

QPSK 调制光通信中混合噪声的功率谱性能与误码率

陈 牧, 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: 研究了 QPSK 副载波调制下乘性噪声与加性噪声对接收端星座图影响。基于 Gamma-Gamma 信道模型, 分析了乘性噪声和加性噪声影响下系统的接收星座图。通过仿真实验计算了混合噪声情况下的星座图分布以及接收端功率谱密度。讨论了混合噪声条件下, 不同能见度、传输距离对系统误码率的影响。结果表明: 随着湍流强度的增强, 接收端功率谱存在明显的展宽迹象; 不同加性噪声条件下, 当能见度小于传输距离时, 气溶胶粒子散射为影响通信的主要因素。不同乘性噪声条件下, 当能见度处于 0.5~1.5 km 时, 乘性噪声会影响接收光强, 进一步增大系统误码率。文中工作对真实环境下降低无线激光通信的误码率和提高通信质量有重要意义。

关键词: 激光通信; QPSK 调制; 混合噪声; 功率谱密度; 误码率

中图分类号: TN929.12 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1022005

Power spectrum performance and bit error rate of mixed noise in QPSK modulated optical communication

Chen Mu, Ke Xizheng

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

Abstract: The received constellation effect of QPSK subcarrier modulation by multiplicative noise and additive noise was studied. A theoretical model of laser communication system was constructed, the received constellation of the system under multiple noise and additive noise was derived. The constellation distribution and the power spectral density of the receiver were calculated under mixed noise environment. The influence of system bit error rate in different visibilities and transmission was analyzed in detail under mixed noise environment. The results show that with the change of turbulence intensity, the receiver power spectrum has obvious broadening. When the visibility is less than the transmission distance, the atmospheric aerosol scattering is the main factor affecting the communication under different additive noise conditions; when visibility is 0.5 km to 1.5 km, the passenger noise will affect the reception light and increase the system error rate under different multiplicative noise conditions. The proposed works are very important for reducing the bit error rate of laser communication and improving the communication quality in the real environment.

Key words: laser communication; QPSK modulation; mixed noise; PSD; BER

收稿日期: 2017-02-15; 修订日期: 2017-04-23

基金项目: 国家自然科学基金(61377080); 陕西省重点产业创新链项目(2017ZDCXL-GY-06-01)

作者简介: 陈牧(1989-), 男, 博士生, 主要从事大气光通信中噪声模型方面的研究。Email: chenmuaj@163.com

导师简介: 柯熙政(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事自由空间光通信方面的研究。Email: xzke@263.net

0 引言

关于大气信道对激光通信系统影响的研究很多,研究热点集中在大气湍流对激光通信系统接收端功率与系统误码率的影响。赵婷等人研究了可见光通信中高阶调制形式下信号功率谱密度特性。通过对比不同阶数的 QAM 调制功率谱密度分析,验证了不同阶数调制对系统的影响。但并没有考虑传输过程中来自大气湍流的影响^[1]。张铁英等人推导出了针对双幅度脉冲调制的连续谱与离散谱,进行了不同调制阶数与调制格式的对比^[2]。李菲等人将闪烁指数作为评判信道湍流全度的指标,并得到了闪烁指数与 OOK 系统的误码率关系^[3]。谷康等人基于长波红外探测器建立了相应噪声模型并结合不同大气湍流条件下光强分布情况,计算了不同湍流强度,通信距离对通信误码率的影响^[4]。郝子强通过对比了 PPM 的三种调制形势性能,包括功率谱密度、信号的传输效率及误码率^[4]。韩立强等人建立了综合大气效应下多输入多输出信道模型和系统模型,分析了零均值高斯白加性噪声条件下各种天气条件和大气湍流对空间光通信链路的影响^[5]。吴君鹏等人研究了部分相干光在 Gamma-Gamma 信道中传输时无线光通信的平均误码率等性能,分析了双 Gamma 信道中,信噪比与误码率的关系^[6]。王德飞等人基于 Kolmogorov 和 Rytov 大气湍流理论模型,得到了强、弱湍流条件下的误码率模型^[7]。柯熙政等人对 PPM 调制 Gamma-Gamma 信道下多孔径接收误码率性能进行了分析,并研究了强湍流模型 k 分布模型下接收分集系统模型。这些研究真实反映了实际无线信道,降低通信误码率,提高通信质量^[8]。针对相移键控(PSK)副载波调制下激光通信系统性能的误码率研究,课题组前期已利用了可编程门阵列(FPGA)和 AD9788 设计了无线光副载波 16 进制相移键控(16PSK)调制模块,搭建了基于副载波调制的无线光通信系统,并通过接收端采集数据分析了不同天气条件对副载波通信信号星座图、误码率、眼图等特性的影响^[9]。现有的研究针对不同强度湍流引起的乘性噪声与系统中加性噪声对于接收端星座图变化、功率谱分布影响以及误码率研究并不多见。因此,文中在课题组前期工作的研究基础上,利用数值仿真

