

LC-SLM 激光大气传输湍流模拟及通信实验分析

艾勇,段梦云,徐洁洁,单欣,陈晶,熊准,姜茹

(武汉大学电子信息学院,湖北武汉430079)

摘要:采用功率谱反演法与叠加低频谐波方式数值模拟静态湍流相位屏,并根据湍流冻结理论仿真了动态湍流相位屏。采用液晶空间光调制器(LC-SLM)在实验室内搭建了大气湍流信道仿真平台,进行了Kolmogorov湍流模型下,不同湍流强度的激光大气传输模拟研究,对比分析了实验结果,与理论较为符合。同时实验研究了不同模拟湍流强度下激光通信误码率的响应关系,这对实验室内评估实际激光通信系统的性能具有重要应用价值。

关键词:大气湍流模拟; 激光传输; 相位屏模拟; 激光通信

中图分类号: TN929.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)10-3103-07

LC-SLM laser atmospheric transmission turbulence simulation and communication test

Ai Yong, Duan Menyun, Xu Jiejie, Shan Xin, Chen Jing, Xiong Zhun, Jiang Ru

(College of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: Numerical simulations for static turbulent phase screens are presented with power spectrum method (FFT). Also simulation methods for dynamic phase screen were presented by using traditional turbulence frozen method. An indoor atmospheric turbulence simulator was designed based on LC-SLM, and a simulation test bed was built. In the Kolmogorov turbulence laser propagation characteristic in different turbulent atmosphere was simulated. The experiments results were analyzed and showed the agreement with the theory. The response of bit error to intensity of turbulence were investigated, it is meaningful for value the laser communication system indoor test.

Key words: atmospheric turbulence simulation; laser transmission; simulation for phase screen; laser communication

收稿日期:2015-02-05; 修订日期:2015-03-15

基金项目:国家自然科学基金(11204220);光电控制技术重点实验室和航空科学基金(201351S5002)

作者简介:艾勇(1958-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事自由空间光通信及空间光学探测方面的研究工作。

Email: aiyong09@163.com

0 引言

在星地或地面远距离激光通信时,激光在大气中传输时会受到严重的大气湍流效应,从而导致传输光束的波面畸变、光强起伏、光束漂移和光束扩展等光学效应。为了保证通信质量,必须对激光束在大气湍流中的传播特性进行研究,在掌握湍流影响规律的基础上,找到提高通信质量的办法。因外场实验费时费力、重复性差,在工程设计和实验中人们迫切需要能模拟大气湍流扰动的大气湍流模拟器,以便在实验室里就可以进行大气湍流研究和进行相应的实验。有研究者利用空气或水等为介质,将在温度梯度场中产生湍流的湍流池作为大气湍流模拟器^[1-3]。尽管该方法具有制作简单、成本低的优点,但体积很难做得足够大,而在米量级的小体积内很难获得低空间频率谱成分,另外,大气参数模拟的重复性精度较低,且系统的散热对光学仪器有不利影响。液晶空间光调制器(LC-SLM)具有高像素密度、大面积、无热量产生、相位调制范围大、模拟参数重复性极好、编程实时控制等优越性能,用来制作大气湍流模拟器十分理想,且可以解决湍流池的上述缺点。近些年国内外已有许多机构开展了 LC-SLM 模拟大气湍流的研究工作,取得了很大的进展^[4-9]。

文中介绍了采用功率谱反演法模拟静态湍流相位屏,并根据湍流冻结理论介绍了动态湍流相位屏仿真方法。采用德国 Holoeye 公司的 PLUTO-NIR-II 液晶空间光调制器在实验室内搭建了大气信道仿真平台,进行了 Kolmogorov 湍流下,不同湍流强度的激光大气传输模拟研究,对比分析了实验结果,与理论较为符合。同时实验研究了不同模拟湍流强度下激光通信误码率的响应关系,这对实验室内评估实际激光通信系统的性能具有重要应用价值。

1 湍流相位屏的数值模拟

1.1 静态相位屏

静态相位屏的模拟采用功率谱反演法,但该法的缺点是生成的相位屏低频成分不足,为此提出采用功率谱反演与叠加 2 级次低频谐波的方法模拟相位屏,这样的相位屏具有合理的高低频谱成分。

