

·测试、试验与仿真·

## 雨雾对白天测星影响分析

王 铎<sup>1,2</sup>, 韩艳丽<sup>2</sup>, 孙腾飞<sup>3</sup>

(1.92941部队, 辽宁 葫芦岛 125001; 2.海军航空工程学院, 山东 烟台 264001; 3.92819部队, 辽宁 大连 116600)

**摘要:** 白天恒星探测工作涉及到很多环境因素的影响, 现有文章对理想环境及云层存在时, 不同参数条件下的测星工作进行了分析, 除去主要影响因素云层外, 红外辐射在大气的传输过程中, 还有不确定因素雨、雾的影响。主要针对这两种不确定因素展开研究, 雨和雾的存在在时间、地域以及高度因素上都是不确定的, 结合已有的经验公式, 针对不同参数情况下的辐射衰减情况进行分析, 定量明确雨和雾对辐射传输的影响。

**关键词:** 尺寸分布; 衰减; 辐射; 近红外; 传输距离

中图分类号: TN215; TP301.6

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2013)-06-0074-03

## Analysis of Influence from Rain and Fog on Star Target Detection during Daytime

WANG Duo<sup>1,2</sup>, HAN Yan-li<sup>2</sup>, SUN Teng-fei<sup>3</sup>

(1. 92941 Army Unit, Huludao 125001, China; 2. Naval Aeronautical Engineering Institute, Yantai 264001, China;  
3. 92819 Army Unit, Dalian 116600, China)

**Abstract:** Star target detection is influenced by many environmental factors during daytime. Star target detection at the condition of different parameters is analyzed in an ideal environment and the presence of clouds. Infrared radiation is also influenced by uncertain factors such as rain and fog except the main influence factor such as clouds during the transmission in atmosphere. These two uncertain factors are researched. The presence time of rain and fog, place and height are all uncertain factors. Incorporating with the existing experience formulas, radiation attenuation states at the condition of different parameters are analyzed. The influence from rain and fog on radiation transmission is quantified.

**Key words:** size distribution; attenuation; radiation; near-infrared; transmission distance

现有文章<sup>[1]</sup>分析了不同情况下的白天测星工作, 各因素对测星带来的影响, 包括理想条件及主要的影响因素云层的影响下的分析, 白天的恒星探测工作涉及到很多不确定因素的影响, 除去主要影响因素云层外, 红外辐射在大气的传输过程中, 还有不确定因素雨、雾的影响。雨和雾的存在在时间、地域以及高度因素上都是不确定的, 分析这些因素对辐射衰减的影响程度对于白天测星工作意义重大。

### 1 雨对辐射衰减影响分析

雨滴的半径一般在 0.1~5 mm 之间, 要远大于近红外波长。雨滴的尺寸分布对于研究辐射在雨中传输的衰减有着极为重要的作用, 因此有必要先了解一下雨滴的尺寸分布特性。

#### 1.1 雨滴的尺寸分布函数

雨滴从云中落向地面时, 当阻力和重力相等时

收稿日期: 2013-08-14

基金项目: 国家 863 项目(2010AAJ140)资助

作者简介: 王铎(1986-), 男, 河南新郑人, 硕士研究生, 研究方向为天文导航; 韩艳丽(1965-), 女, 教授, 硕士研究生导师, 研究方向为图像处理、天文导航与光电技术; 孙腾飞(1985-), 男, 助理工程师, 研究方向为图像处理。

