

# 不同传输环境下大气湍流对无线光通信衰落特性影响分析

吴晓军<sup>1,2</sup> 王红星<sup>1,2</sup> 李笔锋<sup>1,2</sup> 宋 博<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>海军航空工程学院电子信息工程系, 山东 烟台 264001

<sup>2</sup>山东省信号与信息处理重点实验室, 山东 烟台 264001

**摘要** 大气湍流引起的光强信号衰落严重影响无线光通信性能。利用大孔径闪烁仪分别对公路环境和近海面环境下大气湍流效应进行测试,在测得的大气折射率结构常数的基础上,对两种环境下无线光通信的衰落特性展开研究。分析了公路环境和近海面环境下大气折射率结构常数的差异,发现前者的湍流强度明显强于后者的湍流强度;在闪烁指数分别取最小值、平均值以及最大值时,研究了准直高斯光束在两种环境下衰落概率的变化特征,得出公路环境下光强信号的衰落程度明显比近海面环境下衰落程度要严重,同时还对衰落概率保持在 $10^{-6}$ 时,衰落阈值参数的取值情况进行了讨论。

**关键词** 无线光通信; 大气湍流; 公路环境; 近海面环境; 衰落特性

中图分类号 TN929.12 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0513001

## Affect Analysis of Atmospheric Turbulence on Fading Characteristics in Free-Space Optical System over Different Environments

Wu Xiaojun<sup>1,2</sup> Wang Hongxing<sup>1,2</sup> Li Bifeng<sup>1,2</sup> Song Bo<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Department of Electronic Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai, Shandong 264001, China

<sup>2</sup>Key Laboratory of Shandong Province on Signal and Information Processing, Yantai, Shandong 264001, China

**Abstract** Optical intensity signal fading caused by the atmospheric turbulence can severely impact the performance of free space optical communication systems. Large aperture scintillometer is used to test the turbulence effect over the road and sea surface environment. Based on the obtained refractive index structure constant, fading characteristics of free space optical communications are analyzed over these two different environments. The difference of refractive index structure constant under the road environment and the sea environment is analyzed, the result shows that the turbulence intensity of road environment is much stronger than the intensity of sea environment. The change characteristics of probability of fade of colimated Gaussian beam are studied under the two environments, when the scintillation indices are minimum, mean, and maximum, respectively. It shows that the degree of optical signal fading over road is more serious than the degree over sea environment. Fade threshold parameter is discussed when the probability of fade is  $10^{-6}$ .

**Key words** free space optical communications; atmospheric turbulence; road environment; sea surface environment; fading characteristics

**OCIS codes** 010.1300; 010.1330; 060.4510

收稿日期: 2014-11-10; 收到修改稿日期: 2014-12-26

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青年基金(ZR2013FQ010)

作者简介: 吴晓军(1984—),男,博士研究生,助理工程师,主要从事无线光通信方面的研究。E-mail: 195358836@qq.com

导师简介: 王红星(1962—),男,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: 13371368601@cumail.com

## 1 引言

大气折射率的随机变化(光湍流)会引起光强闪烁、光束漂移和光束扩展等效应,其中光强闪烁是指在大气湍流影响下光强信号在时间和空间上出现随机起伏,又称为信号衰落,它会导致接收信号的光强下降至可检测门限之下,进而严重影响到无线光通信系统的性能<sup>[1-4]</sup>。

衰落概率主要用来描述探测器的输出信号低于给定阈值的可能性,而根据光强闪烁程度的不同,目前有关衰落概率的理论模型主要包括描述弱起伏条件下的对数正态分布衰落概率模型和中-强起伏条件下的Gamma-Gamma衰落概率模型<sup>[5]</sup>,目前有关无线光通信衰落特性方面的研究,都是在以上两种模型基础上展开的。例如,在20世纪90年代,美国佛罗里达州立大学数学系的Andrews等<sup>[6-8]</sup>所带领的团队分别对上行和下行星地无线光通信链路的衰落特性展开研究,进入21世纪以来,该团队的Vetelino等<sup>[9]</sup>又将研究重点转向近地面水平无线光通信链路,尤其是在2007年建立的高斯光束衰落特性测试链路,其下垫面为干草地,同时采用3个不同大小的孔径接收光强,从实验的角度验证了目前已有两种衰落概率模型的适用性。在我国,西安电子科技大学和哈尔滨工业大学相关研究人员分别从理论和实验角度对无线光通信衰落特性展开了相关的研究。2012年,西安电子科技大学的易湘博士<sup>[11]</sup>分析了non-Kolmogorov湍流条件下平面波和球面波的衰落特性,而更加符合实际的高斯光束条件下的衰落特性还没有展开研究;2007年,哈尔滨工业大学可调谐激光国家重点实验室在城市环境下分别建立了11.8 km和3.5 km高斯光束传输特性测试链路,在此基础上对不同闪烁指数条件下的衰落概率变化特征进行了分析,为下一步在该地区建立实际的无线光通信链路提供指导<sup>[10-11]</sup>。

