

轻量型成像式云粒子探测器的研制及应用

刘磊^{1,2}, 曾庆伟^{1,2}, 刘西川^{1,2}, 蔡乐乐¹, 王鹏¹

(1. 国防科技大学 气象海洋学院, 湖南 长沙 410073; 2. 中国气象局高影响天气重点开放实验室, 湖南 长沙 410073)

摘要: 准确获取大气中云粒子的原位探测信息, 对于揭示气溶胶—云—降水形成物理机制、改进数值预报模式微物理参数化方案、评估人工影响天气催化效果等具有重要的应用价值。然而, 现有云粒子原位探测器普遍存在价格贵、功耗高、体积大等不足, 无法满足当前科研、业务中对云参数的精细化观测需求。本研究提出了一种利用粒子前向散射光成像的云粒子测量方法, 并研制了可搭载于探空气球或无人机等平台的轻量型成像式云粒子探测器 (Imaging cloud particle sensor, I-CPS) 样机。在此基础上, 联合水汽测量、温湿度探测、GPS 定位等传感器模块组成了联合探空仪, 以准确同步获取云中宏微观原位参数, 为云降水物理科学观测提供重要工具。

关键词 原位探测; 云粒子探测器; 散射光成像; 轻量型; 联合探空仪;

中图分类号: P414.9+4

文献标识码:

Development and application of lightweight imaging cloud particle detector

LIU Lei^{1,2}, ZENG Qingwei^{1,2}, LIU Xichuan^{1,2}, CAI Lele¹, WANG Peng¹

(1. College of Meteorology and Oceanography National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China; 2. High Impact Weather Key Laboratory of CMA, Changsha 410073, Hunan, China)

Abstract: The accurate acquisition of in situ particle detection information in clouds is important in revealing the physical mechanism of cloud precipitation formation, improving the parameterization scheme of numerical weather prediction models, and evaluating the seeding effect of weather modification. However, the existing cloud particle in situ detectors are generally expensive, high-power consumption, large volume and other shortcomings, which cannot meet the needs of the current scientific research and business for fine observation of cloud parameters. To make up for the shortcomings of existing cloud particle in-situ detection instruments, a cloud particle measurement method using forward scattered light imaging of particles is proposed in this

study. A prototype of lightweight Imaging cloud particle sensor (I-CPS), which can be mounted on sounding balloons or unmanned aerial vehicles, is also developed. On this basis, sensors such as water vapor measuring instrument, radiosonde and GPS positioning module are coupled to form a combined radiosonde, which can accurately and synchronously obtain macro and micro in-situ parameters in the cloud. The instrument is expected to provide an important tool for scientific observation of cloud precipitation physics.

Keywords: In situ measurement; cloud particle detector; scattered light imaging; light weight; combined radiosonde

大气中的云覆盖了大约 70% 的地球表面积，是影响地气辐射平衡和地球水循环的重要因素^[1-3]。微观上，云是由无数具有不同尺度和形状的悬浮水凝物粒子（液滴、冰晶或者两者混合物）组成的可见聚合体。准确获取云中粒子的原位探测信息，对于揭示气溶胶-云-降水形成物理机制、了解云对天气尺度环流热量和动量再分配的影响、改进数值预报模式微物理参数化方案、评估人工影响天气催化效果和检验与订正卫星及雷达遥感产品等具有十分重要的意义^[4-7]。

目前，常见的云粒子原位探测仪器主要有碰撞采样式、光学散射式和光学成像式等类型^[8-10]。碰撞采样式仪器发展最早，主要原理是利用胶片和涂层组成的采样面收集由粒子碰撞产生的印痕，通过分析印痕得到粒子的形状、直径和尺度谱等。碰撞采样式仪器测量过程大多需要依靠手工采样，操作较为复杂，容易受到外界因素的影响，难以实现自动化处理，而且测量精度不高^[11]。光学散射式仪器发展于 20 世纪七八十年代，其主要原理是通过测量采样区内粒子引起的光散射强度的变化，进而获得粒子相态、光学特性以及谱分布等参数。该类型仪器对于球形粒子的测量需要假定粒子折射率，对于非球形粒子测量需要假设粒子的形状和取向已知，并且不能直接获得粒子的相态信息^[12]。光学成像式探测器则利用云粒子移动中对线形激光光束或者准直 LED 光束的切割遮挡，通过线阵探测器及图像算法，实现云粒子谱分布和形状的测量。目前，国际上广泛使用的光学成像式云粒子探测器主要有美国 DMT 研制的云图像探头（Cloud Imaging Probe, CIP）和 SPEC 公司研制云粒子图像仪（Cloud Particle Imager, CPI）。然而，这些成像式云粒子探测器的价格贵、功耗高、体积大，维修周期长，维护困难。同时，由于重量限制和稳定性要求等使用条件，这些探测器只能在挂载于飞机上穿云探测，探测成本较高，容易造成粒子破碎^[13]，并且不能在极端天气下工作，使用限制较大，无法满足当前科研、业务中对云参数的精细化观测需求。因此，研制可

搭载于探空气球、无人机等平台上的轻量型光学成像式云粒子探测器显得十分必要。

为此，在综合现有光学散射式和光学成像式探测仪器测量优势的基础上，创新提出了一种利用粒子前向散射光成像的云粒子测量方法，并研制了轻量型成像式云粒子探测器（Imaging cloud particle sensor, I-CPS）样机。该云粒子探测器具有体积小、重量轻、功耗低、结构简单、环境适应性强、测量精度高等诸多优点，可搭载于探空气球或无人机上空探测，同时还具备探测大气中云滴和冰晶粒子的能力。以 I-CPS 为基础，进一步联合水汽测量、无线电探空、GPS 定位等传感器模块组成联合探空仪，以同步测量温度、压力、湿度、云水含量及云微物理特征等物理参数以及经纬度、高度等定位信息，从而准确获取云中宏微观原位参数，为云降水物理科学观测提供重要工具。

