



数据加载失败，请稍后重试！

光信号在地球大气中的传输

〔苏〕B. E. 祖耶夫 M. B. 卡巴诺夫 著

殷贤湘 译

吕达仁 校

科学出版社

1987

内 容 简 介

本书综述了光信号在地球大气中传输的实验和理论研究成果,系统地阐述了噪声引起的大气的光学干扰问题。

全书共分七章,主要研究光信号在大气中传输所产生的各种效应,讨论了散射和吸收引起的信号能量的衰减,光波与大气的相互作用和下垫面产生的背景干扰,以及大气中光信号的时间调制和空间调制等问题,并分析了相应的大气模式。叙述中避免了烦琐的数学推导。

本书可供从事大气光学和大气物理学、地球物理学、天文学和天体物理学、光电子学,以及激光技术和遥感技术等科技人员和大专院校相应专业的师生参考。

В. Е. Зуев, М. В. Кабанов

ПЕРЕНОС ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В ЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЕ (В УСЛОВИЯХ ПОМЕХ)

Советское Радио, 1977

光信号在地球大气中的传输

〔苏〕В. Е. 祖耶夫 М. В. 卡巴诺夫 著

殷贤湘 译

吕达仁 校

责任编辑 侯建勤 赵惠芝

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

*

1987 年 7 月 第 一 版 开本: 787 × 1092 1/32

1987 年 7 月 第一次印刷 印张: 10 1/2

印数: 0001—1,800 字数: 237,000

统一书号: 13031 · 3560

本社书号: 4099 · 13—3

定价: 2.50 元

序 言

激光的出现,极大地推动了光学、电子学以及其他边缘科学和技术的发展。激光在通信、信息传送、雷达、高精度测距、遥感探测各种环境参量和其他方面广泛应用的可能,有力地促进了激光在大气中传播的研究工作。本书提供的研究成果,揭开了大气光学领域中新的一页。因为有关热辐射源的大部分早期资料,即使用来对激光与大气相互作用产生的效应作粗略的定量估算也不行。此外,用激光的研究成果,可以更深入地弄清光波与大气相互作用的本质,了解这种相互作用的详细机理。

光波在大气中传播时,会受到分子吸收、大气气体和气溶胶散射、并合散射和共振散射、折射以及辐射与介质的非线性相互作用。

吸收和散射引起大气中波的能量衰减。大气折射率的起伏引起波的振幅和相位起伏。非线性效应则使能量的变化与表征大气中光信号能量以指数衰减的布格尔 (Byrep) 定理产生偏差。另一方面,无论是传播信号本身的畸变,或是外来辐射与大气的相互作用产生的上述效应,都伴随着产生大气的光学干扰。

和无线电波段不同,光波在大气中的传播主要取决于大气的性质。因此,在与光信号通过大气传输有关的系统中,光波的利用效率,主要取决于介质对信号的影响,更确切地说,是对信噪比的影响。

在文献[1,2]中,论述了光信号在大气中的各种传播问

题。至于大气光学干扰的普遍问题,文献中暂时还没有,作者试图填补这一空白。本书的基本思想,就是要对大气的光学干扰产生的各种效应逐个进行分析,并作出定量的描述。为了完整地描述光信号在不同大气条件下的传播,我们也讨论了有用信号的各种传输问题。

本书综述了作者和他们的同事的研究成果,也引用了苏联和国外其他科学工作者的研究成果。

第一章概述了光信号通过大气的传输。第二、第三章是关于散射和吸收引起的光信号的能量衰减问题。第四章讨论了光信号的散射产生的背景干扰。第五章讨论了来自外来源的背景干扰。第六章分析了散射大气对光信号产生的时间调制。第七章分析了散射大气对光信号产生的空间调制。

