

大气湍流对无线光通信系统信噪比的影响研究

解孟其 柯熙政

(西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要 通信系统的信噪比与信道状态和收发电路噪声有关。通过对大气湍流指数与光强方差的分析,基于光强度调制建立了湍流大气 Rytov 指数与无线光通信系统接收信噪比之间的关系。分析了由光强闪烁引入乘性噪声的情况下,无线光通信系统接收信噪比与接收光强方差之间的关系;讨论了大气湍流乘性噪声常用的两种概率密度函数及其对接收光强信号的影响,得到了 Rytov 指数与光强方差、系统接收信噪比之间的关系。最后采用不同天气条件下测得的实验数据验证了结果。研究表明:在弱湍流环境下,光强方差与 Rytov 指数满足线性关系,相应的接收信噪比随着 Rytov 指数的增大而降低;在中强湍流环境下,光强方差趋近饱和,系统信噪比趋近于稳定值。

关键词 大气光学; 无线光通信; 光强闪烁噪声; 信噪比; 对数正态分布; Gamma-Gamma 分布

中图分类号 TN929.12 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.110102

Effect of Atmospheric Turbulence on the Signal-to-Noise Ratio of Free Space Optical System

Xie Mengqi Ke Xizheng

(School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi, 710048, China)

Abstract The signal-to-noise ratio (SNR) of communication system is variable with channel status and circuits noise. We analyze the turbulence index and irradiance variance, and then establish the relationship between Rytov index of the atmospheric turbulence and SNR of intensity modulation free space optical communication (FSO) system. Firstly, the multiplicative noise induced by irradiance is analyzed. The relationship between irradiance variance and SNR of the FSO system is introduced. Then two common noise models are introduced to simulate the multiplicative noise. The relationship among Rytov index, irradiance variance and SNR of FSO system is derived. At last, the experimental measurement data under different weather conditions are used to prove the simulation results. The results show that there is a linear relationship between Rytov index and variance of intensity in weak turbulent weather. SNR of FSO system relatively decreases as the Rytov index increases. While in medium to strong turbulent weather, variance of intensity converges towards saturation, and SNR tends to a stable value.

Key words atmospheric optics; free space optical communication; scintillation noise; signal-to-noise ratio; logarithmic-normal distribution; Gamma-Gamma distribution

OCIS codes 010.1300; 010.1330; 010.3310

1 引言

随着无线光通信(自由空间光通信,FSO)系统通信距离的增大和速率的提高,大气信道的各种干扰也逐渐成了影响 FSO 技术发展的瓶颈。大气湍流的影响主要有光束漂移、光束扩展和光强闪烁。其中,光束漂

收稿日期: 2013-06-05; 收到修改稿日期: 2013-07-20; 网络出版日期: 2013-09-10

基金项目: 国家自然科学基金(60977054)、陕西省“13115”科技统筹计划(2011KTCQ01-31)、陕西省教育厅产业化培育基金(2010JC17)、西安市科技成果转化基金(CX12165)

作者简介: 解孟其(1986—),男,博士研究生,主要从事大气信道建模以及通信编码等方面的研究。

E-mail: xiemengqi@stu.xjtu.edu.cn

导师简介: 柯熙政(1962—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事无线光通信方面的研究。E-mail: xzke@263.net

