538.566(049.3)

ЦЕННАЯ МОНОГРАФИЯ ПО РАССЕЯНИЮ ВОЛН НА ШЕРОХОВАТЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ

Ф. Г. Басс, И. М. Фукс. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. М., «Наука» (Главная редакция физико-математической литературы), 1972, 424 стр.

Все реальные тела в той или иной мере шероховаты. Этим объясняется повышенный интерес к теории рассеяния волн шероховатыми поверхностями, которая стала акутальной и интенсивно развивающейся областью статистической теории дифракции и распространения волн. Теория рассеяния на статистически неровных поверхностях применяется в самых различных областях современной физики — в радиофизике, акустике, оптике, радио- и гидролокации, радиоастрономии, физике твердого тела, сейсмологии. Затруднительно даже простое перечисление задач, решение которых требует привлечения теории рассеяния волн шероховатыми поверхностями. Прежде всего это задачи, связанные с рассеянием электромагнитных волн различных диапазонов — от сверхдлинных радиоволн до волн СВЧ и оптического диапазонов, распространяющихся над пересеченной местностью или над взволнованной поверхностью моря. Нужно отметить далее вопросы рассеяния звуковых волн на поверхности моря и на морском дне, проблемы рассеяния ультразвука на поверхности твердого тела, вопросы передачи звуковой и электромагнитной энергии по волноводам с шероховатыми стенками, в том числе по естественным волноводам, таким, как Земля — ионосфера, приповерхностный звуковой канал и др. Большой интерес представляет также рассеяние упругих волн на неровных границах раздела, влияние неровностей больших зеркальных антенн на характеристики радиотелескопов, рассеяние радиолокационных сигналов на поверхности Луны, искажение лазерных пучков неровностями зеркал и т. д.

Первые попытки дать количественное объяснение рассеянию света матовыми поверхностями мы находим еще у Бугера [1]. Однако волновая картина, правда, в случае рассеяния на синусоидальной поверхности, была дана значительно позже Рэлеем [2], который предложил приближенный метод расчета рассеянного поля. Теория, учитывающая статистический характер неровностей, была впервые развита на основе метода Рэлея Мандельштамом [3], Андроновым и Леонтовичем [4] в связи с задачей о рассеянии света на тепловых флуктуациях поверхности жидкости. Наиболее бурно, однако, теория стала развиваться с начала 50-х годов, главным образом в связи с новыми идеями и методами, привнесенными работами советских ученых Л. М. Бреховских, М. А. Исаковича, Е. Л. Фейнберга, Ф. Г. Басса и др.

К настоящему времени накоплен весьма обширный материал по теории рассеяния волн статистически неровными поверхностями, в котором, однако, чрезвычайно трудно ориентироваться, поскольку он разбросан по многим периодическим изданиям, подчас из различных областей физики. Имеющиеся обзоры [5-9] в известной мере систематизируют этот материал, но они, разумеется, не могут дать его последовательного изложения. Книга [10] и отдельные главы монографий [11,12] не охватывают многих важных разделов теории, а также не характеризуют ее современного состояния, поскольку с момента их опубликования прошло уже много времени. Что касается книги [13], то в ней освещены лишь некоторые вопросы теории, связанные с прикладными задачами.

Недавно вышедшая из печати работа Ф. Г. Басса и И. М. Фукса является первой в нашей литературе монографией, посвященной систематическому изложению теории рассеяния волн статистически неровными поверхностями. Основная часть книги содержит изложение теории в приближении методов малых возмущений (гл. 3—6) и Кирхгофа (гл. 7—9). Этими методами охватываются случаи рассеяния на поверхностях, содержащих либо малые и пологие, либо плавные в масштабе длины волны неровности. Несмотря на то, что построение теории в рамках этих традиционных

методов во многом уже завершено, последовательное и полное изложение этого материала приводится, по-видимому, впервые. В книге описан также комбинированный подход к задаче, который позволяет рассматривать поверхности со сложной структурой (типа мелкой ряби на плавных неровностях), близкие по рельефу к реальным (гл. 10). Кроме того, в монографии развит метод функций Грина, основанный на суммировании рядов возмущений с помощью техники фейнмановских диаграмм (гл. 11). Изложению предшествуют необходимые сведения из теории распространения звуковых и электромагнитных волн, а также из теории случайных полей (гл. 1, 2).

