

文章编号: 1001-3806(2008)01-0011-04

空间光通信的时间平滑实验研究

刘剑峰,于思源,韩琦琦,高 宠,马 晶,谭立英

(哈尔滨工业大学 可调谐激光技术国家级重点实验室,哈尔滨 150001)

摘要: 为了给空间光通信的瞄准捕获跟踪链路的设计提供参考,实验研究了强湍流区的大气闪烁时间平滑效应,并考虑大气闪烁和瞄准抖动误差,分析了空间光通信的跟瞄链路的强度起伏统计规律;在此基础上,分析了时间平滑对链路衰落起伏的改善作用。实验研究结果表明,随着曝光时间的增加,强湍流区的大气闪烁起伏幅度减小,当曝光时间达到几十毫秒时,强湍流区的大气闪烁起伏服从对数正态分布;在确保空间光通信系统的链路跟踪中断概率小于 10^{-3} 以下,采用时间平滑可以使所需的衰落冗余减少 15 dB ~ 20 dB。

关键词: 光通信;大气闪烁;时间平滑;衰落冗余;强湍流区

中图分类号: TN929.12 **文献标识码:** A

Experimental research of time-averaging effect in space optical communication

LIU Jian-feng, YU Si-yuan, HAN Qi-qi, GAO Chong, MA Jing, TAN Li-ying

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: To present preference to design of pointing, acquisition and tracking link in space optical communication, time-averaging effect of the atmospheric scintillation in the strong turbulent regime was studied experimentally. The mathematical model for the fade probability in space optical communications was provided in which effect of the pointing jitter and atmospheric scintillation on intensity fluctuations was taken into account. Based on the above, the improvement of links' fade fluctuation by time-averaging effects was analyzed. Experimental results show that the probability density function of irradiance in the strong turbulent regime is governed by the lognormal distribution, when exposure time reaches several decades of milliseconds; the required fade budget of the link at a lost-tracking probability of 10^{-3} is improved by the least of 15 dB ~ 20 dB, when the method of time-averaging effects of the atmospheric scintillation is used in space optical communications.

Key words: optical communication; atmospheric scintillation; time-averaging effect; fade budget; moderate and strong turbulence

引 言

空间光通信以其发射光束窄、通信容量大、抗干扰性强、系统体积小、保密性能好等优点倍受人们的青睐^[1-3]。捕获、跟踪、瞄准(acquisition, tracking, pointing: ATP)技术是以大气为传输媒介的空间光通信系统的关键技术,用于通信链路的建立和保持,但是接收光信号的强度起伏^[4-7]影响链路的稳定性。

为了克服强度起伏对链路的影响,在链路设计中需要留有充足的衰落冗余,但是由于激光器^[8-9]发射功率和光电探测器性能的限制,实际链路中较难得到充足的衰落冗余。ATP系统的粗跟踪子系统的采样频率较低,利用时间平滑效应^[10],增加位置传感器的曝光

时间可以减小强度起伏,这样将有效减小粗跟踪子系统所需的衰落冗余。下面将实验研究强湍流区的大气闪烁时间平滑效应,分析时间平滑对链路所需衰落冗余的改善作用。

1 强湍流区的链路衰落起伏

在唯象闪烁模型中,归一化光强被表示为 $i_s = xy$ 积的调制过程,其中 x 是由大尺度湍流引起的光强起伏, y 是由独立于大尺度的小尺度湍流引起的光强起伏。把接收到的大气闪烁光强起伏看作是大尺度产生的起伏对小尺度产生的起伏调制的结果,则强湍流区的强度起伏服从 gamma-gamma 分布^[3-4]:

$$f_s(i_s) = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \times i_s^{(\alpha+\beta)/2-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta}i_s) \quad (1)$$

式中,参量 $\alpha = 1/\sigma_{\ln x}^2$ 和 $\beta = 1/\sigma_{\ln y}^2$, $\sigma_{\ln x}^2$ 和 $\sigma_{\ln y}^2$ 分别是大尺度和小尺度湍流的对数强度闪烁方差, $\Gamma(x)$ 是伽马函数, $K_\nu(x)$ 是第二类修正贝塞尔函数。

