



预计计算的大气散射

埃里克·布伦顿，法布里斯·尼雷特

►要引用此版本，请执行以下操作：

埃里克·布伦顿，法布里斯·尼雷特。预先计算好的大气散射量。《计算机图形学论坛》，2008年，《特刊：第19届欧洲图形学渲染2008年研讨会论文集》，第27（4）页，第086页。.1079-110.1111/j.1467-8659.2008.01245.x .英里亚-00288758

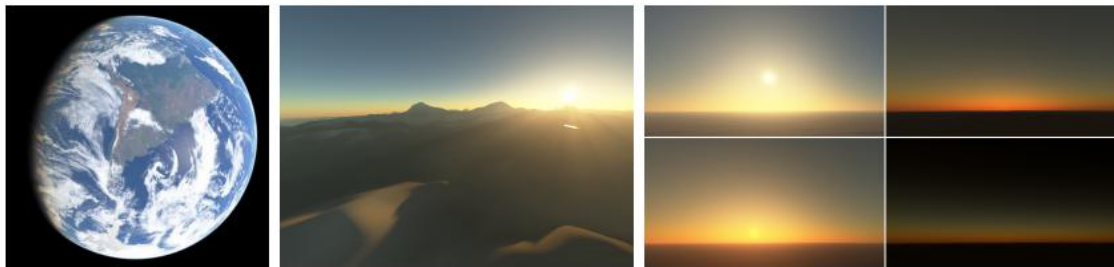
HAL Id: `inria-00288758`

`https://inria.hal.science/inria-00288758`

已于2008年6月18日提交

HAL是一个多学科的开存取档案
关于存放和传播科学仓库的资料的档案，无论它们是否有科学研究，是否有出版物。这些文件可能来自法国的教学和研究机构，或法国的教育研究所、国外的实验室，或公共或私人研究中心。公众你引以为豪。

Precomputed Atmospheric Scattering



埃里克·布鲁内顿和法布里斯·内雷特

逃避-LJK/格勒诺布尔大学-INRIA

摘要

我们提出了一种新的和精确的方法, 可以从地面到外层空间的任何角度实时呈现大气, 同时考虑到瑞利和米伊的多重散射。我们的方法再现了光散射的许多效应, 如日光和暮色的天空颜色, 以及所有视野和光方向的空中透视, 或者大气内部的地球和山的阴影(光轴)。我们的方法是基于光输运方程的公式, 预先计算所有视点, 视点方向和太阳方向。我们展示了如何紧凑地存储这些数据, 并提出了一个符合GPU的算法来在几秒钟内预计算它。这个预先计算的数据允许我们在运行时评估恒定时间内的光输运方程, 而不需要任何采样, 同时考虑到阴影和光轴的基础。

类别和主题描述符(根据ACM中国化学会): I[计算机图形学]: 三维图形学和现实主义. 3. 7

在许多应用中, 大气效应对于提高户外场景的真实性非常重要。天空的颜色提供了一天中的时间的关键指示, 而空中的视角提供了评估距离的重要线索。在许多游戏或应用中, 飞行模拟器或地球浏览器是可取的, 比如飞行模拟器或谷歌地球浏览器。这对于针对现实主义的应用程序尤其如此, 如天文学或美国宇航局世界风。然而, 这些应用程序目前使用非常基本的模型来渲染这些效果, 这并不能给出真实的图像。

在本文中, 我们提出了一种方法, 从任何角度实时呈现这些效果。这种方法考虑了多重散射, 这对于正确渲染黄昏或大气中地球的阴影很重要(见图8)。它是基于适度简化的假设, 使我们能够得到一个更好的近似解(与以前的工作相比), 其中大多数项可以预先计算。我们的

该方法是第一个实时计算所有视点、所有视点和太阳方向以及多重散射的方法。

下一个部分的组织方式如下。第二节介绍了物理模型和渲染方程, 并回顾了相关的工作。第3节介绍了我们的分辨率方法, 得到一个可计算的公式。第4和第5节介绍了我们的预算和渲染算法。第6节给出了实现的细节, 并给出了我们的结果。

2. 大气模型

渲染大气照明依赖于两个方面: 局部介质特性的物理模型, 和全局照明交换的模拟。这包括与地面的交换, 它可以建模为兰伯表面, 反射高度场为 $\alpha(x, \lambda)$ 、正常 $n(x)$ 等。

大多数计算机图形学(CG)论文, 从[NSTN93]开始, 都依赖于一个由空气分子和气溶胶颗粒组成的介质的物理模型, 总结在

第2.1节。然而，在大气CG模型中很少完全考虑参与媒体的经典渲染方程，特别是交互式渲染。我们在第2.2节中重申了一般模型，并在第2.3节中在之前的CG模型中展示了它的近似。

1. 2物理模型

CG中常用的物理模型是基于空气分子和气溶胶粒子两种成分的清天空模型，在R之间密度下降的薄球形层中 $g=6360$ 公里和右翼 6420 公里（见图1）。

在每一点上，离其入射方向散射 θ 度的光的比例由散射系数 β 的乘积给出 S 和一个相位函数 P 。 β 依赖于颗粒密度， P 描述了角度的依赖性。用于空气分子 β 和 P 是由瑞利理论给出的：

$$\beta_R^s(h, \lambda) = \frac{8\pi^3(n^2 - 1)^2}{3N\lambda^4} e^{-\frac{h}{H_R}} \quad (1)$$

$$P_R(\mu) = \frac{3}{16\pi}(1 + \mu^2) \quad \text{where } \mu = \cos \theta \quad (2)$$

其中 $h=-R_g$ 海拔， λ 波长， n 空气的折射率， N 为海洋中的分子密度

R_g 和人力资源 8 km是atmo-的厚度

球体，如果其密度是均匀的。与在[REK 04]中一样，我们使用 $\beta_R^s = (5.8, 13.5, 33.1) 10^{-6} m^{-1}$ 对于 $\lambda = (680, 550, 440)$ nm。

