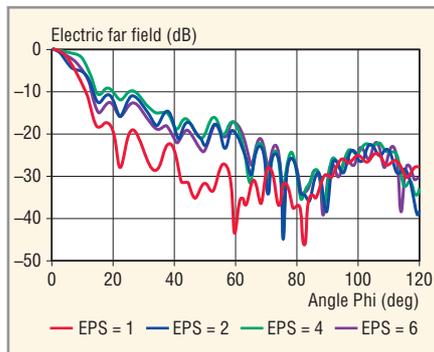


Рис. 7. Диаграммы направленности системы антенна – обтекатель при линейных фазовых искажениях в Н-плоскости
 $\theta = 90^\circ$

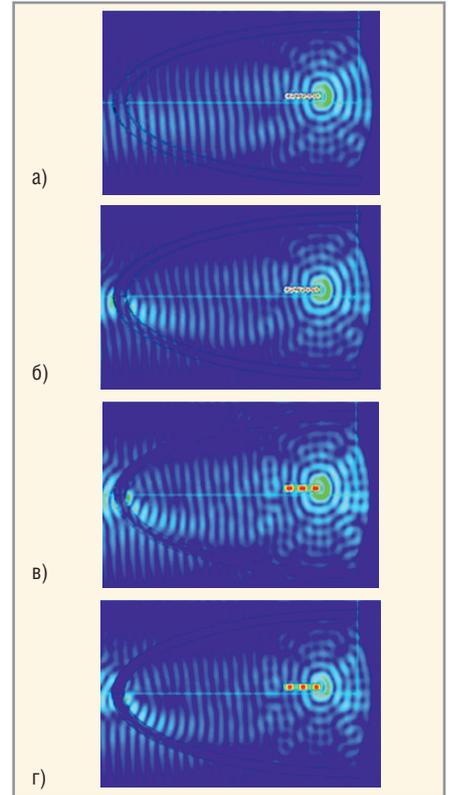


Рис. 8. Распределение напряжённости электрического поля в ближней зоне для системы антенна – обтекатель в Е-плоскости при различных значениях диэлектрической проницаемости и линейных фазовых искажений
а) $\epsilon = 1$; б) $\epsilon = 2$; в) $\epsilon = 4$; г) $\epsilon = 6$

программ FEKO, в основу которого положены точные методы моделирования и приближённые методы (метод геометрической оптики, метод физической оптики), а также возможность их комбинированного использования.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕННЫ С ОБТЕКАТЕЛЕМ

Система антенна – обтекатель представляет собой зеркальную антенну, окружённую обтекателем вытянутой конической формы. Стенки обтекателя характеризуются толщиной d (которая может быть переменной) и диэлектрической проницаемостью ϵ . Модель

задачи в трёхмерном представлении формируется с помощью набора и объединения простейших геометрических фигур. Этапы моделирования системы антенна – обтекатель в пакете FEKO показаны на рисунках 1 и 2. Расчёты выполнялись на частоте 9,375 ГГц, электрическая толщина обтекателя $kd = 4$.

На рисунке 3 приведены диаграммы направленности в Е- и Н-плоскостях системы антенна – обтекатель при различных значениях относительной диэлектрической проницаемости $\epsilon = 1; 2; 4; 6$. Как и следовало ожидать, материал обтекателя оказывает существенное влияние на диаграмму направленности антенны (см. рис. 4). Наибольшее

влияние на диаграмму направленности наблюдается при увеличении диэлектрической проницаемости материала обтекателя в области бокового излучения в угловом секторе $\theta = \pm(10^\circ \dots 90^\circ)$ по отношению к нормали на носовое направление.

На рисунке 5 приведено распределение напряжённости электрического поля в ближней зоне для системы антенна – обтекатель при различных электрофизических параметрах материала обтекателя. Видно, что при увеличении диэлектрической проницаемости фазовый фронт волны всё более искривляется, что ведёт к увеличению боковых лепестков и искажению диаграммы направленности. Аналогичные распределения были получены методом ИУ для двумерной задачи антенна – обтекатель.

Кроме того, было исследовано влияние линейных фазовых искажений на диаграмму направленности системы антенна – обтекатель. Смещение фазового центра облучателя в направлении, перпендикулярном оси зеркала, приводило к повороту диаграммы направленности в сторону, противоположную смещению облучателя. Угол поворота диаграммы направленности (в данном случае $6,3^\circ$) определялся смещением облучателя и фокусным расстоянием.

Смещение облучателя из фокуса широко используется для управления диаграммой направленности антенны. На рисунках 6 и 7 изображены диаграммы направленности системы антенна – обтекатель при различном значении диэлектрической проницаемости и линейных фазовых искажениях.

На рисунке 8 изображены распределения поля в ближней зоне системы антенна – обтекатель с различной диэлектрической проницаемостью и линейными фазовыми искажениями. Следует учитывать, что при смещении облучателя из фокуса фазовое распределение поверхности раскрыва нелинейно даже при отсутствии обтекателя, поскольку фаза изменяется не только по линейному закону, но и по кубическому, что приводит к искажению диаграммы направленности. Наличие обтекателя усиливает нелинейность фазового распределения на поверхности раскрыва зеркала. Во избежание значительных искажений, обусловленных кубической фазовой погрешностью, угол поворота диаграммы направлен-

ности не должен превышать удвоенной ширины главного лепестка по половинной мощности.