大气湍流的光束漂移效应、位置传感器的跟踪误

作者简介:刘剑峰(1975-),男,博士后,主要从事空间光通信、光路设计等相关方面的研究。

E-mail: jfliu@163.com

收稿日期:2006-12-21;收到修改稿日期:2007-03-27

差、常平架机械轴系晃动以及基座扰动等因素导致系统瞄准抖动,进而引入服从 Beta 分布的强度起伏^[11]:

$$f_w(i_w) = \gamma i_w^{\gamma-1}, (0 < \gamma < 1, 0 < i_w) \quad (2)$$

式中, $\gamma = \omega_0^2 / 4\sigma_c^2$, ω_0 是光束发散角, σ_c 是瞄准抖动误差的均方差。

由于瞄准抖动误差和大气闪烁导致信号强度起伏,所以信号总的归一化强度表示为 $i_t = i_s \cdot i_w$ 。大气闪烁引起的归一化强度起伏满足 $0 < i_s < \infty$, 则考虑大气闪烁和瞄准抖动误差的影响,总的强度起伏的概率密度函数表示为:

$$f_t(i_t) = \int_0^\infty f_s(x) f_w\left(\frac{i_t}{x}\right) \frac{1}{x} dx \quad (3)$$

由(1)式、(2)式和(3)式得归一化强度起伏的概率密度函数表达式:

$$f_t(i_t) = \gamma i_t^{(\alpha+\beta)/2-1} \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \times \int_0^1 K_{\alpha-\beta} [2\alpha\beta i_t/x] dx \quad (4)$$

在 $\beta > \gamma$ 的情况下,对(4)式积分得归一化强度起伏的概率密度函数表达式:

$$f_t(i_t) = \frac{\gamma(\alpha\beta)^\gamma i_t^{\gamma-1}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \Gamma(\beta-\gamma)\Gamma(\alpha-\gamma) \times \frac{\gamma(\alpha\beta)^\beta i_t^{\beta-1}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \frac{\pi}{\sin(\pi\alpha-\pi\beta)} \frac{1}{(\beta-\gamma)\Gamma(\beta-\alpha+1)} \times {}_1F_2(\beta-\gamma, \beta-\alpha+1, \beta-\gamma+1; \alpha\beta i_t) + \frac{\gamma(\alpha\beta)^\alpha i_t^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \frac{\pi}{\sin(\pi\alpha-\pi\beta)} \frac{1}{(\alpha-\gamma)\Gamma(\alpha-\beta+1)} \times {}_1F_2(\alpha-\gamma, \alpha-\beta+1, \alpha-\gamma+1; \alpha\beta i_t) \quad (5)$$

式中, ${}_1F_2(a, b, c; z)$ 是广义超几何函数。

空间光通信终端间进行激光通信的前提是激光链路的建立,激光链路的建立和保持需要通过 ATP 系统来实现。当完成光束瞄准和捕获以后,由于存在着两个终端间的相对运动、光束漂移和终端微振动,面临着将发射端的光束保持在接收端探测器表面上的问题,即链路跟踪。ATP 系统一般通过高灵敏度位置传感器探测入射信标光来实现链路跟踪。信号强度随机起伏影响链路跟踪稳定性,当信号强度衰落到低于探测阈值时,系统判断没有信标光入射,链路跟踪中断,重新开始捕获。

为了克服强度起伏对链路跟踪稳定性的影响,在系统设计中必须留有充足的衰落冗余。ATP 链路的衰落冗余是链路设计的重要指标,是指链路达到一定稳定性(即链路中断概率小于某一给定值)所需的衰落冗余,表示为:

$$M = P_0' - P_{\text{rec}}' \quad (6)$$

上式的参量均以 dB 表示, $P_0' = 10\lg P_0$, $P_{\text{rec}}' =$

$10\lg P_{\text{rec}}$, P_{rec} 是探测器的探测阈值。

链路跟踪中断概率是描述强度起伏对链路跟踪稳定性影响的重要指标,设归一化阈值 $i_{\text{th}} = P_{\text{rec}}/P_0$, 则 $\ln i_{\text{th}} = -0.23M$, 跟踪中断概率表示为:

$$F(M) = P(i \leq M) = \int_0^\infty f_s(x) dx \int_0^{i_{\text{th}}/x} f_w(y) dy = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \exp[-0.115(\alpha+\beta)M] \int_0^1 K_{\alpha-\beta} [2\alpha\beta/x \exp(-0.115M)] + K_{\alpha-\beta} [2\alpha\beta x \exp(-0.115M)] dx \quad (7)$$

