

文章编号:1001-5078(2009)08-0813-04

· 激光技术与应用 ·

大气湍流对激光通信系统影响的数值模拟

宿 伟, 齐文宗

(四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064)

摘要:从大气湍流对激光传输的影响出发,在 Rytov 和 Tartaskii 理论模型的基础上,得到激光通信系统的信噪比(SNR)、误码率(BER)和光强起伏之间的关系,并对信噪比和误码率在不同湍流强度、不同波长下随传输距离的变化进行了数值模拟。结果表明:大气湍流对系统误码率和信噪比均有明显的影响,且对误码率的影响超过信噪比占主要地位,在不同湍流强度下,误码率随着湍流强度的增加起初以指数形式迅速增长,最后趋于同一值,传输的最大距离有显著的变化,使用长波长的激光可以增加信号传播的有效距离,提高激光的通信质量。

关键词:大气湍流;光强起伏;信噪比;误码率

中图分类号:TN929.13 **文献标识码:**A

Research on the effect of the atmospheric turbulence on laser communication system

SU Wei, QI Wen-zong

(School of Electronics and Information, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: From analyzing the effect of the atmospheric turbulence on laser communication system, based on the theory model of Rytov and Tartaskii and ignoring other noises in the system, the signal-to-noise ratio(SNR) and the bit error rate(BER) between which the relationship and intensity variance was deduced in laser communication system, then made numerical simulation which varied with distance in different turbulence and different wavelength. The result indicates that the intensity of atmosphere turbulence has great impact on both BER and SNR of the system, and it affects the former more. BER follows an exponential growth curve as the intensity of atmosphere turbulence increases initially and finally tends to be maintain the same value, during which course, the maximum effective range of the transmission varies. Adopting laser with longest wave to communicate can increase effective distance of the signal transmission and improve the quality of laser communication system.

Key words: atmosphere turbulence; light-intensity oscillation; SNR; BER

1 引言

随着激光通讯技术的发展,激光在大气湍流中的传输越来越受到人们的关注和研究,从以前的许多研究中可以知道:激光束在大气中传输时,由于湍流大气的影响,激光束的波前发生随机起伏,引起光束强度的起伏、光束的扩展以及传输方向的随机漂移等效应^[1-3],导致光束质量的下降,对激光通信系统的实际应用造成严重的影响。而信噪比和误码率是衡量激光通信系统质量的两个重要参量。本文正

是通过研究信噪比和误码率这两个参量随大气湍流的变化,从而分析大气湍流对激光通信系统的影响,以利于提高激光通信的质量。

2 基本理论

2.1 信噪比(SNR)的理论模型

基于 Rytov 的理论可以知道平面波在自由介质

作者简介:宿 伟(1983-),男,在读研究生,主要从事激光在大气中传输问题的研究。E-mail:su1680@163.com

收稿日期:2009-02-25;修订日期:2009-04-23

中的传播公式为^[4]:

$$E_0(\vec{r}) = A_0(\vec{r}) \exp(i\varphi_0(\vec{r})) \quad (1)$$

式中, $A_0(\vec{r})$ 是激光光束在没有湍流时的振幅; φ_0 是光波相位; $E_0(\vec{r})$ 是光束电磁场的分布。当激光光束在大气湍流中传输时, 大气湍流引起的光强起伏、光束的扩展和光束的漂移严重削弱了接收端的信号。其中光束偏转的起伏率约低于 1 kHz 或 2 kHz, 光束扩展也是影响较小, 因此大气湍流折射率变化引起的光强起伏是影响信号削弱的最重要因素。大气折射率的改变引起激光光束的分布的变化。这样波动方程可以表示为^[5-6]:

$$E(\vec{r}) = A(\vec{r}) \exp(i\varphi(\vec{r})) = E_0(\vec{r}) \exp(\Phi) \quad (2)$$

