

文章编号 1004-924X(2017)04-0842-08

## 基于单帧双脉冲成像的降水微物理特征测量仪

刘西川<sup>1</sup>, 高太长<sup>1\*</sup>, 胡云涛<sup>1</sup>, 舒小健<sup>2</sup>, 翟东力<sup>3</sup>

(1. 解放军理工大学 气象海洋学院, 江苏 南京 211101; 2. 解放军 93318 部队气象台, 辽宁 开原 112300;  
3. 南京英恩特环境技术有限公司, 江苏 南京 210007)

**摘要:** 为了实现对降水粒子尺度、形状、速度等微物理特征的同步测量, 提出了一种基于单帧双脉冲成像的降水粒子测量方法, 并搭建了降水微物理特征测量仪样机, 该样机由脉冲光源、面阵图像传感器、以数字信号处理(DSP)芯片为核心的采集与控制单元、数据处理单元组成。然后研究了利用点扩散函数进行图像复原的方法, 以及利用曝光参数进行粒子捕获概率修正的方法, 并利用定标小球进行了检验。最后使用该仪器在南京地区进行了降雨外场实验, 并与 OTT 雨滴谱仪进行对比。实验结果表明: 仪器可以同步测量雨滴的形状、轴比、速度与尺度等微物理特征, 与经验模型具有良好的一致性; 与 OTT 雨滴谱仪的雨滴谱分布和降雨强度有很好的 consistency, 二者测量降雨强度的标准偏差为 1.57 mm/h, 相关系数达到 96%。该仪器对降水微物理特征具有更好的测量效果, 可以在野外长期无人值守运行, 在大气物理研究、数值天气预报模式、水文学研究等领域有着广阔的应用前景。

**关键词:** 降水粒子; 微物理特征; 同步测量; 单帧双曝光; 面阵图像传感器

**中图分类号:** P414.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172504.0842

## Precipitation micro-physical characteristics sensor based on double-pulse in single frame imaging

LIU Xi-chuan<sup>1</sup>, GAO Tai-chang<sup>1\*</sup>, HU Yun-tao<sup>1</sup>, SHU Xiao-jian<sup>2</sup>, ZHAI Dong-li<sup>2</sup>

(1. College of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China;

2. Unit No. 93318 of PLA Meteorological Observatory, Kaiyuan 112300, China;

3. Ying EnTe Environment Technique Co. LTD., Nanjing 210007, China)

\* Corresponding author, E-mail: 2009gaotc@gmail.com

**Abstract:** In order to realize synchronize measurement of size, shape, fall velocity and other micro-physical characteristics of precipitation particles, an imaging method based on the double exposures in one frame was proposed, and a Precipitation Micro-physical Characteristics Sensor (PMCS) was established. The PMCS prototype consisted of pulse light source, planar array image sensor, signal processing and control unit with a Digital Signal Processor (DSP) as the core and data processing unit. Then an image restoration method based on the point spread function and capture probability correction approach using exposure parameters were investigated and verified with calibration balls. Finally,

收稿日期: 2016-09-20; 修订日期: 2016-11-20.

基金项目: 国家自然科学基金科学仪器基础研究专款项目 (No. 41327003); 国家自然科学基金青年项目 (No. 41505135); 江苏省自然科学基金青年项目 (No. BK20150708)

the PMCS was employed to field experiments in Nanjing, where the measurement results were compared with the one of OTT disdrometer. The results indicate that the PMCS is able to measure the shape, axis ratio, size and fall velocity of raindrops effectivity accurately and synchronously. The measured values of those characteristics are highly consistent with empirical models. The raindrop size distribution and rainrate measured by PMCS and OTT disdrometer show good consistency for the average error of rainrate is 1.57 mm/h and the correlation coefficient can reach 96 %. The proposed instrument can provide comprehensive measurement of micro-physical features and realize unattended long-term stable operation, thus having a promising prospect in the fields such as atmospheric physics, numerical weather forecasting model, hydrological research and etc..

