

СРАВНЕНИЕ ДИФРАКЦИОННЫХ ПОЛЕЙ ОТ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КЛИНА, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ИНТЕГРАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ И В ПРИБЛИЖЕНИИ РАВНОМЕРНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ДИФРАКЦИИ

Пермяков В.А., Жексенов М.А., Комаров А.А.

Московский энергетический институт (Технический университет)

E-mail: Permyakovva@mpei.ru

Расчет дифракции электромагнитных волн на диэлектрическом клине является составной частью многих практических задач радиосвязи и радиолокации. В случае высоких частот для этой цели обычно используют приближенные аналитические решения, базирующиеся на равномерной геометрической теории дифракции (РГТД) для идеально проводящего клина и описании полей внутри и на поверхности диэлектрического клина на основе геометрической оптики. Однако применимость этих приближений неясна и требует сравнения с расчетами дифракционных полей строгими численными методами. В данной работе проведено подробное сравнение приближенного решения на базе РГТД для прямоугольного диэлектрического клина с расчетами, выполненными методом поверхностных интегральных уравнений согласно работам Е.Н.Васильева и В.В. Солодухова.

Многие практические задачи электродинамики, связанные с расчетом радиолокационных характеристик сложных объектов и расчетом радиосвязи на реальных трассах, приводят к необходимости использования высокочастотных методов, таких, как геометрическая теория дифракции (ГТД), физическая теория дифракции (ФТД), физическая оптика (ФО). Метод ГТД с практической точки зрения удобен тем, что он весьма нагляден, так как использует понятие дифракционных лучей и построение алгоритмов расчета полей по методу ГТД ведется аналогично методу геометрической оптики. Метод ГТД строго обоснован для идеально проводящих объектов [1] и наиболее детально в применении к задаче дифракции на идеально проводящем клине изложен в статье [2], где дана формулировка так называемой равномерной ГТД, в которой устранены разрывы полей на границах свет – тень. В случае импедансных тел с постоянным поверхностным импедансом требуется привлечение эталонной задачи дифракции плоской волны на импедансном клине, решение которой получено Г. Д. Малюжинцем [3], однако оно является громоздким и в применении к реальным диэлектрическим объектам – приближенным. Для анализа процессов распространения радиоволн в городе и зданиях наиболее важной эталонной задачей, необходимой для применения метода ГТД, является задача дифракции плоской волны на диэлектрическом клине с потерями. Строгое аналитическое решение такой задачи неизвестно и может быть получено только численными методами (см. [4,5]). Имеется ряд работ, в которых получены приближенные формулы для расчета полей, рассеянных диэлектрическим клином с потерями, при этом поля на поверхности диэлектрического клина определяются через известные коэффициенты отражения и прохождения Френеля плоских волн через плоскую границу раздела диэлектрических сред [6-10]. Однако, если потери в диэлектрическом клине малы, возникает необходимость учета многократного прохождения плоских волн в клине, соответствующие эвристические формулы для дифракционных коэффициентов приведены в [11,12]. Формулы [6-12] являются эвристическим обобщением РГТД на случай диэлектрических объектов.

Для обоснования этих приближенных формул используют строгие численные решения подходящих эталонных задач, как правило, это метод интегральных уравнений [4,5] или другие численные методы. В [4,5] численно решена задача дифракции плоской волны на диэлектрическом клине с потерями и получены выражения для дифракционных коэффициентов с учетом как равномерной, так и неравномерной частей токов на поверхности

клина. Главный вывод из работ [4,5] : при больших углах раствора диэлектрического клина с потерями и наклонном падении плоской волны на клин дифракционные коэффициенты практически определяются равномерной частью токов, что соответствует вычислению дифракционных коэффициентов в приближении ФО. Аналитические выражения дифракционных коэффициентов в приближении ФО приведены в [5], однако они являются более громоздкими по сравнению с данными в [6-10]. Кроме того, из вида дифракционных коэффициентов, приведенных в [5], следует, что они неприменимы на границах свет – тень, т.е. соответствуют неравномерной ГТД. Поэтому предпочтительнее использовать формулы РГТД, приведенные в [6-10]. Отметим, что последние формулы применялись при реализации алгоритма расчета распространения радиоволн внутри зданий во многих прикладных программах, см., например, [13]. Однако сравнение приближенных формул РГТД для диэлектрического клина с численными результатами в работах [6-12] носило по существу иллюстративный характер, систематическое исследование контроля точности приближенных решений не проводилось.

