

引用格式: ZHANG Chuan, WANG Jun, ZHOU Hao, et al. Digital Holographic Method for Observation of Microphysical Parameters of Orographic Clouds[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(12):1201002

张川,王骏,周浩,等. 地形云微物理参数观测的数字全息方法研究[J]. 光子学报, 2023, 52(12):1201002

# 地形云微物理参数观测的数字全息方法研究

张川,王骏,周浩,杨晨遇,雷轲,刘晶晶,华灯鑫

(西安理工大学 机械与精密仪器工程学院,西安 710048)

**摘要:**提出了一种基于数字全息理论结合主动风向随动和复杂可编程逻辑器件驱动的纳秒尺度脉宽的脉冲激光调制技术,利用全域数字图像融合和局部亮度梯度方差算法的地形云观测方法。在六盘山地形云野外科学试验基地开展了长期的连续观测以获得地形云微物理参数。与该基地内基于光散射原理的测量仪器及前向散射能见度仪的观测数据进行比对,发现虽然两者长时间观测结果的变化趋势具有良好的相关性,但在  $2\sim 4\ \mu\text{m}$  和  $7\sim 50\ \mu\text{m}$  的云滴粒子区间,数字全息测量方法具有更强的观测能力。本文方法可为提高对云降水物理过程的理论认识和参数化方案的开发奠定数据支持,也可为天气、气候、人工影响天气和大气化学等领域研究提供重要的技术支撑。

**关键词:**数字全息;地形云;云微物理参数;全域数字图像融合;局部亮度梯度方差

中图分类号:O438.1

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20235212.1201002

## 0 引言

云覆盖了地球表面的  $60\%\sim 70\%$ ,是影响地球-大气系统辐射平衡和气候变化的主要因素之一<sup>[1-2]</sup>。与此同时,大气中的云仍然是天气和气候预测中最大的不确定因素之一。由于云微物理参数是研究云滴凝结增长<sup>[3]</sup>、云滴碰并增长<sup>[4]</sup>、云中湍流<sup>[5]</sup>的重要参数。对云微物理过程的深入了解对于研究降水机制<sup>[6]</sup>、数值天气预报<sup>[7]</sup>、人工影响天气的准确性起着至关重要的作用。然而,机载仪器观测云微物理参数需要严格的空域申请,以及观测时间、空间连续性、采样频率等有限。因此,在高山气象站,可长时间连续地观测地形云成为研究云微物理参数的主要研究对象。此外,地面和空间遥感技术在过去几十年里得到了迅猛的发展,利用卫星和地基雷达测量的功率谱数据进行云微物理参数的反演<sup>[8-10]</sup>。遥感探测方法具有从长距离探测高空云的优点<sup>[11]</sup>。然而,在数据反演的过程中,需要假设云滴的性质

以及反演参数<sup>[12-13]</sup>。因此,无法获得真实的云微物理参数,其测量精度也需要进一步验证。目前在高山站采用的地形云微物理参数观测仪器是基于光散射理论,该方法<sup>[14]</sup>在采样中会出现云滴损失,以及吸入方式会破坏云的原始三维分布的情况。

有别于光学全息技术,数字全息技术(Digital Holography, DH)极大地简化了研究者在全息图记录过程和处理程序中的工作。利用 CCD (Charge Coupled Device) 或 CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) 成像器件替代干板记录及后续化学处理过程,实现了全息图的数字化记录,使该方法具有了快速、实时、无损、全视场光学测量的能力<sup>[15-16]</sup>。因此 DH 被视为同步观测动态多参量物理场的潜在技术,在粒子场成像<sup>[17]</sup>、生物细胞成像<sup>[18]</sup>、超快过程成像<sup>[19]</sup>等领域得到了成功的应用。目前,利用 DH 测量云微物理参数的研究中,国内外都取得了多项卓有成效的研究成果。BEALS M J<sup>[20]</sup>、PETER A<sup>[21]</sup>、FUGAL J P<sup>[22]</sup>等先后利用同轴数字全息术研究了云中粒子谱分布、数浓度、粒子直径和冰晶粒子。然而在上述研究成果中,云粒子的最小探测尺寸为  $7.5\ \mu\text{m}$ ,对于研究完整云滴谱难以提供完整的谱宽数据支持(需要  $\geq 2\ \mu\text{m}$ )。本文

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 41975045, 52127802)

第一作者:张川, zhangchuan@stu.xaut.edu.cn

通讯作者:王骏, wangjun790102@xaut.edu.cn

收稿日期:2023-06-02;录用日期:2023-07-20

<http://www.photon.ac.cn>

采用随风转动系统和同轴DH技术,在宁夏回族自治区固原市六盘山地形云野外科学试验基地(35°40'N, 106°12'E)中实现了最小探测尺寸为2 μm云滴粒子的地形云观测,并与同类观测仪器的比对以及对实验数据的分析验证了数字全息技术在测量云微物理参数方面的可行性。研究成果可为提高对云降水物理过程的理论认识和参数化方案的开发奠定数据支持,也可为天气、气候、人工影响天气和大气化学等领域研究提供重要的技术支撑。

## 1 基本原理

根据云微物理理论,可以表征云和雾的云微物理参数有数浓度(Number Concentration, NC)、体积中值直径(Mean Volume Diameter, MVD)和液态水含量(Liquid Water Content, LWC)。它们可以表示为

$$\begin{cases} \text{NC} = \frac{N}{V} \\ \text{MVD} = d_m \\ \text{LWC} = \sum_{i=1}^N \frac{4\pi\rho_c}{3V} \left(\frac{d_i}{2}\right)^3 \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $V$ 为采样空间的体积,  $N$ 为采样空间中的液滴总数,  $\rho_c$ 为液态水的密度。MVD是指云滴的体积中值直径。在一次测量中,采样空间中的所有云滴的粒径都按升序排列,像这样:  $d_1 < d_2 < d_3 < \dots < d_i < \dots < d_N$ ,其中  $d_i$ 是第  $i$ 个粒子的直径。将云滴的体积按此顺序累加,当累加值等于全部云滴体积的50%时,如式(2)所示的那样,所对应的第  $m$ 个云滴粒子的直径( $d_m$ )为MVD。式(2)表示为

$$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \frac{4}{3} \pi \left(\frac{d_i}{2}\right)^3 = \sum_{i=1}^m \frac{4}{3} \pi \left(\frac{d_i}{2}\right)^3 \quad (2)$$

此外,能见度是一个重要的气象参数之一,它反映了小云滴的数浓度,可以表示为

$$\begin{cases} R = \frac{2.99}{k_{\text{ex}}} \\ k_{\text{ex}} = \sum_{i=1}^l \pi \left(\frac{d'_i}{2}\right)^2 \text{NC}' \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $R$ 为能见度,  $k_{\text{ex}}$ 为消光系数。观察到的液滴被分为从2 μm到50 μm的30段。  $d'$ 为每个段中云滴的平均直径,  $\text{NC}'$ 为每个段中液滴的数浓度,  $l$ 为段的数量( $l=30$ )。为了准确地获得这些云的微物理参数,需要获得  $V$ 、 $N$ 和采样空间中每个粒子的直径。

