

蓝绿激光通信空地下行链路性能分析

李松朗¹,毛忠阳^{1*},刘传辉¹,刘敏¹,黄睿鑫²

(1. 海军航空大学,山东烟台264001;2. 91910部队通信保障室,辽宁大连116000)

摘要:为了给蓝绿激光通信系统提供设计依据,采用中纬度地区标准大气衰减模型,结合大气衰减、几何衰减与大气湍流,分析了天气现象、湍流强度、发散角与接收孔径对链路余量、信噪比和误码率的影响。分析结果表明:在外界环境确定时,链路余量和发散角与接收孔径都有关,信噪比和误码率只与接收孔径有明显关系。同时,晴天、发散角越小和接收孔径越大,链路余量越大;湍流强度越弱,接收孔径越大,信噪比越大,误码率越小。

关键词:无线光通信;大气信道;链路余量;误码率;蓝绿激光通信

中图分类号:TN929.12 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-5561(2019)11-0033-04

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.11.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Performance analysis of blue-green laser communication air-ground downlink

LI Songlang¹, MAO Zhongyang^{1*}, LIU Chuanhui¹, LIU Min¹, HUANG Ruixin²

(1. Naval Aviation University, Yantai Shandong 264001, China; 2. Army communications support room 91910, Dalian Liaoning 116000, China)

Abstract: In order to provide design basis for blue-green laser communication system, a standard atmospheric attenuation model in mid-latitude region was used to analyze the effects of weather phenomena, turbulence intensity, divergence angle and receiving aperture on link margin, signal-to-noise ratio and bit error rate, combined with atmospheric attenuation, geometric attenuation and atmospheric turbulence. The analysis results show that the link margin is related to divergence angle and receiving aperture, while the signal-to-noise ratio and bit error rate are only related to receiving aperture. At the same time, on sunny days, the smaller the divergence angle and the larger the receiving aperture, the larger the link margin is; the weaker the turbulence intensity, the larger the receiving aperture, the larger the SNR is and the smaller the bit error rate is.

Key words: wireless optical communication; atmospheric channel; link margin; bit error rate; blue-green laser communication

0 引言

蓝绿激光在水下损耗小,是实现空中和水下目标通信的有效手段^[1],主要应用于机载或星载与水下航行器之间的通信,通信速率可达到千比特率级;其信道比自由空间光通信信道更为复杂。

在现有无线光通信大气信道的分析中,水平链路

和斜程链路的分析较为丰富,有详细的光路衰减和误码率模型^[2,3],但由于不涉及水下通信,所以主要是红外和紫外波段,而对蓝绿激光大气信道的分析主要是蒙特卡洛仿真法。甄洁等人分析了激光通过云层后的脉冲展宽^[4]。詹恩奇等人分析了光在大气信道中传输多径效应^[5]。魏安海和曹瑞卿分析了光脉冲展宽及到达角分布^[6,7]。何谷强仿真了不同云与气溶胶对光的散射^[8]。杨虹仿真了激光在云层中的多次散射^[9]。胡秀寒等人分析了云的高度和厚度对激光下行传输的影响^[10]。但这些研究主要集中在光学特性的研究,并未计算激光经过大气信道后的通信性能以及收发端的参数对通信性能的影响。因此,本文在已有光学特性研究的基础上,研究蓝绿激光经过大气信道后的链路余量、信噪比与误码率,并分析在不同天气现象、不同湍流强度时的发散角与接收孔径对通信性能的影响。

收稿日期:2019-05-15。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(6170012154)资助;山东省“泰山学者”建设工程专项经费基金资助项目(ts20081130)资助。

作者简介:李松朗(1995-),女,河北唐山人,硕士研究生,现就读于海军航空大学电子与通信工程专业,研究方向为无线光通信,包括蓝绿激光通信信道模型、海上无线光信道测试等,参与近海水平及斜程衰减系数测量工作。

