**Ю. Н. Барабаненков, Ю. А. Кравцов, С. М. Рытов, В. И. Татарский.** Состояние теории распространения волн в случайно-неоднородных средах

Исследованию распространения волн в случайно-неоднородных средах уделяется в последнее время все большее внимание. Повышенный интерес к этой проблеме вызван в первую очередь большим количеством актуальных прикладных задач, возникших в радиофизике, акустике, оптике, теории плазмы и т. д. Разнообразие этих задач стимулировало разработку различных методов расчета статистических параметров, характеризующих волновое поле, распространяющееся в случайно-неоднородной среде или прошедшее через такую среду. Результаты, полученные этими методами, частично просуммированы в ряде монографий [1-5] и обзоров [6, 7], но со времени опубликования этих работ статистическая теория рассеяния и распространения волн претерпела определенные изменения.

Во-первых, разработаны новые методы расчета флуктуаций волнового поля, например марковское приближение в методе параболического уравнения [8-11], и использованы приемы, заимствованные из других областей физики, в частности методы суммирования рядов теории возмущений, аналогичные применяемым в квантовой электродинамике [3, 7, 12-14]. Во-вторых, усовершенствованы «старые» методы, что позволило применить их для описания более широкого круга явлений, чем это удавалось первоначально. В-третьих, в ряде случаев оказалось возможным уточнить границы применимости различных методов расчета, что, конечно, способствовало прояснению всей картины.

В данном обзоре авторы попытались дать представление о существующих методах теории распространения волн в случайно-неоднородных средах, о границах их применимости и о роли развиваемых в последнее время новых методов. Наиболее четко очерчены границы применимости теории *однократного рассеяния* волн (*борновское приближение*). Оно пригодно в условиях, когда полная интенсивность рассеянного поля мала по сравнению с интенсивностью падающей волны. Во многих задачах это условие выполнено, что дает возможность использовать все преимущества борновского приближения, а именно учесть множество эффектов, сопутствующих рассеянию в сложных условиях (наличие регулярной рефракции, анизотропия среды, импульсный характер рассеиваемого сигнала и т. д.). Существенно, что борновское приближение охватывает рассеяние как на мелких неоднородностях (по сравнению с длиной волны), так и на крупных, но с увеличением их размеров область применимости этого приближения все более суживается.

В противоположность этому, *метод плавных возмущений* (сокращенно — МПВ) и примыкающий к нему *метод геометрической оптики* приурочены к описанию флуктуаций волнового поля именно в средах с крупномасштабными неоднородностями. По вопросу о пределах применимости МПВ в литературе неоднократно возникала дискуссия. В настоящее время можно считать установленным, что для сред, флуктуации параметров которых характеризуются *одним масштабом*, первое приближение МПВ (как и борновское приближение) пригодно только при достаточно малых флуктуациях фазы волны и ее уровня (логарифма амплитуды). Если же имеется целый спектр масштабов, причем сильнее всего представлены крупные неоднородности (как, например, в турбулентной атмосфере), то первое приближение МПВ пригодно вплоть до среднеквадратичных флуктуаций уровня порядка единицы, а результаты, касающиеся флуктуаций фазы волны, справедливы даже при еще бóльших флуктуациях уровня.

Для описания распространения волн в средах с крупными неоднородностями применяется наряду с МПВ и методом геометрической оптики также *метод параболического уравнения* (МПУ) [8–10]. Недавно этот метод получил дальнейшее развитие в результате использования так называемого марковского приближения [11]. Этот метод позволяет выйти за пределы области слабых флуктуаций уровня (хотя он и менее удобен, чем МПВ, в тех случаях, когда непосредственный интерес представляют статистические характеристики фазы волны).

Все названные методы с самого начала строятся как приближенные. Большое внимание в настоящее время уделяется построению *точной* волновой теории многократного рассеяния. Здесь сформулированы уравнения для среднего поля и для его корреляционной функции (уравнения Дайсона и Бете — Солпитера) [3, 7, 12–14]. Правда, решить их удается только в ряде частных случаев, но даваемая ими общая постановка задачи позволяет надеяться на дальнейшее уточнение и конкретных результатов, и сравнительной оценки приближенных методов. К достижениям общей теории многократного рассеяния относится, например, последовательный *волновой* вывод уравнения переноса излучения [15], которое ранее записывалось на основе чисто энергетических соображений. В других же отношениях названные выше приближенные методы остаются пока наиболее действенным рабочим аппаратом при исследовании конкретных задач.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Л. А. Чернов, Распространение волн в среде со случайными неоднородностями. М., Изд-во АН СССР, 1958.
2. В. И. Татарский, Теория флуктуационных явлений при распространении волн в турбулентной атмосфере. М., Изд-во АН СССР, 1959.
3. В. И. Татарский, Распространение волн в турбулентной атмосфере. М., «Наука», 1967.
4. Е. Л. Фейнберг, Распространение радиоволн вдоль земной поверхности. М., Изд-во АН СССР, 1961.
5. С. М. Рытов, Введение в статистическую радиофизику. М., «Наука», 1966.
6. Н. Г. Денисов, В. А. Зверев, Изв. вузов (Радиофизика) **2** (4), 521 (1959).
7. V. Frish, Wave Propagation in Random Media. Inst. d'Astrophysique, Paris, 1965.
8. Л. А. Чернов, Рефераты докладов III Всесоюзного симпозиума по дифракции волн, Тбилиси, 1964, г., М., «Наука», 1964, стр. 224.
9. Л. С. Долин, Изв. вузов (Радиофизика) **7** (3), 559 (1964); **11** (6), 840 (1968).
10. В. И. Шишов, Изв. вузов (Радиофизика) **11** (6), 866 (1968).
11. В. И. Татарский, ЖЭТФ **56** (6), 2106 (1969).
12. Ю. Н. Барабаненков, В. М. Финкельберг, ЖЭТФ **53** (3 (9)), 978 (1967).
13. В. М. Финкельберг, ЖЭТФ **46** (2), 725 (1964).
14. K. Furutsu, J. Res. NBS **D67** (3), 303 (1963).
15. Ю. Н. Барабаненков, ЖЭТФ **56** (4), 1262 (1969).