1 成像式云粒子探测器的研制

1.1 探测器的总体方案设计

成像式云粒子探测器主要由光学单元、成像单元以及采集和控制单元等三部分组成，结构设计如图 1 所示。光学单元包括环形光源和光学镜头两部分，主要作用是为成像单元提供暗视场。成像单元由 CMOS 图像传感器和 CMOS 驱动电路组成，主要功能是接收粒子的前向散射光并实现光电转换从而得到粒子的投影图像。采集和控制单元由现场可编程门阵列芯片 FPGA 和数字信号处理器 DSP 组成，FPGA 的作用是在 CMOS 曝光的同时短暂点亮环形 LED 光源从而实现 CMOS 短时曝光，DSP 的作用是实时采集粒子图像、粒子图像提取和数据传输。另外，还开发了配套数据处理软件，其主要作用为实时接收、存储原位探测器的测量数据并重构粒子图像。

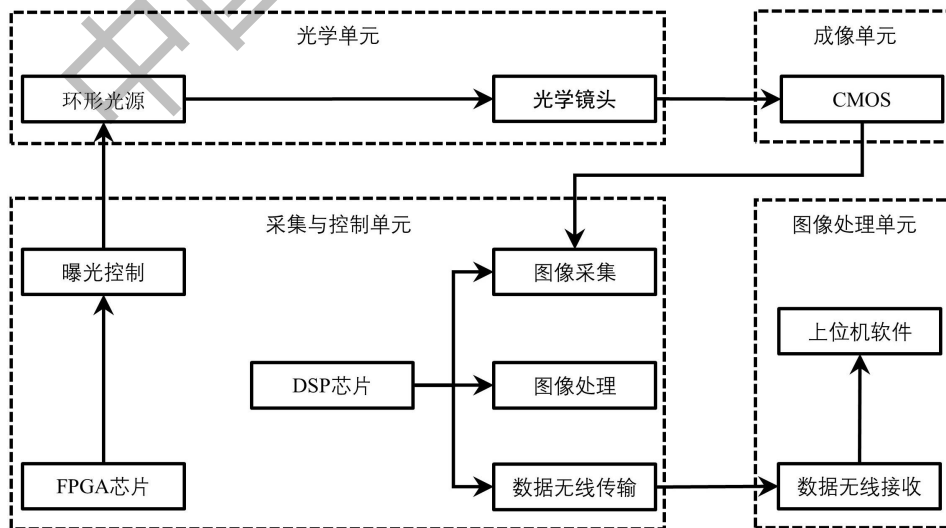


图 1 成像式云粒子探测系统结构框图

1.2 关键部件实物的研制

1.2.1 环形 LED 光源设计

现有的光学成像式云粒子探测器一般使用激光器或准直 LED 光源为采样空间提供照明，主要是因为激光器和准直 LED 光源的方向性强，有助于提高图像的边缘对比度。但是，为了获得较强光照条件，激光器或 LED 的功率往往较高，体积也较大，难以在球载探测器上直接应用。如果换用方向性较差的标准光源，小尺度的云粒子容易被发散的背景光淹没而无法成像。为此，提出了一种基于 LED 照明的环形光源结构，如图 2 所示。

