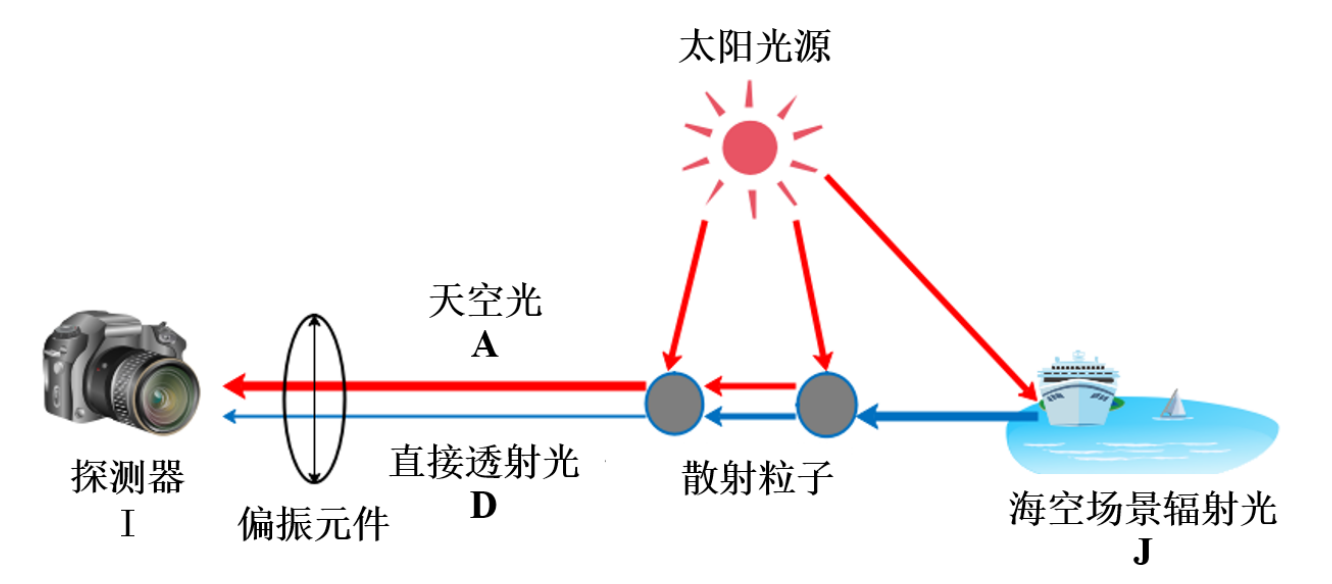
**偏振图像去雾**

# 1 问题描述

雾、霾等天气下，大气中悬浮着大量的微小水滴和气溶胶，对自然光有强烈的散射作用，导致成像系统采集到的图像对比度降低、模糊失真，严重影响视觉系统性能。主流的图像去雾算法可以分为两类，分别是基于图像增强的去雾算法和基于图像复原的去雾算法。基于图像增强的去雾算法旨在去除图像噪声，提高图像对比度，生成无雾清晰图像。代表性算法有直方图均衡化（HLE）、自适应直方图均衡化（AHE）、限制对比度自适应直方图均衡化（CLAHE）、Retinex算法、小波变换、同态滤波等。基于图像复原的去雾算法基于大气退化模型进行响应的去雾处理，旨在恢复真实的自然场景。代表性算法有偏振图像去雾算法、暗通道去雾算法、基于导向滤波的暗通道去雾算法、贝叶斯去雾算法等。

# 2 大气退化物理模型

可以使用大气退化物理模型描述特殊天气条件下（如雾、霾、雨、雪等）图像的退化过程和退化程度。示意图[1]如下：



成像设备的探测器获取的光强信号来源主要分为两种，一种是**景物目标反射的自然光**经过大气中悬浮的粒子散射后到达探测器，这种光强信号称为**直接透射光**；另一种来自太阳光和天空光照明，同样经过大气中的悬浮粒子散射后到达探测器，这种光强信号称为**天空光**。直接透射光和天空光在探测器上叠加即形成了目标场景的退化图像。