Почти по каждому из вопросов, рассмотренных в книге, авторам принадлежат оригинальные результаты, которые в свое время, т. е. в момент их опубликования, оказали заметное действие на весь ход исследований в статистической теории рассеяния волн как в нашей стране, так и за рубежом.

Отметим наиболее важные, с нашей точки зрения, моменты, которые не потеряли своего значения и по сей день:

1. Одному из авторов, Ф. Г. Бассу, принадлежит модифицированный метод возмущений, приводящий к нелокальным граничным условиям для среднего поля. При помощи этого метода в книге рассмотрен вопрос о распространении звуковых и электромагнитных волн над поверхностью с малыми пологими неровностями (§ 5—7). Здесь, в частности, вычислены значения эффективного импеданса поверхности, описывающего в первом приближении влияние неровностей. Большой интерес представляет явление трансформации пространственной волны в поверхностную при распространении над мелкомасштабными неровностями. Теория этого явления изложена также с помощью модифицированного метода возмущений.

2. В книге представлен исчерпывающий материал по расчету средней интенсивности поля в дальней зоне рассеивающего участка при различных предположениях относительно статистических свойств неровностей (§ 8, 9, 20, 21). В частности, проиллюстрирована связь между чисто геометрическим подходом к расчету индикатрисы рассеяния и ее расчетом по методу Кирхгофа. Кроме того, исследованы поляризационные характеристики электромагнитного поля, рассеянного в дальнюю зону.

В ближней зоне установлено правило некогерентного сложения интенсивностей полей от отдельных элементов поверхности и приведены некоторые расчеты в случае точечного источника и безграничной поверхности (§ 10, 24). Весьма существенно, что правило некогерентного сложения интенсивностей, которое долгое время носило характер гипотезы, здесь получено в результате строгого анализа, позволяющего указать условия применимости этого правила. Более того, такой подход позволяет существенно расширить область применимости тех результатов, которые первоначально были получены для дальней зоны рассеивающего участка. Этот чрезвычайно важный для практики вопрос также освещен в монографии.

3. Расчеты частотных спектров как самого поля (§ 13, 27), так и флуктуаций его амплитуды и фазы (§ 14) при рассеянии на движущейся поверхности проведены в квазистатическом приближении. В основе этих расчетов лежит представление движущейся поверхности в виде суперпозиции монохроматических плоских волн с законом дисперсии, определяемым уравнениями движения (§ 12). Такое представление позволяет описывать широкий класс поверхностей, уравнения движения которых линейны, в частности, колеблющиеся водные поверхности, равномерно движущиеся поверхности и т. д.

4. В рамках метода Кирхгофа существенным является вопрос об учете затенений. В монографии приведено всестороннее исследование этого вопроса (§ 22, 23). Здесь изложен общий подход к задаче о затенениях статистически неровной поверхности. Особое внимание уделено нахождению и анализу приближенных решений, которые были бы приемлемы для практических расчетов.

5. Значительный интерес для радио- и гидролокации представляют расчеты статистических характеристик поля при рассеянии от шероховатых ограниченных тел (§ 28—31). С точки зрения теории — это задача о рассеянии волн на неплоской (в среднем) поверхности. Изложение этого вопроса ведется с общих позиций для произвольной криволинейной средней поверхности. Здесь получены формулы для сечения рассеяния шероховатых тел, а также изучены флуктуации амплитуды и фазы рассеянного поля.

6. В монографии проведен подробный анализ некоторых экспериментальных данных, указывающий на необходимость учета сложной структуры поверхности для правильной интерпретации экспериментов (§ 32). Сложная структура описывается двухмасштабной моделью поверхности, рассеяние на которой рассмотрено с помощью комбинации методов Кирхгофа и малых возмущений (в разработке такого комбинированного метода принимали участие также Б. Ф. Курьянов и Б. И. Семенов). Решение получено как для звуковых, так и для электромагнитных волн (§ 33).

7. Особый интерес представляет применение методов квантовой теории поля к исследованию многократного рассеяния на шероховатых поверхностях (§ 34—37). Учет многократного рассеяния особенно важен при наличии нескольких поверхностей (в волноводах, резонаторах и т. п.), когда волна многократно возвращается к рассеивающей поверхности. Отметим, что хотя методы квантовой теории поля уже прочно

вошли в теорию распространения волн в случайно неоднородных средах, в теории рассеяния на шероховатых поверхностях они стали применяться лишь в последнее время, причем инициаторами внедрения этих методов были авторы рецензируемой книги вместе с В. Д. Фрейлихером. Рассмотренные в книге вопросы связаны в основном с распространением волн в нерегулярных волноводах. Это — вычисление среднего поля и его затухания, расчеты изменения спектра нормальных волн, вопросы перекачки энергии из одной моды в другую и образования квазиэлектрических и квазимагнитных волн, обоснование уравнения переноса излучения в волноводе.

