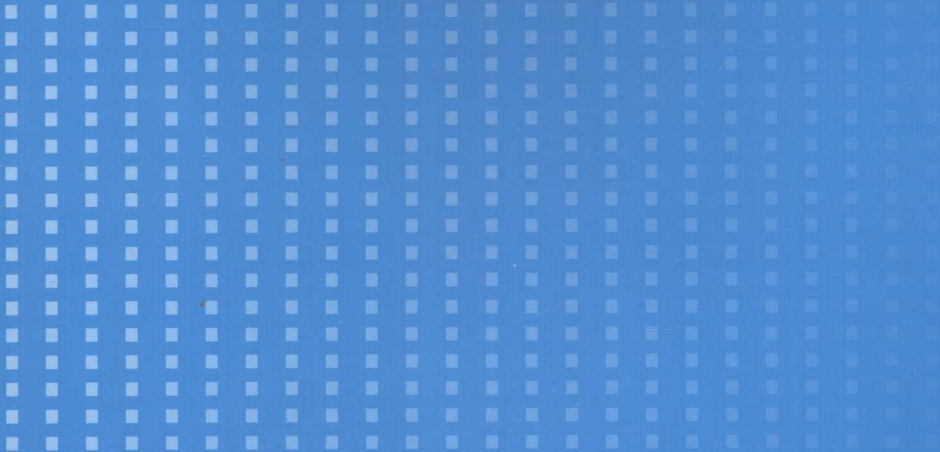




# 光传输建模与计算机模拟



陈纯毅 杨华民 蒋振刚 著

GUANGCHUANSHU JIANMO YU  
JISUANJI MONI



国防工业出版社

National Defense Industry Press

# 光传输建模与计算机模拟

陈纯毅 杨华民 蒋振刚 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

光传输建模与计算机模拟 / 陈纯毅, 杨华民, 蒋振刚著.  
—北京: 国防工业出版社, 2016. 3  
ISBN 978-7-118-10647-3

I. ①光… II. ①陈… ②杨… ③蒋… III. ①光  
传输系统—系统建模 IV. ①TN818

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 039567 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

三河市众誉天成印务有限公司印刷

新华书店经售

\*

开本 710 × 1000 1/16 印张 11¼ 字数 200 千字

2016 年 3 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 40.00 元

---

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

# 前 言

作者在承担国家自然科学基金(61007046、61275080、61475025)、教育部博士点基金(20132216110002)、吉林省自然科学基金(20150101016JC)、吉林省科技攻关计划(20140204009GX)、长春市科技攻关计划(14KG008)等科研任务过程中所开展的研究工作是本书的撰写基础。本书主要讨论大气湍流中的光波传输和虚拟三维场景中的光照传输建模与计算机模拟问题。全书内容共分为7章,除第1章绪论外的其余6章涉及部分相干连续光波大气湍流传输特性建模、脉冲光波大气湍流传输特性建模、艾里阵列光束大气湍流传输特性建模、大气湍流对光学接收影响建模、光波大气湍流传输数值模拟和虚拟三维场景光照传输计算机模拟等内容。

部分相干连续光波大气湍流传输特性建模部分首先针对部分相干光束经大气湍流传输后的闪烁特性和光束漂移特性展开讨论,然后对使用部分相干光传送信息的大气信道无线光通信链路的中断概率、衰落频率、衰落时间长度、误码率、信道容量以及光源相干参数自适应控制等问题作了深入分析。

脉冲光波大气湍流传输特性建模部分首先介绍了统计平稳光场和统计非平稳光场的概念,然后对光脉冲经大气湍流传输后的双频互相干函数、时间扩展、四频交叉相干函数、时间依赖的闪烁指数等进行了理论解析建模;通过数值计算,详细分析了各种湍流参数对光脉冲大气湍流传输特性的影响。

艾里阵列光束大气湍流传输特性建模部分首先介绍了艾里光束的基本特征及相关的数学描述模型;然后详细给出了相干合并和非相干合并艾里阵列光束经大气湍流传输后的平均光强模型,并对艾里阵列光束平均光强随传输距离的变化特性进行了数值分析;最后简要讨论了艾里阵列光束的潜在应用。

大气湍流对光学接收影响建模部分主要讨论环形孔径接收空间光到单模光纤耦合效率和环形孔径接收光信号到达角起伏方差的理论解析建模问题。虽然该部分的理论推导针对环形接收孔径展开,但所建立的数学模型也适用于无中心遮挡的圆形孔径。这是因为无中心遮挡的圆形孔径可看作是环形孔径的一个特例。