Отметим, что численные методы решения задачи дифракции на диэлектрическом клине могут быть использованы в прикладном плане не только для контроля точности приближенных аналитических решений ГТД.

Другая возможность заключается в том, что, в соответствии с идеями гибридных ГТД и ФТД, развитыми проф. Васильевым Е.Н. с сотрудниками [14-17], численные методы могут быть использованы непосредственно для численного определения дифракционных коэффициентов. При этом целесообразность применения численных методов для отыскания дифракционных коэффициентов определяется двумя факторами: допустимой погрешностью вычисления суммарного электромагнитного поля при использовании приближенных аналитических решений равномерной ГТД и допустимым увеличением времени расчета суммарного поля при переходе к численному методу определения дифракционных коэффициентов.

Таким образом, из проведенного обзора следует вывод, что в случае аппроксимации фрагментов реальных объектов диэлектрическими клиньями для расчета дифракционного поля удобно применять эвристические формулы равномерной ГТД, однако необходим контроль точности приближенных решений численными методами, и при необходимости – переход к численным методам определения дифракционных коэффициентов в соответствии с идеями работ [14-17].

В данной работе для численного анализа дифракционных полей, возникающих при падении плоской волны на прямоугольный диэлектрический клин, использованы результаты исследований проф. Васильева Е.Н. и доц. Солодухова В.В. по применению метода интегральных уравнений к решению задач дифракции электромагнитных волн на полубесконечных двумерных диэлектрических объектах и разработанные В.В.Солодуховым и его учениками программы. Основная идея решения задач дифракции на полубесконечных диэлектрических объектах заключалась в том [4,5,18], чтобы свести поставленные задачи к интегральным уравнениям относительно поверхностных электрических и магнитных токов, определяемых на контуре конечной длины, охватывающем нерегулярность (в случае клина - на контуре, включающем ребро клина). При этом, следуя П.Я.Уфимцеву, использовали понятие о неравномерной и равномерной частях токов в области нерегулярности. Размеры контура интегрирования выбирались таким образом, чтобы неравномерные части токов затухали в пределах этого контура, так что вне участка интегрирования на полубесконечных контурах оставались только равномерные части токов, которые могли быть вычислены аналитически, например, для клина – в приближении ГО. Поскольку методика решения указанных задач неоднократно излагалась, расчетные формулы в тезисах не приводятся и читатель отсылается к публикациям [4,5,18].

Для расчета дифракционных полей от диэлектрического клина в приближении РГТД нами использованы формулы, приведенные в работе [13], с тем упрощением, что на гранях клина были учтены только отраженные в приближении ГО поля, а коэффициенты прохождения положены равными нулю.

Была рассмотрена двумерная задача, то - есть на ребро клина падает плоская волна, вектор Пойнтинга которой ортогонален ребру клина. В этом случае кросс – поляризационные эффекты отсутствуют и отдельно рассматриваются случаи E поляризации (вектор электрического поля параллелен ребру клина) либо H поляризации (вектор магнитного поля параллелен ребру клина). Дифракционное поле каждой поляризации является функцией трех параметров: угла падения плоской волны α , определяемого, как угол между направлением падения волны и плоскостью симметрии клина, действительной и мнимой частей относительной диэлектрической проницаемости материала клина. Волна гармоническая, временной множитель $\exp(i\omega t)$. В качестве конкретных параметров материала клина выбраны варианты I: $\epsilon' - i\epsilon'' = 4 - i0,12$ и II: $\epsilon' - i\epsilon'' = 3 - i0,06$, что примерно соответствует параметрам бетона и кирпича в диапазоне УКВ. Угол падения α менялся от 0° до 60° с шагом 10° .