2 强湍流区的大气闪烁时间平滑实验分析

2.1 实验测量原理

光电探测器的曝光时间是有限短的,测量到的大气闪烁不再是在无限短的曝光时间下测量得到的闪烁值,而是在曝光时间内的统计平均,是一个下降了闪烁值,这种效应称为时间平滑效应。大气闪烁的时间平滑效应可以从频域和时域,分别利用功率谱和时间协方差函数来描述。在频域内,用低通滤波函数描述时间平滑效应,低通滤波函数可以表示为:

$$G(f) = [\text{sinc}(\pi fT)]^2 \quad (8)$$

式中, T 是曝光时间;函数 $\text{sinc}(x) = \sin(x)/x$ 。曝光时间为 T 的强度起伏方差表达式为:

$$\sigma_i^2(T) = \int_0^\infty W_i(f) [\text{sinc}(\pi fT)]^2 df \quad (9)$$

式中, $W_i(f)$ 是强度起伏功率谱。

在时域内,用时间协方差函数 $B_i(t)$ 来描述强度起伏的快慢程度、关联性,此时在曝光时间为 T 下的强度起伏方差表示为:

$$\sigma_i^2(T) = 2 \int_0^1 \int_0^{1-x} B_i(xT) dx \quad (10)$$

大气闪烁的时间平滑因子为:

$$A_i(T) = \sigma_i^2(T) / \sigma_i^2(0) = \frac{\int_0^\infty W_i(f) [\text{sinc}(\pi fT)]^2 df}{\int_0^\infty W_i(f) df} = 2 \int_0^1 \int_0^{1-x} b_i(xT) dx \quad (11)$$

式中, $b_i(t)$ 是强度起伏的相关系数(归一化协方差函数)。

2.2 实验测量系统

作者于 2006 年 3 月至 6 月在哈尔滨进行了传输距离 $L = 3200\text{m}$ 的光束传输实验,对大气闪烁起伏进行了测量。实验中所用激光器的波长为 532nm 。实验探测系统由光学接收、光电转换系统和数据处理系统两大部分组成。前者包括接收光学望远镜、滤波片

(中心波长为 532nm,带宽为 20nm)、光电探测器 CMOS和 APD。后者包括 1394 数据线、信号采集卡、计算机和数据处理软件。其中光电探测器 APD 的响应度为 10⁸ V/W,光敏面尺寸为 3mm,最大输入光功率为 0.6μW,最小探测光功率为 0.05nW; CMOS 的型号为 BASLER A602f,它具有低照度响应、高信噪比的特点,光敏面上像素的总数目为 659(水平)×493(垂直),单一像元的尺寸为 9.9μm(水平)×9.9μm(垂直)。

2.3 实验测量结果

长曝光时间下的强度测量值是通过短曝光时间下的强度测量值平均得来的。设每 Δt 时间内采集一个强度起伏值,则曝光时间为 kΔt 的强度起伏测量值序列表示为:

$$y_n(k\Delta t) = \frac{1}{k} \sum_{m=nk}^{nk+k} i(m\Delta t), (n = 0, 1, 2, \dots; N_{total}/k - 1) \tag{12}$$

图 1 和图 2 中的数据,是由在短曝光时间下的归一化

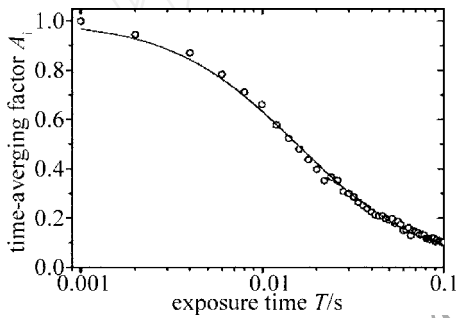


Fig 1 Experimental data of the time-averaging factor of atmospheric scintillation

强度起伏方差为 2.21 的一组强度起伏测量值序列得来的。图 1 中给出了大气闪烁的时间平滑因子随曝光时间的变化规律。图中的“o”是大气闪烁时间平滑因子的实验测量值 $A_i(k\Delta t) = \sigma_i^2(k\Delta t) / \sigma_i^2(\Delta t)$, $\sigma_i^2(k\Delta t)$ 和 $\sigma_i^2(\Delta t)$ 分别是序列 $y_n(k\Delta t)$ 和 $y_n(\Delta t)$ 的起伏方差;“—”是实验数据的拟合曲线,表示为 $A(T) = \{1 + (T/0.0155)^{1.2395}\}^{-1}$ 。