***通信作者:**毛忠阳(E-mail: freedom_mzy@163.com)。



1 垂直链路大气衰减模型

激光在大气中的透过率为:

$$T_{\text{atm}} = \exp\left(-\sum_{i=0}^{\infty} \mu_i H_i\right) \quad (1)$$

其中, i 为通信路径上大气近似均匀层数; μ_i 为第 i 层大气衰减系数, 与激光波长有关; H_i 为第 i 层大气厚度。

蓝绿激光通信通常选择波长 $\lambda=0.532 \mu\text{m}$ 。由于分子吸收系数在此波长下小于 $10^{-9}/\text{km}^{-1}$, 可以忽略, 故可认为大气衰减系数与波长成线性关系。而中国渤海、黄海和东海都处于中纬度地区, 因此可结合文献[11]中的 $\lambda=0.5145 \mu\text{m}$ 与 $\lambda=0.6328 \mu\text{m}$ 的中纬度各高度的大气衰减系数, 采用插值法计算出 $\lambda=0.532 \mu\text{m}$ 时的各高度的大气衰减系数, 进而得到高度为 8 km 时的透过率分别为 74.58%(晴天)和 40.06%(阴天)。

2 垂直链路几何衰减模型

几何衰减物理含义为天线有效接收到的光功率^[12], 是系统发射与接收带来的衰减。蓝绿激光垂直通信系统的特点为距离长、发射器发散角大, 因此几何衰减尤为严重, 是影响接收光功率的主要因素。设 L_{geo} 为几何衰减系数, D_R 为接收端孔径, W_L 是传输距离为 L 时的光斑半径, θ 为发散角, 则几何衰减模型为^[12]:

$$L_{\text{geo}} = \frac{D_R^2}{2W_L^2} = \frac{\pi^2 \theta^2 D_R^2}{8\lambda^2 + \frac{(L\pi\theta^2)^2}{2}} \quad (2)$$

当发射器高度改变时, 会导致海面光斑面积变化, 因此往往在降低高度的同时扩大发射器的发散角, 但这又会导致接受面能量分散, 需要大接收孔径来保证足够的接收光功率, 所以需要分析发散角和接收孔径大小对几何衰减的影响。

2.1 发散角对几何衰减的影响

当 $D_R=250 \text{ mm}$ 、 $\lambda=532 \text{ nm}$ 时, 不同发散角下几何衰减与传输距离的关系如图 1 所示。可以看出, 传输距离在 1 km 内, 几何衰减剧烈, 之后衰减趋势渐缓; 传输距离相同时, 发散角越大, 几何衰减越大。1 km 后, 发散角从 15 mrad 增加到 20 mrad 时, 衰减增加了 2.5 dB; 发散角从 20 mrad 增加到 25 mrad 时, 衰减增加了 1.94 dB。

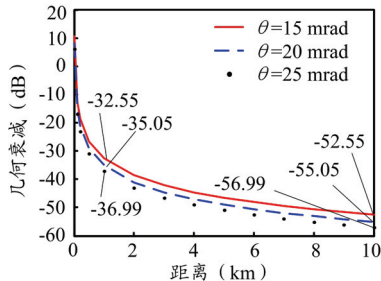


图 1 不同发散角 θ 下的几何衰减

2.2 接收孔径对几何衰减的影响

当 $\theta=20 \text{ mrad}$ 、 $\lambda=532 \text{ nm}$ 时, 不同接收孔径下几何衰减与传输距离的关系如图 2 所示。与发散角的影响类似, 传输距离 1 km 内, 几何衰减剧烈, 之后衰减趋势渐缓; 传输距离相同时, 接收孔径越小, 几何衰减越大。1 km 后, 当接收孔径从 200 mm 增加到 250 mm, 衰减减小了 1.94 dB; 当接收孔径从 250 mm 增加到 300 mm, 衰减均减小了 1.58 dB。

