

# A Novel Image Formation Model for Descattering

汇报人：谭飞

时间：2025.04.20

# 现有模型

- 辐射传输方程 (RTE)

$$\frac{1}{\beta(\lambda)} \cdot \frac{dI_\lambda}{dr} = -I_\lambda + Js_\lambda$$

- 大气散射模型 (ASM)

$$I(x) = J(x)t^c(x) + A^c(1 - t^c(x)),$$

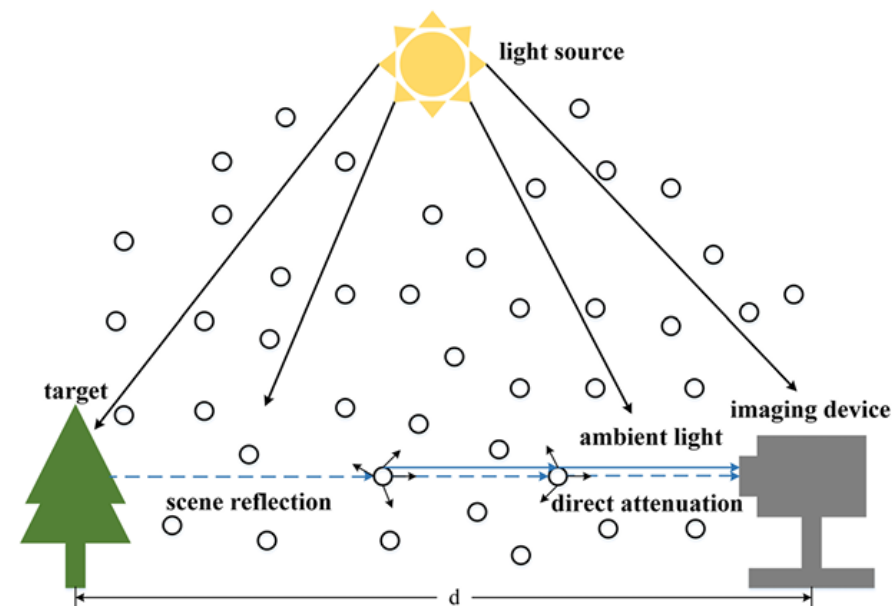
$$t^c(x) = e^{-\beta^c r}, c \in \{R, G, B\}$$

- Jaffe-McGlamery 模型

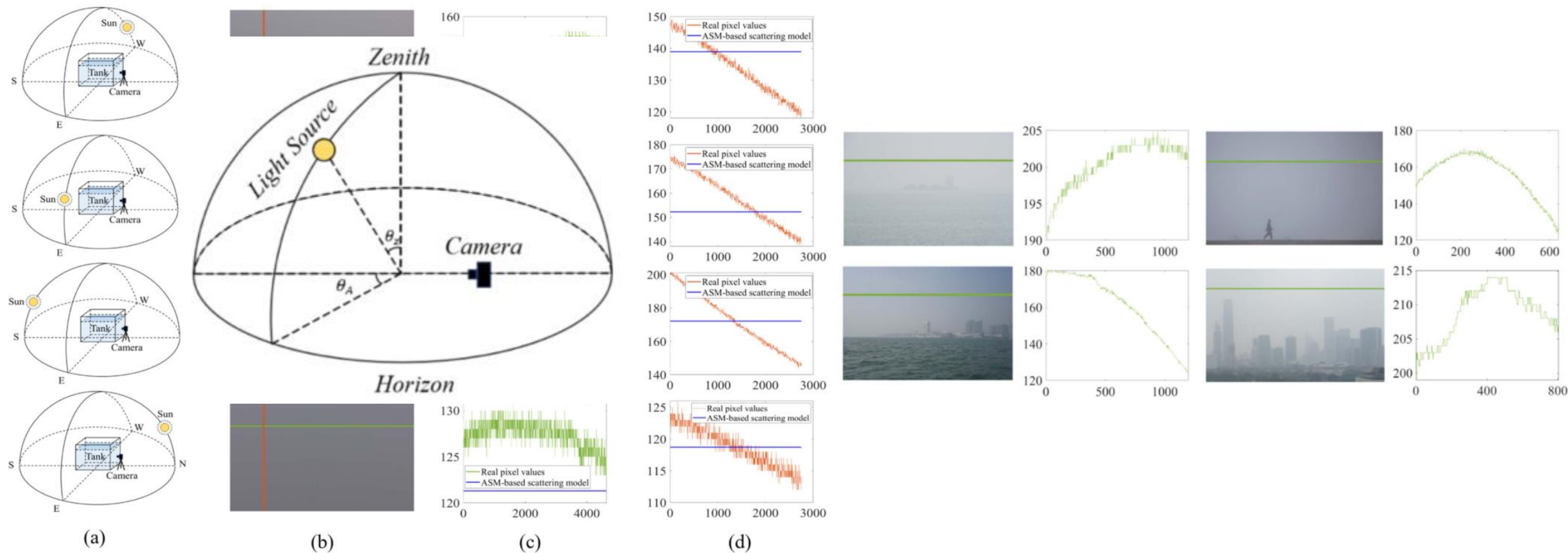
$$I = I_d + I_{fs} + I_b.$$

- Narasimhan模型

$$I^c = I_0^c \left[ e^{-\beta^c(d_s+d_v)} R + \mathcal{P} e^{-\beta^c d_s} (1 - e^{-\beta^c d_v}) \right]$$