做匀速运动,此时的雨滴速度被称为最终下落速度, Gunn 和 Kinzer<sup>[2]</sup>经研究给出了较为全面的雨滴最终下落速度模型,如式(1)所示

$$v(D) = \begin{cases} 28D^2 & D \leq 0.075 \text{ mm} \\ 4.5D - 0.18 & 0.075 \text{ mm} < D \leq 0.5 \text{ mm} \\ 4D + 0.07 & 0.5 \text{ mm} < D < 1 \text{ mm} \\ -0.425D^2 + 3.695D + 0.8 & 1 \text{ mm} < D < 3.6 \text{ mm} \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $D$  代表雨滴直径。雨滴形状与其尺寸大小有关,最小雨滴类似于云中的微小水滴,最大的雨滴通常不超过 4 mm,因为当其半径大于 4 mm 时,雨滴会发生破裂,分解成更小的水滴,因此式(1)中的雨滴半径分布上限取 3.6 mm。

雨滴谱表示对应不同半径的雨滴个数的分布。实际中雨粒子的尺度复杂多变,随地域、大气底层状态和降水云层的类型而不同。相关研究指出<sup>[3]</sup>,雨滴谱分布通常呈指数分布。1895年, Wiesner 使用“吸水纸法”对雨滴谱进行了测量<sup>[4]</sup>,1943年, Laws 和 Parsons 等人使用“面粉法”<sup>[5]</sup>测得经典的 LP 雨滴谱分布模型,1948年, Marshall 和 Palmer 等结合 Laws 和 Parsons 的结论,在实验的基础上提出一个负指数模型, MP 雨滴谱分布为

$$n(D) = N_0 \exp(-4.1R^{0.21}D) \quad (2)$$

其中,  $D$  为雨滴的等效直径 (mm),  $N_0 = 8 \times 10^3 \text{ m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}$ ;  $R$  是降水量,单位为  $\text{mmh}^{-1}$ 。

Joss 和 Waldvogel 等人在 1967 年研制了雨滴测量器,利用这个仪器对毛毛雨和暴雨的雨滴谱分布 JD 和 JT 进行了统计<sup>[6]</sup>,二者的方程和 MP 分布除了参数略有不同,基本是一样的,Takeuchi<sup>[7]</sup>和 Ulbrich<sup>[8]</sup>针对 MP 分布,引入形状因子,进而得到 Gamma 分布。Wolf<sup>[9]</sup>在考虑降雨强度的基础上,对 Gamma 分布进行改进,如式(3)所示

$$n(D) = N_0 D^u \exp(-KD) \quad (3)$$

式中,  $K = 5.38R^{-0.186}$ ,此时  $N_0 = 1.98 \times 10^4 \text{ m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。

文献[10]经过对比各种分布模型后指出,韦布分布模型的一个通用形式对于任何一个地区都适用,其表达式如下

$$M_g(D) = 2.13 \frac{M_{gt}}{D_0} \left(\frac{D}{D_0}\right)^2 \exp\left[-0.71\left(\frac{D}{D_0}\right)^3\right] \quad (4)$$

其中,  $M_g(D)$  表示单位平米地面、单位时间内(s)降落的直径为  $D$  的雨滴总数,依据经验  $M_{gt}(D) = 154\sqrt{R}$ ,  $D_0 = aR^b \exp(-cR)$ ,代表雨滴平

均直径,参数  $a$ 、 $b$ 、 $c$  的取值与地理位置有关,最常用的取值为  $a=0.941$ ,  $b=0.336$ ,  $c=4.71 \times 10^{-3}$ 。雨滴尺寸分布可用单位立方米空气中直径在  $D$  和  $(D+dD)$  间雨滴数目近似代替,其值由于无法测量,可通过下式获得

$$n(D) = M_g(D)/v(D) \quad (5)$$

式中,各参数如前。雨滴尺寸分布随降水量不同而有很大的变化,各种降水量的雨型如下,微雨:0.25 mm/h,小雨:1 mm/h,中雨:4 mm/h,大雨:16 mm/h,暴雨:100 mm/h。