8. Большое внимание в книге уделено обратным задачам, когда по характеристикам рассеянного поля требуется определить статистические характеристики рассеивающей поверхности. В частности, выявлены условия, при которых возможно определение статистических характеристик поверхности по пространственной функции корреляции рассеянного поля. Анализ пространственной корреляции проведен в книге при различных условиях облучения и наблюдения (§ 15—17, 26).

Утверждение о «шероховатости» (в той или иной степени) всех реальных тел относится, разумеется, и к рецензируемой книге. К сожалению, в ней не нашлось места методу Рэлея и методу интегрального уравнения Ю. П. Лысанова, которые также эффективно используются в теории рассеяния волн шероховатыми поверхностями. Кроме того, авторы оставили без внимания теории рассеяния, основанные на модельных представлениях неровных поверхностей, например, в виде полусфер, хаотически разбросанных по плоскости, и т. п. Не упомянут и закон Ламберта, который не имеет теоретических оснований, но часто используется для поверхностей с высокими (по сравнению с длиной волны) и крутыми неровностями. На наш взгляд, даже краткое описание этих вопросов способствовало бы созданию более полного представления о характеристиках рассеянного поля и о математическом аппарате теории.

Далее, метод Кирхгофа целесообразно было бы изложить для падающей волны общего вида, описываемой в приближении геометрической оптики. При таком описании можно было бы с единой точки зрения рассмотреть рассеяние плоских и сферических (как ненаправленных, так и направленных) волн.

Можно, наконец, посетовать на то, что при описании средней интенсивности поля, рассеянного протяженной поверхностью, авторы не используют полезное понятие сечения рассеяния единичной площадки. Формулы, выражающие некогерентное сложение интенсивностей, приобрели бы при этом, как нам кажется, более естественный вид.

Все эти «шероховатости», однако, легко устранить при дальнейшей работе над книгой. В целом же она написана на высоком научном уровне и содержит весьма глубокое изложение основных вопросов и достижений теории. Необходимость этой монографии давно назрела, поэтому ее издание можно лишь приветствовать. Безусловно, эта книга будет с одобрением встречена физиками различных направлений,— и как ценное пособие для изучения теории рассеяния волн шероховатыми поверхностями, и как настольная книга специалиста, работающего в этой области

Ю. А. Кравцов, А. Б. Шмелев

ЛИТЕРАТУРА

1. П. Бугер, Оптический трактат о градации света. М.— Л., Изд-во АН СССР, 1950.
2. Дж. В. Стретт (лорд Рэлей), Теория звука, т. 2. М., Гостехиздат, 1955, гл. XIII.
3. Л. И. Мандельштам, Полное собрание трудов, т. I. М., Изд-во АН СССР, 1948, стр. 246.
4. А. А. Андронов, М. А. Леонтович, в «Собрании трудов А. А. Андронова». М., Изд-во АН СССР, 1956, стр. 5.
5. M. P. Bachynski, R.C.A. Rev. **20**, 308 (1959).
6. D. E. Barrick, W. H. Peake, Radio Sci. 3, 865 (1968).
7. F. G. Bass, I. M. Fuks, A. I. Kalmykov, I. E. Ostrovsky, A. D. Rosenberg, IEEE Trans. **AP-16**, 554 (1968).
8. L. Fortuin, J. Acoust. Soc. Amer. **47**, 1209 (1970).
9. А. Б. Шмелев, УФН **106**, 459 (1972).
10. P. Beckmann, A. Spizzichino, The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces, Oxford — New York. Pergamon Press, 1963.
11. Е. Л. Фейнберг, Распространение радиоволн вдоль земной поверхности. М., Изд-во АН СССР, 1961.
12. С. М. Рытов, Введение в статистическую радиофизику. М., «Наука», 1966.
13. С. Г. Зубкович, Статистические характеристики радиосигналов, отраженных от земной поверхности. М., «Сов. радио», 1968.