方法,基于双 Gamma 信道的模型,构建了 QPSK 相移键控副载波调制的无线激光通信系统模型,详细计算了乘性噪声和加性噪声条件下星座图分布情况,以及功率谱密度和比特误码率(Bit Error Rate, BER)随能见度 V 的变化关系。为无线光通信系统硬件设计提供有效的技术支持,对提高 QPSK 相移键控调制下无线光载波通信系统通信质量的提高和误码率的降低有重要意义。

1 QPSK 调制激光通信系统组成

激光通信系统有别于传统的无线通信系统,除了传统系统中拥有的星座映射、系统调制等,最主要的是必须要拥有光电转换器以及光学天线。在接收端,实现光信号到电信号的逆变换。系统框图如图 1 所示。

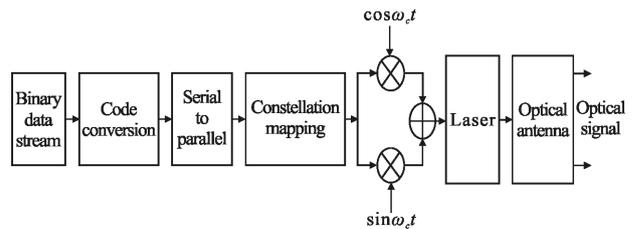


图 1 QPSK 调制激光通信发射系统

Fig.1 QPSK modulation laser communication emitting system

数据串并转换后,信号可以表示为:

$$A(t)=I(t)+jQ(t) \quad (1)$$

式中: $I(t)$ 、 $Q(t)$ 分别为同相分量和正交分量。

通过星座映射信号可以表示为:

$$A(t)=\cos(\varphi_n)+jsin(\varphi_n) \quad (2)$$

式中: φ_n 表示 QPSK 的相位映射, $\varphi_n=\arctan(Q(t)/I(t))$ 。

调制后电信号为:

$$S(t)=\sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} A(t)e^{j\omega_c t} = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} e^{j(\omega_c t + \varphi_n)} = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} [\cos(\varphi_n)\cos(\omega_c t) - \sin(\varphi_n)\sin(\omega_c t)] + \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} [\sin(\varphi_n)\cos(\omega_c t) + \cos(\varphi_n)\sin(\omega_c t)]j \quad (3)$$

式中: E_s 为信号的能量; T_s 为码元的周期,而信号的功率为 $P_s=E_s/T_s$ 。令 $P_s=0.5$,即归一化电信号幅值。

当采用半导体激光发射器作为光源实现对光强的直接调制,即:让电信号去控制光源发出光信号的强度。光在大气中传输会引起光强度的衰减,在只考

考虑大气吸收和大气散射的影响下，激光传播距离 l 的光强度可以用 Lambert-Beer 定律^[8]描述。

$$I(\lambda, l) = I(\lambda, 0) \exp(-\alpha(\lambda)l) \quad (4)$$

式中： $I(\lambda, 0)$ 表示波长为 λ 在光源处光强度； $\alpha(\lambda)$ 为与波长有光的衰减系数。

起始光强 $I(\lambda, 0)$ 被 $s(t)$ 调制，因此存在如下关系：

$$I(\lambda, 0) = \overline{I(\lambda)} + ks(t) \quad (5)$$

式中： $\overline{I(\lambda)}$ 表示激光器的平均光强；系数 k 表征了光强的变化大小。衰减系数 $\alpha(\lambda)$ 由吸收衰减系数 $A(\lambda)$ 和散射衰减系数 $S(\lambda)$ 组成，即： $\alpha(\lambda) = A(\lambda) + S(\lambda)$ 。大气激光通信采用的波段多为近红外光波，此波段是良好的透光窗口，因此 $A(\lambda) = 0$ 。近地面，大尺度气溶胶粒子引起的米粒散射影响较大，此时，粒子散射衰减系数可以用能见度 V 来描述^[5]，即：

