

随机介质中波的 传播和散射

A. 石丸 著

科学出版社

随机介质中波的 传播和散射

A. 石九 著

黄润恒 周诗健 等 译

周秀骥 校

科学出版社

1986

内 容 简 介

本书是讨论波在随机介质中的传播和散射问题的专著。全书共有五个部分。第一部分讨论平面波、束状波、连续波和脉冲波在稀疏分布的散射元中的散射和传播,以及波在离散散射元中的视线传播问题;第二部分详细讨论了漫射近似理论以及若干重要实例的近似解;第三部分讨论多次散射理论;第四部分讨论波在随机连续介质和湍流介质中传播的弱起伏理论和强起伏理论;第五部分讨论粗糙表面的散射特征以及几种重要的遥感反演技术。

书中着重基本的物理概念以及各种理论之间的相互联系,数学推导简明扼要,并附有一定数量的实例。特别适合大专院校高年级学生和研究生阅读,对于从事地球环境遥感、雷达气象、电波通信、水下声光传播以及生物介质的声光探测的科研和工程技术人员,本书也是一本很有价值的参考材料。

Akira Ishimaru

WAVE PROPAGATION AND SCATTERING IN RANDOM MEDIA

Academic Press, 1978

随机介质中波的传播和散射

A. 石丸 著

黄润恒 周诗健 等 译

周秀骥 校

责任编辑 侯建勤

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1986年10月第一版 开本:787×1092 1/32

1986年10月第一次印刷 印张:21 5/8 插页:2

印数:0001—2,000 字数:491,000

统一书号:13031·3281

本社书号:4779·13—3

定价:5.65元

译 者 的 话

这是一部讨论波在随机介质中传播和散射问题的专著。作者是美国华盛顿大学电气工程系教授，多年从事波在随机介质中传播理论及其在大气遥感方面的应用的研究。本书就是作者根据他给研究生讲课的讲义整理而成的。

波在随机介质中的传播和散射是电磁波、声波传播理论的一个重要组成部分。由于自然界中的许多传播介质（例如大气、海洋、生物介质、粗糙表面）的特性在时间上和空间上是随机变化的，因此波传播特征的起伏性是一种十分普遍的自然现象。正如作者在本书前言中所说的，“波的这种随机起伏和散射在各种实际问题中十分重要”，它与电波通信、雷达气象、地球环境遥感、水下声光传播以及生物介质的声光探测密切相关，因此随机介质中的波的传播是多学科共同关心的问题。

作者在本书中采用统一的和系统的方式提出波在随机介质中传播和散射的基本公式。这是一种很有意义的尝试，它为我们掌握波在各类随机介质中的传播规律的内在联系提供了有益的启发。本书着重物理概念，数学推导简明扼要，并附有许多实际应用的例子，特别适合作为研究生课程的教材，也可供上述各个学科的工作人员阅读。

原书分两卷出版，第一卷为单次散射和输运理论，包括第一、二部分；第二卷为多次散射、湍流、粗糙表面和遥感，包括第三、四、五部分。为读者阅读和发行方便，现中译本将其合成一册，删掉卷名，保持原书结构，五个部分融为一体。原书（尤其是公式）中明显印刷错误颇多，译文中已作改正，为避免

繁琐,不再一一加注. 翻译分工如下: 黄润恒译前言、第一、七、八、九、十、十六、十七、十八、十九和二十章,魏重译第二章和附录 A, B, C, D, 周诗健译第三、四、十四和十五章, 吕达仁译第五、六、二十一和二十二章,林海译第十一、十二和十三章. 魏重、林海和周诗健整理了名词索引, 黄润恒、周诗健整理和校阅了第一、二两部分译稿,林海整理和校阅了后三部分的译稿,最后周秀骥教授校阅了全书. 由于我们水平有限,错误之处在所难免,敬希广大读者批评指正.