目前有关无线光通信衰落特性的研究主要是针对星地、陆地等一些环境展开的,为了满足在近海面环境下建立无线光通信链路的实际需求,需对近海面环境下的光强衰落特性展开研究。本文对公路环境和近海面环境的大气湍流进行测试,对比分析两种环境下的光强信号衰落特性,目的在于为设计实际的无线光通信链路提供指导。本文对测试的基本情况介绍,包括所采用的仪器和链路的设置。引入了目前所普遍采用的对数正态分布和Gamma-Gamma分布衰落概率模型,并在准直高斯光束条件下,对模型中参数的计算过程进行介绍,为后面的衰落特性分析奠定理论基础。在实测数据的基础上,对公路环境和近海面环境下的大气折射率结构常数变化特性进行分析,并在此基础上估计了高斯光束在两种环境下传输时的衰落概率,分析其变化特征,在衰落概率保持为 $10^{-6}$ 的条件下,对不同环境下衰落阈值参数的取值进行讨论。

## 2 链路设置

公路测试环境选择在牟平区观海东路(主要为沥青路面),近海面测试环境选择在牟平区养马岛附近海域。测试过程主要分为两个阶段,每阶段分别进行一次公路环境和近海面环境测试,其中第一阶段于2014年4月12日进行,链路长度设置为1.4 km,第二阶段于2014年5月17日进行,链路长度设置为0.9 km,测试路径示意图如图1和图2所示(两幅图像都取自maps.google.com)。为了保证天气条件的稳定性,测试全部选在晴天中午湍流最强时段进行,每两次测试间隔不超过30 min,并通过微型气象站记录测试期间的气象参数,测试期间的基本情况如表1所示。

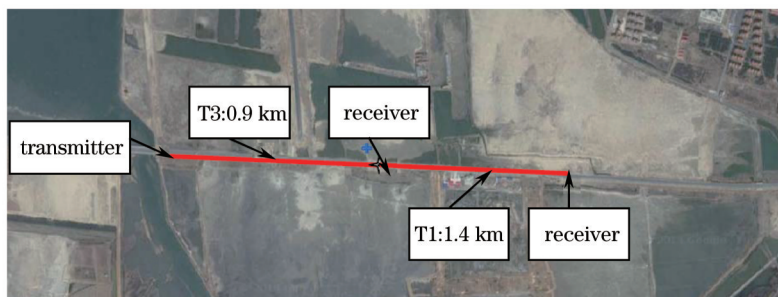


图1 观海东路公路光程路径卫星图

Fig.1 Aerial photo of the optical path under road of Guanhai Road

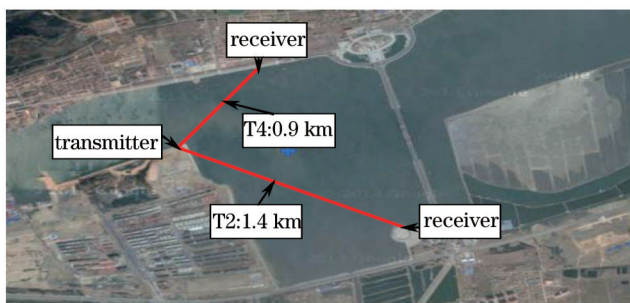


图2 养马岛近海面光程路径卫星图

Fig.2 Aerial photo of the optical path under sea surface of Yangma Island

表1 实验的气候特征和链接情况

Table 1 Climate characteristics and link conditions for the experiment

Trial	Date	Local time	Underlying surface	Length /km	Height /m	Temperature /°C	RH /%	Wind speed /(m/s)
T1	12 April	11:50~12:20	road	1.4	1.5	11.5	88.4	0.5
T2	12 April	12:50~13:20	sea	1.4	3	11.4	91.3	1.3
T3	17 May	11:40~12:10	road	0.9	1.5	19.4	39.5	2.3
T4	17 May	12:40~13:10	sea	0.9	3	20.0	46.5	3.0