$$S(\lambda) = \frac{3.19}{V} \left(\frac{\lambda}{0.55} \right)^{-\delta} \quad (6)$$

式中： δ 是与能见度 V 和波长 λ 有关的系数。

相移键控调制激光通信系统结构如图 2 所示，接收天线获得携带信息的有用信号和来自大气中的背景辐射，信号接收后将进行滤光，滤出频带以外的光波，然后进行光电转换、解调、星座映射等后期处理。

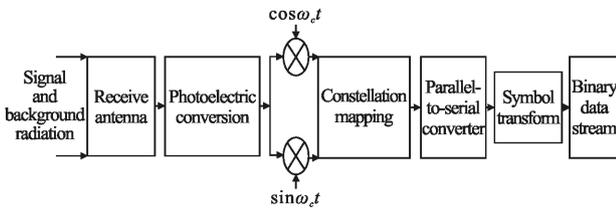


图 2 相移键控调制激光通信接收系统

Fig. 2 Phase shift keying modulation laser communication receiving system

接收端获得的光强表示为：

$$I(\lambda, L) = I(\lambda, 0) \exp(-\alpha(\lambda)L) \quad (7)$$

式中： L 表示接收端与发送端的距离。

设光电转换效率为 η ，则接收到的电信号为：

$$R(t) = \eta I(\lambda, L) = \eta I(\lambda, 0) \exp(-\alpha(\lambda)L) + n = \eta \overline{I(\lambda)} \exp(-\alpha(\lambda)L) + \eta k \exp(-\alpha(\lambda)L) S_{\text{QPSK}}(t) + n \quad (8)$$

公式(8)中第一项产生一个直流电信号，第二项产生一个随副载波已调信号变化的电信号，第三项为系统的噪声电信号。加入隔直电容后可以方便地去除直流分量，因此 $R(t)$ 改写为：

$$R(t) = \eta k \exp(-\alpha(\lambda)L) S_{\text{QPSK}}(t) + n = \eta k \exp(-\alpha(\lambda)L) e^{j(\omega_c t + \varphi_n)} + n = \xi e^{j(\omega_c t + \varphi_n)} + \psi \quad (9)$$

式中： $\xi = \eta k \exp(-\alpha(\lambda)L)$ ， $\psi = n$ ，并且对电信号进行解调，则得到的基带电信号为：

$$A'(t) = R(t) \exp(-j\omega_c t) = \xi \cos(\varphi_n) + \psi \cos(-\omega_c t) + j[\xi \sin(\varphi_n) + \psi \sin(-\omega_c t)] = \xi \cos(\varphi_n) + \psi' + j[\xi \sin(\varphi_n) + \psi_n] \quad (10)$$

式中： $\psi' = \psi \cos(\omega_c t)$ ， $\psi_n = -\psi \sin(\omega_c t)$ 。比较 $A(t)$ 和 $A'(t)$ ，可以发现发送前后，星座由 $(\cos(\varphi_n), \sin(\varphi_n))$ 变为 $(\xi \cos(\varphi_n) + \psi', \xi \sin(\varphi_n) + \psi_n)$ ，这将造成接收星座的弥散，增加系统的误码率。

