

指向误差对海上无线光通信误码率性能的影响分析

王红星^{1,2} 宋 博^{1,2*} 吴晓军^{1,2} 刘 敏^{1,2}

¹海军航空工程学院电子信息工程系, 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

摘要 基于近海环境的大气信道测试链路, 实时测量了大气湍流中的大气折射率结构常数、光束漂移方差和光束半径等参数的实验数据。对仅考虑湍流影响和考虑指向误差影响的无线光通信的误码率(BER)模型进行对比分析, 分析考虑指向误差影响下的 BER 分别随大气折射率结构常数、光束漂移和光束扩展半径的变化关系。分析结果表明, 实际测量的 BER 分布随着大气折射率结构常数的增大而变大, 受到光束漂移和光斑扩展效应的影响, 在大气折射率结构常数较小时, 实际测量 BER 较理论计算的 BER 大 10~20 个数量级。

关键词 大气光学; 光通信; 大气湍流; 光束漂移; 误码率; 指向误差

中图分类号 TN929.12 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0901001

Influence of Pointing Error on Bit Error Rate of Free Space Optics System at Sea

Wang Hongxing^{1,2} Song Bo^{1,2} Wu Xiaojun^{1,2} Liu Min^{1,2}

¹Department of Electronic Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai, Shandong 264001, China

²Key Laboratory of Shandong Province on Signal and Information Processing, Yantai, Shandong 264001, China

Abstract An atmosphere channel testing link is set up in the marine environment, and the experimental data are tested, including the atmosphere refractive configuration index, the variance of beam drifting and the beam radius. The comparison of free space optics bit error rate (BER) model with none of pointing error and the one with pointing error is carried on. Based on the BER model with pointing error, the BER performance of free space optics system is estimated with the refractive configuration index, beam drifting and beam spreading. Experimental results show that the actual measured BER increases with the atmosphere refractive configuration index. When the atmosphere refractive configuration index is small, the actual measured BER is larger 10 to 20 orders of magnitude than the theoretical calculated BER on account of the effect of beam drifting and beam spreading.

Key words atmospheric optics; optics communication; atmospheric turbulence; beam drifting; bit error rate; pointing error

OCIS codes 010.1300; 010.1330; 010.3310

1 引 言

在视距无线光通信系统中, 指向的精确度是决定系统性能和稳定性的一个重要因素。由于建筑物的抖动、大气湍流、光学设备的对准误差和机械振动等因素的影响, 无线光通信系统中的激光信号在大气中传播时会产生指向误差^[1]。指向误差对无线光通信的影响主要与光束漂移方差^[2]和光束半径大小有关, 最终会导致光功率的下降以及链路信号的中断。本文研究了包含指向误差因素的大气湍流对无线光通信系统的影

收稿日期: 2016-03-16; 收到修改稿日期: 2016-04-18

基金项目: 山东省“泰山学者”建设工程专项经费(ts20081330)、山东省自然科学基金(ZR2013FQ010)

作者简介: 王红星(1962—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事光通信技术、现代通信新技术等方面的研究。

E-mail: buaawhx@163.cn

* 通信联系人。E-mail: 330487101@qq.com

响,可以为更好地估计和设计无线光通信系统提供帮助。

目前,关于指向误差的报道主要集中于理论研究。2003年,Arnon等^[3]认为建筑物的抖动服从瑞利分布,建立了指向误差的误码率模型,并分析大气湍流和建筑物抖动对城市无线光通信系统的误码率,但模型中忽略了接收孔径的大小以及并未考虑发射端时的编码方式。在同一年,Arnon等^[4]考虑了接收孔径因素分析指向误差对无线光通信误码率的影响。在2007年,Farid等^[5]综合考虑了大气湍流、光斑半径、接收孔径的尺寸和指向误差等因素,建立了不同天气条件下无线光通信系统的中断概率模型,用于优化光斑半径与接收孔径的比值,提高系统的可用度,但并未建立无线光通信系统的误码率模型。2008年,Ma等^[6]分析了光束漂移对星地无线光通信系统下行链路的影响,分析了光束漂移在不同链路余量、发散角和波长条件下误码率的变化情况。上述研究中,均假设接收平面上光束的横向位移和纵向位移是相互独立的,且服从均值为零的高斯分布,可以得到指向误差的概率分布为瑞利分布^[3],而在实际应用中,接收平面上横向位移量和纵向位移量的变化更为复杂。2011年Gappmair等^[7]使用Hoyt分布建立了新的无线光通信系统的指向误差模型。2013年Yang等^[1]在Farid提出的信道模型的基础上,使用Rician分布建立了指向误差的模型,并分析该指向误差模型下无线光通信系统的误码率性能。

综上所述可以看出,在指向误差的理论研究方面已经较为成熟,考虑指向误差后建立的无线光通信系统误码率模型或者中断概率模型都较之前更为准确,但无线光通信系统在实际通信中,受到大气湍流、气象条件和设备条件等随机因素的影响,测得的结果往往与理论计算存在一定的差别。另外还可以看出,目前理论分析大多建立在陆地城市等环境,而近海环境具有风速大、湿度高等特点,且海上大气折射率起伏功率谱具有bump特性^[8],因此在近海环境考虑指向误差影响下大气湍流对无线光通信误码率性能影响的实验研究可以为海上无线光通信系统设计提供一定指导。

