

Gamma-Gamma 湍流信道中大气光通信系统误码特性分析

吴晗玲¹ 李新阳² 严海星¹

(¹ 中国科学院力学研究所, 北京 100190
² 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209)

摘要 大气信道中的大气湍流是影响无线激光通信系统性能的主要因素之一, 其引起的强度闪烁效应对接收信号的提取和还原造成很大干扰。基于 Gamma-Gamma 概率分布的大气湍流信道统计模型, 研究了利用副载波相移键控 (PSK) 强度调制技术的大气光通信系统的误码特性; 推导了副载波二进制相移键控 (BPSK) 及开关键控 (OOK) 两种调制模式下的系统误码率表达式; 对在一定条件下的大气光通信系统, 比较了副载波 BPSK 和 OOK 两种调制模式的误码特性; 分析了链路特征、接收口径尺寸、通信波长和天顶角等因素对系统误码率的影响。结果表明, 增大接收孔径和通信波长都能有效地降低系统误码率, 而天顶角的增大则会使系统误码率增加, 副载波 BPSK 调制模式的误码特性要优于 OOK 调制模式的误码特性。

关键词 光通信; 误码率; 副载波二进制相移键控调制; 开关键控调制; 大气湍流

中图分类号 TN929.12; TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS200828s2.0099

Bit Error Rate Performance Analysis of Atmospheric Optical Communication System Based on Gamma-Gamma Turbulence Channel

Wu Hanling¹ Li Xinyang² Yan Haixing¹

(¹ Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China
² Institute of Optoelectronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)

Abstract In atmospheric channel, atmospheric turbulence is one of the main factors that degrade the performance of atmospheric optical communication systems. Turbulence-induced intensity scintillation often reduces the capability of receiver to extract and recover information contained in the modulated optical wave. Based on the Gamma-Gamma distribution, the bit error rate (BER) performance of atmospheric optical communication system using subcarrier PSK intensity modulation is investigated. The bit error rate for turbulent channel is derived for subcarrier BPSK and OOK modulation schemes. Under some conditions, comparison is given about the BER performance of the above-mentioned two modulation schemes. The influences of link character, aperture diameter, wavelength and zenith angle on the BER are evaluated. Results show that the BER is effectively reduced by increasing aperture and wavelength and increases with increasing the zenith angle. It is also shown that the BER performance of systems employing subcarrier BPSK modulation is much better than that of compatible systems employing OOK modulation.

Key words optical communication; bit error rate (BER); subcarrier binary phase shift keying modulation; on-off keying modulation; atmospheric turbulence

作者简介: 吴晗玲(1979—), 男, 博士研究生, 主要从事大气激光通信及其自适应光学相位校正技术研究。

E-mail: wuhanling@imech.ac.cn

导师简介: 严海星(1942—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光大气传输及自适应光学校正技术的数值模拟研究等。E-mail: hxyan@imech.ac.cn

1 引言

大气激光通信兼具微波通信和光纤通信的优势,具有通信容量大、传输码率高、保密性能好以及相对于其它波段通信系统体积小、重量轻等优点^[1]。然而,传输信道中的大气湍流是影响通信系统性能的主要因素之一,其引起的强度闪烁效应使激光信号受到随机的寄生调制而呈现出额外的大气湍流噪声,对接收端信号的提取和还原造成很大干扰,增大了通信系统的误码率。而误码率是衡量数字通信系统性能的重要指标之一,国际电信联盟-电信标准部(ITU-T)对于现代光通信的普遍要求是比特误码率(BER-bit-error rate)低于 10^{-12} ,可接受的最大比特误码率是 10^{-9} ^[2]。

开关键控(OOK)是目前强度调制/直接检测(IM/DD)系统采用的主要调制方式之一^[3],OOK方式成本低且实现简单,但信号检测需设定门限值,大气湍流使得其最佳门限值的选取变得异常困难。因此可采用副载波强度调制技术来避免上述不足,从而优化系统性能^[4~6],副载波编码可以采用任意二进制方法,其中最有效的方法是二进制相移键控(BPSK)^[7]。Huang^[4]首先分析了使用副载波BPSK调制模式的大气激光通信系统的误码率特性,并进行了实验研究,得出在大气湍流信道中,就调制模式的误码特性而言,副载波BPSK调制优于OOK调制。John Q. Liu等^[5]比较了副载波BPSK与OOK两种调制模式的性能,并推导出各自的误码率表达式,进而研究了它们的误码率下限,从理论上说明了副载波BPSK调制模式的误码特性优于OOK调制模式的误码特性的原因。Anoop Kumar^[6]在John Q. Liu工作的基础上,针对星地通信链路,研究了孔径平均效应对这两种调制模式的误码特性的影响。