光波大气湍流传输数值模拟部分首先简要介绍了基于多相位屏的光波大气

湍流传输计算机模拟的基本思想以及随机湍流相位屏的生成方法,然后以双向大气光通信链路信道状态模拟为研究对象,通过计算机数值模拟详细分析了湍流路径分布模式对双向链路两端接收光功率瞬态差异的影响和湍流强度对双向链路两端接收光功率瞬态差异的影响。

虚拟三维场景光照传输计算机模拟部分首先介绍了基于光线近似的虚拟三维场景光照传输建模的基本思想,然后讨论了三维场景光照传输的数学表述和三维场景光照明方程的近似求解方法;其中将三维场景的光照分为直接光照和间接光照两部分,详细论述了面光源照射下的直接光照计算机模拟求解方法和基于路径跟踪的全局光照计算机模拟求解方法。

本书是作者对近年来的研究工作进行系统整理的初步尝试,由于作者学识水平有限,本书可能存在各种不足之处,欢迎广大同行批评、指正。

作者  
2015年8月

# 目 录

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 第1章 绪论 .....                 | 1  |
| 1.1 光波传输中的环境影响问题 .....       | 1  |
| 1.1.1 大气光学湍流 .....           | 1  |
| 1.1.2 物体散射与遮挡 .....          | 5  |
| 1.2 光波传输特性研究方法 .....         | 7  |
| 1.2.1 理论解析建模方法 .....         | 7  |
| 1.2.2 计算机模拟方法 .....          | 8  |
| 1.2.3 实验测量方法 .....           | 9  |
| 参考文献 .....                   | 10 |
| 第2章 部分相干连续光波大气湍流传输特性建模 ..... | 13 |
| 2.1 光场二阶相干特性的数学表述 .....      | 13 |
| 2.2 高斯-谢尔模态光束 .....          | 14 |
| 2.3 部分相干光束大气湍流传输闪烁特性 .....   | 24 |
| 2.3.1 闪烁方差 .....             | 24 |
| 2.3.2 光强起伏概率密度函数 .....       | 25 |
| 2.3.3 接收光功率起伏均方根时间带宽 .....   | 27 |
| 2.4 部分相干光束大气湍流传输漂移特性 .....   | 31 |
| 2.4.1 光束漂移方差 .....           | 31 |
| 2.4.2 光束漂移时间谱 .....          | 32 |
| 2.5 大气湍流信道无线光通信应用 .....      | 35 |
| 2.5.1 部分相干光通信链路中断概率 .....    | 35 |
| 2.5.2 部分相干光通信链路衰落频率 .....    | 36 |
| 2.5.3 部分相干光通信链路衰落时间长度 .....  | 38 |
| 2.5.4 部分相干光通信链路误码率 .....     | 39 |
| 2.5.5 部分相干光通信链路容量 .....      | 40 |

|                                    |            |
|------------------------------------|------------|
| 2.5.6 光源相干参数自适应优化方法 .....          | 43         |
| 参考文献 .....                         | 47         |
| <b>第3章 脉冲光波大气湍流传输特性建模 .....</b>    | <b>50</b>  |
| 3.1 统计平稳光场和统计非平稳光场的大气湍流传输特性 .....  | 50         |
| 3.1.1 统计平稳高斯-谢尔模态光束 .....          | 50         |
| 3.1.2 统计非平稳脉冲高斯-谢尔模态光束 .....       | 59         |
| 3.2 光脉冲经大气湍流传输后的双频互相干函数 .....      | 65         |
| 3.2.1 弱湍流情形 .....                  | 66         |
| 3.2.2 强湍流情形 .....                  | 74         |
| 3.3 脉冲时间扩展 .....                   | 78         |
| 3.3.1 弱湍流情形 .....                  | 78         |
| 3.3.2 强湍流情形 .....                  | 80         |
| 3.4 脉冲经大气湍流传输后的四频交叉相干函数 .....      | 87         |
| 3.5 脉冲的时间依赖闪烁指数 .....              | 90         |
| 参考文献 .....                         | 97         |
| <b>第4章 艾里阵列光束大气湍流传输特性建模 .....</b>  | <b>99</b>  |
| 4.1 艾里光束及其基本特性 .....               | 100        |
| 4.1.1 艾里光束数学模型 .....               | 100        |
| 4.1.2 艾里光束的特殊性质 .....              | 100        |
| 4.2 相干合并艾里阵列光束大气湍流传输平均光强 .....     | 102        |
| 4.3 非相干合并艾里阵列光束大气湍流传输平均光强 .....    | 107        |
| 4.4 艾里阵列光束的潜在应用 .....              | 111        |
| 参考文献 .....                         | 111        |
| <b>第5章 大气湍流对光学接收影响建模 .....</b>     | <b>113</b> |
| 5.1 环形孔径接收空间光到单模光纤耦合效率 .....       | 114        |
| 5.2 环形孔径接收光信号到达角起伏方差 .....         | 120        |
| 参考文献 .....                         | 130        |
| <b>第6章 光波大气湍流传输数值模拟 .....</b>      | <b>133</b> |
| 6.1 基于多相位屏的光波大气湍流传输数值模拟的基本思想 ..... | 133        |
| 6.2 相位屏生成算法 .....                  | 135        |