# 现有模型存在的问题



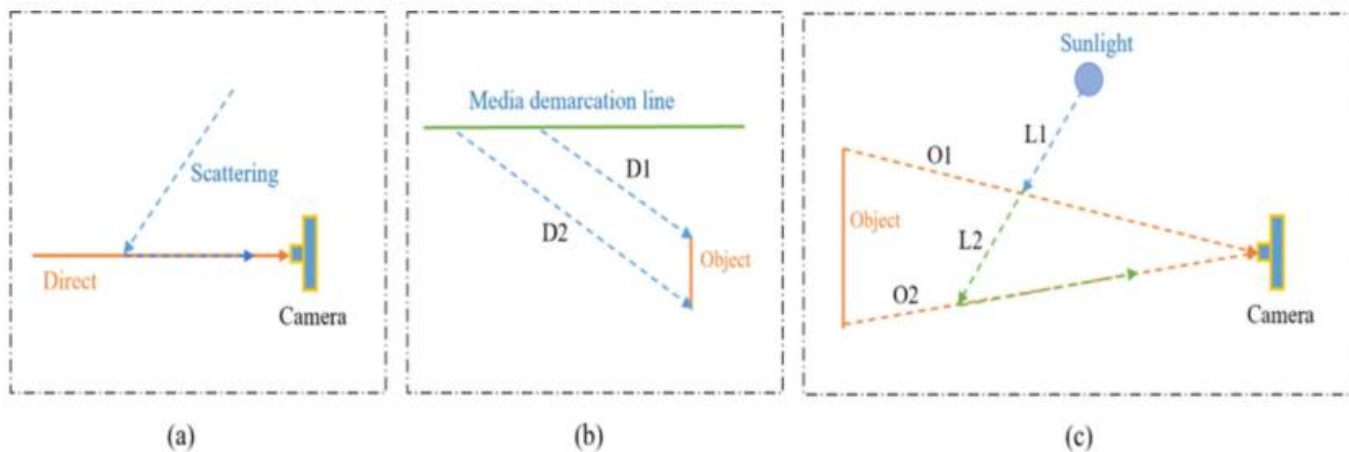
通过水箱实验（含不同光源位置和均匀介质），证明即使深度固定，散射分布仍因光源位置和像素位置变化而呈现非均匀性。

在雾环境中也可以观察到散射的不均匀外观。

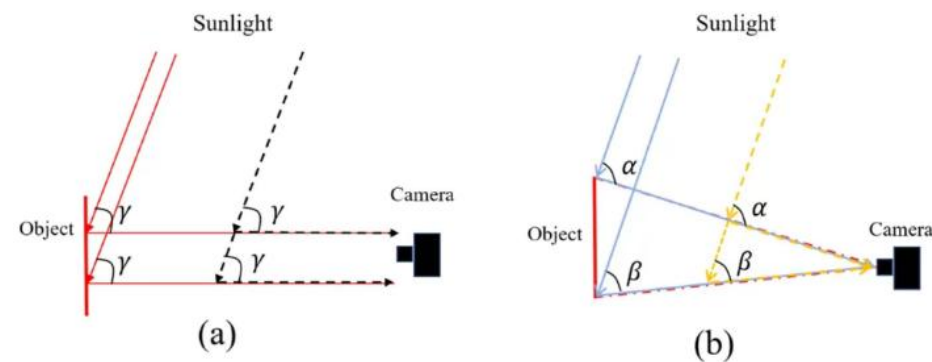
# 本文提出的模型

- 提出的新成像模型

$$I^c(\mathbf{x}) = I_d^c(\mathbf{x}) + I_b^c(\mathbf{x}), \quad c \in \{R, G, B\},$$



光传播导致散射不均匀。



散射的不均匀外观也是由每个像素不同的散射角造成的。

# 直接辐射项推导

- 1. 光路衰减路径

$$I_d^c(\mathbf{x}) = E^c e^{-\beta_D^c \gamma \|\mathbf{D}(\mathbf{x})\|} \rho^c(\mathbf{x}) e^{-\beta_D^c \|\mathbf{x}\|},$$