写本书时,作者力图利用大气光学的全部重要成果。然而,这部著作并非完美无缺,作者将感谢对本书提出的任何诚恳意见。

目 录

序言	v
第一章 概述	1
1.1 光信号和光学干扰的基本性质	1
1.1.1 光度学概念的适用范围	2
1.1.2 偏振特性	4
1.1.3 大气的光学干扰	5
1.2 大气中光波的散射	8
1.2.1 单个粒子对光波的散射	8
1.2.2 粒子系对光波的散射	10
1.2.3 气溶胶大气的光学模式	14
1.3 湍流大气中光波的传播	18
1.3.1 湍流大气的性质	18
1.3.2 波的振幅起伏和相位起伏	20
1.3.3 湍流介质对光束结构的影响	24
1.3.4 湍流大气的光学模式	27
1.4 地球大气中光的折射	31
1.4.1 斜程地球折射	32
1.4.2 水平路程的地球折射	37
1.4.3 随机折射	39
1.4.4 光学折射与频谱的关系	40
1.5 大气气体对光辐射的吸收	42
1.5.1 基本概念和定义	42
1.5.2 单根谱线的吸收	44
1.5.3 重叠谱线组的吸收	48

1.5.4 非均匀大气的吸收	50
第二章 大气散射引起的光信号的能量衰减	52
2.1 光信号的分子散射	53
2.2 光信号的气溶胶散射(模式数据)	54
2.2.1 近地层的散射系数和衰减系数	55
2.2.2 衰减系数的高度剖面	59
2.3 大气霾和降水的光谱透过率(实验数据)	65
2.3.1 大气霾的透过率	65
2.3.2 降水的透过率	74
2.4 布格尔定理的适用条件	79
2.4.1 适用条件的一般特性	79
2.4.2 独立散射的条件	82
2.4.3 在湍流大气中的适用条件	87
2.5 光信号在一次散射情况下的衰减	90
2.5.1 点光源的信号衰减	91
2.5.2 准直光束的衰减	94
2.5.3 大散射粒子系产生的光束衰减的计算	99
2.6 布格尔定理在窄光束中的适用范围	101
2.6.1 光源和接收机几何参数的影响	102
2.6.2 介质光学性质的影响	105
第三章 大气的分子吸收引起的光信号能量衰减	108
3.1 大气气体吸收光谱的一般特性	108
3.2 实验研究	114
3.3 理论研究	120
3.4 布格尔定理适用范围和条件	122
3.4.1 适用条件的一般特性	122
3.4.2 弱辐射强度的条件	124
3.4.3 窄辐射脉冲宽度的条件	127
第四章 大气中光信号的散射产生的背景干扰	129
4.1 前向散射的背景亮度	129

4.1.1	前向散射的背景亮度与光学厚度的关系	129
4.1.2	空间分布	132
4.1.3	雾和霾的定量数据	136
4.2	后向散射辐射的背景亮度	138
4.2.1	一次散射公式	138
4.2.2	考虑二次散射的计算	144
4.2.3	空间分布	148
4.3	散射辐射的偏振特性	154
4.3.1	前向散射辐射的偏振特性	155
4.3.2	后向散射辐射的偏振特性	156
4.3.3	雷达脉冲的散射辐射的偏振特性	159
第五章	大气中外来辐射源的背景干扰	165
5.1	不同性质的背景干扰的一般特性	165
5.2	散射太阳辐射的背景	167
5.2.1	散射辐射的光谱组分	167
5.2.2	白天无云天空的亮度和偏振特性	171
5.2.3	多云天空和无云天空亮度的统计结构	179
5.3	大气自身的辐射背景	183
5.3.1	大气的热辐射背景	183
5.3.2	大气的发光背景	189
5.4	地-气系统的向上辐射特征	191
5.4.1	光谱组分	192
5.4.2	空间分布和角分布	197
5.5	下垫面对光辐射的反射特性	200
5.5.1	光谱反照率	200
5.5.2	光谱亮度系数	203
5.5.3	风浪水面反射辐射亮度的起伏特性	207
第六章	散射大气对光信号的时间调制	210
6.1	在离散介质中传播的辐射的强度起伏	210
6.1.1	模拟介质中的实验	211

