

M 分布星地激光通信链路相干正交频分复用系统误码性能研究

王怡^{1,2}, 王亚萍¹

(1. 中国计量大学信息工程学院, 浙江省电磁波信息技术与计量检测重点实验室, 浙江 杭州 310018;
2. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘 要: 为了缓解大气湍流对星地激光通信系统性能的影响, 基于 M 分布大气信道模型, 在星地激光通信上行链路和下行链路中提出了一种多载波相干正交频分复用 (OFDM) 调制系统, 推导了星地激光通信上行链路和下行链路相干 OFDM 调制系统误码率的闭合表达式。在弱大气湍流和强大气湍流下, 分别研究了天顶角、接收孔径、信噪比、最佳束散角以及最佳发射半径与系统误码率的关系, 并与二进制相干差分相移键控 (DPSK) 调制进行比较。理论和仿真对比结果表明, 星地激光通信系统中采用相干 OFDM 调制系统的误码性能优于相干 DPSK 调制系统。

关键词: 星地激光通信; M 分布; 正交频分复用; 光强闪烁; 光束漂移; 到达角起伏

中图分类号: TN929.13

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2020197

Research on the system error performance of coherent orthogonal frequency division multiplexing system with M-distribution in satellite-to-ground laser communication

WANG Yi^{1,2}, WANG Yaping¹

1. Key Laboratory of Electromagnetic Wave Information Technology and Metrology of Zhejiang Province,
College of Information Engineering, China JiLiang University, Hangzhou 310018, China

2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection,
Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract: In order to alleviate the influence of atmospheric turbulence on the performance of satellite-to-ground laser communication system, based on the M-distribution atmospheric channel model, a multi-carrier coherent orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) modulation system was proposed for uplink and downlink in the satellite-to-ground laser communication. The closed-form expression of bit error rate (BER) of coherent OFDM modulation system was derived. The relationship between the zenith angle, receiving aperture, signal-to-noise ratio (SNR), optimal beam divergence angle, and optimal transmission radius and the BER were studied under weak, and strong atmosphere turbulence, and compared with binary coherent differential phase shift keying (DPSK) modulation. Both the theory and the simulation results show that compared with coherent DPSK modulation, the bit error performance of the coherent OFDM modulation system in the satellite-to-ground laser communication system is better.

Key words: satellite-to-ground laser communication, M-distribution, orthogonal frequency division multiplexing, intensity scintillation, beam wander, angle of arrival fluctuation

收稿日期: 2020-05-19; 修回日期: 2020-07-31

基金项目: 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室开发基金资助项目 (No.SKLG2020K017); 国家自然科学基金资助项目 (No.51704267)

Foundation Items: Open Fund of State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection (Chengdu University of Technology) (No.SKLG2020K017), The National Natural Science Foundation of China (No.51704267)

1 引言

星地激光通信是连接星间光网和地面光网的纽带,分为上行链路和下行链路。目前,星地通信网络中采用微波作为通信波段。无线光通信与微波通信相比,具有通信容量大、数据传输率高、信息保密性好、设备体积小、重量轻以及低功耗的特点,引起了研究人员的兴趣^[1]。然而,卫星与地面之间的激光通信系统不可避免地受到大气湍流的影响。大气湍流会造成折射率起伏进而破坏激光光束的相干性,产生一系列的大气湍流效应,如光强闪烁、光束漂移、到达角起伏、光束宽展等,都直接影响系统的通信性能^[2-5]。对于星地激光通信系统,大气湍流对上行链路的影响更复杂。上行链路中,除了受到光强闪烁以及到达角起伏的影响外^[6-7],由于大气湍流的直径大于波束直径引起的光束漂移效应对通信性能影响显著。下行链路中,光束到达大气层时的直径远大于湍流的直径,因此,光束漂移在下行链路中产生的影响是可以忽略的^[8-9]。为了缓解大气湍流对星地激光通信系统性能的影响,调制技术是一种有效的解决方法^[10]。

近年来,星地激光通信系统的调制技术不断发展。目前,在星地激光通信系统中广泛应用的调制技术主要有键控调制、脉冲调制、偏振调制等。例如, Jiang 等^[11]研究并比较了开关键控(OOK, on-off keying)调制、脉冲位置调制(PPM, pulse position modulation)和数字脉冲间隔调制(DPIM, digital pulse interval modulation)3种调制方案对星地激光通信上行链路系统性能的影响。Wang 等^[6]采用圆偏振(CpolSK, circle polarization shift keying)调制技术对星地激光上行链路的误码率性能进行研究。此外,星地激光通信系统中还出现了一些频率调制和相位调制技术。例如, Ding 等^[12]在星地激光上行链路中采用最小频移键控(MSK, minimum-shift keying)调制技术,研究了星地激光通信系统误码性能。Sandalidis 等^[13]采用差分相移键控(DPSK, differential phase shift keying)调制、多进制相移键控(M-PSK, M-ary phase-shift-keying)调制和多进制正交幅度(M-QAM, M-ary quadrature amplitude)调制技术,研究了星地激光通信上行链路系统性能。Li 等^[14]利用空间分集技术,研究了下行链路 DPSK 调制。上述调制技术多为单载波调制,在星地激光通信系统中,多载波调制技术尚无报道。相

