Новые возможности получения аналитических эвристических решений в физической теории дифракции

М.В. Весник

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, vesnik@cplire.ru

Предложен ряд новых подходов, позволяющих строить эффективные аналитические эвристические решения теории дифракции. Такие решения могут создать новые возможности при решении ряда актуальных практических задач.

A number of new approaches are proposed that allow constructing effective analytical heuristic solutions of diffraction theory. Such solutions can create new opportunities in solving a number of topical practical problems.

Введение

Аналитические решения теории дифракции обладают исключительной важностью и ценностью. Строгие аналитические решения строят при помощи метода разделения переменных в специальных системах координат. Поэтому возможность нахождения строгих решений ограничена. В то же время, в связи с развитием численных методов и компьютерной техники, появилось большое количество новых численных решений.

Эвристические подходы позволяют получать простые аналитические формулы, не обладающие математической строгостью. Точность эвристических подходов зависит от геометрии задачи (т.е. от взаимного расположения источника, приемника и рассеивателя). Например, в задачах построения зеркальных антенн приближение физической оптики позволяет получать достаточно точное решение на границе «свет – тень», т.е. в районе главного и первого бокового лепестка, что является практически важным диапазоном углов точки наблюдения. А в задачах расчета эффективной поверхности рассеяния хорошую точность дают геометрическая теория дифракции и метод краевых волн, но лишь в направлениях дифракционных конусов кромок. В то же время, в некоторых практических задачах, таких как распространение радиоволн в условиях городской застройки или рассеяние на объектах радиолокации с малой заметностью, важно знать рассеянный сигнал на всех направлениях точки наблюдения.

В последнее время автором предложен ряд эвристических подходов, позволяющих получать достаточно точные аналитические решения для всех геометрий задачи. Объединяет эти подходы метод базовых компонентов (МБК). В соответствии с этим методом эвристические формулы строят из набора так называемых «базовых компонентов», каждый из которых представляет собой аналитическое решение простейшей задачи и имеет ясный физический смысл. Затем эвристическое решение подвергают верификации (т.е. проверке точности при помощи численного решения) и на основе этой проверки находят новые базовые компоненты, описывающие физические явления, влияние которых еще не было учтено.

1. Базовые компоненты МБК

В состав набора базовых компонентов к настоящему моменту предлагаем включить следующие формулы, приведенные в [1] и в последующих публикациях автора [2 – 10]:

1.1. Интеграл в приближении физической оптики по поверхности рассеивателя. При выполнении условия дальней зоны может быть сведен к линейному интегралу по кромке. Из линейного интеграла для каждой из кромок можно выделить дифракционный коэффициент.

1.2. Компоненты рассеянного поля в двумерной задаче рассеяния на клине. Из этой формулы можно выделить три базовых компонента: зависимость от расстояний от кромки до источника и точки наблюдения; зависимость амплитуды поля от углового расстояния до границы «свет – тень»; дифракционные коэффициенты.

1.3. Коэффициенты отражения и прохождения R и T, описывающие задачу взаимодействия поля с безграничной плоской поверхностью. Конкретные значения R и T определяются заданным видом граничных условий.

1.4. Дифракционные коэффициенты (ДК) в приближении обобщенного дифракционного коэффициента (ОДК) и физической оптики (ФО), в которые входят R и T. Эти формулы характеризуют поле, рассеянное кромкой, с учетом возмущения на краю полуплоскости и без учета возмущения на краю (т.е. в приближении ФО).

1.5. «Поляризационная составляющая» дифракционного коэффициента (числитель), характеризующая зависимость от формы профиля, поляризации падающего поля, типа решения (физоптическое/строгое) и граничных условий.

1.6. «Геометрическая составляющая» дифракционного коэффициента (знаменатель), зависящая от взаимного расположения кромки и направлений на источник и точку наблюдения.

1.7. Модифицирующая функция, уточняющая решение для вершинной волны.

1.8. Переходная формула для дифракционного коэффициента полупрозрачного рассеивателя на основе формул ОДК и ФО. Для другого вида граничных условий переходная формула может измениться или остаться той же.

По мере проведения дальнейших исследований набор базовых компонентов может пополняться. Также базовые компоненты можно комбинировать между собой, что расширяет область их применения.

2. Приемы МБК

К приемам МБК относится ряд действий, позволяющих получить аналитические формулы и уточнить геометрическую теорию дифракции (ГТД) и метод краевых волн (МКВ). Эти действия не обладают математической строгостью, но имеют физическое обоснование.