## 1.2 雨滴的衰减作用

由于雨滴的尺寸在 0.1~5 mm,远远大于近红外波长,因此 Mie 散射理论不再适用。不同波段的光在雨中传输时,其能量的衰减与传输距离密切相关,考虑雨滴的遮挡作用导致的光的衰减,假设雨滴大小相同,均为平均直径大小,最终下落速度也相同,那么一个光在雨中传输的衰减计算公式为

$$L'_R = 0.35R^{\frac{3}{5}} \left| 1 + 0.041R^{\frac{2}{5}} \right| \quad (6)$$

其中,  $R$  为降水量,此曲线被称为  $J$  曲线。

在降水量较大时(例如大于 100 mm/h),  $J$  曲线已经不能正确反应衰减的变化情况,因为在实际情况下,雨滴的大小和速度都是随机分布的。

不同波长的入射辐射在雨中传输时,随着距离的增大而减小。根据朗伯比尔定律,某一波长的辐射在雨滴中的透射率可表示为<sup>[11]</sup>

$$\tau_\lambda = \exp[-A(\lambda)L] \quad (7)$$

其中,  $A(\lambda)$  是衰减系数。研究表明,从可见光波段到约 10  $\mu\text{m}$  的远红外波段,雨滴引起的辐射衰减与波长的关系不明显。经常使用式(8)来计算雨滴的衰减系数。

$$A = 4.343 \times 10^3 \times 0.25 \times \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} \pi D^2 Q_{ext}(x, m) n(D) dD \quad (8)$$

其中,  $D_{\min}$  和  $D_{\max}$  分别为雨滴的最小直径和最大直径,  $Q_{ext}(x, m)$  是球形雨滴总的衰减截面,由于雨滴半径在 50  $\mu\text{m}$ ~5 mm 之间,要远远大于近红外波长,因此可近似认为  $Q_{ext}(x, m) = 2$ 。

## 1.3 雨滴对辐射的衰减效果

根据式(8),在不同的降水量时,计算得到辐射在雨中传输时与传输距离的关系,雨滴平均半径取值相同,其结果如图 1 所示。

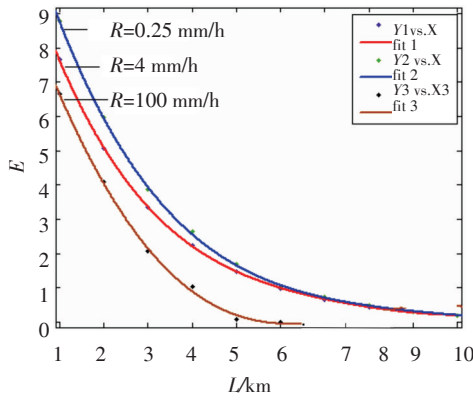


图1 雨中辐射传输与传输距离的关系

从图1中可以看出,随着传输距离的增大,辐射的衰减也越来越大,这是因为在较长的传输距离时,辐射经过的雨滴衰减作用明显,并且不同的降水量时,辐射的衰减作用也有所差别。毛毛雨时衰减速度最慢,暴雨时由于雨滴的强烈遮挡作用,经过一定的传输距离后,红外辐射基本无法传输。

## 2 雾对白天测星的影响

雾是悬浮在近地面空气中缓慢沉降的微小水滴或冰晶等组成的一种胶体系统,是近地面层空气中水汽凝结的产物<sup>[12]</sup>,能见度通常小于1 km。根据能见度  $V_S$  的不同,雾可以划分为重雾 ( $V_S < 50$  m)、浓雾 ( $50 \text{ m} < V_S < 1000$  m)、大雾、轻雾或霭 ( $V_S > 1$  km)。

### 2.1 雾滴的尺寸分布

对于雾粒子的研究,比其他气溶胶要困难很多,因为雾的粒子分布随时间、地域有很大的不同。观测表明,雾的半径一般在  $1 \sim 60 \mu\text{m}$  之间,能见度大于100 m时,其半径大多小于  $8 \mu\text{m}$ ,根据地域和雾的形成机理,一般将雾分为两大类:平流雾(海雾)和辐射雾(内陆)。目前使用最多的雾滴尺寸分布仍是广义Gamma分布,具体表达如下

$$n(r) = ar^\alpha \exp[-br^\beta] \quad (9)$$

其中,  $r$  表示雾滴半径(m),  $a$ 、 $b$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$  是雾滴尺寸分布的参数。使用最多的是  $\alpha=2$ ,  $\beta=1$  的 Khra-gian-Mazin 模型。雾滴的半径经常使用微米计算,在此条件下,结合能见度与雾滴含水量的关系,可以得

