

雨雾共存天气下大气衰减计算的修正模型

刘敏^{1,2} 王红星^{1,2} 王倩¹ 徐建武^{1,2} 赵昕³

(¹ 海军航空工程学院, 山东 烟台 264001;
² 山东省信号与信息处理重点实验室, 山东 烟台 264001; ³ 94129 部队, 甘肃 武威 733003)

摘要 针对雨雾共存的特殊天气条件下大气衰减计算模型误差较大的问题,由雨雾天气的物理现象入手,对现有模型进行修正,提出更为精确、合理的大气衰减计算模型,并采用该模型对无线光通信系统的链路余量进行仿真分析。结果表明,采用已有的理论模型计算将引入较大的系统误差,而修正的计算模型更加精确。提出的修正模型和分析结论对无线光通信及其他相关领域中大气衰减的估计和评价具有重要指导意义。

关键词 无线光通信;大气衰减;雨雾;能见度;链路余量

中图分类号 O436.2; TN929.12 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.1005002

A Revision Model of the Calculation of Atmospheric Attenuation in Water Fogs Weather

Liu Min^{1,2} Wang Hongxing^{1,2} Wang Qian¹ Xu Jianwu^{1,2} Zhao Xin³

¹ Navy Aeronautical Engineering University, Yantai, Shandong 264001, China
² Key Laboratory on Signal and Information Processing of Shandong Province, Yantai, Shandong 264001, China
³ Unit 94127 of PLA, Wuwei, Gansu 73303, China

Abstract For the problem of the big errors in the calculation of atmospheric attenuation under water fog weather, starting from the physical phenomena of water fogs weather, through the revision of the existing model, a more precise and reasonable model was proposed. And using the proposed model, the performance of free space optical (FSO) communication system was analyzed, the simulated results pointed out that the relative errors caused by the existing model can't be ignored. The work can provide a theoretical basis for the evaluation and estimation of FSO communication system and other related domain in water fogs weather.

Key words free space optical communication; atmospheric attenuation; water fogs; visibility; link margin

OCIS codes 010.1300; 140.3295; 060.4510

1 引言

雨雾天气是一种比较特殊的大气现象,雨雾天气的雨量不大,一般小于 3 mm/h^[1]。这是由于,雨量较大时,雨滴会对雾滴产生清除作用,共存现象消失^[2]。与同期观测到的辐射雾和平流雾相比,雨雾共存天气的持续时间较短,能见度较高,一般在 1000 m 左右^[3]。实验观测表明,雨雾共存的天气现象时有发生^[1~5],而且多出现在冬春季节的连阴雨

时段^[4,5]。

在无线光通信等领域中,发射激光在雨雾共存天气中传输,不仅要受到雨的衰减,还要受到雾的衰减,而且雾的衰减通常比雨大。因此,有必要将雨雾共存天气作为一种单独的天气现象加以研究。已有多篇文献对雨雾共存天气下的衰减模型进行了研究。例如文献^[6,7]直接将传统的计算雨天和雾天^[8]大气衰减的方法引入,提出了雨雾共存时红外

收稿日期: 2011-04-29; **收到修改稿日期**: 2011-05-30

基金项目: 山东省泰山学者专项基金资助课题。

作者简介: 刘敏(1983—),女,博士研究生,主要从事光通信信道模型方面的研究。E-mail: liumin05@163.com

导师简介: 王红星(1962—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事现代通信技术方面的研究。

E-mail: buaawhx@163.com

波段大气衰减的简易计算方法,并进行了实例计算。但是这种直接将雨衰减和雾衰减进行线性相加的方法,在理论上并不严谨。针对已有衰减模型的不足,本文从雨雾现象的物理特征和基本原理出发,在已有模型的基础上进行修正和改进,提出一种计算雨雾共存天气下大气衰减的精确模型,给出了计算方法和步骤,并结合对无线光通信系统链路余量的分析,来说明两种模型的差异。

