

本文引用格式: 庄涵,陈检,邱健,等.基于 FPGA 与 NAND FLASH 的多通道动态光散射自相关器[J].自动化与信息工程,2026,47(2):9-17.

ZHUANG Han, CHEN Jian, QIU Jian, et al. Multi-channel dynamic light scattering autocorrelator based on FPGA and NAND FLASH[J]. Automation & Information Engineering, 2026,47(2):9-17.

基于 FPGA 与 NAND FLASH 的多通道动态光散射自相关器*

庄涵¹ 陈检³ 邱健¹ 骆开庆¹ 彭力² 徐炳权¹ 刘冬梅¹ 韩鹏¹ 陈淼¹

(1.华南师范大学电子科学与工程学院(微电子学院)/

广东省光电检测仪器工程技术研究中心, 广东 佛山 528225

2.华南师范大学物理学院, 广东 广州 510006

3.广东工业大学实验教学部, 广东 广州 510006)

摘要: 为提高多角度动态光散射(MDLS)的数据可靠性与测量准确性,研制一种基于现场可编程门阵列(FPGA)与非易失性存储(NAND FLASH)的多通道 DLS 自相关器。该多通道 DLS 自相关器利用 FPGA 实现多通道并行同步采集机制与自相关计算;采用 RAM 数据缓存单元和 NAND FLASH 存储模块构建双级协同存储架构与“采集-缓存-存储-回读”四阶段数据传输架构。通过 4 种单分散、双峰聚苯乙烯标准颗粒悬浮液的实验结果表明,单分散颗粒粒径分布结果趋近于真实的颗粒粒径分布,双峰分布颗粒体系粒径分布反演结果与真实分布较为吻合,表明该多通道 DLS 自相关器能有效提升 MDLS 测量的可靠性与准确性,为复杂颗粒体系粒径分析提供可靠的硬件支持。

关键词: 多角度动态光散射;多通道自相关器;粒径分析;现场可编程门阵列;时间同步

中图分类号: TP23

文献标志码: A

文章编号: 1674-2605(2026)02-0002-09

DOI: 10.12475/aie.20260202

开放获取

Multi-channel Dynamic Light Scattering Autocorrelator Based on FPGA and NAND FLASH

ZHUANG Han¹ CHEN Jian³ QIU Jian¹ LUO Kaiqing¹ PENG Li²

XU Bingquan¹ LIU Dongmei¹ HAN Peng¹ CHEN Miao¹

(1.School of Electronic Science and Engineering (School of Microelectronics), South China Normal University/
Guangdong Provincial Engineering Research Center for Optoelectronic Instrument, Foshan 528225, China

2.School of Physics, South China Normal University, Guangzhou 510006, China

3.Department of Experimental Teaching, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: To improve the data reliability and measurement accuracy of multi-angle dynamic light scattering (MDLS), a multi-channel DLS autocorrelator based on field-programmable gate array (FPGA) and non-volatile memory (NAND FLASH) is developed. The proposed multi-channel DLS autocorrelator utilizes the FPGA to achieve a multi-channel parallel synchronous acquisition mechanism and autocorrelation calculation. A dual-level collaborative storage architecture and a four-stage data transmission architecture consisting of “acquisition-caching-storage-readback” are constructed using RAM data caching units and a NAND FLASH storage module. Experimental results obtained with four types of monodisperse and bimodal polystyrene standard particle suspensions show that the measured particle size distribution for monodisperse particles approaches the true distribution, and the inversion results for bimodal particle systems are in good agreement with the true distributions. These findings demonstrate that the developed multi-channel DLS autocorrelator can effectively enhance the reliability and accuracy of MDLS measurements, providing reliable hardware support for particle size analysis of complex particle systems.

* 基金项目: 国家自然科学基金(62205110,62375089); 广东省自然科学基金联合项目(2022A1515140139); 广东省自然科学基金面上项目(2023A1515011452)。

Keywords: multi-angle dynamic light scattering (MDLS); multi-channel autocorrelator; particle size analysis; field-programmable gate array(FPGA); time synchronization

0 引言

动态光散射 (dynamic light scattering, DLS) 通过分析悬浮液中颗粒布朗运动引起的散射光强变化来测量或计算颗粒粒径^[1-2]。该方法具有非接触性、测量速度快、操作简单、粒度分析准确等特点, 广泛应用于纳米颗粒粒度分析等领域^[3-6]。然而, 对于宽分布或多分散颗粒体系, DLS 测量结果存在准确性下降、重复性差等问题。多角度 DLS (MDLS)^[7]通过测量多个角度的 DLS, 可获得更多的颗粒散射光强信息, 从而提高复杂、多分散颗粒体系粒度分布的测量准确性。