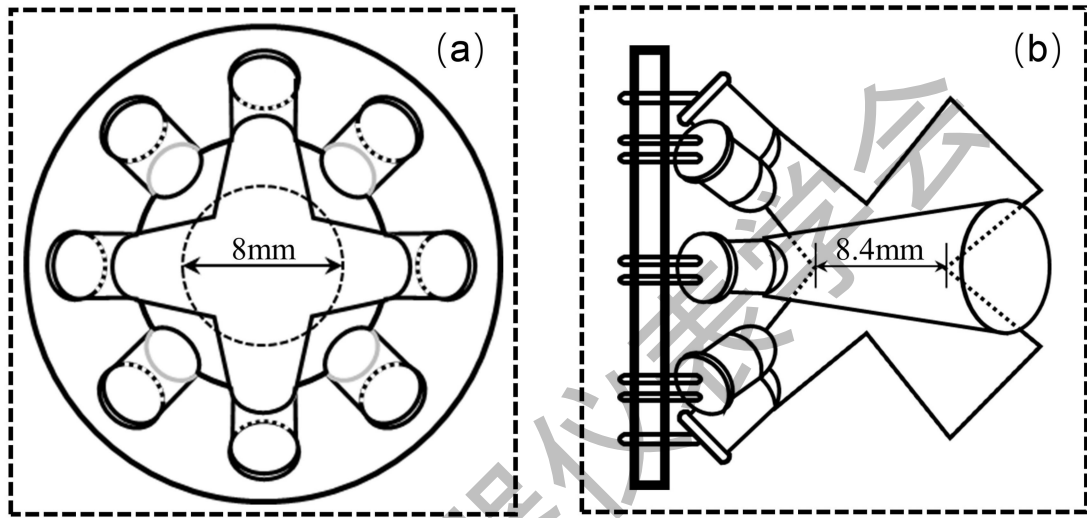


图 2 环形光源结构图。(a) 俯视图，(b) 侧视图。

光源由 8 颗向中心倾斜且均匀分布的 LED 组成。LED 照明光束的中轴与光学镜头的光轴相交，因此照明光束不能直接穿过光学镜头。仅当交点处有云粒子时，粒子的前向散射光可以穿过镜头在 CMOS 上形成粒子的投影图像。但是单一 LED 光源的亮度较低，投影图像的对比度较差，因此使用多个相同规格的 LED 组成环形光源。这些 LED 的规格相同，直径为 3mm，中心波长 470nm，亮度 4000mcd，工作电压 3.2V，工作电流 20mA。由于 LED 均匀分布且具有相同的倾斜角，它们的照明光束将汇聚在照明光束中轴与光学镜头光轴的交点处，形成明亮的采样空间。采样区内光斑汇聚中心位置的圆形光斑大小直径约为 8mm，锥形光束汇聚起始位置间隔约 8.4mm，假设采样空间近似为圆柱形，则光源汇聚区域的体积约为 420mm³。LED 的发散角一般在 30 度左右，这可能会对测量过程产生不利影响。为了限制照明光束的发散角，设计了如图 3 所示的结构件。该结构件还能够起到固定 LED 位置的作用。

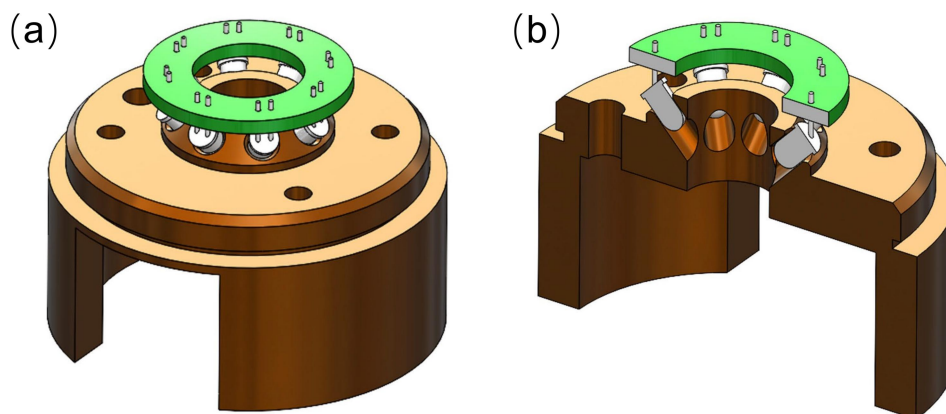


图3 环形光源及结构件模型图。(a) 主视图, (b) 剖面图。

1.2.2 光学成像系统设计

I-CPS 的主要成像组件结构设计如图 4 所示。环形光源的斜照光束汇聚在采样区中心位置, 形成三维采样空间。当采样空间内有云粒子时, 光束与云粒子发生米散射作用, 云粒子的前向散射光将通过镜头汇聚在 CMOS 传感器上, 形成明亮的光斑, 经光电转换后形成粒子图像。通过对图像进行处理, 就可以得到粒子的形状和尺度等信息。

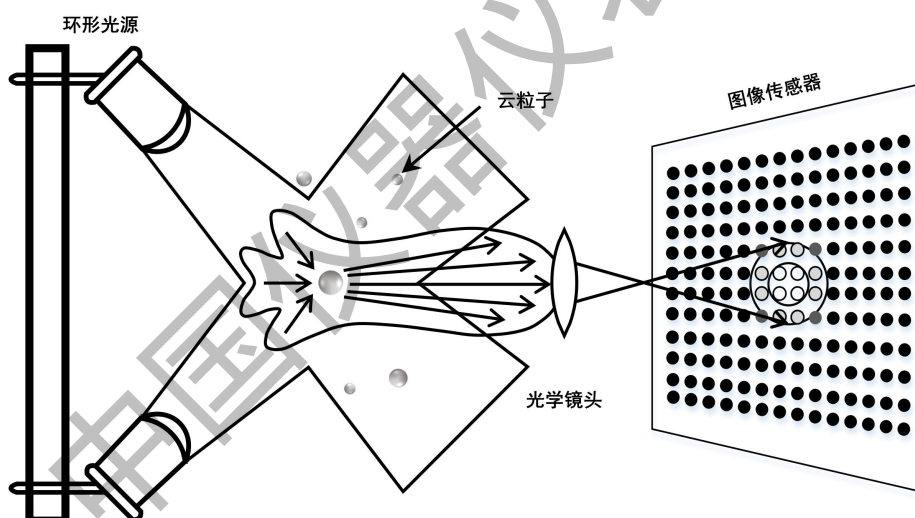


图4 I-CPS 光学成像原理示意图

为了提高成像质量, 设计了由多片透镜组成的显微镜头。显微镜头的共轭距约为 50mm, 工作距离约为 11mm, 实际放大倍率约为 4.3 倍, 光学组件的系统畸变小于 1%, 能够较好的满足设计要求, 可以在样机上使用。由于显微镜头的引入, CMOS 的像素尺寸理论上可以达到 $1.4\mu\text{m}$, 但这也使得 CMOS 的靶面面积减小为 $1053 \times 672\mu\text{m}$ 。为了验证光学成像系统的实际性能, 采用 Edmund Optics 公司生产的标准测微尺#59-273 进行测试, 测微尺在硅玻璃上印有镀铬的圆点和线作为参照物, 测试结果如图 5 所示。图 5(a)为 $100\mu\text{m}$ 标准圆的图像, 对图像做反白处理并将其二值化得到图 5(c), 由图可知 $100\mu\text{m}$ 标准圆图像的直径为 71