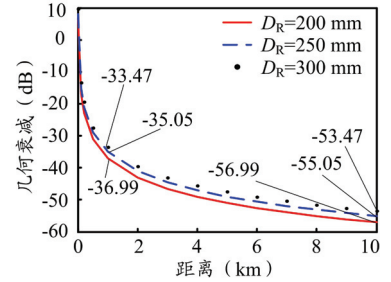


图 2 不同接收孔径 D_R 下的几何衰减

综合上述 2 个仿真可知: 当传输距离超过 1 km 时, 由发散角和接收孔径的改变引起的衰减的差值变化与传输距离无关。

3 湍流模型下性能分析

由于 Gamma-Gamma 模型在整个湍流区域都与实验数据有较好吻合, 且模型参数相对简单, 能够直接与大气湍流的物理特性相连, 故本文采用 Gamma-Gamma 大气湍流模型。

考虑湍流时, 信噪比模型为^[12]:

$$\langle \gamma_{\text{SNR}_0} \rangle = \frac{\gamma_{\text{SNR}_0}}{\sqrt{1 + 1.63(\sigma_I^2)^{2/5} \Lambda_L + A \gamma_{\text{SNR}_0}}} \quad (3)$$

其中, γ_{SNR_0} 为不考虑湍流时的信噪比, σ_I^2 为 Rytov 方差, Λ_L 为与通信距离和接收孔径有关的参数, A 为孔径平均因子, 定义 $A = \sigma_I^2(D_R) / \sigma_I^2(0)$, σ_I^2 为闪烁指数, 表征湍流的强弱。

无湍流时接收端接收到的光功率较大, 由于接收信号而产生的噪声(散粒噪声)远大于热噪声和背景光噪声, 因此二进制启闭键控(OOK)调制时信噪比可以表示为^[13]:

$$\gamma_{\text{SNR}_0} = \sqrt{\frac{R \cdot P_s}{2eB}} = \sqrt{\frac{R \cdot P_t \cdot T_{\text{geo}} \cdot T_{\text{atm}}}{4eB}} \quad (4)$$

其中, P_t 为发射功率, P_s 为接收功率, R 为探测器光电响应度, T_{geo} 表示几何衰减, e 为电子电荷, B 为探测器滤波带宽。采用 OOK 调制时, 链路余量可表示为^[12]:

$$LM = 10 \lg \frac{\langle P_R \rangle}{S} = 10 \lg \frac{P_t \cdot T_{\text{geo}} \cdot T_{\text{atm}}}{2S [1 + 1.63(\sigma_I^2)^{2/5} \Lambda_L]} \quad (5)$$

其中, P_R 为发送“1”时接收端接收到的信号光功率; S 为接收机灵敏度, 即能感应到的最小光功率。当 $LM < 0$

时,可接收到的光功率小于接收机能感应到的最小光功率,会将“1”误判为“0”导致误码。OOK 调制时的误码率闭合表达式为^[14]:

$$P_e = \frac{2^{\alpha+\beta-3}}{\pi^{3/2} \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} G_{5,2}^{2,4} \left[\left(\frac{2}{\alpha\beta} \right)^2 \times \langle \gamma_{\text{SNR}_0} \rangle \left| \frac{1-\alpha}{2}, \frac{2-\alpha}{2}, \frac{1-\beta}{2}, \frac{2-\beta}{2}, 1, 0, \frac{1}{2} \right| \right] \quad (6)$$

其中, $G_{p,q}^{m,n}$ 为 MeijerG 函数, Γ 为 gamma 函数, α 和 β 为 Gamma-Gamma 模型中大尺度和小尺度闪烁系数,表征大尺度湍流和小尺度湍流的有效个数。

根据烟台近海面大气折射率结构常数 C_n^2 实测数据^[15]与美国夏威夷州哈雷阿卡火山空军毛伊岛光站 C_n^2 的观测值^[16],分别取近海面中湍流典型值 $C_n^2=3.19 \times 10^{-15}$ 和高空弱湍流典型值 $C_n^2=3.19 \times 10^{-18}$,对应的平面波 Rytov 方差分别为 $\sigma_I^2=10$ 和 $\sigma_I^2=0.01$ 。