测试仪器采用世界著名厂商德国 Scintec 公司生产的 BLS450 型号大孔径闪烁仪,如图 3 所示。该仪器发射端采用 GaAlAs 激光器,波长为 880 nm,接收端采用 Si 光电二极管探测器。其基本原理是测得光强的均值  $\langle I \rangle$  与标准差  $s$ ,代入公式  $\sigma_x^2 = \frac{1}{4} \ln \left[ 1 + \left( \frac{s}{\langle I \rangle} \right)^2 \right]$  得出对数幅度方差,根据水平传输路径下大气折射率结构常数  $C_n^2$ 、对数幅度方差  $\sigma_x^2$ 、链路长度  $L$  以及孔径尺寸  $D$  之间的关系,即  $C_n^2 = 4.48 D^{7/3} L^{-3} \sigma_x^2$ ,反演可得到所需的实测数据<sup>[12]</sup>。

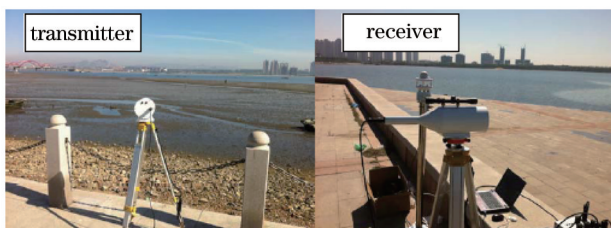


图3 BLS450大孔径闪烁仪图片

Fig.3 Photograph of the BLS450 scintillometer

### 3 理论模型

#### 3.1 光强衰落概率

衰落概率表示接收到的光强低于给定阈值光强的可能性大小,当探测器输出的信噪比足够高时,可以忽略噪声对衰落概率的影响,在这种情况下,衰落概率  $P_{fa}$  可以由光强信号的累计分布函数给出,即<sup>[5]</sup>

$$P_{fa} = \Pr(I \leq I_T) = \int_0^{I_T} p_I(I) dI, \quad (1)$$

式中  $I_T$  表示光强的阈值水平,  $p_I(I)$  为光强起伏概率密度函数。为了表示衰落阈值低于平均接收光强的分贝数,文献[5]中定义了衰落阈值参数  $F_T$ ,单位为 dB,表达式为

$$F_T = 10 \lg \left[ \frac{\langle I(0,L) \rangle}{I_T} \right], \quad (2)$$

式中  $\langle I(0,L) \rangle$  表示高斯光束轴上光强的平均值。

在弱起伏条件下, (1)式中的  $p_i(I)$  为对数正态分布, 其对应的衰落概率模型为<sup>[5]</sup>

$$P_{fa} = \frac{1}{2} \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{\frac{1}{2} \sigma_{\ln I}^2 - 0.23 F_T}{\sqrt{2} \sigma_{\ln I}} \right) \right], \quad (3)$$

式中  $\sigma_{\ln I}^2$  表示对数光强方差,  $\operatorname{erf}(\cdot)$  表示误差函数。在中-强起伏条件下,  $p_i(I)$  可以用 Gamma-Gamma 来描述<sup>[13]</sup>, 此时的衰落概率模型为<sup>[5]</sup>

$$P_{fa} = \frac{\pi}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)\sin[\pi(\alpha-\beta)]} \times \left\{ \frac{(\alpha\beta)^\beta}{\beta\Gamma(\beta-\alpha-1)} \exp(-0.23\beta F_T) \times {}_1F_2[\beta; \beta+1, \beta-\alpha-1; \alpha\beta \exp(-0.23F_T)] - \frac{(\alpha\beta)^\alpha}{\alpha\Gamma(\alpha-\beta-1)} \exp(-0.23\alpha F_T) \times {}_1F_2[\alpha; \alpha+1, \alpha-\beta-1; \alpha\beta \exp(-0.23F_T)] \right\}, \quad (4)$$

式中  $\Gamma(\cdot)$  表示 Gamma 函数,  ${}_1F_2(\cdot)$  表示广义的超几何函数<sup>[14]</sup>,  $\alpha$  和  $\beta$  分别表示 Gamma-Gamma 分布的参数, 它们分别与大尺度闪烁和小尺度闪烁有关, 其表达式分别为<sup>[5]</sup>

$$\begin{cases} \alpha = \frac{1}{\sigma_x^2} = \frac{1}{\exp(\sigma_{\ln x}^2) - 1} \\ \beta = \frac{1}{\sigma_y^2} = \frac{1}{\exp(\sigma_{\ln y}^2) - 1} \end{cases}, \quad (5)$$