本文在近海地区进行大气湍流实验,记录光束经过大气传播后在接收端的径向距离和光束半径的实验数据,同时还测量了与之对应的大气折射率结构常数。根据实际的光束漂移和光束半径数据确定指向误差的分布情况,并计算在该指向误差影响下大气湍流对无线光通信误码率性能的影响情况,为无线光通信系统的设计提供一定的帮助。

2 无线光通信系统的误码率模型

目前无线光(FSO)通信一般采用强度调制/直接检测(IM/DD),而且现有的FSO设备基本都采用开关键控(OOK)调制方式,发射0、1信号。因此本文的分析都是基于OOK调制方式展开^[9-10]。

2.1 不考虑指向误差误码率模型

无线光通信系统的误码率性能(BER)取决于系统的信噪比大小,对于开关键控调制方式的数字通信系统,其误码率可以写为

$$P(E) = \frac{1}{2}P(1|0) + \frac{1}{2}P(0|1) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{\gamma_{\text{SNR}_0}}{2\sqrt{2}}\right). \quad (1)$$

当不存在大气湍流时,无线光通信系统的信噪比为

$$\gamma_{\text{SNR}_0} = \sqrt{\frac{R \cdot P_s}{2eB}} = \sqrt{\frac{\eta\lambda \cdot P_s}{2hcB}}, \quad (2)$$

式中 P_s 为无湍流影响时接收机接收到的平均光功率,单位为W,对于OOK调制, $R = \eta e / (h\nu) = \eta e \lambda / hc$ 表征探测器灵敏度, η 是探测器量子效率, $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ 为电子电荷, $h = 6.625 \times 10^{-34} \text{ J/s}$ 为普朗克常量, λ 为光波波长, $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 为光速。

当存在大气湍流的影响时,会导致接收器接收到的信号光功率 P_s 的降低且表现为一个随机起伏的量,假设大气湍流引起的闪烁噪声与探测器噪声统计独立,可以得到平均信噪比为^[11]

$$\langle \gamma_{\text{SNR}} \rangle = \frac{\gamma_{\text{SNR}_0}}{\sqrt{\frac{P_{s_0}}{\langle P_s \rangle} + \sigma_1^2(D_G) \gamma_{\text{SNR}_0^2}}} =$$

$$\frac{\gamma_{\text{SNR0}}}{\sqrt{1 + 1.63(\sigma_{\text{R}}^2)^{6/5} \Lambda + \sigma_{\text{I}}^2(D_{\text{G}})\gamma_{\text{SNR0}}^2}}, \quad (3)$$

式中 $\sigma_{\text{R}}^2 = 1.23k^{7/6}C_n^2L^{11/6}$, $k = 2\pi/\lambda$, L 为链路距离, C_n^2 为大气折射率结构常数, $\sigma_{\text{I}}^2(D_{\text{G}})$ 为接收孔径为 D_{G} 时的光强起伏方差。因此, 可以得到在大气湍流影响且考虑接收孔径条件下的系统误码率性能为

$$\frac{1}{2} \int_0^{\infty} P_1(u) \operatorname{erfc}\left(\frac{\langle \gamma_{\text{SNR}} \rangle}{2\sqrt{2}}\right) du, \quad (4)$$

式中 $P_1(u)$ 采用的对数正态分布的光强起伏模型为

$$P_1(I) = \frac{1}{I\sigma_1(0, L)\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{\left\{\ln\left[\frac{I}{\langle I(0, L) \rangle}\right] + \frac{1}{2}\sigma_1^2(0, L)\right\}^2}{\sigma_1^2(0, L)}\right\}, I > 0. \quad (5)$$

2.2 考虑指向误差误码率模型

在考虑指向误差对误码率性能的影响时, 大气湍流中的光束漂移和光斑扩展效应均会对指向误差的计算造成影响, 其中光斑扩展效应会造成光束半径的增大, 大气湍流与指向误差并非独立, 因此, 不能只考虑无湍流条件下指向误差对接收光功率的影响而估计系统的误码率性能。采用 Ahmed 等提出的一种综合考虑指向误差、大气湍流和光束扩展的信道模型来分析系统的误码率性能。假设探测器的响应度为 1, 接收信号 y 可以表示为^[5]

$$y = hx + n, \quad (6)$$

式中 x 为传输光强, h 为信道状态, y 为接受的电信号, n 为与信号独立且方差为 σ_n^2 的加性高斯白噪声。信道状态 h 由无线光通信系统信道中随机的衰减组成, 主要包括大气衰减部分 h_1 (本文将其看作常数), 光束扩展半径及指向误差部分 h_p , 大气湍流衰落部分 h_a 。信道状态可以表示为

$$h = h_1 h_p h_a, \quad (7)$$

式中在弱湍流条件下, 大气湍流衰落的模型选择较为常用的对数正态分布, 则大气湍流的衰落分布可以表示为^[5]

$$f_{h_a}(h_a) = \frac{1}{2h_a\sqrt{2\pi\sigma_x^2}} \exp\left[-\frac{(\ln h_a + 2\sigma_x^2)^2}{8\sigma_x^2}\right], \quad (8)$$

式中 $\sigma_x^2 = \frac{1}{4}\sigma_{\text{R}}^2$ 。

而指向误差 h_p 的计算方法如图 1 所示, 假设探测器的孔径尺寸为 a , 在接收平面的光强分布为 I , 可以得到:

$$h_p(r, z) = \int_A I(\rho - r, z) d\rho, \quad (9)$$

式中 $I(\rho, z) = \frac{2}{\pi W_{\text{LT}}^2} \exp\left(-\frac{2\|\rho\|^2}{W_{\text{LT}}^2}\right)$, W_{LT} 为链路距离 z 处的光束扩展半径, 在弱湍流条件下^[11], $W_{\text{LT}} = W\sqrt{1 + 1.33\sigma_{\text{R}}^2\Lambda^{5/6}}$ 。 $h_p(r, z)$ 表示探测器接收到得光功率, A 表示探测器面积。根据 Farid^[5] 可以得到:

$$h_p(r, z) \approx A_0 \exp\left(-\frac{2r^2}{W_{\text{eq}}^2}\right), \quad (10)$$