2.1. Разделение ДК на «геометрическую» и «поляризационную» части. Заменяя поляризационные составляющие дифракционных коэффициентов в выражениях для интегралов по кромке, можно получить эвристические решения множества задач.

2.2. Комплексные углы – подстановка в известные выражения комплексных значений углов с целью получить решение на элементарной полоске без проведения непосредственного интегрирования.

2.3. Получение решения на условной кромке. Условная кромка – это направление в пространстве, по отношению к которому источник и точка наблюдения находятся как бы на дифракционном конусе. Если условная кромка совпадает с реальной, то источник и точка наблюдения на самом деле находятся на дифракционном конусе.

Решение на условной кромке можно интерпретировать как объединение подходов ГТД и МКВ. В формулах применяют строгое двумерное решение, как в ГТД, но решение справедливо для случаев, когда точка наблюдения находится вне дифракционного конуса, как в МКВ.

2.4. Применение навязанного условия дальней зоны.

При интегрировании поля по поверхности полубесконечных структур условие дальней зоны не может выполняться в принципе, поскольку угловые размеры полубесконечного рассеивателя при удалении от него точки наблюдения не уменьшаются, а сигналы с поверхности рассеивателя приходят в точку наблюдения с разных углов. Соответственно, и результат интегрирования не может представлять собой сингулярную функцию. Навязывая условие дальней зоны, считаем, что в точку наблюдения все сигналы с поверхности рассеивателя приходят с одного угла. При этом аналитические выражения существенно упрощаются, но становятся сингулярными. Тем не менее, использование их в практических задачах для рассеивателей конечного размера корректно.

2.5. Воздействие на дифракционный коэффициент функциональным коэффициентом, представляющим собой интеграл Френеля, деленный на свою асимптотику (под воздействием понимаем умножение или деление). Применяется для перевода сингулярных дифракционных коэффициентов в несингулярные и обратно. Сингулярные дифракционные коэффициенты возникают в задачах при выполнении условия дальней зоны, несингулярные – при невыполнении условия дальней зоны.

2.6. Учет влияния полупрозрачности на дифракционный коэффициент.

2.7. Учет возмущения поля, связанного с ограниченностью кромки по длине.

2.8. Применение основной формулы радиолокации и понятия зоны, существенной для распространения радиоволн для сокращения объема вычислений и перехода от двумерных решений теории дифракции к трехмерным решениям.

3. Преимущества формул МБК

Применение базовых компонентов и приемов МБК позволяет строить эффективные эвристические аналитические решения, обладающие рядом преимуществ перед известными подходами.

3.1. Точность – самое важное свойство. Формулы МБК более точны, чем формулы ГТД и МКВ. Тем не менее, нужно отметить, что для эффективного решения практических задач важно выбирать метод, дающий не максимальную, а оптимальную точность, при этом иногда бывает достаточно точности ГО и ФО.

3.2. Простота – простота применяемых формул. Важна при проведении аналитических преобразований, в том числе, например, при взятии производной или при переходе из частотной области во временную «time domain – frequency domain».

3.3. Быстродействие – свойство, связанное с простотой формул. Быстродействие эвристических формул практически не зависит от размера рассеивателя. Это дает новую возможность при решении задач дифракции. Если для рассеивателя большого размера не существует строгих решений (ни аналитического, ни численного), можно сначала при помощи численного решения верифицировать эвристические формулы на рассеивателе меньшего размера, а затем применить их на большом рассеивателе. Точность при этом только увеличится.

3.4. Физичность (в отличие от инженерных формул) – физическая ясность. Эвристические подходы основаны на физических понятиях (в отличие от краевой задачи математики). Применяя эвристические формулы, можно провести физическую интерпретацию численных результатов.

Все базовые компоненты имеют четкий физический смысл. Настройка решения проводится адресно – для конкретного компонента. Например, настройка продольного и поперечного возмущения поля проводится отдельно. При этом можно обнаружить важные физические характеристики процесса дифракции. Так произошло для функции, описывающей полупрозрачность, которая была обнаружена при отдельном рассмотрении приближений ОДК и ФО.