**Key words:** precipitation particle; micro-physical feature; synchronize measurement; double exposures in one frame; array image sensor

## 1 引言

降水粒子的尺度、形状、速度等微物理特征资料在大气物理研究<sup>[1]</sup>、数值天气预报<sup>[2]</sup>、雷达定量估计降水等方面<sup>[3-4]</sup>有着重要的作用。国外最早于19世纪末开始采用滤纸法、面粉法等对雨滴谱开展测量研究<sup>[5]</sup>,但是受到当时技术水平的限制,测量大多以手动操作为主,采样分辨率低,仅能进行个例研究<sup>[6]</sup>。虽然近年来计算机技术开始用于雨滴图像的自动处理,但是只能根据落到滤纸上的雨滴斑点来估计雨滴大小,并不能反映雨滴在空中的真实形状<sup>[7]</sup>。20世纪70年代,随着光电技术的发展,利用撞击法<sup>[8]</sup>、光学法<sup>[9]</sup>、线阵成像法<sup>[10]</sup>对雨滴谱进行自动测量的仪器应运而生,但是这些仪器仍然无法测量雨滴的真实形状<sup>[11]</sup>。虽然高速摄像机可以在实验室内通过高速拍摄获取水滴的形状,但是不适用于自然环境条件<sup>[12-13]</sup>。基于光强衰减法的OTT激光雨滴谱仪可以获取雨滴的水平尺度,但是其速度是根据形状经验关系估计得到的,速度误差较大,而且只能测量雨滴,难以测量降雪<sup>[14]</sup>。2DVD通过高速双线阵切片扫描的方式可以重构降水粒子的三维剖面信息<sup>[15]</sup>,但是降水粒子穿过测量区域时的水平位移会引起图像畸变,从而给形状和速度的测量带来误差<sup>[16]</sup>。因此,目前在自然环境条件下对降水粒子的尺度、速度和形状等微物理特征的同步准确测量仍然是一个难题。

本文针对这一难题,设计并研制了降水微物理特征测量仪(Precipitation Micro-physical Characteristics Sensor, PMCS),利用精密曝光控

制的面阵CMOS图像传感器对处于自由下落过程中的降水粒子进行实时成像。根据快速曝光的粒子图像得到其大小和形状,根据粒子单帧双曝光图像计算其速度,根据时间积分得到降水粒子的尺度谱分布和速度谱分布。最后,搭建了面阵式光学降水微物理特征测量仪样机,并通过定标试验和外场试验验证了仪器的准确性。

## 2 仪器组成与测量原理

### 2.1 PMCS的系统构成

PMCS由光学单元、成像单元、采集与控制单元和数据处理单元组成,如图1所示。其中,光学单元为成像单元提供稳定而均匀的平行光;成像单元将接收到的光强信号转换为数字图像信号;采集与控制单元进行图像数据的实时采集、预处理与传输控制等;数据处理单元进行图像数据的进一步处理、降水信息的提取和存储等,其功能通过终端计算机和应用软件来实现。

光学单元由平行光源、扩束透镜组和成像透镜组组成,其作用是给粒子成像提供均匀、一致和稳定的背景场。由于常用的卤素灯、LED、激光光源等不能满足本仪器对平行度的要求,本文采用集束多模光纤重新设计了平行光源,以提高光照强度和光束宽度,光源的中心波长为460 nm,功率为1 W,如图2所示。其中,扩束透镜组将平行光源发出的光束宽度放大,成像透镜组将接收到的光束按照一定的倍率缩小后传到成像单元。本仪器的有效采样空间为300 mm(长)×40 mm(宽)×30 mm(高)。

成像单元由面阵CMOS图像传感器及其驱

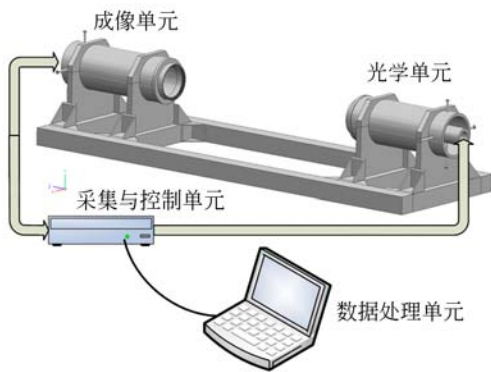


图 1 降水微物理特征测量仪组成示意图

Fig. 1 Framework of Precipitation Micro-physical Characteristics Sensor (PMCS)