令相位屏尺度 $G=0.5\text{ m}$,采样点数 $N=512$,采样间隔 0.001 m ,大气相干长度 0.1 m 。采用功率谱反演与叠加 2 级次低频谐波后的模拟相位屏如图 1 所示。由图 1 可见高低频成分分布较合理。相位屏的相位结构函数可以用来验证仿真结果的有效性。模拟结果与理论结果对照如图 2 所示。可以看出随着横坐标 r 值增大(对应低频成分),未叠加低次谐波的相位屏的相位结构函数与理论值差异较大,叠加 2 级次谐波后,低频成分得到补偿,与理论值比较接近。

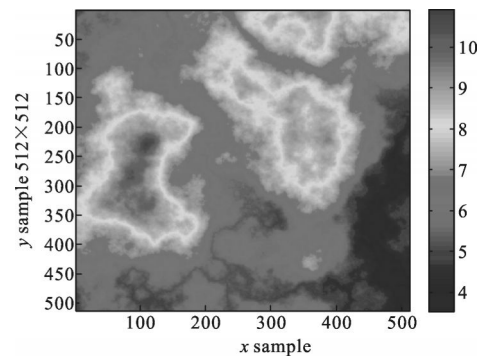


图 1 湍流相位屏模拟图($r_0=0.1\text{ m}$)

Fig. 1 Simulation map of turbulent phase screen($r_0=0.1\text{ m}$)

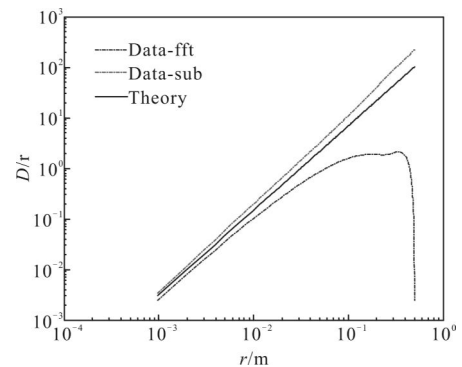


图 2 湍流相位屏和相位结构函数($r_0=0.1\text{ m}$)

Fig. 2 Turbulence phase screen and phase structure function($r_0=0.1\text{ m}$)

1.2 动态相位屏

采用湍流冻结法模拟动态湍流相位屏,首先生成一个较大尺度的相位屏(母屏),再根据风速的大小连续选取母屏上的子区域作为子相位屏(子屏),这些子屏构成动态相位屏。具体做法为,采用 FFT 法生成采样点数为 8192×8192 的母屏。子屏的大小和形状需与液晶空间光调制器尺寸及其接收光斑尺寸相匹配。取子屏为采样点数 512,直径 0.5 m 。若考虑