2 雨雾共存天气下的大气衰减模型

2.1 已有模型分析

激光在近地大气中传输受到的衰减主要包括:大气分子的吸收,大气分子的散射,霾、雾、雨和雪等气溶胶粒子的衰减。对于红外波段激光而言,大气分子的散射可以忽略不计,对于近地红外波段激光而言,最活跃的吸收分子是水气和二氧化碳^[8]。因此,红外波段激光在近地大气中所受到的总衰减可以表示为^[7]

$$\mu = \mu_{\text{H}_2\text{O}} + \mu_{\text{CO}_2} + \mu_{\text{P}}, \quad (1)$$

式中 μ 为激光在近地大气中传输受到的总衰减系数; $\mu_{\text{H}_2\text{O}}$ 、 μ_{CO_2} 分别为水气和二氧化碳的吸收系数,可以利用文献[8]提到的方法得到; μ_{P} 为霾、雾、雨和雪等气溶胶粒子引起的衰减系数,常常利用气象参数通过经验模型计算得到^[9]。

借鉴(1)式,路远等^[6,8,10]提出了雨雾共存天气下大气衰减的简易计算方法:

$$\mu = \mu_{\text{H}_2\text{O}} + \mu_{\text{CO}_2} + \mu_{\text{S}} + \mu_{\text{r}}, \quad (2)$$

式中 μ_{r} 为雨粒子引起的衰减,与降水强度有关,

$$\mu_{\text{r}} = a \times J^b, \quad (3)$$

a 、 b 为模型参数,各个地区的取值不同^[11]; μ_{S} 为雾粒子引起的衰减,与能见度有关^[12],

$$\mu_{\text{S}} = \frac{3.912}{V} \left(\frac{0.55}{\lambda} \right)^q, \quad (4)$$

V 为大气能见度, λ 为激光波长, q 为波长修正因子,根据能见度的不同取不同的值:

$$q = \begin{cases} 0.585V^{\frac{1}{3}} & V \leq 6 \text{ km} \\ 1.3 & \text{平均能见度} \\ 1.6 & \text{能见度特别良好} \end{cases}$$

从(2)式来讲,大气的衰减是将雨的衰减和雾的衰减相加,这一点毫无疑问。问题的关键在于,雨雾共存天气下,能见度测量仪测量的能见度是雨和雾共同作用下产生的。根据能见度测量原理可知,能见度仪的直接测量实际是其工作波段激光在大气中

传播的透射率,其显示的能见度是利用(4)式计算得到的^[13,14]。而雨雾共存天气下,由于大气中既存在雾,又存在雨,测量的透射率是雾和雨共同影响的结果,直接利用(4)式计算雨雾共存天气雾粒子引起的衰减存在两个误差因素:

1) 经验公式错误引起的误差。(4)式只适用于计算雾、霾引起的衰减,而雨雾共存天气下测量的透射率还包括雨的衰减,不能直接利用(4)式计算所需波段激光受到的雾粒子的衰减。

2) 雨衰减重复计算带来的误差。在计算 μ_{S} 的过程中本来就包含了雨衰减部分,在计算 μ_{r} 时又将雨衰减单独考虑,必然会引入重复计算的误差。

2.2 修正模型

综上所述,有必要对(2)式中 μ_{S} 的计算模型进行修正。根据 2.1 节的分析结论,关键问题是将雨衰减部分从能见度计算雾衰减的过程中剔除,具体的步骤为:

1) 根据雨雾共存天气下能见度仪测量的能见度值 V' ,计算出能见度仪工作波段激光所受的气溶胶衰减为

$$\mu'_{\text{c}} = \frac{3.912}{V'} \left(\frac{1.55}{\lambda'_c} \right)^q, \quad (5)$$

式中 λ'_c 为能见度仪工作波长;

2) 根据雨雾共存天气下测量得到的降雨强度计算出雨的衰减 μ_{r} ;

3) 能见度仪工作波段激光受到的雾衰减为

$$\mu'_{\text{Sc}} = \mu'_{\text{c}} - \mu_{\text{r}}; \quad (6)$$

4) 根据(4)式中波长和衰减成反比的关系,反演得到所需波段(λ')激光所受的雾衰减 μ'_{S} :

$$\frac{\mu'_{\text{S}}}{\mu'_{\text{Sc}}} = \left(\frac{\lambda'_c}{\lambda'} \right)^q; \quad (7)$$