这些工作都是利用大气湍流信道的对数正态统计模型来分析和考察激光通信系统的误码特性。一般认为,在弱湍流条件下,光强起伏服从对数正态分布^[8]。但是,最近研究发现^[9],弱起伏区的光强起伏分布并不是一个真正的对数正态分布,实验结果和模拟数据均表明,起伏分布的尾端偏离对数正态统计值。而概率密度函数尾端值对激光通信系统有着重要的影响,因为其探测概率或衰落概率等系统性能参量主要是由给定概率密度函数尾端部分计算得到的。另外随着湍流强度的增强,多重散射效

应显著,对数正态分布统计模型已不适用于描述中到强湍流环境下的光强起伏行为。为了能更为准确的描述光波大气传输中光强起伏的统计特征,M. A. Al-Habash等^[10]基于接收到的光强起伏是由小尺度湍流起伏(衍射效应)受大尺度湍流起伏(折射效应)再调制过程的假设,提出了Gamma-Gamma光强起伏概率分布模型。相对于对数正态分布模型而言,Gamma-Gamma光强起伏概率分布是一个双参数模型,其参数与大气湍流物理特性直接相关。由于它获得了实验和数值模拟结果的支持且由于该模型易于进行数学处理,能较准确的描述弱、中、强湍流条件下光强起伏特征,现已得到了广泛的应用。

为此,利用能较准确描述大气湍流特性的Gamma-Gamma光强起伏概率分布模型,将副载波相移键控(PSK)强度调制技术应用于大气激光通信系统,推导了副载波二进制相移键控(BPSK)及开关键控(OOK)两种调制模式下误码率公式,然后基于此,以卫星-地面通信为例,对副载波BPSK及OOK两种调制模式的误码性能进行了比较分析,最后就副载波BPSK调制方式,分别考察了链路特征、通信波长、接收孔径大小和天顶角等因素对系统比特误码率(BER)的影响。

2 强度闪烁效应及光强起伏的概率分布模型

大气温度、压力不均匀所引起的大气湍流效应导致接收面上的光强随时间和空间发生随机起伏,即所谓的“强度闪烁效应”。接收端光强的随机起伏是大气湍流效应的一个重要表现,也是影响基于直接检测的光通信系统性能的一个主要因素。光强起伏的概率密度函数在预测及评估通信系统性能时是必不可少的,如在定量评估系统误码率、衰落概率及信道容量等性能参量时,就需要能够准确反映大气湍流特性的光强起伏概率密度函数。目前业已提出多种光强的概率密度函数模型,这些分布模型一般都包含着可调节的参量,也有着各自不同的适用范围。一般可用Rytov方差 σ_R^2 对光强起伏的程度进行分类^[1]: $\sigma_R^2 < 1$ 表示弱起伏区; $\sigma_R^2 \approx 1$ 表示中等起伏区; $\sigma_R^2 \gg 1$ 表示强起伏区;余下则为饱和区和超饱和区。表1给出了各种光强起伏的概率密度函数及其适用的范围^[11]。

表 1 光强起伏的概率密度函数及其适用范围

Table 1 The PDF of irradiance-intensity fluctuation and its application scope

Weak fluctuations regime		moderate fluctuations regime		strong fluctuations regime		saturation fluctuations regime		supersaturation fluctuations regime	
Lognormal distribution	⇒	beckmann distribution	⇒	lognormally modulated exponential distribution		⇒	Negative exponential distribution		
IK-distribution			⇒	K-distribution					
Gamma-Gamma distribution									

在一般的大气激光通信场景中，光载波的光强起伏都是在弱到强起伏区，而出现在饱和区和超饱和区的可能性都很小。在弱、中等及强起伏区的几种概率密度函数中，又以对数正态分布和 Gamma-Gamma 分布最为常用。与对数正态分布模型相比，