从图 1 可以看出,随着曝光时间的增加,强度起伏幅度减小;当曝光时间增加到 50ms,强度起伏幅度随曝光时间增加而下降的速度减小。

图 2 中给出了强度起伏的概率密度函数曲线。其中各个小图对应的归一化强度起伏方差分别为 0.88, 0.67, 0.39, 0.23, 分别是曝光时间为 10ms, 30ms, 50ms 和 100ms 时的强度起伏方差值,图中“o”是实验测量数据,“—”是根据实验测量给出的方差值得到的对数正态分布理论曲线。

从图 2 可以看出,由于时间平滑效应使得强湍流区的大气闪烁起伏减小,此时接收光强近似服从对数正态分布。

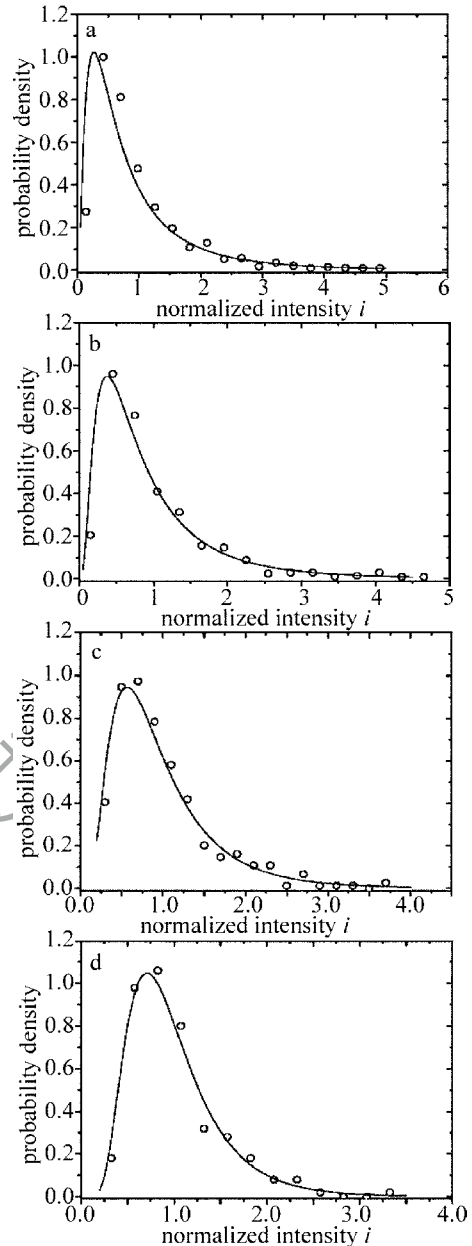


Fig 2 Probability density function of normalized intensity fluctuation

3 讨论

由跟踪探测器和大惯量、大行程机架结构组成的粗跟踪子系统,与由跟踪探测器、精瞄偏转镜和数字式精密定位控制器等组成的精跟踪子系统是空间光通信系统的重要组成部分,共同构成复合轴跟踪系统。ATP 系统一般通过光电探测器 CMOS 对入射信标光的像斑进行质心探测来实现链路跟踪。粗跟踪子系统的跟踪频率一般不大于 30Hz,其允许的光电探测器 CMOS 的最大曝光时间至少为 33ms,由图 1 可知,此时将产生时间平滑效应。

由上面的实验研究可知,时间平滑后,强湍流区的大气闪烁起伏服从对数正态分布,此时考虑大气闪烁和瞄准抖动误差,得信号衰落概率的表达式为:

$$F(M) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \int_0^{\infty} \exp(-x) \times \operatorname{erf} \left[\frac{-0.23M + x/\gamma + \sigma_i^2/2}{\sqrt{2\sigma_i^2}} \right] dx \quad (13)$$

式中,误差函数 $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-t^2) dt$

图 3a中给出了在没有时间平滑下,根据(7)式得

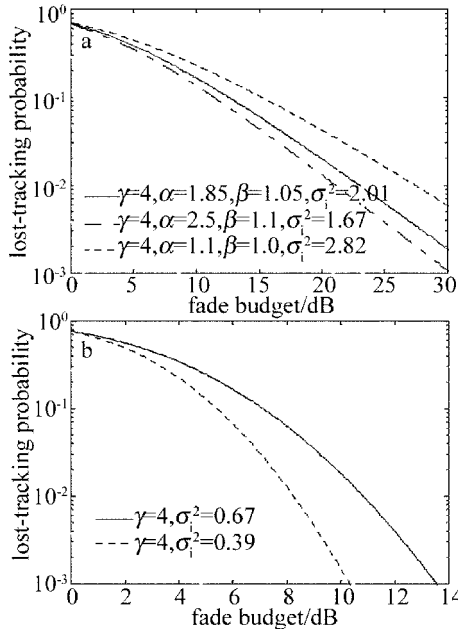


Fig 3 Lost-tracking probability variable with fade budgets
a—no time-averaging effect b—time-averaging effect