风向影响,即取横向风速典型值 $r=10\text{ m/s}$,子屏时间间隔 $Dt=0.02\text{ s}$ 。若不考虑风向,可获得 960 幅子屏。

2 实验装置及参数

LC-SLM 湍流模拟实验装置框图如图 3 所示。实物及实验场景如图 4、表 1 所示。

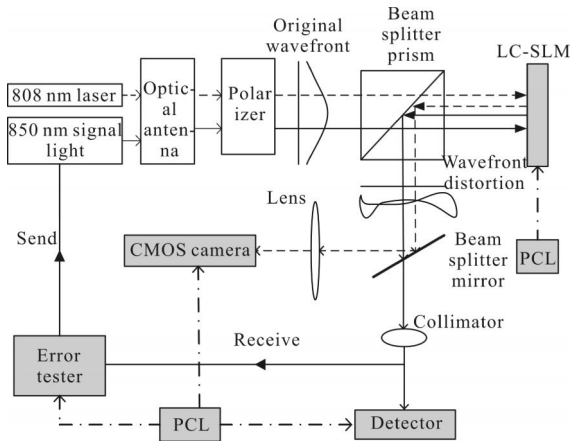


图 3 LC-SLM 湍流模拟实验装置框图

Fig.3 Experimental device block diagram of LC-SLM turbulence simulation

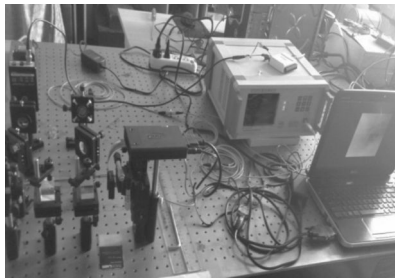


图 4 LC-SLM 湍流模拟实验装置实物及实验场景

Fig.4 Actual device and experimental scenes of LC-SLM turbulence simulation

表 1 实验装置有关参数

Tab.1 Relevant experimental parameters

Device	Parameters
F240FC-780	$\lambda_D=780\text{ nm}$, $\theta=1\text{ mrad}$, $D=2\text{ mm}$, $f=8\text{ mm}$
Polarizing prism	PBS@800nm $T_p>95\%$, $T_s<1\%$, $R_s>99\%$, $R_p<5\%$
Beam splitter	1:1@800 nm
LC-SLM	$f_{SLM}=60\text{ Hz}$
Mirrors	Silver, reflectivity>95%@400-12 000 nm
Detector model2031	PIN, 400-1 070 nm 0.6 A/W, @900 nm
Data acquisition card	NI USB-6009, 14 bit, 48 kS/s
CMOS CCD MV-D1024E-40	Resolution:1 024x1 024 pixel Size:10.6x10.6 μm^2
BER tester	ET3200

3 湍流模拟结果

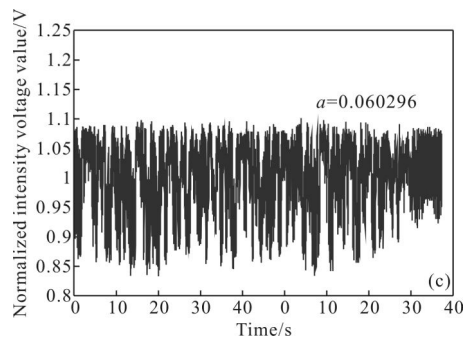
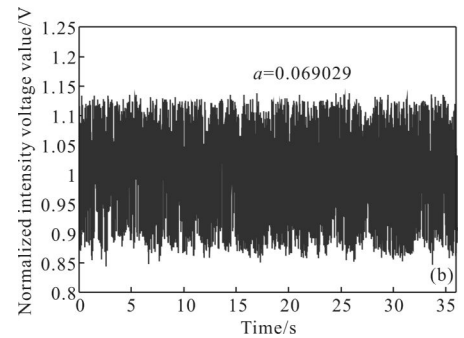
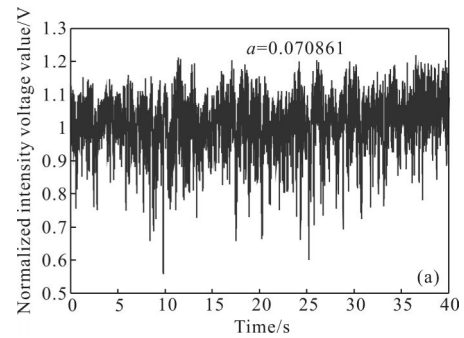
采用 1.2 节介绍的方法分别制作 $r_0=0.01\text{ m}$ 、 0.05 m 、 0.1 m 和 0.5 m 的动态相位屏,考察不同 r_0 下激光传输的效果。

3.1 光强起伏

接收端采用光电探测器和数据采集卡,通过 Labview 数据采集卡采集电压并存储,所用的光电探测器灵敏度优于 100 nW ,采样频率为 1 kHz ,采样时间为 40 s 。

(1) 归一化光强值

不同 r_0 下采集的归一化光强变化如图 5 所示。图中的 a 值代表归一化光强值的标准偏差,用来表征归一化光强的起伏偏差。可以看出,随着 r_0 的减小,湍流强度逐渐增大,光强波动越大。



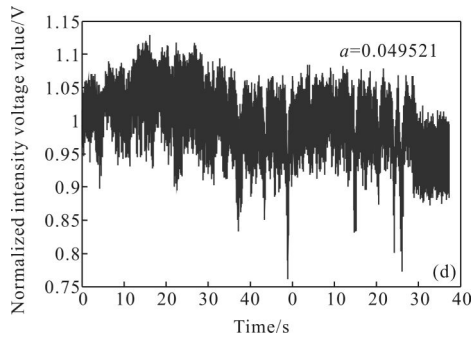


图 5 采集的归一化光强变化曲线
Fig.5 Normalized intensity curves

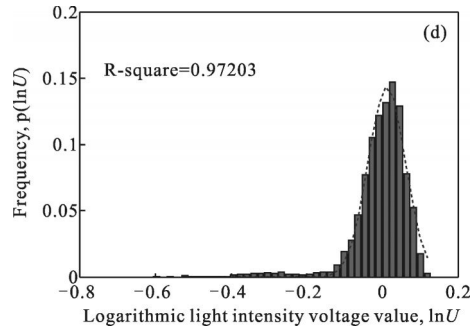


图 6 对数光强电压值的归一化直方图及其正态拟合曲线
Fig.6 Normalized histogram and normal curve fitting of logarithmic intensity voltage values