|            |                                     |            |
|------------|-------------------------------------|------------|
| 6.3        | 双向大气光通信链路信道状态数值模拟.....              | 137        |
| 6.3.1      | 双向链路的信号光束传输与接收模型 .....              | 138        |
| 6.3.2      | 大气湍流中的高斯光束双向互反传输数值模拟 .....          | 139        |
| 6.3.3      | 湍流路径分布模式对链路两端接收光功率<br>瞬态差异的影响 ..... | 140        |
| 6.3.4      | 湍流强度对两端接收光功率瞬态差异的影响 .....           | 147        |
| 6.4        | 脉冲光信号的大气湍流传输数值模拟.....               | 150        |
|            | 参考文献 .....                          | 153        |
| <b>第7章</b> | <b>虚拟三维场景光照传输计算机模拟 .....</b>        | <b>155</b> |
| 7.1        | 基于光线近似的三维场景光照传输建模.....              | 155        |
| 7.2        | 三维场景光照传输的数学表述.....                  | 162        |
| 7.3        | 三维场景光照明方程的近似求解.....                 | 163        |
| 7.3.1      | 直接光照求解 .....                        | 164        |
| 7.3.2      | 间接光照求解 .....                        | 167        |
|            | 参考文献 .....                          | 170        |

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 光波传输中的环境影响问题

人们在日常生活中每天都能见到各种不同的光现象,例如在夜晚人眼能观察到星星闪烁,在太阳的照射下潜入到海底的人能看见形状各异的焦散斑,人们对着镜子能看到“第二个自己”,晴天行走在林荫道上的人可以看到斑驳的树影。这些都是光在不同环境中传播所产生的表现各异的物理现象,从理论上分析它们的形成原因,或者对它们进行计算机模拟,有助于阐明各种复杂环境条件对光传输特性的影响,或者生成人们需要的特定三维场景光照画面,以便人们更好地开展或者优化各种相关的实际应用。本书主要讨论大气湍流中的光传输和虚拟三维场景中的光传输的建模与计算机模拟问题。下面将针对这两个方面简单介绍一些相关的基本理论和物理概念。

### 1.1.1 大气光学湍流

人们对大气湍流的研究已有较长的历史,不少文献都对湍流的产生和统计变化特性作过论述<sup>[1-5]</sup>,这里只作概要性介绍。太阳辐射传播到地球表面后,地球表面因受热而向外辐射能量,导致靠近地表面的空气团温度升高。对于地球大气而言,温度越高的气团,其密度越低。因此,当地面附近的气团温度比临近的上层气团温度高时,地面附近的气团就会做上升运动,同时上层温度相对较低的气团会做下沉运动,从而形成大气对流。另外,不同地点位置受太阳辐射的不均匀性,也可能引起不同地点附近的大气团温度产生差异,从而形成温度梯度,导致大气流动。人们能直接感知的大气流动就是风。根据现有的流体力学理论,流体运动可分为层流和湍流。在处于层流状态的大气流动中,内摩擦力占主导,流体的惯性力可以忽略,大气流动非常平稳,无湍流产生。在处于湍流状态的大气流动中,惯性力占主导,流体的内摩擦力可以忽略,大气流动不再平稳,流体的不同部分存在速度起伏,会出现大量不同的涡旋。雷诺数是用于描述流体运动性质的一个关键物理量,其等于流体的惯性力和内摩擦力的比值。当大气流动的雷诺数大于某一临界值时,大气流动就从层流变成湍流。大气流动的临界雷诺数比较低,因此大气湍流在地球大气中普遍存在。根据 Richardson 描绘

的级串图像<sup>[6]</sup>可知:尺度最大的涡旋的能量来自风切变或者对流,大尺度湍流涡旋会不断破碎形成尺度更小的湍流涡旋,直至到达尺度最小的涡旋为止。这一过程实现了湍流动能在不同尺度涡旋之间的传递,湍流动能最终在尺度最小的涡旋处被完全耗散变成热能。湍流涡旋的最大尺度称为外尺度,湍流涡旋的最小尺度称为内尺度,内尺度和外尺度之间的区间称为惯性区。