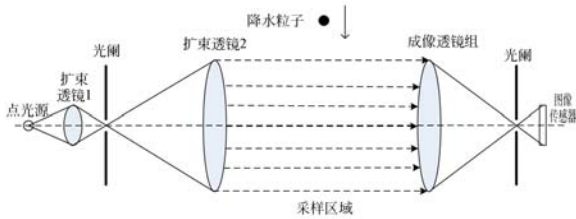


图 2 降水微物理特征测量仪光学单元结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of optical unit of PMCS

动电路组成,其作用是对穿过采样区域的降水粒子进行快速曝光成像。为了满足高灵敏度、高信噪比、大像元尺寸及高采样速度等测量要求,选用靶面尺寸为 0.847 cm (1/3 inch) 的 CMOS 面阵图像传感器,如图 3 所示。扫描频率为 50 frame/s,像素分辨率为 640 pixel×480 pixel,对应的采样空间为 40 mm×30 mm,因此单个像素的尺寸分辨率为 0.062 5 mm。

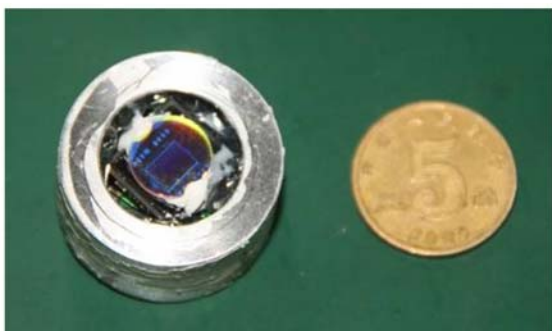


图 3 面阵 CMOS 图像传感器

Fig. 3 Photo of planar CMOS image Sensor

采集与控制单元由数字信号处理器 (Digital Signal Processor, DSP) 芯片、复杂可编程逻辑器

件 (Complex Programmable Logic Device, CPLD)、复位电路、时钟电路、总线接口及存储芯片等配套电路组成,主要实现曝光时序驱动、图像数据的实时采集、缓存、处理和编码压缩、逻辑控制、传输接口 TCP/IP 协议的移植等功能。其中, DSP 芯片采用 TI 公司 C6000 系列 TMS320DM642,其核心是 C6416 型高性能数字信号处理器; CPLD 选用 MachX0 系列 LC-MX0256,控制单帧图像曝光时间内光源的精密开关;数据传输采用 TCP/IP 方式,接口选用以太网驱动芯片 LXT971ALC。由于图像采集频率为 50 frame/s,要保证图像信号的实时处理,重点解决并优化 DSP 内的数据处理方法,保证单帧图像的处理时间小于 20 ms。针对镜头长期暴露于自然环境条件下易受污染的情况,设计了 DSP 内的实时图像背景检测与消除算法。该算法将每 1 024 帧图像的平均作为背景图像,对每一帧图像进行滚动实时的背景消除。图 4 为数据采集与处理流程。

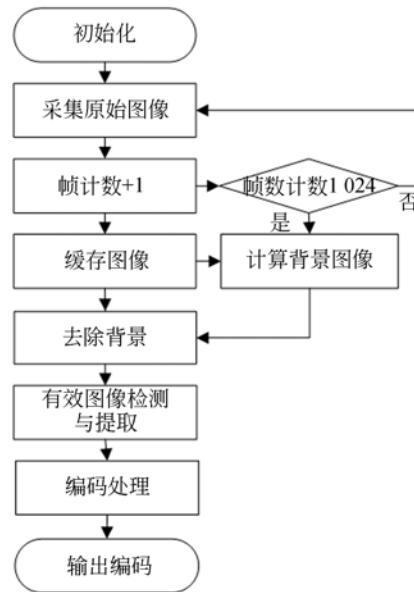


图 4 数据采集与处理流程

Fig. 4 Flowchart of data acquisition and process

数据处理单元由终端计算机和相关应用软件组成,主要实现图像数据的进一步处理、降水特征量的提取等功能。在经过降水粒子图像的滤波去噪、边缘识别、二值化等预处理后,提取图像中粒子的面积、周长、长轴、短轴等几何特征,通过特征匹配寻找到两次曝光的粒子运动轨迹,实现降水

粒子的自相关匹配,同时提取单个粒子的尺度、速度、轴比、形状、取向等特征。最后,通过时间积分和统计分析得到降水强度、降水类型、粒子尺度谱分布和速度谱分布等降水信息。