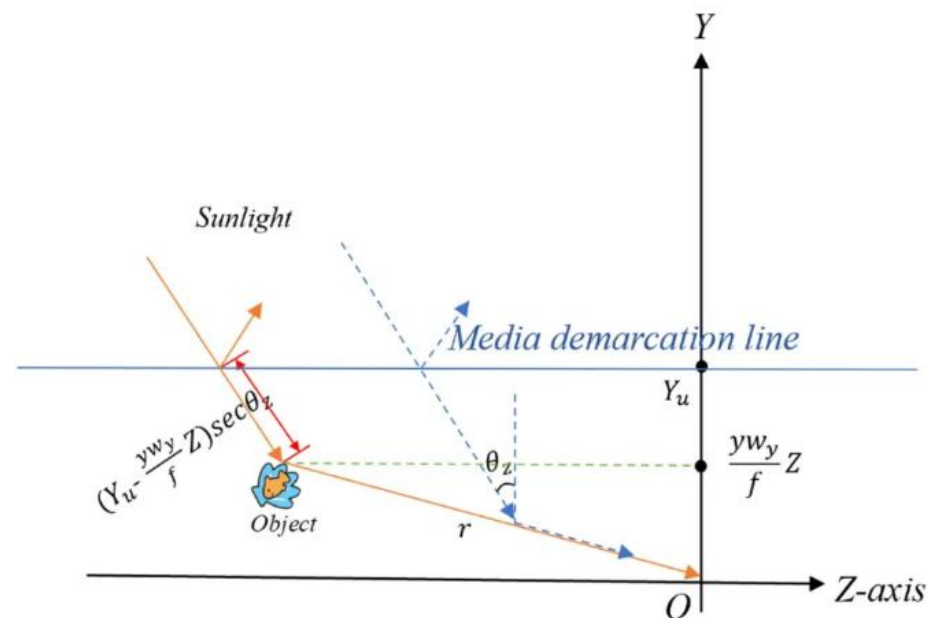
- 2. 几何关系建模

$$\gamma \|\mathbf{D}(\mathbf{x})\| = \left( Y_u - \frac{yw_y}{f} Z \right) \sec(\theta_z).$$

$$\begin{aligned} \|\mathbf{x}\| &= \sqrt{\left( \frac{xw_x}{f} \cdot Z \right)^2 + \left( \frac{yw_y}{f} \cdot Z \right)^2 + Z^2} \\ &= \frac{Z}{f} \sqrt{(xw_x)^2 + (yw_y)^2 + f^2}. \end{aligned}$$

- 3. 最终直接辐射公式

$$I_d^c(\mathbf{x}) = J^c(\mathbf{x}) e^{-\beta_D^c (\gamma \|\mathbf{D}(\mathbf{x})\| + \|\mathbf{x}\|)}$$



# 后向散射项推导

- 1. 光源单位方向向量

$$\mathbf{u} = [\sin(\theta_Z) \sin(\theta_A), \cos(\theta_Z), \sin(\theta_Z) \cos(\theta_A)]$$

- 2. 散射角

$$\begin{aligned}\cos(\psi) &= \frac{\sin(\theta_Z) \sin(\theta_A) X + \cos(\theta_Z) Y - \sin(\theta_Z) \cos(\theta_A) Z}{\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}} \\ &= \frac{\sin(\theta_Z) \sin(\theta_A) xw_x + \cos(\theta_Z) yw_y - \sin(\theta_Z) \cos(\theta_A) f}{\sqrt{(xw_x)^2 + (yw_y)^2 + f^2}}.\end{aligned}$$

- ### 3. 路径变化

$$dr = \sqrt{(dX)^2 + (dY)^2 + (dZ)^2} = \frac{1}{f} \sqrt{(xw_x)^2 + (yw_y)^2 + f^2} \cdot dZ$$

- #### 4.辐射度变化

$$dI_{\mathbb{C}_b}(x, y) = \beta_c^s E_c e^{-\beta_c^B \gamma \|D(X)\|} P(\psi) e^{-\beta_c^B dr}$$

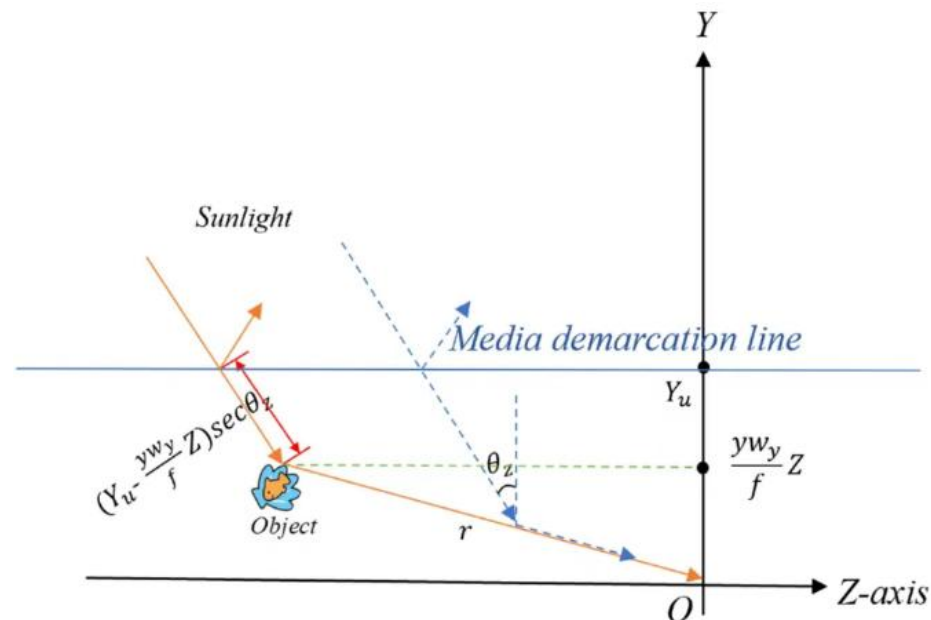
- 5. 反向散射积分

$$I_b^c(x, y) = \int_0^{Z_s} E^c e^{-\beta_B^c \gamma \|\mathbf{D}(\mathbf{X})\|} \beta_s^c P(\psi) e^{-\beta_B^c r} dr,$$

$$I_{c_2}(\psi, y) = \int_0^{Z_s} E_c e^{-\beta_c^B (Y u - \frac{y u y}{f} Z) \sec(\theta_z)} \beta_c^s P(\psi) e^{-\beta_c^B \eta Z} \eta dZ$$