目前, 多数 DLS 装置仅配备了单角度光子自相关器, 而 MDLS 装置受限于自相关器性能, 需采用数台相关器并行工作或通过旋转探测器^[8]实现分时多角度数据采集。文献[9]通过分时模拟实验, 分别在 1、3、6、9 个散射角条件下测量双峰分布颗粒体系, 证明了随着散射角数量增加, 测量结果更趋近于真实值。文献[10]发现仅当各散射角接收的散射光强存在显著差异时, 增加散射角数量才能有效提高测量准确性。相较于并行数据采集, 分时数据采集的效率更低, 导致多角度数据无法反映同一时刻的颗粒体系状态, 影响数据可靠性与测量准确性。而采用数台相关器并行工作, 会增加成本且难以充分利用相关器资源。文献[11]基于现场可编程门阵列 (field-programmable gate array, FPGA) 开发了多通道 DLS 自相关器, 利用一台自相关器实现并行计算, 但受限于硬件资源, 仅支持采集 4 路光子脉冲信号。文献[12]设计了具有 7 个散射角的多通道光子自相关器, 虽实现了多通道的数据采集与自相关计算, 降低了系统成本, 但不同通道间的散射光强仍存在时间延迟, 影响了数据的同步性与可靠性; 同时, 硬件性能限制了数据传输的实时性与处理效率, 进而影响 MDLS 的测量准确性。因此, 当前 MDLS 技术发展需在角度数量、数据采集方式、硬件性能之间寻求平衡, 以实现高准确性、高可靠性

的颗粒表征。

本文设计基于 FPGA 与 NAND FLASH 的多通道 DLS 自相关器 (以下简称多通道 DLS 自相关器)。该多通道 DLS 自相关器采用全局同步控制器, 并集成 NAND FLASH 存储模块, 实现 7 个散射角的时间同步采集、实时数据缓存和回读上传功能, 提升了 MDLS 装置的检测性能。同时, 引入非负最小二乘约束的加权贝叶斯反演算法^[13-14], 处理多角度采集的复杂散射光强信号, 增强对复杂颗粒体系粒径分布的识别能力和反演精度。

1 多通道 DLS 自相关器

1.1 自相关器基本结构

DLS 通常采用光子相关光谱法测量颗粒粒径^[15]。该方法通过对散射光强信号时间相关性的定量分析, 计算散射光强的自相关函数, 获取颗粒布朗运动特征, 从而反演得到颗粒粒径信息。其中, 自相关器用于计算散射光强的自相关函数 $G^{(2)}(\tau)$:

$$G^{(2)}(\tau) = \langle I(t)I(t+\tau) \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T I(t)I(t+\tau)dt \quad (1)$$

式中: $I(t)$ 、 $I(t+\tau)$ 分别为 t 、 $(t+\tau)$ 时刻的散射光强, τ 为延迟时间, T 为 DLS 实验时间。

目前, DLS 装置主要采用线性自相关器和多通道延迟时间自相关器两类架构。其中, 线性自相关器采用均匀延迟时间 (即相邻延迟时间差为固定值) 采样, 若要覆盖宽动态范围则需大量的硬件通道, 导致资源利用率降低。然而, 不同粒径颗粒的散射光强自相关函数衰减时间差异可达数个数量级, 传统的线性自相关器架构难以在保持高时间分辨率的同时, 实现宽动态范围测量。因此, 扩展 DLS 颗粒粒径测量范围的关键在于构建一种能够匹配信号衰减特性的非均匀采样架构, 即多通道延迟时间自相关器。其通过集成多个具有不同延迟时间的线性自相关器模块, 改善传统线性自相关器动态范围窄、硬件资源消耗大的问题。

本文设计的多通道 DLS 自相关器采用五级级联架构, 包含 1 个并行结构线性自相关器(最小延迟时间可达系统时钟周期精度, 即 $1\mu\text{s}$) 和 4 个串行结构线性自相关器^[6]。各级联的线性自相关器的通道数分别为 32、64、128、256、512, 共计 992 个独立采样通道, 其延迟时间遵循几何级数扩展规律。当最小延迟时间在 $1\sim 100\mu\text{s}$ 范围内调整时, 各级联的线性自相关器延迟时间按固定比例逐级递增, 以实现延迟时间与通道资源的有效匹配。该设计通过动态调整最小延迟时间基准, 可精确适配不同衰减特性的散射光强信

号; 在快速衰减段(小颗粒)启用高时间分辨率通道; 在慢速衰减段(大颗粒)激活宽延迟范围通道, 实现从 $10\text{nm}\sim 10\mu\text{m}$ 颗粒粒径的跨尺度准确测量, 同时优化了硬件资源的分配效率。

1.2 多通道 DLS 自相关器设计

多通道 DLS 自相关器主要包括全局同步控制器、7 个通道的光子计数模块、并行的自相关计算模块、RAM 数据缓存单元、NAND FLASH 存储模块及数据通信模块等, 整体架构如图 1 所示。