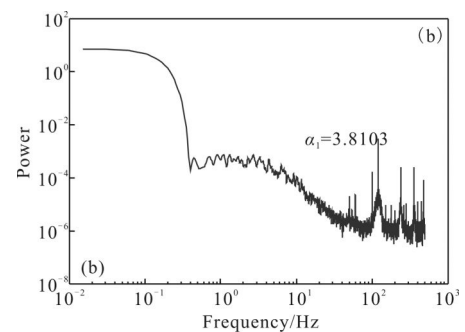
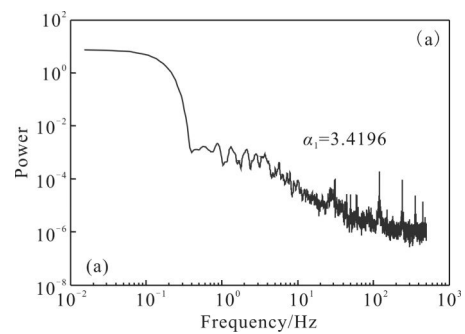
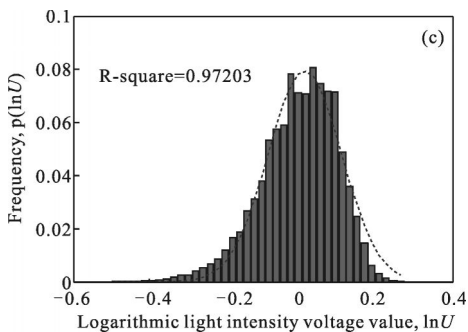
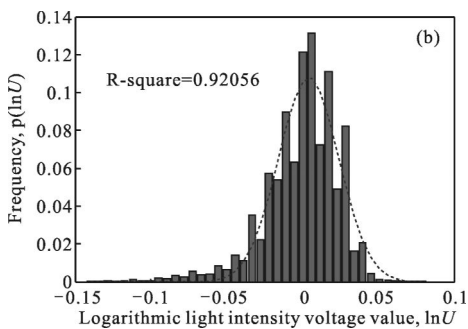
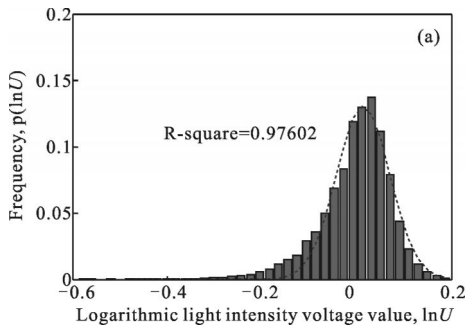
(2)光强概率密度分布

实验得到的数据进行处理后得到对数光强电压值的归一化直方图及其正态拟合曲线 (见图 6)。R-square 为拟合确定系数,可以看出不同湍流情况下,对数光强概率密度分布趋于正态分布,均在 0.9 以上,拟合度较好。但是也有一定的偏差,可能是由以下情况造成的,如光束漂移,到达角起伏,甚至还可

能是两通信端的不稳定造成的。

(3)光强功率谱估计

对于光强的功率谱估计,文中在周期图法的基础上,使用海明窗加窗函数进行分段,并使得各段之间有重叠,称为平均周期图法。图 7 给出了不同湍流强度下的光强功率谱估计。图中 α 为用非线性最小二乘法拟合得到的高频幂律线性区标度指数的绝对值。可以看出,光强的谱密度在对数坐标中的高频段部分呈现线性趋势,实验数据得到 α 的平均值为 3.644 7,并且随着湍流强度的变化,此值并没有一个统一的变化趋势,这是因为该指数主要与湍流类型有关,实验数据比理论值 $-8/3$ 要小一些,但在湍流谱幂律最小值 $-11/3$ 范围之内,认为在理论值范围之内。



