

# 激光雨滴谱仪光学设计与分析

汪玉,谈图,王贵师,高晓明\*

中国科学院安徽光学精密机械研究所,大气物理化学研究室,安徽合肥 230031

**摘要** 用来描述降水粒子数浓度随粒子尺度变化函数的雨滴谱,是降水最基本的微物理特征量,利用雨滴谱信息可以更清楚地认识自然降水的发展演变过程。从雨滴在矩形光束中的相对位置出发,理论分析了不同尺寸条件下矩形光束透射强度随粒径的变化,结果显示矩形光束的透过率与雨滴尺寸具有很好的线性关系;数值模拟了不同粒径、不同降落速度下雨滴在矩形光束中的渡越时间。并指出利用测量的雨滴粒子大小和下落时间就可获得降水类型(毛毛雨、普雨、降雪、降霰、冰雹以及混合型降水)、降水强度、降水量和粒子波谱(在体积波谱上的粒子分布)等信息。

**关键词** 雨滴谱分布; 矩形光束; 雨滴粒径; 下降速度; 渡越时间

中图分类号: TH73 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2018)12-3952-06

## 引言

雨量信息是气象监测、机场观测系统、交通控制、科学研究、水文地理学等应用的重要指标。传统的雨滴直径测量主要依靠动力学方法<sup>[1]</sup>、滤纸色斑法<sup>[2]</sup>、照相法<sup>[3]</sup>、雷达观测法<sup>[4]</sup>等。目前自动翻转式漏斗测量降雨量仍然是气象部门的重要手段,这种方法只能获得一段时间内的降雨量,无法测量雨滴的谱特征,如雨滴尺寸、雨滴下降速度等。反映雨滴谱特征的参数主要有雨滴的直径大小、粒径分布、雨滴下降速度、雨滴类型等,雨滴直径的大小决定了雨滴在降落过程中的质量和速度大小。用来描述降水粒子数浓度随粒子尺度变化函数的雨滴谱,是降水最基本的微物理特征量,利用雨滴谱信息可以更清楚地认识自然降水的发展演变过程。

Marshall 和 Palmer 提出了降水粒子谱分布<sup>[5]</sup>, Gunn 和 Kinzer 得到了降水粒子速度谱分布<sup>[6]</sup>。1984年 Daniele Hausner 等<sup>[7]</sup>提出了一种基于红外光束同时测量雨滴直径和降落速度的新方法,光束经矩形光阑后形成光束面积 100 cm<sup>2</sup>、高度为 1 cm 的矩形光束,雨滴通过矩形光束引起探测器接收到的光强衰减,利用光强衰减强度和时来获得雨滴的尺寸谱分布和降落速度。20世纪90年代,德国 OTT 公司推出了 Parsive 激光雨滴谱仪<sup>[8]</sup>, Thies 公司推出 LNM 激光雨滴谱仪。在国内,近年来一些公司、大学和研究机构纷纷开展激

光雨滴谱仪的研制,也取得了很好的进步。

本文基于几何光学原理,理论分析了激光雨滴谱仪的矩形光束雨滴不同位置的透射光强变化和雨滴在下落过程渡越矩形光束的时间。

## 1 测量原理

激光雨滴谱仪采用的是一束红外激光经整形透镜组产生一个平行的矩形光束(如图1),再由带透镜的光电二极管安装在接收端来测量光学透过率,并将其转换成电信号,如图2所示。当雨滴粒子通过这个矩形光束,接收到的信号将

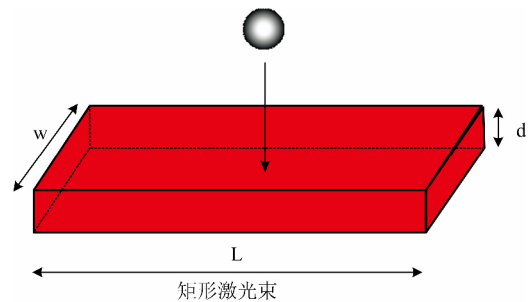


图1 测量雨滴谱分布的原理简图

Fig. 1 Sketch of the measurement for the distribution of raindrops

收稿日期: 2017-11-01, 修订日期: 2018-04-19

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0209700), 国家自然科学基金重点项目(41730103), 国家自然科学基金项目(41575030) 资助