其中,  $\sigma_{\ln x}^2$  和  $\sigma_{\ln y}^2$  分别表示大尺度和小尺度对数光强方差。

### 3.2 高斯光束下光强闪烁

高斯光束条件下的 Rytov 方差为<sup>[5]</sup>

$$\sigma_B^2 \cong 3.86\sigma_R^2 \left\{ 0.40 \left[ (1+2\Theta_1)^2 + 4\Lambda_1^2 \right]^{5/12} \times \cos \left[ \frac{5}{6} \arctan \left( \frac{1+2\Theta_1}{2\Lambda_1} \right) \right] - \frac{11}{16} \Lambda_1^{5/6} \right\}, \quad (6)$$

式中  $\sigma_R^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}$ ,  $L$  表示传输距离,  $k = 2\pi/\lambda$  表示波数,  $\lambda$  为波长,  $\Theta_1$  和  $\Lambda_1$  分别表示输出平面波束参数,

$$\begin{cases} \Theta_1 = \frac{1}{1+\Lambda_0^2} \\ \Lambda_1 = \frac{\Lambda_0}{\Theta_0^2 + \Lambda_0^2} \end{cases}, \quad (7)$$

其中,  $\Theta_0$  和  $\Lambda_0$  分别表示输入平面波束参数,

$$\begin{cases} \Theta_0 = 1 - \frac{L}{F_0} \\ \Lambda_0 = \frac{2L}{kW_0^2} \end{cases}, \quad (8)$$

其中,  $F_0$  表示发射端波束的曲率半径, 对于准直高斯光束而言,  $F_0 = \infty$ ,  $W_0$  为发射端光束半径。

在求得高斯光束条件下的 Rytov 方差之后, 可以根据(9)式求得点孔径接收下大尺度对数光强方差  $\sigma_{\ln x}^2$  和小尺度对数光强  $\sigma_{\ln y}^2$  方差, 即

$$\begin{cases} \sigma_{\ln x}^2 = \frac{0.49\sigma_B^2}{(1+0.56\sigma_B^{12/5})^{7/6}} \\ \sigma_{\ln y}^2 = \frac{0.51\sigma_B^2}{(1+0.69\sigma_B^{12/5})^{5/6}} \end{cases}. \quad (9)$$

将(9)式代入(5)式中就可以得到参数  $\alpha$  和  $\beta$ , 进而可以求得 Gamma-Gamma 分布条件下的光强衰落概率。

当激光在湍流大气中传输时, 主要用闪烁指数  $\sigma_i^2$  来描述光强的起伏程度, 即当  $\sigma_i^2 < 1$  时, 属于弱起伏, 当  $\sigma_i^2 > 1$  时, 属于中-强起伏。根据(9)式可以得到, 高斯光束条件下点孔径接收下的光强闪烁指数为<sup>[5]</sup>

$$\sigma_i^2(0,L) = \exp(\sigma_{\ln x}^2 + \sigma_{\ln y}^2) - 1 = \exp\left[\frac{0.49\sigma_B^2}{(1 + 0.56\sigma_B^{12/5})^{7/6}} + \frac{0.51\sigma_B^2}{(1 + 0.69\sigma_B^{12/5})^{5/6}}\right] - 1. \quad (10)$$

将(6)代入(10)式中,就可以得到高斯光束轴上的光强闪烁指数,图4给出了闪烁指数  $\sigma_i^2(0,L)$  随  $\sigma_R$  的变化曲线,  $\sigma_R = (1.23C_n^2 k^{7/6} L^{11/6})^{1/2}$ 。

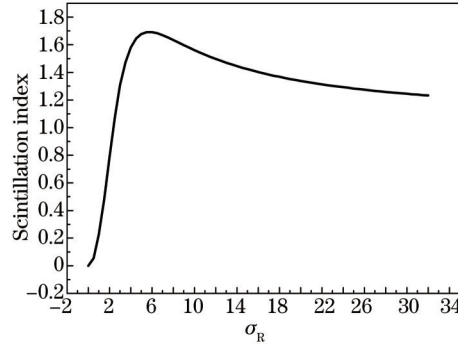


图4 高斯光束闪烁指数随  $\sigma_R$  变化曲线图

Fig.4 Scintillation index versus  $\sigma_R$  for Gaussian beam

从图4中可以看出,高斯光束的闪烁指数  $\sigma_i^2(0,L)$  随着  $\sigma_R$  的变化不具有单调性,具体表现为:当  $\sigma_R < 5.5$  时,  $\sigma_i^2(0,L)$  单调递增,并且上升速度较快,并且在  $\sigma_R = 5.5$  时,闪烁指数达到最大值;当  $\sigma_R > 5.5$  时,  $\sigma_i^2(0,L)$  开始逐步减小,下降速度缓慢,并且随着  $\sigma_R$  的继续增加,闪烁指数保持在1左右,这种现象称作“闪烁饱和”效应<sup>[5]</sup>。因此,在计算高斯光束的闪烁指数时,需要考虑“闪烁饱和”的影响。