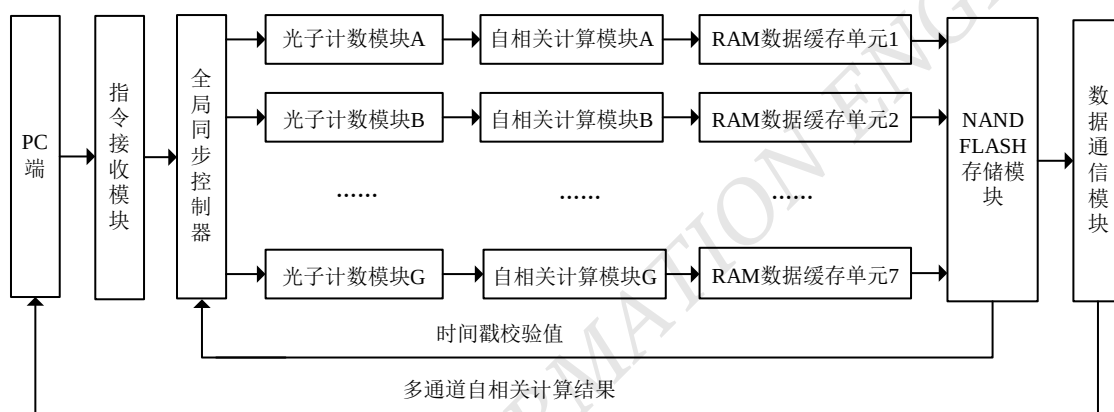


图 1 多通道 DLS 自相关器整体架构图

在多通道 DLS 自相关器的硬件实现上, 采用 Altera Cyclone IV 系列 FPGA(型号: EP4CE22E22C8) 作为主控芯片, 并基于自主设计的专用电路板构建开发平台, 实现整体架构设计的搭载, 开发工具选用 Quartus II 集成开发套件。多通道 DLS 自相关器的各模块采用并行独立架构设计, 以实现高效协同处理。其工作流程如下:

- 1) PC 端发送启动指令后, 指令接收模块完成指令解析, 并转发至全局同步控制器;
- 2) 全局同步控制器随机向 7 个通道的光子计数模块输出同步启动信号, 确保所有采集通道在同一时刻开始采集光子脉冲信号;
- 3) 各通道将采集的光子脉冲信号输入对应的自相关计算模块, 以完成初步信号处理和自相关计算;
- 4) 各通道的自相关计算结果暂存于 RAM 数据缓存单元, 当 7 个通道的数据均完成计算并全部写入

RAM 数据缓存单元后, NAND FLASH 存储模块将时间戳校验值发送至全局同步控制器触发同步确认流程, 以保障多通道数据的时间一致性;

- 5) 全局同步控制器比对校验各通道的时间戳, 确认数据采集时间同步后, 将 RAM 数据缓存单元中的缓存数据批量存入 NAND FLASH 存储模块, 以实现数据长期存储与后续调用;

- 6) 数据通信模块将光子脉冲信号和多通道自相关计算结果传输至 PC 端, 进行深度分析。

1.2.1 多通道并行同步采集机制

多通道采集数据的时间一致性是实现粒径分布高精度反演的关键前提。本文采用多通道并行同步采集机制, 即全局同步控制器实现采集数据的时序统一调度与精确控制, 以及 7 个通道的同步启停控制, 有效保障所有通道信号采集与处理的同步性, 避免数据融合过程中因时间偏差而引入误差。

全局同步控制器以锁相环技术构建的 100 MHz 高精度时钟发生模块为系统主时钟源，各功能模块时钟输入均由此统一提供。全局同步控制器通过通信接口接收来自 PC 端的启动指令后进行如下操作：

1) 执行多级初始化序列，依次完成 7 个通道光子计数模块与自相关计算模块的复位配置、寄存器清零及工作状态机归位等操作，并进行就绪状态校验；

2) 生成同步启动信号，驱动 7 个通道光子计数模块同步启动数据采集；

3) 仅当所有光子计数模块均正确接收同步启动信号并进入就绪状态时，才启动计数流程；若某一通道未准备就绪，则自动发送终止信号，强制中断当前任务并对相关模块进行重置，随后尝试重新启动。

为验证多通道并行同步采集机制的有效性与稳定性，引入高精度时间戳机制，实时记录各功能模块运行状态与数据采集时刻的精确时间信息。在光子计数模块与自相关计算模块内部嵌入 32 位时钟计数器，在数据采集启动时，同步捕获系统时钟的当前计数值。时间戳基于 100 MHz 系统主时钟源生成，时间分辨率达 1 μ s，满足多通道并行同步采集机制对时间一致性的精度要求。

经测算，在连续计数模式下，32 位时钟计数器约 42 s 会发生溢出。由于单轮 7 个通道数据采集耗时小于 1 s，该计数器设计可有效确保采集过程时间戳校验结果的准确性。

通过 PC 端及串口调试助手获取的多通道 DLS 自相关器时间戳校验结果如图 2 所示。

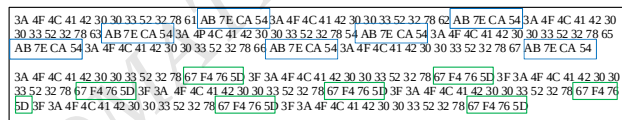


图 2 多通道 DLS 自相关器时间戳校验结果示意图

图 2 中，第一段表示首次数据采集时 7 个通道的 32 位时间戳为“AB 7E CA 54”；第二段对应第二次数据采集时 7 个通道的 32 位时间戳为“67 F4 76 5D”。