个像素，1个像素的实际尺寸为 $1.4\mu\text{m}$ ，显微镜的实际放大倍数为4.3倍。测试结果表明，MT9V024与显微镜镜头相结合、实现较高的图像分辨率。

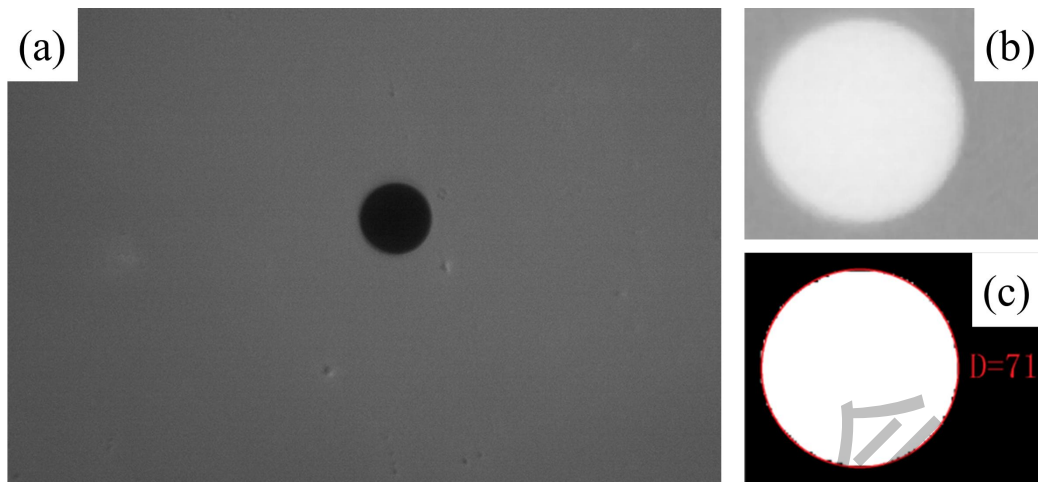


图5 100 μm 标准圆成像测试图。(a)原始图像，(b)粒子图像（反白），(c)二值图像。

1.2.3 嵌入式电路设计

I-CPS的主要功能是获取云粒子的图像并将其实时传输到地面，因此电路选择了嵌入式图像处理系统中常用的异构芯片FPGA（Field Programmable Gate Array）+DSP（Digital Signal Processor）的多处理器级联架构，如图6所示。DSP处理器具有高性能、低功耗、外设接口丰富、开发效率高等优点，主要用于实现图像处理与传输的复杂算法。而FPGA具有较强的逻辑控制功能，内部延时小，在系统数据采集和逻辑控制方面有更大的优势。

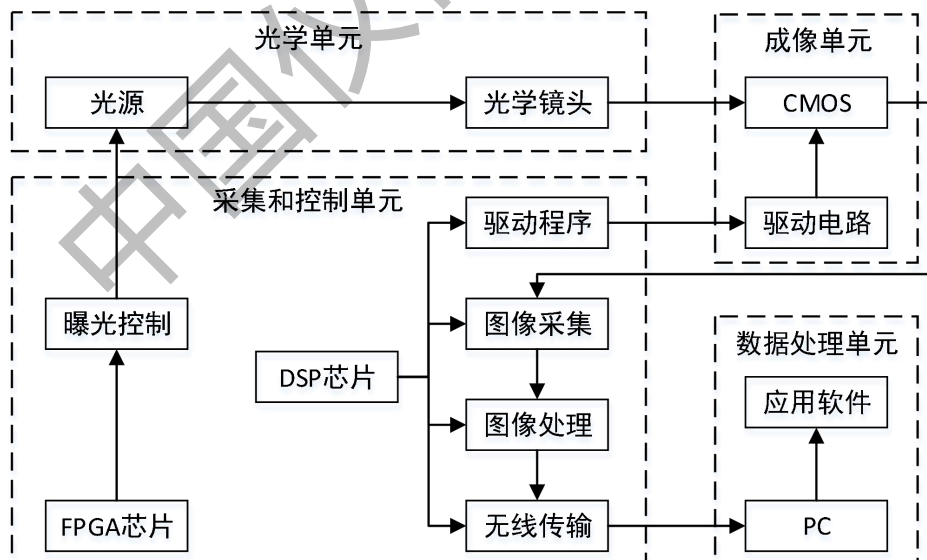


图6 DSP+FPGA的架构设计结构图

DSP+FPGA的架构设计充分利用了DSP快速数据处理能力和FPGA丰富的可编辑资源，有效地实现优势互补，能很好的实现图像数据的采集、传输、处理等功能。由于I-CPS

是为原位测量设计的，因此样机所采用的芯片应该具有功耗低、集成度高、价格便宜等优点，使样机满足质量轻、体积小、功耗低等要求，以便利用气球探空携带样机开展探空实验。

1.3 嵌入式集成软件的开发

为了减小探测器与粒子相对运动造成的拖尾现象，利用 FPGA 芯片 XC6SLX4 实现在 CMOS 曝光的同时短暂点亮环形 LED 光源，LED 工作脉冲的时序由 FPGA 内部的 PLL 模块控制，PLL 频率合成器的工作频率为 400 MHz 至 1080 MHz，可通过倍频器 M 提高输出频率，预分频器 D 降低输出频率，相移器 O 改变相位。由于 FPGA 芯片负载能力较弱，不能直接驱动多个 LED，为此设计了专门的时序控制电路，电路由 RC 充放电电路和场效应管 MOSFET 组成，RC 电路为 LED 提供所需的工作电压，改变 MOSFET 的工作状态能够控制 RC 电路完成充放电过程，为 LED 供电。