实际系统中,当发散角与接收孔径不同时,链路余量、信噪比和误码率也会发生变化;同时,不同的天气和湍流强度也会导致不同的结果。

3.1 发散角对链路余量的影响

当发射器位于 $L=8$ km 高处, $D_R=260$ mm, $\lambda=0.532$ μm , $P_T=15$ W, $S=-50$ dBm,分别仿真不同天气时中湍流 $C_n^2=3.19 \times 10^{-15}$ 和弱湍流 $C_n^2=3.19 \times 10^{-18}$ 条件下,发散角不同时到达接收机的链路余量,其仿真结果如图 3 所示。可以看出,随着发散角增大,链路余量减小。这是因为发散角增大,接收面的光斑变大,能量更为分散,接收机能接收到的光功率减小。因此,链路余量主要与天气的阴晴有关,与湍流强弱关系不大,阴天比晴天的链路余量小 2.7 dB。

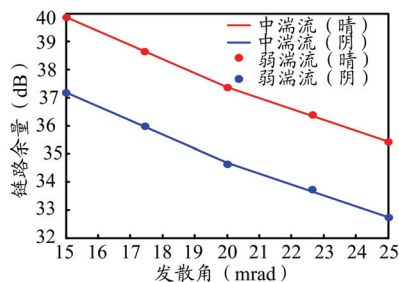


图3 不同发散角下的链路余量

3.2 接收孔径对链路余量的影响

当发射器位于 $L=8$ km 的高处, $\theta=20$ mrad, $\lambda=0.532$ μm , $P_T=15$ W, $S=-50$ dBm, 分别仿真不同天气时,中湍流 $C_n^2=3.19 \times 10^{-15}$ 和弱湍流 $C_n^2=3.19 \times 10^{-18}$ 条件下,接收孔径不同时到达接收机的链路余量,其仿真结果如图 4 所示。可以看出,随着接收孔径增大,链路余量也增大。这是因为接收孔径变大,接收机能接收

到更大的光功率。因此,链路余量主要与天气的阴晴有关,与湍流强弱的关系不大,阴天比晴天的链路余量小 2.7 dB。

综合上述 2 个仿

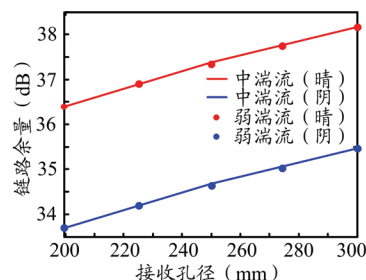


图4 不同接收孔径下的链路余量

真,在发散角与接收孔

径固定时,阴天比晴天的链路余量固定小了 2.7 dB。为了弥补这个差值,可以将发散角从 20 mrad 减小到 15 mrad,或者将发散角从 25 mrad 减小到 20 mrad 的同时,将接收孔径增加 50 mm。

3.3 发散角对信噪比的影响

当发射器位于 $L=8$ km 高处, $\lambda=0.532$ μm , $R=0.7$ A/W, $B=3$ GHz, $D_R=250$ mm, $P_T=15$ W,分别仿真不同天气时,在中湍流 $C_n^2=3.19 \times 10^{-15}$ 和弱湍流 $C_n^2=3.19 \times 10^{-18}$ 条件下,发散角不同时的信噪比,仿真结果如图 5 所示。可以看出,考虑湍流时信噪比与天气的阴晴和发散角的大小无明显关系,主要与湍流的强度有关,中湍流 $C_n^2=3.19 \times 10^{-15}$ 比弱湍流 $C_n^2=3.19 \times 10^{-18}$ 的信噪比低约 1.5 dB。