此外,对数光强方差与闪烁指数  $\sigma_i^2$  的关系式为<sup>[5]</sup>

$$\sigma_{\ln I}^2 = \ln(\sigma_i^2 + 1). \quad (11)$$

将求得的对数光强方差  $\sigma_{\ln I}^2$  代入(3)式中就可以得到对数正态分布条件下的光强衰落概率。

## 4 数据分析

分析湍流引起的光强衰落时,大气折射率结构常数  $C_n^2$  采用不同环境下测试所得到的数据,假设准直高斯光束波长  $\lambda = 1550 \text{ nm}$ ,发射端的波束半径  $W_0 = 1 \text{ cm}$ ,并且不考虑内尺度  $l_0$  和外尺度  $L_0$  的影响<sup>[15]</sup>。先给出了两阶段4次测试所得到的大气折射率结构常数  $C_n^2$  结果,在此基础上对不同传输环境下高斯光束光强衰落特性展开研究。

### 4.1 大气折射率结构常数 $C_n^2$ 变化特征分析

在测试期间,闪烁仪每隔 30 s 记录一次大气折射率结构常数,因此每次测试可以采集到 60 个  $C_n^2$  数据样本,图5、6分别给出了测试期间公路环境和近海面环境下大气折射率结构常数变化趋势,其中红色曲线代表近海面环境下  $C_n^2$  数据,黑色曲线代表公路环境下  $C_n^2$  数据。

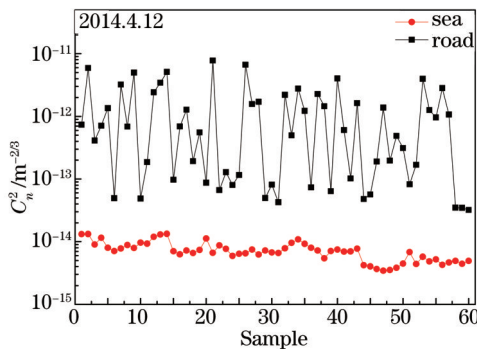


图5 T1 和 T2 测得的  $C_n^2$  变化曲线

Fig.5 Changing curve of  $C_n^2$  for T1 and T2

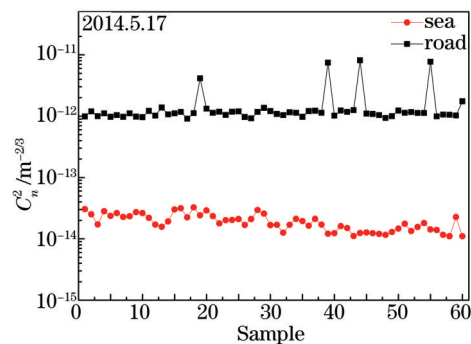


图6 T3 和 T4 测得的  $C_n^2$  变化曲线

Fig.6 Changing curve of  $C_n^2$  for T3 and T4

从图5、6中可以看出,测试期间公路环境下的大气折射率结构常数  $C_n^2$  明显高于近海面环境下的  $C_n^2$  值。在图5中,公路环境下T1测试得到的  $C_n^2$  值集中分布在  $10^{-14} \sim 10^{-12} \text{m}^{-2/3}$  数量级之间,而近海面环境下T2测试得到的大部分  $C_n^2$  值集中分布在  $10^{-15} \text{m}^{-2/3}$  数量级范围内,只有少部分  $C_n^2$  处于  $10^{-14} \text{m}^{-2/3}$  数量级范围。同样,从图6中可以得到,公路环境下T3测试得到的  $C_n^2$  值集中分布在  $10^{-13} \sim 10^{-12} \text{m}^{-2/3}$  范围内,近海面环境下T4测试得到的  $C_n^2$  值分布则较为集中,全部分布于  $10^{-14} \text{m}^{-2/3}$  数量级范围内。表2给出了T1~T4测试期间  $C_n^2$  值的详细统计情况。

表2 T1~T4测试期间  $C_n^2$  值统计  
Table 2 Statistics of  $C_n^2$  during T1~T4

Test	Minimum / $\text{m}^{-2/3}$	Mean / $\text{m}^{-2/3}$	Maximum / $\text{m}^{-2/3}$
T1(road)	$3.21 \times 10^{-14}$	$1.34 \times 10^{-12}$	$7.75 \times 10^{-12}$
T2(sea)	$3.43 \times 10^{-15}$	$7.29 \times 10^{-15}$	$1.33 \times 10^{-14}$
T3(road)	$9.07 \times 10^{-13}$	$1.50 \times 10^{-12}$	$8.13 \times 10^{-12}$
T4(sea)	$1.10 \times 10^{-14}$	$1.92 \times 10^{-14}$	$3.24 \times 10^{-14}$