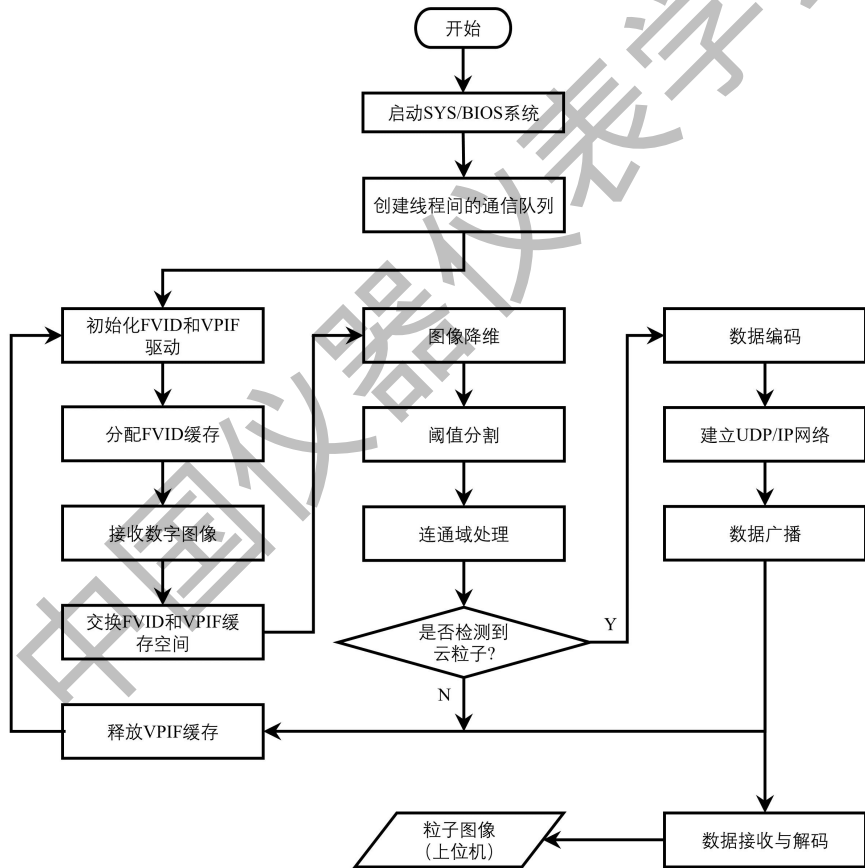


图 7 DSP 嵌入式软件流程图

为了实现图像采集、粒子识别和网络传输等功能，基于 SYS/BIOS 嵌入式实时操作系统开发了相应的 DSP 嵌入式软件，如图 7 所示。该软件可以实现不同功能的不同任务线程控制。图像采集线程的主要任务是利用 VPIF 接口接收 CMOS 数据，其本质也是调用通用 I/O 与外部设备实现数据交换。粒子识别线程的主要功能是识别图像中的粒子图像，并计算粒子

大小与坐标。CMOS 最大帧率为 50Hz，由于 C6748 芯片主频较低，为了保证单帧图像处理时间小于 20ms，提出了一种综合图像降维、阈值分割和连通域处理等算法的粒子识别算法。该算法能有效识别图像中的云粒子，并剔除其中明显散焦的粒子图像，原始图像的大小为 720*480 像素，经 DSP 处理后得到 12*15 像素的粒子图像，粒子图像的大小仅为原始图像的 1/2000，大大提高了数据传输效率。网络传输线程的主要任务是将粒子图像的坐标、大小及各像素点对应的灰度值通过网络发送给上位机。网络传输线程通过基于 SYS/BIOS 实时操作系统的网络协议栈 Network Developer's Kit (NDK) 实现。为解决 UDP/IP 协议在无线传输条件下报文丢失率较高的问题，DSP 软件在对数据编码和传输时对大粒子（粒径大于 50 μm ）图像进行分包，确保每段数据中均包含粒子坐标、大小和像素坐标等信息，以便后期处理时通过图像插值等算法补全云滴图像，提高数据利用率。

2 联合探空仪的研制

I-CPS 是一款用于原位测量的球载云粒子探测器，但此类探测器一般不会单独使用，而是使用多种传感器组成联合探空仪，以获取更多的测量数据。因此，我们使用 I-CPS、水汽测量仪、无线电探空仪、GPS 定位模块等传感器组成联合探空仪，以准确测量温度、压力、湿度、云水含量及云微物理特征等物理参数以及经纬度、高度等定位信息。

