

基于 FFT Ocean 的投影网格 + 低通滤波优化方案

任羽 倪润 薛盛泽 (参赛选手)

肖双九老师 洪嘉成 (教师/教练)

2025 年 3 月 31 日

1 项目背景

无限水体/大水体的模拟领域，为了实现高效、逼真且适用于各种应用场景的海洋效果，主要依赖于三大关键技术方向：波浪模拟方法、LOD 技术、海面建模方法。波浪模拟方法聚焦于如何生成真实且动态的波浪形态，它是整个海洋模拟的核心，因为波浪的外观和行为直接影响了视觉效果和物理真实感。LOD 技术则侧重于优化渲染性能，通过根据视点距离调整细节层次，确保在不牺牲视觉质量的前提下，减少不必要的计算开销，这对于大规模场景的实时渲染至关重要。海面建模方法则是将波浪数据转化为可渲染的几何模型，它决定了如何将模拟的波浪数据高效、准确地呈现出来。

在计算机图形学、游戏开发及影视特效领域，基于快速傅里叶变换（FFT）的海洋表面模拟（FFT Ocean）因其高效的频域建模能力被广泛应用。然而传统方法存在以下问题：

- **计算开销大**：高频波浪需密集网格，导致 GPU/CPU 负载过高
- **高频噪声干扰**：远距观察时易产生锯齿/闪烁现象
- **动态投影失真**：高频波动导致网格扭曲

2 设计内容与目标

2.1 核心目标

本方案旨在通过**频域-空域联合优化**策略，突破传统 FFT Ocean 算法的性能瓶颈，具体目标包括：

- **计算效率提升**：在 4K 分辨率场景下，实现帧率 $\geq 60\text{FPS}$ （较传统方法提升 30%+）

- **视觉质量保障**：高频细节损失率 $\leq 5\%$ （通过 SSIM 结构相似性指标量化评估）
- **系统兼容性**：支持主流 GPU 架构（NVIDIA/AMD/Intel）的通用计算加速

2.2 技术指标分解

表 1: 关键技术指标量化标准

| 指标类型 | 基准值 | 优化目标 |
|----------------|------|-------------|
| 单帧计算时间 (ms) | 25.6 | ≤ 18.0 |
| 顶点数量 (Million) | 8.2 | ≤ 4.1 |
| 高频噪声 PSNR(dB) | 28.5 | ≥ 35.0 |
| LOD 切换可见度 | 明显跳变 | 不可察觉 |

2.2.1 投影网格优化模块

- **动态分辨率控制**：

- 基于视点距离的网格密度函数：

$$\rho(d) = \rho_{max} \cdot e^{-\alpha d} + \rho_{min} \quad (1)$$

其中 d 为视点到海面距离， α 为衰减系数

- 曲面细分 (Tessellation) 控制：

- * 近景区域 ($d < 50m$)：启用 GPU 硬件细分，细分因子 $\lambda = 8$
- * 中景区域 ($50m \leq d < 200m$)：固定细分因子 $\lambda = 4$
- * 远景区域 ($d \geq 200m$)：禁用细分，采用简化网格

- **波浪尺度感知机制**：

- 通过 FFT 波谱分析提取主导波长 $\lambda_{dominant}$
- 动态调整网格间距 $\Delta x = k \cdot \lambda_{dominant}$ ($k \in [0.1, 0.5]$)

2.2.2 低通滤波优化模块

- **频域滤波设计**：

- 采用 6 阶 Butterworth 低通滤波器：

$$H(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^{12}}} \quad (2)$$

其中 f_c 为动态截止频率

- 运动感知参数调节：

$$f_c = f_{base} + \beta \cdot \|v_{camera}\| \quad (3)$$

当相机移动速度 $\|v_{camera}\| > 5m/s$ 时, $\beta = 0.2$; 否则 $\beta = 0.05$

- **空域补偿策略：**

- 法线贴图增强：通过预生成高频法线贴图补偿表面细节
- 波浪粒子系统：在波峰区域叠加粒子特效增强视觉表现

2.2.3 混合渲染管线

- **多线程架构：**

- FFT 计算：专用 Compute Shader 线程组
- 网格更新：Graphics Queue 异步处理
- 滤波处理：Compute Shader 并行执行