移主要影响 FSO 系统的对准,光束扩展会影响接收光功率,光强闪烁是影响接收信噪比(SNR)、误码率(BER)的主要因素。本文试图建立起信道参数与系统接收信噪比之间的联系,为 FSO 系统中的信道估计等工作提供理论基础和实验依据。目前人们研究的焦点往往集中在大气湍流对通信系统误码率的影响上。文献[1]介绍了一种可兼容同步数字体系(SDH)的无线光端机,系统性能测试结果表明大气信道状况对系统误码率有很大的影响;文献[2]直接给出大气结构常数与开关键控(OOK)系统误码率的对应关系;然而,采用大气结构常数作为信道参数仍然很不直观;文献[3]将闪烁指数(Rytov 方差)作为衡量信道湍流强度的指标,并给出了闪烁指数与 OOK 系统误码率的关系。随着通信技术的发展,人们开始在 FSO 系统中尝试各种编码,文献[4-6]在无线光通信中应用了 Turbo 码、低密度奇偶校验(LDPC)码、空时码等各种不同的编码方式。可以看出,在相同的信道环境下不同的编码方式使得系统误码率性能差异很大^[7]。因此,为了探究不同编码方式对系统的影响,更直观地研究大气信道参数对无线光通信系统的影响,本文选择通信系统的接收信噪比作为研究对象。通过理论推导、数值仿真以及计算实验数据等方法,研究大气湍流强度与接收光强方差以及 FSO 系统接收信噪比的关系。在数值仿真中,采用同时包含乘性噪声和加性噪声的简化信道模型,对系统接收信噪比随着 Rytov 指数变化的趋势进行了数值分析,其结果与实际情况基本吻合。

2 理论推导

光束通过理想大气介质传播,波动方程可以写为^[8]

$$u_0(\mathbf{r}) = A_0(\mathbf{r})\exp[i\phi_0(\mathbf{r})], \quad (1)$$

式中 $u_0(\mathbf{r})$ 为光波包络, $A_0(\mathbf{r})$ 为包络幅度, $\phi_0(\mathbf{r})$ 为相位, \mathbf{r} 为传播路径。考虑湍流的影响,相应的光波包络可以描述为

$$u(\mathbf{r}) = A(\mathbf{r})\exp(i\phi\mathbf{r}). \quad (2)$$

普遍认为,湍流的影响可以用一个指数因子来表示:

$$u(\mathbf{r}) = u_0(\mathbf{r})\exp(\Phi), \quad (3)$$

式中 Φ 为表征湍流的指数因子。对(3)式两边取对数得

$$\ln u(\mathbf{r}) = \ln u_0(\mathbf{r}) + \Phi, \quad (4)$$

其中,

$$\Phi = \ln\left[\frac{A(\mathbf{r})}{A_0(\mathbf{r})}\right] + i[\phi(\mathbf{r}) - \phi_0(\mathbf{r})] = \chi + iS, \quad (5)$$

式中 χ 为幅度 A 与 A_0 比值的对数, S 为相位 ϕ 与 ϕ_0 的差值。因此,可以看出大气湍流会造成接收信号的光强和相位的畸变。对于一个光强调制直接检测的 FSO 系统,(5)式退化为

$$\Phi = \ln[A(\mathbf{r})/A_0(\mathbf{r})] = \chi. \quad (6)$$

当光源和接收器位置固定时, \mathbf{r} 为常量, χ 的观测值就可由发射光束幅度 A_0 和接收光束幅度 A 的某一时间观测值来得到:

$$\chi = \ln\left[\frac{A(t)}{A_0(t)}\right]. \quad (7)$$

由于通信系统中信噪比的定义为信号功率与噪声功率之比,故将接收光幅度视为有用信号与噪声的叠加(不考虑大气衰减)^[9]

$$\chi = \ln\left[\frac{A(\mathbf{r})}{A_0(\mathbf{r})}\right] = \ln\left[\frac{A_0(\mathbf{r}) + A_i(\mathbf{r})}{A_0(\mathbf{r})}\right] = \ln(1 + \epsilon), \quad (8)$$

式中 $A_i(\mathbf{r})$ 是噪声幅度, $\epsilon = A_i(\mathbf{r})/A_0(\mathbf{r})$ 是噪声幅度与信号幅度之比。

对(8)式进行泰勒级数展开,有

$$\ln(1 + \epsilon) = \epsilon - \frac{1}{2}\epsilon^2 + \frac{1}{3}\epsilon^3 - \cdots + \frac{(-1)^{k-1}}{k}\epsilon^k + \cdots. \quad (9)$$

当 ϵ 较小时,可以近似认为满足

$$\chi = \ln(1 + \epsilon) \approx \epsilon. \quad (10)$$

对于平面波, ϵ 的均方值与大气湍流折射率结构常数 C_n^2 的关系满足^[10]