一九八三年三月

• II •

前 言

近几年来波在大气、海洋和生物介质中的传播和散射问题,特别是在通信、遥感和检测等领域,变得越来越重要了.一般来说,这些介质在时间和空间上是随机变化的,所以波的振幅和相位在时间和空间上也是随机起伏的.波的这种随机起伏和散射在各种实际问题中十分重要.通信工程师所关心的是波在大气和海洋湍流中传播时波的相位和振幅起伏,以及波在这种介质中的相干时间和相干宽度.湍流对波的散射可以用作超地平通信.用散射技术来探测晴空大气湍流对于安全飞行很有意义.地球物理学家所感兴趣的是利用波在行星大气中传播时所发生的起伏效应来遥测行星大气的湍流和动力学特征.生物学工程师可以利用声波的起伏和散射特征作为诊断的工具.雷达工程师需要处理雷暴、雨、雪或冰雹所造成的扰乱回波.地质介质的电磁探测和声探测需要了解统计上随机分布的不均匀结构的特征.最后,新兴的无线电海洋学这门学科就是利用无线电波的散射来研究海洋的特征.这种技术的核心是了解波在粗糙表面上的散射特征.

所有上述问题的特点都是对波和介质作统计描述.由于存在着这种基本的类似性,因此,应该有可能发展对所有这些问题都适用的基本公式.在这本书里我们将采取统一的和系统的方式提出波在随机介质中传播和散射的基本公式.这不是一件容易的工作,但是希望读者通过本书所涉及到的各种公式和各种问题能够了解某些共同的线索.应该强调的是,因为问题本身的多样性,因而有必要应用各种近似以便得到一些有用的结果.为此,我们对不同情况下所采用的有用的近

似方法也将给出系统的说明。

利用波传播和散射技术遥感地球物理和气象要素，作为研究大气结构和动力学特征的有用手段，其重要性与日俱增。这方面的知识可以用于改进天气预报，对人工影响天气提出建设性的方法，研究污染以及确保空中交通的安全。在这个领域里所介绍的最新研究结果可以看作是未来更普遍的遥感技术的先导。

概括地说，本书的读者对象是对光波、声波和微波在大气、海洋和生物介质中的传播和散射有兴趣的工程师和科学家，特别是利用这些介质进行通信或遥感这些介质特性的工程师和科学家。本书也是波传播统计理论的基本概念和有用结果的一个导论。本书所涉及的理论包括系统地阐述辐射传输和输运以及多次散射理论，这些理论也是化学家、地球物理学家以及核物理工程师所关心的。必要的预备知识包括求解波动方程、Maxwell 方程、向量运算、Fourier 级数和 Fourier 积分。

本书所涉及的课题可以分为三大类：“随机散射元中的波动”、“随机连续介质中的波动”以及“粗糙表面对波的散射”。随机散射元是许多粒子的一种随机分布，例如雨、雾、烟雾、冰雹、海洋中的粒子、红血球、聚合物以及处于 Brown 运动状态的其他粒子。随机连续介质是指其特性随时间和空间随机连续变化的介质，例如，晴空湍流、喷气发动机排出的废气、对流层和电离层湍流、海洋湍流以及诸如组织和肌肉这些生物介质。粗糙表面的例子有海洋表面、行星表面、不同生物介质的交界面以及光学纤维的粗糙表面。

第一部分和第二部分分别讨论单次散射理论和输运理论。单次散射理论可以应用于稀疏分布的散射元中的波动。它包括许多实际情形，如在各种介质中使用的雷达、光雷达和

声纳。由于它的数学公式相对简单一些，毋需复杂的推导就可以发展各种基本概念，如相干宽度、相干时间、时间频谱、运动的散射元以及脉冲的传播。我们还收集了大气、海洋和生物介质中粒子特性的某些数值结果。输运理论（又叫做辐射传输理论）所讨论的是波通过随机分布的散射元后其强度的变化。它可以应用到大气和生物介质对光波和微波的各种散射问题。我们提出几种近似解，包括扩散理论、Kubelka-Munk理论，平面平行问题、各向同性散射以及前向散射理论。

第三、四、五部分包括随机介质波动理论的许多新发展。第三部分讨论随机分布散射元对波的多次散射理论。第四部分包括波在随机连续介质和湍流中的弱起伏和强起伏理论。第五部分讨论粗糙面的散射和遥感随机介质特性的基本问题，以及几种重要的反演技术。