作者简介: 汪玉, 1990年生, 中国科学院安徽光学精密机械研究所研究员 e-mail: wy272772685@163.com

\* 通讯联系人 e-mail: xmgao@aiofm.ac.cn

减弱,粒子的直径可以从光强衰减量计算得到,而粒子的下降速度可以从下降信号的时间  $t$  来确定,如图 3 所示。

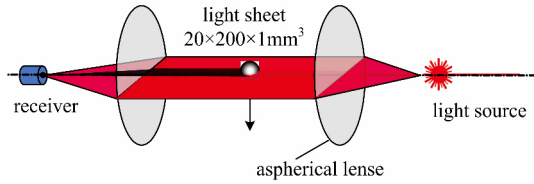


图 2 激光雨滴谱仪光路图

Fig. 2 Optical schematic of laser raindrop spectrometer

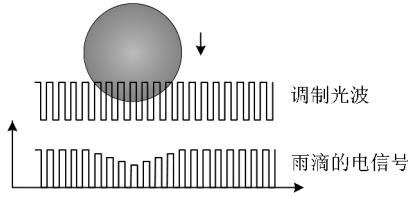


图 3 雨滴谱的信号测量图

Fig. 3 The electrical signal of raindrop spectrum

## 2 雨滴尺寸及下降速度的数值模拟分析

### 2.1 雨滴尺寸的分析

在进行雨滴谱测量时,由于光束的厚度是很小的,因此雨滴在通过矩形光束时主要有以下几种情况产生,本文将详细分析每种情况下矩形光束的透过率变化。

(1) 雨滴粒径小于矩形光束厚度时,即  $2r < d$

① 当  $h < r$  时,雨滴开始进入到光束时

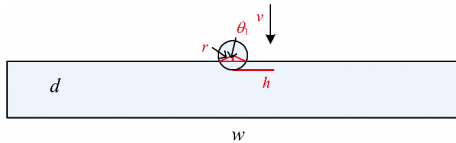


图 4 雨滴刚进入光束时雨滴与矩形光束之间的几何关系

Fig. 4 The geometric relationship between the raindrop and the rectangular beam when the raindrop has just entered the beam

雨滴刚开始遮挡住矩形光束的面积为

$$S_1 = \frac{\theta_1}{180} \times r^2 \pi - (r - h) \sqrt{r^2 - (r - h)^2}$$

其中:  $\theta_1 = \cos^{-1}\left(\frac{r-h}{r}\right)$ ,  $h = \nu t = \nu N \Delta t$

此时透射光强的变化率为

$$T_1 = \frac{wd - S_1}{wd} \quad (1)$$

②  $r \leq h < 2r$  时,雨滴大部分进入到光束中,见图 5。

雨滴大部分进入到矩形光束内遮住的面积为

$$S_2 = r^2 \pi - \frac{\theta_2}{180} \times r^2 \pi + (h - r) \sqrt{r^2 - (h - r)^2}$$

其中:  $\theta_2 = \cos^{-1}\left(\frac{h-r}{r}\right)$

此时透射光强的变化率为

$$T_2 = \frac{wd - S_2}{wd} \quad (2)$$

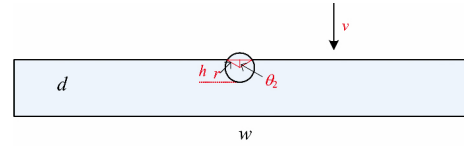


图 5 雨滴大部分进入到光束时雨滴与矩形光束之间的几何关系

Fig. 5 The geometric relationship between the raindrop and the rectangular beam when the most of the raindrop enters the beam

③  $2r \leq h \leq d$  时,雨滴完全进入到光束,即

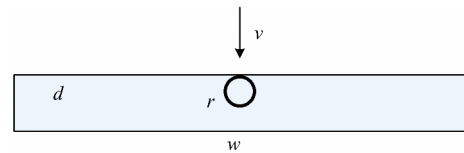


图 6 雨滴完全进入到光束时雨滴与矩形光束之间的几何关系

Fig. 6 The geometric relationship between the raindrop and the rectangular beam when the raindrop completely enters the beam