6.1.2	降水的透过率起伏	212
6.1.3	起伏特性的计算	215
6.2	离散介质中散射辐射的强度起伏	219
6.2.1	实验研究	220
6.2.2	一次散射近似的计算	223
6.2.3	考虑多次散射的计算	230
6.3	光辐射在湍流大气中的强度起伏	234
6.3.1	起伏方差与距离的关系	234
6.3.2	起伏方差与波长的关系	238
6.3.3	强度起伏的频谱	240
6.4	脉冲光信号在散射介质中的传输	243
6.4.1	传播脉冲的模糊	244
6.4.2	反射脉冲的特性	247
第七章	散射大气对光信号的空间调制	253
7.1	空间频率传递概述	253
7.1.1	光学系统的滤波	253
7.1.2	散射介质光学传递函数的一般特性	257
7.2	通过混浊大气的远距离目标的视度	260
7.2.1	一次散射的光学传递函数	261
7.2.2	一次散射的视度公式	266
7.2.3	考虑多次散射的视度公式	270
7.3	通过湍流大气的远距离目标的视度	274
7.3.1	湍流大气的光学传递函数的性质	275
7.3.2	远距离目标图象的模糊和对比与距离的关系	283
7.4	通过非均匀大气的远距离目标的视度	287
7.4.1	湍流大气中垂直路程的视度	287
7.4.2	通过薄离散介质层的视度	289
7.4.3	一次散射近似的计算	291
7.4.4	混浊大气中斜程的视度	294
	参考文献	297

第一章 概 述

光信号在地球大气中传播时,首先会产生与下列几点有关的变化:(1)大气气体的吸收和分子及气溶胶散射引起的能量衰减;(2)空气折射率的随机不均匀性引起的波的振幅和相位起伏;(3)大气的垂直和水平不均匀性产生的折射。当信号功率足够大、持续时间极短时,非线性效应也会影响信号的特性。通常,上述各种效应可独立地进行研究,以解决光信号在大气中传播的各种复杂问题。此外,大气光学效应还造成光学干扰,使光电系统在大气中的工作效率受到限制。

本章扼要地描述了产生光信号畸变的主要大气光学效应和出现的光学干扰。不同效应对光信号的定量作用和干扰,放在后面几章研究。这里仅指出,这种作用既与信号的光谱和几何特性有关,也与大气的光学性质有关。

1.1 光信号和光学干扰的基本性质

严格来说,光信号应表示为电磁振荡的复振幅的函数^[3,4]:

$$q(\mathbf{r}, t) = a(\mathbf{r}, t)e^{i\varphi(\mathbf{r}, t)}, \quad (1.1)$$

式中 $a(\mathbf{r}, t)$, $\varphi(\mathbf{r}, t)$ 是光信号的振幅和相位。距单色光源为 $\mathbf{r}$ 的某一点上,与光信号相关的电场 $E(\mathbf{r}, t)$ 为

$$E(\mathbf{r}, t) = q(\mathbf{r}, t)e^{-i\nu t}, \quad (1.2)$$

式中 ν 是光频率。由式(1.2)可见, $q(\mathbf{r}, t)$ 实质上是谐波 $E(\mathbf{r}, t)$ 的包络。在光频段,通常把信号绝对值的均方值作为信号的度量(与无线电波段不同,在该波段可以记录信号的大

小)。随着全息照相的发明,人们才能直接记录光频段的信号振幅。因此,通常使用的“光信号”这个术语,系指光信号的均方值或强度。

在许多实际情况中,为了描述测量到的光信号大小,可以应用光度学的概念。但是必须注意,由于光场的相干性(譬如用激光测量),有时这个概念就不适用。因此,这节我们就来研究描述光信号的光度学概念的适用范围和光信号的特性,以便后面应用。

1.1.1 光度学概念的适用范围

在光度学测量中,通常记录到的是辐射通量(或光)的平均功率。平均功率与电磁振荡的振幅平方成正比:

$$\mathcal{F} = \int_0^{\infty} \mathcal{F}_\lambda d\lambda, \quad (1.3)$$

式中 $\mathcal{F}_\lambda$ 是辐射通量的谱密度。

在实际的光度学测量中,用入射在单位面积上的通量表示照度 $E = d\mathcal{F}/ds$, 以及以单位立体角入射在角度为 φ 的单位面积上的光通量表示的辐射(或光)亮度 $B = d\mathcal{F}/d\Omega ds \cos \varphi$ (这里 ds 和 $d\Omega$ 相应为面积元和立体角元)是两个重要的能量(光度学的)概念。

在光谱测量中,常常应用光谱照度和光谱亮度的概念。它们表示单位光谱间隔中相应的光通量^[5,6]。应指出,过去确定的这些概念,没有考虑辐射通量的量子性质。统计光学能作相应的分析,并阐明这些概念在现代光度学测量中的适用范围。