5) 将各种因素引起的衰减相加,即可得到所需波段激光所受的总的大气衰减为

$$\mu' = \mu_{\text{H}_2\text{O}} + \mu_{\text{CO}_2} + \mu'_{\text{S}} + \mu_{\text{r}}, \quad (8)$$

式中

$$\mu'_{\text{S}} = \left(\frac{\lambda'_c}{\lambda'} \right)^q \cdot (\mu'_{\text{c}} - \mu_{\text{r}}). \quad (9)$$

(3)、(8)和(9)式共同组成本文提出的雨雾共存天气下大气衰减的计算模型。当降雨强度为 0(即 $\mu_{\text{r}}=0$)时,(8)式就等同于雾天大气衰减的模型;而当大气中只有雨粒子时,能见度仪的衰减完全由雨衰减引起,即 $\mu'_{\text{c}} - \mu_{\text{r}}$,此时(8)式等同于雨天大气衰减的计算模型。

3 仿真分析

3.1 链路余量模型

为了比较分析已有模型和本文提出的修正模型的差异,对无线光通信系统性能进行分析。

忽略湍流的影响,无线光通信系统所受到的衰减由大气衰减和几何衰减两部分组成,接收端接收到的功率为^[15]

$$P_R = P_T \cdot \left(\frac{d_R}{d_T + \theta L} \right) \cdot \exp(-\mu L), \quad (10)$$

式中 P_T 为发射功率, d_T 和 d_R 分别为发射和接收望远镜直径, θ 为光束发散角, L 为传输距离。常用链路余量来表征无线光通信系统的性能:

$$M_{LM} = 10 \lg \frac{P_R}{S}, \quad (11)$$

式中 S 表征接收机的灵敏度,即接收机能感应到的最小光功率, S, θ, d_T, d_R 和 P_T 都是无线光通信设备的固有参数,取决于产品型号。

3.2 仿真和分析

假设某地某时测量得到的空气温度为 15°C ,相对湿度为 100% ,利用文献[6]查表得到: $\mu_{\text{H}_2\text{O}} \approx 0.0136 \text{ km}^{-1}$, $\mu_{\text{CO}_2} \approx 0.007 \text{ km}^{-1}$;降雨强度模型中,取 $a=b=0.66$ ^[10];能见度仪工作波长为 940 nm ;无线光通信设备的参数如表 1 所示。

表 1 系统仿真参数

Table 1 Parameters of the simulation

Parameters	Values
Wavelength /nm	1550, 1060, 850
Divergence angle /mrad	2
Emitting power /mW	100
Aperture diameter /mm	100
Receiver sensitivity /dBm	-34
Distance /km	4

若降雨强度为 1.5 mm/h ,图 1 为两种模型计算的链路余量与能见度测量值的关系;若测量的能见度值为 1 km ,图 2 为两种模型下计算的链路余量与降雨量测量值的关系(EM 表示现有模型;NM 表示修正模型)。根据仿真结果可以看出:

1) 修正模型计算的大气衰减比现有理论模型要小,因此相应的链路余量较传统计算方法要大,这说明现有理论模型会低估通信系统的性能。

2) 能见度测量值越大,激光在雨雾共存天气中传输受到的衰减越小,因此链路余量也越大。这是由于,测量的能见度值反映的是测量波段(这里为 940 nm)激光在雨雾共存天气中所受的气溶胶衰减值,其大小反映大气情况的好坏,能见度越大,说明