雨滴完全进入到矩形光束内遮住的面积为

$$S_3 = r^2 \pi$$

此时透射光强的变化率为

$$T_3 = \frac{wd - S_3}{wd} \quad (3)$$

④  $d < h \leq d + r$  时,雨滴开始离开光束,即

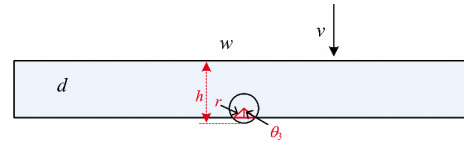


图 7 雨滴开始离开光束时雨滴与矩形光束之间的几何关系

Fig. 7 The geometric relationship between the raindrop and the rectangular beam when the raindrop begins to leave the beam

雨滴开始离开矩形光束时,雨滴遮住的面积为

$$S_4 = r^2 \pi - \frac{\theta_3}{180} \times r^2 \pi + (r - h + d) \sqrt{r^2 - (r - h + d)^2}$$

其中:  $\theta_3 = \cos^{-1}\left(\frac{r-h+d}{r}\right)$

此时透射光强的变化率为

$$T_4 = \frac{wd - S_4}{wd} \quad (4)$$

⑤  $d + r \leq h < d + 2r$  时,雨滴大部分离开光束

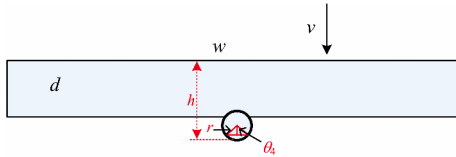


图 8 雨滴大部分离开光束时雨滴与矩形光束之间的几何关系

Fig. 8 The Geometric relationship between the raindrop and the rectangular beam when most of the raindrop leaves the beam

雨滴大部分离开矩形光束时, 雨滴遮住的面积为

$$S_5 = \frac{\theta_4}{180} \times r^2 \pi - (h - d - r) \sqrt{r^2 - (h - d - r)^2}$$

其中:  $\theta_4 = \cos^{-1} \left( \frac{h - d - r}{r} \right)$

此时透射光强的变化率为

$$T_5 = \frac{wd - S_5}{wd} \quad (5)$$

⑥  $h \geq d + 2r$  时, 雨滴完全离开光束, 即

$$T_6 = 1 \quad (6)$$

(2) 雨滴粒径大于光束厚度时, 且  $2r \geq d > r$

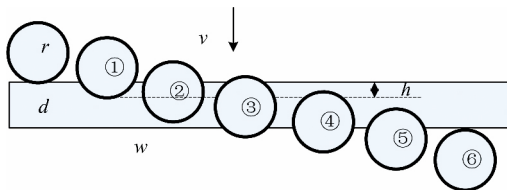


图 9 雨滴粒径大于光束厚度时雨滴与矩形光束之间的几何关系

Fig. 9 The geometric relationship between raindrops and rectangular beams when the size of the raindrop is larger than the thickness of the beam

① 当  $h < r$  时, 雨滴刚进入光束

雨滴遮挡住矩形光束的面积为

$$S_7 = \frac{\theta_5}{180} \times r^2 \pi - (r - h) \sqrt{r^2 - (r - h)^2}$$

其中:  $\theta_5 = \cos^{-1} \left( \frac{r - h}{r} \right)$ ,  $h$  为雨滴遮挡住光束的高度,  $2\theta_5$  为雨滴中心到遮挡光束的角度,  $d$  是光束高度,  $r$  是雨滴的半径,  $v$  是雨滴的下降速度。

此时透射光强的变化率为

$$T_7 = \frac{wd - S_7}{wd} \quad (7)$$

② 当  $r \leq h \leq d$  时, 雨滴大部分进入到光束, 见图 10。

雨滴大部分进入到矩形光束内遮住的面积为

$$S_8 = r^2 \pi - \frac{\theta_6}{180} \times r^2 \pi + (h - r) \sqrt{r^2 - (h - r)^2}$$

其中:  $\theta_6 = \cos^{-1} \left( \frac{h - r}{r} \right)$

此时透射光强的变化率为

$$T_8 = \frac{wd - S_8}{wd} \quad (8)$$

③ 当  $d < h \leq 2r$  时, 雨滴完全遮住光束, 见图 11。

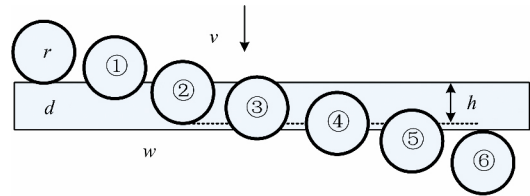


图 10 雨滴大部分进入光束时雨滴与矩形光束之间的几何关系

Fig. 10 The geometric relationship between the raindrop and the rectangular beam when the most of the raindrop enters the beam