严格地说,无惯性的点探测器接收到的信号与辐射的瞬时强度成正比。任何实际的探测器都有一个有限的线性尺度 r_0 和时间常数 t_0 。在多数实际情况中,可以把符合光度学概念的光场,以空间和时间的平均特性记录下来。

如果光场的相干体积比用接收器参数确定的量 ct_0r_0 (c 是光速) 大, 那么光度学的概念就不适用。这时就应使 $t_0 \gg \nu^{-1}$, $r_0 \gg \lambda$ 。对于平均参数的光电接收器, $ct_0r_0 \approx 10^2$ 厘米³。光场的相干体积取决于相干面积和相干长度的乘积。激光和较好的“单色”热辐射源, 其相干长度分别可达到 10^8 厘米和 10^3 厘米。热辐射源的相干面积 ΔA 可由关系式 $\Delta A \approx \bar{\lambda}^2 / \Delta \Omega$ (式中 $\bar{\lambda}$ 是平均波长, $\Delta \Omega$ 是该条件下被观测的光源辐射面的立体角) 大致确定, 其数值约为 10^{-2} 厘米²。激光的相干面积可达到接收器的面积大小。

因此, 光电接收器就足以接收热辐射的空间和时间的平均强度(或照度)。对激光来说, 光电接收器实际接收到的是瞬时强度, 即接收到的信号是某种随机量。在这种情况下, 信号的起伏会引起不稳定的叠加效应, 并可用四阶相关函数来描述。由光场的相关理论可以得出^[7]相干性很好的辐射(如单模激光), 其随机信号的概率分布可用泊松定律描述, 它的数学期望值(等于它的方差) $\langle n \rangle = \alpha \langle I \rangle T$, 其中 n 是光电子数目; $\langle I \rangle$ 是入射在光电阴极上的光辐射的时间平均强度; α 是接收器的量子效率; 而 $T \ll 1/\Delta\nu$ ($\Delta\nu$ 为辐射的光谱宽度) 是记录时间, 通常与接收器的时间常数没有明显不同。可见, 信号的起伏频谱处在 $\omega > 1/\tau_0$ 的频率范围内, τ_0 为辐射的相干时间。对于良好的激光器, 低频端的截止频率可达到 300 赫。我们将进一步看到, 上面指出的频率范围, 有时会超过信号在光学不均匀介质中传播时产生的起伏频谱。因此, 在说明起伏的特性, 特别是用激光和光电接收器作大气光学测量时, 必须十分谨慎。对于比光电接收器有更大惯性的其他接收器(辐射热测量器、量热器等), 光度学概念的适用范围大得多, 并且更容易用类似的方法估算。

1.1.2 偏振特性

和狭义的电磁场一样,光场也完全取决于电场和磁场强度矢量。这些矢量振动平面的位置与时间的关系,是用光场的偏振特性来表征,而偏振特性又是由相应的信号和干扰的性质决定。下面将讨论描述这些特性的简单方法。

到目前为止,已经研究出一些描述光场偏振状态的方法^[3,7,9]。矢量性质用矩阵计算。在光波的传播理论中,以斯托克斯(Stokes)参数为基础的方法是应用最早而又最详细的方法^[10,11]。为了描述光场的偏振特性和能量特性,只要确定带有亮度因次的四个参数就够了。如果光波沿 z 轴传播,而电矢量用 xoy 平面上的椭圆(椭圆偏振辐射)描述,则斯托克斯参数的形式为

$$\begin{aligned} S_1 &= B, & S_2 &= B \cos 2\beta \cos 2x, \\ S_3 &= B \cos 2\beta \sin 2x, & S_4 &= B \sin 2\beta, \end{aligned} \quad (1.4)$$

其中 x 是椭圆的取向角; β 是正切角,它等于椭圆的两半轴之比值。当独立的光通量入射时,斯托克斯参数就为可加量。因此,对于非偏振辐射,独立的通量叠加在一起,使 $S_2 = S_3 = S_4 = 0$,仅 $S_1 \neq 0$ 。由式(1.4)得出,对于线偏振辐射, $S_4 = 0$;而对于圆偏振辐射, $S_2 = S_3 = 0$ 。