Gamma-Gamma 光强起伏概率分布适用范围更广，能较为准确的描述弱、中及强起伏区的光强起伏统计特征，而且在概率分布的尾端部分与数值模拟及实验结果更为吻合。其形式为^[1]

$$p(x) = \frac{2}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)x} \left(\frac{\alpha\beta x}{\langle x \rangle} \right)^{(\alpha+\beta)/2} K_{\alpha-\beta} \left(2\sqrt{\frac{\alpha\beta x}{\langle x \rangle}} \right), x > 0 \quad (1)$$

这里 $\langle \rangle$ 表示随机变量的系综平均值， $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数， $K_{\alpha-\beta}(\cdot)$ 为阶数为 $\alpha-\beta$ 的第二类修正 Bessel 函数， α, β 则与波束模型有关。对平面波而言，有

$$\alpha = \left\{ \exp \left[\frac{0.49\sigma_1^2}{(1 + 0.65d^2 + 1.11\sigma_1^{12/5})^{7/6}} \right] - 1 \right\}^{-1}, \quad (2)$$

$$\beta = \left\{ \exp \left[\frac{0.51\sigma_1^2(1 + 0.69\sigma_1^{12/5})^{-5/6}}{1 + 0.90d^2 + 0.62d^2\sigma_1^{12/5}} \right] - 1 \right\}^{-1}, \quad (3)$$

对球面波而言，有，

$$\alpha = \left\{ \exp \left[\frac{0.49\sigma_2^2}{(1 + 0.18d^2 + 0.56\sigma_2^{12/5})^{7/6}} \right] - 1 \right\}^{-1}, \quad (4)$$

$$\beta = \left\{ \exp \left[\frac{0.51\sigma_2^2(1 + 0.69\sigma_2^{12/5})^{-5/6}}{1 + 0.90d^2 + 0.62d^2\sigma_2^{12/5}} \right] - 1 \right\}^{-1}, \quad (5)$$

其中 $d = (kD^2/4L)^{1/2}$ ， D 为接收孔径 ($D = 0$ 表示点接收器，下同)， C_n^2 为大气折射率结构常数，通常是位置、时间和高度的函数， $k = 2\pi/\lambda$ 为波数， L 为光束传输距离。 σ_1^2, σ_2^2 分别记为平面波和球面波的 Rytov 方差^[12]：

$$\sigma_1^2 = 2.25k^{7/6} \sec^{11/6} \zeta \int_{h_0}^H C_n^2(h) (h - h_0)^{5/6} dh, \quad (6)$$

$$\sigma_2^2 = 2.25k^{7/6} \sec^{11/6} \zeta \int_{h_0}^H C_n^2(h) \left(\frac{(H-h)(h-h_0)}{H-h_0} \right)^{5/6} dh, \quad (7)$$

式中 H, h_0 为通信终端高度 (m) 且 $H > h_0$ 。一般来说，对于星地激光通信的下行链路可用平面波光束模型来近似描述光信号传输特征，而上行链路则可用球面波光束模型来近似描述光信号传输特征^[13]。

从 Gamma-Gamma 概率分布模型出发，可以推得光强起伏的 n 阶矩与其平均值的关系是

$$\frac{\langle x^n \rangle}{\langle x \rangle^n} = \frac{\Gamma(\alpha+n)\Gamma(\beta+n)}{(\alpha\beta)^n \Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)},$$

这里将随机变量 x 的二阶矩归一化为单位 1，可推

得其平均值为

$$\langle x \rangle = \sqrt{\frac{\alpha\beta}{(1+\alpha)(1+\beta)}}.$$

3 系统误码率的理论分析

相对于 OOK 调制模式而言，副载波相移键控 (PSK) 调制的优点是无需门限设定，可实现多进制信号调制以及多路副载波调制等，其中多载波调制可以有效地减少符号间干扰 ISI (Inter-symbol

Interference), 从而可以优化系统性能。其工作过程是^[7]: 在发射端, 利用标准的调制方式比如 AM, FM 等, 把信号波形调制到射频(RF)或中频(IF)副载波上, 副载波再通过强度调制到主载波上。然后主载波以光场或光束的形式通过大气光学信道进行传输。在接收端, 光场被收集和处理, 通过光电检测装置恢复调制的副载波信号。恢复的副载波信号与探测器噪声一起馈入到副载波解调通道对信号数据进行解调。这里我们主要使用二进制相位键控(BPSK)。