1.2.2 数据缓存与存储架构

本文基于多通道 DLS 自相关器的数据特征，构

建易失性缓存（RAM 数据缓存单元）与非易失性存储（NAND FLASH 存储模块）^[17]双级协同存储架构。该架构通过 RAM 数据缓存单元实现高速数据缓存；NAND FLASH 存储模块完成可靠、持久化存储，增强了多通道 DLS 自相关器的实用性与可扩展性。多通道 DLS 自相关器的工作状态机转移图如图 3 所示。



图 3 多通道 DLS 自相关器工作状态机转移图

1) 工作状态机初始处于空闲状态，当光子计数模块完成单次数据采集并发出信号时，工作状态机跳转至清零状态，自动清除前次计算残留数据；

2) 工作状态机进入自相关器运算状态，完成 7 个通道自相关函数的并行计算；

3) 工作状态机切换至写入状态，将计算结果依次写入对应的 RAM 数据缓存单元，实现多角度、多延迟数据的有序缓存；通过状态间严格的时序约束与数据流控制，确保数据传输的全局一致性与完整性。

为实现多次采集数据的连续存储与防覆盖，本文采用 NAND FLASH 存储模块作为非易失性存储单元，并设计支持分块续写的存储器控制器架构^[18-19]。存储器控制器由 RAM 数据传输模块与 NAND 接口控制模块构成。其中，RAM 数据传输模块承担 7 个散射角 RAM1~ RAM7 数据的顺序传输与分块续写任务，并将存储空间划分为地址管理器与数据存储器；NAND 接口控制模块负责 NAND FLASH 的初始化与基础读写操作。存储器控制器架构示意图如图 4 所示。

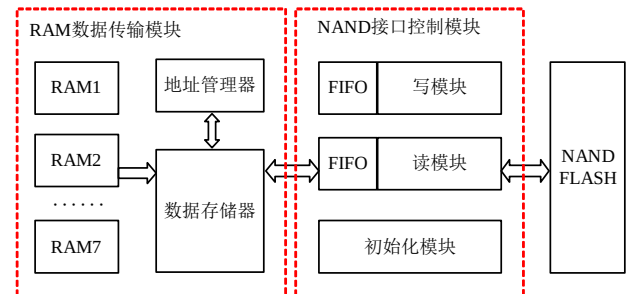


图 4 存储器控制器架构示意图

NAND FLASH 存储模块上电时自动读取最新起始地址，有效避免数据重复写入。针对不同延迟通道的数据量差异，每个散射角分配 8 个数据块（共 56 块，约 28 kB）。其中，RAMA~RAME 分别用于存储 128、256、512、1 024 和 2 048 B 数据。多通道 DLS 自相关器为每个通道设计了结构化存储格式，如图 5 所示。

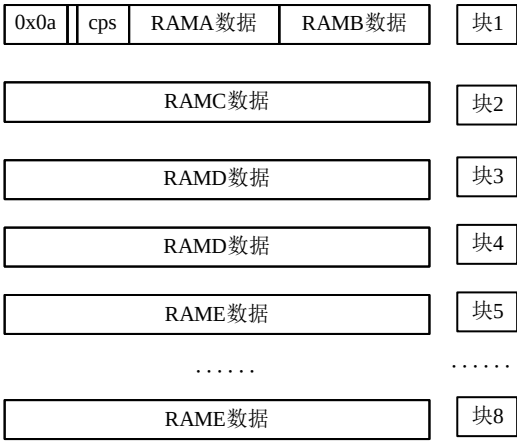


图 5 多通道 DLS 自相关器单通道数据结构化存储格式

图 5 中，块 1 存储时间戳、散射光强与短延迟自相关数据（RAMA、RAMB）；块 2 存储 RAMC 数据；块 3、4 存储 RAMD 数据；块 5~8 存储 RAME 数据。该设计通过分块存储与地址映射机制，实现了数据的高效组织与可追溯存储，在保障数据完整性的同时，提升了多通道 DLS 自相关器的可靠性与数据管理效率。

1.2.3 四阶段数据传输架构

多通道 DLS 自相关器构建了“采集-缓存-存储-回读”四阶段数据传输架构，即多角度自相关计算结果先暂存于高速 RAM 数据缓存单元，随后批量写入 NAND FLASH 存储模块完成长期存储；待单轮 7 个散射角测量周期结束后，PC 端通过专用指令读取 NAND FLASH 存储模块中的历史数据，完成终端回读。该设计利用非易失性存储特性，有效避免因断电或多通道 DLS 自相关器工作异常导致的数据丢失风险，为数据重现、算法改进与故障诊断提供了完整、可靠的数据基础。此外，多通道 DLS 自相关器搭载的

NAND FLASH 存储模块采用地址管理分块续写策略，系统可自动记录末次写入的块地址，实现多批次采集数据的无缝连续存储与全程可追溯。结合工业级串口协议（921 600 b/s 波特率）的简洁结构与广泛兼容性，单次 28 kB 数据量可在 0.3 s 内上传，传输速率较传统方案提升 3 倍以上，提高了系统响应速度与数据流转效率。

