

文章编号: 1672-8785(2010)08-0024-04

大气湍流对激光通信系统的影响分析

马春林 崔元顺

(淮阴师范学院物理与电子电气工程学院, 江苏 淮安 223300)

摘 要: 大气湍流是影响大气激光通信系统性能的主要因素之一。在忽略光通信系统中的其它噪声且仅考虑由大气湍流引起的系统误码率的情况下, 对激光信号在大气湍流中斜程传输时的通信系统误码率 (BER)、信噪比 (SNR) 与对数振幅起伏之间的关系进行了研究; 依据 ITU-R 公布的随高度变化的大气结构常数模型, 用 FORTRAN 对信噪比和误码率在不同波长与不同天顶角的条件下随高度的变化情况进行了数值模拟。结果表明, 当传输高度相同时, 用长波激光和较小的天顶角进行斜程传输, 可以有效地减小系统的误码率和增加系统的信噪比, 从而提高激光的通信质量。

关键词: 大气湍流; 对数振幅起伏; 误码率; 信噪比

中图分类号: TN929.12 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2010.08.006

Analysis of Effect of Atmospheric Turbulence on Laser Communication System

MA Chun-lin, CUI Yuan-shun

(School of Physics and Electronic Electrical Engineering, Huaiyin Normal University, Huai'an 223300, China)

Abstract: Atmospheric turbulence is one of the main factors which have influence on the performance of a laser communication system. When other noises in a laser communication system are ignored and only the bit error rate (BER) resulted from the atmospheric turbulence is considered, the relation among BER, signal-to-noise ratio (SNR) and log-amplitude variance of a laser communication system when its laser beam is propagating in a slant atmospheric turbulence path is studied. According to the ITU-R turbulence structure constant model, the SNR and BER varied with the altitude at different wavelengths and different zenith angles are simulated numerically with FORTRAN. The result shows that for the same altitude, if the long wavelength laser beam is propagating slantly at a small zenith angle, the BER of the laser communication system can be reduced, the SNR can be increased and the communication quality can be improved.

Key words: atmospheric turbulence; Log-amplitude fluctuation; BER; SNR

1 引言

随着光束控制器、高灵敏度接收器以及高速通信电子设备等技术的日益成熟, 大气激光通信技术已成为当今世界信息技术的一大热点。由于采用大气作为信道, 大气本身的特点会给系统的可靠性与稳定性带来诸多问题。激光在

大气中传输时, 由各种气体分子和气溶胶粒子的吸收和散射效应造成的光衰减, 会导致接收端功率的减小; 由大气运动形成的大气湍流会引起大气的光学折射率出现随机起伏, 并造成其中传播的激光出现光强闪烁、光束漂移、扩展和到达角起伏等现象, 使得接收光信号受到干

收稿日期: 2010-04-13

作者简介: 马春林 (1980-), 女, 江苏涟水人, 硕士, 助教, 主要从事激光大气传输特性的研究。E-mail: mchl88@163.com

扰和通信误码率上升, 从而严重影响大气光通信的稳定性和可靠性^[1,2]。因此在设计激光通信系统的链路时, 必须考虑大气对激光传输的影响。关于大气湍流对激光通信系统的影响的文献^[3,4]有很多, 但它们都是在水平传输情况下进行的研究。近年来, 激光通信和激光制导等诸方面的研究均要求考虑光波斜程传输问题。大气湍流是影响大气无线光通信系统性能的主要因素之一, 其影响主要表现为光通信系统中接收端接收的光强存在闪烁效应^[5]。本文针对激光信号斜程穿过湍流大气后引起的闪烁效应对激光通信系统的影响进行了研究。

2 误码率与信噪比的基本理论

误码率和信噪比是衡量激光通信系统质量的两个重要参量。本文通过研究误码率、信噪比和对数振幅起伏之间的关系, 分析了激光信号斜程穿过湍流大气后激光波长和天顶角对系统误码率和信噪比的影响。

激光大气闪烁一直是随机介质中传播研究的重要问题之一。在激光通信系统中, 大气闪烁可引起接收端光电探测器的探测电流随机涨落, 从而导致探测系统噪声增加。激光在大气湍流中传播时, 其电磁场分量 $\Psi(r, t)$ 满足以下方程:

$$\nabla^2 \Psi(r, t) - \frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2 \Psi(r, t)}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