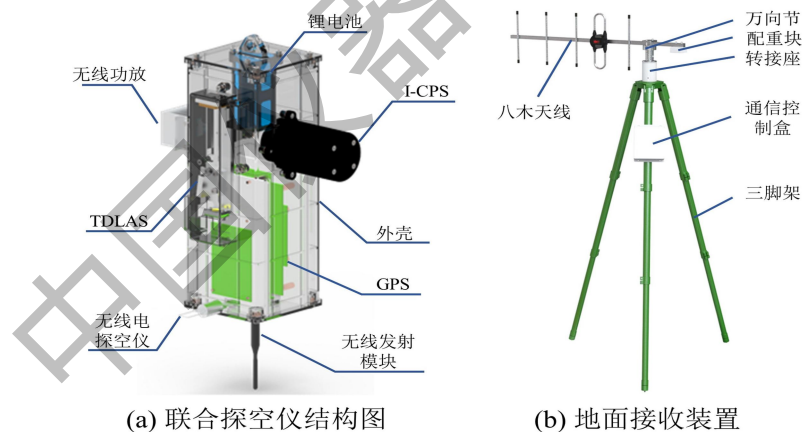


图 8 联合探空仪与地面接收装置结构示意图

联合探空仪的结构组成如图 8 所示。探空仪的体积为 10cm*10cm*26cm，镜头凸起部分大小为 5cm*5cm*7.5cm，质量 1600g，整机功耗不超过 10W，探空仪由锂电池供电，电池电压 12V，容量 2500mAh。其中，TDLAS 水汽测量仪利用水汽对激光的选择吸收特性，计算接收端的气体吸收谱线实时检测大气中的水汽含量。无线电探空仪使用热敏电阻（容）、湿敏电阻（容）、空盒传感器测量大气中的温、压、湿等气象要素的大小与变化。GPS 定位模块通过接收、解调多个卫星的广播 C/A 码信号，计算得到定位模块当前的经度、纬度、

高度和时间。不同传感器之间通过串口进行通讯,最后通过 I-CPS 上的 DSP 芯片建立 UDP/IP 网络连接从而将所有测量数据打包发送给上位机,在 COFDM 无线发射模块和无线功放的作用下实现测量数据的无线广播。

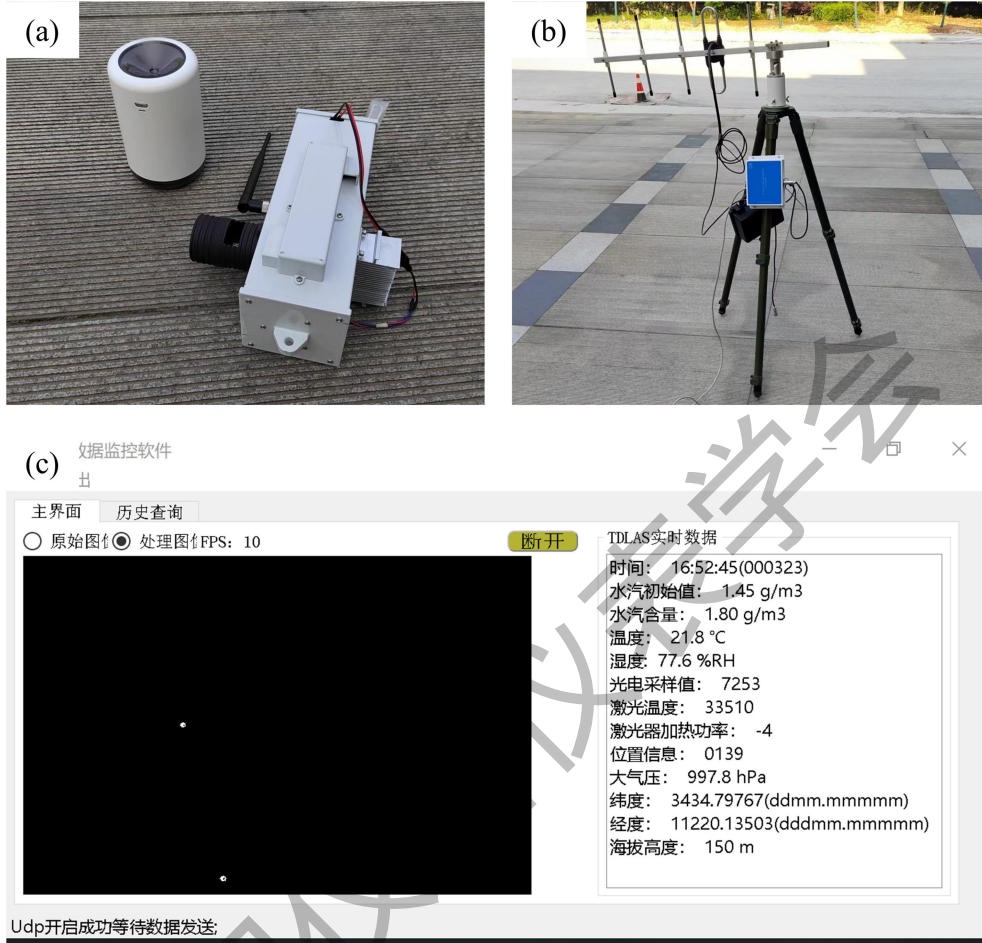


图9 联合探空仪通信测试实验装置及实验结果

(a) 联合探空仪与便携式加湿器, (b) 地面接收装置, (c) 实时测量数据

图9所示为联合探空仪部分通信测试实验结果。地面接收装置如图9(b)所示,接收机通过八木天线接收无线电信号,通信控制盒主要由COFDM接收模块和视频解码板组成,主要用于数据的解调与解码从而还原测量数据。图9(c)所示为地面实时数据接收软件界面,根据水汽含量和相对湿度情况,可以判断仪器是否入云观测。

3 成像式云粒子探测器的应用

3.1 云雾舱观测实验

利用国防科技大学的扩散云室开展了云室实验,如图10所示。该扩散云室内部尺寸为4.5m×2m×2.3m,主要由温度控制系统、供电系统、造雾系统、喷淋系统和控制系统组成。云室顶部连接电热蒸汽机组,能够为云室内部提供流量可控的水蒸汽。而云室底部布设了大