3.1 副载波 BPSK 强度调制

经大气光学信道传输后, 系统接收端输出的电流信号为^[5]

$$I(t) = X(t) + mX(t)s(t)\cos 2\pi f_c t + n(t)\cos 2\pi f_c t, \quad (8)$$

其中 m 为调制指数且 $m \in (0, 1]$, f_c 为副载波频率, $s(t)$ 是调制信号。 $n(t)$ 是窄带高斯白噪声, 其方差为 σ_n^2 。

假设副载波频率足够高, 以至于(8)式中的前两项在整个频率域不相互重叠。上式中第一项可通过低通滤波器滤除, 将第二项转化为基带信号, 则解调器输入的基带 BPSK 信号可以表示为

$$r(t) = \begin{cases} mX(t) + n(t) & \text{发送 "1" 符号} \\ -mX(t) + n(t) & \text{发送 "0" 符号} \end{cases} \quad (9)$$

由(1)、(8)两式可知接收信号的条件概率密度函数为:

$$p(r | x) = \begin{cases} \frac{2}{\sqrt{2\pi\sigma_n}\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{\alpha\beta}{m < x >}\right)^{(\alpha+\beta)/2} \int_0^{+\infty} t^{(\alpha+\beta)/2-1} K_{\alpha-\beta} \left(2\sqrt{\frac{\alpha\beta t}{m < x >}}\right) \exp\left(-\frac{(r-t)^2}{2\sigma_n^2}\right) dt \\ \frac{2}{\sqrt{2\pi\sigma_n}\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{\alpha\beta}{m < x >}\right)^{(\alpha+\beta)/2} \int_0^{+\infty} t^{(\alpha+\beta)/2-1} K_{\alpha-\beta} \left(2\sqrt{\frac{\alpha\beta t}{m < x >}}\right) \exp\left(-\frac{(r+t)^2}{2\sigma_n^2}\right) dt. \end{cases} \quad (10)$$

对这种调制模式来说, 门限值可为“0”, 在大气湍流环境中, 可推出基于 Gamma-Gamma 光强起伏分布模型的系统误码率表达式:

$$P_e = \frac{1}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{\alpha\beta}{< x >}\right)^{(\alpha+\beta)/2} \int_0^{\infty} x^{(\alpha+\beta)/2-1} K_{\alpha-\beta} \left(2\sqrt{\frac{\alpha\beta x}{< x >}}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{mx}{\sqrt{2}\sigma_n}\right) dx. \quad (11)$$

在不考虑大气湍流效应, 仅考虑加性白高斯噪声时, 其误码率为^[5]

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{m^2}{2\sigma_n^2}}\right). \quad (12)$$

由此, 我们得到了真空与大气湍流环境下的副载波二进制相移键控调制方式的误码率表达式。不失一般性, 下面的分析中假定调制指数 $m = 1$ 。

3.2 OOK 调制模式

OOK 调制模式下, 接收电信号可以写为

$$i(t) = X(t) + \sum_{i=-\infty}^{\infty} X(t) a_i g(t - iT_s) + n(t), \quad (13)$$

其中 a_i 为 -1 或 $+1$, 其出现概率分别为 P_0 和 P_1 。 $g(t)$ 为单个矩形脉冲, 脉宽为 T_s 。当不考虑大气湍流时, $X(t) = 1$, 由此可得真空条件下的系统误码率^[5]:

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{E_b}{2\sigma_n^2}}\right). \quad (14)$$

这里 $E_b = a_i^2 = 1$ 。而在大气湍流信道中, 可推得 OOK 调制模式的误码率性能为(门限值选为 $< x >$):

$$P_e = \frac{1}{2} P_0 \operatorname{erfc}\left(\frac{T}{\sqrt{2}\sigma_n}\right) + \frac{(1-P_0)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{\alpha\beta}{< x >}\right)^{(\alpha+\beta)/2} \int_0^{\infty} x^{(\alpha+\beta)/2-1} K_{\alpha-\beta} \left(2\sqrt{\frac{\alpha\beta x}{< x >}}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{2x-T}{\sqrt{2}\sigma_n}\right) dx. \quad (15)$$

由(12)和(14)式的比较可以看出, 在真空条件下, OOK 与副载波 BPSK ($m = 1$) 两种调制模式的系统误码率表达式完全一致。同时为方便起见, 可