式中, n 为介质的折射率, c 为真空中的光速, 式 (1) 的解可写为

$$\begin{aligned} \Psi(r, t) &= A(r) \exp[i\phi(r)] \exp[-i\omega t] \\ &= A_0(r) \exp[\chi + i\phi(r)] \exp(-i\omega t) \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $A(r)$ 和 $\phi(r)$ 分别为湍流存在时的光波振幅和相位; $A_0(r)$ 为没有湍流时的光波振幅; ω 为圆频率; $\chi = \ln \frac{A(r)}{A_0(r)}$ 为大气湍流引起的对数振幅起伏, 用来描述大气湍流的强弱, 对数光强起伏为

$$\ln \frac{I(r, t)}{I_0} = \ln \left(\frac{A(r)}{A_0(r)} \right)^2 = 2 \ln \frac{A(r)}{A_0(r)} = 2\chi \quad (3)$$

本文仅讨论由大气湍流所引起的噪声, 并忽略系统中的热噪声、散弹噪声、背景噪声等的影响。当激光光束在大气中传播时, 由于大气湍流的存在, 光波的振幅会发生变化。我们可以近似地认为这是在原有的光波信号上叠加了一个噪声。

那么对数光强起伏就变为

$$\begin{aligned} \ln \frac{I(r, t)}{I_0} &= 2 \ln \frac{A(r)}{A_0(r)} = 2 \ln \frac{A_0(r) + A_i(r)}{A_0(r)} \\ &= 2 \ln(1 + \varepsilon) \end{aligned} \quad (4)$$

式中, $A_i(r)$ 为噪声的振幅, $\varepsilon = \frac{A_i(r)}{A_0(r)}$ 为噪声与信号的振幅之比。当噪声很小时, 可以近似地认为

$$\chi = \ln(1 + \varepsilon) \approx \varepsilon \quad (5)$$

对于数字通信激光通信系统, 光接收机接收光信号时的误码率为^[6]

$$\text{BER} = \frac{1}{2} \left[\text{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \right] = \frac{\exp \left(-\frac{Q^2}{2} \right)}{Q\sqrt{2\pi}} \quad (6)$$

式中, $Q = \frac{I_1 - I_0}{i_1 + i_0}$, I_1 和 I_0 分别对应于比特 1 和比特 0 处的平均光强, i_1 和 i_0 分别对应于比特 1 和比特 0 处由噪声引起的光强的均方根, $\text{erfc}(x)$ 代表补余误差函数。

在自由空间光通信系统中, 码间串扰可忽略。对于 OOK 调制, 接收机只在传输“1”码时收到光信号, 并假定“0”码对应的平均光强为 0 (即 $I_0 = 0$), 这样参数 Q 可表示为

$$Q = \frac{I_1}{i_1 + i_0} = \left\langle \frac{A_0^2(\vec{r})}{A_i^2(\vec{r})} \right\rangle = \frac{1}{\langle \varepsilon^2 \rangle} = \frac{1}{\langle \chi^2 \rangle} \quad (7)$$

那么由大气湍流的闪烁效应引起的信噪比便为

$$\text{SNR} = \frac{I}{\langle I_i \rangle} = \frac{\langle A_0^2(\vec{r}) \rangle}{\langle A_i^2(\vec{r}) \rangle} = \frac{1}{\langle \varepsilon^2 \rangle} \quad (8)$$

式中, I 为信号强度, $\langle I_i \rangle$ 为空间噪声强度的平均值。则

$$\text{SNR} = Q \quad (9)$$

由式 (7)、式 (8) 和式 (9) 可得, 当噪声很小时, 光通信系统的信噪比与误码率的关系为

$$\text{BER} = \frac{1}{2} \left[\text{erfc} \left(\frac{\text{SNR}}{\sqrt{2}} \right) \right] \quad (10)$$

因此, 在噪声很小的情况下, 误码率和信噪比都依赖于大气湍流的对数振幅起伏。

3 对数振幅起伏计算模型

空-地激光通信分别按平程、斜程或垂直的方式进行光传输时,在传输距离相同的情况下,系统在传输信道上所产生的功率衰减不同,系统误码率和信噪比所受到的影响也不同。

在实际的激光通信系统中,从发射端出来的激光经过光学透镜准直后可作为平面波来处理。在弱湍流条件下,传输光束类型为平面波的激光在大气中斜程传输时的对数振幅起伏计算模型^[7]如下:

$$\chi = 0.5631 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^{7/6} (\sec \theta)^{11/6} \times \int_0^H C_n^2(h) (H-h)^{5/6} dh \quad (11)$$