气溶胶的密度也呈指数下降

一个较小的高度尺度 $H_M \approx 1.2$ km。它们的相位函数是

由Mie理论给出，近似于cornente相位函数[TS99]：

$$\beta_M^s(h, \lambda) = \beta_M^s(0, \lambda) e^{-\frac{h}{H_M}} \quad (3)$$

$$P_M(\mu) = \frac{3}{8\pi} \frac{(1 - g^2)(1 + \mu^2)}{(2 + g^2)(1 + g^2 - 2g\mu)^{3/2}} \quad (4)$$

与空气分子不同，气溶胶吸收了入射光的一部分。用吸收系数 β 进行测量，给出了消光系数 $\beta_M^e = \beta_M^s + \beta_M^a$ （典型值 β_M^a 见图6 β_M^s 空气分子）。

请注意，折射率 n 的变化

高度会引起光线的轻微弯曲（小于2度）。为了简单起见，我们忽略了它。

2. 2渲染方程

我们在这里回忆起参与介质中的渲染方程。我们注意到 $L(x, v, s)$ 当太阳在 s 方向上时，光从 v 方向到达 x 的亮度，而 $x_o(x, v)$ 是射线 x +电视的末端（见图1）。注意， x_o 要么在地面上，要么在顶部大气边界 $r=$ 上右翼。 x_o 在 x 和 x 之间的透射率 T ，在 x_o 处反射的光的辐射 I ，以及半径-光在 $-v$ 方向散射的方向定义为

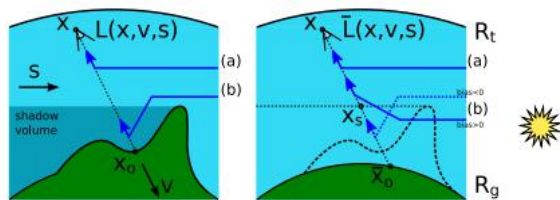


图1：我们的方法。左：参考方案包括单散射(a)和从 x 到 x_o 的多散射(b)，都考虑了遮挡。对：我们的近似值。从 x 到 x_s 完成集成，忽略遮挡（通过使用 x_s 隐式）。(a)不变。(b)受到忽略二次散射遮挡的影响（这将产生正偏差和负偏差，而且无论如何影响都很小）。

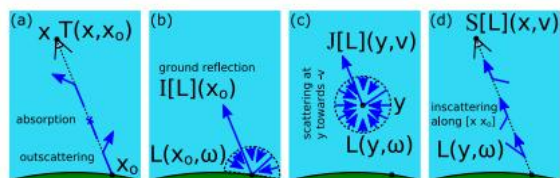


图2：定义。(a)大气透明度 T 结果

来自吸收和输出散射光。(b) $I[L]$ 是轻 L

在 x_o 。它在顶部大气边界上为空。(c) $J[L]$

是光 L 在 y 方向散射的。-(d) $S[L]$ 是光分散在 x_o 和 x 之间的 x_s 上，从任何方向看。

如下（见图2）：

$$T(x, x_o) = \exp \left(- \int_x^{x_o} \sum_{i \in \{R, M\}} \beta_i^e(y) dy \right) \quad (5)$$

$$I[L](x_o, s) = \frac{\alpha(x_o)}{\pi} \int_{2\pi} L(x_o, \omega, s) \omega \cdot n(x_o) d\omega, \text{ or } 0 \quad (6)$$

$$J[L](y, v, s) = \int_{4\pi} \sum_{i \in \{R, M\}} \beta_i^s(y) P_i(v, \omega) L(y, \omega, s) d\omega \quad (7)$$

注意，我在顶部大气边界上为空。使用这些符号，渲染方程为[TS99]：

$$L(x, v, s) = (L_0 + \mathcal{R}[L] + S[L])(x, v, s) \quad (8)$$

$$L_0(x, v, s) = T(x, x_o) L_{sun}, \text{ or } 0 \quad (9)$$

$$\mathcal{R}[L](x, v, s) = T(x, x_o) I[L](x_o, s) \quad (10)$$

$$S[L](x, v, s) = \int_x^{x_o} T(x, y) J[L](y, v, s) dy \quad (11)$$

在哪里 L_0 是阳光直射的 L 吗太阳在达到 x 之前减弱了 $T(x, x_o)$ 。 L_0 如果 v ，或者太阳被地形遮挡， i 为空。e.，如果 x_o 是在地面上的话。 $R[L]$ 是在 x_o 反射的光，在达到 x 之前也衰减， $S[L]$ 是不散射光 i 。e.，光在 x 和 x_o 之间向 x 散射（见图2）。

3. 2以前的渲染方法

方程8的求解非常复杂。因此，在CG中做出了许多简化的假设，以找到近似的

匹配更容易计算的解决方案（参见[S1o02]）。大多数实时测量方法都忽略了多重散射。在这种情况下，方程8简化为 $L=L_0 + R[L_0] + S[L_0]$ 。然而，即使是 $S[L_0]$ 的起来也相当复杂。一些作者以理想的代价提出了解析解：大气密度恒定的平坦地球[HP02]，或没有Mie散射[REK 04]。^{*}平面地球假设将他们限制在地面上的观察者身上。否则， $S[L_0]$ 通常通过数值积分[NSTN93]计算，可以使用低采样[0 ‘N05]实时完成。一个显著的例外是[SFE07]，它依赖于这个积分的预先计算。但是，为了减少参数的数量，他们只考虑了视野和太阳的天顶角，而忽略了视野和太阳的方向之间的角度。因此，它们不能繁殖，e. g.，大气层中的地球的阴影。

忽略上述多次散射是可以接受的日光，但不为黄昏[HMS05]。这是因为阳光在白天穿过的大气层比在日落或日出时要少得多。因此，一些作者提出了解释多重散射的方法。[PSS99]用解析模型拟合了双散射蒙特卡罗模拟的结果，但他们的模型仅适用于地面观测者。[NDKY96]和[HMS05]使用体积辐射灵敏度算法来计算多重散射，但它们的方法远非实时性（每张图像需要数分钟到数小时）。