大气湍流中的不同涡旋对于光传输来说,就相当于一个个随机透镜<sup>[7]</sup>,对光波产生随机折射和衍射作用,使得光波的振幅和相位出现随机变化。实际上,人们观察到的星光闪烁就是由星光振幅随机变化引起的。大气湍流中的折射率随机起伏是导致光波振幅和相位产生随机变化的根本原因。对于呈现随机性的大气湍流而言,只能用统计方法来描述其折射率变化特性。根据随机过程理论可知,对于某一随机过程来说,只要知道它的任意维概率密度函数,就能完全描述该随机过程。但在实际研究中,很难获得某一随机过程的任意维概率密度函数。就大气湍流来说,通常用折射率起伏的空间协方差函数来描述折射率在三维空间中的随机变化特性。折射率起伏定义为<sup>[4]</sup>

$$n_1(\mathbf{R}) = n(\mathbf{R}) - n_0(\mathbf{R}) \quad (1.1)$$

式中: $n(\mathbf{R})$ 表示点 $\mathbf{R}$ 处的大气折射率; $n_0(\mathbf{R})$ 表示点 $\mathbf{R}$ 处的大气折射率均值。通常条件下, $n_0(\mathbf{R}) \approx 1$ 和 $\langle n_1(\mathbf{R}) \rangle \approx 0$ ,尖括号表示系综平均。折射率起伏的协方差函数定义为<sup>[4]</sup>

$$B_n(\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_1 + \mathbf{R}) = \langle n_1(\mathbf{R}_1) n_1(\mathbf{R}_1 + \mathbf{R}) \rangle \quad (1.2)$$

对于统计均匀各项同性大气湍流而言,有<sup>[4]</sup>

$$B_n(\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_1 + \mathbf{R}) = B_n(\mathbf{R}) \quad (1.3)$$

式中: $\mathbf{R} = |\mathbf{R}|$ 。利用傅里叶变换,可以根据折射率起伏协方差函数得到折射率起伏的空间功率谱密度函数<sup>[4]</sup>:

$$\Phi_n(K) = \frac{1}{(2\pi)^3} \iiint_{-\infty}^{\infty} B_n(R) \exp(-i\mathbf{K} \cdot \mathbf{R}) d^3\mathbf{R} \quad (1.4)$$

式中: $K = |\mathbf{K}|$ 。上式假设湍流满足统计均匀假设。虽然折射率起伏协方差函数和折射率起伏空间功率谱密度函数构成一个傅里叶变换对,从理论上说二者对大气折射率起伏的描述是等效的,但在各种理论研究中,普遍使用折射率起伏空间功率谱密度函数来描述大气湍流折射率的随机变化特性。有时为了叙述简便,折射率起伏空间功率谱密度函数又被称为湍流谱。

各种文献给出了许多不同形式的折射率起伏空间功率谱密度函数<sup>[4,8,9]</sup>。大量研究者<sup>[1-19]</sup>针对不同的折射率起伏空间功率谱研究了光波经大气湍流传输后的各种光场统计量,分析了各种湍流参量对光场统计量的影响。从严格意

义上讲,折射率起伏空间功率谱密度函数应该包含湍流内尺度、湍流外尺度、折射率结构常数、谱指数和湍流涡旋各项异性参数。湍流内外尺度描述了大气流动中尺度最小的涡旋尺寸和尺度最大的涡旋尺寸。折射率结构常数是折射率起伏空间功率谱密度函数的一个不依赖于空间波数  $K$  的比例系数,表征了折射率起伏的强弱。谱指数描述了折射率起伏空间功率谱密度函数在惯性区内的函数形状。湍流涡旋各项异性参数描述了各项异性湍流中的涡旋在水平和竖直两个方向上的尺度之比;对于各项同性大气湍流,湍流涡旋各项异性参数取值为 1。目前,学术界对各项异性大气湍流的研究和认识并不全面,还没有获得过关于湍流涡旋各项异性参数随涡旋尺度变化的可靠数据,光波在各项异性大气湍流中的传输特性有待进一步深入研究<sup>[9,14,15]</sup>。在各种文献<sup>[4,20,21]</sup>中,如果考虑空地垂直/斜程光传输问题,通常都将大气折射率结构常数的路径依赖性纳入理论分析之中。到目前为止,已经有许多关于大气折射率结构常数高度分布廓线模型的报道<sup>[21]</sup>。这些模型大多数是根据实验测量结果利用数据拟合方法得到的。然而,值得注意的是,大气湍流内外尺度、湍流谱指数以及湍流涡旋各项异性参数实际上都具有海拔高度依赖性<sup>[2,9,22]</sup>。在各种理论研究中,为了简化数学解析求解过程,即使对空地垂直/斜程光传输问题,也很少有作者将大气湍流内外尺度、湍流谱指数以及湍流涡旋各项异性参数等的海拔高度依赖性纳入解析理论建模之中。然而,目前还没有文献系统分析过这些参数的海拔高度依赖性对最终光波参数统计量有多大影响。造成相关研究工作缺乏的原因之一也许是,由于目前学术界对这些参数的高度分布廓线的了解还不够系统和详细,因此即便在相关解析理论建模中考虑这些参数的海拔高度依赖性,也难以获得可靠的分析结果。