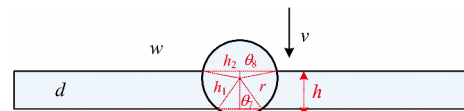


图 11 雨滴完全遮挡住光束

Fig. 11 A raindrop completely shields the beam

雨滴横穿过矩形光束遮住的面积为

$$S_9 = r^2 \pi - \left( \frac{\theta_7}{180} \times r^2 \pi - (r - h + d) \sqrt{r^2 - (r - h + d)^2} + \frac{\theta_8}{180} \times r^2 \pi - (h - r) \sqrt{r^2 - (h - r)^2} \right)$$

其中:  $\theta_7 = \cos^{-1} \left( \frac{r - h + d}{r} \right)$ ,  $\theta_8 = \cos^{-1} \left( \frac{h - r}{r} \right)$

此时透射光强的变化率为

$$T_9 = \frac{wd - S_9}{wd} \quad (9)$$

④ 当  $2r < h < r + d$  时, 雨滴开始离开光束, 大部分还在光束内

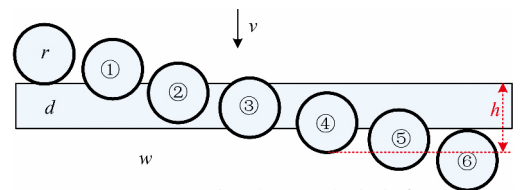


图 12 雨滴大部分还在光束中

Fig. 12 Most of the raindrop is still in the beam

雨滴开始离开矩形光束时, 雨滴遮住的面积为

$$S_{10} = r^2 \pi - \frac{\theta_9}{180} \times r^2 \pi + (r - h + d) \sqrt{r^2 - (r - h + d)^2}$$

其中:  $\theta_9 = \cos^{-1} \left( \frac{r - h + d}{r} \right)$

此时透射光强的变化率为

$$T_{10} = \frac{wd - S_{10}}{wd} \quad (10)$$

⑤ 当  $d + r \leq h \leq d + 2r$  时, 雨滴大部分离开光束, 见图 13。

雨滴开始离开矩形光束时,雨滴遮住的面积为

$$S_{11} = \frac{\theta_{10}}{180} \times r^2 \pi - (h - d - r) \sqrt{r^2 - (h - d - r)^2}$$

其中:  $\theta_{10} = \cos^{-1} \left( \frac{h - d - r}{r} \right)$

此时透射光强的变化率为

$$T_{11} = \frac{wd - S_{11}}{wd} \tag{11}$$

⑥ 当  $h \geq 2r + d$  时,雨滴完全离开光束,见图 14。

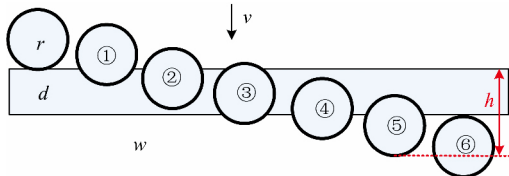


图 13 雨滴大部分离开光束

Fig. 13 Most of the raindrop leaves the beam

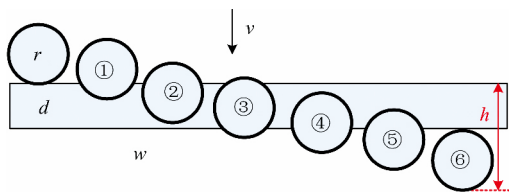


图 14 雨滴完全离开光束

Fig. 14 The raindrop completely leaves the beam

此时透射光强的变化率为

$$T_{12} = 1 \tag{12}$$

(3) 雨滴粒径远大于光束厚度时,且  $r > d$

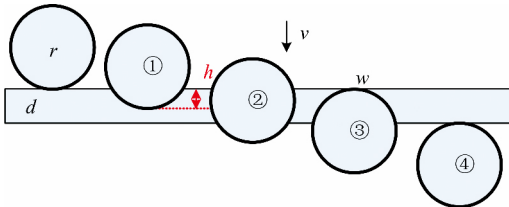


图 15 雨滴粒径远大于光束厚度

Fig. 15 The particle size of the raindrop is far larger than the thickness of the beam