式中 $A_0 = [\operatorname{erfc}(v)]^2$, $W_{\text{eq}}^2 = W_{\text{LT}}^2 \frac{\sqrt{\pi} \operatorname{erfc}(v)}{2v \exp(-v^2)}$, $v = \frac{\sqrt{\pi} a}{\sqrt{2} W_{\text{LT}}}$ 。

假设接收端光束的径向移动距离 r 服从瑞利分布:

$$f_r(r) = \frac{r}{\sigma_s^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_s^2}\right), r > 0, \quad (11)$$

式中 σ_s^2 为接收端光束的抖动方差, 在弱湍流条件下, 准直高斯光束的光束漂移方差理论值为^[11]

$$\sigma_s^2 = 2.42C_n^2L^3W_0^{-1/3}, \quad (12)$$

联合(11)式与(10)式, 令 $\gamma = W_{\text{eq}}/(2\sigma_s)$, 可以得到 h_p 的分布为

$$f_{h_p}(h_p) = \frac{\gamma^2}{A_0^{\gamma^2}} h_p^{\gamma^2-1}, 0 \leq h_p \leq A_0, \quad (13)$$

最终联合(8)式和(13)式,可以得到信道状态 h 的分布^[5]:

$$f_h(h, W_{LT}) = \frac{\gamma^2}{2(A_0 h_1) \gamma^2} h^{\gamma^2-1} \operatorname{erfc} \left[\frac{\ln \left(\frac{h}{A_0 h_1} \right) + \mu}{\sqrt{8} \sigma_X} \right] \exp [2\sigma_X^2 \gamma^2 (1 + \gamma^2)], \quad (14)$$

根据文献^[11],考虑指向误差影响下的平均误码率模型为

$$P_e = \int_0^{\infty} P_e(e | h) f_h(h) dh, \quad (15)$$

式中 $P_e(e | h) = Q \left(\frac{P_t h}{\sigma_n} \right)$, $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} \exp \left(-\frac{u^2}{2} \right) du$ 为高斯 Q 函数, P_t 为传输功率, σ_n 为噪声标准差。

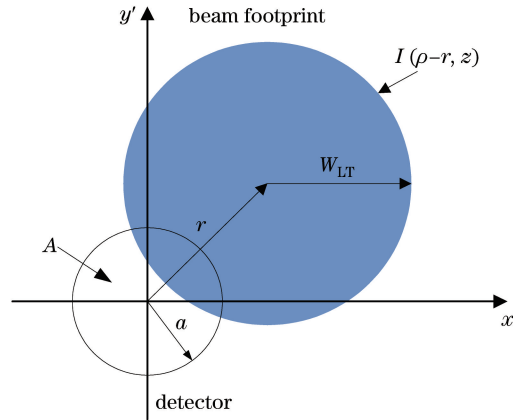


图 1 探测器平面上指向误差引起的光束轨迹示意图

Fig. 1 Diagram of beam footprint with pointing error on the detector plane

通过误码率模型的建立过程可以看出,所建立的误码率模型综合考虑了大气湍流、光束扩展半径和指向误差等影响因素,比较全面地包含了大气信道中影响光信号传输的因素。同时在估计指向误差对单发单收无线光通信系统光信号的接收影响时,与实际情况较为符合。基于大气信道参数测试系统,实时记录了大气湍流信道参数。根据实际测量的大气折射率结构常数对 2.1 节中仅考虑大气湍流影响时的误码率性能和 2.2 中节考虑指向误差的误码率性能在理论上进行了估计。根据实际测量的大气折射率结构常数、光束漂移方差和光束扩展半径数据,对 2.2 节中实际中考虑指向误差的系统误码率进行估计,可以较为准确地反映实际测试中误码率的变化情况,并对计算得到的三种误码率曲线进行对比分析。

3 数据分析

所使用的实验系统主要由闪烁仪、光束动态测试系统、激光雷达和六要素便携式气象站等设备组成^[12-13]。基于上述测试设备,在近海环境下开展了 6 次激光传输实验,采集到了不同时段、不同距离条件下的大气折射率结构常数、光束漂移方差、光束扩展半径以及大气消光系数等实验数据,在该实验数据的基础上结合第 2 节中的误码率模型分别计算并对比了仅考虑大气湍流影响的误码率、考虑理论计算的指向误差下的误码率和考虑实际测量的指向误差下的误码率;然后,分别从光束漂移方差和光束扩展半径两个方面分析了实际测量中指向误差对于系统误码率性能的影响。

以 2015 年 5 月~6 月的实验数据为基础,对近海环境下无线光通信误码率性能的分布情况进行分析,测试期间的具体情况如下:

1) 白天时段误码率的测试。选取近海面 1.2 km 测试链路,进行了两次误码率的实验测试。根据便携式气象站对实验时天气情况进行记录如下:在 2015 年 5 月 3 日 10:00~16:00 期间,天气晴有少量云,平均风速为 1.65 m/s(轻风),温度在 13.2 °C~13.9 °C 之间;在 2015 年 5 月 25 日 12:00~16:30 期间,天气主要