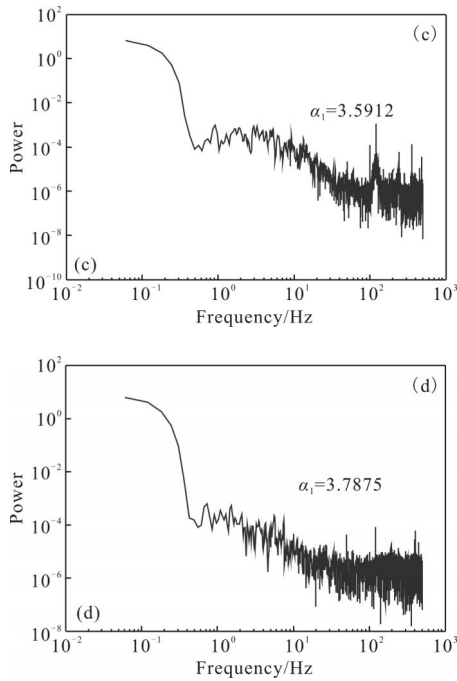


图 7 平均周期图法估计的光强谱密度

Fig.7 Estimate of the spectral density of the light intensity by average periodogram

3.2 到达角起伏

采用 CMOS 高帧频相机实时录制光斑随湍流强度的变化情况,曝光时间为 0.1ms,像元尺寸为 10.6 μm,接收天线焦距为 400 mm,开窗为 256×256,帧频典型值为 580 fps,处理帧数为 3000~5000 帧。到达角起伏分析结果如图 8 所示。到达角 α 和光斑质心位置变化、像元尺寸 p 、接收天线焦距 f 之间的关系为 $\alpha = \Delta x \times p / f$ 。

在弱湍流($r_0=0.1$ m, $r_0=0.5$ m)情况下:光斑集中在 2 个像素左右;在中强湍流($r_0=0.01$ m, $r_0=0.05$ m)情况下,光斑抖动在 10 个像素以上。有关大气相干长度与到达角起伏均方根值 (x 和 y 方向的均值)之间的关系如表 2 所示。到达角起伏均方根值越大,说明光斑抖动越厉害,湍流强度越大。

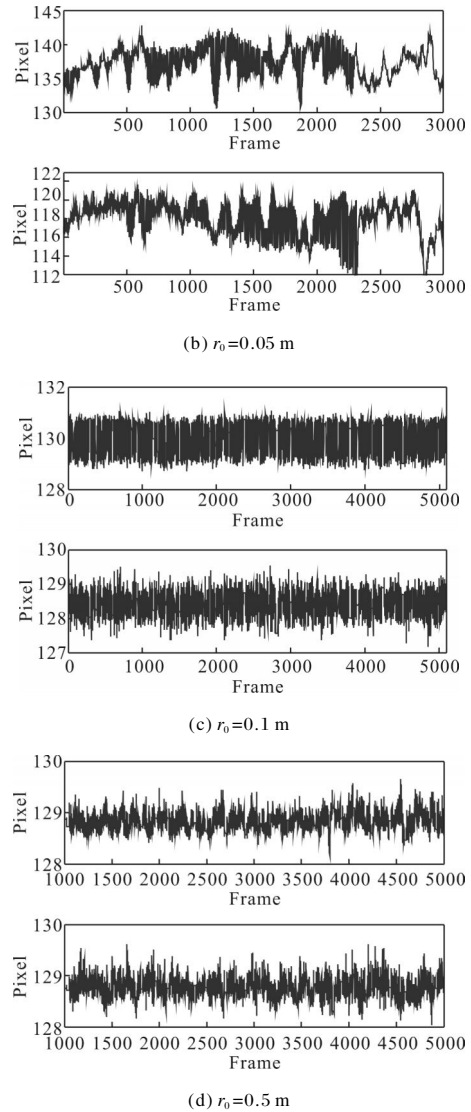
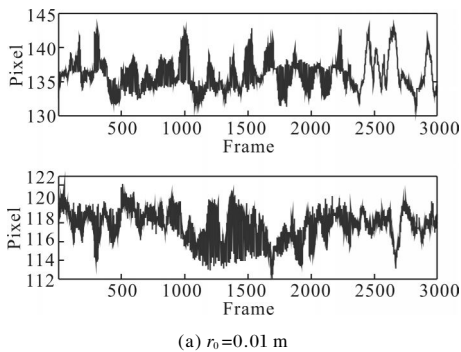


图 8 到达角起伏分析结果

Fig.8 Analysis of angle of arrival fluctuation

表 2 大气相干长度与到达角起伏均方根值之间的关系
Tab.2 Relationship of atmospheric coherence length and RMS value of angle of arrival fluctuation

