4.10.1 漫反射遮蔽

McGuire [McG10]公式化环境遮挡并为其提供物理基础。如果在方向和表面上有无阻碍的视线，则可见度函数定义为，否则为0. 渲染方程的环境项是：

其中是环境光。一个粗糙的近似是从BRDF中分离可见项，则入射光为：

这种分离仅当和是常量时是正确的。这意味着朗伯表面由恒定的远光照亮。如果两个函数在球体周围是平滑的，则这种近似是合理的。右边项是0到1之间的标量因子，表示一个点的可见性。环境遮挡被定义为与此可见性相反：

在游戏中，出于性能原因，通常在不同的位置和时间捕获环境光，并将其烘焙成light map, cube map或球谐函数。然而，这种烘焙缺乏场景中动态对象的信息。在运行时，此信息用于通过在着色点处插值烘焙信息来着色场景。这意味着着色点可以具有与烘培时不同的可见性（例如，合成静态和动态对象）。为了弥补这一点，我们通常应用环境遮挡项来重建事件照明。（环境遮挡项只能使烘焙的灯光变暗，而不会产生光。由于烘焙照明通常在没有碍物体的情况下进行处理，因此具有高的可访问性，在游戏期间在可访问性较低的情况下使其变暗是合理的。）见性和入射光之间的分离假设不准确，但出于性能原因只能如此权衡。

4.10.2 镜面光遮蔽

环境遮挡推导假定朗伯表面，即它仅对间接漫射照明“有效”。那光滑或镜面表面怎么办，即间接镜面照明？ 在重建间接镜面光照时没有可见性信息远比间接漫射更差。高强度的照明和基于物理的BRDF导致大量可见光泄漏，见图63.此外，间接镜面照明的高频需要大量存储空间，因此限制了捕获点的数量，甚至导致更大的可见性差异。

直接使用环境遮挡项进行光泽或镜面遮挡来解决这个问题并不理想。环境遮挡表示相反的余弦波瓣形状的可见性，即半球上的宽波瓣。相反，光泽表面随粗糙度降低呈现出较窄的BRDF波瓣形状。图64示出了与不同粗糙度值的波瓣BRDF相关联的可见性椎体形状。（BRDF波瓣定义在整个半球上，但远离峰值的一些值非常小，我们可以丢弃它们。这允许我们将粗糙度转换为锥角。见4.9节）这与我们为镜面光照预先集成Cube贴图的方式密切相关。

但即使能提供这样的可访问性，它也无法提供预期的结果。例如，对于像铬球一样的完美光滑表面，将对单一方向测试可访问性并给出二分结果：0或1。因此，使用此可访问性信息的铬球将在受阻的情况下为黑色。这个小例子只是强调，在光泽和镜面表面上分离环境光照积分中的可见性是错误的。

然而Kozlowski [KK07]强调，绝大多数光泽场景可以在某种程度上近似，并且使用球谐函数的定向环境遮挡近似是最有效的方法。

Gotanda [Got13]提出了一个源自环境遮挡项的镜面遮挡项。他注意到高强度的环境遮挡不具有正确的比例，应考虑BRDF波瓣的形状。在Frostbite中，我们目前采用了类似的方法，根据经验适应GGX粗糙度，参见清单26。即使与任何物理方法不相关，结果在视觉上也是愉悦的。它将受益于进一步的研究，以提高其质量。图65突出显示了此函数对0.5的环境光遮挡的行为。当表面完全粗糙时，该函数返回未修改的环境遮挡项。对于光滑的表面，它减少了垂直入射时环境遮挡的影响，但在掠射角时增加了它。

*清单26展示了本节中讨论的结果代码。 原文P.72，限于篇幅和排版这里不再列出*

备注：正如我们所见，镜面遮挡不是基于物理的。但是，我们的屏幕空间反射提供的值是，参见第4.9.4节。它在不分离可见性的情况下评估环境渲染方程积分。所以我们的SSR项在理论上是比镜面遮挡更好。然而，如果我们不考虑镜面遮挡，除了常见的屏幕空间伪像之外，SSR还会遭受由间接Cube贴图引起的漏光伪影。因此，应用镜面遮挡仍然是有用的。

4.10.3 多分辨率环境遮蔽

在上一节中，我们看到漫反射遮挡和镜面遮挡是用于重建入射光，绕过烘烤光限制和减少光泄漏的暗化因素。这些因素不是基于物理的，但是对于图像质量是有效的目前有两种技术用于产生漫反射遮挡因子：

* 离线预计算：捕获中远距离的遮挡信息。
* 屏幕空间技术：捕获中距离的遮挡。这包括许多不同的技术：HBAO，SSAO，VolumetricAO，环境障碍等。

这些技术允许我们管理中等以上的遮挡效果，但它们都不能处理小规模的遮挡。 褶皱，凹痕和小斑点不能由引擎自动处理，也不能通过这些中到大范围的遮挡技术处理。这一观察突出了“多分辨率遮挡”[Qu'ı12]的必要性。我们可以将镜面反射和漫反射的遮挡分为三个范围：小，中和大。