干正交频分复用(OFDM, orthogonal frequency division multiplexing)作为一种特殊的多载波调制方式,由于子载波是正交的,它们之间的符号间干扰(ISI, intersymbol interference)被最小化,因此能够有效抑制和消除由于信道的时延扩展引起的频率选择性衰落,具有较高的频谱利用率和易于实现调制解调的优点^[15-17]。

本文在星地激光通信系统中,采用 M 分布模拟大气信道模型,提出了一种多载波相干 OFDM 调制系统。上行链路考虑光强闪烁、光束漂移和到达角起伏的联合噪声,下行链路考虑光强闪烁、到达角起伏的影响,分别推导了上行链路和下行链路相干 OFDM 调制系统的误码率的闭合表达式,并仿真分析了天顶角、接收孔径、信噪比、束散角、发射半径对通信系统性能的影响。

2 系统性能分析

2.1 星地激光通信链路

图 1 为星地激光通信链路传输示意。在星地激光通信上行链路中,激光束从地面终端发出,经过大气信道向上传输时,受光强闪烁、光束漂移、到达角起伏等大气湍流的影响,最后通过真空信道传输后,由星上终端通过接收天线接收。在星地激光通信下行链路中,光信号由星上终端发出,先经过真空信道传输,然后进入大气层。下行链路传输信号经过大气层受到光强闪烁和到达角起伏的影响,最后地面终端上的接收机经过处理接收所需的信号。

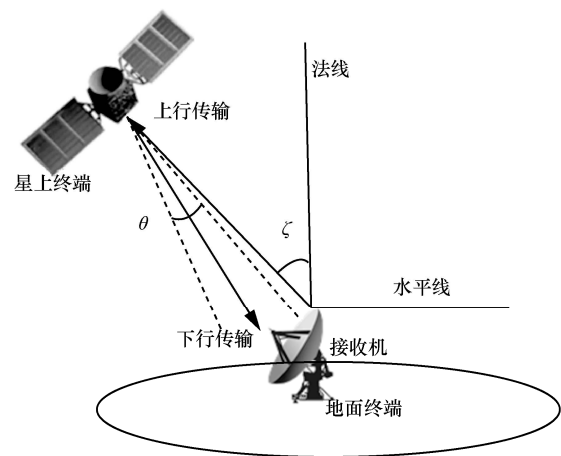


图 1 星地激光通信链路传输示意

星地激光通信中特有的天顶角 ζ 表示地面接收机法线方向与传播方向之间的夹角; θ 表示激光光束的束散角,衡量光束从其中心向外发散程度;激

光光束的发射半径衡量光束横向扩展;接收端的接收孔径表示接收入射光能量有效面积。上述参数都是影响星地激光通信系统性能的重要指标。

星地激光 OFDM 通信系统框架如图 2 所示。在发射端,OFDM 调制经过串并转换将原始信号分割成 N 个子信号,即 d_0, d_1, \dots, d_{N-1} 。然后用 N 个子信号分别调制 N 个相互正交的子载波。由于子载波的频谱相互正交,子信道的频谱可以相互交叠,因而可以得到更高的频谱效率。最后,各个子信道的已调信号相加形成 OFDM 发射信号。相干 OFDM 的解调适用于所有线性调制信号的解调,本文采用相干 OFDM 的解调,其性能优于直接探测方式。在相干 OFDM 的解调中,首先对接收到的信号进行分离,由于子载波的频谱是相互正交的,可利用混频和积分电路将各个子信道分离。在接收端,输入信号分成 N 个支路,分别用各个子载波混频和积分,恢复子信号,再经过并/串变换解调恢复原始 OFDM 信号。