定义系统信噪比为

$$R_{SN}(\text{dB}) = 10\lg(E_b/\sigma_n^2). \quad (16)$$

由(14)式可知, 当 $R_{SN} = 15.56 \text{ dB}$ 时, $P_e = 10^{-9}$ 。

4 性能计算及结果分析

由于激光通信具有大通信容量、高传输速率、高隐蔽性、高抗干扰能力等优点,是今后星地间大容量信息保密通信最具竞争力的可选方案之一,在军用和民用等通信领域有着广泛的应用和发展前景。因此这里以星地间激光通信为例,研究各种参数对系统性能的影响及相应的改进措施。假设卫星高度为 400 km,在两种链路(上行链路和下行链路)情形下,分别考察通信波长、接收孔径大小以及天顶角对误码率的影响。

采用 Hufnagel-Valley(HV)湍流模型描述湍流大气结构常数随高度的分布:

$$C_n^2(h) = 5.94 \times 10^{-23} h^{10} \exp(-h) \left(\frac{W}{27}\right)^2 + 2.7 \times 10^{-16} \exp(-2h/3) + A \exp(-10h), \quad (17)$$

式中 h 是高度(km), $A = 1.7 \times 10^{-14}$, $W = 21$ 。如果光载波以天顶角 ζ 进行斜程传输,则其传输距离为:

$$L = (R_e^2 \cos^2 \zeta + 2hR_e + h^2)^{1/2} - R_e \cos \zeta \quad (18)$$

式中 R_e 是地球半径,显然当 $\zeta = 0$ 时, $L = h$, 此时的光载波是垂直传输的。

4.1 副载波 BPSK 和 OOK 两种调制模式误码特性的比较

我们在下行链路中比较副载波 BPSK 和 OOK 两种调制模式的误码特性。图 1 给出了两种调制模式下,系统误码率随信噪比的变化关系,以及接收孔径(以下用 D 表示)的大小对误码率的影响。 $D = 0.0$ 表示点接收器。AWGN 表示仅考虑系统的加

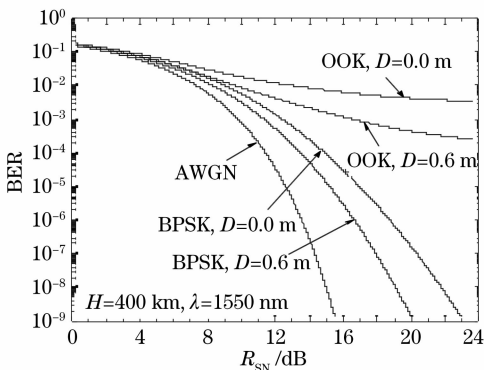


图 1 下行链路中,不同调制模式及接收孔径下的误码率随信噪比的变化(0° 天顶角)

Fig. 1 Downlink BER for BPSK as a function of R_{SN} for different modulation schemes and aperture diameters and for the no-turbulence with zenith of 0 degree

性高斯噪声影响,而不考虑湍流的作用。从图中可见,就误码特性而言,副载波 BPSK 调制模式要远优于 OOK 调制模式,对 OOK 来说,即使增大接收口径,仍不能使误码率降低到 10^{-9} ,而对于副载波 BPSK 来说,即使在点接收器下,信噪比为 23 dB 时,误码率就降低到 10^{-9} ,若将接收孔径增大到 60 cm,则信噪比可以降低 3 dB 左右,就能使误码率达到 10^{-9} 。由于副载波 BPSK 调制模式的误码率远低于 OOK 调制模式的误码率,以下将只针对副载波 BPSK 调制模式的误码率影响因素进行分析。

4.2 孔径平均效应对系统误码率的影响

光信号在大气中传输时所出现的强度闪烁效应一般会随着接收孔径的增大而降低,这就是所谓的孔径平均效应。孔径平均效应可以降低强度闪烁效应对通信链路的不利影响,从而提高系统的通信质量。