由成像模型可知，图像质量退化的原因之一是天空光的干扰。天空光的光强随着到达探测器距离的增加而增加，表示为：

其中，表示无穷远处的天空光对应于目标物体上辐射强度，通常无穷远处视为地平线附近，为非相干光的透过率函数，表示为：

其中，为由于大气散射和吸收引起的消光系数。若假设消光系数与距离无关时，，那么：

除天空光之外，另一个使图像质量退化的原因为景物目标反射的自然光通过散射介质后被衰减。设在无雾条件下，真实场景光强为。在有雾条件下，一部分光被大气中的散射介质散射到其他方向，一部分被吸收。因此，探测器获取的直接透射光为景物目标反射的自然光的一部分，该光强随着到达探测器距离的增加而衰减，表示为：

探测器接受到的信号强度称为实际场景光，实际场景光函数是天空光强度函数和直接透射光函数的非相干叠加，表示为：

无雾条件下的真实场景光强为由下式可得：

由上式可知，还原真实场景光需要知道三个参量：实际场景光强、到达探测器的天空光、以及无穷远处的天空光。实际场景光强由探测器获取，去雾问题的关键是准确地计算出天空光、以及无穷远处的天空光。

# 3 偏振图像去雾技术

通常难以通过强度图区分实际场景光和大气光的辐射强度，偏振图像去雾技术通过探测场景中介质和感兴趣的场景中的偏振特性，再进一步进行区分，可以有效提高图像对比度。下文首先介绍天空光和直接透射光的偏振态组分模型，之后介绍基于偏振成像的去雾算法，最后对这些算法进行了对比和总结。

## 3.1 偏振态组分模型

对于天空光而言，自然光经过多次散射后，天空光将转化为部分偏振光且具有圆偏振光的偏振态组分。同样地，景物目标反射的自然光经过散射后得到的直接透射光也具有偏振特性，但是圆偏振光的成分较少，在此忽略不计。天空光和直接透射光的偏振态组分模型表示为：

## 3.2 基于偏振差分成像的去雾算法

偏振差分去雾算法[2]是较早的基于偏振成像的去雾算法，该算法包括众多改进版本[3-5]。偏振差分去雾算法建立在三个假设条件上：

1. 该算法主要针对由于场景光光强信号的衰减和附加的天空光的累加引起的图像退化问题，对图像模糊问题不做处理；
2. 对于图像质量退化和偏振度降低，以考虑单次散射作用为主，而不计算多次散射效应；
3. 假设对于远距离目标成像时，直接透射光不具有明显的偏振特性，而天空光是部分偏振的。

基于以上三点假设。首先将天空光分解为水平和竖直两个分量和，天空光的偏振度可表示为：

变换可得：

设定各参量的平行分量与各像素上的最小辐射测量值时的各参量值相对应，相应的垂直分量与各像素上的最大测量辐射值时的各参量值相对应。在相机镜头前放置一个偏振片，偏振片的方向角为，建立偏振片方向角与探测器获取的光强信息关系模型。由于事先假定直接透射光为非偏振光，而天空光为部分偏振光，因此直接透射光的辐射强度在各偏振方向角上均匀分布，旋转偏振片引起的总体辐射强度的改变主要是来自天空光辐射强度变化。

随着偏振方向角的改变，辐射强度变化曲线为正弦曲线。当图像的辐射强度最小时， ，总辐射强度为：

当图像的辐射强度最大时，，总辐射强度为：

结合以上公式可得，天空光为：

至此可将求天空光的问题转换为求天空光偏振度的问题。

由透过率定义可知，随着传输距离趋近于无穷远，趋近于零，此时可得：

故图像中天空区域的实际场景的总辐射强度值即为无穷远处天空光强度：

实际场景光偏振度为：

距离趋近于无穷远时：

由此可得，可以直接从采集到的偏振图像中探测到天空光的偏振度：分别从辐射强度最强图和最小图中选取同一天空区域的像素点并计算其偏振度，以此作为天空光的偏振度估算值，进一步可计算出天空光。

此外，为了还原后的图像更加符合人眼观察的真实场景，保持图像的景深信息，在对天空光辐射强度进行估算时可以引入系数以调节天空光辐射强度的估算结果，即用来取代。

至此，可以通过天空光与无穷远处的天空光计算出无雾图像。

## 3.3 基于偏振角估算特征参量的去雾算法

基于偏振角估算特征参量的去雾算法[6]是在偏振差分图像去雾算法基础上的改进算法。算法摆脱了图像中必须包含天空区域以估算天空光辐射强度的限制，适用于没有天空区域的场景中。