同轴DH由于其记录范围大、空间带宽利用率高、信息密度大、光路简单等优点,被广泛应用于微小粒子的三维测量中。当粒子受到平面光波的照射时,粒子的衍射光(作为物体光波)与平面光(作为参考光波)发生干涉形成全息图像。全息图像由CCD或CMOS相机记录。与普通二维成像不同,全息图记录了粒子的三维空间信息。对全息图进行数值重建,可获得再现距离为  $z_r$ 的重建平面上的二维复振幅分布,表示为<sup>[23-24]</sup>

$$U_R(u, v) = \frac{1}{j\lambda} \iint_{-\infty}^{\infty} R(x, y) I_H(x, y) \frac{\exp\left(jk\sqrt{(u-x)^2 + (v-y)^2 + z_r^2}\right)}{\sqrt{(u-x)^2 + (v-y)^2 + z_r^2}} dx dy \quad (4)$$

式中,  $\lambda$ 为激光波长,  $R(x, y)$ 为参考光的强度,  $I_H(x, y)$ 为全息图的强度,  $k$ 为波数,  $z_r$ 为重建距离。在多个重建平面上,重建距离为  $z_r$ 的平面中的液滴清晰成像,而其他液滴成像模糊。利用图像检测算法对重建图像上的聚焦液滴进行识别,可获得液滴的三维坐标和粒径。

为了确保粒子识别的准确性,粒子需在聚焦位置被识别。本文使用再现距离与全域数字图像融合的方法,结合局部亮度梯度方差法(Local Tenengrad Variance, LTV),局部像素块的宽和高分别为粒子  $x$ 和  $y$ 方向尺寸的两倍,高精度确定粒子的  $z$ 轴位置<sup>[21]</sup>。LTV公式为

$$\text{LTV} = \frac{\sum_{(x,y \in W)} \left[ G_1(x, y) - \overline{G_1(x, y)} \right]^2}{N_W} \quad (5)$$

式中,  $G_1$  为粒子局部区域内的梯度,  $\overline{G_1}$  为粒子局部区域内的平均梯度,  $W$  为局部区域内像素点的集合,  $x$  和  $y$  为粒子像素坐标,  $N_w$  为局部区域内包含的像素数。梯度由 Sobel 算子处理得到, 公式为

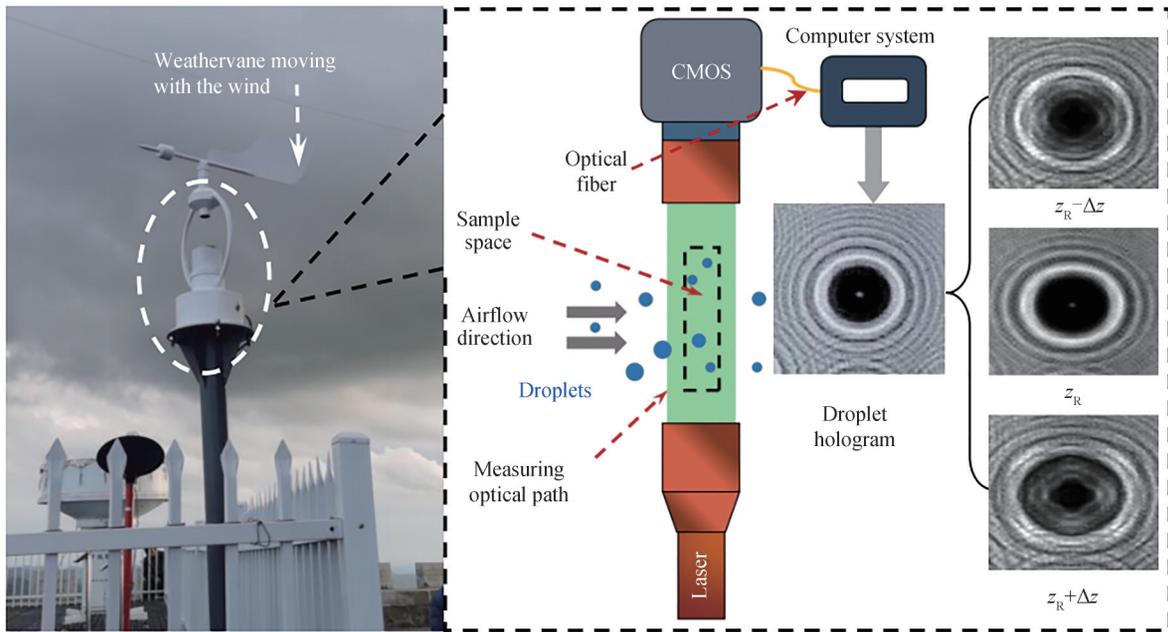
$$G_1(x, y) = \sqrt{[I(x, y) * S_x]^2 + [I(x, y) * S_y]^2} \quad (6)$$

式中,  $*$  为卷积运算符号,  $I$  为局部区域内的亮度, 且 Sobel 算子的  $S_x$  和  $S_y$  因子为

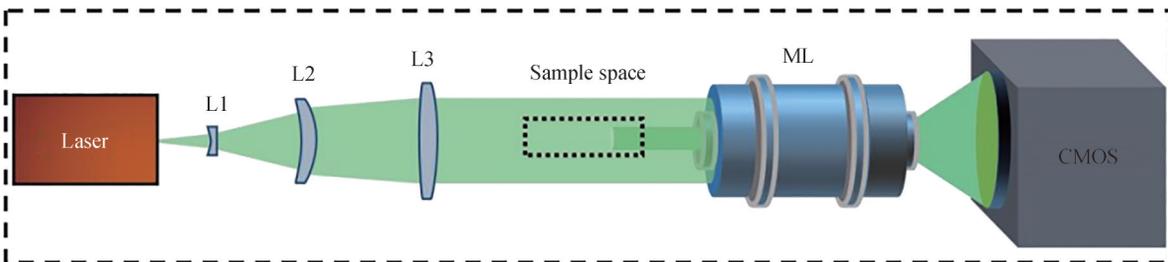
$$S_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, S_y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

## 2 实验系统

六盘山地形云野外科学试验基地海拔 2 840 m, 年降水量达 677 mm, 9 月云过程天气天数超过一半, 是优良的地形云观测基地。本文使用 DH 实验系统在此地进行了 168 h 的连续观测。图 1 展示了实验系统的原理图。光路中, 采用 532 nm 脉冲调制激光器作为光源, 脉冲频率为 30 Hz。如图 1(b) 所示, 透镜 L1~L3 共同组成准直扩束系统。激光器发出的光通过该准直扩束系统形成平面波照射到被测云粒子。粒子衍射光与未经调制的透射光形成干涉, 再经高分辨率、大景深的显微光学系统 ML 放大(放大率为 5.2 倍)后, 被 CMOS(最大分辨率 3 000 W × 3 000 H, 像素尺寸 2.5 μm × 2.5 μm, 最高采样率 30 帧/s)靶面接收。CMOS 相机通过光纤与计算机系统相连接, 实现全息图的实时采集、传输与重建处理。



(a) Schematic diagram of the experimental system



(b) Optical path diagram

图 1 DH 实验系统  
Fig. 1 DH experimental system

由于在自然界中,雾所处的大气环境为近稳状态,因此雾滴受风速风向的影响较小,采用连续激光结合CMOS相机10微秒量级曝光时间,即可获得雾微物理参数。而地形云所处的环境中,存在较高的风速(10 m/s)以及紊乱的风向。依然采用连续波激光和10微秒量级曝光时间时,云滴粒子在曝光时间内已运动了100  $\mu\text{m}$ ,将产生如图2所示的高速运动粒子的拖尾现象。由于CMOS的10微秒曝光时间已无法降低,因此需要采用纳秒尺度脉宽的脉冲激光照射云滴粒子。由于半导体激光器具有连续或脉冲工作的特点,以及在脉冲工作条件下大的峰值功率的优点,结合基于复杂可编程逻辑器(Field-Programmable Gate Array, FPGA)驱动的纳秒尺度脉宽的脉冲激光调制技术,再根据半导体激光器的响应特性和CMOS成像的照度阈值,利用20纳秒尺度脉宽的脉冲激光照射云滴粒子,最高10 m/s的风速下,云滴粒子在激光脉宽时间内运动距离小于0.2  $\mu\text{m}$ ,比地形云滴粒子直径观测下限2  $\mu\text{m}$ 小一个量级,再结合图像矫正算法,可获得精确的云滴粒径数据,以避免风速对地形云微物理参数观测的影响。