- 6. 反向散射项

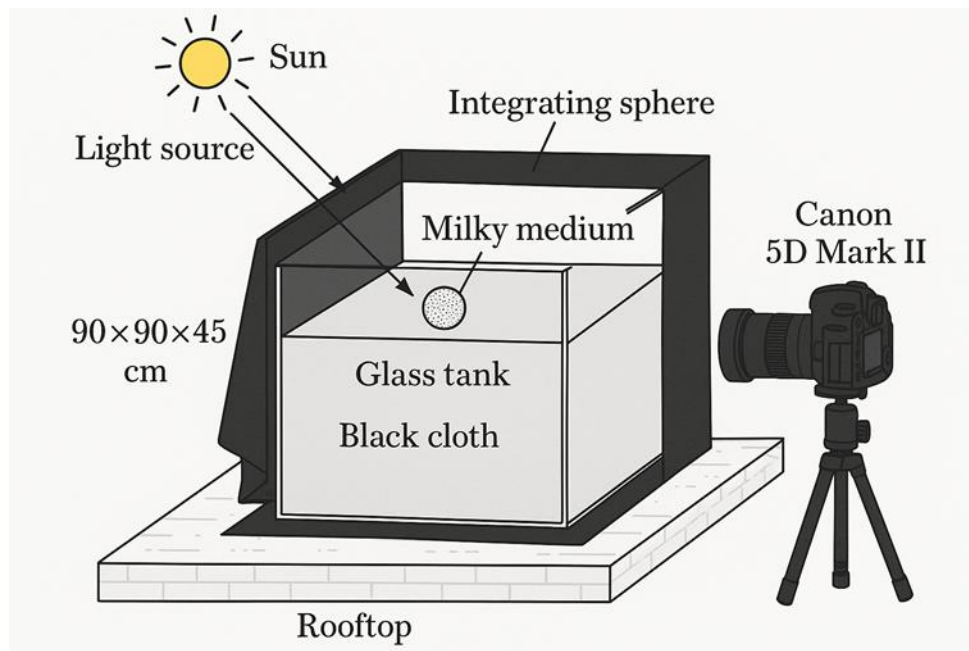
$$I_c(x, y) = E_c e^{-\beta_c^B Y_u \sec(\theta_Z)} \frac{\beta_c^S P(\psi) \eta}{\beta_c^B} \left[ 1 - e^{-\beta_c^B \left( \frac{f\eta - y\omega_y \sec(\theta_Z)}{Z_\delta} \right) Z_\delta} \right]$$



# 与传统模型的对比

特征	传统ASM	新模型
散射分布假设	均匀	非均匀（依赖 $\theta_z$ , $\theta_A$ , 像素坐标）
光路建模	忽略光源到物体的路径	完整路径 + 几何关系
散射角处理	假设为常数	相位函数 + 空间变化 $\psi$
参数数量	4（如 $\beta$ , $z$ , $J$ , $A$ ）	9+（包含光源位置、焦距等）

# 实验验证



- 水缸是用特别设计的光学玻璃构建的，具有高透射率和低反射率特性。
- 遮光布覆盖了水缸的所有内外表面，除了相机镜头所在的一侧，以防止阳光在玻璃表面之间反射造成的干扰。
- 使用指南针对缸的方向进行校准，确保缸的南北方向与地球轴线平行。缸放置在屋顶上，屋顶平面与地面平面之间的夹角为零。
- 禁用了相机的智能功能，如自动填充光、自动对焦和周边光校正。我们使用原始的RAW数据格式而不是JPG进行处理。
- 相机固定在水缸的中心，水平放置，以避免参数计算中的不准确。
- 牛奶和水在缸中均匀搅拌，当水面静止时拍摄照片。
- 使用积分球进行均匀照明，以校准我们的相机，消除由相机镜头引起的暗角效应。每次实验前都进行此校准，以避免引入相机本身的不均匀性。



# 参数估计与优化

- 1.Fournier-Forand (FF)相函数

$$P(\psi) = \frac{1}{4\pi(1-\delta)^2\delta^v} \left[ v(1-\delta) - (1-\delta^v) \right. \\ \left. + [\delta(1-\delta^v) - v(1-\delta)] \sin^{-2} \left( \frac{\psi}{2} \right) \right] \\ + \frac{1-\delta(180)^v}{16\pi(\delta(180)-1)\delta(180)^v} (3\cos^2\psi - 1),$$

- 2.非线性优化

$$\arg \min_{M^c, \beta_B^c, \theta_Z, \theta_A, f, \mu^c, n^c, Z_s, Y_u} \left\{ \sum_i \|I_{bi}^c - \tilde{I}_{bi}^c\| \right\}$$