2 实验及分析

2.1 实验准备

本实验采用标称值分别为 (70.5 ± 3.6) nm、 (115.4 ± 5.0) nm、 (401.2 ± 9.0) nm、 (635.0 ± 14.0) nm 的 4 种不同粒径的单分散聚苯乙烯标准颗粒悬浮液（北京海岸鸿蒙标准物质有限责任公司生产，以下简称标准颗粒悬浮液）进行测试。为减小多重散射对实验结果的影响，所有样品均使用去离子水稀释。实验装置采用本课题组自主研制的 MDLS 实验系统。该实验系统主要由激光器、圆柱型样品池、光学系统、接收器、多通道 DLS 自相关器和数据传输模块等部分构成，如图 6 所示。

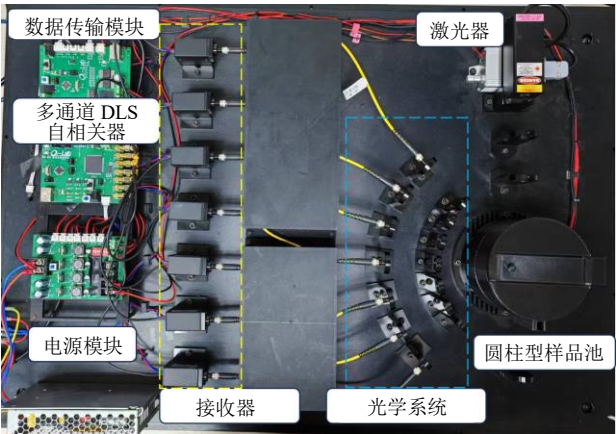


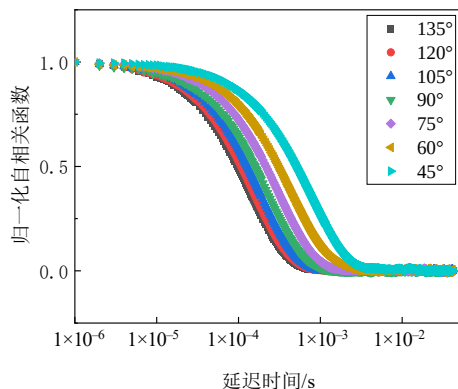
图 6 MDLS 实验系统

MDLS 实验系统采用波长为 632.8 nm 的激光光源，具有良好的相干性与稳定性。圆柱型样品池配备温控装置，控温范围为 10~50 ℃，精度为 ± 0.1 ℃。光学系统和接收器通过单模光纤和光电倍增管阵列实现 135°、120°、105°、90°、75°、60°、45°共 7 个散射

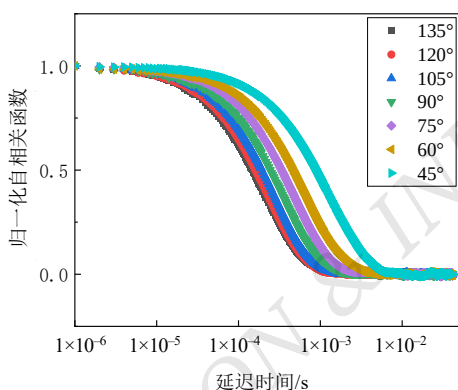
角的同步采集。

2.2 单分散颗粒体系粒径测量

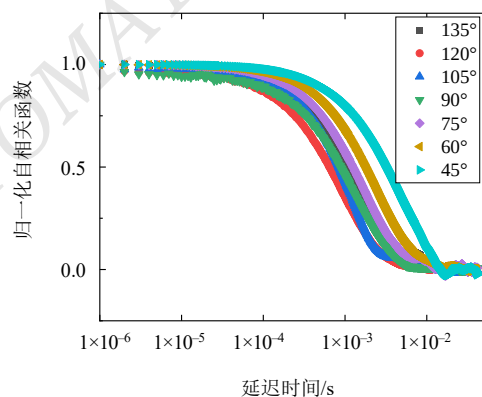
为验证多通道 DLS 自相关器的性能,通过 MDLS 实验系统,测量上述 4 种标准颗粒悬浮液在 7 个散射角 (135°、120°、105°、90°、75°、60°、45°) 的归一化自相关函数随延迟时间 τ 的变化趋势,即 MDLS 自相关函数曲线如图 7 所示。