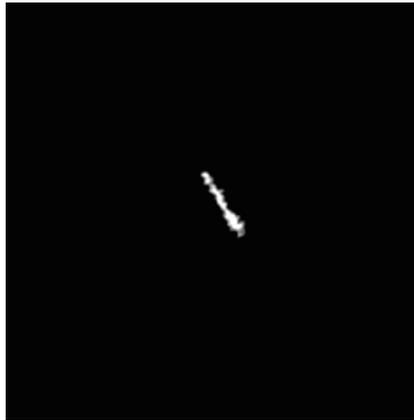


图2 高速运动粒子的拖尾现象  
Fig. 2 Trailing of high-speed moving droplets

紊乱的风向使得云滴采样区域无法与风向垂直,云滴碰撞实验系统后易产生破碎,特别是产生卡门涡街现象。气(液)流场在障碍物后产生乱流(称为卡门涡街),进而影响原有气流场分布。在观测系统中为了避免卡门涡街现象影响云滴粒子场分布,实现地形云微物理参数的原位测量,实验中采用主动风向随动风标。即利用大尺寸风标产生大转矩,带动同轴DH观测系统转动,使采样区域始终垂直风向。实际实验中,现场测风仪器显示启动风速为0.7 m/s。为获得在0.7 m/s风速以下的卡门涡街影响率,我们开展了流场仿真。图3展示了0.7 m/s风速垂直和45°入射采样区域时,采样区域实际风速的情况下,分别为0.683 m/s和0.667 m/s,卡门涡街影响率小于5%。

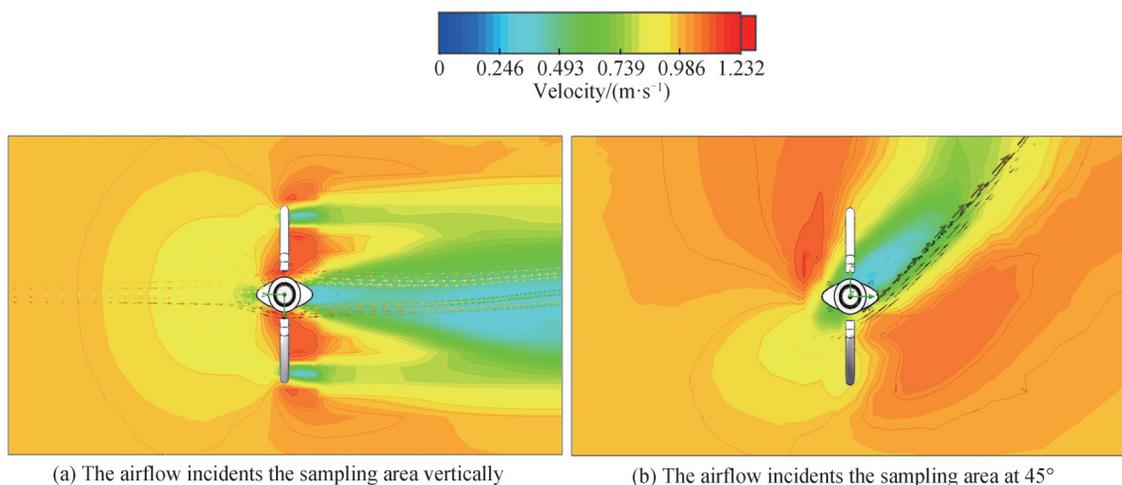


图3 0.7 m/s风速的卡门涡街影响率  
Fig. 3 The influence rate of Carmen vortex street with a wind speed of 0.7 m/s

### 3 实验数据与分析

#### 3.1 实验系统的成像分辨率与粒子识别精度

为验证同轴DH观测系统在采样区间内的光学分辨率,利用该系统观测了USAF1951分辨率板。在 $x$ - $y$ 截面的采样面积为 $1.35\text{ mm}\times 1.35\text{ mm}$ ,沿光束方向( $z$ 轴)的采样距离为焦平面 $\pm 20\text{ mm}$ , $z$ 轴的零点设置在焦平面上。图4展示了在 $z$ 轴上 $0\text{ mm}$ 、 $-15\text{ mm}$ 和 $15\text{ mm}$ 位置处的再现图。图4(a)~(c)中最小可分辨的线对标号均为7-6(最高标号),其对应的线宽为 $2.19\text{ }\mu\text{m}$ 。

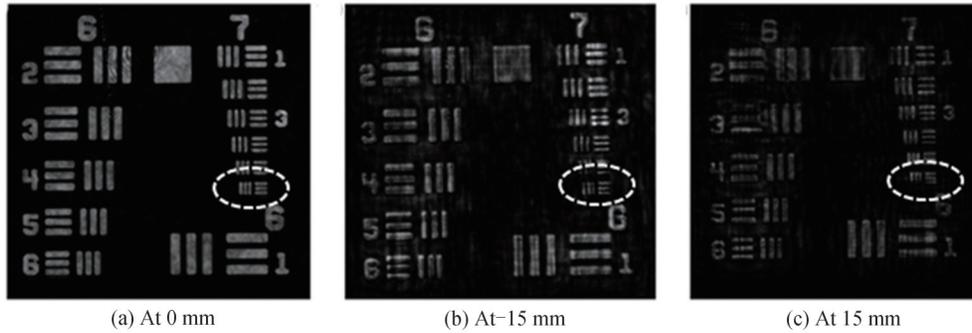


图4 USAF 1951分辨率板的再现全息图

Fig. 4 Reconstructed holograms of USAF 1951 resolution plate

为验证高浓度粒子条件( $\text{NC} > 6000\text{ cm}^{-3}$ )下球形粒子粒径的识别精度,利用同轴DH系统观测了标准粒子衍射板,粒子标准粒径分别为 $2\text{ }\mu\text{m}$ (798个)、 $10\text{ }\mu\text{m}$ (236个)和 $20\text{ }\mu\text{m}$ (36个)。 $2\text{ }\mu\text{m}$ 和 $10\text{ }\mu\text{m}$ 粒子按照8倍粒径的间隔组成方形阵列, $20\text{ }\mu\text{m}$ 粒子的间隔设置为12倍粒径。不考虑光学系统像差条件下,由于粒子识别时使用了腐蚀和膨胀的图像算法,有1个像素的误差,因此粒径测量的系统误差为 $\pm 0.42\text{ }\mu\text{m}$ 。此外,标准粒子衍射板中粒径加工误差为 $\pm 0.5\text{ }\mu\text{m}$ 。图5展示了距离焦平面 $6\text{ mm}$ 处标准粒子衍射板的再现图。图5(a)中识别795个粒子,测量不确定度为 $(2.05 \pm 0.53)\text{ }\mu\text{m}$ ;图5(b)中识别225个粒子,不确定度为 $(10.12 \pm 0.86)\text{ }\mu\text{m}$ ;图5(c)中识别36个粒子,不确定度为 $(19.89 \pm 1.24)\text{ }\mu\text{m}$ 。结果表明不同粒径粒子的综合识别率为98%。经过长时间实验观察与分析,同轴DH观测系统采样空间内的不同粒径粒子数通常少于50个,因此粒子识别率会更高。