以晴天为主,在 14:40~15:40 期间海上出现平流雾对激光信号造成中断;该时段平均风速为 1.46 m/s,温度在 16.8 °C~18.5 °C 之间;在 2015 年 5 月 9 日 10:30~15:00 期间,天气少云转多云,平均风速为 1.9 m/s(轻风),温度在 15.2 °C~18.9 °C 之间,2015 年 5 月 30 日 11:10~14:10 期间,天气晴,平均风速为 1.15 m/s(软风),温度在 18.2 °C~19.8 °C 之间。

2) 夜间时段误码率的测试。在夜间时段,进行了两次不同距离条件下的误码率实验测试。在 2015 年 5 月 21 日 19:00~20:30 进行了链路距离为 1.2 km 的实验测试,根据便携式气象站对实验时天气情况的记录,该时段天气少云,平均风速为 1.3 m/s(软风),温度在 23.7~25.9 °C 之间;在 6 月 12 日的 20:25~21:40 进行了链路距离为 2.1 km 的实验测试,该时段天气晴,平均风速为 1.33 m/s(软风),温度在 19.5~20.4 °C 之间。表 1 给出了 6 次实验测量的大气折射率结构常数、大气消光系数、光束漂移方差和光束半径的变化范围。另外,噪声标准差 σ_n 取 10^{-7} A/Hz,激光发射器的发射功率为 40 mW,波长为 850 nm。

表 1 测试期间的数据采集情况

Table 1 Data collection during observation period

Date	$C_n^2 / (10^{-15} \text{ m}^{-2/3})$	σ / km	σ_s / cm	W_{LT} / cm	L / km
2015-05-03	2.2~5.9	0.7	0.98~1.85	12.5~17.5	1.2
2015-05-21	1.4~5.2	1.0	1.05~1.82	12.2~12.7	1.2
2015-05-09	1.8~14.0	0.9	0.88~1.80	12.5~16.0	1.2
2015-05-25	8.1~11.0	0.8	1.48~1.82	11.2~12.6	1.2
2015-05-30	2.1~8.9	1.0	1.05~2.00	13.5~18.0	1.2
2015-06-12	0.3~3.0	0.3	1.67~2.21	21.1~24.0	2.1

需要说明的是,为了便于计算和对实验结果进行分析,对实验数据进行了一定程度的近似:1) 实验系统为了便于采集激光经大气传输后的光束漂移量和接收平面上的光束半径,采用发散角为 0.1 mrad 发射、功率为 40 mW 的准直高斯激光发射器,在链路距离为 2.5 km 以下时可以确保接收平面上的光束半径在 0.1~0.3 m 之间,以便 CCD 可以完整地记录光束的变化情况,提高计算光束漂移方差和光束半径的精度。而现有较为常用的无线光通信系统中激光发射器的发散角一般为 2.5 mrad,接收端接收孔径一般为 20 cm^[4],当链路距离为 1 km 时,激光经大气传输后到达接收端的光束半径一般在 2.5 m 左右,需要完整记录光斑大小以及光束漂移量比较困难,且精确度较低。因此,根据文献[4]将接收孔径的大小设置为测量得到的平均光束漂移量的三分之一,可以保证实际测量的误码率与实际无线光通信系统差别不大。2) 测试时通过米氏散射激光雷达可以得到大气消光系数的实验数据,测试间隔为 1 h,根据 4 次测量的实验数据发现实验期间大气消光系数的变化不大,为了便于研究指向误差对系统误码率的影响,大气消光系数值采用当日实验期间测量的均值。3) 由于近海环境的大气折射率结构常数的数量级一般都在 $10^{-15} \text{ cm}^{-2/3}$ 以下且光强分布均服从对数正态分布^[14],在链路距离为 1.2 km 湍流强度基本上处于弱湍流,为了计算简单,在湍流对指向误差影响理论研究中光强分布主要采用对数正态分布。

3.1 三种条件下误码率对比分析

根据第 2 节中的误码率模型,图 2 分别给出了 6 次实验中三种条件下的误码率随大气折射率结构常数的变化曲线。图中方形曲线为根据实际测量光束漂移方差和光束扩展半径得到的带有指向误差影响的系统误码率分布,简称实测值;三角形曲线为根据湍流理论计算的光束漂移方差和光束扩展半径得到的带有指向误差影响的系统误码率分布,简称理论值;圆形曲线为仅考虑大气湍流影响不考虑指向误差影响的系统误码率分布,简称湍流值。

图 2(a)为 2015 年 5 月 3 日误码率分布情况,误码率曲线分布从大到小依次为实测值、理论值和湍流值,理论值与湍流值相差较小。其中大气折射率结构常数在 $2 \times 10^{-15} \sim 3.5 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 之间时,误码率的实测值与湍流值相差 3~5 个数量级,当大气折射率结构常数在 $4 \times 10^{-15} \sim 6.4 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 之间时,二者之间相差 2~3 个数量级。图 2(b)为 2015 年 5 月 21 日误码率分布情况,误码率曲线分布从大到小依次为实测值、理论值和湍流值。由于实测的光束漂移或者光束扩展半径的起伏幅度较大导致误码率的实测值起伏较大。理论值与实测值更为接近。误码率的实测值与湍流值之间相差 5~9 个数量级。图 2(c)为 2015 年 5 月 25