如果已知斯托克斯参数,就可求出光辐射的任何偏振特性。其中椭圆偏振度 P 用下式求出:

$$P = \sqrt{S_2^2 + S_3^2 + S_4^2} / S_1. \quad (1.5)$$

由上式很容易导出线偏振度和圆偏振度的关系式以及非偏振(自然)辐射的偏振度 $P = 0$ 。

斯托克斯参数不仅完整地描述了被测光场的偏振特性,由于麦克斯韦方程的线性,通常,光学仪器 and 散射介质就是对斯托克斯参数作线性变换。因此,输入介质的辐射参数(S_i^0)

和介质输出的辐射参数 (S_μ) 之间的关系为

$$S_\mu = F_{\mu\nu} S_\nu^0, \quad (1.6)$$

式中 $F_{\mu\nu}$ 是表示介质(仪器)性质的 16 个分量的矩阵。斯托克斯参数这一明显的性质,可以用来检验斯托克斯参数用于光波在不同散射介质中传播问题中的合理性。

用斯托克斯参数可以描述光场的偏振特性和部分相干性。文献[3,9]严格指出,这种可能是根据任何准单色光波,都可以看作两个独立的完全非偏振的或完全偏振的波之和来研究。这个概念是唯一的。根据以上所述,斯托克斯参数与更完整地描述了光场的相干性和偏振特性的矩阵存在唯一的关系。这种关系用下式确定:

$$\begin{aligned} S_1 &= I_{xx} + I_{yy}, \quad S_2 = I_{xx} - I_{yy}, \\ S_3 &= I_{xy} + I_{yx}, \quad S_4 = i(I_{yx} - I_{xy}). \end{aligned} \quad (1.7)$$

这里 $I_{jk} = \langle E_j E_k^* \rangle$ 是电场 E_i 的相干函数的相干矩阵元。由式(1.7)可见,在光场的部分相干情况下,偏振特性一般不用四个矢量参数来描述。矢量参数的复数特性(存在相位因子),表示在散射介质中传播时进行非线性变换的可能。众所周知,在解决相干光束的传播问题时,类似概念的有效性就会降低。光信号的偏振特性,可以用斯托克斯参数来描述,或者用无论对相干光场还是对非相干光场都非常完善的相干矩阵来描述。

1.1.3 大气的光学干扰

光信号通过大气传送,总是伴随有限制传送信号信息量的内部干扰和外部干扰。内部干扰与使用的收发设备有关。外部干扰主要来源于大气。

根据大气的光学干扰特性和物理本质,可以把它分成两类:(1)经常存在于大气中的背景干扰,这种干扰是由大气和地球辐射以及来自各种外来辐射源,其中包括太阳、月亮和下垫面等的光辐射的散射产生的;(2)由于信号与大气的相互作用产生的光信号畸变引起的干扰。

第一种干扰基本上是相加性的干扰，它累积在传送的信号上，并由随时间不变(更确切地说是随时间缓慢变化的，譬如在一昼夜里才发生变化)的分量和随机(快速变化的)分量组成。这两种分量都使接收机的动态范围减小，从而降低了整个信息传送系统的有效性。

第二种干扰既是相加性的也是相乘性的，这就是大气干扰。这种干扰是被接收的信号中的一个乘子。在这种情况下，有用信号就是记录下来的信号的另一个乘子。这种干扰使传送的信号大小和波形改变时，就降低了信息系统的有效性。