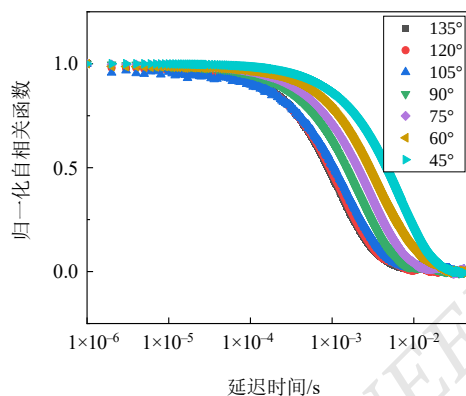
(a) 70.5 nm 颗粒悬浮液



(b) 115.4 nm 颗粒悬浮液



(c) 401.2 nm 颗粒悬浮液

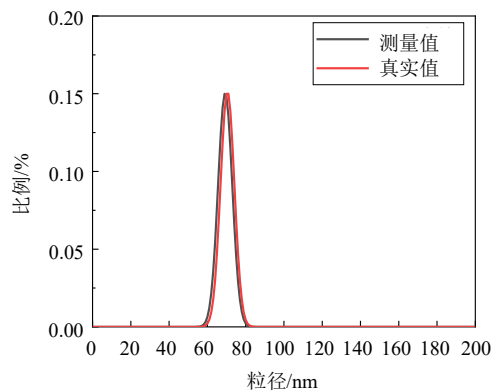


(d) 635.0 nm 颗粒悬浮液

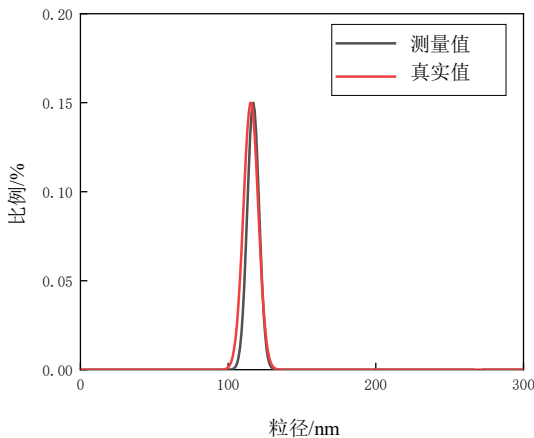
图 7 4 种标准颗粒悬浮液的 MDLS 自相关函数曲线图

由图 7 可知: MDLS 自相关函数曲线均随延迟时间 τ 的增大而衰减,最终趋于平缓并在基线附近波动,反映出散射光强波动从完全相关到完全不相关的动态演变过程;当颗粒粒径从 70.5 nm 增大至 635.0 nm 时, MDLS 自相关曲线的衰减速度显著减缓,表明颗粒的扩散系数减小,布朗运动速度变慢;同一粒径颗粒悬浮液在不同散射角下的 MDLS 自相关曲线虽存在细微差异,但整体衰减趋势基本一致,未表现出明显的散射角依赖性。

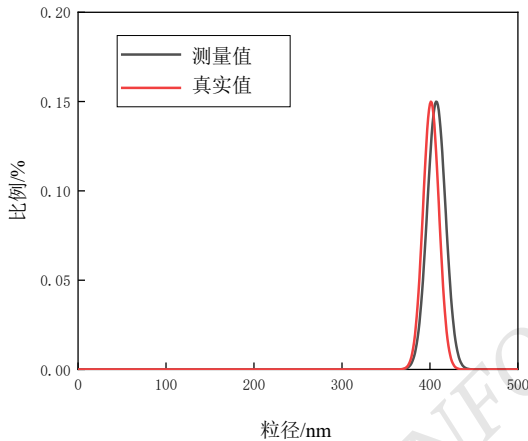
采用非负最小二乘法^[13,21]解析的颗粒粒径分布信息作为测量值,根据颗粒粒径标称值拟合的高斯曲线作为真实值,4 种标准颗粒悬浮液 MDLS 粒径分布图如图 8 所示。利用累积量法^[20]计算真实颗粒粒径, MDLS 实验系统对 4 种标准颗粒悬浮液粒径进行测量,结果如表 1 所示。



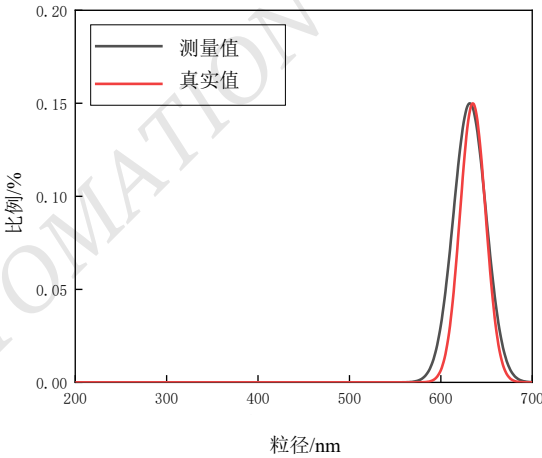
(a) 70.5 nm 颗粒悬浮液



(b) 115.4 nm 颗粒悬浮液



(c) 401.2 nm 颗粒悬浮液



(d) 635.0 nm 颗粒悬浮液

图 8 4 种标准颗粒悬浮液 MDLS 粒径分布图

表 1 4 种标准颗粒悬浮液粒径测量结果

标称值/nm	散射角度/(°)	测量值/nm
70.5±3.6	45	69.3±3.7
	60	68.6±3.3
	75	72.3±3.2
	90	72.6±2.5
	105	74.3±2.7
	120	74.5±3.7
	135	75.2±3.5
115.4±5.0	45	117.3±3.7
	60	118.2±3.0
	75	117.0±4.0
	90	118.3±3.3
	105	119.3±3.6
	120	119.7±3.7
	135	120.3±3.0
401.2±9.0	45	417.4±12.5
	60	407.3±10.3
	75	420.4±12.0
	90	414.7±11.6
	105	408.9±11.0
	120	421.2±13.5
	135	430.3±23.3
635.0±14.0	45	685.1±15.6
	60	631.7±17.8
	75	622.4±18.5
	90	658.5±19.5
	105	669.0±21.3
	120	681.3±19.8
	135	659.4±22.5