其中, $A(\vec{r})$ 表示激光光束在湍流中传输时的振幅, 式中的 Φ 为:

$$\Phi = \ln\left(\frac{A(\vec{r})}{A_0(\vec{r})}\right) + i(\varphi(\vec{r}) - \varphi_0(\vec{r})) = \chi + iS \quad (3)$$

式中, χ 表示大气湍流引起的对数振幅起伏; S 为光波相位起伏。从这个式子中可以看出接收信号的强度和相位的起伏是大气湍流引起的信号的信噪比和误码率导致的。

对于平面波, 当湍流强度较弱时, 且折射率结构常数 C_n^2 关于光路对称, 根据 Rytov 的理论, 平面波的对数光强起伏方差为^[6]:

$$\sigma_{\ln I}^2 = \langle (\ln I - \langle \ln I \rangle)^2 \rangle = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \quad (4)$$

其中, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, k 为波数; L 为传播距离下标; I 表示光强。

Tartaskii 运用 Rytov 近似对激光通过大气后的接收光强起伏, 即光强闪烁给出了理论模型, 在弱起伏条件下, 根据此模型得出水平传输时的对数振幅方差为^[7]:

$$\langle \chi^2 \rangle = 0.31 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \quad (5)$$

假定只考虑大气湍流引起的噪声, 忽略其他噪声的影响, 可以得到:

$$\begin{aligned} \chi &= \ln\left(\frac{A(\vec{r})}{A_0(\vec{r})}\right) = \ln\left[\frac{A_0(\vec{r}) + A_n(\vec{r})}{A_0(\vec{r})}\right] \\ &= \ln(1 + \varepsilon) \end{aligned} \quad (6)$$

式中, $A_n(\vec{r})$ 为噪声的振幅。令 $\varepsilon = \frac{A_n(\vec{r})}{A_0(\vec{r})}$, 那么当信号强度为 I_0 , 噪声强度为 $\langle I_n \rangle$ 时大气湍流引起的 SNR 为:

$$\text{SNR} = \frac{I_0}{\langle I_n \rangle} = \frac{\langle A_0(\vec{r}) \rangle}{\langle A_n(\vec{r}) \rangle} = [\langle \varepsilon^2 \rangle]^{-1} \quad (7)$$

对于弱湍流 ε 很小, 因此 $\chi = \ln(1 + \varepsilon) \approx \varepsilon$, 所以:

$$\text{SNR} = (\chi^2)^{-1} = (0.31 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6})^{-1} \quad (8)$$

联立式(4)、式(5)得:

$$\text{SNR} = \left(\frac{31}{123} \sigma_{\ln I}^2\right)^{-1} \quad (9)$$

2.2 误码率(BER)的理论模型

对于数字激光通信系统, 光接收机接受光信号时的误码率为^[8]:

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

式中, $\text{erfc}(x)$ 代表补余误差函数, 定义为^[9]: $\text{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty \exp(-y^2) dy$, $Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0}$, I_1 和 I_0 分别对应比特 1 和比特 0 时的平均光强, σ_1 和 σ_0 分别对应比特 1 和比特 0 处有噪声引起的光强的均方根。假定 $I_0 = 0$ 即比特为 0 时对应的光强为 0, 可以得到:

$$Q = \frac{I_1}{\sigma_1 + \sigma_0} = \frac{\langle A_0^2(\vec{r}) \rangle}{\langle A_n^2(\vec{r}) \rangle} = \frac{1}{\langle \varepsilon^2 \rangle} = \frac{1}{\langle \chi^2 \rangle} \quad (11)$$

将 Q 代入式(10)中可以得到:

$$\begin{aligned} \text{BER} &= \frac{1}{2} \left[\text{erfc}\left(\frac{(\chi^2)^{-1}}{\sqrt{2}}\right) \right] \\ &= \frac{1}{2} \left[\text{erfc}\left(\frac{(0.31 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6})^{-1}}{\sqrt{2}}\right) \right] \end{aligned} \quad (12)$$