到雾滴尺寸分布如下。

平流雾

$$n(r) = 1.059 \times 10^7 V_S^{1.15} r^2 \exp \cdot (-0.8359 V_S^{0.43} r) \text{ m}^{-3} \mu\text{m}^{-1} \quad (10)$$

辐射雾

$$n(r) = 3.104 \times 10^{10} V_S^{1.72} r^2 \exp \cdot (-4.122 V_S^{0.54} r) \text{ m}^{-3} \mu\text{m}^{-1} \quad (11)$$

### 2.2 雾滴散射的近似计算

雾滴可看作是球形粒子,据此雾的消光系数为

$$\beta_{ext}(\lambda) = \int_{r_1}^{r_2} \pi r^2 [Q_{ext}(x, m)] n(r) dr = \int_{r_1}^{r_2} \pi r^2 [Q_{scat}(x, m) + Q_{abs}(x, m)] n(r) dr \quad (12)$$

其中,  $r_1$ 、 $r_2$  分别是粒子半径的上限和下限;  $Q_{abs}$  和  $Q_{scat}$  分别为吸收效率因子和散射效率因子,二者均是尺度参数 ( $x = \frac{2\pi r}{\lambda}$ ) 和粒子复折射率  $m$  (分为实部  $m_r$  和虚部  $m_i$ ) 的函数。根据 Mie 散射理论, Van de 和 Hulst<sup>[13]</sup> 提出近似的计算方法,表达式如下

$$Q_{ext}(x, m) = 2 - 4 \exp(-\alpha \tan \beta) \frac{\cos \beta}{\alpha} \sin(\alpha - \beta) + 4 \cos^2(\beta/\alpha) [\cos(2\beta) - \cos(\alpha - 2\beta) \exp(-\alpha \tan \beta)] \quad (13)$$

其中,  $\alpha = 2x(m_r - 1)$ ;  $\beta = \tan^{-1} \frac{m_i}{m_r - 1}$ 。

### 2.3 雾对辐射的衰减效果

利用朗伯比尔定律,可以得到红外光谱在雾中传输时,辐射的衰减为

$$E = E_0 \exp[-\int_0^L \int_{r_1}^{r_2} n(r) Q_{ext}(\lambda, r) dr dL] \quad (r \geq \lambda) \quad (14)$$

其中,  $E_0$  为目标辐射量,  $E$  为衰减后的辐射量。根据这个公式,以平流雾为例,在不同的雾的能见度情况下,对  $H$ -波段红外辐射的衰减变化进行简要分析,如图2所示。

可以看出,随着传输距离的增大,雾对辐射的衰减作用显得越来越明显,而在不同的能见度情况下,辐射衰减的速度也不一样,能见度较大的雾比能见度较小的雾的衰减作用要弱一些。

(下转第80页)

## 参考文献

- [1] 雷敏,王志中,马勤弟,等. 薄膜热电偶的动态特性及动态补偿研究[J]. 仪器仪表学报,1999,20(3): 183-186.
- [2] 马勤弟,雷敏. 薄膜热电偶的动态校准及辨识建模[J]. 仪器仪表学报,1999,20(3): 300-302.
- [3] 孟宪文. 瞬态表面温度传感器动态测量误差补偿技术研究[D]. 太原:中北大学,2007.
- [4] 郝晓剑,李科杰,周汉昌,等. 热电偶动态测量误差补偿技术研究[J]. 中北大学学报(自然科学版),2008,29(4): 370-375.
- [5] 郝晓剑. 瞬态表面高温测量与动态校准技术研究[D]. 太

原:中北大学,2005.