**小型/微遮挡**：在Frostbite中，我们通过让艺术家直接在纹理内烘烤微遮挡来处理小遮挡。褶皱，凹痕或裂缝太小，无法通过阴影贴图处理。因此，微遮挡被应用于直接和间接照明。 我们选择将微遮挡分为两部分：漫反射和镜面微遮挡。 它们都来源于相同的微遮挡信息。（该微遮挡信息可以通过离线过程生成，如传统的环境遮挡纹理，但具有较短的射线范围。）

* 漫反射微遮挡：漫反射微遮挡是与视角无关的，并与漫反射纹理预先相乘以节省指令，请参见图67。
* 镜面微遮挡：镜面微遮挡依赖于视角，我们使用ShaderX7 [Sch09]中提供的解决方案。目标是修改Schlick近似值，使得某个阈值以下的任何值都具有逐渐减小的菲涅耳反射率。由于我们知道没有真实材料的f0值小于0.02，因此任何低于此值的反射率值都可以假设为预烘焙遮挡的结果，从而平滑地降低了菲涅耳反射率的贡献，参见清单27.这样 在反射纹理内部预先烘焙镜面微遮挡。

*清单27展示了本节中讨论的结果代码。 原文P.72，限于篇幅和排版这里不再列出*

备注：该解决方案意味着修改f0和f90值的菲涅耳反射率曲线，因为在不改变f0值的情况下实际上不可能预先烘焙反射遮挡信息。修改f0意味着修改特征材质的折射率。因此，由于可达性，应该仅影响照明的现在正在影响材料的性质，有时甚至不会在掠射角度改变菲涅耳。我们已经研究了使用单独的专用镜面微遮挡纹理，这也意味着要在GBuffer中存储额外参数。该项适用于使用与我们的镜面遮挡相似的配方而不是材料属性的照明计算。 但是，我们发现感知结果不值得花费。

中型和大型遮挡：中型到大型遮挡仅适用于间接照明。我们支持HBAO，它带来中等范围的环境遮挡，但更重要的是，它提供动态对象之间的接触阴影。我们还支持烘焙中到大环境遮挡，有两种选择。经典离线烘焙或动态烘培由我们的radiosity系统提供。烘烤的环境遮挡需要存储在GBuffer中。游戏团队可以选择他们的选项，但我们希望防止过度变暗。为此，我们采用所有应用项的最小值，从中到大的环境遮挡。这很好地处理了烘焙环境遮挡以及动态环境遮挡以进行接触。微遮挡的规模非常不同，最好保持其影响力。（在Frostbite中，由于微遮挡被烘烤到在其他纹理内部，因此只能有限访问。）对于镜面间接照明，我们通过上一节中提供的公式转换得到的环境遮挡项。

总之，我们各种形式的遮挡是：

|  |  |
| --- | --- |
| **直接漫反射** | 漫反射微遮挡 |
| **间接漫反射** | 漫反射微遮挡, min(bakedAO,HBAO) |
| **直接镜面反射** | 通过镜面微遮挡修改后的菲涅尔反射，清单27 |
| **间接镜面反射** | 通过镜面微遮挡修改后的菲涅尔反射，然后执行清单26函数，参数分别问(NdotV, min(bakedAO,HBAO),roughness) |

4.10.4 阴影

阴影是PBR的重要视觉因素。关于这个主题的文献非常广泛，因此我们不在这里讨论它。理想情况下，所有灯光都应该有阴影，但性能成本使得它们在所有灯光下通常都无法承受。通常游戏团队依靠艺术家隐藏这些缺乏的信息。柔和阴影对于区域灯非常重要，以便提供柔和的外观并支持包裹的灯光。使用带有区域光的常规“精确“阴影贴图将移除包裹的光线，参见图68。区域阴影处理的一个很好的解决方案是Kasyan在[Kas13]中描述的体素化技术。可以通过以下方法实现结果有限的更便宜的技术 在阴影贴图计算[Bre00]中略微减小几何体的大小。

在Frostbite中，我们目前支持点光源和聚光灯阴影贴图。这些阴影贴图用于覆盖我们所有的灯光类型。为了伪造区域阴影，我们将投影中心向后移动。这允许平截头体覆盖/跨越整个区域的光形状。然后使用重度模糊和低阴影分辨率来获得柔和外观，请参见图69。它将从进一步研究中受益，以提高质量。

备注：在所有灯光上使用阴影作为照明参考非常重要，以便真正了解应该实现的目标。

4.11 延迟/前向渲染

Frostbite支持具有前向和延迟基于tiled渲染的混合引擎[And09]。关于这些主题的文献非常广泛，因此我们不在这里讨论它们。我们所有的灯光类型，包括阴影灯，都使用tiled路径支持。这种架构的选择取决于性能。光线剔除使用与光线形状相关的紧密边界体积，以避免浪费像素评估。我们在一个大循环内的计算所有灯光，以避免消耗带宽读取GBuffer并提高计算精度。