在本文中，我们提出了一种新的方法，从地面到空间，同时考虑多重散射。它的灵感来自[SFE07]，并通过多次散射扩展，之前忽略了视图-太阳角度参数，对预先计算的表进行了更好的参数化，并对光轴采用了新的方法。

3. 我们的方法

为了提高效率和现实性，我们的目标是尽可能多地预先计算 L ，只有最小的近似。我们的解决方案是基于对零和单散射的精确计算，并使用一个近似的遮挡效应来计算多次散射。事实上，我们考虑了详细的地面形状的零轴和单次散射，以得到正确的地面颜色、阴影和光轴。但我们用一个恒定反射率的完美球体来近似它来计算多次散射，以允许预先计算。

在介绍我们的方法之前，我们需要一些不-

旋转和辅助功能。我们注意到 $L = \bar{L}_0 + (+S\bar{R}^-) [\bar{L}]$

对于一个完全旋转的情况，方程8的解

恒定反射率的椭圆形地面。 $\bar{\alpha} \bar{L}_0$ ， $S\bar{R}^-$ ， $\bar{x}_o \bar{I}$ 和这样定义，但是对于这个球形地面。

请注意，由于地面的球面对称， x 和 v

可以降低到一个高度和一个视野的天顶角。因此

x ， v ， s 的函数，比如 L^- 或 $S^-[\bar{L}]$ 可以简化为4个参数的函数（2为 x 为 v ， s 为2）。还要注意， L （回复 \bar{L} ）可以用线性算子 R 和 S 中的一个级数来表示。 \bar{R} 和 S^- ，其中的 i^{th} 术语对应于光反射和/或散射精确 i 次：

$$\begin{aligned} L &= L_0 + (R + S)[L_0] + (R + S)[(R + S)[L_0]] + \dots \\ &= L_0 + L_1 + L_2 + \dots = L_0 + L_* \end{aligned} \quad (12)$$

在渲染过程中，我们精确地计算了10和 $R[L_0]$ 。为此，我们使用一个阴影算法来计算太阳遮挡（见公式9），以及一个预先计算的透射率 T 表，它只依赖于2个参数（见第4节）。 $S[L_0]$ 更为复杂。它是 x 和 x_o 之间的一个积分，但是，由于遮挡项在 L_0 ，被积函数在所有处于阴影中的点 y 上都是null（这就是给光轴的方法）。我们在这里假设这些点在 x_s 和 x_o 之间（参见图1—般情况将在第5节中讨论）。然后积分可以简化为照明段。此外，遮挡可以被忽略，因为它已经通过 x_s ， i 来解释了。e.， L_0 可以被替换为 L^-_0 。这表明， $S[L_0] = \frac{1}{x} \bar{x} s T J / \bar{L}_0$ 。

通过将其重写为 $\frac{1}{x} \bar{x} s T J / \bar{L}_0 = \frac{1}{x} \bar{x} s o T J / \bar{L}_0$ ，扩展一个在[0 ‘N05]中引入并在[SFE07]中重用，我们发现利用2的可计算函数得到一个公式

还有4个参数， T 和 $S^-[\bar{L}_0]$ ：

$$S[L_0](x, v, s) = S^-[\bar{L}_0](x, v, s) - T$$

$$(x, \mathbf{x}_s) S^-[\bar{L}_0](\mathbf{x}_s, v, s) \quad (13)$$

多次散射，如上述10和 L^- 可以是

尽管有遮挡，但计算得很准确。不幸的是帐户

在其他术语中表示遮挡 $L_2 \dots + = R[L^-] + S[L^-]$ ，

要困难得多。希望，在这种情况下，咬合

可以近似。事实上，多重散射效应是

小的相对于白天的单一散射，而

当不直接照明时，地面的贡献很小

靠太阳。所以我们有一个近似的遮挡效应。

通过积分多重散射的贡献，计算了

计算没有遮挡，在 x 和 x_s 之间。这两者都产生

正面和消极的偏差（见图1）。数学上，

这个近似给出了 $S[L^-] \approx \frac{1}{x} \bar{x} s T J / \bar{L}_0$ 。 \bar{L}_* 我们也是

与环境环境的近似闭塞效应。

由于地面的棕褐色，水平半球

摄政平面。 $\frac{1+s\bar{\alpha}}{2}$ 这给出了 $\hat{\cdot} [\bar{L}_*]$ 和

$$\hat{R}[\bar{L}_*] = T(\mathbf{x}, \mathbf{x}_o) \frac{\alpha(\mathbf{x}_o)}{\pi} \frac{1 + \mathbf{n}(\mathbf{x}_o) \cdot \bar{\mathbf{n}}(\mathbf{x}_o)}{2} \bar{\mathcal{E}}[\bar{L}_*](\mathbf{x}_o, \mathbf{s}) \quad (14)$$

$$\bar{\mathcal{E}}[\bar{L}_*](\mathbf{x}_o, \mathbf{s}) = \int_{2\pi} \bar{L}_*(\mathbf{x}_o, \boldsymbol{\omega}, \mathbf{s}) \boldsymbol{\omega} \cdot \bar{\mathbf{n}}(\mathbf{x}_o) d\boldsymbol{\omega}, \text{ or } 0 \quad (15)$$