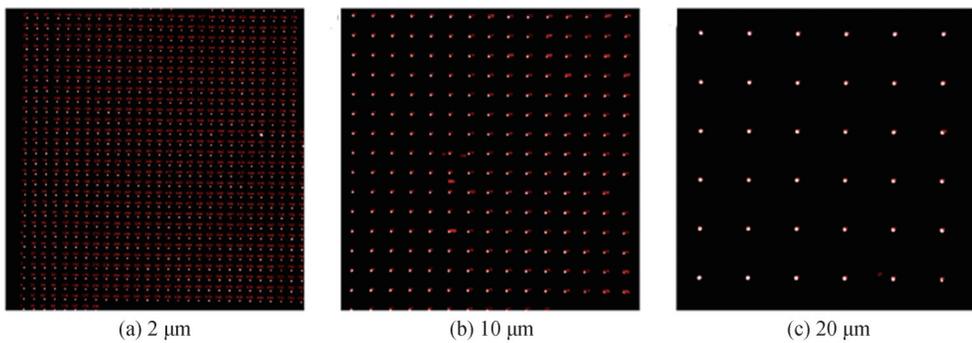


图5 距离焦平面 $6\text{ mm}$ 处标准粒子衍射板测量结果

Fig. 5 Measurement results of a standard particle diffraction plate at  $6\text{ mm}$  from the focal plane

#### 3.2 数字全息图的再现与特征信息提取方法

在获得云滴的数字全息图后,需要对每一个粒子进行判焦,获得其清晰再现像。因此,获得一幅全息图中所有粒子质心后,即可确定粒子数量。再沿 $z$ 轴在整个 $40\text{ mm}$ 的测量长度上,取35个再现平面。每个粒子在这些再现平面上都会成像,利用全域数字图像融合方法将35张再现全息图融合为一张,如图6所示。融合全息图中,在每个粒子周围圈定宽和高分别为粒子 $x$ 和 $y$ 方向尺寸的两倍的局部像素块的计算区域,如图6的虚线框中所示,框中区域内的像素坐标与式(5)对应,且坐标原点处于虚线框左上角的第一个像素。

再利用这一区域在35张再现全息图中依次圈定。图7为粒子 $a$ 、粒子 $b$ 和粒子 $c$ 在35个再现平面上的成像结果。计算35个圈定区域内的局部亮度梯度方差,获得图7所示的局部亮度梯度方差曲线。在曲线中取局部亮度梯度方差的极大值,作为该粒子的聚焦平面,即粒子实际的 $z$ 轴位置,可成清晰像,如图7所示。云滴粒子 $a$ 、 $b$ 和 $c$ 的清晰成像位置分别为第1、第4和第12个再现平面。

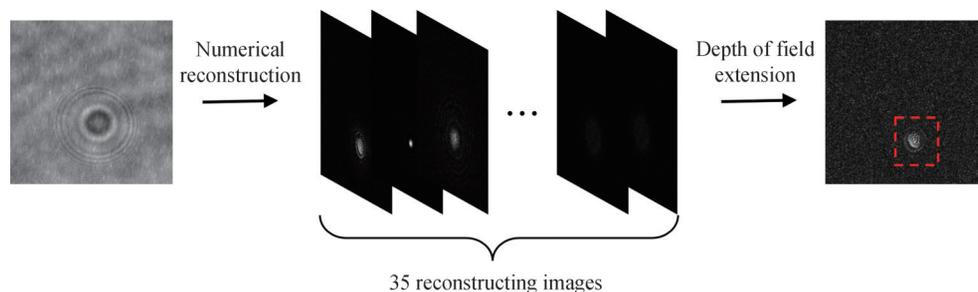


图6 全域数字图像融合方法  
Fig. 6 Method of global digital image fusion

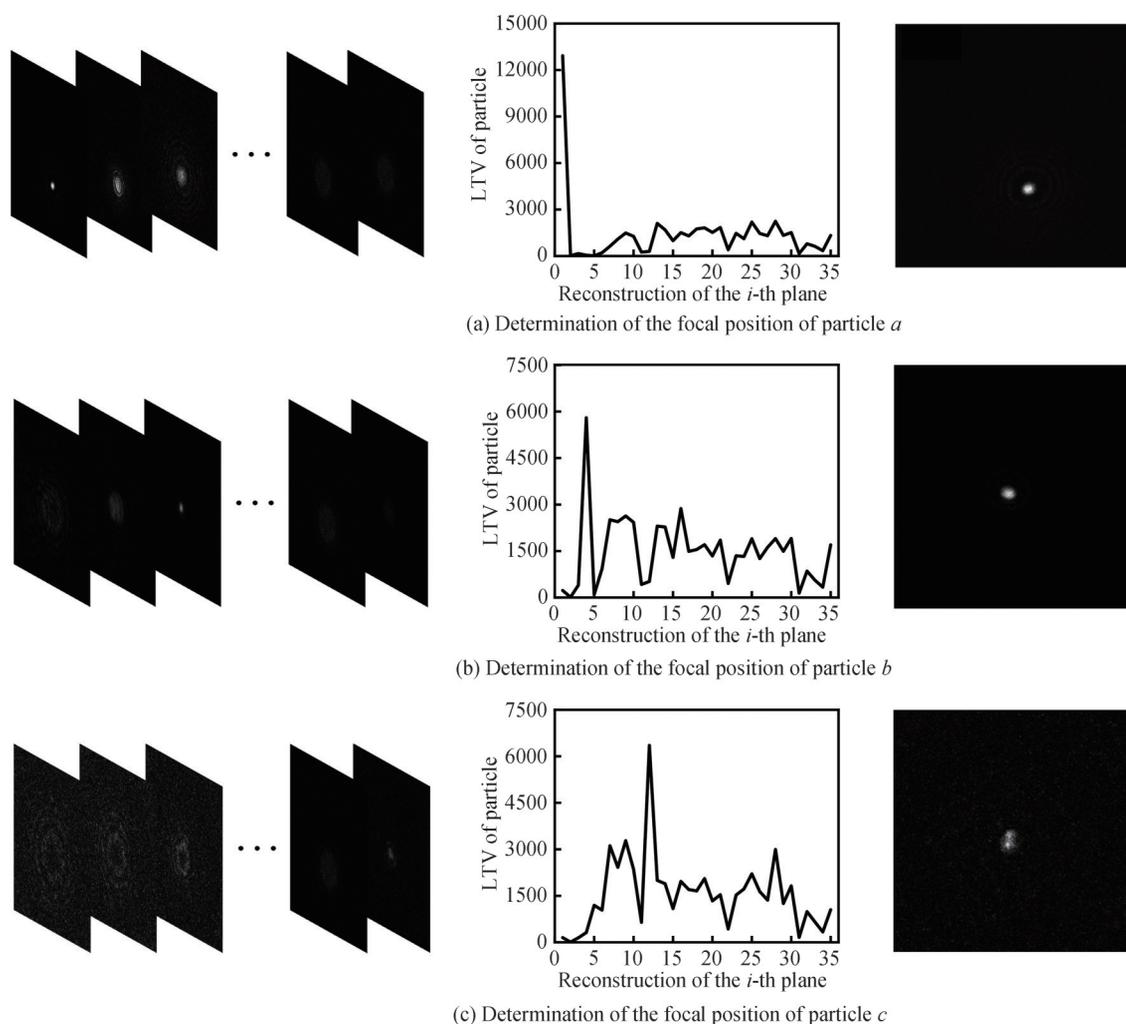


图7 局部亮度梯度方差与粒子判焦  
Fig. 7 Local tenengrad variance and determine the focus of particles