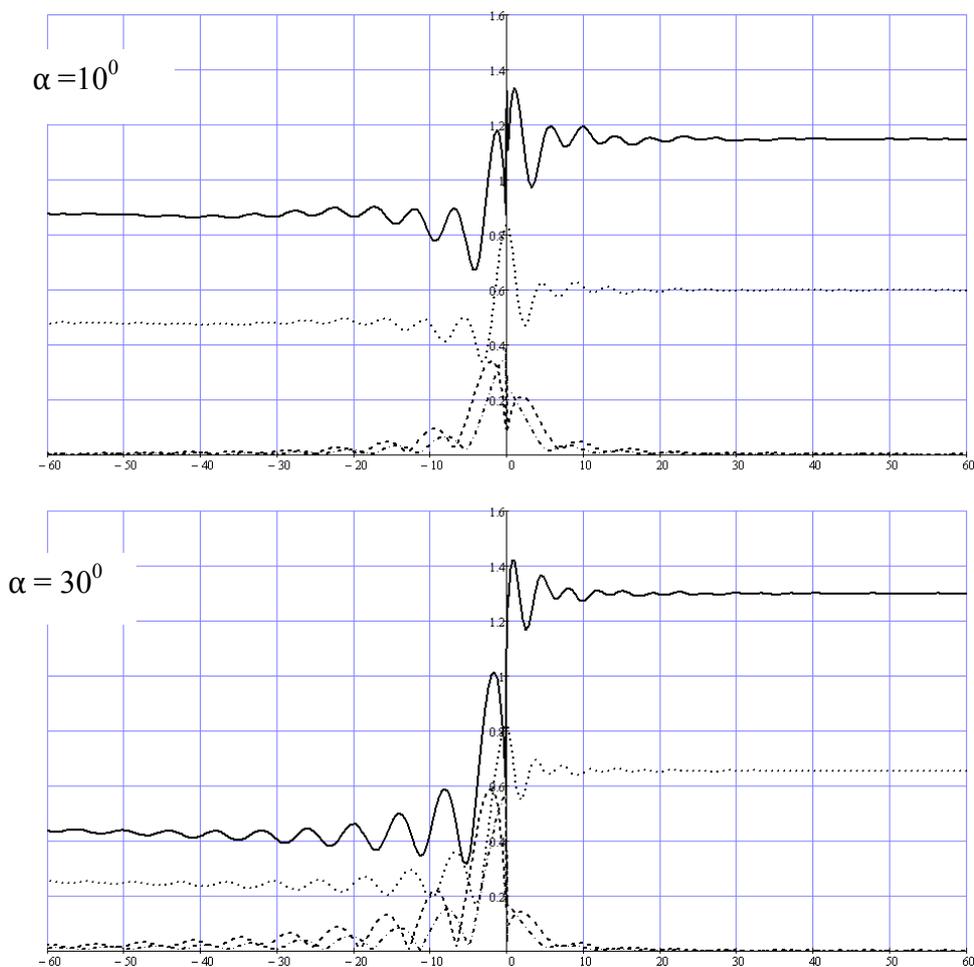


Рис.1. Распределение поверхностных токов на боковой поверхности клина $\Phi = 90^\circ$; $\epsilon = 4 - i0,12$. E – поляризация. Полные поверхностные токи: сплошная линия - J_z^e , точки - J_y^m . Неравномерные части токов : пунктир - J_z^e , штрих-пунктир - J_y^m .