① 当  $h < d$  时,雨滴刚进入光束

透射光强的变化率与式(7)一致。

② 当  $d \leq h \leq 2r$  时,雨滴完全遮住光束

透射光强的变化率与式(9)一致。

③ 当  $2r < h < 2r + d$  时,雨滴开始离开光束

透射光强的变化率与式(11)一致。

④ 当  $h > d + 2r$  时,雨滴离开光束

透射光强的变化率与式(12)一致。

根据式(1)一式(12)模拟计算雨滴粒径尺寸从 0.2 ~ 5.8 mm 的雨滴谱仪探测到的矩形光束透过率,如表 1 所示,雨滴尺寸与矩形光透过率的关系曲线如图 16 所示,点为表 1 中的数据,直线为线性拟合曲线:  $D = 19.568 12 - 19.418$

18T, DSP 信号处理器根据接收到的透过率值,由此公式可计算得到雨滴的粒径。

表 1 雨滴粒径引起的矩形光束透过率的变化

Table 1 The change of the rectangular beam transmittance caused by the raindrop particle size

粒径/mm	透过率	粒径/mm	透过率
0.2	0.998	1.8	0.913
0.3	0.995	2.2	0.892
0.8	0.967	3.2	0.842
0.9	0.961	5.8	0.711

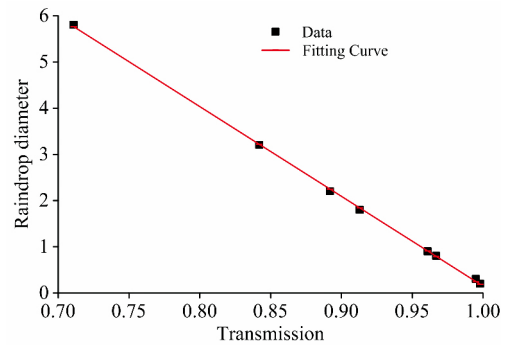


图 16 雨滴粒径与矩形光束透过率的关系曲线

Fig. 16 Relationship between rain droplet and rectangular beam transmittance

### 2.2 雨滴下降速度的分析

对于具有同样的速度、不同粒径或不同类型的雨滴,渡越矩形光束(如图 1)的时间是不同的。雨滴渡越光束的时间为

$$t = \frac{d + 2r}{v} = N\Delta t \tag{13}$$

由于探测激光采用调制频率约为 120MHz 的正弦波或方波,当雨滴通过矩形激光时,在雨滴渡越光束期间,其遮挡正弦波或方波的周期数可用来测量雨滴的渡越时间。只需要计数正弦波或方波振幅从开始衰减的第一个周期到正弦波或方波振幅恢复到基准振幅时的周期数,就可以得到雨滴渡越矩形光束所花费的时间,进而可以得到雨滴的下降速度。

在门限电路上加一个阈值比较器,当光强小于某一设定值,开始计数,光强恢复到设定阈值,计数结束,就可以得到雨滴渡越光束的准确时间。

雨滴粒子可利用小球模型来估算作为电压变化函数,粒径  $D < 1$  mm,假定为球形粒子,轴向比  $\gamma = 1$ ,对于雨滴粒径  $D > 5$  mm,轴向比采用  $\gamma = 1.3$ 。对于雨滴粒径在  $1 \text{ mm} < D < 5 \text{ mm}$  之间,假定轴向比是在  $1 < \gamma < 1.3$  之间线性变化的。雨滴渡越光束的时间为

$$t = \frac{d + D\gamma}{v} = N\Delta t \tag{14}$$

其中,  $\gamma$  是雨滴粒子粒径轴向比,  $D$  是雨滴直径,  $d$  为矩形光束的厚度,  $v$  是雨滴下降速度。

在三种不同轴向比情况下,数值模拟了在不同速度下雨

滴渡越矩形光束的时间,如图 17。利用测量的雨滴粒子大小和下落时间就可获得降水类型(毛毛雨、普雨、降雪、降霰、冰雹以及混合型降水)、降水强度、降水量和粒子波谱(在体积波谱上的粒子分布)等信息,降水类型通过所有粒子直径和速度的统计学比例关系来确定。