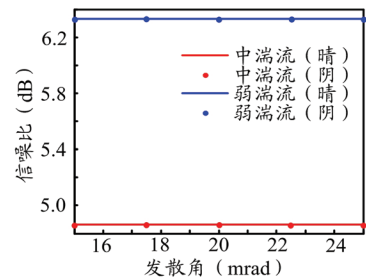


图5 不同发散角下的信噪比

3.4 接收孔径对信噪比的影响

当发射器位于 $L=8$ km 高处, $R=0.7$ A/W, $B=3$ GHz, $\theta=20$ mrad, $P_T=15$ W,分别仿真不同天气时,中湍流 $C_n^2=3.19 \times 10^{-15}$ 和弱湍流 $C_n^2=3.19 \times 10^{-18}$ 条件下,接收孔径不同时的信噪比,仿真结果如图 6 所示。可以看出,考虑湍流时信噪比与天气的阴晴无明显关系,中湍流 $C_n^2=3.19 \times 10^{-15}$ 比弱湍流 $C_n^2=3.19 \times 10^{-18}$ 的信噪比低。湍流强度一样时,接收孔径越大,信噪比越高,且接收孔径越大,不同湍流强度下的信噪比差值越小,接收孔径为 200 mm 时,中湍流比弱湍流的信噪比低约 2.0 dB; 而接收孔径为 300 mm 时,中湍流比弱

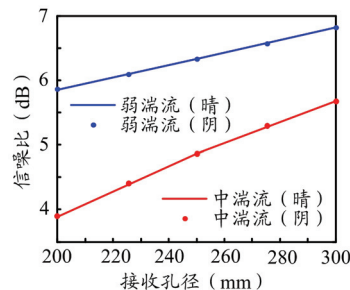


图6 不同接收孔径下的信噪比

李松朗,毛忠阳,刘传辉,等:蓝绿激光通信空地下行链路性能分析

湍流的信噪比低约 1.1 dB。由此可见,大接收孔径会对湍流有平滑作用。

综合上述 2 个仿真,为了减小湍流对信噪比带来的影响,只能增大接收孔径,而随着接收孔径的增大,中湍流与弱湍流的信噪比会越来越接近。

3.5 发散角对误码率的影响

当发射器位于 $L=8$ km 高处, $\lambda=0.532$ μm , $R=0.7$ A/W, $B=3$ GHz, $D_R=250$ mm, $P_T=15$ W, 分别仿真不同天气下,中湍流 $C_n^2=3.19\times 10^{-15}$ 和弱湍流 $C_n^2=3.19\times 10^{-18}$

条件下,发散角不同时的误码率,其仿真结果如图 7 所示。可以看出,误码率与发散角大小和天气阴晴无明显关系,与湍流强弱关系密切,中湍流误码率约为 5.4×10^{-4} ,弱湍流误码率约为 4.3×10^{-6} 。

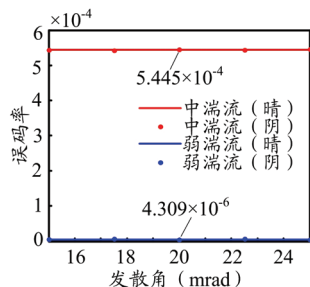


图 7 不同发散角下的误码率

3.6 接收孔径对误码率的影响

当发射器位于 $L=8$ km 的高处, $R=0.7$ A/W, $B=3$ GHz, $\theta=20$ mrad, $P_T=15$ W, 分别仿真不同天气下,中湍流 $C_n^2=3.19\times 10^{-15}$ 和弱湍流 $C_n^2=3.19\times 10^{-18}$ 条件下,接收孔径不同时的误码率,其仿真结果如图 8 所示。可以看出,误码率与天气阴晴无明显关系,弱湍流下误码率小于中湍流误码率;另外,接收孔径越大,误码率

越低,且增大孔径对中湍流的平滑作用更为明显。中湍流下,接收孔径为 200 mm 和 300 mm 时,误码率分别为 3.6×10^{-3} 和 5.5×10^{-5} ;弱湍流下接收孔径为 200 mm 和 300 mm 时,误码率分别为 3.0×10^{-5} 和 3.9×10^{-7} 。