量的制冷盘管，其在制冷机组的作用下使云室底部迅速降温。云室内部上热下冷，形成较大的温度梯度场，进而达到在短时间内形成过饱和蒸汽层的目的。云室内部还安装了多个风扇，可以起到辅助降温和维持云室内部环境均一性的作用。利用 FM-120 激光雾滴谱仪同步进行观测，结果发现二者在获取粒子数浓度、等效粒径等参数方面一致性较好。进一步观测结果表明，I-CPS 具备识别冰晶粒子的能力，如图 10 (b) 所示。

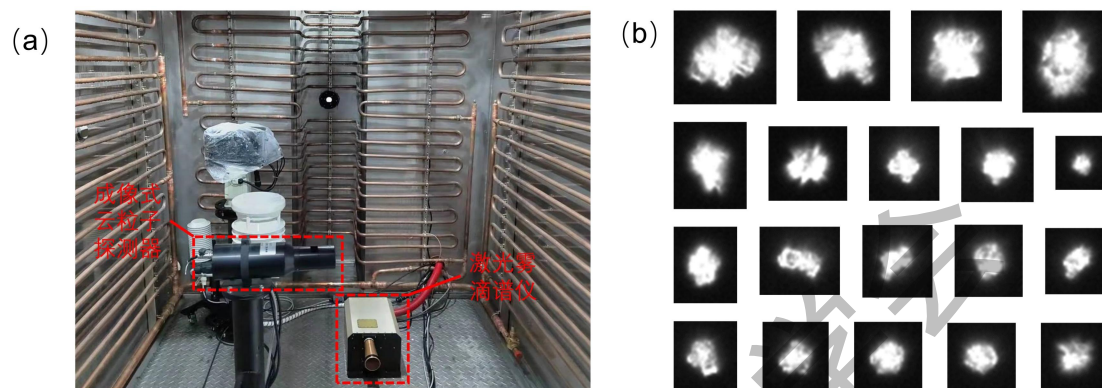


图 10 (a) 云雾舱内部测量场景，(b) I-CPS 拍摄到的冰晶粒子图像。

3.2 高山云雾观测实验

为了研究 I-CPS 在真实云雾环境下的性能表现，使用 I-CPS 与 FM-120 开展了高山云雾观测实验，利用高山地区的海拔优势实现对自然云雾的长时间直接观测。实验地点位于厦门市同安区白交祠村，这里平均海拔 900 多米，是一个常年云雾缭绕的高山村，实验环境如图 11 所示。实验设备主要为 FM-120 和 I-CPS，通过当地的自动气象站，还可以获取温度、湿度、压强、风速、风向、能见度等气象要素。

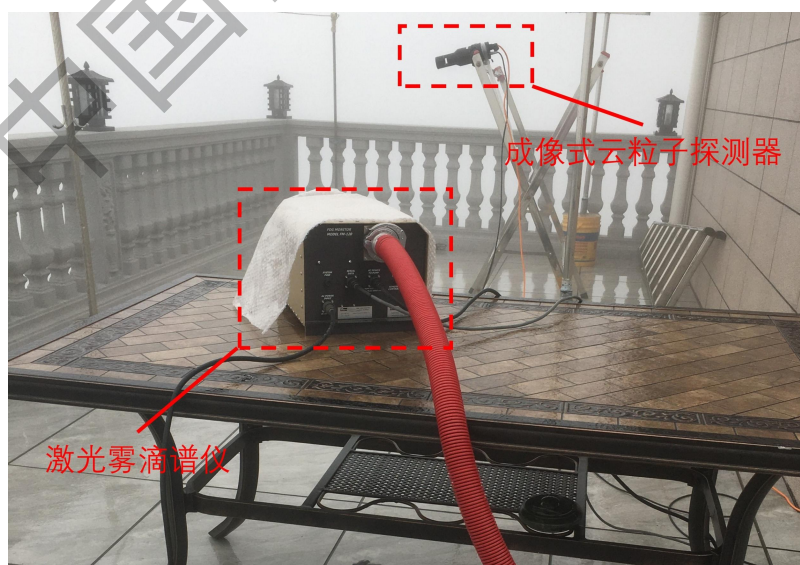


图 11 高山云雾观测实验环境与设备

选取了 2022 年 3 月 23 日 12 时-24 时的实验数据进行分析。实验当天，能见度小于 1000

米，可以认为在这些时间段内白交祠村被云雾笼罩。图 12 对比了两种仪器的在同一时刻测得的谱分布对比。图 12 (a) 与图 12 (b) 为 16: 00 测得的粒子谱分布，二者呈现出了相同的特性，即云雾滴谱较宽，呈双峰谱型，粒子浓度较小、但粒径较大。图 12 (c) 与图 12 (d) 为 18: 30 的测量结果，此时能见度略有上升，两种仪器的测量结果均为粒子数浓度与平均粒径有所下降，粒子谱也由双峰变为单峰。但 CPIS 的谱宽比 FM-120 略大，这可能是因为这组数据中 CPIS 的样本数较少，导致测量结果有较大随机性，也可能是 FM-120 长时间工作破坏了雾的均一性导致的。总体而言，在此次实验中两种仪器的测量结果均保持了较好的一致性，表明在自然云雾环境下，I-CPS 也能够较准确的测量云雾的微物理特性。与 FM-120 相比，I-CPS 样机的实时性较差，需要对较长时间内的测量数据做积分才能得到粒子谱分布等微物理参数，目前正在优化仪器的设计，以提高数据的实时性。但 I-CPS 成本低、便于安装、不会破坏云雾均一性等优点也是 FM-120 不具备的。