### 2.2 测量原理

PMCS 采用单帧图像内两次曝光的方法同步测量降水粒子的图像和速度。PMCS 的光源为脉冲光源,利用采集与控制单元将脉冲光源时序与 CMOS 曝光时序精密配合,CMOS 的采样频率为 50 frame/s,单次曝光时间为 20 ms,在此时间段内脉冲光源连续进行 2 次曝光,如图 5 左图所示。在此成像时序(见图 5 右图)的控制下,当降水粒子穿过采样空间时,面阵 CMOS 图像传感器会在单帧图像内得到同一个粒子连续 2 次的曝光图像。在获取单帧双脉冲图像的基础上,对单个粒子图像进行处理可以得到降水粒子的尺度和形状;根据粒子先后 2 次曝光的位置和间隔时间可以计算降水粒子的运动速度。

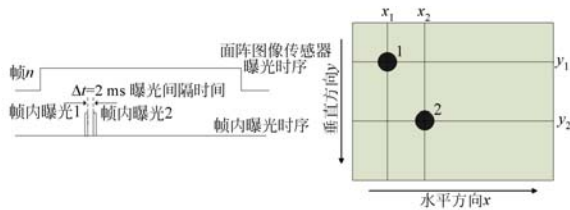


图 5 降水微物理特征测量仪的工作时序和图像  
Fig. 5 Working sequence and images of PMCS

降水粒子的水平速度和垂直速度分别为:

$$\begin{cases} v_x = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x_2 - x_1}{\Delta t} \\ v_y = \frac{\Delta y}{\Delta t} = \frac{y_2 - y_1}{\Delta t} \end{cases} \quad (1)$$

根据时间积分可以得到降水粒子的尺度谱分布  $N(D)$  和速度谱分布  $V(D)$ , 据此还可以进行降水强度和降水量的计算以及降水类型和降水性质的判断。

## 3 数据处理方法

### 3.1 图像处理方法

本仪器采用的图像传感器的分辨率为  $640 \times 480$ , 采样空间的尺寸为  $40 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ , 最小可测粒子 ( $0.1 \text{ mm}$ ) 在水平方向上对应 1.6 个像素。前期试验发现, 由于成像质量受到散焦模糊、镜头

污染、仪器噪声等多种因素的影响, 单个像素点往往难以被精确地识别出来。因此本文设计了如下的图像处理步骤:

(1) 滤波去噪。针对镜头污染、环境等因素给成像带来的叠加噪声, 采用中值滤波法去除图像中的噪点, 同时保证粒子图像的边缘轮廓信息;

(2) 图像复原。针对成像系统中散焦、衍射效应造成的图像边缘模糊和图像质量退化, 采用高斯函数模型, 利用点扩散函数对模糊图像进行复原;

(3) 二值化。主要是将粒子图像和背景图像进行分割, 其中阈值确定是关键, 本文采用基于灰度直方图的全局阈值法。

图 6 为定标玻璃球的图像处理结果, 由左至右分别是直径为 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 mm 的玻璃球的原始图像、预处理图像和二值化图像。由图可知, 通过图像处理和定标后可以得到具有清晰边缘和轮廓的雨滴图像。在此基础上就可以逐个计算雨滴的形状、水平尺度、垂直尺度和倾斜角等特征。

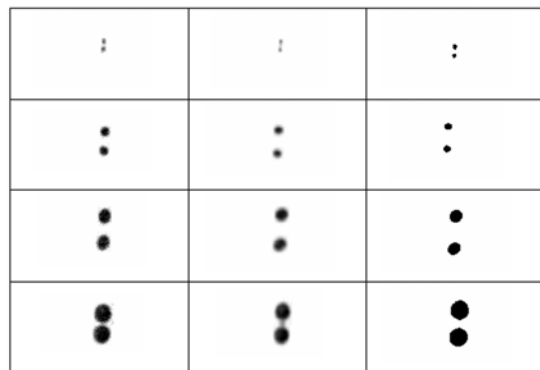


图 6 定标的玻璃球图像  
Fig. 6 Images of glass balls for calibration

### 3.2 特征提取方法

由于本仪器采用间隔曝光的方式对降水粒子进行采集, 并非每一个穿过采样空间的降水粒子都能够被面阵 CMOS 采集到, 单帧内两次曝光的间隔时间仅占单帧曝光时间的  $1/10$ , 因此面阵 CMOS 对降水粒子存在一定的捕获概率。鉴于不同大小的粒子具有不同的降落末速度, 不同的降水粒子具有不同的捕获概率, 对于已知大小和速度的粒子, 仪器在采样空间内两次捕获到粒子曝光图像的概率为:

$$Prob(D) = \frac{30 - D_v - V(D) \cdot 2}{V(D) \cdot 20} \quad (2)$$

其中:  $D_v$  为粒子在垂直方向上的高度,  $V(D)$  为粒

子的垂直运动速度。单帧曝光时间为 20 ms, 单帧内两次曝光的间隔时间为 2 ms。

因为面阵 CMOS 对降水粒子存在一定的捕获概率, 所以直接采样得到的降水粒子谱分布并非真实谱分布  $N_{\text{sample}}(D)$ , 必须经捕获概率修正才能得到真实的谱分布:

$$N(D) = \frac{N_{\text{sample}}(D)}{S \cdot \text{Prob}(D)}, \quad (3)$$

其中  $S$  为有效采样空间。根据降水粒子尺度谱分布  $N(D)$ 、速度谱分布  $v(D)$ 、密度  $\rho$  与直径  $D$  的积分, 可以得到降水强度为:

$$R = \frac{\pi}{6} \int_0^{\infty} N(D) \rho D^3 v(D) dD. \quad (4)$$

#### 4 外场实验及结果分析

利用该仪器在南京地区进行了外场观测实验, 在 2015 年 6 月 16 日内共采集得到 234 093 个有效雨滴图像。以 0.2 mm 为间隔的等效直径, 统计出雨滴形状在不同位置的出现概率, 如图 7 所示(彩图见期刊电子版)。图 7(a)~7(d) 分别是直径为 0.8~1.0 mm, 1.4~1.6 mm, 2.4~2.6 mm, 3.4~3.6 mm 的雨滴统计概率形状, 其中“Thurai model”为 Thurai 利用 2DVD 得到的统计形状<sup>[17]</sup>, “Oblate model”为雨滴的椭球形状模型<sup>[18]</sup>。图中颜色越红, 代表雨滴形状出现在此处的概率越大; 颜色越蓝, 则出现的概率越小。由图可知, 0.8~1.0 mm 的雨滴平均呈圆形; 1.4~1.6 mm 的雨滴平均形状比椭球形状略扁; 2.4~2.6 mm 的雨滴形状与 1.4~1.6 mm 的雨滴形状相似, 但其底部比经验分布偏小; 3.4~3.6 mm 的雨滴呈现显著的顶部凸起、底部扁平形状, 与 Thurai 模型比较接近。总体而言, 直径小于 1 mm 的雨滴以圆形为主; 直径在 1.0~3.0 mm 之间的雨滴逐渐变扁, 与椭圆形相近; 当直径大于 3.0 mm 时, 雨滴呈现明显的顶部凸起, 底部扁平形状。

在雨滴图像的基础上计算雨滴的轴比(长轴与短轴之比), 轴比分布如图 8 所示(彩图见期刊电子版)。其中彩色图像代表雨滴速度的分布概率, 颜色越红概率越大, 实线为 Beard 经验关系<sup>[19]</sup>。由图可知, 直径大于 1 mm 的雨滴轴比随直径的增大呈现线性减小的趋势, 实测数据大多