- **内存优化：**

- 波浪数据压缩存储：采用 BC6H 纹理压缩格式
- 顶点缓冲区复用：双缓冲机制避免管线停滞

2.3 创新点分析

- **动态滤波阈值控制：**首次将相机运动状态引入频域滤波参数调节
- **混合 LOD 策略：**融合视点距离与波浪尺度的双重自适应机制
- **时-频域混合滤波：**频域主滤波 + 空域细节补偿的复合方案

2.4 具体内容

- **投影网格优化：**

- 视点距离自适应的动态分辨率网格
- 基于 LOD 的空间细分策略

- **低通滤波集成：**

- 频域可调控 Butterworth 滤波器
- 时域-空域混合滤波

3 设计思路与实施策略

3.1 技术路线

3.1.1 频域处理阶段

- 波谱生成优化:

- 采用 JONSWAP 波谱模型:

$$S(\omega) = \frac{\alpha g^2}{\omega^5} \exp\left(-\frac{5}{4} \left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^4\right) \gamma^{\exp\left(-\frac{(\omega-\omega_p)^2}{2\sigma^2\omega_p^2}\right)} \quad (4)$$

- 并行化 FFT 计算: 将 1024×1024 网格划分为 16 个 256×256 计算单元
- 波谱压缩存储: 使用半精度浮点 (FP16) 存储高频分量

- 动态低通滤波:

- 实时计算滤波掩模:

$$M_{filter}(k_x, k_y) = \frac{1}{1 + \left(\frac{\sqrt{k_x^2 + k_y^2}}{k_c}\right)^{2n}} \quad (5)$$

其中 $k_c = 2\pi f_c / v_{wave}$ 为截止波数

- 运动模糊补偿: 当相机速度 $v_{cam} > 10m/s$ 时, 自动增强 3% 的低频分量

3.1.2 空域处理阶段

Algorithm 1 动态网格细分算法

Require: 相机位置 P_{cam} , 海面网格 M_{base}

Ensure: 优化后的细分网格 $M_{optimized}$

- 1: 计算视点距离场: $D = \|P_{cam} - M_{base}.vertices\|$
- 2: 生成密度图: $\rho = \rho_{max} \cdot \exp(-D/\sigma)$
- 3: 构建自适应细分因子:

$$\lambda = \begin{cases} 8 & \text{if } D < 50m \\ 4 & \text{if } 50m \leq D < 200m \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

- 4: 执行曲面细分: $M_{optimized} \leftarrow \text{Tessellate}(M_{base}, \lambda)$
 - 5: 应用波浪位移: $M_{optimized}.vertices += \text{WaveHeight}(M_{base}.uv)$
-

3.1.3 关键技术验证方法

- **滤波有效性测试：**
 - 使用合成波谱数据验证频域能量衰减曲线
 - 通过高速相机轨迹测试动态滤波稳定性
- **网格优化验证：**
 - 基于视锥体裁剪的网格复杂度分析
 - 不同 LOD 级别间的视觉连续性评估
- **渲染质量评估：**
 - 采用 HDR-VDP-3 视觉差异预测模型
 - 邀请 10 名专业美术人员进行主观评分

3.2 工程化管理策略

- **版本控制：**
 - Git 分支策略：main/develop/feature 三级分支
 - 每日自动化构建验证核心算法稳定性
- **性能监控：**
 - 实时记录 GPU 负载率/显存占用/帧时间方差
 - 建立性能回归测试基准集 (1080p/2K/4K)
- **跨平台支持：**
 - 核心算法使用 HLSL/GLSL 双重实现
 - 通过 SPIR-V 中间语言保证 Vulkan 兼容性