通过使用与公式13相同的重写规则，并通过

注意 $S^-[\bar{L}]|_{\mathbf{x}} = S^-[\bar{L}](x, v, s)$ ，我们最终得到：

$$L \approx L_0 + R[L_0] + R^-[\bar{L}_*] + S^-[\bar{L}]|_{\mathbf{x}} - T$$

$$(x, \mathbf{x}_s) S^-[\bar{L}]|_{\mathbf{x}_s} \quad (16)$$

其中前三项可以用

帮助 T 和 E 的2D表 \bar{L}_* ，以及

$S^-[\bar{L}]$ 可以在一个4D表中预先计算。我们现在展示如何在合理大小的表中预先计算它们。

算法4.1: 预计算圣职

```

 $T(\mathbf{x}, \mathbf{v}) \leftarrow T(\mathbf{x}, \bar{\mathbf{x}}_0(\mathbf{x}, \mathbf{v}))$ 
 $\Delta E(\mathbf{x}, \mathbf{s}) \leftarrow \bar{\mathcal{E}}[\bar{L}_0](\mathbf{x}, \mathbf{s})$ 
 $\Delta S(\mathbf{x}, \mathbf{v}, \mathbf{s}) \leftarrow \bar{\mathcal{S}}[\bar{L}_0](\mathbf{x}, \mathbf{v}, \mathbf{s})$ 
 $E(\mathbf{x}, \mathbf{s}) \leftarrow 0$ 
 $S(\mathbf{x}, \mathbf{v}, \mathbf{s}) \leftarrow \Delta S(\mathbf{x}, \mathbf{v}, \mathbf{s})$ 
for  $i \leftarrow 1$  to  $i < n_{orders}$ 
do
 $\begin{cases} \Delta J(\mathbf{x}, \mathbf{v}, \mathbf{s}) \leftarrow \mathcal{J}[T \frac{\partial}{\partial \pi} \Delta E + \Delta S](\mathbf{x}, \mathbf{v}, \mathbf{s}) \\ \Delta E(\mathbf{x}, \mathbf{s}) \leftarrow \bar{\mathcal{E}}[T \frac{\partial}{\partial \pi} \Delta E + \Delta S](\mathbf{x}, \mathbf{s}) = \bar{\mathcal{E}}[\Delta S](\mathbf{x}, \mathbf{s}) \\ \Delta S(\mathbf{x}, \mathbf{v}, \mathbf{s}) \leftarrow \int_{\bar{\mathbf{x}}_0} T(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \Delta J(\mathbf{y}, \mathbf{v}, \mathbf{s}) d\mathbf{y} \\ E(\mathbf{x}, \mathbf{s}) \leftarrow E(\mathbf{x}, \mathbf{s}) + \Delta E(\mathbf{x}, \mathbf{s}) \\ S(\mathbf{x}, \mathbf{v}, \mathbf{s}) \leftarrow S(\mathbf{x}, \mathbf{v}, \mathbf{s}) + \Delta S(\mathbf{x}, \mathbf{v}, \mathbf{s}) \end{cases}$ 

```

4. Precomputations

我们预计算 $T(\mathbf{x}, \bar{\mathbf{x}}_0(\mathbf{x}, \mathbf{v}))$, 表示2D表中的所有 \mathbf{x}, \mathbf{v} 的 $T(\mathbf{x}, \mathbf{v})$. 由于球面对称, T 只依赖于 $r = |\mathbf{x}|$ 和 $\mu = \mathbf{v} \cdot \mathbf{x}/r$ [0' N05]. 然后, 我们使用标识 $T(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = T(\mathbf{x}, \mathbf{v})/T(\mathbf{y}, \mathbf{v})$, 与 $\mathbf{v} = (\mathbf{y} - \mathbf{x})/|\mathbf{y} - \mathbf{x}|$.

我们预先计算 $E[\bar{L}_i]$ 和 $S[\bar{L}_i]$ 在两个表 E 和 S 中. 一种计算每个散射顺序的算法 L_i 一个接一个. 另一个. 该算法使用了三个中间表 ΔE , ΔS 和 ΔJ 包含每次迭代后的 $iE[\bar{L}_i]$, $S[\bar{L}_i]$ 和 $J[\bar{L}_i]$. ΔE 和 ΔS 被添加到结果表 E 和 S 中. 每次迭代的结束 (使用标识进行计算) $\bar{\mathcal{R}}[L_i](\mathbf{x}, \mathbf{v}, \mathbf{s}) = T(\mathbf{x}, \bar{\mathbf{x}}_0) \bar{\mathcal{R}}_i[\bar{L}_i](\bar{\mathbf{x}}_0, \mathbf{s})$ - 请参见算法4.1).

角精度由于 S 是一个4D表, 它的大小随着分辨率的增加非常增加. 所以我们只能使用有限的角度分辨率来 \mathbf{v} . 这就提出了一个精度问题, 但这仅限于强正向Mie散射. 为了解决这个问题, 我们分离了单个Mie散射项从所有其他的 S , 以便适用

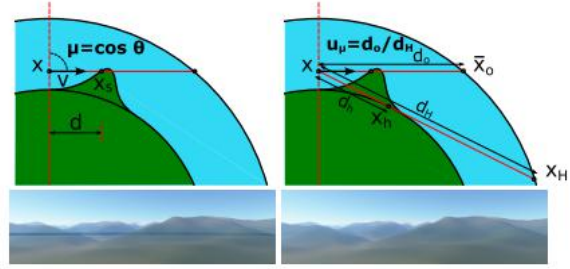
在运行时的相位函数. 为此, 我们重写了 $S[\bar{L}_i]$ 作为 $PM S[\bar{L}_i] + PR S[\bar{L}_i] + S[\bar{L}_i]$. 然后我们存储 $CM = S[\bar{L}_i]$ 和 $CM = S[\bar{L}_i] + PR S[\bar{L}_i]$. 这需要6 S 中的每个条目的值. 如果有必要, 为了提高效率, 这可以是减少到4个值, 每个条目, 只存储红色的 CM - 波伦特 CM , r 的 CM . 在这种情况下, 其他组件可以使用

用 S 之间的比例规则来近似 $S[\bar{L}_i]$ 和 $S[\bar{L}_i]$, 它给出 $CM \approx C^{CM, r} \beta^{RS, r} \beta^{-SM, r} \beta^{MS} \beta^{-SR}$