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

式中 k 为波数, L 为传播距离。信噪比的定义是有用信号与噪声信号的功率之比, 可由下式得出:

$$R_{\text{SN}} = \frac{I_0}{\langle I_i \rangle} = \frac{\langle A_0^2(\mathbf{r}) \rangle}{\langle A_i^2(\mathbf{r}) \rangle} = \frac{1}{\langle \epsilon^2 \rangle}. \quad (12)$$

取波长 $\lambda = 650 \text{ nm}$, 对应不同的大气结构常数, 计算得到的光强对数方差和接收信噪比的结果如图 1 所示。

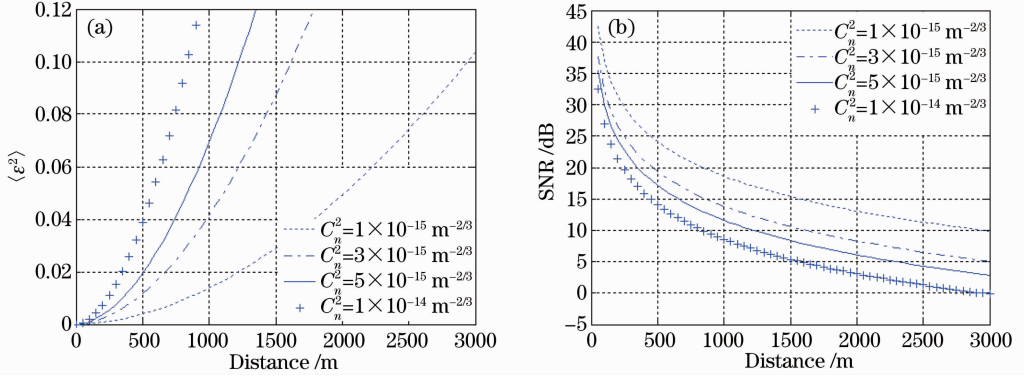


图 1 弱湍流环境下(a)对数方差与(b)信噪比随距离的变化关系^[9]

Fig. 1 (a) Logarithmic amplitude variance and (b) SNR versus distance with different C_n^2 ^[9]

在通信距离较短、大气湍流较弱时, 光强信号的对数幅度方差与我们通常使用的 Rytov 指数 σ_R^2 满足线性关系^[10]:

$$\sigma_R^2 = 4\langle \epsilon^2 \rangle. \quad (13)$$

当通信距离较长、大气湍流较强时, 通过(11)式算出的光强对数方差与实际测得的结果并不吻合, 许多学者对光强起伏方差 σ_i^2 做了各种近似^[10]:

$$\sigma_i^2 = 1 + 0.85(\sigma_R^2)^{-2/5}, \quad (14)$$

$$\sigma_i^2 \approx 0.92 + 1.44(\sigma_R^2)^{-2/5}, \quad (15)$$

$$\sigma_i^2 \approx 1.36 - 0.907(\sigma_R^2)^{-2/5}. \quad (16)$$

因此, 根据(13)~(16)式, 可以得出 Rytov 方差与光强方差间的变化关系, 进而由(12)式求得 Rytov 指数与接收信噪比的关系如图 2 所示。

从图 2 可以看出, 在强湍流下对光强方差的近似与弱湍流结果的主要区别在于光强方差不会随着 Rytov 指数的增大而不断增大, 而是趋近于一个极限值, 这点可以用来描述实际观测到的光强闪烁饱和现象。