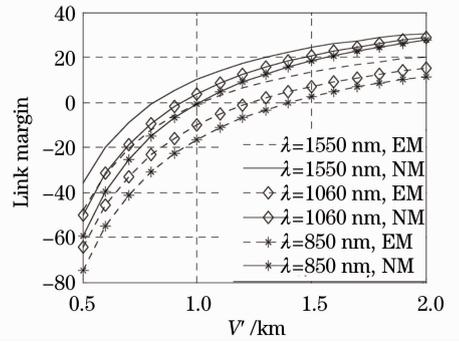


图 1 链路余量与能见度测量值间的关系

Fig. 1 Relations between link margin and measured visibility

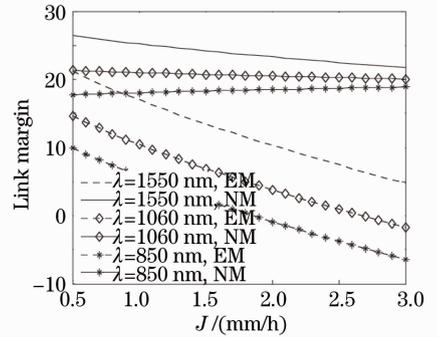


图 2 链路余量与降雨量测量值的关系

Fig. 2 Relations between link margin and measured rainfall

大气情况相对越好,那么其他任何红外波段激光在其中传输所受到的大气衰减也越小。

3) 修正模型计算链路余量随降雨量的变化相比现有模型计算结果要小。这是由于,雾的衰减比雨大,雨雾共存天气,雨量的变化对于大气衰减的影响相对于总的衰减很少。

4) 当降雨量接近于 3 mm/h 时,修正模型下不同波长的仿真曲线趋于一致。而理论上,随着降雨量的增大,大气中的雾会慢慢变少,直至大气中完全存在着雨,而雨天的大气衰减仅与降雨量有关,与波长无关。从这一点看,本文提出的模型计算结果与雨衰减的经验理论一致,在一定程度上证明了所提出的模型的正确性。

5) 用现有模型得到链路余量随着降雨量的增大而降低,但是本文提出的模型只在 1550 nm 和 1060 nm 波段时有类似的情况,在 850 nm 时,链路余量反而随着降雨量的增大而减少。这与“降雨引起的衰减与降雨强度成正比”的理论并不矛盾,这里的链路余量反映的是整个大气的衰减,因此这种反比的现象主要是由于雾的计算引起的,其总的衰减还是不变的,而且这种反比现象出现在通信波段比测

量波段小的情况下。因此,这种不同仅仅是由于测量仪器的不同引起的,与雨衰减的经典理论并不矛盾。

综上所述,在对雨雾天气下的通信系统性能进行分析时,采用合理的计算模型是必不可少的,图2中可以明显看出两种模型计算带来的差异,随着降

雨量的不断增大,差异越来越大,这是因为降雨量越大,雨衰减越大,现有计算模型中重复计算部分在总的大气衰减中所占的比重越大,误差也就越大。表2列出了几种情况下计算的链路余量的相对误差。

表2 不同降雨量下的计算相对误差($V'=1.5\text{ km},\lambda=1550\text{ nm}$)

Table 2 Relative error under different rainfall intensity ($V'=1.5\text{ km},\lambda=1550\text{ nm}$)

Rainfall intensity / (mm/h)	0.5	0.8	1.6	2.0	2.5	3
Existing model	21.2	18.6	12.8	10.3	7.5	4.8
Proposed model	26.4	25.6	24.0	23.3	22.5	21.7
Relative error / %	19.7	27.6	46.6	55.6	66.8	78

可以看出,随着降雨量的增大,现有计算模型带来的误差越来越大,甚至能达到50%以上。这主要是由于其将雨引起的衰减用雾衰减的经验公式和雨衰减的经验公式计算了两次而引入的误差。因此在无线光通信等应用中,现有的计算模型会带来较大的性能分析差异,对实际的系统设计和评估产生不可忽略的错误影响。

4 结 论

从大气衰减的基本原理出发,对雨雾共存天气条件下激光在大气中传输的衰减效应进行了研究,指出了现有理论模型在计算雨雾共存天气下的大气衰减时会引入重复计算的误差。针对该问题,提出了一种计算雨雾共存天气下大气衰减的修正模型。通过对无线光通信系统的链路性能进行仿真分析,在一定程度上验证了所提出模型的合理性,最后通过误差分析指出现有的理论模型应用于FSO通信系统中将引入较大的误差。

本文提出的计算模型和分析结论对无线光通信及其他相关领域中大气衰减的估计和评价具有重要指导意义。虽然从理论分析的角度,在一定程度上验证了所提出模型的合理性,但仍然需要进行大量的实验分析和验证。