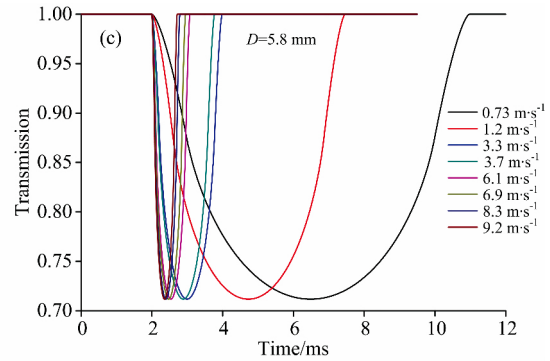
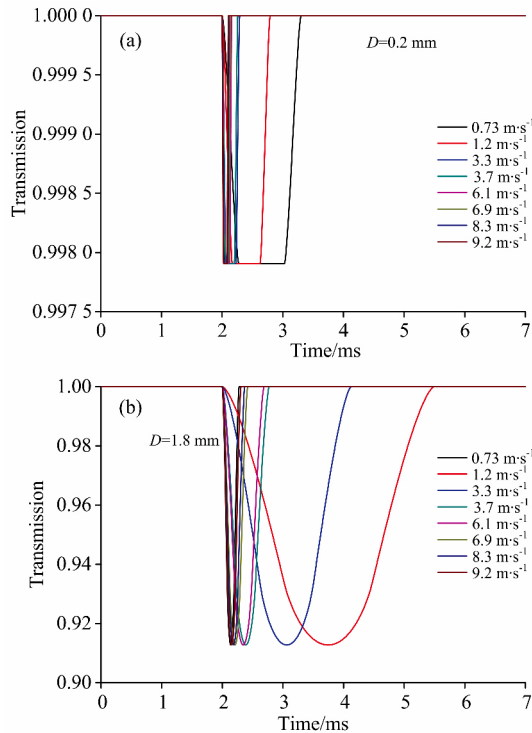


图 17 不同尺寸的雨滴渡越矩形光束时间  
Fig. 17 The time of different sizes raindrops transit the rectangular beam

### 3 结 论

详细分析了不同尺寸雨滴粒子在渡越矩形光束时引起的透过光强变化,结果显示矩形光束的透过率与雨滴尺寸具有很好的线性关系。数值模拟了不同粒径、不同下降速度雨滴在矩形光束中的渡越时间,指出利用雨滴粒子大小和下落时间的分布信息就可区分降水类型(毛毛雨、普雨、降雪、降霰、冰雹以及混合型降水),并获得降水强度、降水量和粒子波谱(在体积波谱上的粒子分布)等信息。

### References

- [1] Scheleusener P E. Drop Size Distribution and Energy of Falling Raindrops from a Medium Pressure Irrigation Sprinkler. Michigan State University, East Lansing, 1967. 45.
- [2] Best A C. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1950, 76: 16.
- [3] Jones D M A. Journal of Atmospheric Sciences, 1959, 16: 504.
- [4] Morin E, Krajewski W F, Goodrich D C, et al. Journal of Hydrometeorology, 2003, 4: 782.
- [5] Marshall J S, Palmer W M. Journal of Atmospheric Sciences, 1948, 5(4): 165.
- [6] Gunn R, Kinzer G D. J. Meteorol., 1949, 6(4): 243.
- [7] Daniele Hauser, Paul Amayenc, Bernard Nutten. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1984, 1: 256.
- [8] Martin Loffler-Mang, Joss Jurg. J. Atmos. Ocean Technol., 1999, 17: 130.

## Optical Design and Analysis of Laser Precipitation Monitor

WANG Yu , TAN Tu , WANG Gui-shi , GAO Xiao-ming\*

Laboratory of Atmospheric Physico-Chemistry , Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics , Chinese Academy of Sciences , Hefei 230031 , China

**Abstract** Raindrop spectra describing the variation of precipitation particle concentration with particle size is the most basic micro-physical characteristics parameter. Using the information of raindrop spectra , we'll have a clearer understanding of the development of natural precipitation process. From the relative position that the raindrop is in the rectangular beam , the variety of transmission intensity of rectangle beam with raindrop size were theoretically analyzed , and the results showed a nice linear relationship. It pointed out that the type of precipitation ( drizzle , rain , snow , soft hail , hail as well as mixed precipitation ) can be obtained by measuring raindrop size and fall time , and the information can be calculated , such as precipitation intensity , amount of precipitation and particle spectrum distribution.

**Keywords** Raindrop spectrum distribution ; Rectangle beam ; Raindrop diameter ; Fall velocity ; Spanning time

( Received Nov. 1 , 2017 ; accepted Apr. 19 , 2018 )

\* Corresponding author