- 粗到细优化策略

步骤1：遍历参数物理范围（如 $\theta_Z \in [0^\circ, 90^\circ]$ ），以十分之一间隔初筛。

步骤2：固定其他参数，逐参数优化。

步骤3：使用MATLAB的'fit'函数进行最终非线性拟合。

TABLE II  
THE RANGE OF SOME PARAMETERS

Parameters	$M$	$Y_u$	$\beta(mm^{-1})$	$f(mm)$
Range in Water	$[0, (max(L_b^c))/min(f)]$	+	$[10^{-5}, 10^{-2}]$	$[24, 105]$
Range in Haze	$[0, (max(L_b^c))/min(f)]$	+	$[10^{-9}, 10^{-7}]$	$[24, 105]$

TABLE III  
THE RANGE OF SOME PARAMETERS, WHERE  $X_s$  AND  $Y_s$  ARE MAXIMUM  
VALUES OF  $x$  AND  $y$  PIXEL COORDINATES

Parameters	$\theta_A$	$\theta_Z$	$Z_s$	$x$	$y$	$z$
Range	$[0, 360]$	$[0, 90]$	+	$[0, X_s]$	$[0, Y_s]$	$[min(L_b^c), max(L_b^c)]$

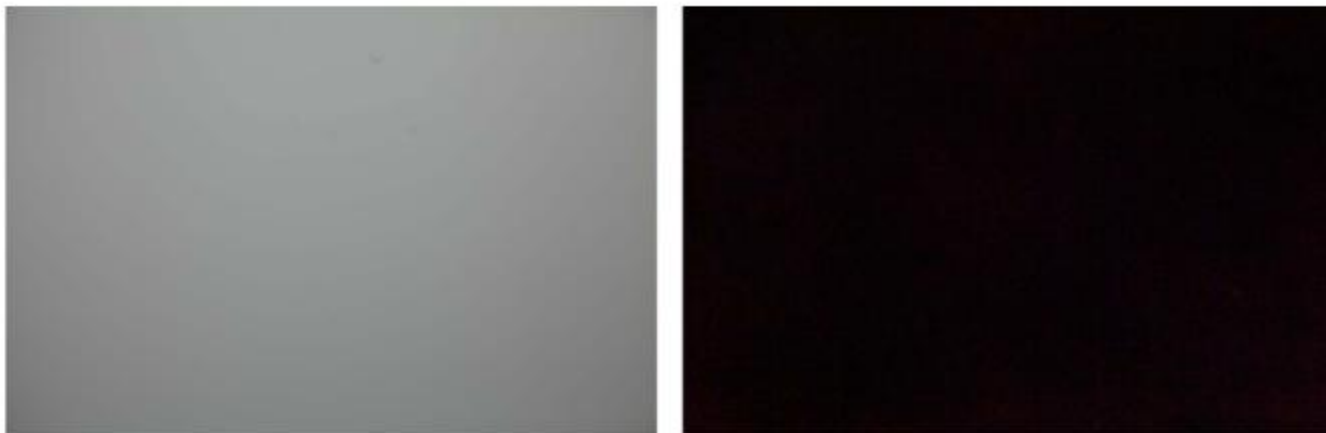


Fig. 8. Pure scattering image and the restored background. Left: Photo of pure scattering. Right: Our restoration result.