目 录

第一章 引言.....	1
第一部分 波在稀疏分布散射元中的散射和传播: 单次 散射近似.....	6
第二章 单粒子对波的散射和吸收.....	6
2-1 散射截面和散射振幅.....	6
2-2 截面的一般特性.....	9
2-3 前向散射定理.....	12
2-4 散射振幅和吸收截面的积分表示.....	13
2-5 Rayleigh 散射.....	16
2-6 Rayleigh-Debye 散射(Born 近似).....	21
2-7 WKB 内部波数近似方法	25
2-8 Mie 理论	28
2-9 椭圆偏振和 Stokes 参数	31
2-10 部分偏振和自然光.....	34
2-11 独立波的叠加.....	35
2-12 散射振幅函数 $f_{11}, f_{12}, f_{21}, f_{22}$ 及 Stokes 矩阵	35
2-13 坐标系绕轴旋转时 Stokes 参数的变换.....	37
2-14 粒子谱分布.....	39
2-15 声波.....	40
2-16 声波的散射.....	43
第三章 大气、海洋和生物物质中离散散射元的特征	45
3-1 天气雷达、扰乱回波和干扰.....	45
3-2 气溶胶和水汽凝成物.....	47
3-3 海水中的光散射(水光学).....	57
3-4 水下的声散射(水声学).....	60

3-5	生物质的散射.....	69
第四章	稀疏分布粒子对波的散射.....	77
4-1	平均散射功率的单次散射近似.....	79
4-2	散射功率的一级多次散射表达式.....	81
4-3	窄波束方程.....	83
4-4	相干场和非相干场.....	86
4-5	运动粒子的时间相关散射截面.....	90
4-6	散射场的时间相关函数和时间频谱.....	95
4-7	散射场的空间相关.....	96
4-8	运动的接收机信号的相关.....	99
4-9	散射场的概率分布.....	99
第五章	随机分布粒子对脉冲波的散射.....	105
5-1	时变随机介质中脉冲传播和散射的普遍公式.....	105
5-2	双频相关函数和输出脉冲的相关.....	108
5-3	相干时间和相干带宽.....	110
5-4	窄带脉冲的散射.....	111
5-5	来自窄波束发射机的脉冲的后向散射.....	115
5-6	一系列短脉冲的后向散射.....	121
5-7	来自宽波束发射机的脉冲的后向散射.....	123
5-8	脉冲的双向散射.....	124
5-9	模糊函数表达法.....	126
5-10	脉冲 Doppler 雷达.....	128
第六章	通过稀疏分布粒子的视线传播.....	132
6-1	平面波的相干和非相干强度以及起伏的空间相关.....	134
6-2	平面波的时间相关和频谱.....	139
6-3	平面波脉冲的视线传播.....	141
6-4	在发射机和接收机之间的视线传播.....	144
6-5	发射机和接收机之间的脉冲传播.....	150
6-6	振幅和相位起伏的 Rytov 解.....	153
6-7	平面波情况下的 Rytov 解.....	156

6-8	平面波的对数振幅和相位起伏的时间相关和频谱·····	160
6-9	考虑了发射机和接收机特征后的 Rytov 解·····	162
第二部分 随机分布散射元中波的输运理论·····		165
第七章 随机粒子中波传播的输运理论·····		165
7-1	辐射强度、通量和通量密度·····	167
7-2	自由空间及均匀介质边界面上的辐射强度·····	171
7-3	辐射强度的微分方程·····	174
7-4	约化入射强度、漫射通量、边界条件以及源函数·····	178
7-5	积分方程关系式·····	180
7-6	接收截面和接收功率·····	183
7-7	部分偏振电磁波的输运方程·····	184
7-8	辐射强度与 Poynting 矢量的关系 ·····	186
第八章 稀疏介质的近似解·····		189
8-1	一级多次散射近似下的辐射强度·····	189
8-2	入射到平面平行介质的平面波·····	191
8-3	入射到平面平行介质的准直光束·····	195
第九章 漫射近似·····		197
9-1	漫射方程的推导·····	197
9-2	边界条件·····	201
9-3	准直光束入射到包含粒子的平行层·····	204
9-4	平面波入射到粒子平行层上的解·····	205
9-5	有限宽度的准直光束入射到包含粒子的平行层问题 的解·····	207
9-6	点源的漫射·····	209
9-7	双光学纤维反射率·····	210
9-8	纤维光学血氧定量计测试管·····	211
第十章 二流和四流理论·····		215
10-1	Kubelka-Munk 二流理论 ·····	215
10-2	二流理论中的系数 K 和 S ·····	220
10-3	四流理论·····	222