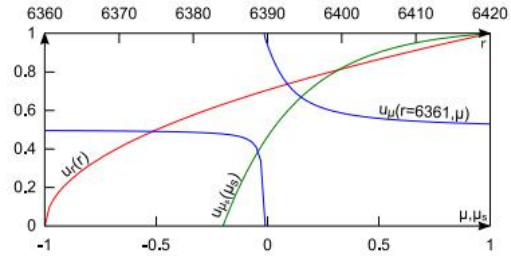
参数化, 以存储 $S[\bar{L}_i]$ 我们需要一个从 $(\mathbf{x}, \mathbf{v}, \mathbf{s})$ 映射到 $[0, 1]$ 中的表索引⁴. 一个简单的解决方案是使用 $r = |\mathbf{x}|$ 和视野天顶, 太阳天顶, 和视野太阳角, $\mu = \mathbf{v} \cdot \mathbf{x}/r$, $\mu_s = \mathbf{s} \cdot \mathbf{x}/r$ 和

$\mathbf{v} = \mathbf{v} \cdot \mathbf{s}$ (线性映射自 $[R_g, R_t] \times [-1, 1]^3$ 到 $[0, 1]^4$). 这个参数化的问题是它需要

在 μ 中具有非常高的分辨率, 以获得良好的航空透视采样. 例如, 考虑一个靠近地面的观察者水平观察, 在距离 d 处有一座山 (见图3). 空中透视由方程16给出为 $S(\mathbf{x}, \mathbf{v}, \mathbf{s}) = T(\mathbf{x}, \mathbf{x}_s) S(\mathbf{x}_s, \mathbf{v}, \mathbf{s})$. 然后用 $\mu=0$ 表示 \mathbf{x} ,

图3: 查看角度参数。左图: 使用 μ 给出了工件。

右图: 使用 $u_\mu = d_o/dh$ 或 d_o/dH 解决了这个问题 (使用128个值的 μ 或 u_μ 在预先计算的空中辐射表 S 中)。

图4: 参数化。 u_r , u_μ , u_{μ_s} , μ , μ_s 的功能 s 。

和 $d/\sqrt{r^2 + d^2}$ 为了 \mathbf{x}_s , 它给出了 $\Delta\mu=0$. 016年 $\ll 1$ $d = 100$ km. 这个太小的值会了可见的工件 (参见图3)。为了解决这个问题, 我们依靠一个赌注 - ter 参数化. 我们用 u_μ 替换 μ , 定义为

距离 d 之比 $\propto 1/\sqrt{r^2 + d^2}$ 和距离 dh (报告 d/h) 从 \mathbf{x} 到地平线. 到大气中在地平线后面的边界, 见图3)。在预防中

示例 $d/H \approx (R_t^2 - R_g^2)^{1/2}$ 对于 \mathbf{x} 和 \mathbf{x}_s , 而 $d_o \approx d/H$ \mathbf{x} 和 d/H 为 \mathbf{x}_s , 这给出了 $\Delta u_\mu \approx 0.11 \gg 0.016$ 为 d 行驶100公里. 用这个映射得到了128个样本 u_μ 是足以避免上述工件。

另一个问题是 S 在视界上是不连续的, 这是由于这里的观察射线的长度是不连续的. 因此, 连续映射对这种不连续产生线性插值, 从而导致伪影. 我们通过确保这一点来解决这个问题 u_μ 它本身在地平线上是不连续的 (见图4)。最后, 我们对 r 和 μ 使用了一个特别的非线性映射 s , 选择是为了获得一个更好的精度接近地面和太阳天顶角接近 90° . 所以我们从 $(\mathbf{x}, \mathbf{v}, \mathbf{s})$ 映射到 $[0, 1]^4$ 最终定义如下:

$$\begin{aligned}
 u_r &= \rho/H \\
 u_\mu &= 1/2 + (r\mu + \sqrt{\Delta})/(2p) & \text{if } r\mu < 0 \text{ and } \Delta > 0 \\
 &= 1/2 - (r\mu - \sqrt{\Delta + H^2})/(2p + 2H) & \text{otherwise} \\
 u_{\mu_s} &= (1 - e^{-3\mu_s - 0.6})/(1 - e^{-3.6}) \\
 u_v &= (1 + v)/2 \\
 \text{with } \rho &= (r^2 - R_g^2)^{1/2}, H = (R_t^2 - R_g^2)^{1/2}, \text{ and } \Delta = r^2\mu^2 - \rho^2.
 \end{aligned}$$

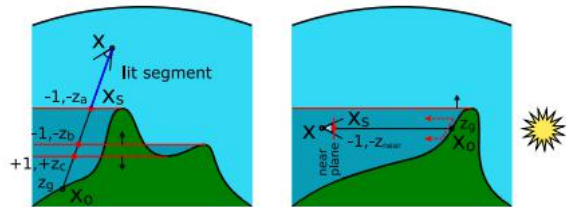


图5：评价1。左图：由于错误的边界 b 和 c ，计算长度 $\Delta z \Delta n$ 。 $z_g = z_g - z_a + z_c$ $z - b$ 大于 l 。将此值夹到 $z_g - z_{min}$ 修复了这个问题。右图：视点在阴影中。仅使用挤压的边缘， x_0 将被视为照明和 l 将等于0而不是 $z - g$ z_{near} 。投影背面近平面上的面（虚线）解决了这个问题。

5. 渲染

为了渲染天空和空中的视角，我们评估了-

在每个像素处读取等式16。 \bar{L}_0 可以有效地计算

使用 T 。计算 $R[\bar{L}_0]$ 涉及 T 、 $\alpha(x_0)$ 和 $n(x_0)$ ，和一个用来确定 x_0 是否被点亮的阴影测试。最后 E 和

S 用于计算 $R[\bar{L}_*]$ 和 $S[\bar{L}_*]$ 。与[SFE07]中一样， x 是相机的位置，如果在空间，最近的交点

与大气边界的观察射线。唯一的剩余的非平凡参数是 x_s ，它依赖于地形阴影和提供光轴。

大多数光轴算法使用采样或切片来沿着观察射线执行数值积分，并使用阴影地图来查找哪些样本是被照亮的。每条射线最多必须使用100个样本来消除由于离散采样而造成的伪影[IJTN07]。我们在此提出了一种受阴影体积启发的新方法[HHLH05]。它不依赖于数值积分，因此不受这些伪影的影响。我们首先证明了一个精确的计算是可能的，但不适合于GPU。然后我们提出一个ap-近似解更适合于GPU。我们的想法是利用预先计算的积分 S 来计算不散射每个照明部分的光 i ， x_{i+j} 沿着观察到的光线，