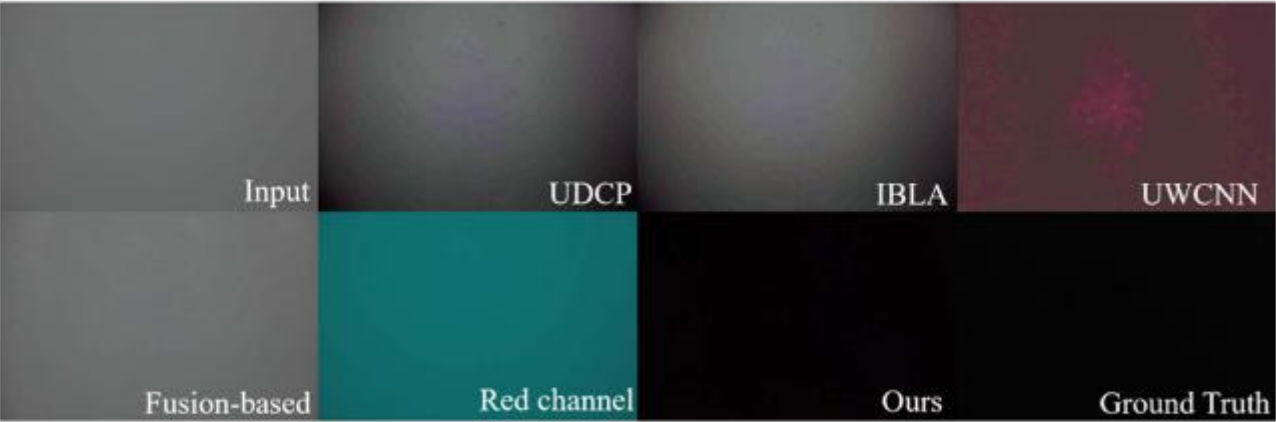
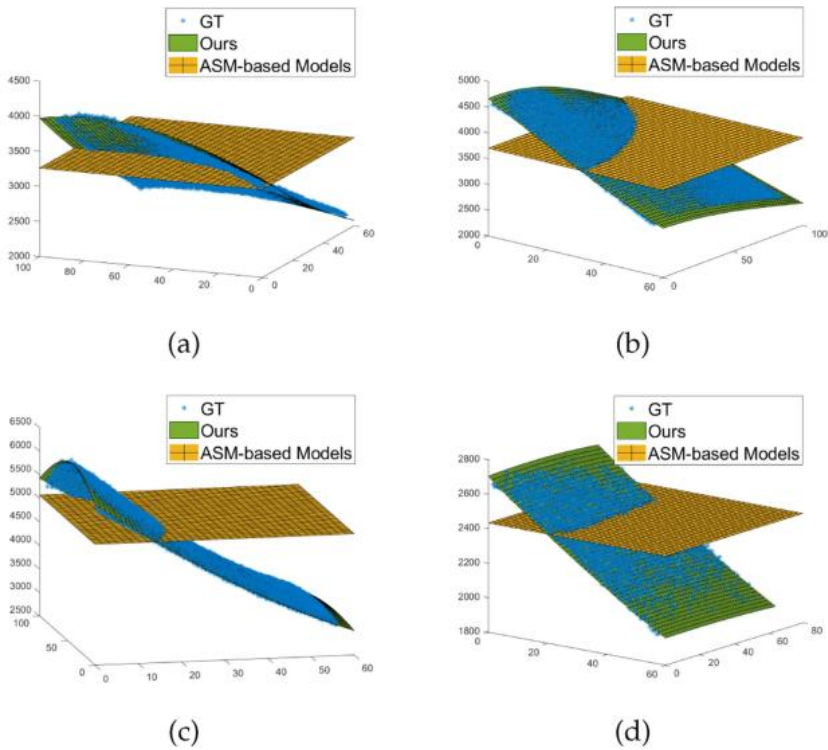


Fig. 10. Visual Comparisons of the restored pure scattering images.

TABLE IV  
THE CALCULATED PARAMETERS OF FIG. 8

Parameters	$f(mm)$	$\theta_A(^{\circ})$	$\theta_Z(^{\circ})$	$Z_s(mm)$	$Y_u(mm)$	$\mu$	$n$
Ground Truth	105	10	31	1000	150	(3,5)	(1.33, 1.47)
Our Calculation	98.68	7.324	30.14	999.99	160.9	4.597	1.356