式中, h 为大气湍流的高度; θ 为天顶角; λ 为传输激光的波长; C_n^2 为大气湍流折射率结构常数,用于表征湍流的强度。对于一般的路径,尤其是地-空路径, C_n^2 随高度的变化是明显的。因此,对于非均匀的斜径传播路径, C_n^2 需要沿路径进行积分。如果考虑的是平程传输情形,并假设传输路径是均匀的,则 $C_n^2(h)$ 为常数。目前国内外常用的大气湍流模型主要有强湍流区的 HV21 模型和弱湍流区的 Modified HV 模型^[3]。本文采用 ITU-R 在 2001 年提供的光波波段计算斜程路径上随高度变化的大气结构常数模型^[8]。该模型考虑了大气吸收、近地面大气结构常数以及风速的影响,它既接近于实际湍流模型又不失一般性,其具体形式如下:

$$C_n^2(h) = 8.148 \times 10^{-56} v_{rms}^2 h^{10} e^{-h/1000} + 2.7 \times 10^{-16} e^{-h/1500} + C_n^2(0) e^{-h/100} \quad (12)$$

式中, h 为地面以上的高度; $C_n^2(0)$ 为地平面附近的大气结构常数,其典型值是 1.7×10^{-14} ; $v_{rms} = \sqrt{v_g^2 + 30.69 v_g + 348.91}$ 是垂直路径风速的均方根值; v_g 为近地面风速,当其未知时,取 $v_g = 2.8 \text{ m/s}$; 传输距离 $L = h \sec \theta$ 。

4 数值模拟

常见的通信窗口为 $0.8 \mu\text{m} \sim 1.6 \mu\text{m}$ 和 $8 \mu\text{m} \sim 13 \mu\text{m}$ 波段。对于近、中红外波段的激光大气传输,当波长处于大气窗口时,大气分子引起的吸收和散射可以不予考虑,故选择波长为 $0.85 \mu\text{m}$ 、 $1.06 \mu\text{m}$ 和 $1.55 \mu\text{m}$ 的激光进行研究。本文根据 ITU-R 大气结构常数模型,在 5 km 高度以内,利用式 (11) 给出的平面波斜程传输时的弱湍流对数振幅起伏模型,当激光波长 $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$,天顶角 θ 分别为 15° 、 30° 和 45° 时,数值模拟了对数振幅起伏以及激光通信系统的误码率和信噪比在不同天顶角的情况下随高度的变化关系,如图 1、图 2 和图 3 所示。

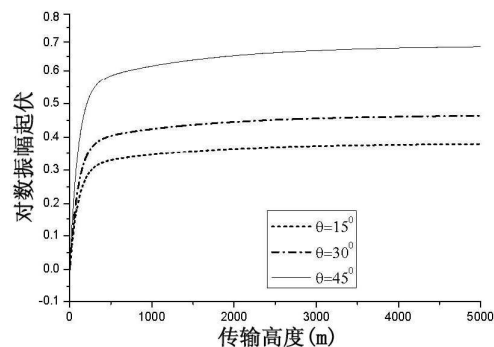


图 1 波长为 $1.06 \mu\text{m}$ 时对数振幅起伏随传输高度的变化关系

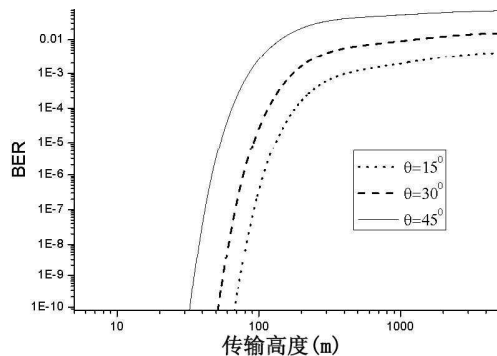


图 2 波长为 $1.06 \mu\text{m}$ 时误码率随传输高度的变化关系

由图 1 和图 2 可以看出,当传输高度相同时,天顶角越小,对数振幅起伏和激光通信系统的误码率就越小;在弱起伏区 ($\chi < 0.3$),随着传播高度的增加,对数振幅起伏和误码率增加得非常快;在中强起伏区,两者的增加慢慢趋于平稳;对于相同的系统误码率要求,天顶角较小时传输的有效距离要远些。由图 3 可以看出,当传

传输高度相同时, 天顶角越小, 激光通信系统的信噪比就越大。因此, 在传输高度相同的情况下, 斜程传输时波束受大气湍流的影响比水平传输时要小, 在实际操作中应尽量不采用通信光束低仰角甚至平程传输方式。