参 考 文 献

- Wei Heli, Liu Qinghong, Song Zhengfang. Extinction of infrared radiation by rain[J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 1997, **16**(6): 418~423
魏合理,刘庆红,宋正方. 红外辐射在雨中的衰减[J]. *红外与毫米波学报*, 1997, **16**(6): 418~423
- Yan Wenlian, Liu Duanyang, Pu Meijuan *et al.*. Formation and structure characteristics of precipitation fog in Nanjing [J]. *Meteorological Monthly*, 2010, **36**(10): 29~36
严文莲,刘端阳,濮梅娟等. 南京地区雨雾的形成及其结构特征[J]. *气象*, 2010, **36**(10): 29~36
- Liang Yangang, Hu Wenzhi, Yang Jingji. A study on the

- relationship among visibility, atmospheric suspended particulate concentration and meteorological in Hong Kong [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2008, **66**(3): 461~469
梁延刚,胡文志,杨敬基. 香港能见度、大气悬浮粒子浓度与气象条件的关系[J]. *气象学报*, 2008, **66**(3): 461~469
- Wei Gening. Can rain and fog coexist [J]. *J. Guangxi Meteorology*, 1987, (4): 32
韦革宇. 雨和雾能否同时并存[J]. *广西气象*, 1987, (4): 32
- Liu De, Zhou Guobing, Xiang Bo *et al.*. Cause analysis of fog formation in Chongqing [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2004, **32**(6): 461~466
刘德,周国兵,向波等. 重庆雾的天气成因[J]. *气象科技*, 2004, **32**(6): 461~466
- Zhang Mingping, Zhang Jingxian, Li Yudan. Night Vision System [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1993. 72~96
张鸣平,张敬贤,李玉丹. 夜视系统[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1993. 72~96
- Lu Yuan, Ling Yongshun. The simple method to calculate the atmosphere transmittance of infrared radiation [J]. *Infrared Technology*, 2003, **25**(5): 45~49
路远,凌永顺. 红外辐射大气透射比的简易计算[J]. *红外技术*, 2003, **25**(5): 45~49
- Zhou Guohui, Liu Xiangwei, Xu Jiwei. A math model of calculate the atmospheric transmittance of infrared radiation[J]. *Infrared Technology*, 2008, **30**(6): 331~334
周国辉,刘湘伟,徐记伟. 一种计算红外辐射大气透射率的数学模型[J]. *红外技术*, 2008, **30**(6): 331~334
- Han Cheng, Bai Baoxing, Yang Huamin *et al.*. Study and simulation of air influences on laser pulse transmission delay time [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2046~2050
韩成,白宝兴,杨华民等. 大气信道对激光脉冲延迟时间影响的仿真研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2046~2050
- Lu Yuan. Simple method to calculate the atmosphere transmittance of infrared radiation on slanting route[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(suppl.): 423~426
路远. 斜程红外辐射大气透射率的简易计算[J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(增刊): 423~426
- Ke Xizheng, Yang Lihong, Ma Dongdong. Transmitted attenuation of laser signal in rain [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(6): 1021~1024
柯熙政,杨利红,马冬冬. 激光信号在雨中的传输衰减[J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(6): 1021~1024
- Zhao Taifei, Feng Yanling, Ke Xizheng *et al.*. Research on the coverage area of communication in the solar-blind UV communication network[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2229~2235
赵太飞,冯艳玲,柯熙政等. “日盲”紫外光通信网络中节点覆盖

- 范围研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(8): 2229~2235
- 13 Yuan Lin, Liu Bo, Wang Bangxin *et al.*. Design of mobile 1064 nm Mie scattering lidar[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(7): 1721~1725
袁 林, 刘 博, 王邦新 等. 车载式 1064 nm 米氏散射激光雷达的研制[J]. 中国激光, 2010, **37**(7): 1721~1725
- 14 Rao Ruizhong. Vision through atmosphere and atmospheric visibility[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2486~2492
饶瑞中. 大气中的视觉和大气能见度[J]. 光学学报, 2010, **30**(9): 2486~2492
- 15 Hennes Henniger, Otakar Wilfert. An introduction to free-space optical communications[J]. *Radio Engineering*, 2010, **19**(2): 203~211