大气湍流导致在其中传播的光波的振幅和相位发生随机起伏。对这一问题的研究已有大量文献报道<sup>[1-7]</sup>,这里对得到的一些基本结果作简要介绍。早期人们主要研究平面波和球面波经大气湍流传输后的振幅和相位起伏。在理论解析研究中,通常把大气湍流分为弱湍流和强湍流两种情形。在弱湍流条件下,光波的对数振幅起伏方差远小于 1,因而光波的振幅起伏很小,相位起伏占主导;此时大气湍流对光波的散射以单散射为主,人们用微扰法求解随机亥姆霍兹方程,得到的光波复振幅起伏扰动解和实验测量结果能够很好地吻合。然而当湍流变强时,基于微扰法得到的光波复振幅起伏扰动解和实验测量结果则出现明显的偏差。根据基于微扰法得到的光波复振幅起伏扰动解可知,光闪烁指数随湍流的增强无限制地增大,但是实验测量结果显示光闪烁指数存在饱和区,即当湍流强度增加到一定值后,光闪烁指数不是进一步增加,而是随着湍流强度的不断增加而减小,最终趋近于 1。为了解决光闪烁指数饱和问题,人们利用不同方

法得出了不同的光闪烁解析理论结果。微扰方法在强湍流区失效的本质原因是,随着湍流的增强,湍流涡旋对光波的多次散射占主导,光波的空间相干性不断变差;当湍流增强到一定值后,观察点处的光场实际上是大量非相干光波被湍流涡旋散射后的叠加场;大量随机散射光波的非相干叠加使得观察点处的闪烁指数不会随湍流的增强而不断增加。值得注意的是,虽然利用微扰法在弱湍流区中得到的光波振幅起伏结果不适用于强湍流区,但是利用微扰法在弱湍流区中得到的平面波和球面波相位起伏结果则可以用于强湍流区<sup>[4]</sup>。实际上利用微扰法求出的平面波和球面波的结构函数的数学形式与利用光场矩抛物方程法求出的平面波和球面波的结构函数的数学形式完全一样<sup>[4]</sup>,而光场矩抛物方程法是学术界公认的适用于处理强湍流区中的光传输问题的方法<sup>[23]</sup>。对横向空间尺度有限的束状波,其大气湍流传输特性的解析理论求解过程比平面波和球面波更复杂;利用微扰法求出的束状波结构函数的数学形式和利用光场矩抛物方程法求出的束状波结构函数的数学形式则不再相同<sup>[4]</sup>。因此,光波的横向尺度也对其大气湍流传输特性的解析求解有重要影响。

除了光闪烁外,光波相位起伏也在各种实际应用中被广泛关注。与光波相位起伏密切相关的一个物理量是到达角起伏,其在天文观测、无线激光通信等应用中非常重要。到达角起伏会引起接收焦平面上的信号光斑随机移动,严重时可能超出探测器的有效探测区域,引起探测性能降低。到达角起伏主要对应于光波相位起伏中的随机倾斜量。实验测量结果表明,用微扰法得到的到达角起伏解析表达式在相对较强的湍流区也适用<sup>[24]</sup>。对于束状波传输而言,大气湍流会导致光束瞬时横截面光斑在观察面上发生随机移动,产生所谓的光束漂移现象。光束漂移导致光束在观察面上的长曝光半径增加,使观察面上的平均接收光强降低;另外,由于光束横截面光斑在观察面上随机移动,光束漂移也会导致在给定观察点处产生光强起伏,从而造成闪烁指数增加。例如,聚焦光束经大气湍流传输后,在光轴上的闪烁指数就和光束漂移密切相关<sup>[4]</sup>。从物理上说,光束漂移也是相位起伏相关量,和到达角起伏具有一定对应关系;光束漂移主要源自靠近发射端的湍流涡旋的贡献,到达角起伏则主要源自靠近接收端的湍流涡旋的贡献;不少研究者直接利用到达角起伏解析结果来推导光束漂移表达式<sup>[4]</sup>。需要指出的是,光束漂移的概念只在弱湍流条件下有意义,当湍流非常强时,光束会发生破碎,在光束横截面内出现大量相互独立的子光束,此时光束漂移对给定观察点的闪烁指数的影响可以忽略。相位起伏中的高阶扰动量对光学成像产生重要影响,会严重降低成像系统的分辨率。目前大量关于大气自适应光学的文献<sup>[25,26]</sup>,就是研究如何补偿大气湍流导致的光波相位扰动,提高成像系统的成像质量。