这是由 T 给出的 $i) S / x_{i+j} = T(x, x_{i+j}) S | x_{i+j}$ 。按定义 t_{iont} 点 x_i 是在阴影体积的边界上吗

的地形。因此，它们可以在阴影卷中找到

ume算法，如[HHLH05]。这个算法挤出

物体的剪影边缘，从光线下看；它也

将这些物体投影到近平面上，以获得正确的回复

尽管剪裁。然而，这些算法也是gen-

删除许多不对应于边界的曲面

在光和阴影之间设置（请参见图5）。这些假束缚

在计算非散射光时，必须忽略天体，

否则就会得到一个错误的结果。不幸的是，检测

使它们是一个非本地操作，不适合GPU（需要，e.g.，使用多个通道，或列表结构）。

我们的解决方案是使用阴影体积算法来计算阴影段的总长度 l ，并在光线的“地面”端用这个长度的单个段替换它们（见图5）。错误的边界仍然会导致问题，i.e.，对 l 的过高估。在这里如何

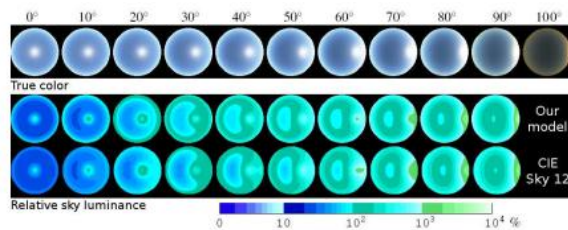


图6：验证。天空亮度 S 在鱼眼视图的几个太阳天顶角度，在颜色上，和相对于天顶亮度。与 $=0$ 。 $\bar{\alpha}1$ ， $\beta_s = 2 \cdot 10^{-5} m^{-1} s_m$ ， $\beta / \beta_m = 0.9$ ， $g = 0.76$ 和 $HM = 1.2$ km时，我们得到了CIE晴天模型，符合实际测量结果（来源[ZWP07]）。

永远， l 可以夹在阴影卷的最近面和最远面之间的距离。

这在大多数情况下给出正确的结果，在其他情况下给出近似值。我们的详细算法如下。我们关联每个像素4个值 Δn ， Δz ， z 分， z_{max} 初始化为 $00 \infty 00$ 。第一步是我们的递减量。

增量 Δn 为1， Δz 为片段深度 z ，并更新 z 分和 z_{max} 使用 z ，对于每个前面（重新设置。阴影表面的表面。在第二步中，我们将使用（参见图5）

$$\bar{l} = \text{clamp}(\Delta z - \Delta n \cdot z_{ground}, 0, z_{ground} - z_{min})$$

$$L \simeq L_0 + \mathcal{R}[L_0] + \hat{\mathcal{R}}[\bar{L}_*] + S|_{x_s = x_0 - \bar{l}} - T(x, x_s) S|_{x_s = x_0 - \bar{l}} \quad (17)$$

当你看地面，或者看着天空：

$$\bar{l} = \text{clamp}(\Delta z, 0, z_{max})$$

$$L \simeq L_0 + \mathcal{R}[L_0] + \hat{\mathcal{R}}[\bar{L}_*] + T(x, x_s) S|_{x_s = x + \bar{l}} \quad (18)$$

6. 实施、结果和讨论

我们在GPU上实现了预算算法，用片段着色器处理数值积分。这不是强制性的，但它允许我们快速改变大气参数，并节省了磁盘空间（实际上，在Nvidia8800GTS上，5秒内计算出5秒散射数）。我们将 $T(r, \mu)$ 和 $E(r, \mu)$ 存储在 64×256 和 16×64 纹理中。我们储存 $S(ur, u\mu, u\mu_s, uv) = [C, CM_*, r]$ 在一个 $32 \times 128 \times 32 \times 8$ 表中，视为8 3D表

包装在一个单一的 $32 \times 128 \times 256$ RGBA纹理（使用a

手动线性插值为 4^{th} 坐标谢谢

对于我们优化的参数化，我们的4D表比[SFE07]的3D表有更好的精度和使用更少的空间（16位浮点数的 S 为8MB，1283纹理为12MB）。

渲染渲染分四步完成：

我们只在深度缓冲区中绘制地形；

我们将地形的阴影体积绘制成一个 Δn ， Δz ， z 分， z_{max} 质

地为此，我们使用ADD和MAX混合功能，禁用深度写，并使用几何着色器来挤压轮廓边缘（从太阳看到）。该着色器也会沿着-在近平面上投影

位于这个平面和太阳之间的背面（从太阳上看）；我们用空中绘制地形和其他物体透视，以及天空，使用方程17和18。如果有透明的物体，如云，空中每一必须为每个对象计算透视图，然后才能混合。ing. 我们使用 Δn 来计算 $R[L0]$ 中的遮挡，和 $I^{\sim}com$ 如上计算，得到 x_s （见第5节）；最后，我们应用了一个全局音调映射函数。

结果我们用美国宇航局地球天文台的高度场和反射率纹理进行了几次测试[SVS 05]。*结果如图8和图9所示。如图6和图7所示，我们的模型可以很好地再现CIE晴朗天空模型，从地面的实际测量拟合[DK02]。由于天空颜色和空中透视是用每像素少量纹理获取（ < 10 ）计算的，我们的算法相当快。例如，对于 1024×768 中的图8中的正确视图，我们在没有光的情况下得到125 fps安装在Nvidia 8800 GTS上的轴。这包括5个ms的联合国-阴影地形，公式17和18中的前三项为0.4 ms，其余项为2.6 ms（包括1个ms来评估非线性参数化）。我们得到25帧/秒的光轴（i. e.，前两个渲染过程的成本很高，大约是32 ms）。相比之下，我们重新实现[0 ‘N05]得到50 fps，每条射线使用10个样本（以获得相同的单次散射质量，没有轴）。