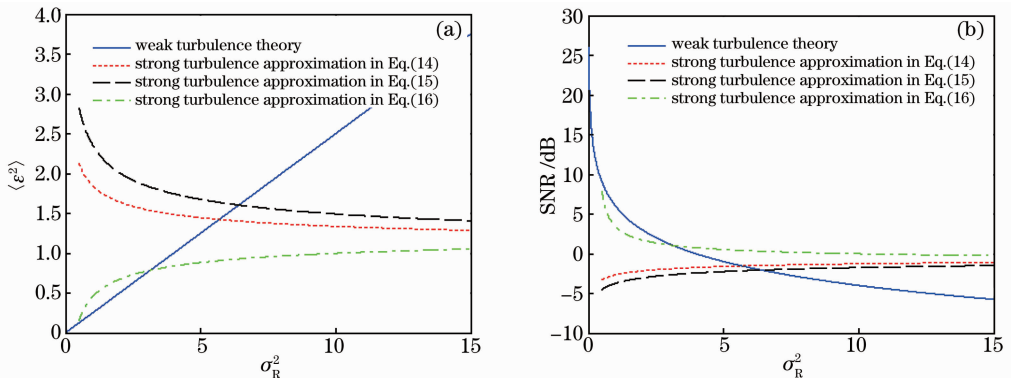


图 2 (a) 光强方差和(b)信噪比与 Rytov 指数关系图

Fig. 2 (a) Variance of intensity and (b) SNR versus Rytov index

3 数值仿真

根据上一节的分析,可以将 Rytov 指数作为大气信道参数、将电路信噪比 $\text{SNR}_e (R_{\text{SN}-e})$ 作为电路参数对大气信道中传输的 FSO 信号进行仿真。首先对系统建模,对于光强调制直接解调的 FSO 系统,接收信号可表示为

$$A(t) = A_0(t) \cdot e^x + e_n, \quad (17)$$

式中 $s(t)$ 为 t 时刻发射的光强信号, e^x 为大气湍流影响下引入的乘性因子, e_n 为发射和接收电路自身的电噪声。

文献[8, 11]指出,在弱湍流环境中光强闪烁服从对数正态分布,在中强湍流环境中光强闪烁服从 Gamma-Gamma 分布。因此,我们分别采用对数正态分布和 Gamma-Gamma 分布作为乘性噪声的概率密度函数。前者写作

$$f_1(I; \sigma_x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \exp\left[-\frac{(I - \langle I \rangle)^2}{2\sigma_x^2}\right], \quad I > 0, \quad (18)$$

式中 I 为归一化接收光强, σ_x^2 为对数方差。后者写作

$$f_1(I; \alpha, \beta) = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \cdot I^{\alpha+\beta/2-1} \cdot K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta I}), \quad I > 0, \quad (19)$$

式中 α, β 为 Gamma-Gamma 分布的概率密度参数,定义如下:

$$\begin{cases} \alpha = \left\{ \exp\left[\frac{0.49\sigma_R^2}{(1+1.11\sigma_R^{12/5})^{7/6}}\right] - 1 \right\}^{-1} \\ \beta = \left\{ \exp\left[\frac{0.51\sigma_R^2}{(1+0.69\sigma_R^{12/5})^{5/6}}\right] - 1 \right\}^{-1} \end{cases} \quad (20)$$

文中对 e^x 分别采用对数正态分布模型和 Gamma-Gamma 模型进行仿真,电噪声 e_n 服从正态分布,对仿真得到的接收信号分别统计方差和信噪比。为了得到相对平滑的仿真曲面,每个网格节点都计算了 50 万个样本的平均值,方差和信噪比结果分别如图 3 和图 4 所示。图中 x 轴和 y 轴的坐标分别为 Rytov 指数和电路信噪比。可以看出,接收信号的方差随着 Rytov 指数和电噪声的增大而增大,相应的接收信噪比也逐渐恶化。

从图 3 和图 4 中看出,对数正态噪声模型与一阶 Rytov 近似的理论结果吻合较好,在电噪声较小(电路信噪比大于 30 dB)时,仿真结果与(13)式的理论值基本一致;使用 Gamma-Gamma 噪声模型仿真的信号方差则明显大于(13)式的理论值,相应的接收信噪比也比理论值要小,但是方差和信噪比数值却在(14)~(16)式的范围之内。