对一幅数字全息图中所有粒子进行判焦后,即可获得每一个粒子清晰像。对清晰像所处的那张再现全息图按照特定的阈值进行二值化。再对二值化图分别使用一次开运算和闭运算,使粒子的边缘形成平滑的闭合曲线。如果粒子内部存在空洞,再使用填洞算法将空洞置1。对获得的完整粒子进行贴标签,获得每个

粒子的包含像素的外轮廓,如图8所示。图8(a)~(c)分别展示了三个云滴粒子的识别图。最终利用识别算法可获得这些粒子的粒径和三维位置坐标。

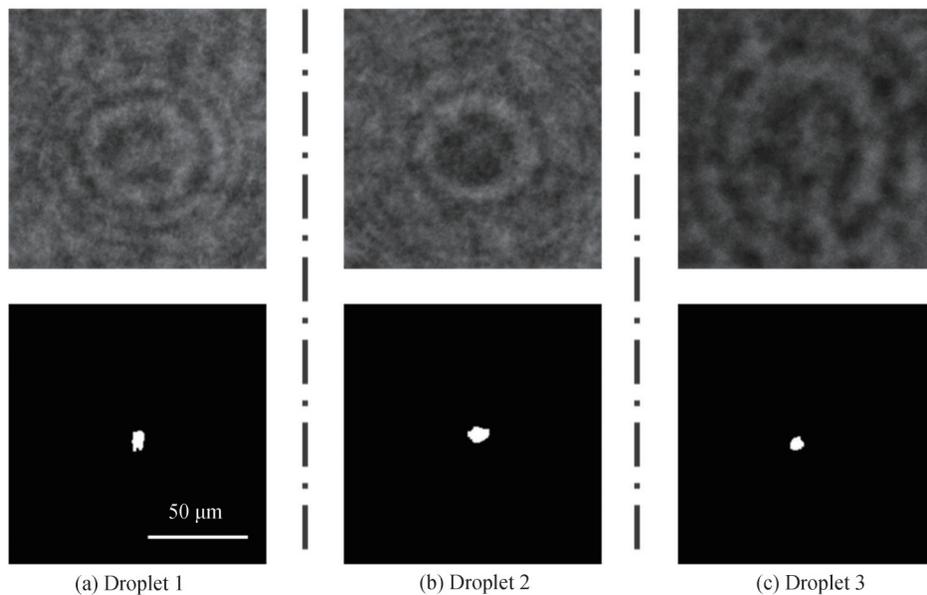


图8 液滴的识别图

Fig. 8 Identification diagrams of droplets

### 3.3 实验数据分析

在本次实验中,同轴DH系统连续观测168个小时,期间经历多次地形云的生消过程。随机在168小时的实验数据中抽取3小时进行数据分析。图9展示了3次实验中NC、MVD和LWC的变化趋势。

为了验证风向随动风标对同轴DH系统在观测过程中大云滴粒子的测量效果,比对了固定测量方位的美国FM120雾滴谱仪测量结果,实验如图10所示。由于FM120雾滴谱仪没有设置风向随动装置,只能向一个方向测量。当风向改变时,由于测量原理限制,其大云滴粒子会损失。

对比实验中,统计所有云滴的粒径,获得云滴尺寸分布(DSD)。DSD的形状反映了云滴分布的特征。为了便于DSD的比较,两种仪器测量 $2\sim 50\ \mu\text{m}$ 的云滴按大小分为30段(bin)。第1至第12个bin的宽度为 $1\ \mu\text{m}$ ,第13至第30个bin的宽度为 $2\ \mu\text{m}$ 。将每个bin中的云滴数除以采样体积进行归一化,得到DSD。计算实验中每个时间点的DSD,得到平均DSD,如图11所示。FM120的测量结果用线条梯形图表示,DH的测量结果用实心条形图表示。根据云滴尺寸,DSD分为小云滴(smaller droplets, bin 1~bin 2)、中等云滴(medium droplets, bin 3~bin 5)和大云滴(oversize droplets, bin 6~bin 30)。多数云滴主要分布在bin 1至bin 15中,而bin 16至bin 30中的云滴相对较少。从图11可以看出,FM120测量的大云滴和小云滴的平均浓度均低于DH。特别是在bin 10至bin 15中的云滴几乎完全没有被FM120观测到。

图12是平均数浓度的直方图,对于中等云滴的数浓度,FM120的观测结果分别为DH的116.84%、91.86%和83.10%;小云滴数浓度,分别为61.54%、30.24%和18.39%;大云滴数浓度,分别为26.90%、16.79%和28.57%。在DH的观测结果中,三组实验中大云滴的比例分别为16.75%、26.13%和33.01%。而在FM120的测量结果中,大云滴的比例分别为5.17%、7.28%和17.01%。

对图11和图12的分析显示FM120存在云滴损失。云滴粒径越大损失越严重。在第一组实验中,大云滴的占比小,因此两个仪器间的比对结果差距很小。在第二、三组实验中,大云滴的占比增大,两个仪器的测量结果差距较大。在第三组实验中,原始的 $LWC_{DH}$ 是 $LWC_{FM120}$ 的 $3.49\pm 1.63$ 倍。为了研究大云滴对LWC的贡献,删除bin 8至bin 30中的云滴后,该比例降低到 $1.23\pm 0.56$ ,如图13所示。在图13的虚线区域中,观测了第18至30 min期间的原始 $LWC_{DH}$ 上升和下降过程。而对于删除bin 8至bin 30中的云滴后的 $LWC_{DH}$ ,其变化与原始 $LWC_{DH}$ 趋势不同,但与 $LWC_{FM120}$ 相似。以上结果表明,FM120的大云滴的损失直接影响了LWC的观测结果,降低了观测数据的可靠性。