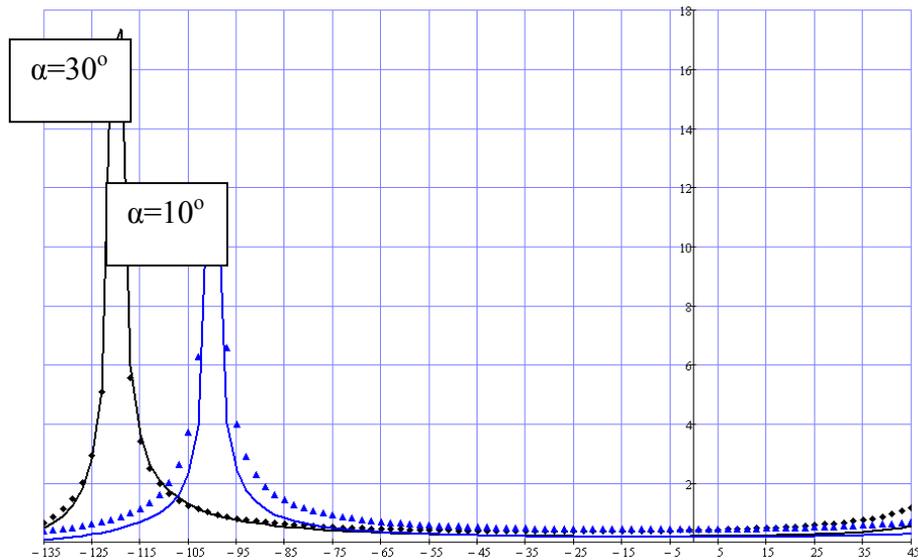


Рис.2. Диаграммы рассеяния клином. Сплошные линии – метод ИУ; точки – метод равномерной ГТД;

На рис. 1 в качестве примера приведены результаты расчета полных токов и неравномерной части токов для Е поляризации падающего поля на диэлектрический клин с параметрами по варианту I при двух углах падения плоской волны на клин α . Видно, что при относительно малых значениях углов падения волны на клин в соответствии с заложенными в алгоритм расчета допущениями неравномерная часть тока действительно оказывается малой вне контура интегрирования, что является подтверждением правильности работы предложенного алгоритма. С увеличением угла падения неравномерная часть тока перестает быть быстро убывающей на бесконечных участках контура. Последнее, по нашему мнению, не означает, что алгоритм метода интегральных уравнений, предложенный в [4,5], становится ошибочным. Фактический результат расчета указывает на то, что заложенная в нулевое приближение величина равномерной части тока отличается от окончательного значения на некоторую постоянную величину.

На рис. 2 приведено сравнение расчетов дифракционных коэффициентов для данного клина численным методом (сплошные кривые) и в приближении РГТД (точки) для углов наблюдения $\varphi: -135^\circ \dots 45^\circ$. Как следует из сравнения, приближение РГТД хорошо согласуется с численным решением. Так, приближенное и строгое решения для дифракционных полей при угле падения волны 10° в пределах углов наблюдения $\varphi \leq -105^\circ$ и $\geq -95^\circ$ различаются не более чем на 5 дБ, а в секторе углов $-105^\circ < \varphi < -95^\circ$ погрешность заметно меньше. Таким образом, наибольшее различие строгого и приближенного решений имеет место в секторах углов наблюдения, где уровень дифракционного поля мал. Подобное различие несущественно для таких приложений, как расчет электромагнитных полей в городе, в зданиях, когда не предъявляются жесткие требования к точности определения поля. Вместе с тем существует ряд радиолокационных задач, в которых требуется более высокая точность расчета дифракционных полей. Для изучения возможностей повышения точности расчета дифракционных полей в приближении ГТД следует проанализировать варианты метода ГТД, в которых поле в диэлектрическом клине рассчитывается с учетом многократных переотражений плоских волн внутри клина. Кроме того, целесообразно реализовать метод ИУ для вычисления дифракционных полей с вычислением равномерной части токов на основе учета процессов многократного переотражения полей плоских волн внутри клина.

В заключение следует подчеркнуть, что в данной работе существенно использованы результаты пионерских исследований проф. Васильева Е.Н. и доц. Солодухова В.В. [4,5,18].