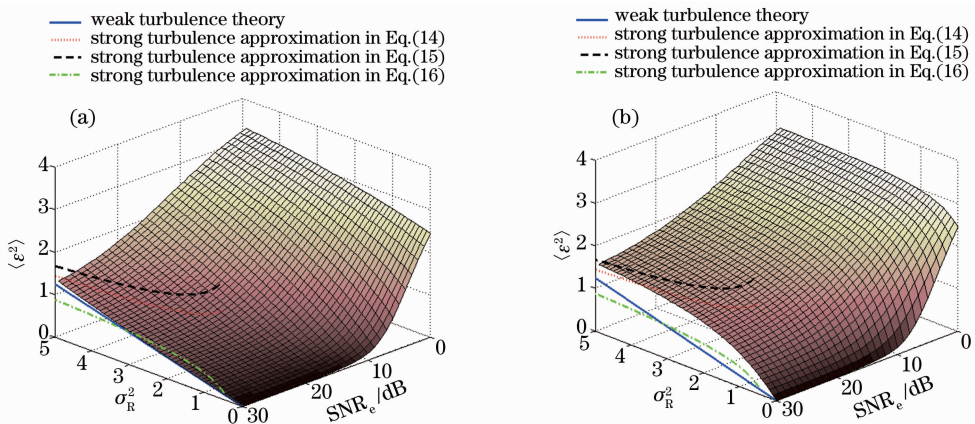


图 3 两种噪声模型在不同电噪声下的接收信号方差。(a) 对数正态噪声模型; (b) Gamma-Gamma 噪声模型

Fig. 3 Variance versus Rytov index with different SNR_e simulated with two different models.

(a) Logarithmic normal model; (b) Gamma-Gamma model

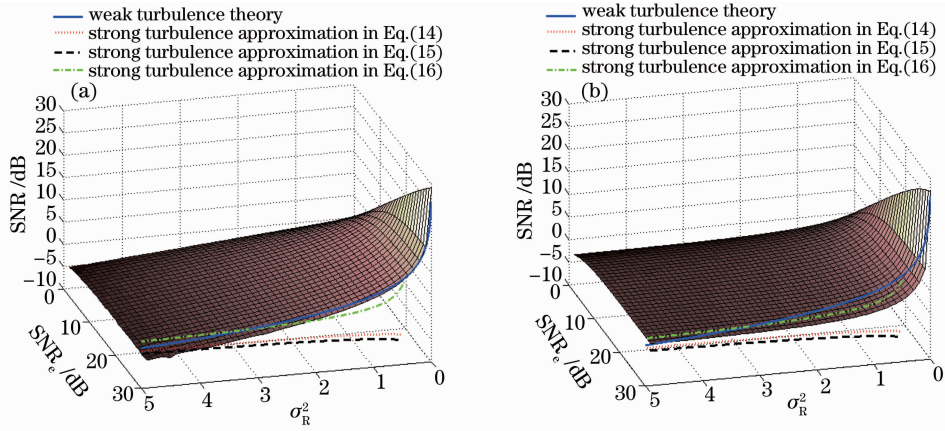


图 4 两种噪声模型在不同电噪声下的接收信号信噪比。(a) 对数正态噪声模型；(b) Gamma-Gamma 噪声模型

Fig. 4 SNR versus Rytov index with different SNR_e simulated with two different models.

(a) Logarithmic normal model; (b) Gamma-Gamma model

4 实验验证

为了验证上一节的仿真数据,将文献[12—13]中的实测数据与仿真结果进行比对。实验数据包括晴天、雾、小到中雨以及扬尘天气下的 FSO 实验接收光强数据,采样频率 40 kHz。典型的接收光强数据如图 5 所示。

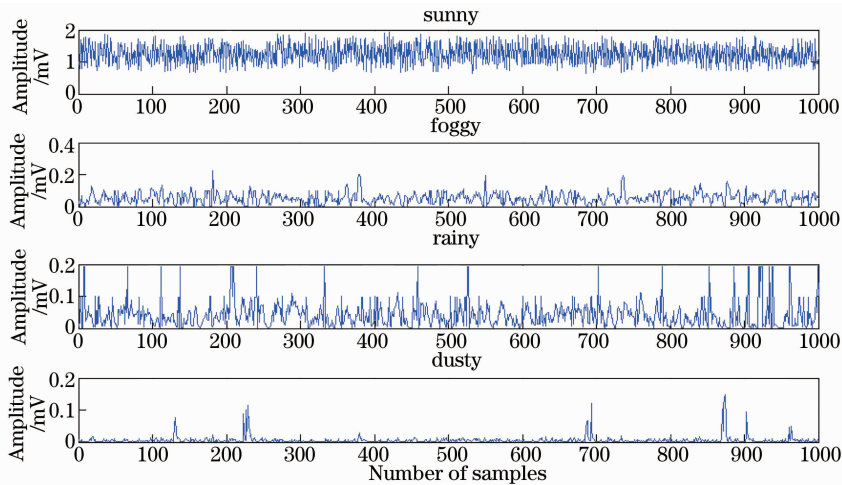


图 5 各种天气情况下的部分光强样本序列

Fig. 5 Samples of experimental measurement data under different weather conditions