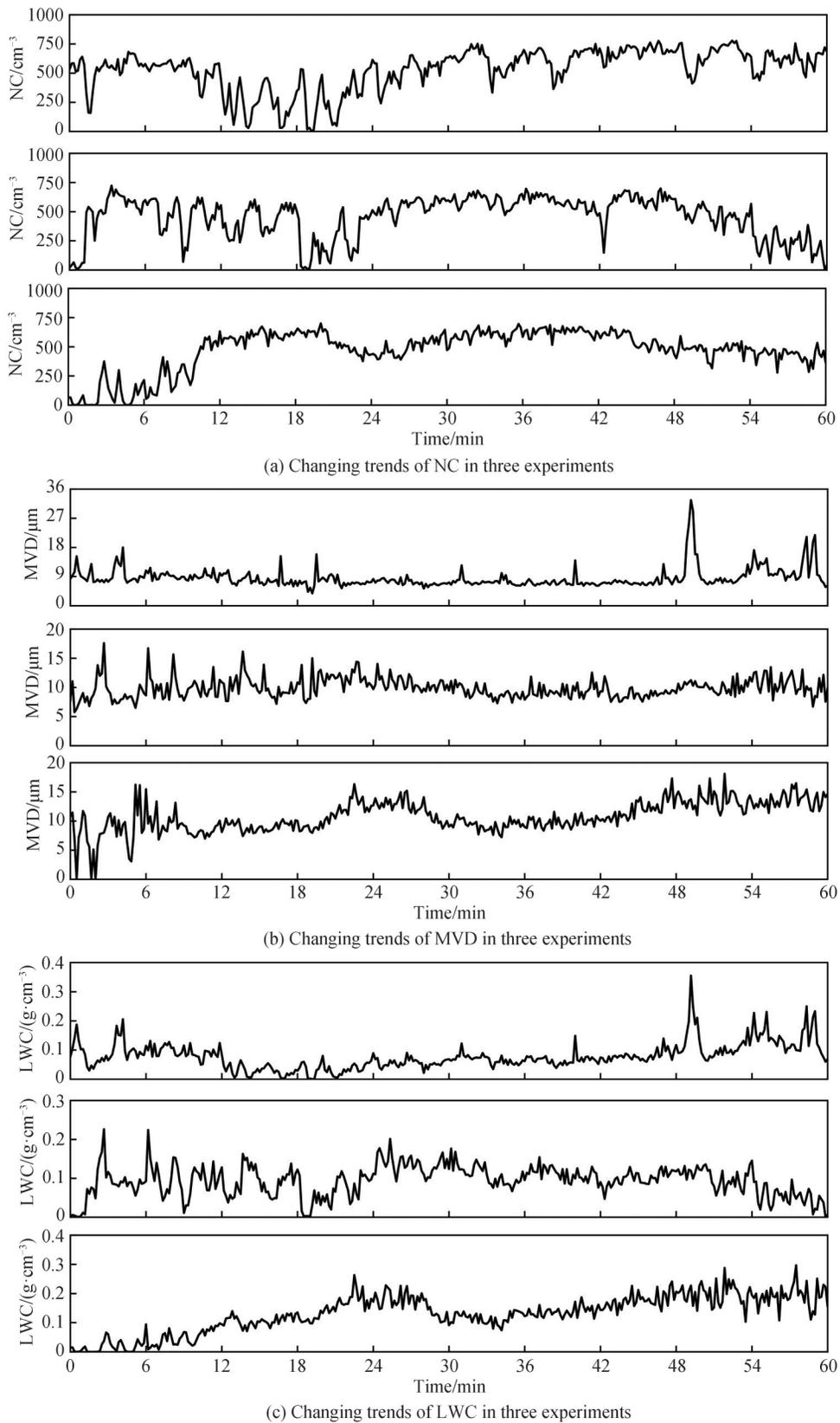


图9 三组实验中,同轴DH系统观测的云微物理参数的变化趋势

Fig. 9 In three experiments, changing trends of cloud microphysical parameters observed by coaxial DH system

根据式(3),能见度主要受小粒子的影响。因此,它被用来表征小云滴的测量结果。将FM120和DH的观测数据计算获得的能见度,与前向散射能见度仪器(FSV)测量结果进行比较,如表1所示。结果表明,在

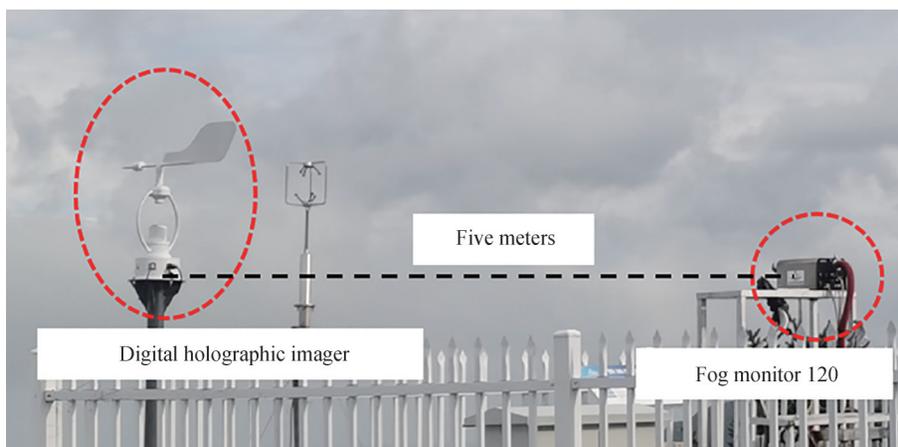


图 10 对比实验布置

Fig. 10 Schematic diagram of the comparative experiment

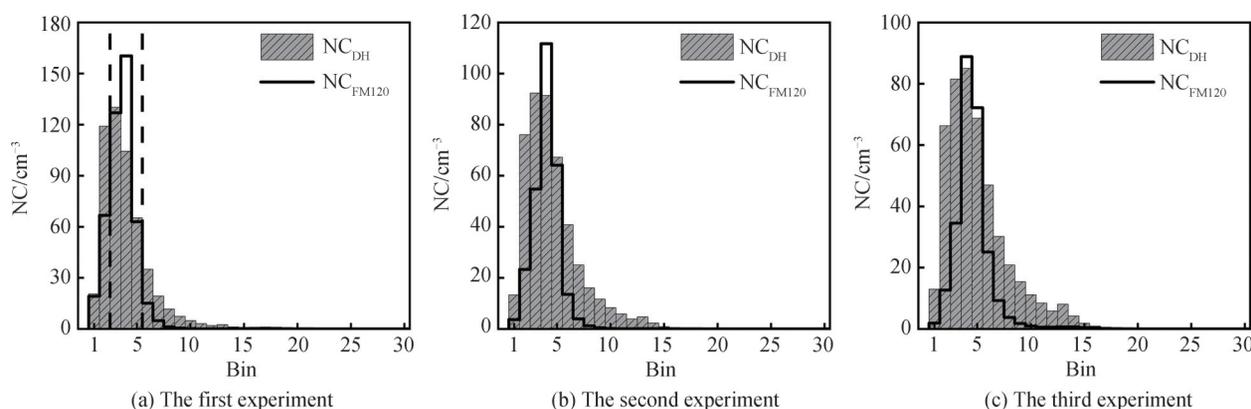


图 11 三次实验中的平均 DSD

Fig. 11 Average DSD in three experiments

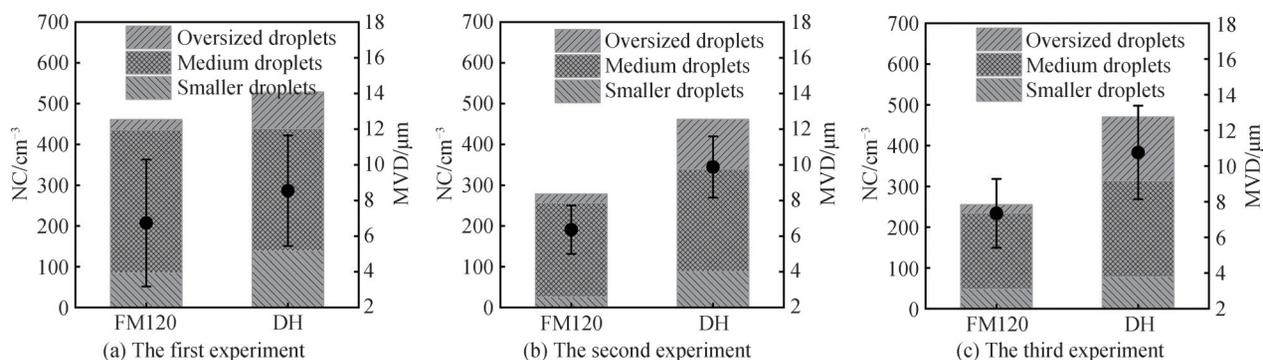


图 12 三次实验中,三种尺寸类型的云滴的平均数浓度:小、中等和大云滴

Fig. 12 In in three experiments, average number concentration of three size styles of droplets; smaller, medium and oversized droplets

