

К. М. Зейде

ПРЕДСКАЗАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭМ ДИФРАКЦИИ В СИСТЕМАХ С ВРАЩАЮЩИМСЯ РАССЕИВАТЕЛЕМ

В этой работе описывается метод предсказания поведения вторичного электромагнитного поля, основанный на корреляционных коэффициентах, вычислительного эксперимента по рассеянию ЭМВ от вращающегося цилиндра. Использование этого метода существенно сокращает время расчета дифракционной задачи.

Ключевые слова: *дифракция, рассеяние, предсказание, моделирование.*

In this work describes the prediction method based on correlating coefficients of computational experiment of electromagnetic scattering on rotating cylinder. Using this method instead of simulating significantly reduces the time of obtaining the desired results. The method was tested statistically on the created mathematical model of a physical system.

Keywords: *diffraction, scattering, predicting, modeling.*

Предсказание поведения математической модели, часто преследует цель экономии времени, особенно в контексте длительного симулирования. Используя предложенный алгоритм, возможно с определенной степенью точности предсказать изменение результатов моделирования, относительно эталонной системы. Данный подход, фактически является сведением результатов моделирования к более общему виду, в целях оптимизации и получения требуемого результата.

Математическая модель симулирует рассеяние плоской электромагнитной волны от вращающегося слабопроводящего круглого, однородного цилиндра, ориентированного перпендикулярно к волновому вектору падающей волны, и бесконечному по этой оси [1]. Эталонной системой является система с неподвижным цилиндром, при прочих равных параметрах. Цель предсказания — указать качественно и количественно влияние вращения цилиндра на его диаграмму рассеяния (ДР). Данный алгоритм может быть также использован и для учета влияния вращения на другие радиолокационные параметры рассеивателя.

При высоких угловых скоростях (Ω), угол ориентации максимума главного лепестка диаграммы рассеяния (θ_{max}), смещается в противоположную сторону, относительно направления вращения (при определенных входных параметрах направление смещения может совпадать с направлением вращения [2]). При увеличении Ω , растут потери ЭМ мощности в среде, связанные с поверхностным током, как следствие уменьшается рассеянная амплитуда. Коэффициент соот-

носимости по скорости задается в форме (a — радиус цилиндра; V_ϕ — фазовая скорость распространения падающей волны)

$$\tau v = \frac{\Omega a}{V_\phi} \quad (1)$$

Алгоритм предсказания (эталонная ДР априорно известна):

1. Получение функций изменения вида ДР: $\theta_{max}(\tau v)$ и $\langle E \rangle(\tau v)$ ($\langle E \rangle$ — средняя рассеянная мощность электрического поля);
2. Установление границ линейного участка функций (разница достоверно линейной функции и экспериментально полученной, показывает точность предсказания);
3. Нахождение аналитического уравнения прямой, соответствующей, линейному участку функции;
4. Решение уравнений, относительно θ_{max} и $\langle E \rangle$ для τv ;
5. Корректировка эталонной ДР, с учетом найденных величин.

На рис. 1 показаны ДР для вращающегося цилиндра, полученные моделированием системы и предсказанием по указанному алгоритму. Эталонная система представлена следующим образом: нормированная к единице амплитуда падающей плоской волны, с частотой 2 ГГц, распространяется в вакууме. Для цилиндра: $a = 0,1$ м, $\epsilon r = 4$, $\mu r = 1$, $\sigma = 0,012$ см/м.

Рассчитанные функции изменения ДР (в квадратных скобках указаны границы линейной области для τv):

$$\begin{aligned} \Theta_{max}(\tau v) &= 135,636 \tau v + 0,881 & [0,0055 \div 0,023]; \\ \langle E \rangle(\tau v) &= -1,041 \tau v + 1,003 & [0,003 \div 0,027]. \end{aligned} \quad (2)$$

Корректировка эталонной ДР производится геометрическим образом, и не требует особых временных и вычислительных ресурсов.