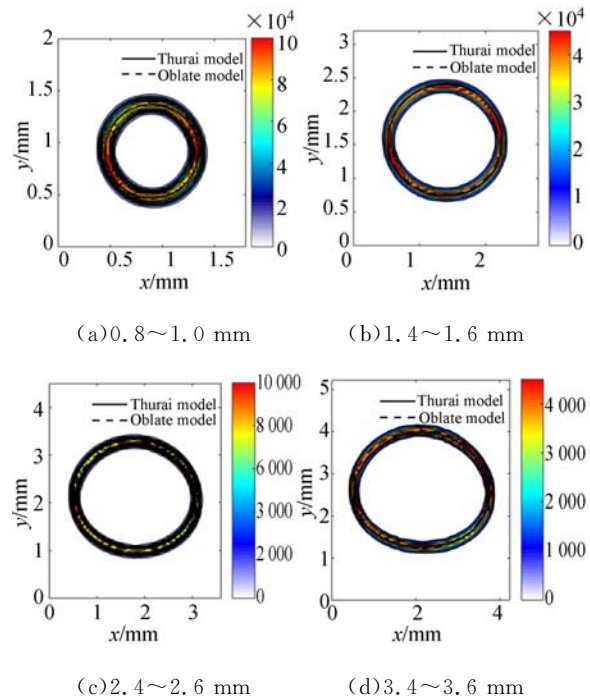


图 7 雨滴的平均形状

Fig. 7 Average shapes of raindrops

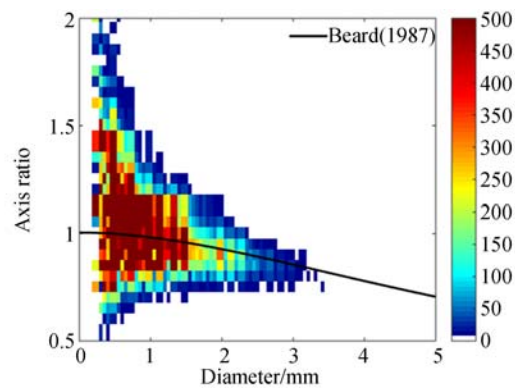


图 8 雨滴的轴比

Fig. 8 Axis ratios of raindrops

分布在 Beard 经验关系曲线附近。需要说明的是, 受仪器分辨率的限制, 最小雨滴(0.1 mm)的图像仅占 1~2 个像素, 纵向或横向上 1 个像素的变化就会导致轴比的大幅变化, 因此直径小于 1 mm 的雨滴轴比分布比较分散。该分布特征与文献[20]中的轴比分布特征接近。考虑到实际小雨滴呈现球形, 因此并不影响对雨滴轴比分布的测量。

雨滴的速度分布如图 9 所示, 其中彩色图像代表了雨滴速度的分布概率, 颜色越红概率越大, 实线为 Atlas 经验关系<sup>[21]</sup>。由图可知, 除了少量

大雨滴会溅落到仪器外罩上破碎后穿过采样空间,从而导致少量小雨滴的速度偏大之外,大部分雨滴速度均分布在 Atlas 经验关系曲线附近。该分布特征与文献[22]中的速度分布特征接近,从而检验了本仪器对降水粒子速度测量的有效性。

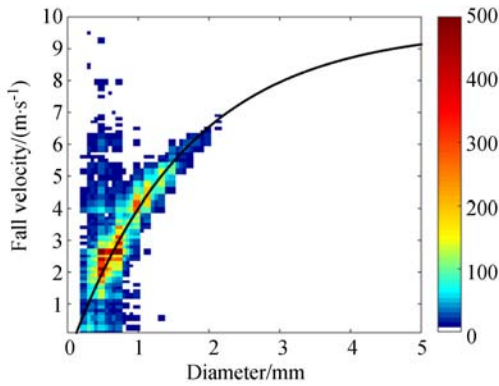


图9 雨滴的速度分布

Fig. 9 Velocity distribution of raindrops

图10为PMCS和OTT雨滴谱仪测量的雨滴尺度谱。由图可知,针对直径为0.3~3.5mm的雨滴,PMCS与OTT的测量结果有良好的一致性,OTT测量的小雨滴( $D < 0.3$  mm)数目比PMCS测量的数目略少,其原因可能是小雨滴对激光的衰减不明显,OTT存在漏测,因此在图像上更容易成像; $D > 3.5$  mm时,OTT比PMCS测量的雨滴数量多。其原因之一是大雨滴并非绝对球形,而OTT测量的是雨滴的长轴,致使大雨滴的直径测量值偏大,而且雨滴越大,轴比越小,测量值的偏离程度越大;二是PMCS对单帧双曝光粒子的完整捕获概率随着雨滴的增大而降低,这也会导致大雨滴测量偏少。