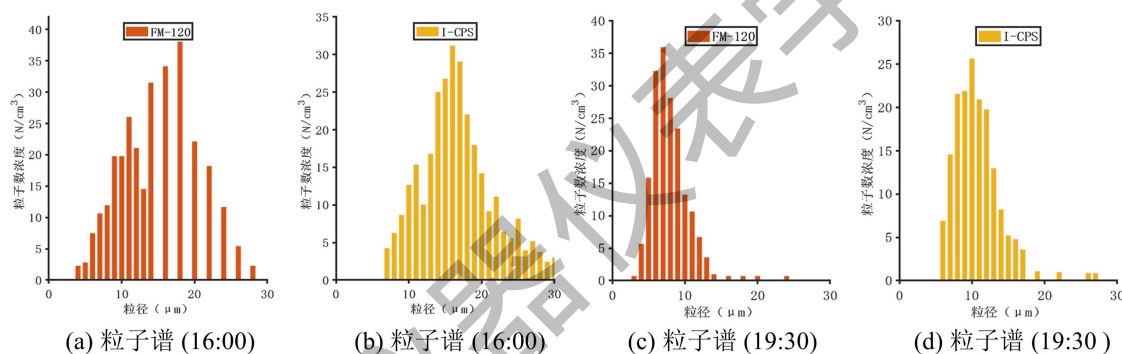


图 12 I-CPS 与 FM-120 测得粒子谱分布对比

3.3 无人机挂载穿云试验

2023 年 4 月 24 日，利用无人机搭载 I-CPS 升空进行穿云探测试验。将绳子挂接在无人机的两个脚上时，设备悬挂在无人机下方约十米位置处，测量场景如图 13 所示。实验过程中，天气现象为小雨转阴，云高 360 米左右，控制无人机悬停至 400 米位置，进行观测。从图 13 (b) 所示的遥控器显示无人机拍摄到的画面来看，无人机正逐渐进入云层中。从当天的飞行情况来看，仪器整体工作情况良好，相关的数据正在分析中。



图 13 无人机穿云探测试验。(a) 无人机挂载 I-CPS 升空场景, (b) 无人机操控设备上显示的穿云场景。

4 结语

准确获取云粒子原位探测信息具有广泛的应用前景,但是现有云粒子探测器普遍存在价格贵、功耗高、体积大等不足,无法推广应用。研制了一款轻量型成像式云粒子探测器 I-CPS,该探测器具有体积小、重量轻、功耗低、结构简单、环境适应性强、测量精度高等优点,且具备识别液滴和冰晶粒子的能力,可以搭载于探空气球、无人机等平台升空观测。以 I-CPS 为基础,通过水汽测量、无线电探空、GPS 定位等传感器模块集成,组成一款新的联合探空仪,能够实现云中宏微观原位参数的准确获取。该项目弥补了现有同类型探测设备的功能不足,同时也显著拓展了同类设备的后续应用范围,为提高云降水物理科学观测水平提供了重要工具。

参考文献

- [1] Stevens B, Bony S. Climate change. What are climate models missing? [J]. *Science*, 2013, 340(6136): 1053-1054.
- [2] Vogel R, Albright AL, Vial J, et al. Strong cloud - circulation coupling explains weak trade cumulus feedback [J]. *Nature*, 2022, 612: 696-700.
- [3] Bony S, Stevens B, Frierson DM, et al. Clouds, circulation and climate sensitivity [J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8(4): 261 - 268.
- [4] 王鹏, 刘磊, 刘西川, 等. 球载云降水粒子探测器研究现状及进展 [J]. *地球科学进展*,

2020, 35(7): 704-714.

- [5] Heymsfield AJ, Schmitt C, Chen C-C-J, et al. Contributions of the Liquid and Ice Phases to Global Surface Precipitation: Observations and Global Climate Modeling [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2020, 77(8): 2629-2648.
- [6] 郭学良, 付丹红, 郭欣, 等. 我国云降水物理飞机观测研究进展 [J]. *应用气象学报*, 2021, 32(6): 641-652.
- [7] Rosenfeld D, Zhu YN, Wang MH, et al. Aerosol-driven droplet concentrations dominate coverage and water of oceanic low-level clouds [J]. *Science*, 2019, 363(6427): eaav0566.
- [8] 卜令兵, 高爱臻, 袁静, 等. 一种新型云粒子探测仪的研制及初步观测结果分析 [J]. *光子学报*, 2014, 43(1): 101005.
- [9] Abdelmonem A, Järvinen E, Duft D, et al. PHIPS - HALO: the airborne Particle Habit Imaging and Polar Scattering probe - Part 1: Design and operation [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2016, 9(7): 3131-3144.
- [10] Heymsfield AJ. On measurements of small ice particles in clouds [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(23): L23812.
- [11] 郭学良, 于子平, 杨泽后, 等. 高性能机载云粒子成像仪研制及应用 [J]. *气象学报*, 2020, 78(6): 1050-1064.
- [12] Baumgardner D, Abel SJ, Axisa D, et al. Cloud Ice Properties: In Situ Measurement Challenges [J]. *Meteorological Monographs*, 2017, 58: 9.1-9.23.
- [13] 黄敏松, 雷恒池. 云粒子的破碎对积层混合云微物理参量测量的影响 [J]. *大气科学*, 2021, 45(02): 369-378.