图 2 给出了在下行链路和上行链路中,接收孔径 D 的大小对系统误码率的影响。在接收孔径较小时(如点接收器和 $D = 20$ cm),两种链路条件下的结果基本类似;而在接收孔径较大时,二者差别较为明显。在 $D = 60$ cm 时,达到同样的误码率,下行链路所需的信噪比要比上行链路低 1 dB 左右。就卫星-地面光通信系统的下行链路而言,光载波经过长距离的真空传播,到达大气层顶部时,其直径已扩展得比大气湍流外尺度大,故大气湍流对光信号的影响基本上只有光束扩展和小尺度引起的闪烁效应,此时漂移效应可以忽略。与下行链路不同的是,在上行链路中,光载波在发射端就受到大气湍流的影响,其相位和振幅发生随机起伏,光束漂移、扩展和闪烁效应都比较明显。显然,在上行链路中,光束漂移对误码率有较大的影响,这导致在同样条件下,要达到同样的误码率,上行链路需要更高的信噪比或发射功率。

另外,在信噪比为 21.5 dB 时,与点接收器相比,20 cm、40 m 和 60 cm 的接收孔径能将误码率分别提高近 1、2 和 3 个数量级左右。所以对于地面上的通信终端设备而言,可以采用大孔径接收方法来抑止或缓解强度闪烁等湍流效应对通信链路的干扰;对于星上的通信终端设备而言,其尺寸不宜太大,所以从减小通信误码率,提高通信质量的角度考虑,可以在地面采用多孔径发射技术来降低大气湍流对光信号传输的不利影响。

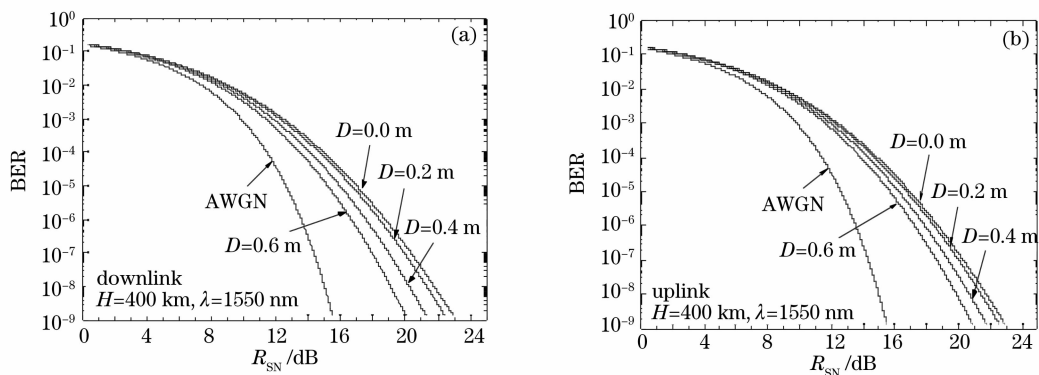


图 2 四种接收孔径以及真空条件下的误码率随信噪比的变化(0° 天顶角), (a)下行链路;(b)上行链路

Fig. 2 Downlink(a) and uplink(b) BER for BPSK as a function of R_{SN} for three receiver diameters D and for the no-turbulence with zenith of 0 degree

4.3 通信波长对系统误码率的影响

受大气吸收和散射的影响,通信系统的工作波长应选在大气层透射窗口。但由于大气湍流的作用,使用不同波长的通信系统性能也有所不同,为了考察误码率与波长之间的关系,这里选用几种典型的激光波长进行数值计算,波长分别为 750 nm、860 nm、1310 nm 和 1550 nm,接收孔径为 20 cm,

计算结果如图 3。从图中可以发现,波长越长,误码率越小,在下行链路中,1550 nm 波长的系统在信噪比为 23 dB 时,误码率就达到了 10^{-9} ,而此时 750 nm 的系统误码率才达到 10^{-6} 。在上行链路中也有类似的结果。所以对于长距离激光通信,特别是星地间通信系统设计时,从降低误码率的角度出发,宜采用较长的波段。