三个不同的时刻,DH的能见度比FM120更接近FSV的测量值。这说明DH系统在小粒子端有更好的观测能力。

为了研究在大粒端FM120与DH的测量差异,对FM120的仪器结构和采样方式进行了分析。如图14所示,FM120的采样运输管道由收缩区(Shrinkage zone)和风洞(Wind tunnel)组成。在风洞内部有一个激光平面(Laser plane),有粒子通过时发生散射。FM120则是根据散射光的强度来判断粒子的大小。空气中的云滴在泵的作用下被吸入到采样运输管道。对于较重的大粒子,更容易受到重力和惯性的影响。在较大

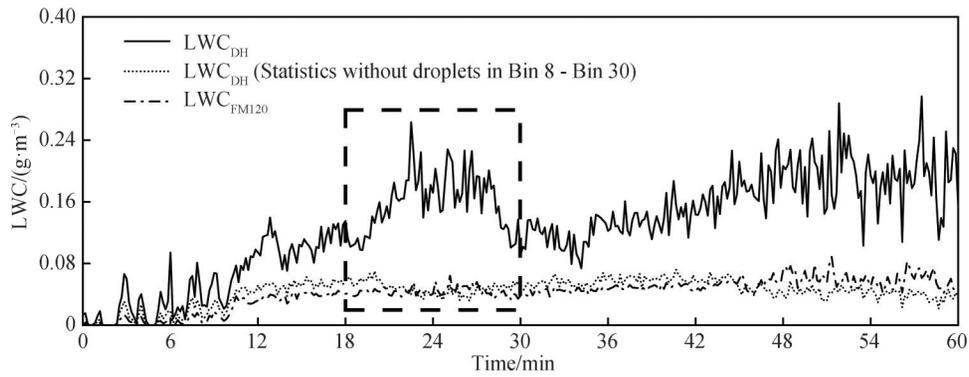


图13 第三组实验中LWC的比较

Fig. 13 Comparison of LWC in the third experiment

表1 在三个不同时间点,FSV、DH和FM120所观测的能见度的对比

Table 1 Comparison of Visibility observed by FSV, DH and FM120 in different times

Time	Visibility of FSV/m	Visibility of DH/m	Visibility of FM120/m
05:00	72	81	133
06:40	80	101	123
13:22	32	55	98

的重力和惯性影响下,大云滴粒子并不能遵循和气体分子完全相同的轨迹。在粒子的采样和运输过程中,有一部分大粒子会撞击管道壁,并吸附到管道上,从而造成粒子的损失。SPIEGEL JK<sup>[14]</sup>等通过理论计算得到了FM100的粒子损失效率。从图11的结果来看,粒子越大,粒子损失率越高。GUYOT G<sup>[24]</sup>、TIITTA P<sup>[25]</sup>等发现,风向也会对FM120粒子的损失造成额外影响。如果风向不正对着FM120的管道,会有更多的粒子撞击管壁表面,则会造成更多的粒子损失。而DH系统则不存在这样的问题。DH的采样方式是开放式的,其采样区间直接暴露在云中。在自然风的作用下,粒子自由地进入到采样区被CMOS记录,这不会破坏粒子的原始空间分布,也不会造成粒子在采样过程中的损失。

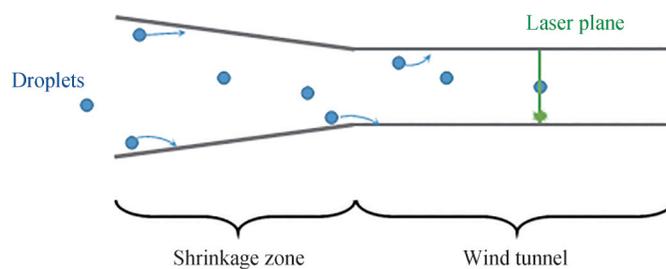


图14 FM120的采样运输通道示意图

Fig. 14 Schematic diagram of the sampling transport tube of FM120

FM120根据云滴粒子的前向散射光的强度来计算粒子的粒径。小粒子的前向散射强度很小,这会导致小粒子无法被检测到。因此FM120对于小粒子的检测效率和准确性会降低。云中的能见度主要受到小粒子的影响。根据DH测量结果计算得到的能见度更加接近前向散射能见度仪的测量结果,可以从侧面验证DH对小粒子的测量结果更合理。

## 4 结论

为观测地形云中 $2\sim 50\ \mu\text{m}$ 云滴粒子的微物理参量和云滴谱并进行分析,提出了一种基于数字全息理论并结合基于FPGA脉冲激光和高光学放大率的同轴DH系统。在六盘山地形云野外科学试验基地,进行了长期的连续观测,获得了地形云生消过程中的云微物理参数。并将观测数据与FM120进行了对比分析,我们发现在大粒子和小粒子端,DH拥有更强的观测能力。而FM120在这两个区间存在粒子损失的情况,降

低了液态水含量与能见度数据的可靠性。本文的研究成果可以为更加准确地测量云微物理参数、研究云滴碰并增长和人工影响天气等领域的研究提供技术支撑和数据支持。此外,进一步将DH系统做成机载仪器,可在实现高空云的指定位置的云微物理量的准确测量,为地面遥感技术提供更加准确的校正数据。