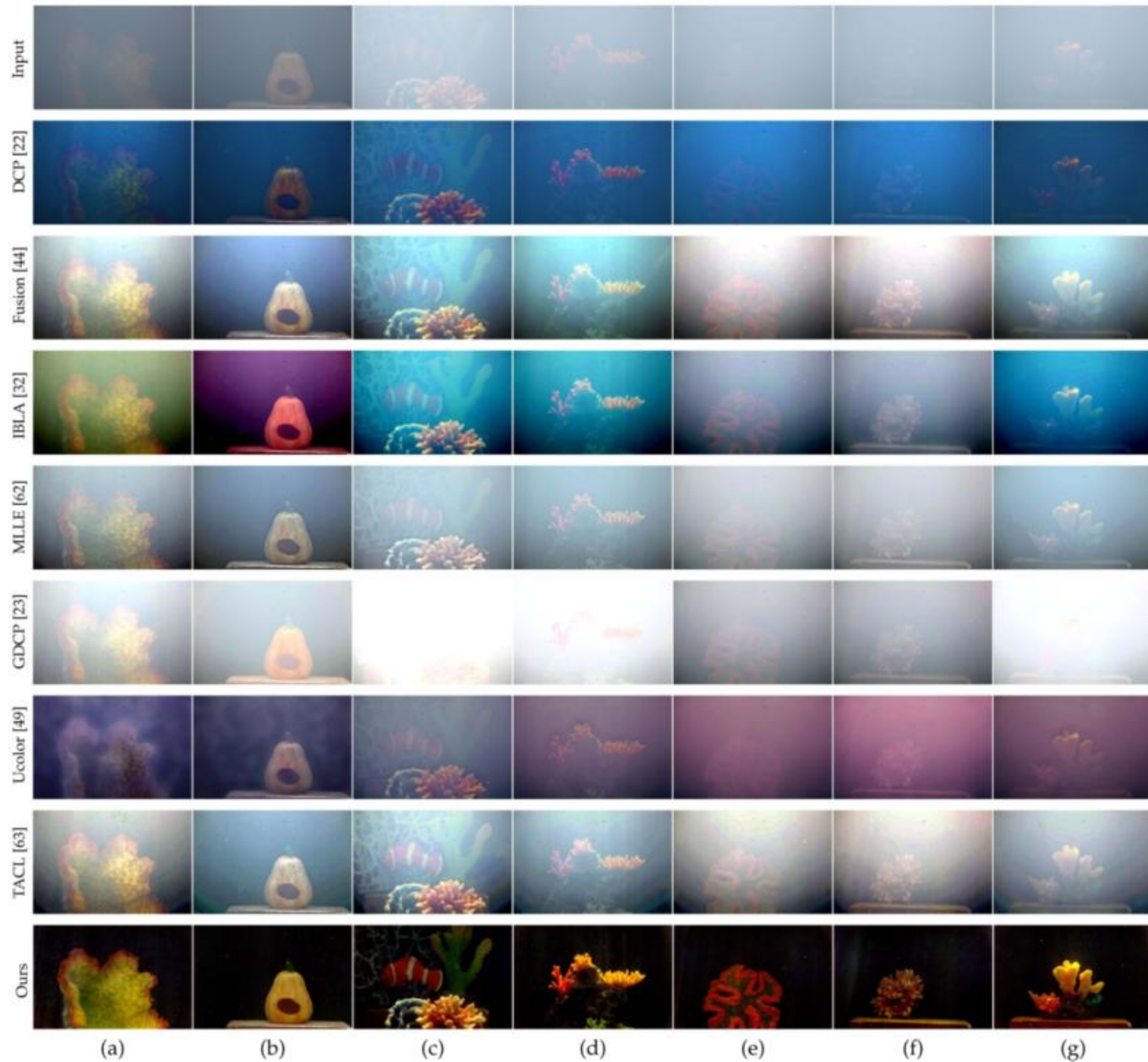


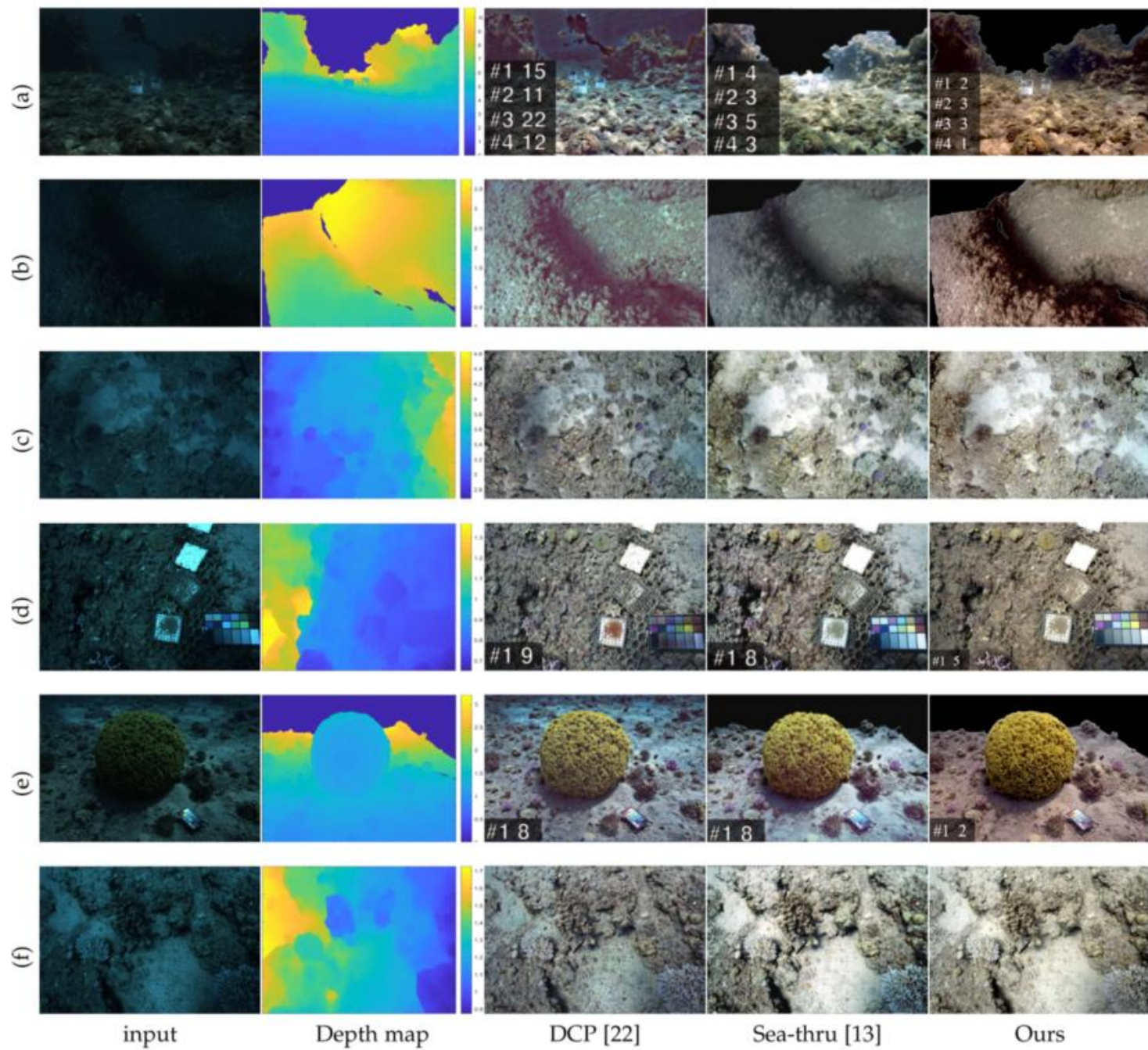
TABLE V  
NIQE SCORES OF FIG. 11, WHERE LOWER SCORES INDICATE BETTER IMAGE QUALITY