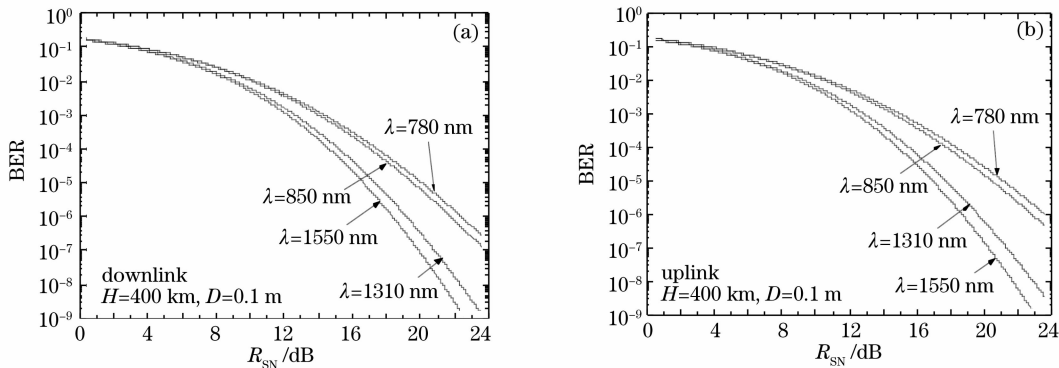


图 3 四种通信波长下的误码率随信噪比的变化(0° 天顶角), (a)下行链路;(b)上行链路

Fig. 3 Downlink(a) and uplink(b) BER for BPSK as a function of R_{SN} for four wavelengths with zenith of 0 degree

4.4 天顶角与通信系统的误码率

以上的分析都是针对 0° 天顶角的场景进行的,实际上,由于轨道卫星的运动,星上终端与地面终端都是存在一定天顶角,这使得光载波传输距离增加,相应的增加了大气湍流对通信链路的干扰,从而影响和降低星地激光通信链路中对空间光束的捕获、跟踪和瞄准,降低信号光接收系统实际接收的有效功率,增大系统误码率。图 4 给出了在下行链路和上行链路中,系统误码率随信噪比和天顶角的变化关系,这里的接收孔径是 30 cm。显然,天顶角对误码率的影响较大,在下行链路中,当天顶角为 60° 时,信噪比即使达到 25 dB,系统误码率也仅在 10^{-5} 左右,远低于 10^{-9} 的标准。

从以上的对比分析中可以看到,对于 OOK 和副载波 BPSK 两种调制模式而言,在较强湍流条件下,OOK 调制模式的误码率较高,即使采用较大接收孔径,误码率仍不能降低到可接受的最大比特误码率。从误码率特性来考虑,副载波 BPSK 要远优于 OOK 调制模式。

另外,从对副载波 BPSK 调制模式的误码率影响因素的分析来看,无论是上行链路还是下行链路,增大接收孔径都能使系统误码率得到下降,但只有在孔径较大时,这种改善效果才比较明显。而且,就上行链路而言,由于星上空间有限,接收孔径不能太大,为了降低大气湍流效应对通信系统性能的不利影响,可采用多孔径发射技术来提高通信

系统的性能。对于下行链路，可以使用大孔径接收

设备，从而有效地降低系统误码率。

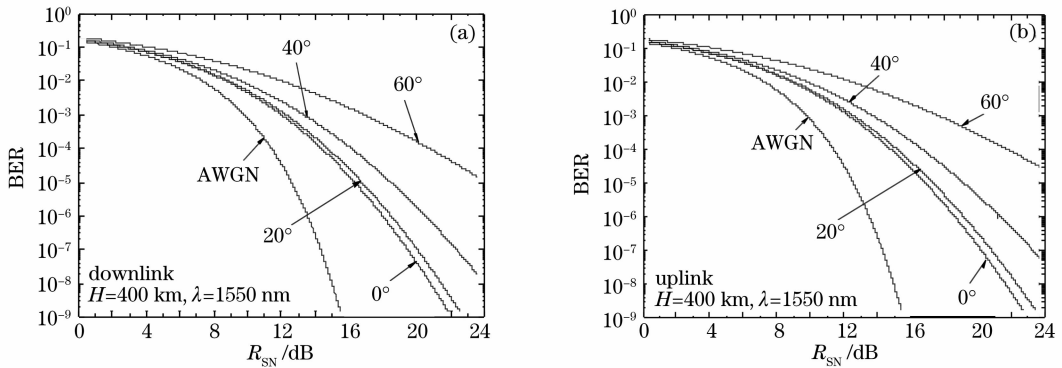


图 4 四种天顶角以及真空条件下的误码率随信噪比的变化。(a)下行链路;(b)上行链路

Fig. 4 Downlink (a) and uplink(b) BER for BPSK as a function of BER for four zenith angles and for the no-turbulence