目前，针对大气湍流的光强分布模型主要有：对数正态模型^[10]。负指数分布模型^[11]以及 Gamma-Gamma 光强起伏模型^[12]。

信号在经过传输后，接收端信号星座图，会受到乘性噪声和加性噪声影响，即 $\xi'(\cos(\varphi_n), \sin(\varphi_n)) + (\psi', \psi_n)$ 。乘性噪声通常伴随在信号的传输过程，因此文中选取 Gamma-Gamma 信道模型，来表征大气湍流强度。引入无量纲的 Rytov 方差概念，表示为：

$$\sigma_R^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \quad (11)$$

式中： C_n^2 为折射率结构常数；波矢 $k = 2\pi/\lambda$ ， λ 为波长； L 为传播距离。

通过对双 Gamma 信道光强因式分解，可得信道模型表达式^[13]：

$$f_I(I) = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \cdot I^{(\alpha+\beta)/2-1} \cdot K_{(\alpha-\beta)}(2\sqrt{\alpha\beta I}), I > 0 \quad (12)$$

式中： I 为光信号强度； α 和 β 为概率密度函数参数； $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数； $K_{(\alpha-\beta)}(\cdot)$ 为 $\alpha-\beta$ 阶的第二类修正 Bessel 函数。

当系统只有乘性干扰情况时，此时的接收星座表达式为 $\xi(\cos(\varphi_n), \sin(\varphi_n))$ 。通过对比发射前信号表达式可知，此时的信号只有径向变化，本质上并不会影响到系统的抽样判决，也不会产生误码。然而无论是否有信号传输，加性噪声总是存在。高斯白噪声 (Additive White Gaussian Noise, AWGN)是最经典的噪声模型。使得接收星座偏离接收判决区域，从而产生系统误码。当径向半径越小时，系统产生的误码越多。由图 3 中虚线可知。当径向半径 ξ' 较大时，接收星座还未偏离判决区域。因此不会产生误码。但当径向半径 ξ' 减小时，接收星座点则会偏离本接收域而达到其他接收域，从而产生系统误码。如图 3 所示，加性干扰由向量 (ψ', ψ_n) 产生，其模值为 $\rho = \sqrt{(\psi')^2 + (\psi_n)^2} = \psi$ 。

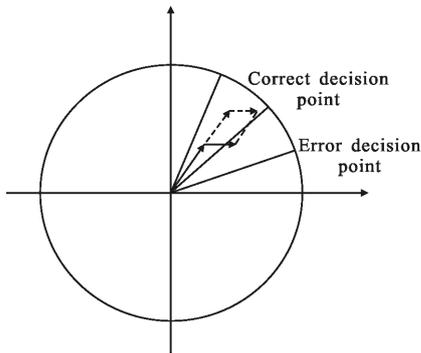


图 3 乘性噪声和加性噪声对接收星座的影响
Fig.3 Effect of multiplicative noise and additive noise on the receiving constellation

2 QPSK 调制混合噪声下的星座图、功率谱和误码率的仿真实验

基于公式(1)~(12)理论,利用数值仿真方法,研究 QPSK 调制在不同乘性噪声与加性噪声影响下的星座图分布。

(1) 乘性噪声影响下星座图

在仿真中,在不考虑加性噪声的情况下,可以分别获得发送端 QPSK 调制系统的星座图,如图 4 所

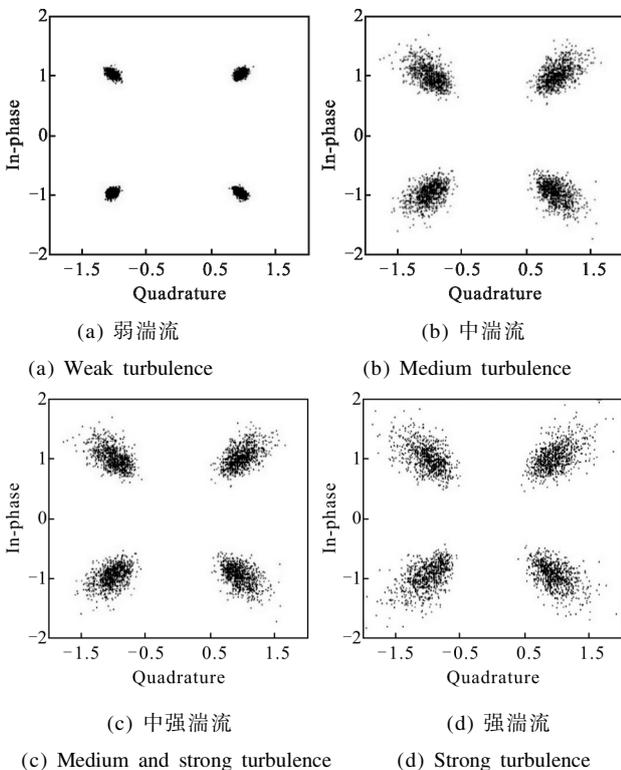


图 4 无加性噪声情况下,不同湍流强度接收端的星座图
Fig.4 Constellation of receiver with different turbulence intensity without additive noise