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)
DCP [22]	5.16	5.51	5.52	5.69	8.25	8.14	6.76
Fusion [44]	6.28	6.12	5.18	6.08	6.65	7.44	7.01
IBLA [32]	5.20	4.99	4.97	6.08	8.43	5.93	7.53
MLLE [62]	6.40	5.67	5.07	6.12	6.97	6.95	4.60
GDCP [23]	5.95	5.95	6.80	5.73	8.59	8.47	6.57
Ucolor [49]	3.77	3.54	3.96	3.74	5.20	4.81	4.05
TACL [63]	4.44	4.52	4.33	4.57	5.35	4.93	4.44
<b>Ours</b>	<b>2.88</b>	<b>2.88</b>	<b>3.67</b>	<b>2.82</b>	<b>2.33</b>	<b>2.27</b>	<b>3.00</b>

TABLE VI  
UIQM SCORES OF FIG. 11, WHERE HIGHER SCORES INDICATE BETTER IMAGE QUALITY

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)
DCP [22]	2.53	2.52	1.76	1.63	1.15	1.07	1.76
Fusion [44]	2.90	2.35	1.90	1.44	2.48	2.51	1.75
IBLA [32]	2.86	4.35	0.34	0.29	1.84	2.01	1.34
MLLE [62]	3.32	2.72	2.27	1.91	2.27	2.31	1.72
GDCP [23]	2.39	2.16	0.78	1.73	1.83	1.80	1.60
Ucolor [49]	3.71	3.47	2.94	3.46	3.79	4.19	3.65
TACL [63]	3.79	2.84	3.13	2.97	3.31	3.41	3.02
<b>Ours</b>	<b>5.34</b>	<b>3.50</b>	<b>3.54</b>	<b>3.71</b>	<b>3.91</b>	<b>4.49</b>	<b>6.14</b>







Input



HL [39]



HL + ours



IDE [66]



IDE + ours



GT

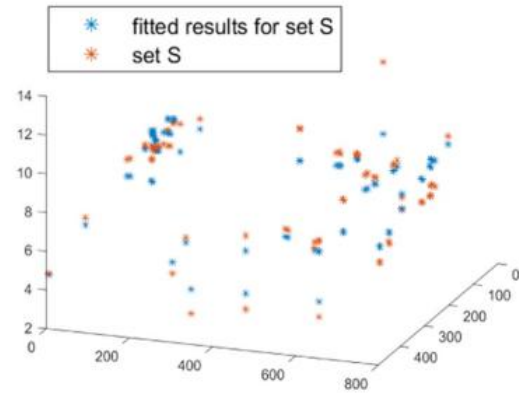




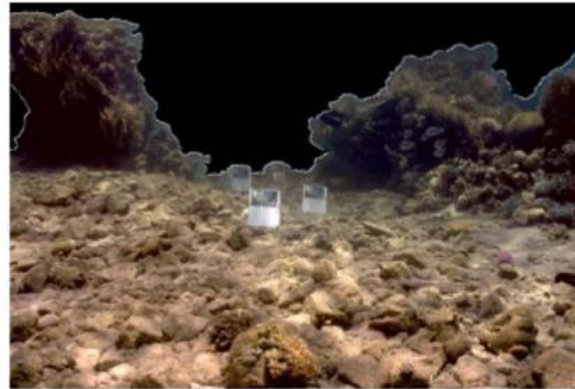
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 13. The set  $S$  and its fitted results in 3 d plane of image ‘LFT3374’. (a) the original image. (b) the selected set  $S$ . (c) the fitted results of set  $S$ . (d) the restored result.

# 消融实验

TABLE IX  
THE ABLATION STUDY BASED ON FIG. 8

	Ours	①	②	③	④	ASM
RMSE ↓	57.2656	68.0589	58.8960	69.8294	132.1235	814.32

• 1.无 $\eta$

$$\eta = \frac{1}{f} \sqrt{(xw_x)^2 + (yw_y)^2 + f^2}.$$

• 2.无  $(Y_u - \frac{yw_y}{f} Z) \sec(\theta_Z)$

$$I_b^c(x, y) = \int_0^{Z_s} E^c e^{-\beta_B^c Y_u \sec(\theta_Z)} \beta_s^c P(\psi) e^{-\beta_B^c \eta Z} \eta dZ.$$

• 3.无相函数

$$I_b^c(x, y) = \int_0^{Z_s} E^c e^{-\beta_B^c (Y_u - \frac{yw_y}{f} Z) \sec(\theta_Z)} \beta_s^c e^{-\beta_B^c \eta Z} \eta dZ.$$

• 4. Narasimhan模型

• 5.ASM模型

# 未来展望

- 深度学习增强的去散射（雾天、水下）
- 大规模数据集的生成（雾天、水下）
- 医学、遥感图像等其它领域



谢谢！