首先对光强数据进行归一化,再分别统计各组光强数据的方差与对数方差,并计算接收信噪比。数据处理结果如图 6 所示。

图 6 中,实测数据与理论值有差异,我们认为这是没有考虑系统中的加性电噪声的原因引起的,因此在仿真中加入加性电噪声以模拟实际情况。从样本点的分布情况来看,将晴天和雨天的样本归为一类作为弱湍流样本、将雾天与沙尘天气的样本归为一类作为中强湍流天气样本分别讨论。在雨天、雾天和沙尘天气条件下(Rytov 方差大于 0.5 时),所测得的数据的方差并不收敛,这体现了湍流的非平稳特性;若干组数据的 Rytov 方差比较接近但是光强方差却没有收敛的迹象,因此在这些天气下测得的样本在图中的散布比较大,而代入特定模型算出的数值结果,仅仅能表征实测结果的中值。

仿真中,选择合适的电噪声信噪比并取不同的 Rytov 指数作为自变量,相应的在图 4 和图 5 中取出方差和信噪比曲线与样本点比较,结果分别如图 7 和图 8 所示。

从图 7 可以看出,在弱湍流环境下,信号的方差与 Rytov 指数之间近似满足线性关系,这在晴天样本中

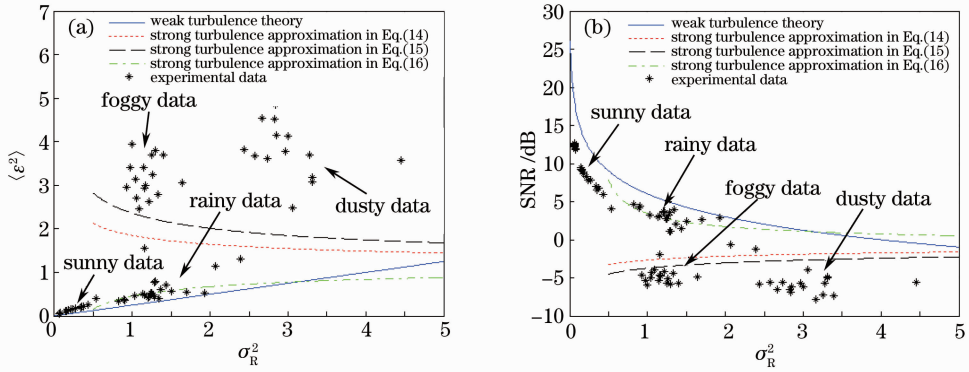


图 6 实测数据的 (a) 光强方差和 (b) 信噪比与 Rytov 指数关系图

Fig. 6 (a) Variance and (b) SNR of measured data versus Rytov index

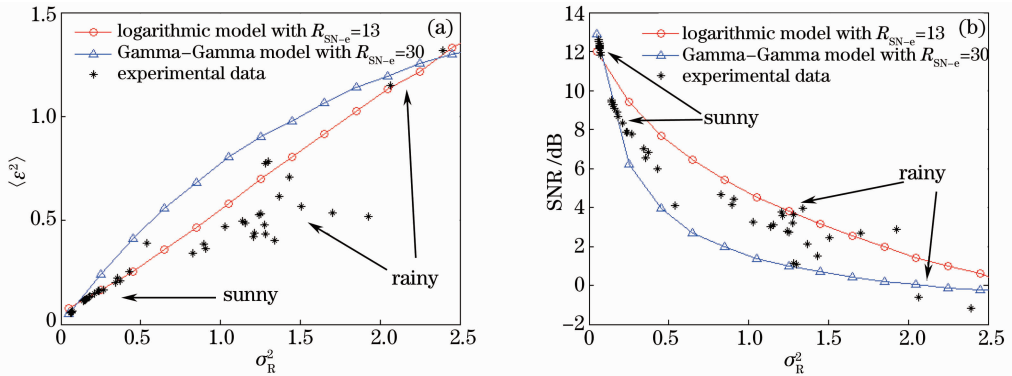


图 7 弱湍流下两种模型的 (a) 方差和 (b) 信噪比与 Rytov 指数关系图

Fig. 7 (a) Variance and (b) SNR of different models versus Rytov index in weak turbulence