- [6] 郝晓剑,李科杰,刘健,等. 基于CO<sub>2</sub>激光器的温度传感器可溯源动态校准[J]. 兵工学报,2009,30(2):156-159.
- [7] 黄亮. 瞬态表面温度传感器动态校准技术研究[D]. 太原:中北大学,2007.
- [8] 赵阳. 传感器的非线性校正及动态补偿研究[D]. 上海:上海交通大学,2007.
- [9] 易伟建,刘翔. 动力系统模型阶次的确定[J]. 振动与冲击,2008,27(11):13-16.
- [10] 刘清,曹国华. 基于微粒子群算法优化的微硅加速度传感器动态补偿研究[J]. 仪器仪表学报,2006,27(12): 1707-1710.

(上接第76页)

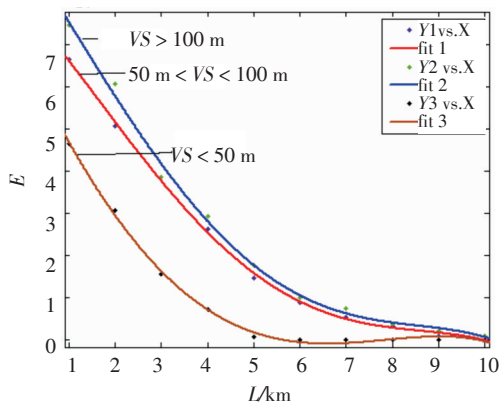


图2 雾中辐射传输衰减与距离的关系

## 3 结束语

除云层以外,红外辐射在传输过程中还会受到雾和雨的影响,结合前人的经验公式,分别分析了雨滴和雾滴的粒子尺度分布,并使用雨和雾对辐射传输的衰减公式进行了计算。计算结果显示,雨的衰减作用随辐射传输距离增大而增大,不同降水量时其衰减速率不同;雾的衰减作用随着传输距离的增大越来越明显,不同的能见度下,衰减的速度也不一样,能见度较大的雾比能见度较小的雾的衰减作用要弱一些。

## 参考文献

- [1] 韩艳丽,王铎,郭少军,等. 近红外白天恒星探测对比度分析[J]. 应用光学,2012,33(5):969-973.
- [2] Gunn R, Kinzer G D. Terminal velocity of water droplets in stagnant air[J]. J Meteor, 1949,6(4):243-248.
- [3] 陈宝君,李子华,刘吉成. 气象学报,1998(56):506.
- [4] Oguclu T. Proceeding of the IEEE 1983,71:1029.
- [5] Laws J O, Parsons D A. Trans. Am. Geophys. Unio, 1943,24: 452.
- [6] Joss J, Thames J C, Waldvogel A. Proc. Internat. Conf. on Cloud Physics, 1968:369.
- [7] Keuchi D M. Preprints of Conf. Cloud Physics and Atmospheric Electricity Amer[J]. Meteor. Soc, 1978:154.
- [8] Ulbrich C W. Preprints of 20th Conf[J]. Radar Meteorology Amer. Meteor. Soc 1981: 276.
- [9] Wolf D A. Radio Science,2001,36:639.
- [10] Brussaard G, Watson P A. Atmospheric Modeling and Millimeter Wave Propagation [M]. London: Chapman & Hall, 1995:285-296.
- [11] 贾建周,宋德安,贾仁耀,等. 激光大气传输衰减的估算方法[J]. 电子信息对抗技术,2010,25(4):73-76.
- [12] 李娣,陈辉. 激光大气传输的雨雾衰减特性研究[J]. 电子设计工程,2011,19(9):1-5.
- [13] Van de Hulst H C. Light Scattering by Small Particles[M]. New York: John Wiley & Sons, 1957:179.