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 08-08-00992-а

ЛИТЕРАТУРА

1. Боровиков В.А., Кинбер Б.Е. Геометрическая теория дифракции. –М.: Связь, 1978, 247 с.
2. Kouyoumjian R.G., Pathak P.H. A Uniform Geometrical Theory of Diffraction for an Edge in an Perfectly Conducting Surface. //Proc. IEEE. 1974, vol. 62, No.11, pp. 1448- 1461 (рус. перевод ТИИЭР, 1974, т. 62, №11, с.40).
3. Малюжинец Г.Д. Некоторые обобщения метода отражений в теории дифракции синусоидальных волн. Автореф. докт. дисс. М. 1951.
4. Васильев Е.Н., Солодухов В.В. О дифракционных коэффициентах для диэлектрического клина. //В сб. Теория дифракции и распространения волн. т.1. VI Всесоюзный симпозиум по дифракции и распространению волн.1973. С. 238-242.
5. Васильев Е.Н., Солодухов В.В. Дифракция электромагнитных волн на диэлектрическом клине. //Известия ВУЗов, Радиофизика, 1974, т. 18, № 10, с. 1518-1528.
6. Luebbers R.J. Finite Conductivity Uniform GTD Versus Knife Edge Diffraction in Prediction of Propagation Path Loss. // IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol. 32, No. 1, 1984, pp. 70-76.
7. Chamberlin K.A., Luebbers R.J. An Evaluation of Longley-Rice and GTD Propagation Models. // IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol. 30, No. 6, 1982, pp. 1093-1098.
8. Holm P.D. A New Heuristic UTD Diffraction Coefficient for Nonperfectly Conducting Wedges. // IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol. 32, No. 2, 1984, pp. 175-177.
9. Jakobsen K.R. An Alternative Diffraction Coefficient for the Wedge.// IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol. 48, No. 8, 2000, pp. 1211- 1219.
10. Lampard G., Vu-Dinh T. The Effect of Terrain on Radio Propagation in Urban Microcells. // IEEE Trans. on Vehicular Technologies, vol. 42, No. 3, 1993, pp. 314-317.
11. Rouviere J.F., Douchin N., Combes P.F. Improvement of the UTD formulation for diffraction of an electromagnetic wave by a dielectric wedge. Electronics Letters, 1997, vol. 33, No.5, pp. 373 – 375.
12. Rouviere J.F., Douchin N., Combes P.F. Diffraction by a Lossy Dielectric Wedges Using Both Heuristic UTD Formulation and FDTD. // IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol. 47, No. 11, 1999, pp. 1702- 1708.
13. Torres R.P.a.o. CINDOOR: An Engineering Tool for Planning and Design of Wireless Systems in Enclosed Spaces. // IEEE Antennas and Propagation Magazine, 1999, Vol. 41, No. 4, p. 11-22.
14. Vasil'ev E.N., Solodukhov V.V., Fedorenko A.I. The Integral Equation in the Problem of Electromagnetic waves diffraction by complex bodies. // Electromagnetics, 1991, vol. 11, No.2, p. 161-192.
15. Vasil'ev E.N., Solodukhov V.V., Makkaveeva V.F. Numerical solving of a new class of canonical problems and their application. // Radio Science, 1996, vol. 31, No.6, p. 1853-1861.
16. Васильев Е.Н., Солодухов В.В. Гибридные геометрическая и физическая теории дифракции. // Труды 11-й всероссийской школы – конференции по дифракции и распространению волн. М.: МГУ. 1998. С. 5-17.
17. Vasil'ev E.N., Solodukhov V.V. Hybrid Geometrical Theory of Diffraction. // Journal of Communication Technology and Electronics, vol. 45, Suppl.2, 2000, pp. 184-195.
18. Васильев Е. Н., Солодухов В.В. Метод интегральных уравнений в задачах дифракции на полубесконечных диэлектрических структурах. Препринт № 25 (397) М.: ИРЭ АН СССР, 45 с.