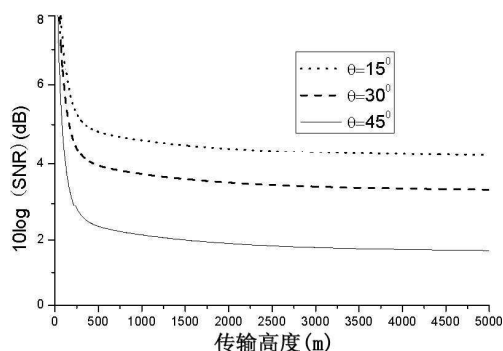


图 3 波长为 $1.06\mu\text{m}$ 时信噪比随传输高度的变化关系

当天顶角 $\theta = 30^\circ$, 激光波长 λ 分别为 $0.85\mu\text{m}$ 、 $1.06\mu\text{m}$ 和 $1.55\mu\text{m}$ 时, 数值模拟了激光通信系统的误码率和信噪比在不同波长情况下随高度的变化关系, 结果如图 4 和图 5 所示。

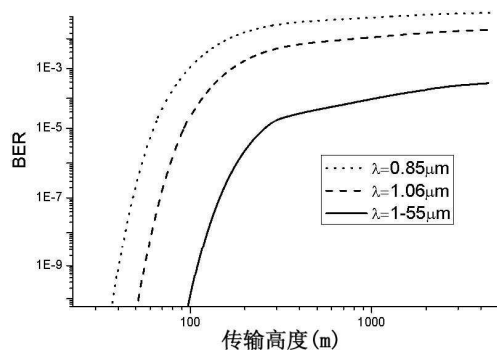


图 4 天顶角为 30° 时 BER 随传输高度的变化关系

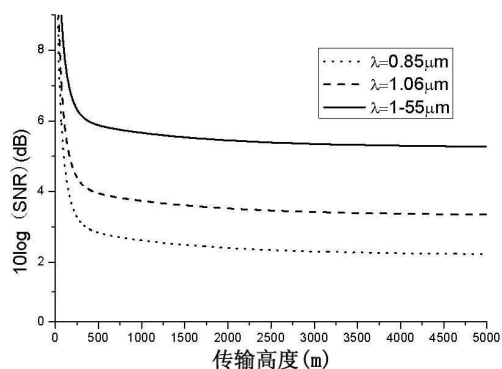


图 5 天顶角为 30° 时 SNR 随传输高度的变化关系

由图 4 和图 5 可以看出, 当传输高度相同时, 天顶角一定且波长越长, 激光通信系统的误码率越小, 信噪比越大。因此, 采用长波长激光能够提高系统的通信质量。

5 结论

本文主要研究了激光信号在大气中斜程传输时, 大气湍流对通信系统的信噪比和误码率的影响, 并采用 ITU-R 模型计算了平面波斜程传输时, 系统的误码率和信噪比在不同天顶角与不同波长的情况下随传播高度的变化关系。计算结果表明, 误码率和信噪比依赖于到达天顶角、波长及大气结构常数的高度分布; 在传输高度相同的情况下, 斜程传输时波束受大气湍流的影响比水平传输时要小。因此, 在实际操作中应尽量不采用通信光束低仰角甚至平程传输方式。另外, 采用长波长激光进行传输, 可降低误码率、增大信噪比, 从而提高激光的通信质量。

参考文献

- [1] 黄印博, 魏合理, 梅海平, 等. 大气信道对红外激光通信系统性能影响的实验研究 [J]. 光子学报, 2009, 38(3): 649-651.
- [2] 陈纯毅, 杨华民, 姜会林, 等. 大气光通信中大气湍流影响抑制技术研究进展 [J]. 兵工学报, 2009, 30(6): 779-791.
- [3] 宿伟, 齐文宗. 大气湍流对激光通信系统影响的数值模拟 [J]. 激光与红外, 2009, 39(8): 813-816.
- [4] 刑建斌, 许国良, 张旭萍, 等. 大气湍流对激光通信系统的影响 [J]. 光子学报, 2005, 34(12): 1850-1852.
- [5] 何小梅, 李晓峰, 车雅良. 大气湍流对近地无线光通信链路影响的研究 [J]. 红外, 2007, 28(10): 26-29.
- [6] Xu Guoliang, Zhang Xuping, Wei Junwei, et al. Influence of atmospheric turbulence on FSO link performance [J]. Proceeding of SPIE, 2004, 5281: 816-823.
- [7] 李晓峰. 星地激光通信链路原理与技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 118-149.
- [8] 吴振森, 骆志敏, 郭立新, 等. 湍流大气中光波闪烁的斜程问题研究 [J]. 电波科学学报, 2002, 17(3): 254-257.