5 结 论

大气湍流信道随空间和时间作无规则的变化使得光载波在传输过程中随机地改变其光波参量，导致传播后的光束质量大大降低，出现所谓强度闪烁、相位畸变、光束漂移以及空间相干性退化等现象，严重地影响了光信号传输结果从而导致通信系统性能的急剧下降。其中强度闪烁效应是影响基于直接检测的光通信系统性能的一个主要因素，它会使激光信号受到随机的寄生调制而呈现出额外的大气湍流噪声，使接收信噪比减小，增加了通信系统误码率。与常用的对数正态分布湍流信道模型相比，Gamma-Gamma 光强起伏概率分布模型具有适用范围广且在分布的尾端部分更为准确。在分析了强度闪烁效应及光强起伏概率分布模型的基础上，应用 Gamma-Gamma 光强起伏分布模型推导了副载波 BPSK 和 OOK 两种调制模式下的系统误码率表达式，以卫星-地面通信为例，对这两种调制模式的误码特性进行了对比研究，然后针对副载波 BPSK 调制模式下的系统误码率的影响因素进行分析。结果表明，副载波 BPSK 调制模式的误码特性要优于 OOK 调制模式的误码特性，在相同条件下，前者要比后者低 6 个数量级左右。增大接收孔径和通信波长以及减小天顶角都能改善系统误码率。副载波 BPSK 调制模式在星地间通信具有很大的应用潜力。

参 考 文 献

1 L. C. Andrews, R. L. Phillips. Laser beam propagation through random media [M]. Bellingham, SPIE Optical Engineering Press, 2005
 2 Liu Jianguo, Huang Yinbo, Wang Yingjian. Numerical analysis of intensity fluctuation scale characteristics in space laser communication

[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(8): 1009~1012
 刘建国, 黄印博, 王英俭. 空间激光通信中光强起伏尺度特征的数值分析[J]. *光学学报*, 2005, **25**(8): 1009~1012
 3 Zhang Tieying, Wang Hongxing, Cheng Gang *et al.*. A novel fixed length digital pulse interval modulation for optical wireless communication [J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(12): 1655~1659
 张铁英, 王红星, 程刚等. 无线光通信中的定长数字脉冲间隔调制[J]. *中国激光*, 2007, **34**(12): 1655~1659
 4 W. Huang, J. Takayanagi, T. Sakanaka *et al.*. Atmospheric optical communication system using subcarrier PSK modulation [J]. *IEICE Trans. Commun.*, 1993, **E76-B**(9): 1169~1177
 5 Jia Li, John Q. Liu, D. P. Taylor. Optical communication using subcarrier PSK intensity modulation through atmospheric turbulence channels [J]. *IEEE Trans. Commun.*, 2007, **55**(3): 1598~1606
 6 Anoop Kumar, V. K. Jain. Antenna aperture averaging with different modulation schemes for optical satellite communication links [J]. *Journal of Optical Networking*, 2007, **6**(12): 1323~1328
 7 R. M. Gagilardi, S. Karpis, *Optical Communications* [M]. Chen Genxiang *et al.* transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1998
 R. M. Gagilardi, S. Karpis. 光通信技术与原理[M]. 陈根祥等译. 北京:电子工业出版社, 1998
 8 V. I. Tatarski. *Wave Propagation in a Turbulent Atmosphere* [M]. Wen Jingsong, Song Zhengfang *et al.* Beijing: Science Press, 1978
 塔塔尔斯基 B. N.. 湍流大气中波的传播理论[M]. 温景嵩, 宋正方等译. 北京: 科学出版社, 1978
 9 S. V. Frida, Y. Cynthia. Aperture averaging effects on the probability density of irradiance fluctuations in moderate-to-strong turbulence[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(11): 2099~2107
 10 M. A. Al-Habash, L. C. Andrews, R. L. Phillips. Mathematical model for the irradiance probability density function of a laser beam propagating through turbulent media [J]. *Opt. Engng.*, 2000, **39**(12): 3272~3280
 11 S. V. Frida. Fade statistics for a lasercom system and the joint PDF of a Gamma-Gamma distributed irradiance and its time derivative [D]. Florida: University of Central Florida, 2006
 12 L. C. Andrews, R. L. Phillips, C. Y. Hopen. Scintillation model for a satellite communication link at large zenith angles [J]. *Opt. Eng.*, 2000, **39**(12): 3272~3280
 13 R. K. Tyson. Bit-error rate for free-space adaptive optics laser communications [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2002, **19**(4): 753~758