附录 10A.....	225
第十一章 平面平行问题.....	228
11-1 垂直入射到一个平面平行层上的平面波.....	229
11-2 典型的相函数.....	231
11-3 Gauss 求积公式	232
11-4 通解.....	236
11-5 半无限介质.....	244
11-6 倾斜入射和其他方法.....	245
11-7 分层平行平面介质.....	246
11-8 其他有关问题.....	249
第十二章 各向同性散射.....	250
12-1 各向同性散射的 Fourier 变换方法.....	251
12-2 漫射和近场现象.....	257
12-3 来自任意入射强度的辐射.....	258
12-4 来自具有角度变化的人射球面波的辐射.....	259
12-5 任意源分布的辐射.....	262
12-6 有限体积内各向同性散射和 Milne 问题.....	264
第十三章 大粒子近似.....	266
13-1 小角近似微分方程的推导.....	266
13-2 通解.....	268
13-3 漫射强度为角度缓变函数时的近似解.....	272
第三部分 多次散射理论.....	279
第十四章 在静止和运动散射元中波的多次散射理论及 其与输运理论的关系.....	279
14-1 Twersky 理论中的多次散射过程	280
14-2 对离散散射元的统计平均.....	285
14-3 对相干场的 Foldy-Twersky 积分方程.....	287
14-4 对相关函数的 Twersky 积分方程.....	290
14-5 相干场.....	293
14-6 入射在散射元薄层上的平面波——“总强度”.....	296

14-7	多次散射理论和输运理论之间的关系	303
14-8	相关函数的近似积分和微分方程	306
14-9	运动粒子的基本方程	309
14-10	尺度分布造成的起伏	316
附录 14A	当 $N=3$ 时 Twersky 散射过程的实例	318
附录 14B	多重积分 I 的平稳相位求值法	319
附录 14C	前向散射定理	324
第十五章 在随机分布散射元中波动起伏的多次散射理论		
	论和脉冲传播	327
15-1	运动散射元的基本方程	327
15-2	小角近似下的相关函数、角度谱和频谱	328
15-3	平面波解	331
15-4	随机分布粒子对成象分辨率的限制	334
15-5	随机分布散射元中接收机的输出	340
15-6	在随机分布粒子中的球面波	342
15-7	随机分布散射元的后向散射	342
15-8	随机分布散射元中的脉冲传播	348
15-9	随机分布散射元中双频互相干函数的积分和微分方程	350
15-10	平面波情况的双频互相干函数	352
15-11	平面脉冲波的弱起伏解	354
15-12	平面脉冲波的强起伏解	357
第四部分 随机连续介质和湍流介质中的波动		
第十六章 随机连续介质和湍流介质对波的散射		
16-1	单次散射近似和接收功率	364
16-2	平稳随机介质单位体积的散射截面	365
16-3	Booker-Gordon 公式	369
16-4	Gauss 谱模式和 Kolmogorov 谱	371
16-5	各向异性随机介质	373
16-6	时变随机介质所引起的散射场的时间起伏	374

16-7	强起伏·····	378
16-8	随机介质对脉冲波的散射·····	379
16-9	声波的单位体积散射截面·····	380
16-10	窄波束方程·····	381
第十七章 平面波在随机介质中的视线传播——弱起伏情形·····		382
17-1	起伏介质的 Maxwell 方程 ·····	383
17-2	Born 和 Rytov 方法 ·····	385
17-3	对数振幅起伏和相位起伏·····	387
17-4	平面波公式·····	388
17-5	直接法和谱展开法·····	389
17-6	振幅和相位起伏的谱表达式·····	390
17-7	振幅和相位相关函数·····	393
17-8	振幅和相位结构函数·····	395
17-9	谱和空间滤波函数·····	396
17-10	均匀随机介质及其谱滤波函数·····	398
17-11	几何光学区 $L \ll l^2/\lambda$ ·····	399
17-12	$L \gg l^2/\lambda$ 区 ·····	402
17-13	均匀随机介质中起伏的普遍特征·····	404
17-14	具有 Gauss 相关函数的均匀随机场·····	405
17-15	均匀湍流和局地均匀湍流·····	406
17-16	具有 Gauss 相关函数的不均匀随机介质和空间滤波函数·····	411
17-17	湍流强度沿传播路径的变化·····	413
17-18	弱起伏理论的适用范围·····	414
17-19	有关的问题·····	414
第十八章 球面波和束状波在随机介质中的视线传播——弱起伏情形·····		416
18-1	球面波的 Rytov 解 ·····	416
18-2	Kolmogorov 谱情形下的方差·····	418