### 1.1.2 物体散射与遮挡

可以利用计算机模拟光在虚拟三维场景中的传输过程,以便获得在三维场景中任意一点处沿某一给定方向的出射光亮度。从理论上说,只要知道三维场景中任意位置处沿任意方向的出射光亮度,就可以很容易地求出三维场景不同物理空间的照明亮度。这可以为室内灯光照明的可视化设计提供支持。另外,也可以根据亮度值计算生成使用虚拟相机拍摄三维场景时的图像画面,从而实现三维场景的可视化绘制。在可见光通信中,也可以利用计算机模拟光信号在室内的多次散射传输以及对应的接收信号多径时延特性<sup>[27]</sup>。在上述应用中,必须考虑三维场景中的各种几何对象表面对光的散射和遮挡影响,其中的散射主要指三维几何对象表面对光的反射或者折射。散射和遮挡实际上属于光与三维几何对象之间的交互研究范畴,已有大量相关的研究报道。

当三维几何对象透明时,光能够从三维几何对象表面透射过去,此时光在三维几何对象表面发生透射,当然也可能会有一部分光在透明表面处发生反射。当三维几何对象不透明时,光在三维几何对象表面处只发生反射。镜面反射和朗伯漫反射是两种常见的特殊光反射模型,二者可以用解析公式来进行描述。然而,实际非透明三维几何对象大多数都不是理想的镜面反射对象或者朗伯漫反射对象,其反射特性往往介于镜面反射和朗伯漫反射之间。物体对光的散射特性在计算机图形学中通常用术语“材质”来描述。从严格意义上讲,物体对光的散射特性需要用双向散射分布函数来建模。虽然从物理上说双向散射分布函数依赖于光波长,但人们在模拟光在三维场景中的传输时,为了提高模拟计算效率,往往会对三维几何对象表面的光散射特性作大量简化。例如,简单地把三维几何对象材质分成镜面反射和漫反射两部分,分别赋予不同的权重。在三维绘制应用中,通常将光源发出的光分为红、绿、蓝三个分量,每个几何对象表面的材质也分成红、绿、蓝三个分量,通过使用红、绿、蓝三个分量来近似获得整个可见光谱内的光照明传输结果。各种文献中使用的三维几何对象表面散射模型可以大致分为经验模型、基于测量的模型和基于物理的模型三类<sup>[28]</sup>。经验散射模型主要是根据日常观察到的散射现象而设计出的简化模型,其未必完全符合三维几何对象表面光散射的物理特性,只是在光散射现象上相似而已,不保证物理上的正确性,例如常见的 Phong 模型<sup>[28]</sup>就属于经验模型。基于测量的模型通常用表格的形式来描述,表中的数据由测量得到,当给定入射方向和出射方向后,可以通过查表来计算双向散射分布函数值。基于物理的模型则是根据对三维几何对象表面光散射物理特性的认识和理解而推导出的解析模型。对于各项同性材

质来说,只有满足能量守恒和互易的三维几何对象表面光散射模型才是物理上正确的<sup>[28]</sup>。当然,为了简化计算,在实际中经常使用的许多经验光散射模型并非在物理上正确,但仍然能获得在视觉上具有一定真实感的计算结果。

当光波在传输过程中遇到三维几何对象阻挡时,从理论上说它会在存在阻挡的空间位置发生衍射。但是对于虚拟三维场景中的光传输计算机模拟来说,光的衍射效应通常并不重要,因此可以忽略其对模拟结果的影响。所以,在模拟虚拟三维场景中的光传输时,如果光线遇到非透明三维几何对象阻挡,就认为光线不能继续按原来的方向传播,而在三维几何对象表面发生散射,这在前面已经作过简要的讨论。三维几何对象对光线传播的阻挡可能会使某些三维几何对象因无法接收到光源发出的光照而处于阴影之中。在三维场景绘制研究中,将这种对光线传播的阻挡称为“遮挡”。三维场景中不同几何对象之间的遮挡计算是三维场景绘制中的核心操作之一。对于光线跟踪等全局光照求解算法,经常需要计算光源对给定场景点的可见性,这实际上就属于遮挡计算。对于点光源而言,其对给定场景点的可见性计算非常简单。点光源对给定场景点的可见性只存在两种可能情况,即要么可见,要么不可见。然而如果照射三维场景的是面光源,光源可见性计算则可能变得非常复杂。这是因为面光源的不同空间位置对给定场景点的可见性可能不同;换句话说,面光源上的某些位置可能与给定场景点之间直接可视,而面光源上另外一些位置可能与给定场景点之间不能直接可视。如图 1-1 所示,面光源发出的光照被一个遮挡几何对象遮挡,图中点 a 至点 b、点 c 至点 d 部分都只能接收到面光源上的部分位置发射的光照,而点 b 至点 c 部分则完全接收不到面光源发射的光照;点 a 至点 b、点 c 至点 d 部分通常被描述为处于半影区中,点 b 至点 c 部分通常被描述为处于本影区中。在多数情况下半影区是从本影区到非阴影区域的平滑过渡,因此不同于点光源,面光源照射下的三维场景中的阴影经常是边界平滑过渡的柔和阴影。