从以上的分析中可以得出,公路环境下的大气湍流强度明显强于近海面环境下的湍流强度,说明随着下垫面环境的不同,大气湍流强度将会出现一定程度的差异。对于在大气中传输的激光而言,湍流直接导致光强出现闪烁,进而引起探测器接收到的信号发生深度衰落,严重影响无线光通信系统的性能。将以测试得到的大气折射率结构常数  $C_n^2$  为基础,对比分析公路环境和近海面环境下的高斯光束的衰落特性。

#### 4.2 衰落概率变化特征分析

根据(6)~(10)式,以T1~T4测试得到的大气折射率结构常数  $C_n^2$  为基础,计算得到了高斯光束下的闪烁指数,并对其进行统计分析,分别得出最小值、平均值以及最大值,如表3所示,并注明了在得到相应闪烁指数时的大气折射率结构常数(如表3括号中所示),为下面进行衰落特性分析奠定基础。

表3 高斯光束  $\sigma_I^2$  统计情况  
Table 3 Statistics of  $\sigma_I^2$  for Gaussian beam

Test	Minimum	Mean	Maximum
T1(road)	0.2889 ( $3.21 \times 10^{-14} \text{m}^{-2/3}$ )	1.2147	1.6905 ( $7.39 \times 10^{-14} \text{m}^{-2/3}$ )
T2(sea)	0.0309 ( $3.43 \times 10^{-15} \text{m}^{-2/3}$ )	0.0662	0.1207 ( $1.33 \times 10^{-14} \text{m}^{-2/3}$ )
T3(road)	1.5102 ( $8.13 \times 10^{-12} \text{m}^{-2/3}$ )	1.6113	1.6889 ( $1.74 \times 10^{-12} \text{m}^{-2/3}$ )
T4(sea)	0.0407 ( $1.10 \times 10^{-14} \text{m}^{-2/3}$ )	0.0709	0.1199 ( $3.24 \times 10^{-14} \text{m}^{-2/3}$ )

在表3中,当闪烁指数取最值时,其公路环境下相应的大气折射率结构常数  $C_n^2$  值与表2中的  $C_n^2$  值有所不同,说明当湍流最强时,对应的闪烁指数并不是最大值,这主要是由于在公路环境下,高斯光束出现“闪烁饱和”效应所致;在近海面环境下,由于没有出现“闪烁饱和”效应,所以当  $C_n^2$  取最值时,其对应的  $\sigma_I^2$  就是该环境下高斯光束闪烁指数的最值。

从表3中可以看出,高斯光束在公路环境下和近海面环境下传输时,光强起伏程度差异较大,前者的闪烁指数几乎全部大于1,属于中-强起伏,而后的闪烁指数全部小于0.3,属于弱起伏。光强起伏程度的差异必然会引起衰落特性呈现出不一样的变化规律,分别在闪烁指数取最小值、平均值以及最大值时,研究T1~T4测试期间高斯光束衰落概率的变化特征。当光强变化处在弱起伏程度时,根据(3)式计算衰落概率;而当光强变化处在中-强起伏程度时,则采用(4)式来得到衰落概率。

图7给出了4次测试期间衰落概率随阈值参数的变化情况,其中图7(a)和图7(b)分别表示2014年4月12日公路环境和近海面环境下的衰落概率曲线,图7(c)和图7(d)则分别是2014年5月17日公路环境和近海面环境下的衰落概率曲线。同时,在每幅图中,分别给出了高斯光束条件下闪烁指数分别取最大值、平均值以及最小值时,衰落概率随阈值参数变化趋势。从图(7)中可以得出如下结论:

1) 从曲线变化的整体趋势来看,随着阈值参数  $F_r$  的不断增加,衰落概率开始逐步地下降,这说明无线光通信系统的性能得到了不同程度的改善,但是根据光强信号起伏程度的不同,衰落概率随阈值参数的变化特征存在一定的差异,具体表现为对于每一次测试来说,当闪烁指数分别取最小值、平均值以及最大值时,衰落概率曲线下速度依次变缓,说明随着闪烁指数的增加,光强信号的衰落概率越大,通信系统性能