联立式(4)、式(5)、式(12)得:

$$\text{BER} = \frac{1}{2} \left[\text{erfc}\left(\frac{123}{\sqrt{2} \times 31 \sigma_{\ln I}^2}\right) \right] \quad (13)$$

2.3 大气中的折射率结构常数(C_n^2)模型和激光波长的选择

折射率结构常数对激光闪烁和光束展宽都具有重要的影响。目前国内外常见的大气湍流模型主要有:

适用于强湍流情况下的 HV21 模型^[10]:

$$C_n^2(h) = 5.94 \times 10^{-53} \times (21/27)^2 h^{10} e^{-h/1000} + 2.7 \times 10^{-16} e^{-h/1500} + 1.7 \times 10^{-14} e^{-h/100} \quad (14)$$

适用于弱湍流情况下的 Modified HV 模型:

$$C_n^2(h) = 8.16 \times 10^{-54} h^{10} e^{-h/1000} + 3.02 \times 10^{-17} e^{-h/1500} + 1.9 \times 10^{-15} e^{-h/100} \quad (15)$$

其中, h 是距离地面的垂直高度, 单位为 m。由以上的两个模型可知, 大气结构常数为高度的函数, 都随着高度的变化而变化。

为了减小大气对激光传输的吸收作用, 应该

选择大气透射情况比较好的激光波长,一般情况下选择波长位于 $0.85\ \mu\text{m}$ 到 $10.6\ \mu\text{m}$ 之间^[11],因此,为了比较各种波长在不同湍流情况下对激光传输的影响,本文选用的波长为 $780\ \text{nm}$, $850\ \text{nm}$ 和 $1550\ \text{nm}$ 。

3 大气湍流对激光通信性能影响的数值模拟

本文依据以上理论模型进行数值模拟,水平传输距离为 $10\ \text{km}$ 以内,海拔高度 $100\ \text{m}$ 以内。大气湍流强度为 $10^{-14}\ \text{m}^{-2/3}$, $5 \times 10^{-15}\ \text{m}^{-2/3}$, $10^{-15}\ \text{m}^{-2/3}$ 。波长分别为 $780\ \text{nm}$, $850\ \text{nm}$, $1550\ \text{nm}$ 。