#### 参考文献

- [1] ZHENG X, XI B, DONG X, et al. Investigation of aerosol–cloud interactions under different absorptive aerosol regimes using Atmospheric Radiation Measurement (ARM) southern Great Plains (SGP) ground-based measurements [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, 20(6): 3483–3501.
- [2] LI D, ZHAO C, YUE Z, et al. Response of cloud and precipitation properties to seeding at a supercooled cloud–top layer [J]. *Earth and Space Science*, 2022, 9(9): e2021EA001791.
- [3] JENSEN J B, NUGENT A D. Condensational growth of drops formed on giant sea–salt aerosol particles[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2017, 74(3): 679–697.
- [4] DEVENISH B J, BARTELLO P, BRENGUIER J L, et al. Droplet growth in warm turbulent clouds [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2012, 138(667): 1401–1429.
- [5] BARRETT P A, BLYTH A, BROWN P R A, et al. The structure of turbulence and mixed–phase cloud microphysics in a highly supercooled altocumulus cloud[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, 20(4): 1921–1939.
- [6] CANNON F, CORDEIRA J M, HECHT C W, et al. GPM satellite radar observations of precipitation mechanisms in atmospheric rivers[J]. *Monthly Weather Review*, 2020, 148(4): 1449–1463.
- [7] MA Z, LIU Q, ZHAO C, et al. Impacts of transition approach of water vapor–related microphysical processes on quantitative precipitation forecasting[J]. *Atmosphere*, 2022, 13(7): 1133.
- [8] SHANG Huazhe, HUSI Lule, LI Ming, et al. Remote sensing of cloud properties based on visible–to–infrared channel observation from passive remote sensing satellites[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(6): 0600003.  
尚华哲, 胡斯勒图, 李明, 等. 基于被动遥感卫星可见至红外通道观测的云特性遥感[J]. *光学学报*, 2022, 42(6): 0600003.
- [9] YUAN Jinhan, ZHOU Yongbo, LIU Yubao, et al. Effect of cloud droplet spectrum distribution on retrievals of water cloud optical thickness and effective particle radius by AGRI onboard FY-4A satellite [J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(6): 0628004.  
袁锦涵, 周永波, 刘玉宝, 等. 云滴谱分布对FY-4A/AGRI水云光学厚度与有效粒子半径反演的影响[J]. *光学学报*, 2022, 42(6): 0628004.
- [10] SCHMIDT J, WANDINGER U, MALINKA A. Dual–field–of–view Raman lidar measurements for the retrieval of cloud microphysical properties[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(11): 2235–2247.
- [11] MARINOU E, VOUDOURI K A, TSIKODI I, et al. Geometrical and microphysical properties of clouds formed in the presence of dust above the eastern mediterranean[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(24): 5001.
- [12] AUSTIN R T, STEPHENS G L. Retrieval of stratus cloud microphysical parameters using millimeter–wave radar and visible optical depth in preparation for CloudSat: 1. Algorithm formulation [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, 106(D22): 28233–28242.
- [13] LIAO L, SASSEN K. Investigation of relationships between Ka–band radar reflectivity and ice and liquid water contents [J]. *Atmospheric Research*, 1994, 34(1): 231–248.
- [14] SPIEGEL J K, ZIEGER P, BUKOWIECKI N, et al. Evaluating the capabilities and uncertainties of droplet measurements for the fog droplet spectrometer (FM-100) [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2012, 5(9): 2237–2260.
- [15] DAI Siqing, DOU Jiazhen, ZHANG Jiwei, et al. Digital holography based near–field imaging and its application[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(1): 0111008.  
戴思清, 豆嘉真, 张继巍, 等. 基于数字全息术的近场成像与应用[J]. *光学学报*, 2020, 40(1): 0111008.
- [16] DI J, LI Y, XIE M, et al. Dual–wavelength common–path digital holographic microscopy for quantitative phase imaging based on lateral shearing interferometry[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(26): 7287–7293.
- [17] LU Qieni, GE Baozhen, GAO Yan, et al. Simultaneous measurement of size and velocity of alcohol spray with digital holography[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(2): 266–270.  
吕且妮, 葛宝臻, 高岩, 等. 乙醇喷雾场粒子尺寸和速度的数字全息测量[J]. *光子学报*, 2010, 39(2): 266–270.
- [18] XIN Lu, XIAO Wen, LIU Yakun, et al. Quantitative monitoring of morphological change of cancer cells apoptosis by digital holographic microscopy (invited)[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(10): 1017001.  
辛露, 肖文, 刘雅坤, 等. 数字全息成像定量监测癌细胞凋亡过程形态变化(特邀)[J]. *光子学报*, 2022, 51(10): 1017001.
- [19] XI T, DI J, LI Y, et al. Measurement of ultrafast combustion process of premixed ethylene/oxygen flames in narrow channel with digital holographic interferometry[J]. *Optics Express*, 2018, 26(22): 28497–28504.

- [20] BEALS M J, FUGAL J P. Holographic measurements of inhomogeneous cloud mixing at the centimeter scale [J]. *Science*, 2015, 350(6256):87–90.
- [21] PETER A, OLAF S, MARTIN S, et al. Ice crystal habits from cloud chamber studies obtained by in-line holographic microscopy related to depolarization measurements[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(30): 5811–5822.
- [22] FUGAL J P, SHAW R A. Cloud particle size distributions measured with an airborne digital in-line holographic instrument [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2009, 2(1):259–271.
- [23] GAO Pan, WANG Jun, TANG Jiabin, et al. Investigation of turbulence parameters based on liquid-phase cloud microphysics fluctuation measured by digital holography[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(7): 0701002.  
高攀, 王骏, 唐家斌, 等. 基于数字全息干涉术测量液相云微物理起伏的湍流参数表征[J]. *光子学报*, 2021, 50(7): 0701002.
- [24] GUYOT G, GOURBEYRE C, FEBVRE G, et al. Quantitative evaluation of seven optical sensors for cloud microphysical measurements at the Puy-de-Dôme Observatory, France [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2015, 8(10):4347–4367.
- [25] TIITTA P, LESKINEN A, KAIKKONEN V A, et al. Intercomparison of holographic imaging and single-particle forward light scattering in situ measurements of liquid clouds in changing atmospheric conditions [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2022, 15(9):2993–3009.

## Digital Holographic Method for Observation of Microphysical Parameters of Orographic Clouds

ZHANG Chuan, WANG Jun, ZHOU Hao, YANG Chenyu, LEI Ke, LIU Jingjing,  
HUA Dengxin

(*School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology,  
Xi'an 710048, China*)

**Abstract:** Clouds cover two-thirds of the Earth's surface and have an important impact on the global radiation balance, global climate change, hydrological cycle, and artificial weather modification. Meanwhile, the cloud in the atmosphere remains one of the biggest uncertainties in weather and climate changes. As cloud microphysical parameters, number concentration, median volume diameter and liquid water content are important parameters to investigate cloud microphysical processes and weather prediction. In the current observation technology of cloud microphysical parameters, remote sensing method exploits the power spectrum data of satellites and radars to invert cloud microphysical parameters. However, in the progress of data inversion, properties of cloud droplets need to be assumed. Therefore, realistic droplet spectrum and cloud microphysical parameters cannot be obtained, and their measurement accuracy needs to be further verified. Airborne instrument requires strict airspace application, and its observation time, spatial continuity and sampling frequency are limited. The measurement method of existing foreign droplet spectrometer based on light scattering will destroy the original cloud droplets field distribution. In view of the above bottleneck problems, an orographic cloud observation method based on digital holographic theory is proposed. This observation method combines the active wind direction follow-up system and the nanosecond pulsed laser modulation technique based on complex programmable logic device, and utilizes global digital image fusion and local tenengrad variance algorithm. The digital holographic experimental system based on this method uses a nanosecond pulsed laser light as the light source. It can eliminate the multiple ghosting phenomenon of high-speed moving particles and obtain accurate holographic images during the recording process of holograms. In the reproduction process of holograms, global digital image fusion and local tenengrad variance algorithm can determine the focus position of particles in the measurement space to obtain more accurate three-dimensional coordinate and size of particles. For traditional fog monitor based on the light scattering theory, its sampling method is inspiratory, which causes the loss of particles during the sampling process of particles. However, the sampling method of the digital holographic experimental system is open. The active wind direction follow-up system can avoid particles loss to obtain the more realistic droplet spectrum. In the Liupan Mountain Orographic Cloud Field Science Experimental Base, long-term continuous observation is conducted to

obtain cloud microphysical parameters. These observation data are compared and analyzed with the observation data of a light scattering-based fog monitor and forward scatter visibility instrument. In three comparative experiments, for particles of 2~4  $\mu\text{m}$ , the measurement results of the fog monitor are 61.54%, 30.24% and 18.39% of the digital holographic system, respectively. For particles of 7~50  $\mu\text{m}$ , the measurement results of the fog monitor are 26.90%, 16.79% and 28.57% of digital holographic system, respectively. The above results show that the digital holographic method measures more droplets in the interval of 2~4  $\mu\text{m}$  and 7~50  $\mu\text{m}$ . In recent years, many researchers have found that FM120 has particle loss during measurement, which is consistent with the findings of this paper. This method can lay data support for improving the theoretical understanding of the physical process of cloud precipitation and the development of parametric schemes. It can also provide important technical support for research in the fields of weather, climate, artificial weather modification and atmospheric chemistry.

**Key words:** Digital holography; Orographic cloud; Cloud microphysical parameters; Global digital image fusion; Local tenengrad variance

**OCIS Codes:** 010.1615; 010.1290; 090.1995; 090.2880