Number	Phase screen size D/m	Atmospheric coherence length r_0/m	RMS of arrival angle fluctuation/urad
1	0.5 m	0.01 m	43.9
2	0.5 m	0.05 m	39.8
3	0.5 m	0.1 m	11.3
4	0.5 m	0.5 m	7.5

4 通信实验结果

大气湍流闪烁效应使激光束远场接收平面上光功率分布不再服从正态分布,此外由于大气湍

流引起波前畸变,产生散斑效应,从而引起额外的空间损耗。大气湍流闪烁效应造成接收光功率的起伏,引起接收单元的信噪比降低,进而导致通信的误码率升高。专门进行了不同湍流强度下的通信实验,希望了解误码率与湍流强度之间的关系。

通信速率为 155.52 Mbps,码型为 $2^{23}-1$,通信激光发射波长为 850 nm,发射信号幅度为 630 mV,发射和接收均通过光口通道进行,构成回环,进行测试。正常通信状态下(无湍流模拟),接收光功率稳定在 -25.6 dBm 左右,优于 850 nm 的光模块灵敏度 -29 dBm,误码率一直为 0。为了验证湍流相位屏对通信误码率的影响,衰减发射功率使接收光功率为临界状态下的 -28.39 dBm,记录误码率的变化情况。图 9 给出了不同湍流强度下的误码率测试结果。

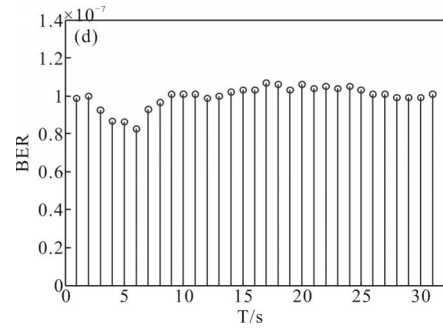
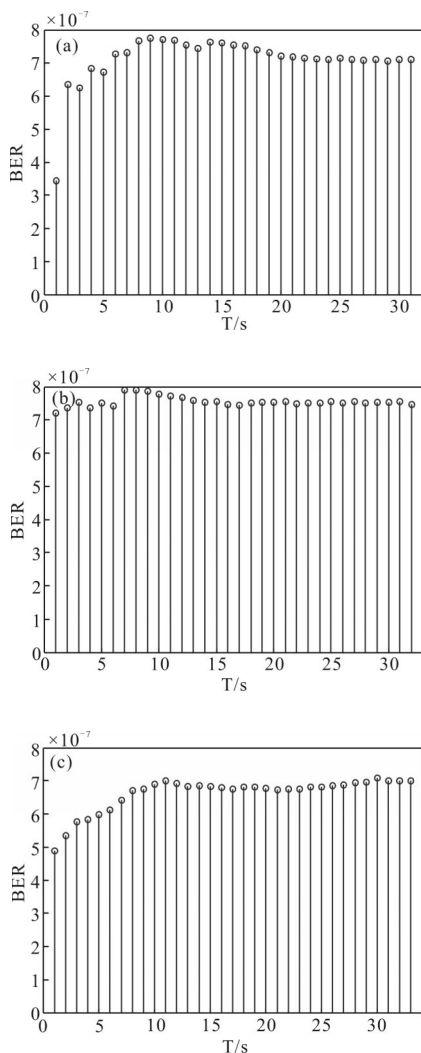


图 9 不同湍流强度下的误码率测试结果

Fig.9 BER test results under different turbulence intensities

当通信速率一定,为直观了解湍流强度与误码率之间的关系,取大气相干长度 r_0 从 0.01 m 变化到 0.5 m,得到湍流强度与平均误码率之间的拟合曲线(图 10)。随着大气相干长度 r_0 不断增大,湍流强度不断减小,平均误码率也不断减小。

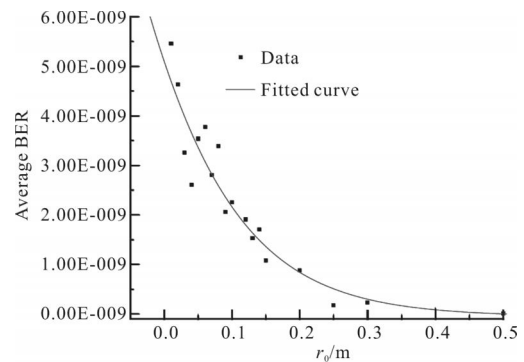


图 10 湍流强度与平均误码率之间的关系曲线

Fig.10 Curve between turbulence intensity and average bit error rate

5 结论

(1) 由图 2 可见,通过在功率谱反演法得到的相位屏上叠加低频次谐波的方法,解决了低频成分不足的问题,获得了与理论值基本一致的相位结构函数,验证了仿真的有效性。