3.5. Автономность от вычислителя – возможность работы автономно от вычислителя 2D решения (в отличие от обычной формы ГТД и МКВ, предусматривающей интегрирование по элементарной полоске и вдоль кромки). Формулы, обладающие свойством автономности, можно верифицировать один раз для всех значений входных параметров, а потом уже применять без верификации. Этап настройки, применяемый в МКВ, усложняет процесс получения решения, но придает ему новые качества, которые дают новые возможности при решении практических задач.

3.6. Гибкость – широкие возможности комбинирования базовых компонентов при перестройке геометрии задачи (например, при выполнении или невыполнении условия ДЗ).

3.7. Универсальность – единая форма решения для сходных постановок задач (в том числе – для выдвижения удачной гипотезы поведения исследуемого решения).

4. Приложения формул МБК

Формулы, полученные при помощи МБК, могут дать новые возможности при решении следующих практических задач:

4.1. Расчет ЭПР воздушных, сухопутных и морских радиолокационных объектов.

4.2. Рассеяние радиоволн на объектах городской застройки.

4.3. Распространение радиосигналов внутри помещений.

4.4. Дифракция электромагнитных волн на кристаллах.

4.5. Дифракция на открытом конце прямоугольного волновода.

4.6. Дифракция света на матрицах фотоприемников.

4.7. Дифракция элементарных частиц на ловушках и других объектах.

4.8. Дифракция упругих волн на неоднородностях в среде распространения упругих волн (твердых телах, горных породах и т.п.).

Заключение

Новые подходы в физической теории дифракции позволяют строить точные и быстродействующие аналитические эвристические решения, а также проводить физическую интерпретацию численных решений с целью выявления тонких особенностей процесса дифракции.

Отметим отличия МБК от других подходов. От строгих методов МБК отличается простотой формул и универсальностью подхода. От ГТД и МКВ МБК отличается точностью. От инженерных подходов или использования в расчетах предварительно полученных баз данных МБК отличается физичностью (ясный смысл всех компонентов эвристических формул позволяет проводить физическую интерпретацию строгого решения и осуществлять углубленное изучение процесса дифракции).

Литература

1. Michael V. Vesnik, “The Method of the Generalized Eikonal. New Approaches in the Diffraction Theory.”, Walter de Gruyter GmbH, Berlin/Boston, 2015, ISBN 978-3-11-031112-9

2. Vesnik M.V., “Efficiency of Different Heuristic Approaches to Calculation of Electromagnetic Diffraction by Polyhedrons and other Scatterers”, Radio Science, Volume 49, Issue 10, October 2014, Pages 945–953, ссылка на статью: doi: 10.1002/2014RS005520

3. М.В. Весник, «Уточнение приближения физической оптики в задачах дифракции на трехмерных объектах», Труды 2-ой Всероссийской Микроволновой конференции, 26-28 ноября 2014 г., ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Москва, стр. 443 – 448

4. М.В. Весник, «Эвристическое выражение для дифракционного коэффициента полупрозрачной полуплоскости», Сборник трудов III Всероссийской Микроволновой конференции, ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, 25-27 ноября 2015 г., стр. 281 – 285

5. М.В. Весник, «Новые возможности повышения эффективности эвристических аналитических формул в физической теории дифракции», Сборник трудов VI

Всероссийской Микроволновой конференции, ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, 23-25 ноября 2016 г., стр. 332 – 336
6. М.В. Весник, «Физическая интерпретация математически строгого решения задачи дифракции при помощи эвристических формул», Современная математика. Фундаментальные направления. Том 62 (2016). с. 32 – 52
7. М. В. Весник, «Физическая интерпретация численного решения задачи дифракции электромагнитной волны на плоском идеально проводящем рассеивателе», Журнал радиоэлектроники, № 4, 2017 (электронный журнал) http://jre.cplire.ru/jre/apr17/7/text.pdf
8. Michael Vesnik, Resonant properties of 3D electromagnetic diffraction by a flat polygon, Abstracts of International conference Days on Diffraction 2017, St. Petersburg, June 19-23, 2017, p. 148
9. М.В. Весник, В.И. Калиничев, «Особенности электромагнитной дифракции на идеально проводящем плоском прямоугольнике», Сборник трудов V Всероссийской Микроволновой конференции, ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, 29 ноября – 1 декабря 2017 г., стр. 114 – 118
10. М.В. Весник, «Учет дифракционного ослабления на трассах распространения радиоволн в условиях городской застройки», Физические основы приборостроения. 2018. Т. 7. № 1 (27). С. 73-78.