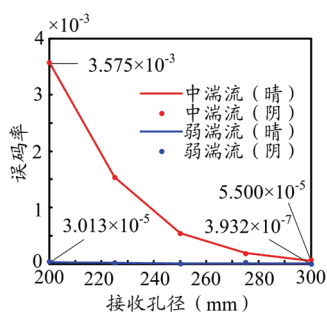


图 8 不同接收孔径下的误码率

综合上述 2 个仿真,弱湍流下误码率较为理想,中湍流时最好采用大接收孔径。同时,增大接收孔径也会改善链路余量与信噪比,因此当通信质量不佳时,可首先考虑增大接收孔径。

4 结束语

本文针对蓝绿激光通信的收发端参数设计需求,分析了垂直链路的大气衰减与几何衰减,并仿真了不同天气时中湍流和弱湍流下发散角和接收孔径对链

路余量、信噪比和误码率的影响。仿真结果表明:链路余量与湍流强弱无明显关系,与天气阴晴、发散角的大小和接收孔径大小有关,晴天、发散角越小和接收孔径越大,链路余量越大。信噪比及误码率与天气和发散角无明显关系,主要与湍流强度和接收孔径有关,湍流强度越弱,接收孔径越大,信噪比越大,误码率越小。增大接收孔径可以平滑湍流效应,且湍流强度越大效果越明显。接收孔径对链路余量、信噪比和误码率均有影响,因此当通信质量不佳时,可首先考虑增大接收孔径。

由于搭载蓝绿激光发射器的飞机可以降低飞行高度在云下飞行,故本文只分析了最普遍的无云场景。但由于实际天气复杂,有时不可避免地要经过云雾、雨滴等衰减,因此需要进一步分析它们对通信的影响。

参考文献:

- [1] 柳树要,何焰蓝. 激光对潜通信原理及发展[J]. 现代物理知识,2016,17(5):19-21.
- [2] 侯洁. 无线激光通信大气信道性能分析 [D]. 西安:西安电子科技大学,2014.
- [3] 刘敏,刘锡国,牟京燕,等. 无线光通信光功率衰减模型分析[J]. 红外与激光工程,2012,41(8):2136-2140.
- [4] 甄洁,刘维亨. 蓝绿激光下行通信云层信道特性研究[J]. 华东船舶工业学院学报(自然科学版),2004,18(6):47-50.
- [5] 詹恩奇. 光在大气和海水信道的传输性能研究[D]. 武汉:华中科技大学,2007.
- [6] 魏安海. 光脉冲在大气-海水混合信道中传输特性研究[D]. 西安:中国科学院大学,2014.
- [7] 曹瑞卿. 空-地光通信大气信道特性的研究 [D]. 武汉:华中科技大学,2007.
- [8] 何谷强. 蓝绿激光通信下行信道 Monte Carlo 仿真和建模 [D]. 武汉:华中科技大学,2009.
- [9] 杨虹. 蓝绿激光对潜通信光信道特性研究[D]. 成都:电子科技大学,2008.
- [10] 胡秀寒,周田华,朱小磊,等. 云对激光下行传输影响的仿真研究[J]. 红外,2015,36(2):8-12.
- [11] 李景镇. 光学手册[M]. 西安:陕西科技出版社,1986:859-862.
- [12] LI J, UYSAL M. Optical wireless communications: system model, capacity and coding[A]. IEEE VTC. Lisbon, 2003, 1(1): 168-172.
- [13] 李玉权,朱勇. 光通信原理与技术 [M]. 北京:科学出版社,2009:321-323.
- [14] 韩立强. 大气湍流下空间光通信的性能及补偿方法研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
- [15] 吴晓军. 近海无线光通信信道特性研究[D]. 烟台:海军航空工程学院,2015.
- [16] SASIELA R J. Strehl ratios with various types of anisoplanatism[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1992, 9(8): 1398-1405.