我们的方法的一个限制是气溶胶

属性是恒定的，只取决于海拔，而事实上它们可以根据大气条件发生很大的变化[S1o02]。由于我们的预计计算速度非常快，所以我们可以快速地改变这些属性，但它们仍然是一致的。

7. 结论

我们提出了第一个实时的方法来渲染天空和空中透视的所有视点，通过多重散射，地形阴影和光轴，并纠正所有视图和太阳角度的变化。这种方法是基于最小简化的假设，允许我们得到一个渲染方程的近似解，其中大多数项可以预先计算。这种方法可以很容易地扩展到更复杂的物理模型，具有更多的成分或更多的波长。

作为未来的工作，我们希望模拟的效果云在地面的照明和空中的角度，消除晴天假说。事实上，由于有许多云，地面和云之间的相互反射应该被考虑在内[BNL06]。同时，我们还应考虑到它们对航空透视图的影响。据我们所知，这从未有人这样做过。

我们的实现的源代码可在
<http://evasion.inrialpes.fr/~Eric.布伦顿。>

这项工作部分由Natsim ANR ARA项目资助。我们要感谢安托万·布瑟斯和西里尔·索莱尔的校对。

参考文献

- ButhorsA.，尼雷特f.，lefebvre年代.：层状云的实时真实照明和阴影。在关于自然现象的欧洲图形研讨会上（2006年9月）。
- [DK02] DARULA S.，基特勒r.：CIE一般天空标准定义亮度分布。eSim（2002）。
- [HHLH05] HORNUS S.，HOBEROCK J.，lefebvre年代.，哈特J.C.：ZP+：正确的z通模板阴影。在ACM交互式3D图形和游戏研讨会（I3D）（2005年4月）上，ACM，ACM出版社。
- HABER J.，MAGNOR M.，塞德尔h.-P.：基于物理学的黄昏现象模拟。ACM跨。图24，4（2005），1353 - 1373。
- 霍夫曼.，epretham. J.：实时渲染室外光的散射。游戏开发者会议论文集（2002年）。
- 想象t.，约翰h.，田村n.，NISHITA T.：抗锯齿和实时渲染的场景与光散射效果。Vis. 压缩。23，9（2007），935 - 944。
- [NDKY96] NISHITA T.，DOBASHI Y.，KANEDA K.，YA - MASHITA H.：考虑到多重散射的天空颜色的显示方法。《太平洋图形学论文集》（1996年），第二页。117 - 132。
- [NSTN93] NISHITA T.，SIRAI T.，TADAMURA K.，NAKAMAE.：考虑到大气散射的地球显示。在签名图93（1993）中，ACM，pp. 175 - 182。
- [O’N05] O’NEIL S.：精确的大气散射。在GPU宝石2：高性能图形和通用计算的编程技术（2005），艾迪森-韦斯利专业版。
- PREETHAM A. J.，雪莉p.，SMITS .B.E.：一个实用的日光分析模型。在签名99（1999）中。
- [rek* 04] 里利k.，EBERT D. S.，克劳斯m.，TESSENDORF J. 汉森c. D.：有效地渲染大气现象。《渲染技术》（2004），页。374 - 386。
- [SFE07] SCHAFFITZEL T.，福尔克m.，ERTL T.：实时渲染带有大气层的行星。在中欧举行的WSCG计算机图形学、可视化和计算机视觉国际会议上（2007）。
- [S1o02] SLOUP J.：对地球大气层的建模和渲染的调查。《SCCG ‘02：第18届计算机图形学春季会议论文集》（2002年），ACM，第3页。141 - 150。
- [svs* 05] 斯托克利r.，维莫特e.，SALEOUS N.，西蒙r.，HERRING D.：蓝色大理石下一代——一个真实的彩色地球数据集，包括来自MODIS的季节动态。美国宇航局地球天文台（2005）。
- [t99] 托马斯g. E.，斯坦尼斯k.：在大气和海洋中的辐射传输。剑桥大学。出版社，1999年。
- ZOTTI G.，威尔基A.，PURGATHOFER W.：对前道德天窗模型的评论。在WSCG 2007简短通讯程序1（1月。2007），pp. 23 - 30。