日误码率分布情况,在大气折射率结构常数 $1.5 \times 10^{-15} \sim 3 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 之间,误码率的实测值高于理论值和湍流值,可以推测出该区间的光束漂移和光束扩展半径与理论值差别较大,指向误差对误码率的影响大于大气折射率结构常数对误码率造成的影响。大气折射率结构常数在 $1.5 \times 10^{-15} \sim 3 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 之间时,误码率的实测值处于理论值和湍流值之间,可以看出该日实测误码率随大气折射率结构常数变化趋势与理论值和湍流值不同,实测值随着大气折射率结构常数增大的趋势并不明显,理论值与湍流值的变化曲线趋势较为一致。图 2(d)为 2015 年 6 月 12 日误码率变化情况,与前三日实验不同,该日实验测试链路的距离为 2.1 km,误码率分布从大到小依次为理论值、实测值和湍流值,可以看出,当大气折射率结构常数小于 $10^{15} \text{ m}^{-2/3}$ 时,无论是理论值还是实测值均比湍流值高出 $10 \sim 20$ 个数量级左右,当大气折射率结构常数达到 $3 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 时,实测值与湍流值仅相差 1 个数量级左右,这说明当大气折射率结构常数较小时,指向误差对于系统的误码率性能影响较大。图 2(e)为 2015 年 5 月 9 日误码率分布情况,误码率曲线分布从大到小依次为理论值、实测值和湍流值。该日实测值与湍流值的差别在 $0 \sim 3$ 个数量级,可以看出该日的指向误差对误码率的影响较小。图 2(f)为 2015 年 5 月 30 日误码率分布情况,误该日理论值和实测值的差别较小,实测值在理论值上下分布,理论值与湍流值的差别在 $1 \sim 2$ 个数量级。

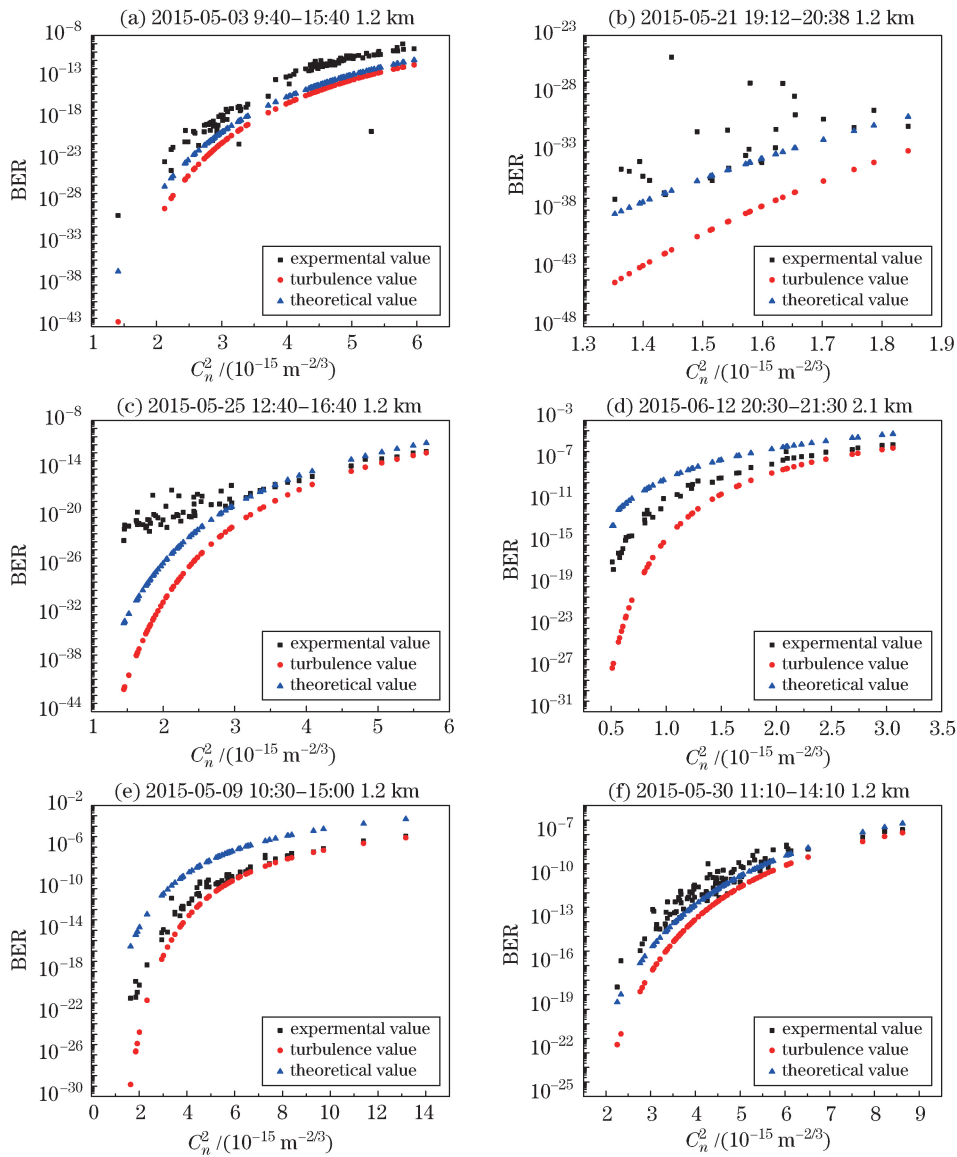


图 2 三种条件下误码率分布对比

Fig. 2 Comparison of BER distribution varying under three conditions

海上环境的光斑扩展和光束漂移受到相对湿度、横向风速等因素的影响,实际测量值与大气折射率结构常数的变化趋势并不一致^[12],从而导致图2中理论值与实测值出现理论值大于实测值、实测值大于理论值和实测值分布在理论值上下等情况。考虑到指向误差和光斑扩展的影响,误码率分布的理论值和实测值均大于仅考虑大气湍流影响的湍流值。5月25日和5月21日光斑扩展和光束漂移的起伏幅度较大,导致在大气折射率结构常数相近时,误码率的实测值的起伏幅度达到了5~7个数量级。