(2) 通过 LC-SLM 仿真大气湍流,并将该湍流作用到传输激光上,使得接收光束将会出现明显的光强起伏和到达角起伏现象,且这种现象与湍流强度成正比,图 5~8 给出的实测激光湍流传输结果与真实外场试验结果有很高的一致性,验证了 LC-SLM 湍流模拟器能模拟出不同强度湍流和具有很高的可靠性,且具有很好的重复性。

(3) 首次得到湍流强度与通信误码率的关系曲

线。由图10可见,湍流越强,引起通信误码率越高,两者之间不是简单的线性关系,是负指数关系。这种关系的详细解释有待进一步的分析。由于外场实验重复性差,且条件不可控,该结果很难由外场实验获得。文中提出的湍流模拟器对实验室内评估实际激光通信设备的性能具有重要应用价值。

(4)从仿真与实验结果来看,虽然文中提出的采用功率谱反演与低频谐波叠加来模拟相位屏的方法具有较好的合理性,但缺乏严格的定量证明。采用标准的大气参数测量仪等仪器来检定和校准文中提出的LC-SLM湍流模拟器各性能参数将是下一步要做的工作。

参考文献:

- [1] Xiao Liming, Ma Chengsheng. Design and properties of convective turbulence cell [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 1999, 16(1): 86-89. (in Chinese)
肖黎明, 马成胜. 对流湍流发生池的设计与性能 [J]. 量子电子学报, 1999, 16(1): 86-89.
- [2] Shen Yong, Liu Jianguo, Zeng Zongyong, et al. Performance testing of atmospheric turbulence simulator [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2011, 6 (3): 231-234. (in Chinese)
申永, 刘建国, 曾宗泳, 等. 大气湍流模拟装置性能测试 [J]. 大气与环境光学学报, 2011, 6(3): 231-234.
- [3] Zhang Huimin, Li Xinyang. Measurement of a hot-wind laboratory atmospheric turbulence generator with Hartman wave-front sensor [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, 31(B12): 4-7. (in Chinese)
张慧敏, 李新阳. 热风式大气湍流模拟装置的哈特曼测量 [J]. 光电工程, 2005, 31(B12): 4-7.
- [4] Vasil'ev A A, Kompanets I N, Parfenov A V. Progress in the development and applications of optically controlled liquid crystal spatial light modulators (review) [J]. *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1983, 13(6): 689-699.
- [5] Hu Lifa. Kinoform using parallel aligned nematic liquid crystal spatial light modulator [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2005, 20(2): 93-98. (in Chinese)
胡立发. 用平行向列液晶空间光调制器制作相息图的研究 [J]. 液晶与显示, 2005, 20(2): 93-98.
- [6] Phillips J D, Goda M E, Schmidt J. Atmospheric turbulence simulation using liquid crystal spatial light modulators [C]// International Society for Optics and Photonics, 2005: 589406-589406-11.
- [7] Ni Xiaolong, Liu Zhi, Kong Yue, et al. Parallel implementation of liquid crystal atmosphere turbulence simulator wavefront generation based on GPU [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26 (3): 0310111-0310115. (in Chinese)
倪小龙, 刘智, 孔悦, 等. 基于GPU的液晶大气湍流模拟器波面生成的并行实现 [J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(3): 0310111-0310115.
- [8] Duan Mengyun, Shan Xin, Ai Yong. Research and progress of laser atmospheric turbulence simulator [J]. *Optical Communication Technique*, 2014, 38(1): 49-52. (in Chinese)
段梦云, 单欣, 艾勇. 激光大气湍流模拟装置的研究与进展 [J]. 光通信技术, 2014, 38(1): 49-52.
- [9] Liu Yongjun, Hu Lifa, Cao Zhaoliang, et al. Liquid crystal atmosphere turbulence simulator [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(12): 1960-1963. (in Chinese)
刘永军, 胡立发, 曹召良, 等. 液晶大气湍流模拟器 [J]. 光子学报, 2006, 35(12): 1960-1963.