由图 8、表 1 可知：MDLS 实验系统测得的颗粒粒径略大于颗粒粒径标称值，原因为 MDLS 实验系统的测量结果是颗粒流体动力学直径，略大于颗粒真实粒径，且颗粒粒径随散射角变化的趋势与日本计量院^[22]及中国计量科学研究院^[23]的结论基本一致；颗粒粒径分布结果趋近于真实的颗粒粒径分布，表明该多通道 DLS 自相关器支持单分散颗粒体系粒径的准确测量。

2.3 多分散颗粒体系粒径测量

为验证本文设计的多通道 DLS 自相关器在复杂

颗粒体系中的适用性与测量准确性,选取由标准颗粒悬浮液配制的双峰分布颗粒体系作为实验对象。由 (115.4 ± 5.0) 、 (401.2 ± 9.0) nm 标准颗粒悬浮液按散射光强贡献比 0.5 : 0.5 配置样品,并采用加权贝叶斯反演算法进行粒径分布反演^[24-25],反演结果如图 9、表 2 所示。

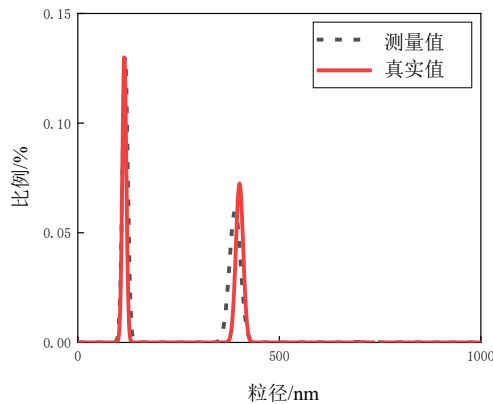


图 9 双峰分布颗粒体系粒径分布反演结果

表 2 双峰分布颗粒体系粒径反演结果

序号	粒径 1/ nm	标准差/ nm	粒径 2/ nm	标准差/ nm	强度比值/ %
1	117.3	6.6	390.1	13.8	50.8 : 49.2
2	119.2	6.7	390.3	12.7	50.3 : 49.7
3	118.5	6.6	392.8	12.8	50.9 : 49.1
4	120.5	6.3	392.5	14.3	51.2 : 48.8
5	121.0	7.3	395.7	14.5	50.8 : 49.2
均值	119.3	6.7	392.3	13.6	

由图 9、表 2 可知,多通道 DLS 自相关器可准确识别出 2 个主峰,双峰分布颗粒体系粒径分布反演结果与真实分布较为吻合,验证了该多通道 DLS 自相关器的双峰识别精度,为复杂颗粒体系的 DLS 表征提供了关键技术支撑。

3 结论

本文研制了一款基于 FPGA 与 NAND FLASH 的多通道 DLS 自相关器。针对多通道信号采集的同步性难题,设计了多通道并行采集机制,有效消除了数据融合过程中的时间偏差误差;结合 RAM 数据缓存

单元和 NAND FLASH 存储模块构建了双级协同存储架构,通过 RAM 数据缓存单元实现高速数据缓存,依托 NAND FLASH 存储模块完成数据可靠持久化存储,提升了多通道 DLS 自相关器的实用性与可扩展性;构建了四阶段数据传输架构,进一步增强了数据的可靠性与鲁棒性,能够满足复杂实验环境对数据管理的高稳定性要求。实验结果表明:该多通道 DLS 自相关器能够同步完成 7 通道光子脉冲信号的并行采集与自相关函数计算,计算结果通过双级协同存储架构存储于 NAND FLASH 存储模块中,并经由四阶段数据传输架构快速上传至 PC 端。在单分散颗粒体系粒径测量中,颗粒粒径测量结果与颗粒粒径标称值基本一致;在双峰多分散颗粒体系测量中,可精确识别 (115.4 ± 5.0) nm 与 (401.2 ± 9.0) nm 构成的双峰分布结构,双峰分布颗粒体系粒径分布反演结果与真实分布较为吻合,为高精度 MDLS 装置的实用化与工程化提供了有效技术支撑与解决方案。后续研究将致力于优化与硬件系统高度适配的反演算法,以进一步提升对多峰分布、高浓度样品等复杂颗粒体系的解析能力与测量效率。

©The author(s) 2024. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

参考文献

- [1] OHNO T, TAGAWA S, ITOH H, et al. Size effect of TiO₂-SiO₂ nano-hybrid particle[J]. Materials Chemistry & Physics, 2009,113(1):119-123.
- [2] CHITHRANI B D, GHAZANI A A, CHAN W C, et al. Determining the size and shape dependence of goldnanoparticle uptake into mammalian cells[J]. Nano Letters, 2006,6(4):662-668.
- [3] 郑书瑞,艾贤军,刘小娟,等.纳米零价铁用于污染场地的修复[J].山东化工,2024,53(21):235-237.
- [4] 肖箫,陈俊宇,李彩霞,等.纳米载体作为药物递送系统的临床应用和药代动力学研究[J].药学报,2023,58(4):856-866.
- [5] 郜儒,王天生,陈玉,等.新型量子点免疫荧光法快速检测鼻腔分泌物 IgE 诊断变应性鼻炎的临床应用研究[J].临床耳鼻咽喉头颈外科杂志,2025,39(6):542-547.