3.2 指向误差对误码率的影响分析

指向误差是影响无线光通信误码率性能的重要因素,根据第2节中的误码率模型可以看出,指向误差对误码率的影响主要与光束漂移标准差和光束半径有关。为了可以直观掌握实际测试中指向误差对误码率性能的影响,分别分析大气湍流中光束漂移和光束半径与误码率的变化关系。图3分别给出了6次实验误码率随光束漂移标准差的变化分布,图4分别给出了6次实验误码率随光束半径的变化分布,其中(a)、(c)、(e)和(f)为白天时段误码率变化情况,测试时间分别为9:40~15:40、12:40~16:40、10:30~15:00和11:10~14:10;(b)和(d)为夜间时段误码率变化情况,测试时间分别为19:12~20:38和20:30~21:30。

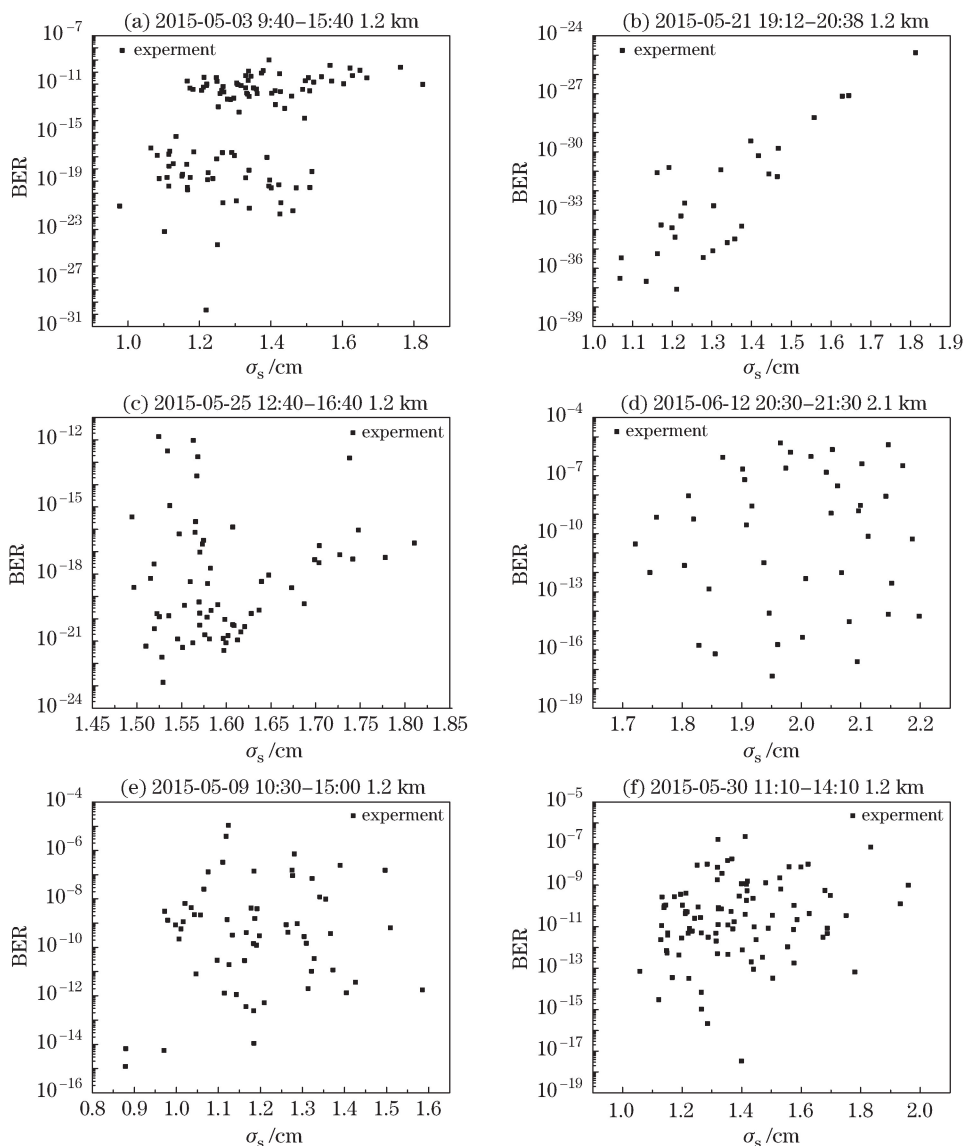


图3 误码率随光束漂移变化分布

Fig. 3 BER varying with the beam drifting distribution

从图3中可以看出,5月3日误码率的变化范围为 $2.2 \times 10^{-30} \sim 1.2 \times 10^{-10}$,主要分布在两个区间:当光束漂移标准差的变化范围在 $0.98 \sim 1.45$ cm 之间时,误码率的变化范围为 $2.2 \times 10^{-30} \sim 9.2 \times 10^{-16}$;当光束漂