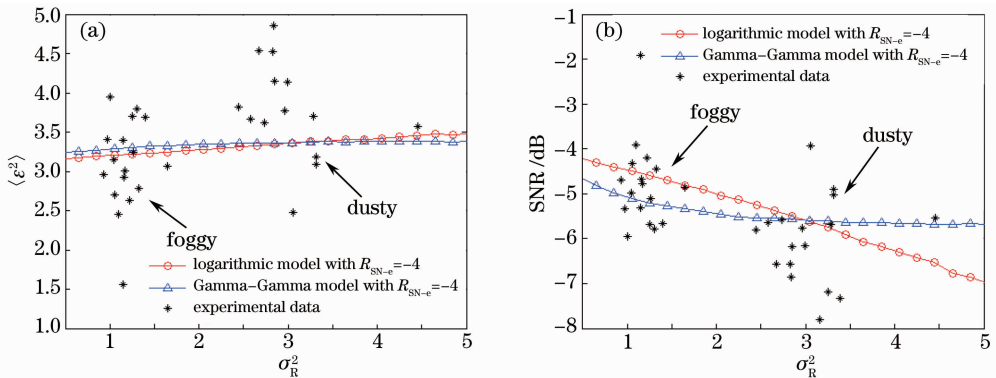


图 8 中强湍流下两种模型的 (a) 方差和 (b) 信噪比与 Rytov 指数关系图

Fig. 8 (a) Variance and (b) SNR of different models versus Rytov index in medium to strong turbulence

体现得尤为明显,此时对数正态模型仿真结果与实验数据基本吻合,而 Gamma-Gamma 模型仿真得出的信号方差比实测数据大,相应的信噪比也比实际值要差。由于雨天对光的散射影响比较明显,导致接收的有用信号功率会低于晴天时的测量数据,归一化接收数据后就相当于放大了电路噪声,降低了接收信噪比,这样就导致仿真得到的方差要比实际测量结果大一些,反映在图 7 中,就是雨天的光强方差中值低于仿真结果。

在图 8 所示的中强湍流环境下,沙尘天气样本的 Rytov 指数要比雾天样本大,而二者的方差却没有明显区别,造成这样结果的原因可能有:1) 随着 Rytov 指数的增大,光强闪烁趋近饱和;2) 由于雾天和沙尘天气也是强散射环境,接收光功率很小,导致光强信号“淹没”在电噪声中,此时的样本方差由电噪声的功率决定,导致样本方差基本不变。无论是哪种原因,Gamma-Gamma 分布下的数值结果都可以吻合实验数据,而对数正态模型预测的系统信噪比则会无限制地下降,这与实际情况不符。

5 结 论

通过计算实验数据和数值仿真,验证了文献[9]中的结论:在弱湍流大气环境中,接收光强方差与湍流指数成线性关系,系统信噪比随着湍流指数的升高而降低;在中强湍流大气环境中,实验测得的光强方差有逐渐饱和的趋势,其原因可能是多方面的,应采用 Gamma-Gamma 分布的噪声模型来对大气信道引起的乘性噪声进行模拟。在恶劣天气条件下的运动粒子对光的散射可能也会引起接收信噪比的恶化,其影响机理尚有待研究。