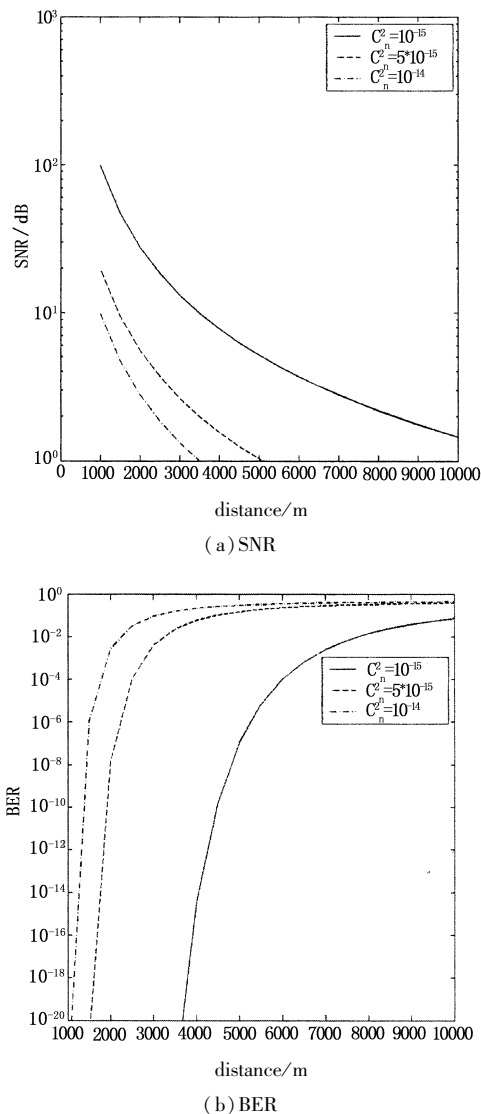


图1 SNR和BER在三种湍流强度下与传输距离的关系

由图1(a)可知在传输距离一定的情况下,SNR随着湍流强度的增加而减小,并且在湍流强度较强时更为显著,可以得知在弱湍流中SNR随距离的传输减小较为缓慢,尤其当湍流强度为 $C_n^2 = 10^{-15}\ \text{m}^{-2/3}$ 的情况下,信号在 $10\ \text{km}$ 处的信噪比仍大于1,即信号在弱湍流中的有效传输距离增长。

由图1(b)知,传输距离一定时,误码率BER随着湍流强度的增加而增大,按BER小于 10^{-9} 的要求对于湍流强度 $C_n^2 = 10^{-15}\ \text{m}^{-2/3}$,激光信号传输的最大距离约为 $4600\ \text{m}$,但在湍流强度为 $C_n^2 = 5 \times 10^{-15}\ \text{m}^{-2/3}$ 和 $10^{-14}\ \text{m}^{-2/3}$ 时,最大传输距离分别约为 $2000\ \text{m}$ 和 $1400\ \text{m}$,表明激光信号传输的最大距离大幅下降。

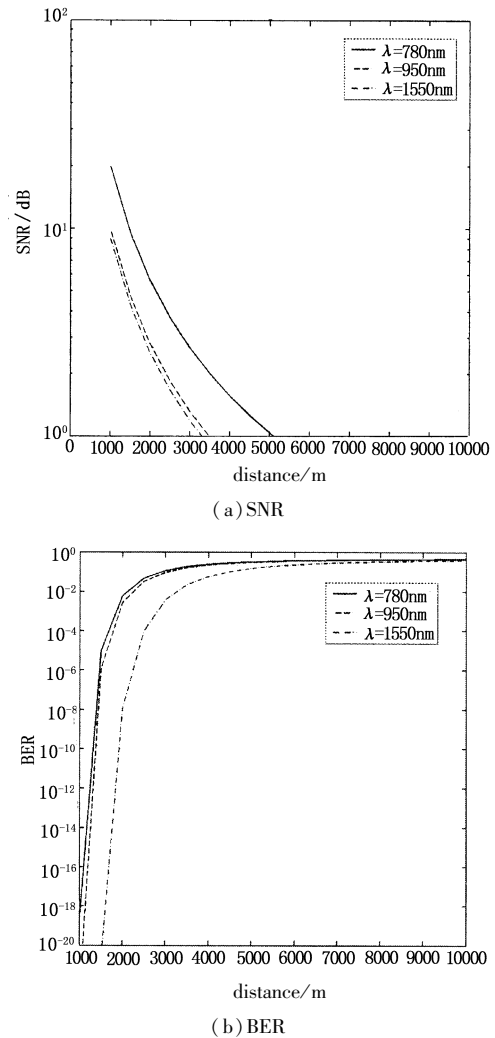


图2 SNR和BER在不同波长下与传输距离的关系

图2(a)可知,传输距离一定时,波长越长相应的信号的信噪比SNR也越高。假定 $\text{SNR} = 1$ 时,波长 $\lambda = 780\ \text{nm}$, $\lambda = 850\ \text{nm}$, $\lambda = 1550\ \text{nm}$ 的激光束在湍流强度 $C_n^2 = 10^{-14}\ \text{m}^{-2/3}$ 中的传输距离分别约为 $3297\ \text{m}$, $3490\ \text{m}$ 和 $5112\ \text{m}$ 。随着波长的增大,SNR传输的有效距离也在逐渐增加。由图2(b)可知,传输距离一定时,BER随着波长的增加而增加,且在 $4\ \text{km}$ 左右时有不同的变化,在 $4\ \text{km}$ 以前以指数形式增长,在 $4\ \text{km}$ 以后增长缓慢且趋于同一值,按小于 10^{-9} 的要求,BER在波长 $\lambda = 780\ \text{nm}$ 和 $\lambda = 1550\ \text{nm}$ 时激光束在湍流强度为 $C_n^2 = 10^{-14}\ \text{m}^{-2/3}$ 中传输的