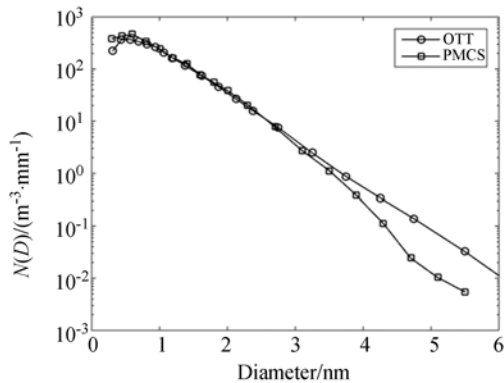


图10 雨滴的尺度谱分布

Fig. 10 Drop size distribution of raindrops

图11为PMCS与OTT雨滴谱仪测量的降雨强度随时间的变化。由图可知,两个仪器在小雨条件下的一致性很好,而在个别雨强较大时刻OTT比PMCS的降雨强度测量值偏大,这与图10中大雨滴段OTT比PMCS数密度偏高是一致的。整个降水时间序列中,PMCS与OTT的平均误差为1.57 mm/h,相关系数可达96%。

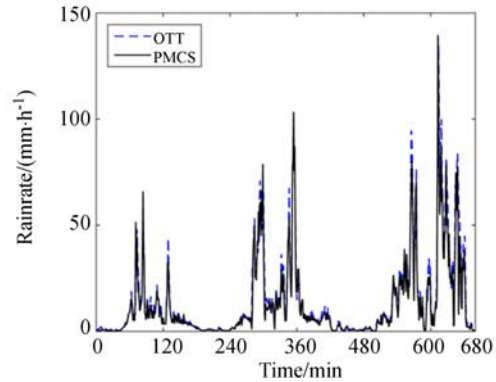


图11 降雨强度的时间序列

Fig. 11 Time series of rainrate

综上所述,PMCS可以有效测量雨滴的形状、轴比和速度,所计算的尺度谱和降雨强度与OTT雨滴谱仪具有良好的一致性,由此验证了PMCS在降水微物理特征测量方面的有效性和准确性。

## 5 结论

本文针对大气物理研究、数值天气预报等对降水粒子微物理特征的测量要求,提出了一种基于面阵图像传感器和单帧双脉冲成像的降水粒子形状、尺度和速度等微物理特征测量方法,并研制了具有自主知识产权的降水微物理特征测量仪(PMCS)。PMCS将CMOS面阵图像传感器和脉冲照明光源进行精密时序配合,当降水粒子穿过采样空间时,面阵CMOS图像传感器会在单帧图像内得到同一个粒子连续2次的曝光图像;通过对此单帧双脉冲获得的自相关图像进行处理,可以得到降水粒子的尺度、形状和速度等微观特征;再通过时间积分和空间积分,就可以得到谱分布、降水强度等宏观特征。

外场实验结果表明,PMCS可以有效测量雨滴的形状、轴比、速度与尺度,与经验关系具有良

好的一致性;与 OTT 雨滴谱仪的雨滴谱分布和降雨强度也有很好的一致性,二者测量降雨强度的标准偏差为 1.57 mm/h,相关系数可达 96 %。该结果很好地验证了 PMCS 在降水微物理特征