示。图 4(a)~(d)分别为 $\sigma_R=0.2$ 弱湍流, $\sigma_R=1$ 中湍流, $\sigma_R=1.5$ 中强湍流, $\sigma_R=2$ 强湍流时接收端的星座变化。由图中可以看出,当大气湍流从弱到强变化时,接收端星座图受到乘性噪声的影响,致使星座图弥散沿着图形径向方向弥散。随着湍流的增强,这种弥散情况越发严重。

(2) 加性噪声影响下星座图

设定 $\sigma_R=1.5$ 表征中强湍流,加性噪声方差 $D(n)$ 分别设定为 0.5、1、2 和 3。接收端星座图分别如图 5(a)~(d)所示。由图中可见,当信道处于中强湍流环境中,接收端星座图不仅会因为乘性噪声影响在径向呈现弥散。更伴随着信噪比的升高,因为收到加性噪声影响。出现了星座点沿轴向方向旋转现象。

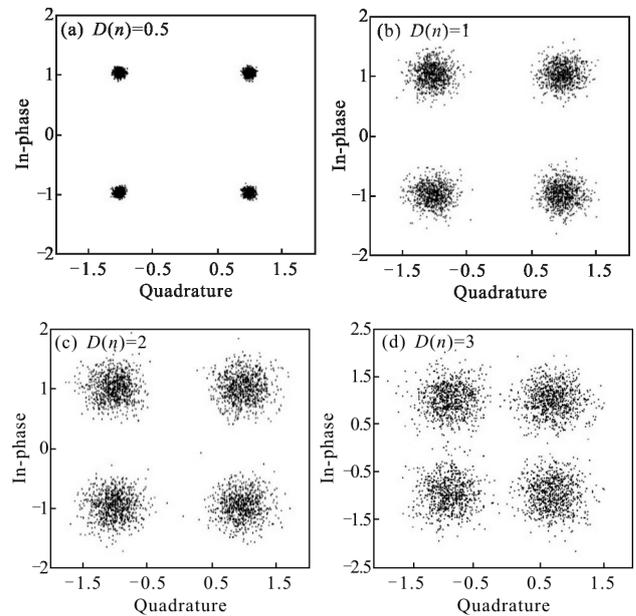


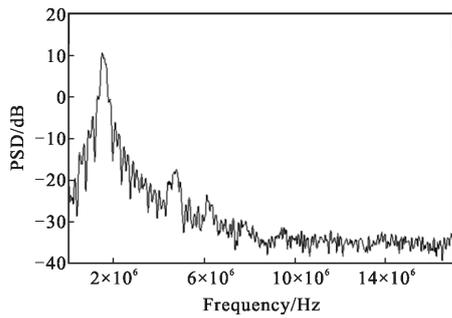
图 5 不同加性噪声环境下接收端星座图

Fig.5 Receiver constellation in different additive noise environments

通过图 4~5 所计算的星座图,乘性噪声与加性噪声影响下 QPSK 调制方式,接收到星座图中星点幅度和相位几乎遍历了允许的任何值,并且模数转换误差也会在原信号的基础上进一步附加较大的加性噪声。

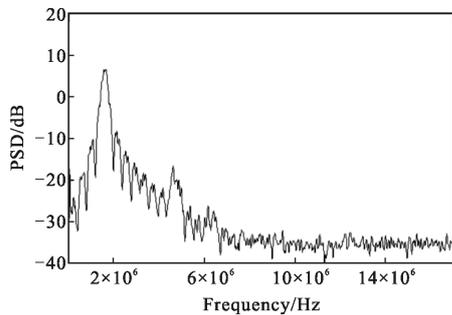
(3) 调制信号功率谱密度分析

对接收端采集到的数据进行分段傅里叶变换,就可以得到不同湍流条件下对 QPSK 大气激光通信系统的功率谱密度估计。通过图 6 中四种湍流条件下功率谱密度函数可以看出,当在弱湍流条件下,接收端信号功率谱估计峰值在 10 dB 附近。而当气象条件转变为中湍流到中强湍流天气情况下,从谱估