最大距离约为 1348 m 和 1957 m, 传输有效距离约增加了 600 m。可见, 随着波长的增加, BER 传输的最大距离也得到增加, 因此采用波长较长的激光可以提高激光通信系统在湍流大气中的传输质量。

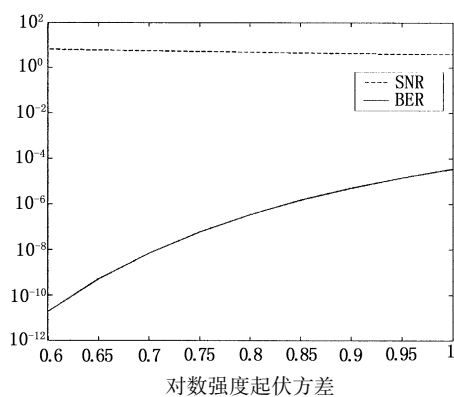


图3 SNR 和 BER 与对数强度起伏方差的关系

由图3可知, 信噪比和对数强度起伏方差成反比关系, 但起伏较小, 误码率和对数强度起伏方差成正比关系且随着对数强度起伏方差的变化起伏很大, 因此在激光通信系统中大气湍流的对数强度起伏方差对误码率的影响较大, 占主要地位。如果要求系统的误码率小于 10^{-9} , 那么对应的大气湍流对数强度起伏方差应小于 0.67。

4 结论

从信噪比(SNR)和误码率(BER)两个典型参数方面研究了大气湍流对激光通信系统性能的影响, 并进行了数值模拟分析。结果表明: 信噪比随着大气湍流强度的增加而减小, 误码率随着湍流强度的增加而增加且变化显著占主要地位。按 BER 小于 10^{-9} 的要求在不同湍流强度下传输的最大距离有明显的变化, 采用长波长的激光可以有效地增加

信号传播有效距离, 提高系统的通信质量。在实际工程中, 还可以采用自适应光学和多发射机等技术来降低大气湍流对误码率的影响。

参考文献:

- [1] 荣健, 陈彦, 等. 激光在湍流大气中的传输特性和仿真研究[J]. 光通信技术, 2003, 27(11): 42-45.
- [2] Andrews L C, Phillips R L, Hopen C Y, et al. Theory of optical scintillation[J]. J opt soc Am A, 1999, 16(6): 1417-1429.
- [3] 张逸新, 迟泽英. 光波在大气中的传输与成像[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001: 4-6.
- [4] X Guo liang, Z Xuping, W Junwei, et al. Influence of atmospheric turbulence on FSO link performance[J]. Proc. SPIE, 2004, 5281: 816-823.
- [5] L C Andrews, R L Phillips, C Y Hopen. Laser beam scintillation with applications[M]. Bellingham, Washington: SPIE Optical Engineering Press, 2001.
- [6] M Uysal, J Li, M Yu. Error rate performance analysis of coded free-space optical links over Gamma-Gamma atmospheric turbulence channels[J]. IEEE, 2006, 5(6): 1229-1233.
- [7] X Zhu, J M Kahn. Free-space optical communication through atmospheric turbulence channels[J]. IEEE, 2002, 50(8): 1293-1300.
- [8] 徐公权. 光纤通信技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 437-438.
- [9] 杨祥林. 光纤通信系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 145-145.
- [10] 张晓芳, 俞信, 阎吉祥. 大气湍流对光学系统图像分辨力的影响[J]. 光学技术, 2005, 31(2): 263-265.
- [11] 李晓峰, 陈彦, 胡渝. 空-地激光通信链路波长选择因素分析[J]. 应用光学, 2004, 25(1): 30-33.