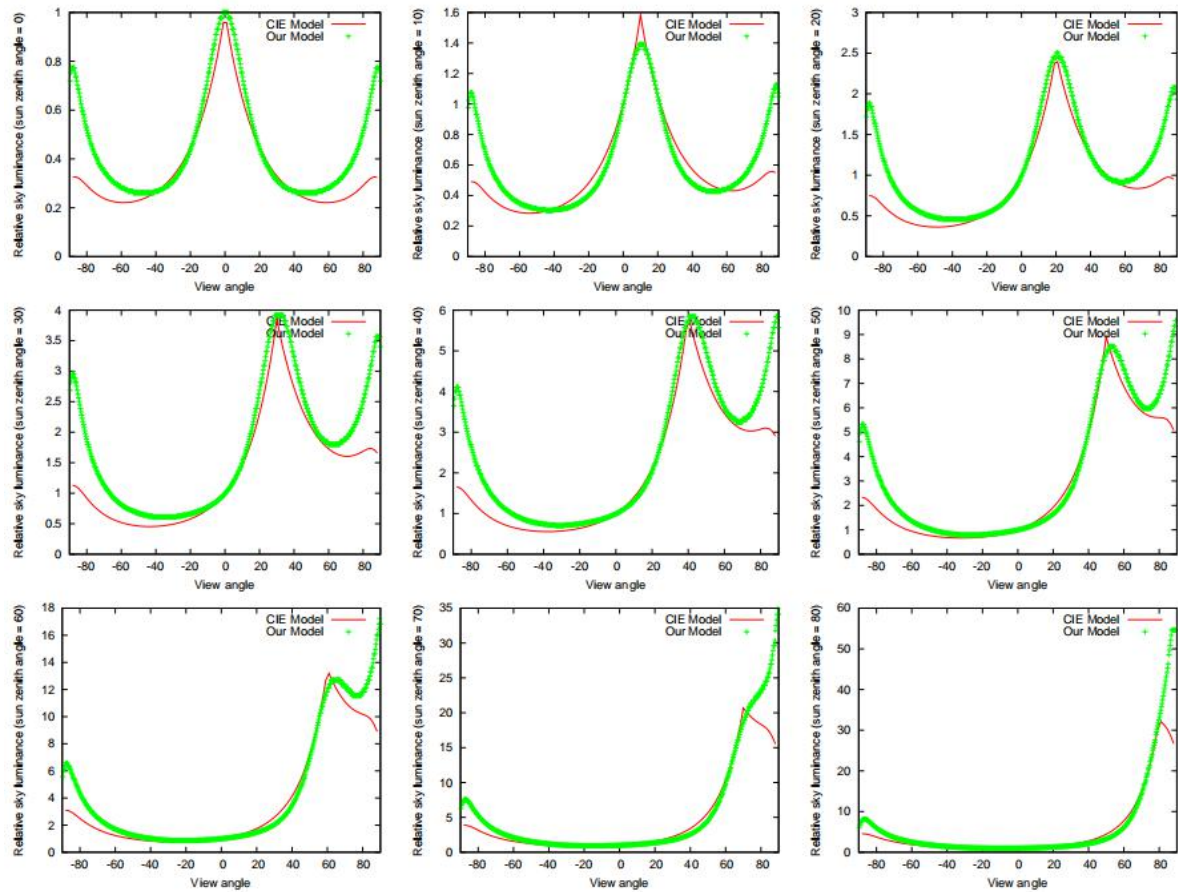


图7: 验证。天空亮度相对于天顶和天顶的天顶角 (和太阳方向之间的零方位角)。比较我们的模型 (与 $\alpha_1 = 0$, $\beta_1 = 2.2 \cdot 10^{-5} m^{-1}$, $\beta / \beta_1 = 0.9$, $g = 0.73$ 和 $HM = 1$) 和 CIE 天空模型 12 (基于实际测量结果)。我们注意到在地平线附近的一个高估 (在 90 和 -90 附近的视角), 这在图 6 中也可以看到。如 [ZWP07] 所示, Preetham 模型 [PSS99] 也存在这个问题, 这可能来自于目前在 CG 中使用的物理模型。

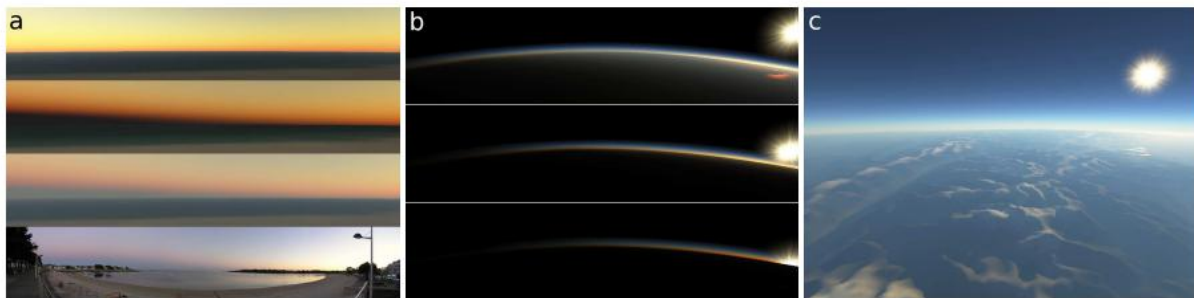
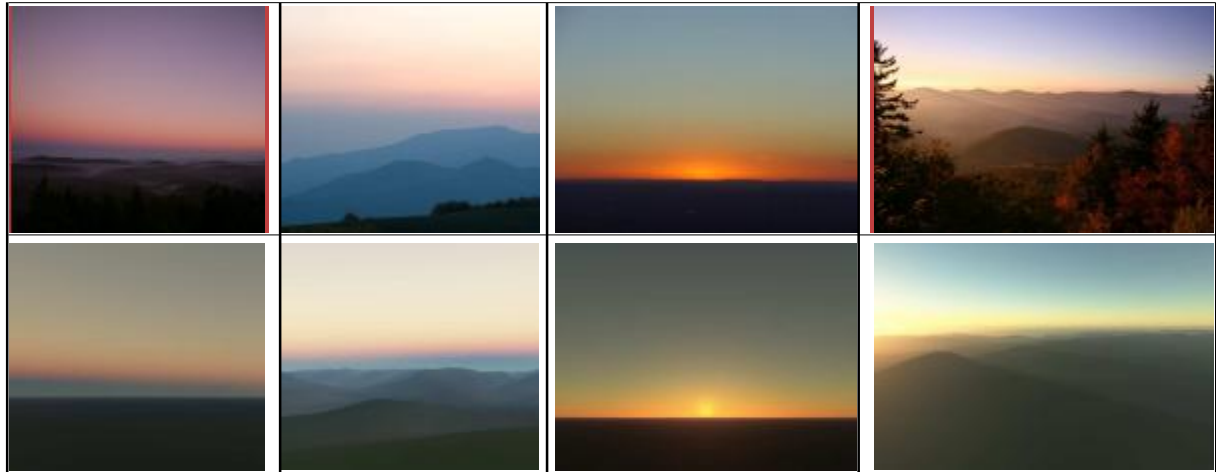


图8: 结果。(a), 从上到下: [SFE07], 单次散射, 多重散射和照片。使用 [SFE07] 时, 由于缺少 v 参数, 阴影不会出现。它太黑了, 只有一个说话。(b) 日落。(c) 是用于性能测量的视图。

图9：结果。我们的结果（没有相框）与网上发现的真实照片（红色相框）相比较。音调映射可以解释一些图像与未校准的照片相比的天空色调差异。



从空间中观看不同的高度和太阳的位置。



从地面看，从左到右，地球的阴影，日落后的空中透视，日落，以及日出时的光轴。



白天的空中透视，不同的视角和太阳角度。