Авторами было исследовано влияние обтекателя конической формы при различных геометрических и электрофизических параметрах обтекателя. Влияние формы обтекателя моделировалось путём изменения угла при вершине обтекателя для внутреннего и внешнего конуса; относительная диэлектрическая проницаемость материала обтекателя составляла $\epsilon = 4$. На рисунке 9 приведены диаграммы направленности в Н-плоскости системы антенна – обтекатель. Как видно из семейства диаграмм, рост угла раскрыва в «носовой» части обтекателя приводит к росту бокового излучения, что объясняется увеличением уровня поля, отражённого от обтекателя в направлении зеркала. Распределение напряжённости электрического поля в непосредственной близости от обтекателя показано на рисунке 10.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Программный пакет FEKO может быть успешно использован для исследования влияния обтекателя на характеристики антенны на основе строгого электродинамического подхода. Как показали исследования, этот пакет является мощным инструментом решения задач оптимизации геометрических и электрофизических параметров антенного обтекателя с целью снижения его влияния на диаграмму направленности антенны. В рамках пакета программ имеется возможность исследования обтекателей с кусочно-неоднородными электрофизическими параметрами материала. Несомненным достоинством пакета является гибридный подход, позволяющий комбинировать точные и высокочастотные методы решения при моделировании.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Kanlun B.A.* Антенные радиопрозрачные обтекатели (этапы исследований и разработок). Радиотехника. 2002. № 11. С. 6–15.
2. *Бойко М.А., Тутов А.Н., Ястребов В.П.* Обтекатели РЛС самолетов нового поколения. Радиотехника. 2002. № 11. С. 39–40.
3. *Gordon R.K., Mittra R.* Finite Element Analysis of Axisymmetric Radomes. IEEE Trans., Antenna Propagation. July 1993. Vol. AP-41. No 7. P. 975–981.
4. *Singh S., Wilton D.R.* Analysis of an Infinite Periodic Array of Slot Radiators with Dielectric

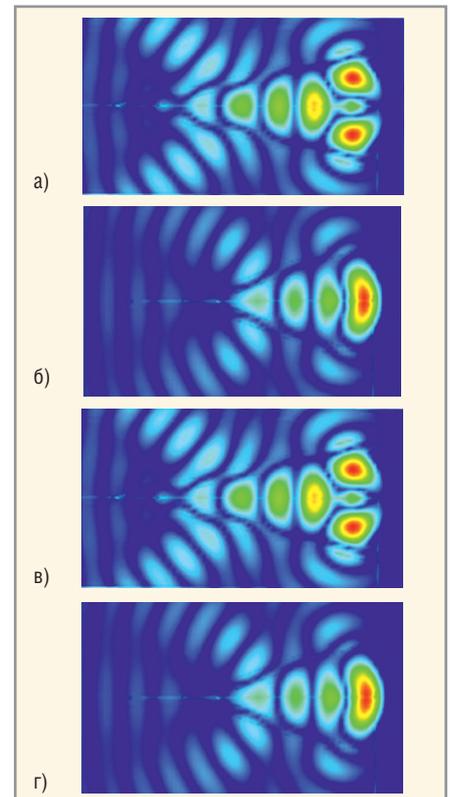


Рис. 10. Распределение напряжённости электрического поля в ближней зоне для системы антенна – обтекатель в Е-плоскости при различных значениях угла раскрыва обтекателя

а) $\alpha = 15^\circ$; б) $\alpha = 20^\circ$; в) $\alpha = 25^\circ$; г) $\alpha = 40^\circ$

Loading. IEEE Trans., Antenna and Propagation. 1991. Vol. AP-39. No 2. P. 190–196.

5. *Chu R.-S.* Analysis of an Infinite Phased Array of Dipole Elements with RAM Coating on Ground Plane and Covered with Layered Radome. IEEE Trans., Antenna and Propagation. 1991. Vol. AP-39. No 2. P. 164–176.
6. *Bayard P.R.* Analysis of infinite Arrays of Microstrip-Fed dipoles printed on protruding dielectric substrates and covered with a dielectric radome. IEEE Trans., Antenna and Propagation. 1994. Vol. AP-42. No 1. P. 82–89.
7. *Sadighi A., Arva E.* Deformation of Horizontal Radiation Pattern of TV Transmitting Antennas Due to a Thin Dielectric Radome. IEEE Trans., Antenna and Propagation. August 1992. Vol. AP-40. No 8. P. 776–782.
8. *Yurchenko V.B., Aybans A., Nosich A.I.* Numerical Optimization of a Cylindrical Reflector-in-Radome Antenna System. IEEE Trans., Antenna and Propagation. 1999. Vol. AP-47. No 4. P. 668–673.
9. *Altintas A., Ouardani S., Yurchenko V.B.* Approximating circular radome by dielectric slab in the antenna simulations. Microwave Physics and techniques. 1997. P. 291–296.
10. *Rengarajan S.R., Gillespie E.S.* Asymptotic Approximations in Radome Analysis. IEEE Trans., Antenna and Propagation. 1998. Vol. AP-36. No 3. P. 635–644.