算法分别采集偏振方向角为、、、的四幅偏振图像，辐射光强分别表示为、、、。圆偏振分量忽略不计，计算斯托克斯矢量：

根据偏振度和偏振角的计算公式可知：

根据上节的第三点假设，场景光是非偏振的，那么场景光在各偏振方向均匀分布，因此和的计算结果与场景光无关。因此，利用偏振角来估算天空光相比于利用偏振度估算天空光的方法，计算结果受到场景透射光的影响更小。

算法首先计算出图像中每一个像元的偏振角，选取出现的概率最大的偏振角作为天空光的偏振角，再计算对应像元的偏振度，选取其中的最大值作为大气光的偏振度。

根据偏振度的定义，天空光辐射强度表示为：

其中，表示天空光中具有偏振特性的部分的光强。

定义偏振方向为时的方向为轴方向，相应的为轴方向，天空光偏振方向为。

在和轴方向的光强大小为：

以及：

结合上述公式可得：

通过上式即可求出，进一步可以求出天空光。

当图像包含天空区域时，可以简单地估算出无穷远处的天空光强度。文献[7,5]给出了不依赖于天空区域的无穷远处的天空光强度估算方法，适用于不包含天空区域的图像。无穷远处的天空光强度的近似值为：

上式估算出的只有在满足成立。可以将原强度图像中光强大小与相同或近似的像元对应的光强作为无穷远处大气光强。

至此，可以通过天空光与无穷远处的天空光计算出无雾图像。

## 3.4 考虑直接透射光偏振特性的去雾算法

文献[8]指出忽视直接透射光中的偏振信息，所还原出的场景图像中的具有偏振特性的物体将会表现出颜色失真或局部色彩畸变的现象。文献[9]提出了一种同时考虑目标和天空光的偏振特性的图像去雾方法。

算法首先计算出斯托克斯矢量，并忽略了大气光中的圆偏振特性。

将分解成直接透射光和天空光两部分：

和分别表示直接透射光分量和天空光分量：

计算偏振度：

其中和分别表示通过旋转偏振片获得的最大光强和最小光强。

类似地：

由上述公式推导出透过率函数的表达式：

进而可得到场景的真实辐射强度的表达式：

式中一共存在四个未知量，分别是差分强度，直接透射光偏振度，天空光偏振度，以及无穷远处天空光。

天空光偏振度与无穷远处天空光的估算方法不再赘述。

文献[9]指出：

其中和可以通过偏振图像计算得出，由此计算出和，进而求得差分强度。

可以利用独立成分分析（Independent Component Analysis，ICA）的基本思想[10]估算直接透射光偏振度。假定在一个较小的像素区域内是相等的，J和在该区域内是不相关的，可表示为：

求解的最优解[11]作为目标。

至此，四个未知量已经求出，可以得到场景的真实辐射强度，恢复无雾图像。

## 3.5 基于全偏振的去雾算法

基于全偏振的去雾算法[1]考虑了包括大气光圆偏振分量在内的各种偏振分量，实现了更强的适应性和更高的精确度。

算法用斯托克斯矢量第一项来表示辐射强度：

式中，和分别表示直接透射光中线偏振光部分和非偏振光部分的光强，，和分别表示天空光中线偏振光部分，圆偏振光部分和非偏振光部分的光强。

不同偏振态的光的透过率函数不同，将线偏振光、圆偏振光和非偏振光的透过率分别用 ，和表示，则辐射强度可重写为：

将圆偏振光从天空光中分离记为，并定义除圆偏振光以外的透过率函数：

可推导出场景的真实辐射强度的表达式：

根据偏振度的定义式已知[12]：

经过变换[1]可得：

代入场景的真实辐射强度的表达式可得：

求解真实辐射强度需要估算以下未知量：无穷远处天空光、差分辐射强度、天空光偏振度、直接反射光偏振度、以及圆偏振光辐射强度。

对于差分辐射强度、无穷远处天空光、天空光偏振度、直接反射光偏振度的计算不再赘述。值得一提的是，文献[1]利用硬件设备同时获得整幅图像中每个像素点的偏振度及光强值，可以利用下式直接求解差分辐射强度：