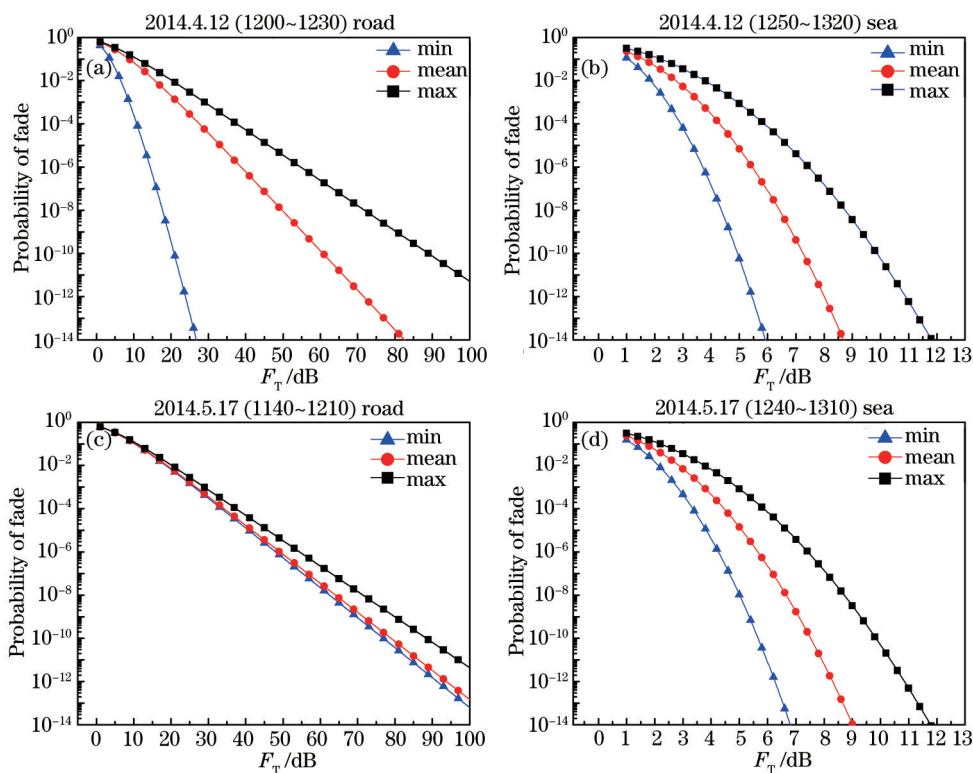


图7 衰落概率随阈值参数变化曲线图

Fig.7 Probability of fade versus fade threshold parameter

下降也越严重。同时还可以看出,图7(a)中的曲线变化趋势差别较大,而图7(c)中的曲线变化趋势则较为接近,根据表3可知,主要原因是两次公路环境下的闪烁指数差异大小不同。

2) 根据表3中闪烁指数分析可知,公路环境和近海面环境下的光强变化分别属于中一强起伏和弱起伏,因此相应引起的无线光通信接收信号的衰落程度也有所不同。对比T1、T2测试和T3、T4测试可以发现,公路环境下和近海面环境下的衰落概率随衰落阈值的变化特征差别非常明显,即前者的下降速度明显比后者的下降速度缓慢,这说明随着阈值参数的增大,近海面环境下的无线光通信性能的改善效果明显优于公路环境下的改善效果。此外,从对大气折射率结构常数的分析中可以看出,近海环境下大气湍流相比于公路环境下大气湍流比较稳定,所以图7(b)和图7(d)中衰落概率的曲线变化趋势较为接近,而图7(a)和图7(c)曲线变化趋势差别相对较为明显。

3) 若要使得衰落概率保持在一定的水平时,不同传输环境下所要求的阈值参数的大小存在较大差异。例如,在T1测试中,由于光强信号起伏较为严重,因此为了使得衰落概率保持在 $10^{-6}$ 水平<sup>[16]</sup>,在闪烁指数分别为最小值、平均值以及最大值时,要求 $F_T$ 所取的特定值较大,分别约为14.40 dB、38.70 dB、54.70 dB,而在T2测试中,由于光强信号起伏程度较弱,要求 $F_T$ 所取得的特定值仅为3.70 dB、5.45 dB、7.45 dB;类似地,在T3测试中,要求 $F_T$ 的取值分别达到48 dB、49.15 dB、54 dB,而在T4测试中,要求 $F_T$ 的取值仅有4.25 dB、5.65 dB、7.40 dB。从以上的分析中可以看出,若要使得闪烁衰落概率保持在一定的水平下,公路环境需要的阈值参数大小明显高于近海面环境下的阈值参数值。