移标准差的变化范围在 1.18~1.85 之间时,误码率变化范围为 $2.5 \times 10^{-14} \sim 1.2 \times 10^{-10}$ 时。5 月 21 日误码率的变化范围为 $8.3 \times 10^{-38} \sim 7.6 \times 10^{-28}$,在该测试中随着光束漂移标准差的增大,误码率的整体趋势也是变大的。5 月 25 日误码率的变化范围为 $1.4 \times 10^{-23} \sim 1.4 \times 10^{-12}$,当光束漂移标准差处在 1.6~1.85 cm 区间上时,随着光束漂移标准差的变大,误码率的分布也呈增大趋势。6 月 12 日和 5 月 9 日误码率在整个光束漂移变化区间上的分布比较均匀,变化范围分别为 $2.5 \times 10^{-17} \sim 2 \times 10^{-6}$ 和 $9.5 \times 10^{-14} \sim 2 \times 10^{-5}$,5 月 30 日误码率的变化范围为 $9 \times 10^{-17} \sim 5 \times 10^{-6}$,随光束漂移标准差的增大,误码率也呈增大的趋势,但是增幅度并不明显。

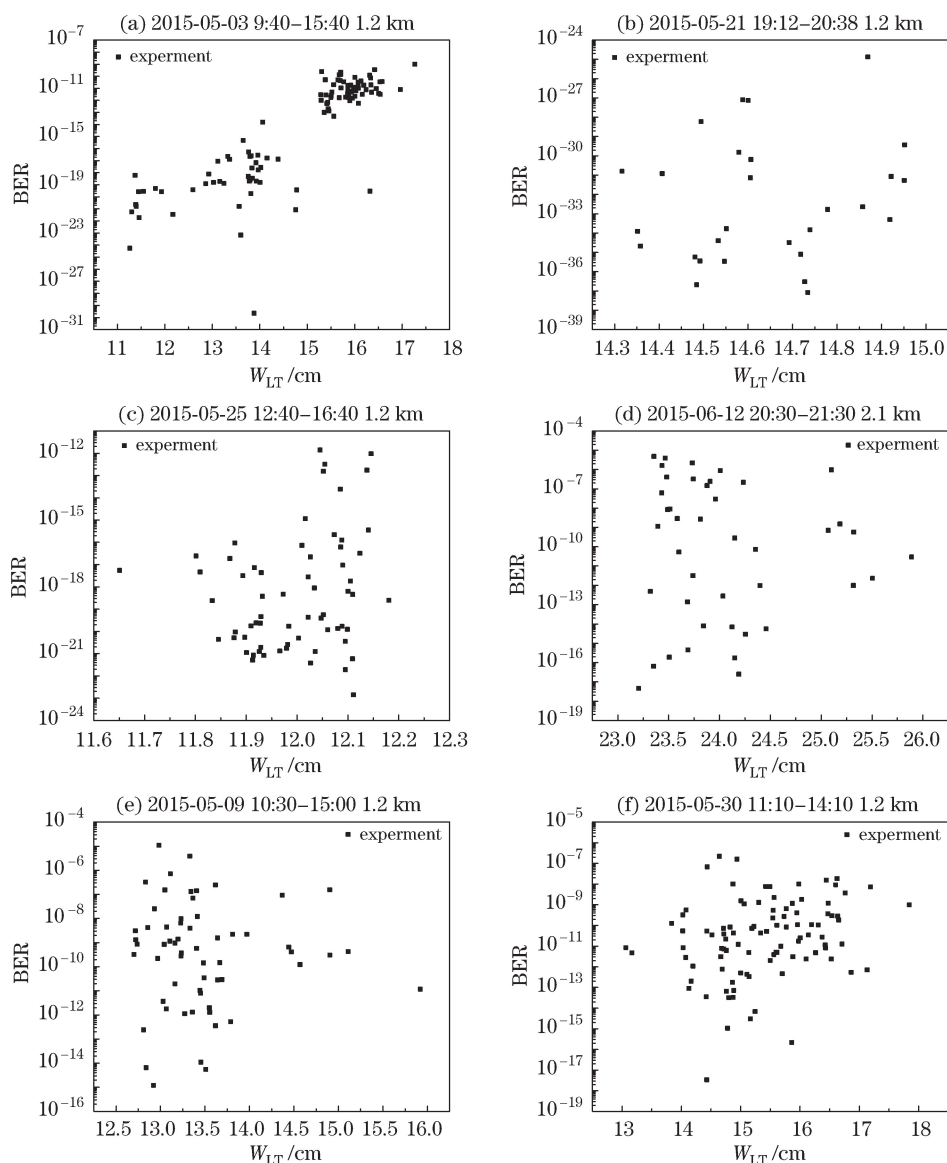


图 4 误码率随光束半径变化分布

Fig. 4 BER varying with the beam radius distribution

从图 4 中可以看出,5 月 3 日误码率的分布明显可以分为两个部分:光束半径为 12~15 cm 时误码率的变化范围在 $2.2 \times 10^{-30} \sim 9.2 \times 10^{-16}$ 之间;光束半径为 15~17.5 cm 时误码率的变化范围在 $2.5 \times 10^{-14} \sim 1.2 \times 10^{-10}$ 之间。可以看出,随着光束半径的增大,误码率的整体趋势也是变大的。5 月 21 日光束半径的变化幅度较小,随光束半径的增大误码率的分布比较均匀。从 5 月 25 日误码率分布可以看出,在光束半径为 12.0~12.1 区间包含了误码率的整个变化范围。6 月 12 日和 5 月 30 日误码率在整个光束半径变化范围内分布比较均匀。5 月 9 日中,光束半径的分布大部分处于 14 cm 之内,仅有 8 个测试点光束半径大于 14 cm,光束半径在 14 cm 之内时误码率分布也比较均匀,并无随光束半径变化一致的趋势。