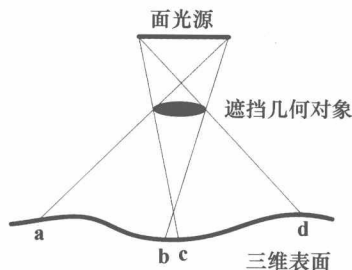


图 1-1 面光源照射的三维场景的二维简化示意图

## 1.2 光波传输特性研究方法

前面介绍了大气湍流中的光传输问题和虚拟三维场景中的光传输问题涉及的一些基本概念,下面将简要介绍现有的光传输问题研究方法<sup>[1-7,28]</sup>。

### 1.2.1 理论解析建模方法

光是电磁波,可以用麦克斯韦方程来对其电场和磁场分量的变化特性进行描述。从理论上说,从麦克斯韦方程出发,可以用理论解析方法来研究光波在各种复杂环境中的传播特性。然而,在各种实际问题中,如果不对问题作适当的简化处理,则难以得到能够揭示问题物理本质的解析结果。对大气湍流中的光传输问题来说,通常作如下假设<sup>[1-7]</sup>:①光场的时间变化可用正弦函数描述;②大气湍流对光波的后向散射可以忽略;③大气湍流引起的光波退偏效应可以忽略;④沿传输方向的大气折射率起伏相关函数可以近似为狄拉克 Delta 函数;⑤可以使用近轴近似。在作上述假设的基础上,可以得到光波大气湍流传输的随机亥姆霍兹方程。很难直接通过分析随机亥姆霍兹方程得到清晰的光波大气湍流传输特性结果,也难以获得光波的各种统计量对大气湍流参数和传输距离的依赖关系。到目前为止,人们在不同的条件下使用过基于平扰近似、广义惠更斯-菲涅耳原理、光场矩抛物方程等方法<sup>[1-7]</sup>来对随机亥姆霍兹方程进行求解,得到的解析结果适用于不同的大气湍流条件。大量的实验测量研究也对这些解析结果进行了验证,证明了这些方法在特定条件下的有效性。实际上使用近似方法求解随机亥姆霍兹方程的最大意义在于,能够获得简明的解析结果,据此可以直接得到大气湍流和传输参数与各种光波统计量之间的物理关系,便于人们对各种物理本质的理解。

对于三维场景中的光传输问题来说,通常人们只是关心给定场景点处沿特定方向的出射光亮度。另外,大多数实际三维场景中的几何对象尺度都比光波波长大多,如前所述,光波的衍射可以忽略。因此,在求解三维场景中的光传输问题时,可以利用几何光学近似,把光波简化成光线,通过分析光线的传播过程来研究光波的传输。除了极其简单的三维场景外,三维场景中的几何对象之间往往存在复杂的遮挡关系,同时几何对象表面对光的散射也可能呈现各种不同的复杂形式,所以利用解析方法求解三维场景中的光传输问题存在很大的困难。目前,各种文献基本上都是用计算机模拟光线在三维场景中的传输过程,进而求得在所关心的场景点处沿特定方向的出射光亮度。

### 1.2.2 计算机模拟方法

对于许多实际问题,有时难以用理论解析法来进行求解。在这种情况下,可以用计算机来模拟光波传输,进而求得各种光场量。就大气湍流中的光波传输来说,可以在传输路径上放置一系列薄随机相位屏,以此来模拟大气湍流对光波传输的影响。每个随机相位屏并不改变光波的振幅,只改变光波的相位;光波的振幅在各个随机相位屏之间的真空衍射模拟传输中发生变化。大气湍流中的光波传输计算机模拟的一个关键问题是,生成能正确反映湍流折射率起伏统计特征的随机相位屏,目前已有大量文献讨论过这方面的内容<sup>[29-36]</sup>。另外,由于计算机模拟处理的是离散化的光场,而非连续光场,因此涉及到对光场的空间采样问题。空间采样间隔大小和空间采样数目的选择,是大气湍流光波传输计算机模拟中的又一个关键问题。受计算机内存容量和计算能力的制约,离散化的采样点总数受到限制;在计算机模拟时,往往需要对各种因素进行权衡和折中,选取最佳的采样参数。如果采样参数选择不当,计算机模拟就有可能得出错误的结果。光波大气湍流传输计算机模拟的空间采样准则已有不少文献作过讨论<sup>[33,37]</sup>。在实际开展光波大气湍流传输计算机模拟研究时,可以先模拟出存在理论解析模型的特定条件下的光波传输结果;如果解析理论预测结果和计算机模拟结果基本吻合,再进一步修改参数,模拟其他条件下的光波传输结果。