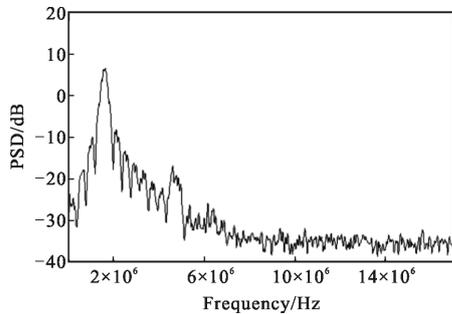
(a) 弱湍流

(a) Weak turbulence



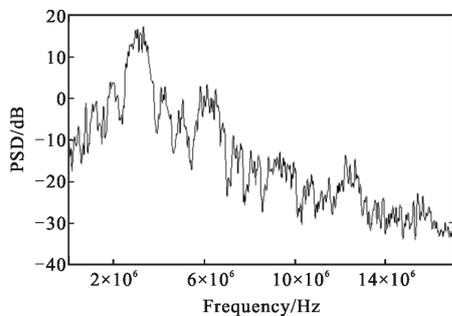
(b) 中湍流

(b) Medium turbulence



(c) 中强湍流

(c) Medium and strong turbulence



(d) 强湍流

(d) Strong turbulence

图 6 不同湍流强度下功率谱密度

Fig.6 Power spectral density at different turbulence intensities

计图中可以看出,峰值功率有 2 dB 的损耗。但是,总体功率谱较为平稳。当通信环境进一步恶化为强湍流时,对比可以看出,信号的功率谱峰值不仅存在下降也存在明显的展宽迹象。并且存在大气湍流的恶化对接收端引进的乘性噪声影响,使得此时频谱最高点向右移动了 20 kHz。随着湍流强度的增强,功率谱主瓣在减弱,而旁瓣在增加。

(4) 不同噪声环境下误码率分析

为了获得系统在不同噪声条件下的误码率,在接收端采集 10^5 数据做统计处理。

图 7 为未考虑乘性噪声,传输距离 $L=1$ km,在不同加性噪声功率条件下,QPSK 的比特误码率(Bit Error Rate, BER)随能见度 V 的变化关系。由图中可以看出,相同能见度条件下,加性噪声功率越大,系统的误码率越大。当加性噪声大于接收信号功率时,系统的误码率很高,此时系统不能根据信号相位,判决出发送的数据。

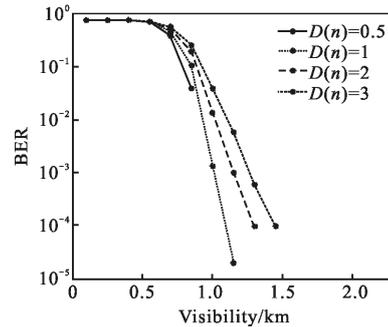


图 7 不同加性噪声下的误码率

Fig.7 Bit error rate under different additive noise

图 8 为未考虑乘性噪声,加性噪声方差 $D(n)=1$,在不同传输距离下,比特误码率随能见度 V 的变化关系。由图可以看出,当能见度小于相应的传输距

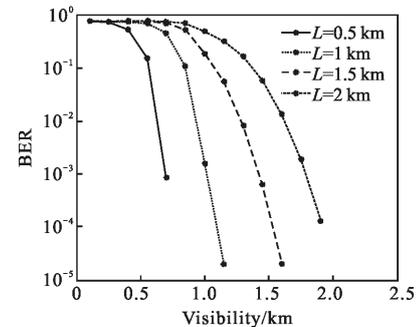


图 8 不同传输距离下的误码率

Fig.8 Bit error rate at different transmission distance

离时,系统的误码率低于 10^{-1} ,这就说明,通信信道的散射衰落很严重,此时散射是影响系统误码率的主要原因。

图 9 为加性噪声方差 $D(n)=1$,传输距离 $L=1$ km,在不同湍流强度的影响下,比特误码率随能见度 V 的变化关系。由图可知,随着湍流强度的增大,当能见度在 0.5~1.5 km 之间时,系统的误码率恶化严重。仿真发现,此时湍流引起的乘性噪声影响较大,原因是乘性噪声直接影响接收信号光强,使得接收信号闪烁,影响系统的正确接收,大大增加了误码率。