- [6] 叶超,孟睿,葛宝臻.基于光散射的粒子测量方法综述[J].激光与红外,2015,45(4):343-348.
- [7] CLEMENTI L A, VEGA J R, GUGLIOTTA L M, et al. A Bayesian inversion method for estimating the particle size distribution of latexes from multiangle dynamic light scattering measurements[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2011,107(1):165-173.
- [8] 华中科技大学.一种多角度动态光散射粒径分布测量装置及方法:201610194746.X[P].2016-08-24.
- [9] 刘晓艳,申晋,朱新军,等.动态光散射技术的角度依赖性[J].光学学报,2012(6):259-264.
- [10] 王雪敏,申晋,朱新军,等.角度组合对多角度动态光散射测量的影响[J].光子学报,2016,45(8):13-21.
- [11] 方钰琪,黄鹭,孙淼,等.基于 FPGA 的多通道动态光散射自相关器的研制[J].计量学报,2023,44(1):41-48.
- [12] 韩鹏,曾仕峰,邱健,等.一种用于多角度动态光散射仪的多通道光子硬件相关器:116429645A[P].2023-07-14.
- [13] 梁一卓,刘玲,彭力,等.非负最小二乘约束的加权贝叶斯反演算法研究[J].光子学报,2020,49(10): 216-226.
- [14] GUO X, CHEN M, PENG L, et al. Particle size distribution inversion in dynamic light scattering by adaptive step-size non-negative least squares[J]. Optics Communications, 2021,503: 127444.
- [15] CUMMINS P G, STAPLES E J. Particle size distributions determined by a multiangle analysis of photon correlation spectroscopy data[J]. Langmuir, 1987,3(6):1109-1113.
- [16] 徐炳权,黄桂琼,韩鹏,等.智能动态光散射纳米粒度分析仪[J].自动化与信息工程,2021,42(1):1-7.
- [17] 王今雨,安健,王龙翔,等.NAND 闪存可靠性验证实验平台设计与应用[J].实验技术与管理,2024,41(2):186-192.
- [18] 彭卓文,杨新民,王胜红.基于 FPGA 控制的高速大容量 NAND FLASH 存储模块设计[J].电子设计工程,2017,25(7): 111-118.
- [19] 曾锋,徐忠锦.基于 FPGA 的 NAND Flash 的分区续存的功能设计实现[J].电子产品世界,2023,30(8):22-25.
- [20] KOPPEL D E. Analysis of macromolecular polydispersity in intensity correlation spectroscopy: The method of cumulants [J]. Journal of Chemical Physics, 1972, 57(11): 4814-4820.
- [21] BRO R, DE JONG S. A fast non-negativity-constrained least squares algorithm[J]. Journal of Chemometrics: A Journal of the Chemometrics Society, 1997, 11(5): 393-401.
- [22] TAKAHASHI K, KATO H, KINUGASA S. Development of a standard method for nanoparticle sizing by using the angular dependence of dynamic light scattering[J]. Anal Sci, 2001, 27(7):751-756.
- [23] 孙淼,黄鹭,高思田,等.多角度动态光散射法的纳米颗粒精确测量[J].计量学报,2020,41(5):529-537.
- [24] 刘玲,陈淼,邱健,等.多角度动态光散射加权贝叶斯反演算法[J].计算物理,2019,36(6):673-681.
- [25] 黄桂琼,徐炳权,徐雨晴,等.基于动态光散射法的双调节散射光接收系统设计[J].机电工程技术,2024,53(8):244-247.

作者简介:

庄涵,男,2001年生,硕士研究生,主要研究方向:光电技术及基础。E-mail: 2577738061@qq.com

陈检,女,1994年生,博士研究生,讲师,主要研究方向:颗粒测试与表征。E-mail: chen_jian@gdut.edu.cn

邱健,男,1994年生,博士研究生,副教授,主要研究方向:光电技术与系统、X射线计算机断层扫描和光散射技术。

E-mail: qiuji@scnu.edu.cn

骆开庆,男,1994年生,博士研究生,副教授,主要研究方向:同步定位与建图、眼动追踪、光电检测技术及仪器。

E-mail: kqluo@scnu.edu.cn

彭力,男,1994年生,博士研究生,副教授,主要研究方向:光电技术与系统、大气环境监测技术和光散射技术。E-mail:

pengli@m.scnu.edu.cn

徐炳权,男,1994年生,博士研究生,副研究员,主要研究方向:先进的电磁波调制技术、光学计算、微波成像。E-mail: xubq@m.scnu.edu.cn

刘冬梅,女,1994年生,博士研究生,教授,主要研究方向:非线性光学、超分辨率成像和光学显微操作。E-mail: dmliu@scnu.edu.cn

韩鹏,男,1994年生,博士研究生,教授,主要研究方向:光电技术与系统、光散射技术。E-mail: hanp@scnu.edu.cn

陈淼(通信作者),男,1990年生,博士研究生,副研究员,主要研究方向:光电技术与系统、体纳米气泡和光散射技术。E-mail: chenmiao@scnu.edu.cn