与光波大气湍流传输问题不同,虚拟三维场景中的光传输问题难以用解析理论求解。为了对虚拟三维场景中的光传输进行计算机模拟求解,可以利用计算机程序跟踪光线在三维场景中的传播过程,得到一系列连接光源和给定场景点的光线传播路径,进而据此计算光源发出的光照经这些路径传到给定场景点的光照值,再计算从该场景点沿特定方向出射的光亮度。在三维场景中,除光源上的点外,从任何场景点向外出射的光亮度都源自于从光源传来的光照。直观上说,这些光照沿不同的路径传播到该场景点,该场景点沿某一方向向外出射的总光亮度等于所有路径携带的光照经场景点散射后沿该方向向外出射的光亮度值之和。由于三维空间是连续的,严格地说光亮度求和在数学上应该写成积分求和形式,相应的积分区域则是所有光传输路径构成的路径空间。光亮度求和积分是个高维积分,直接求解非常困难,通常使用蒙特卡罗方法进行求解,其主要思想是,按某一概率分布(通常根据三维几何对象表面的双向散射分布函数来确定)对光传输路径空间进行采样,得到一系列采样路径,在此基础上近似计算场景点沿特定方向出射的总光亮度。路径跟踪算法是常见的三维场景光照传输蒙特卡罗求解方法,从数学上说该算法能得到统计无偏的计算结果<sup>[28]</sup>。常见的光线跟踪算法在概念上和路径跟踪非常相似,但是光线跟踪算法本质上并未

使用蒙特卡罗求解积分的思想。在光线跟踪中,为了避免无限递归跟踪问题,通常需要设定最大跟踪深度,当光线跟踪深度超过最大跟踪深度时,就停止对光线作进一步跟踪,因此光线跟踪算法总是会低估场景点的出射光亮度,导致光线跟踪计算结果在统计意义上有偏且不相合<sup>[28]</sup>。然而,当采样路径数目比较小时,路径跟踪算法的计算结果方差比较大,如果应用在三维场景绘制中,则表现为绘制的画面存在明显的噪声。光线跟踪则不存在这一问题,虽然它不能绘制出完全正确的三维场景画面,但其绘制结果在视觉上不会有明显的噪声。在某些应用场合中,人们可能更愿意接受视觉上更正确的结果,而不是统计意义上更正确的结果。

### 1.2.3 实验测量方法

前面讨论了利用解析理论方法和计算机模拟方法来研究光波传输的问题。这两种方法得到的结果是否可靠,则需要通过和实验测量结果进行对比来确定。到目前为止,已经有大量关于光波大气湍流传输特性的实验测量结果报道<sup>[1,2,24,38-43]</sup>,不少作者也对实验测量结果和理论解析结果进行了对比分析,验证了理论解析结果在相应近似条件下的可靠性。对光波大气湍流传输而言,由于地球大气本身的复杂多变性,如果仅简单地测量某些光波参量而不实时地监测大气环境参数,实际上并不能有效地对理论解析结果进行验证。例如,要通过测量激光经野外大气湍流传输后的接收光功率起伏,来验证现有的光闪烁模型的有效性,就必须精心设计实验测量系统和实验流程,并且实时监测大气湍流的关键参量,否则,由于无法获知是在什么样的湍流条件下获得的测量结果,而难以对实验数据进行严谨的分析。前面在讨论大气光学湍流时,已经指出大气湍流包括折射率结构常数、湍流内外尺度、湍流谱指数、湍流涡旋各项异性参数等关键参量。路径平均的折射率结构常数可以用闪烁仪来测量。但其他湍流参量的测量则缺乏公认的标准仪器。

实验测量方法受工程条件、经费和时间等制约,往往只能获得有限条件下的测量结果。例如,测量系统使用的激光光源通常就只能选择市场上的商用激光器,其波长并不能任意变化。此外,测量实验中的光传输距离也往往受地形、地貌等的限制而不能任意改变。测量系统收发孔径几何参数也可能对光传输特性产生影响,在分析测量数据时如何处理这些影响也是非常重要的问题。因此,在实际研究中,往往只能在某些特定条件下,测量经大气湍流传输后的光波参量;严格地说,获得的实验测量数据只能对这些特定条件下的理论解析结果进行验证。此外,由于计算机模拟具有参数灵活可控的优点,许多研究者也利用计算机模拟结果来从另一侧面验证理论解析结果。大多数大气湍流参量的测量原理