18-3	Kolmogorov 谱情形下的相关函数和结构函数.....	420
18-4	束状波.....	421
18-5	束状波的方差以及 Rytov 解的适用范围.....	424
18-6	行星大气的遥测.....	425
18-7	某些有关的问题.....	426
第十九章 随机介质中波起伏的时间相关和频谱以及不 均匀随机介质的影响.....		430
19-1	平面波的时间频谱.....	430
19-2	平均风速 U 是横向以及风速起伏 V_r 可以忽略的情形	431
19-3	由平均风速和起伏风速产生的时间频谱.....	435
19-4	球面波的时间频谱.....	437
19-5	双频相关函数.....	439
19-6	交叉波束.....	444
19-7	不均匀随机介质中的波起伏.....	446
19-8	局地缓变随机介质中的波起伏.....	447
第二十章 强起伏理论.....		453
20-1	抛物型方程.....	454
20-2	折射指数起伏的假定.....	455
20-3	平均场方程及其普遍解.....	456
20-4	互相干函数的抛物型方程.....	458
20-5	互相干函数的解.....	461
20-6	互相干函数的举例.....	466
20-7	湍流介质中的互相干函数.....	468
20-8	时间频谱.....	471
20-9	双频相关函数.....	474
20-10	平面波双频互相干函数的解.....	474
20-11	脉冲形状.....	477
20-12	角谱和时间频谱.....	479
20-13	四阶矩.....	481

20-14 薄屏理论.....	484
20-15 薄屏理论的近似解.....	490
20-16 球面波的薄屏理论.....	492
20-17 扩展波源.....	493
20-18 广延介质.....	495
20-19 湍流介质中的光波传播.....	497
20-20 随机介质的调制传递函数.....	502
20-21 自适应光学.....	510
附录 20 A	512
附录 20 B	513
附录 20 C	514
第五部分 粗糙面散射和遥感.....	517
第二十一章 粗糙面散射.....	517
21-1 单位面积粗糙面的接收功率和散射截面.....	519
21-2 水平偏振入射波的一阶扰动解.....	522
21-3 单位面积一阶散射截面的推导.....	529
21-4 粗糙面的统计描述.....	532
21-5 粗糙面的双向散射截面.....	534
21-6 粗糙面随时间变化的作用.....	538
21-7 海浪谱.....	540
21-8 其他有关问题.....	540
21-9 Kirchhoff 近似——粗糙面对声波的散射.....	541
21-10 Kirchhoff 近似下的相干场.....	546
21-11 单位面积粗糙面的散射截面.....	547
21-12 散射场的概率分布.....	550
第二十二章 遥感和反演方法.....	552
22-1 对流层的遥感.....	552
22-2 路径上平均结构常数 C_n 的遥感.....	554
22-3 路径上平均风速的遥感.....	556
22-4 结构常数廓线的遥感及其病态问题.....	560

22-5	反演问题	564
22-6	光滑(规正化)法	564
22-7	统计反演法	566
22-8	Backus-Gilbert 反演法	569
22-9	地球物理观测量的遥感	573
附录 A	随机函数的谱表示法	575
A-1	平稳复随机函数	575
A-2	平稳实随机函数	577
A-3	均匀复随机函数	577
A-4	均匀和各向同性的随机函数	578
A-5	均匀实随机函数	580
A-6	平稳均匀随机函数	581
A-7	“冻结”随机函数	581
附录 B	结构函数	583
B-1	结构函数和具有平稳增量的随机过程	583
B-2	结构函数的谱表示法	585
B-3	局地均匀和各向同性随机函数	587
B-4	Kolmogorov 谱	589
附录 C	湍流和折射指数起伏	592
C-1	片流和湍流	592
C-2	充分发展的湍流	594
C-3	湍流中的保守标量和中性、稳定及不稳定大气	596
C-4	折射指数起伏	599
C-5	保守标量及折射指数起伏的结构函数	599
C-6	大气湍流的能量耗散率 ϵ 和能量收支	601
C-7	起伏耗散率 N	603
C-8	结构常数的计算	603
C-9	边界层、自由大气、大尺度和小尺度湍流	604
C-10	边界层中折射指数的结构常数	605
C-11	自由大气的结构常数 C_n	607