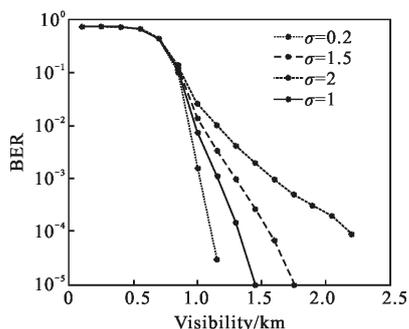


图 9 乘性噪声对误码率的影响

Fig.9 Effect of multiplicative noise on bit error rate

3 结论

文中构建了 QPSK 副载波调制的无线激光通信系统模型,通过数值计算了系统加性噪声与乘性噪声对星座图影响以及不同噪声对接收星座图分布影响,详细分析 QPSK 比特误码率随能见度 V 及传输距离 L 的变化关系。(1) 依据不同噪声条件下星座图,分析得出乘性噪声对 QPSK 系统接收端星座图影响主要来自径向弥散,而加性噪声对调制系统的影响来自轴向旋转。(2) 结合不同乘性噪声与加性噪声条件,分析了不同噪声对系统误码率影响,以及功率谱密度影响。文中通过理论建模和数值仿真方法研究了 QPSK 调制在不同噪声背景下激光通信系统的误码率分析,对开展硬件激光通信系统方案的优化、参数和数据校验提供有效的技术支持,对真实环境下降低无线激光通信的误码率和提高通信质量有重要意义。

参考文献:

[1] Zhao Ting, Li Hongzuo, Gong Yulin. Research on high-level modulation in visible light communication [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 2013, 36

(5): 105–107. (in Chinese)

[2] Zhang Tieying, Wang Hongxing, Shi Jianguo, et al. Spectral characteristics of dual amplitude pulse position modulation in optical communications[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(3): 2–6. (in Chinese)

[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. (in Chinese)

[4] Gu Kang, Xu Zhiyong, Wang Jingyuan, et al. Long-wave infrared wireless laser communication performance under atmospheric turbulence conditions [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(3): 030603. (in Chinese)

[5] Han Liqiang, You Yahui. Performance of multiple input multiple output free space optical communication under atmospheric turbulence and atmospheric attenuation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(7): 0706004. (in Chinese)

[6] Wu Junpeng, Liu Quan, Yu Lintao. Performance analysis of partially coherent optical communication system in Gamma-Gamma atmospheric turbulence [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(3): 0322004. (in Chinese)

[7] Wang Defei, Chu Zhenfeng, Ren Zhenlei, et al. Influence of atmospheric turbulence on BER of laser communication system [J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41 (4): 390–393. (in Chinese)

[8] Ke Xizheng, Liu Mei. Diversity research technology over atmospheric turbulence channels in wireless optical communication [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35 (1): 0106005. (in Chinese)

[9] Chen Dan, Ke Xizheng, Zhang Tuo, et al. Experimental research on wireless optical communication based on 16PSK subcarrier modulation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 442(1): 0105005. (in Chinese)

[10] Li Fei, Lu Houbing. Optimization method for detection threshold of atmospheric optical communication under weak turbulence condition [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(12): 1211004. (in Chinese)

[11] Murat Uysal. Error rate performance of coded free-space optical links over strong turbulence channels [J]. *IEEE Commun Lett*, 2004, 8(10): 635–637.

[12] Chen Dan, Ke Xizheng, Qiao Wei. Blind equalization algorithm of wireless optical communication using subcarrier modulation based on subspace [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(8): 2528–2534. (in Chinese)

[13] Majumdar A K. Free-space laser communication performance in the atmospheric channel[J]. *Journal of Optical and Fiber Communications Reports*, 2005, 2(4): 345–396.