参 考 文 献

- 1 Cai Yanmin, Chen Gang, Dong Zuoren, *et al.*. 155 Mbits/s atmospheric optical communication system and its measurement [J]. Chinese J Lasers, 2000, 27(11): 1040—1044.
蔡燕民, 陈刚, 董作人, 等. 155 Mbits/s 大气传输光通信系统及其测试[J]. 中国激光, 2000, 27(11): 1040—1044.
- 2 Xing Jianbin, Xu Guoliang, Zhang Xuping, *et al.*. Effect of the atmospheric turbulence on laser communication system [J]. Acta Photonica Sinica, 2005, 34(12): 1850—1852.
邢建斌, 许国良, 张旭苹, 等. 大气湍流对激光通信系统的影响[J]. 光子学报, 2005, 34(12): 1850—1852.
- 3 Li Fei, Wu Yi, Hou Zaihong. Analysis and experimental research on bit error rate for free-space optical communication systems through turbulent atmosphere [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(6): 0606002.
李菲, 吴毅, 侯再红. 湍流大气光通信系统误码率分析与实验研究[J]. 光学学报, 2012, 32(6): 0606002.
- 4 Xie Weiliang, Tang Junxiong. Analysis on characterization of atmospheric optical wireless communication system based on turbo code [J]. Chinese J Lasers, 2003, 30(9): 835—838.
谢伟良, 汤俊雄. 基于 Turbo 码的大气无线光通信系统特性分析[J]. 中国激光, 2003, 30(9): 835—838.
- 5 Jia Kejun, Ke Xizheng, Peng Duo, *et al.*. Design of π -rotation LDPC for atmospheric laser communication system and its performance analysis [J]. J Lanzhou University of Technology, 2008, 34(4): 109—113.
贾科军, 柯熙政, 彭锋, 等. 大气激光通信系统中 π -旋转 LDPC 码的设计与性能分析[J]. 兰州理工大学学报, 2008, 34(4): 109—113.
- 6 Wang Huiqin, Ke Xizheng, Zhao Li. Free space optical communication of MIMO based on orthogonal space-time coding [J]. Science China Information Science, 2009, 39(8): 896—902.
王惠琴, 柯熙政, 赵黎. 基于正交空时块编码的 MIMO 自由空间光通信[J]. 中国科学 F 辑: 信息科学, 2009, 39(8): 896—902.
- 7 Ke Xizheng, Yin Zhiyun. Coding Theory of Free Space Optical Communication System [M]. Beijing: Science Press, 2008. 241—248.
柯熙政, 殷致云. 无线激光通信系统中的编码理论 [M]. 北京: 科学出版社, 2008. 241—248.
- 8 Xiaoming Zhu, Joseph M Kahn. Free-space optical communication through atmospheric turbulence channels [J]. IEEE Trans Communications, 2002, 50(8): 1293—1300.
- 9 Xu Guoliang, Zhang Xuping, Wei Junwei, *et al.*. Influence of atmospheric turbulence on FSO link performance [C]. SPIE, 2004, 5281: 816—823.
- 10 Rao Ruizhong. Light Propagation in the Turbulent Atmosphere [M]. Hefei: Anhui Science & Technology Publishing House, 2005. 183—184.
饶瑞中. 光在湍流大气中的传播 [M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 2005. 183—184.
- 11 Rao Ruizhong, Wang Shipeng, Liu Xiaochun, *et al.*. Probability distribution of laser irradiance scintillation in a real turbulent atmosphere [J]. Acta Optica Sinica, 1999, 19(1): 81—86.
饶瑞中, 王世鹏, 刘晓春, 等. 实际大气中激光闪烁的概率分布 [J]. 光学学报, 1999, 19(1): 81—86.
- 12 Liu Jian, Ke Xizheng, Zhao Li, *et al.*. Experimental measurement of atmospheric laser communication [J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(S1): 10—13.
刘健, 柯熙政, 赵黎, 等. 大气激光通信的实验测量 [J]. 光子学报, 2007, 36(S1): 10—13.
- 13 Zhu Yaolin, An Ran, Ke Xizheng. Effect of rainfall on wireless laser communication [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(12): 1206003.
朱耀麟, 安然, 柯熙政. 降雨对无线激光通信的影响 [J]. 光学学报, 2012, 32(12): 1206003.