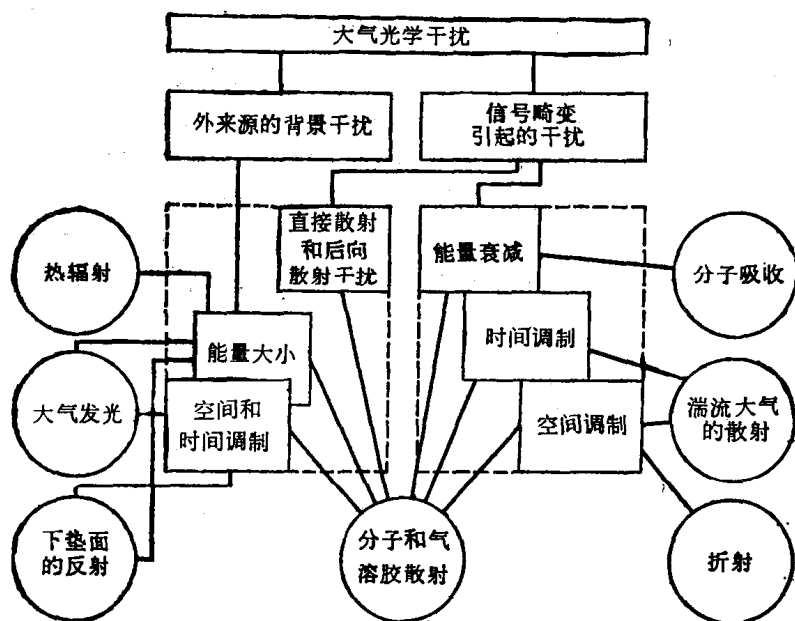


图 1.1 主要的大气光学干扰分类图

图 1.1 是不同性质的主要干扰的分类图。图中长方形和圆之间的连线表示光学干扰与大气光学效应的起因关系。由

图可见,气溶胶散射也列为产生两种光学干扰的效应中。在各种光学干扰中,不同的效应所起的作用主要取决于具体的大气状况。这样,在对流层中,激光束在水平路程和斜程的结构及其起伏特性,首先取决于光波与湍流大气的相互作用。同时,这种相互作用对光信号能量衰减的影响很小而可以忽略。根据大气的气象条件和光电系统的用途,不同效应所起的作用也不同。

对工作在大气中的光电系统的潜在性能的估价,需要有关大气光学干扰特性各方面的知识。同时,为了具体地计算系统的性能,也必须了解大气对光信号的能量衰减、空间和时间调制特性以及大气中背景干扰的能量、偏振和统计性质。

在一系列专门著作^[12-15]中,给出了具体计算光电系统性能的方法。这里只指出,用在输出端信号极值的平方与干扰方差之比所确定的信号干扰比^[12]来表示系统的性能最为方便。实际上,常常利用信号干扰比的另一个概念。所有这些概念,都没有完全表征系统的质量,但是,把这些概念用到具体的系统中却十分有效。根据上面的叙述,在图 1.1 中,右边的方块表示的光学干扰是光信号本身畸变的结果,左边的则是直接的背景干扰。

为了具体估算大气中光学干扰的特性,有两种基本方法可以利用。第一种方法,根据现有的资料估算时,要选择某些典型的大气光学状态(即大气光学模式),再用统计分析估算与所选择的“基本”状态的偏差。由实验和理论可知,用所选择的大气模式就可估算光学干扰的某些特性的平均值和方差。这种方法保证了对光学-气象学参数的预测,而这对于探讨和估算不同用途的光电系统的潜在可能则是必要的。本书以下各章给出的定量数据可供类似的方法应用。

另一种(按确定的意义两者择一)方法在于实际确定求解

问题所必需的大气参数，这对描述该时刻的大气性质无疑是更合适的。当用有效的测量方法得到了相当多的统计资料后，第二种方法就能保证顺利解决光学大气模式的选择问题。从这种观点来看，就不能把第二种方法看作是对立的，而应看作是第一种方法的补充和保障。大气参数的有效测量方法和手段的特性和前景，可参看文献[16—21]。

1.2 大气中光波的散射

光信号在地球大气中传播时，首先其能量会在空气密度的起伏(分子散射)、气溶胶粒子(气溶胶散射)以及空气的湍流运动产生的不均匀性上发生散射。由于忽略了散射截面的微小部分，我们就不涉及其他散射效应，这些效应可以由光波在大气中的传播而产生。

对分子散射已进行了足够详尽的研究，并给出了紫外、可见和红外波段在大气中不同高度的散射系数的详细计算结果。在由散射引起的光信号的能量衰减一章中，我们给出了定量的数据。这里仅指出，分子散射在紫外波段最大，而在红外波段中却是极次要的。

光信号由于气溶胶散射产生的能量衰减是离散介质的一种特殊情况。一般情况下，入射在粒子上的辐射，既产生散射也产生吸收。以后说到气溶胶的散射时，一般情况下都是指气溶胶的衰减。光波在离散介质中的传播理论就是以单个粒子的光散射问题的解为基础的。因此，单个粒子的散射光场特性推广到整个粒子系中。最后，考虑多次散射，传输方程可用测得的整个散射体系中散射光场的二次特性来描述。

1.2.1 单个粒子对光波的散射

Ляв (1899 年) 和 Мис (1908 年) 首先得到了单个球形粒