## 5 结 论

大气湍流会引起接收到的光强信号发生随机衰落,进而严重影响到无线光通信系统的性能。为了在设计无线光通信系统时,对不同环境下湍流信道衰落特性进行准确把握,对公路环境和近海面环境下大气湍流进行测试,并在此基础上,对这两种环境下无线光通信的衰落特性展开研究,得到的结论如下:1) 在测试期间,公路环境下的大气折射率结构常数主要分布在 $10^{-12} \sim 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 范围内,而近海面环境下的 $C_n^2$ 值主要分布在 $10^{-14} \sim 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 范围内,由此可以看出,公路环境下的大气湍流明显比近海面环境下大气湍流强;2) 在考

虑“闪烁饱和”效应的前提下,以实际测得的  $C_n^2$  值为基础,分别计算得到了准直高斯光束条件下闪烁指数的最大值、平均值以及最小值,对比分析了公路环境下和近海面环境下光强信号的衰落特性,研究表明,随着衰落阈值参数的增加,前者的衰落概率曲线下降速度明显比后者缓慢,说明公路环境下的光强信号的衰落程度明显比近海面环境下的衰落程度严重。同时,为了使得衰落概率保持在  $10^{-6}$ ,公路环境下所需要的衰落阈值参数值明显高于近海面环境下所要求的衰落阈值参数值。所得到的测试结果以及分析结论,对于在不同环境下设计无线光通信系统时具有重要的参考价值。

## 参 考 文 献

- 1 Yi Xiang. Research on Irradiance Scintillation and Mitigation Technology in Atmospheric Laser Communication[D]. Xi'an: Xidian University, 2013.  
易 湘. 大气激光通信中光强闪烁及其抑制技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- 2 Hu Qingsong, Huang Yuhua, Wang Junbo. Performance analysis of multi-hop free space optics over strong turbulence[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0906004.  
胡庆松, 黄玉划, 王俊波. 强湍流下多跳自由空间光通信的性能分析[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0906004.
- 3 Shou Qin, Zhang Tao, Wang Han. Analysis of BER performance in free-space optical MIMO-OFDM communication systems over the Gamma-Gamma atmospheric turbulence[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(2): 020602.  
寿 钦, 张 涛, 王 涵. Gamma-Gamma 大气湍流下自由空间光通信 MIMO-OFDM 系统误比特率分析[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(2): 020602.
- 4 Wu Yunyun, Li Xinyang, Rao Changhui. Effect of atmospheric turbulence aberration on the bit-error performance of homodyne binary phase shift keying coherent optical communication[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 0606002.  
武云云, 李新阳, 饶长辉. 大气湍流像差对空间零差二进制相移键控相干光通信误码率性能的影响[J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0606002.
- 5 L C Andrews, R L Philips, C Y Hopen. Laser Beam Scintillation with Applications[M]. Bellingham: SPIE Press, 2001.
- 6 L C Andrews, R L Philips, P T Yu. Optical scintillations and fade statistics for satellite-communication system[J]. Appl Opt, 1995, 34(33): 7742-7751.
- 7 L C Andrews, R L Philips, P T Yu. Optical scintillations and fade statistics for satellite-communication system[J]. Appl Opt, 1997, 36(24): 6068.
- 8 L C Andrews, C Y Young, A Al-Habash. Fade statistics associated with a space/ground laser communication link at large zenith angles[C]. SPIE, 1999, 3763: 268-277.
- 9 F Strömqvist Vetelino, C Young, L Andrews. Fade statistics and aperture averaging for Gaussian beam waves in moderate-to-strong turbulence[J]. Appl Opt, 2007, 46(18): 3780-3789.
- 10 Y Jiang, J Ma. Measurement of optical intensity fluctuation over an 11.8 km turbulent path[J]. Optics Express, 2008, 16(10): 6963-6973.
- 11 F Pan, Q Han, Jing Ma. Measurement of scintillation and link margin for laser beam propagation on 3.5-km urbanised path[J]. Chinese Optics Letters, 2007, 5(1): 1-3.
- 12 T-i Wang, G R Ochs, S F Clifford. A saturation-resistant optical scintillometer to measure  $C_n^2$  [J]. J Opt Soc Am, 1978, 68(3): 334-338.
- 13 M A Al-Habash, L C Andrews. Mathematical model for the irradiance probability density function of a laser beam propagating through turbulent media[J]. Opt Eng, 2001, 40(8): 1554-1562.
- 14 L C Andrews. Special Functions of Mathematics for Engineers[M]. Bellingham: SPIE Press, 1998.
- 15 I Toselli, L C Andrews. Free space optical system performance for a gaussian beam propagating through non-Kolmogorov weak turbulence[J]. IEEE, 2009, 57(6): 1783-1788.
- 16 L C Andrews, R L Philips. Laser Beam Propagation through Random Media[M]. Bellingham: SPIE Press, 2005.

栏目编辑: 史 敏