到的强湍流区的链路中断概率随链路衰落冗余的变化曲线,图 3b中给出了在曝光时间平滑下,根据(13)式得到的强湍流区的链路中断概率随链路衰落冗余的变化曲线。图 3b中的“—”和“---”是在曝光时间分别为 30ms和 50ms(其归一化强度起伏方差分别为 0.67和 0.39,对应的曝光时间为 1ms时的归一化强度起伏方差为 2.21)下的链路中断概率随衰落冗余的变化曲线。

从图 3a可以看出,确保链路中断概率小于 10^{-3} ,在曝光时间为 1ms没有时间平滑下,需要的链路衰落冗余至少为 30dB;从图 3b可以看出,确保链路中断概率小于 10^{-3} ,在曝光时间为 30ms和 50ms的时间平滑下,需要的链路衰落冗余分别为 14dB和 10dB,所以利用时间平滑可以使粗跟踪系统所需的衰落冗余至少减小 15dB~20dB。

4 结论

增加光电探测器的曝光时间是克服大气闪烁起

伏,进而改善大气闪烁对空间光通信系统的链路稳定性影响的有效措施。为了给空间光通信系统的链路设计提供参考,进行了水平传输实验,研究分析了曝光时间对强湍流区的大气闪烁起伏幅度和统计分布规律的影响。实验研究表明,利用大气闪烁的时间平滑效应,增加探测器的曝光时间可以有效降低强湍流区的大气闪烁起伏;当曝光时间达到几十毫秒时,强湍流区的大气闪烁起伏服从对数正态分布。

在此基础上,同时考虑强湍流区的大气闪烁和瞄准抖动误差,分析了时间平滑对链路衰落特性的改善作用。结果表明,在确保链路中断概率小于 10^{-3} 下,利用时间平滑效应可以使粗跟踪系统所需的衰落冗余至少减小 15dB~20dB。

参考文献

- [1] MA J, HAN Q Q, YU S Y, *et al* The effect of vibration on intersatellite optical communication and the resolving project [J]. *Laser Technology*, 2005, 29(5): 228-232 (in Chinese).
- [2] REYESA M, SODN IKB Z, LOPEZA P, *et al* Preliminary results of the in-orbit test of ARTEM IS with the optical ground station [J]. *Proc SPIE*, 2002, 4635: 35-49.
- [3] REYESM, CHUECA S, ALONSO A, *et al* Analysis of the preliminary optical links between ARTEM IS and the optical ground station [J]. *Proc SPIE*, 2002, 4821: 33-43.
- [4] ANDREWS L C, PHILLIPS R, HOPEN C Y, *et al* Theory of optical scintillation [J]. *J O S A*, 1999, A16(6): 1417-1429.
- [5] AL-HABASH M A, ANDREWS L C, PHILLIPS R L. Mathematical model for the irradiance probability density function of a laser beam propagating through turbulent media [J]. *Opt Engng*, 2001, 40(8): 1554-1562.
- [6] AL-HABASH M A, ANDREWS L C. New mathematical model for the intensity PDF of a laser beam propagating through turbulent media [J]. *SPIE*, 2000, 3706: 103-110.
- [7] YANG H, LIU W Q, LIU J G, *et al* Monitoring and study of city tropospheric aerosol [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(2): 174-176 (in Chinese).
- [8] LIANG Z Y, ZHANG S F, WANG J M. Engineering alteration of a passive mode optical probe system [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(3): 286-288 (in Chinese).
- [9] KANG X P, LÜB D. The axial intensity of nonparaxial Gaussian beams diffracted by a small aperture [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(3): 332-336 (in Chinese).
- [10] TOYOSHIMA M, ARAKIKI Effects of time averaging on optical scintillation in a ground-to-satellite atmospheric propagation [J]. *Appl Opt*, 2000, 39(12): 1911-1919.
- [11] KIASALEH K The probability density function of signal communications systems impaired by pointing jitter and turbulence [J]. *Opt Engng*, 1994, 33(11): 3748-3757.