测量方面的有效性和准确性。PMCS 在揭示降水粒子微物理特征、修正天气雷达 Z-R 关系、为数值模式提供精细化资料等方面有着广阔的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] 高太长. 降水测量技术现状与展望[J]. 气象水文装备, 2012, 23(6): 1-7.  
GAO T CH. Current and prospective development of the precipitation measuring techniques[J]. *Meteorological and Hydrological Equipments*, 2012, 23(6): 1-7. (in Chinese)
- [2] 杨艳蓉, 曾明剑. 雷达资料同化对暴雨预报影响的数值模拟研究[J]. 气象科学, 2012, 32(2): 145-152.  
YANG Y R, ZENG M J. Numerical simulation analysis on radar data assimilation for summer rainstorm forecast [J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2012, 32(2): 145-152. (in Chinese)
- [3] 陈聪, 银燕, 陈宝君. 黄山不同高度雨滴谱的演变特征[J]. 大气科学学报, 2015, 38(3): 388-395.  
CHEN C, YIN Y, CHEN B J. Raindrop size distribution at different altitudes in Mt Huang[J]. *Trans. Atmos. Sci.*, 2015, 38(3): 388-395. (in Chinese)
- [4] 汪亭玉, 陈家璧. 雨滴在船舶大气激光通信中的遮挡作用[J]. 光学精密工程, 2014, 22(10): 2652-2658.  
WANG T Y, CHEN J B. Shading effect of rain drops in ship free space laser communication[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(10): 2652-2658. (in Chinese)
- [5] JONES D M A. The shape of raindrops[J]. *Journal of Meteorology*, 1959, 16(4): 504-510.
- [6] 余东升, 徐青山, 徐赤东, 等. 雨滴谱测量技术研究进展[J]. 大气与环境光学学报, 2011, 6(6): 403-408.  
YU D SH, XU Q SH, XU CH D, *et al.*. Progress of measurement of raindrop size distribution[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2011, 6(6): 403-408. (in Chinese)
- [7] 刘西川, 高太长, 刘磊, 等. 雨滴微物理特征研究及测量技术进展[J]. 地球科学进展, 2013, 28(11): 1217-1226.  
LIU X CH, GAO T CH, LIU L, *et al.*. Advances in microphysical features and measurement techniques of raindrops [J]. *Advances in Earth Sciences*, 2013, 28(11): 1217-1226. (in Chinese)
- [8] JOSS J, WALDVOGEL A. A raindrop spectrograph with automatic analysis[J]. *Pure Applied Geophysics*, 1967, 68(1): 240-246.
- [9] LÖFFLER-MANG M, JOSS J. An optical disdrometer for measuring size and velocity of hydrometeors [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2000, 17(2): 130-139.
- [10] 高太长, 江志东, 刘西川, 等. 线阵光学降水现象自动测量系统[J]. 光学精密工程, 2012, 20(10): 2184-2191.  
GAO T CH, JIANG ZH D, LIU X CH, *et al.*. Optical precipitation auto-measurement system based on linear image sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(10): 2184-2191. (in Chinese)
- [11] KATHIRAVELU G, LUCKE T, NICHOLS P. Rain drop measurement techniques; a review[J]. *Water*, 2016, 8(1): 29.
- [12] SZAKÁLL M, DIEHL K, MITRA S K, *et al.*. A wind tunnel study on the shape, oscillation, and internal circulation of large raindrops with sizes between 2.5 and 7.5 mm[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2009, 66(3): 755-765.
- [13] YU C K, HSIEH P R, YUTER S E, *et al.*. Measuring droplet fall speed with a high-speed camera; indoor accuracy and potential outdoor applications[J]. *Atmos. Meas. Tech.*, 2016, 9(4): 1755-1766.
- [14] BATTAGLIA A, RUSTEMEIER E, TOKAY A, *et al.*. PARSIVEL snow observations: a critical assessment[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2010, 27(2): 333-344.
- [15] SCHUUR T J, RYZHKOV A V, ZMI C D S, *et al.*. Drop size distributions measured by a 2D video disdrometer; comparison with dual-polarization radar data[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2001, 40(6): 1019-1034.
- [16] WOOD N B, L'ECUYER T S, BLIVEN F L, *et al.*. Characterization of video disdrometer uncertainties and impacts on estimates of snowfall rate

- and radar reflectivity[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, 6(12):3635-3648.
- [17] THURAI M, BRINGI V N, PETERSEN W A, *et al.*. Drop axis ratio distributions in stratiform and convective rain[C]. *The Sixth European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology. Sibiu, Romania; ERAD*, 2010.
- [18] BEARD K V, BRINGI V N, THURAI M. A new understanding of raindrop shape[J]. *Atmospheric Research*, 2010, 97: 396-415.
- [19] THURAI M, BRINGI V N, SZÁKALL M, *et al.*. Drop shapes and axis ratio distributions: comparison between 2D video disdrometer and wind-tunnel measurements[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2009, 26(7): 1427-1432.
- [20] THURAI M, BRINGI V N. Drop axis ratios from a 2D video disdrometer[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2005, 22(7): 966-978.
- [21] ATLAS D, SRIVASTAVA R C, SEKHON R S. Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidence[J]. *Rev Geophys*, 1973, 11(1): 1-35.
- [22] MARZUKI, RANDEU W L, KOZU T, *et al.*. Raindrop axis ratios, fall velocities and size distribution over Sumatra from 2D-video disdrometer measurement[J]. *Atmospheric Research*, 2013, 119: 23-37.

## 作者简介:



刘西川(1985—),男,河北清河人,讲师,2007年、2010年、2014年于解放军理工大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事大气探测与大气遥感方面的研究。E-mail: liuxc2012@hotmail.com

## 通讯作者:



高太长(1958—),男,山西太原人,教授,博士生导师,1982年于原空军气象学院获得学士学位,主要从事大气探测理论与技术方面的研究。E-mail: 2009gaotc@gmail.com