对于圆偏振光辐射强度。已知圆偏振光仅存在于天空光之中，传统的大气退化物理模型认为透过率函数不随传输距离改变，即天空光中的圆偏振成分恒定。根据偏振参量的定义，天空光区域内的平均圆偏振度为：

式中，为选取的天空区域的总像元数。进而可得图像中任意位置的圆偏振光：

对圆偏振光的估算的关键在于对天空区域的选取，选择不同的像元位置或不同的像元数量都会导致估算结果有细微的差别。为了得到更好的去雾效果，算法在这里引入参数以调节圆偏振度，即用来取代。

至此，五个未知量已经求出，可以得到场景的真实辐射强度，恢复无雾图像。

## 3.6 对比与总结

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 算法 | 待求未知量 | 算法简述 | 评价 |
| 基于偏振差分成像的去雾算法 | 天空光 无穷远处的天空光 | 使用偏振差分图像中的天空区域求出无穷远处天空光与天空光偏振度，进而求出天空光。 | 简单高效，旨在还原真实无雾图像。 |
| 基于偏振角估算特征参量的去雾算法 | 天空光 无穷远处的天空光 | 使用偏振角计算偏振组分光强，进一步求出天空光； 使用不依赖图像中的天空区域的方法估算无穷远处天空光。 | 不依赖图像中的天空区域； 受到场景透射光的影响更小。 |
| 考虑直接透射光偏振特性的去雾算法 | 天空光 无穷远处的天空光 差分强度 直接透射光偏振度 | 使用偏振差分图像计算出差分强度； 使用ICA求解直接透射光偏振度的最优值； 其他参数计算方法同上。 | 同时考虑目标和天空光的偏振特性，避免了颜色失真或局部色彩畸变。 |
| 基于全偏振信息的去雾算法 | 天空光 无穷远处的天空光 差分强度 直接透射光偏振度 圆偏振光辐射强度 | 使用图像中的天空区域计算平均圆偏振度，进而求出圆偏振光辐射强度； 其他参数计算方法同上。 | 考虑了包括大气光圆偏振分量在内的各种偏振分量，适应性更强，精确度更高。 |

# 4 基于偏振差分成像的去雾算法效果演示

原始图像（偏振与偏振）：





去雾效果：



# 参考文献

1. 张玉鑫. (2020). 基于全偏振信息探测的海空背景图像去雾关键技术研究 (Doctoral dissertation, 中国科学院大学).
2. Schechner, Y. Y., Narasimhan, S. G., & Nayar, S. K. (2001, December). Instant dehazing of images using polarization. In Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. CVPR 2001 (Vol. 1, pp. I-I). IEEE.
3. Schechner, Y. Y., Narasimhan, S. G., & Nayar, S. K. (2003). Polarization-based vision through haze. Applied optics, 42(3), 511-525.
4. Schechner, Y. Y., & Karpel, N. (2005). Recovery of underwater visibility and structure by polarization analysis. IEEE Journal of oceanic engineering, 30(3), 570-587.
5. Namer, E., Shwartz, S., & Schechner, Y. Y. (2009). Skyless polarimetric calibration and visibility enhancement. Optics express, 17(2), 472-493.
6. Liang, J., Ren, L., Ju, H., Zhang, W., & Qu, E. (2015). Polarimetric dehazing method for dense haze removal based on distribution analysis of angle of polarization. Optics express, 23(20), 26146-26157.
7. Shwartz, S., Namer, E., & Schechner, Y. Y. (2006, June). Blind haze separation. In 2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'06) (Vol. 2, pp. 1984-1991). IEEE.
8. 刘飞. (2016). 透混沌介质偏振成像技术 (Doctoral dissertation, 西安电子科技大学).
9. Fang, S., Xia, X., Huo, X., & Chen, C. (2014). Image dehazing using polarization effects of objects and airlight. Optics express, 22(16), 19523-19537.
10. Fattal, R. (2008). Single image dehazing. ACM transactions on graphics (TOG), 27(3), 1-9.
11. 方帅, 周明, 曹洋, 徐青山, 武鹏飞, & 王浩. (2011). 基于偏振测量的雾天图像场景分割.
12. 方帅, 夏秀山, 赵育坤, & 于磊. (2015). 利用偏振分析的雾天图像复原 (Doctoral dissertation).