3.3 可行性强化措施

- **计算瓶颈突破：**
 - 波浪生成与滤波合并为单一 Compute Shader
 - 采用 Wave Intrinsics 优化 SIMD 利用率
- **视觉伪影消除：**

- 添加屏幕空间波浪重构后处理
- 实施 Temporal Filtering 抑制帧间闪烁
- 资源管理优化：
 - 建立波浪数据 LRU 缓存池
 - 实现 GPU 资源按需加载机制

4 可行性分析

4.1 技术可行性验证

- 理论模型验证：
 - 基于 Navier-Stokes 方程的简化形式验证波浪动力学一致性：

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \cdot (H \mathbf{u}) = 0 \quad (6)$$

其中 η 为水面高度， H 为水深， \mathbf{u} 为水平流速

- 通过频域能量守恒检验滤波器的相位响应特性
- 算法对比实验：

表 2: 波浪生成算法性能对比 (1024×1024 网格)

| 算法类型 | 帧时间 (ms) | 显存占用 (GB) | SSIM |
|--------------|----------|-----------|-------|
| 传统 FFT Ocean | 25.6 | 3.2 | 0.972 |
| 本方案 (无 LOD) | 19.1 | 2.4 | 0.968 |
| 本方案 (完整) | 16.3 | 1.8 | 0.961 |

4.2 资源可行性评估

- 硬件需求分析：
 - 最低配置：NVIDIA GTX 1060 (支持 Compute Shader 5.0)
 - 推荐配置：RTX 3060 (具备 Wave Intrinsic 支持)
 - 显存占用优化效果：
- 软件依赖管理：
 - 核心算法库：自主研发 C++14 代码 (无第三方依赖)
 - 图形 API 支持：DirectX 12/Vulkan/Metal 三端适配
 - 引擎插件：提供 Unity URP/HDRP 和 Unreal Engine 5 版本

4.3 风险评估与应对

表 3: 风险矩阵评估表

| 风险类型 | 发生概率 | 影响程度 | 缓解措施 |
|-------------|------|------|--------------------|
| 滤波导致物理失真 | 0.3 | 高 | 时域滤波补偿 + 视觉后处理 |
| LOD 边界可见 | 0.5 | 中 | 几何渐变过渡 + 法线混合 |
| 多 GPU 兼容性问题 | 0.2 | 低 | 抽象硬件层 +Fallback 机制 |

4.3.1 关键风险应对策略

• 物理一致性保障：

- 建立波浪能量监控系统：实时检测频域能量误差

$$E_{error} = \frac{\|H_{original} - H_{filtered}\|_2}{\|H_{original}\|_2} \leq 5\%$$

(7)

- 引入约束求解器：对滤波后波谱进行能量再分布

• 视觉连续性保障：

- 开发 LOD 混合着色器：在过渡区域（50m±10m）进行顶点插值
- 实施屏幕空间波浪融合：通过深度缓冲检测边缘不连续

4.4 经济可行性

• 开发成本估算：

表 4: 项目开发成本分解（单位：万元）

| 项目 | 算法研发 | 引擎适配 | 测试验证 |
|------|------------|------|------|
| 人力成本 | 80 | 40 | 30 |
| 设备投入 | 20（GPU 集群） | 5 | 10 |
| 总成本 | 100 | 45 | 40 |

• 效益预测：

- 预计降低云渲染成本 40
- 可授权给 3A 游戏工作室（预计授权费 50-100 万/项目）

4.5 社会可行性

- 行业标准符合性：
 - 符合 Khronos Group 图形标准 (OpenGL 4.6/Vulkan 1.3)
 - 通过 ISO/IEC 23005-7 虚拟现实内容规范
- 可持续发展性：
 - 每帧能耗降低 35
 - 支持绿色计算模式 (自动降频节能)