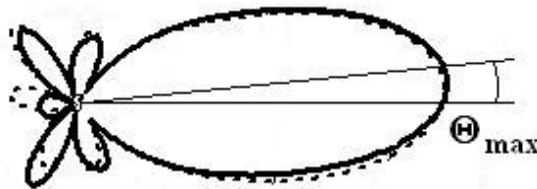


Рис. 1. Диаграммы рассеяния для вращающегося цилиндра, при $\tau v = 0,02$:

(—) — результат предсказания; (---) — результат моделирования

Как видно из рис. 1, главный и боковые лепестки диаграммы практически полностью совпали, однако отраженная волна существенно отличается. Этот факт накладывает определенные ограничения на диапазон достоверности алгоритма предсказания. В представленном случае среднеквадратичное отклонение

амплитуды результирующих функций составляет $\sim 0,009$, что является прямой оценкой точности предсказания.

Обоснование предложенного алгоритма заключается, во-первых, в точностно-временной оценке, а, во-вторых, в ширине диапазона применимости. Нет особого смысла предсказывать быстро анализируемые системы, или системы с априорно известным результатом, данная работа актуальна, только в целях проверки работоспособности алгоритма. Если предсказание поведения существенно экономит время расчета, и предоставляет результат с точностью, не ниже требуемой, использование алгоритма правомерно. Быстрота расчета в математической модели зависит от множества параметров, но в общем случае задается количеством членов в рядах Фурье (стандартное разложение классической записи зависимости амплитуды вторичного поля от точки расчета), так называемая аппроксимация бесконечности, и длиной контура, по которому берутся отчеты о состоянии системы. И тот и другой параметр — настраиваемый, и очевидно существенно влияет на результирующую точность. Количество членов суммирующих серий (n) не превышает значения 180. Длина контура неограничена. Дискрет контура (Δ), при достаточной точности не должен быть ниже 10 точек на λ (длина падающей волны). При максимальной точности время расчета будет значительным. Если положить, что для обработки результатов допустимой точностью является достоверность N -го знака после запятой, то применимость алгоритма выражается условием:

$$N_{predict} = N \left| t_{predict} \ll t_{calc} \right| N_{calc}(n, \Delta) = N, \quad (3)$$

Индексы «*predict*» и «*calc*» — означают, соответственно, предсказанные и рассчитанные величины. Значение N_{calc} , в (3) должно зависеть только от n и Δ (а не от физических параметров системы). Представленный на рис. 1 результат получен с точностью $N = 4$ и не зависит от физических параметров системы, что полностью соответствует условию (3).

Ширина диапазона применимости, как говорилось выше, ограничивается предсказанием поведения только главного луча ДР — это означает, что алгоритм правомерен только в тех случаях, когда рассеиватель формирует излучаемое в бесконечность вторичное поле. При больших электрических радиусах цилиндра — отраженное поле может превосходить излучаемое, подобная ситуация наблюдается при высоких значениях проводимости цилиндра. В случае малых электрических радиусов ($ka < 1$), влияние вращения цилиндра на вторичное поле минимально, и сглаживается при аппроксимации линейных участков. При очень больших значениях электрического радиуса ($ka > 18$), поле излучаемое в бесконечность обусловлено появлением поверхностных волн [4], в этих случаях применение алгоритма также не дает существенного результат.

Практический и теоретический интерес в использовании предложенного алгоритма, обуславливается также возможностью отслеживать различные физические процессы, проявляющиеся при рассеянии ЭМВ от вращающихся объектов.

В силу того, что в выражении (2) для $\langle E \rangle$, угловой коэффициент является числом отрицательным, можно сделать вывод, что при инициализации осевого движения электромагнитные потери в диэлектрике увеличиваются с ростом угловой скорости рассеивателя. В общем случае, на линейном интервале может решаться радиолокационная задача установления скорости вращения цели.

Литература

1. *De Zutter D.* Scattering by a Rotating Circular Cylinder with Finite Conductivity // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1983. Vol. AP-31.
2. *Van Bladel J.* Electromagnetic Fields in the Presence of Rotating Bodies // Proc. IEEE. 1976. Vol. 64.
3. *Петров Б. М.* Прикладная электродинамика вращающихся тел // Горячая линия — Телеком. 2009.
4. *Панченко Б. А.* Рассеяние и поглощение электромагнитных волн неоднородными сферическими телами. М.: Радиотехника, 2012.