从误码率随光束漂移和光束半径的变化分析可以看出,5月3日白天时段测试时间跨度较大时,大气湍流发生了较大的变化,误码率较为明显地分布在两个区域,误码率的变化趋势在一定程度上与光束扩展半径的变化一致。5月21日光束漂移和光束扩展对误码率的影响较大,导致误码率的变化趋势在一定程度上与光束漂移的变化相一致。5月25日由于测试时间跨度较小且夜间天气变化比较稳定,导致光束漂移方差和光束半径的变化范围较小,测试阶段的误码率分布比较均匀。5月9日和5月30日光束漂移和光斑扩展的变化幅度较大,导致虽然两日的测试链路距离为1.2 km,但是误码率的变化范围与6月12日链路距离2.1 km时的误码率变化范围相近。

4 结 论

基于大气信道测试系统,分别于2015年的5月3日、5月9日、5月21日、5月25日、5月30日和6月12日对近海环境下的大气信道参数进行实验记录,采集到了白天时段1.2 km和夜间时段1.2 km、2.1 km的大气折射率结构常数、光束漂移方差和光束半径等实测数据。仅考虑大气湍流影响和考虑指向误差影响,分别对三种条件下的无线光通信系统误码率性能进行估计,对测试期间大气折射率结构常数和指向误差对误码率影响的变化情况进行了分析。从分析的结果可以看出:在设定的无线光通信系统的参数条件下,考虑指向误差后的误码率分布大于仅考虑湍流条件下的误码率分布,相差在3~10个数量级之间。当链路距离为1.2 km时,考虑指向误差的影响,实际测量的误码率大于理论计算的误码率;当链路距离为2.1 km时,理论计算的误码率大于实际测量的误码率。链路距离为1.2 km时,夜间时段的误码率均处于 10^{-9} 以下;链路距离为2.1 km时,误码率最高达到了 10^{-6} 。另外,在几次实验中误码率的变化趋势基本与大气折射率结构常数的变化一致,同时光束漂移也会对误码率性能造成一定程度的影响。

参 考 文 献

- 1 Yang F, Cheng J, Tsiftsis T A. Free-space optical communications with generalized pointing errors[C]. Communications (ICC), 2013 IEEE International Conference on. IEEE, 2013: 3943-3947.
- 2 Li Rongwang, Chang Xiang, Xiong Yaoheng, *et al.* Numerical simulation of wander of ranging laser beam[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(11): 1101001.
李荣旺, 常翔, 熊耀恒, 等. 测距光束光斑漂移的数值仿真[J]. 光学学报, 2011, 31(11): 1101001.
- 3 Arnon S. Effects of atmospheric turbulence and building sway on optical wireless-communication systems[J]. Optics Letters, 2003, 28(2): 129-131.
- 4 Arnon S. Optimization of urban optical wireless communication systems [J]. Wireless Communications, IEEE Transactions on, 2003, 2(4): 626-629.
- 5 Farid A A, Hranilovic S. Outage capacity optimization for free-space optical links with pointing errors[J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 25(7): 1702-1710.
- 6 Ma J, Jiang Y, Tan L, *et al.* Influence of beam wander on bit-error rate in a ground-to-satellite laser uplink communication system[J]. Optics Letters, 2008, 33(22): 2611-2613.
- 7 Gappmair W, Hranilovic S, Leitgeb E. OOK performance for terrestrial FSO links in turbulent atmosphere with pointing errors modeled by Hoyt distributions[J]. Communications Letters, IEEE, 2011, 15(8): 875-877.
- 8 Grayshan K J, Vetelino F S Ö M, Young C Y. A marine atmospheric spectrum for laser propagation[J]. Waves in Random and Complex Media, 2008, 18(1): 173-184.
- 9 Navidpour S M, Uysal M, Kavehrad M. BER performance of free-space optical transmission with spatial diversity[J]. Wireless Communications, IEEE Transactions on, 2007, 6(8): 2813-2819.
- 10 Tsiftsis T A, Sandalidis H G, Karagiannidis G K, *et al.* Optical wireless links with spatial diversity over strong atmospheric turbulence channels[J]. Wireless Communications, IEEE Transactions on, 2009, 8(2): 951-957.
- 11 Andrews L C, Phillips R L. Laser beam propagation through random media[M]. Bellingham: SPIE Press, 2005.
- 12 Wang Hongxing, Song Bo, Wu Xiaojun, *et al.* Experimental study of beam spreading of collimated beam in atmospheric turbulence under the sea surface environment[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(3): 0305004.
王红星, 宋博, 吴晓军, 等. 近海面大气湍流中准直高斯光束光斑扩展的实验研究[J]. 中国激光, 2016, 43(3): 0305004.

- 13 Feng Xinxing, Zhang Liyan, Ye Na, *et al.* Fast algorithms on center location of two dimensional Gaussian distribution spot[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(5): 0512002.
冯新星, 张丽艳, 叶 南, 等. 二维高斯分布光斑中心快速提取算法研究[J]. 光学学报, 2012, 32(5): 0512001.
- 14 Wu Xiaojun, Wang Hongxing, Li Bifeng, *et al.* Statistical analysis of atmospheric refractive index structure parameter under the sea surface environment[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(4): 0401002.
吴晓军, 王红星, 李笔锋, 等. 近海面大气折射率结构常数统计特性分析[J]. 光学学报, 2015, 35(4): 0401002.