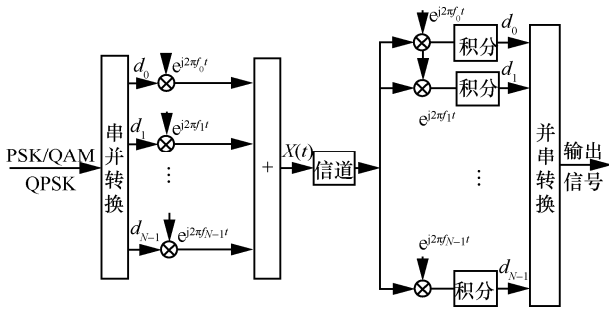


图 2 星地激光 OFDM 通信系统框架

2.2 M 分布上、下行链路信道模型

在大气湍流影响下,综合考虑上行链路光强闪烁和光束漂移的联合效应,采用 M 分布模拟大气湍流下接收光强概率分布模型, M 分布的概率密度函数为

$$f_{I_1}(I_1) = A \sum_{k=1}^{\beta} a_k I_1^{-1} \left(\frac{I_1}{\langle I \rangle} \right)^{\frac{\alpha+k}{2}} K_{\alpha-k} \left(2 \sqrt{\frac{\alpha \beta I_1}{\langle I \rangle (\eta \beta + \Omega')}} \right) \quad (1)$$

其中, I 表示辐照度强度, $\langle I \rangle$ 表示平均辐照度强度, I_1 表示上行链路的辐照度强度。

下行链路在光强闪烁的影响下 M 分布的概率密度函数为

$$f_{I_2}(I_2) = A \sum_{k=1}^{\beta} a_k I_2^{\frac{\alpha+k}{2}} K_{\alpha-k} \left(2 \sqrt{\frac{\alpha \beta I_2}{\eta \beta + \Omega'}} \right) \quad (2)$$

其中, $A = \frac{2\alpha^2}{\eta^{1+\frac{\alpha}{2}} \Gamma(\alpha)} \left(\frac{\eta \beta}{\eta \beta + \Omega'} \right)^{\beta+\frac{\alpha}{2}}$; $\alpha_k \triangleq \binom{\beta-1}{k-1}$.

$\frac{(\eta \beta + \Omega')^{-\frac{k}{2}} \left(\frac{\Omega'}{\eta} \right)^{k-1} \left(\frac{\alpha}{\beta} \right)^{\frac{k}{2}}}{(k-1)!}$; α 为散射过程中关于大尺度单元有效数量的正参数; β 为衰落参数的自然数; $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数; $\eta = 2b_0(1-\rho)$ 为经典散射分量 U_s^c 的平均功率, $\rho(0 \leq \rho \leq 1)$ 为与视距耦合的散射功率和所有散射分量功率的比值, $2b_0$ 为总散射分量的平均功率; $\Omega' = \Omega + \rho 2b_0 + 2\sqrt{2b_0 \Omega \rho} \cos(\varphi_A - \varphi_B)$ 为相干平均功率的贡献, Ω 为视距项的平均功率, φ_A 和 φ_B 分别为视距和耦合到视距散射项的确定相位; $K_\nu(\cdot)$ 为 ν 阶第二类 Bessel 修正函数。M 分布统一了从弱湍流到强湍流的所有通道条件,能够表征大多数现有的大气湍流模型。例如,当 $\rho=1, \Omega'=1$ 时, M 分布将转化为 Gamma-Gamma 分布;当 $\rho=0, \Omega=0$ 或者 $\beta=1$ 时, M 分布转化为 K 分布^[18-19]。

在星地激光通信系统中, α 和 β 在柯尔莫哥洛夫湍流下的表达式为^[20]

$$\alpha = \left[34.29 \left[\frac{AL}{kw_0^2} \right]^5 \left(\frac{\delta_{pc}}{w} \right)^2 + \exp \left(\frac{0.49 \delta_{Bu}^2}{(1+0.56(1+\Theta) \delta_{Bu}^5)^{12/7}} \right) - 1 \right]^{-1} \quad (3)$$

$$\beta = \left[\exp \left(\frac{0.51 \delta_{Bu}^2}{(1+0.69 \delta_{Bu}^3)^6} \right) - 1 \right]^{-1} \quad (4)$$

其中, L 为发射端和接收端的距离, $k = \frac{\lambda}{2\pi}$, λ 为波

长, $w = w_0 + \frac{\theta L}{2}$ 为接收端的光束半径。为了便于高斯光束的分析,引入两对参数:输入平面曲率参数 Θ_0 和输入平面菲涅尔比率 A_0 , 输出平面曲率参数 Θ 和输出平面菲涅尔比率 A 。两对参数的关系如下。

$$\Theta_0 = 1 - \frac{L}{F_0}, \quad A_0 = \frac{2L}{kw_0^2} \quad (5)$$

$$\Theta = \frac{\Theta_0}{\Theta_0^2 + A_0^2}, \quad A = \frac{A_0}{\Theta_0^2 + A_0^2} \quad (6)$$

其中, w_0 和 F_0 分别为发射端的光束半径和波前曲率半径, θ 为光束束散角。对于准直光束, $\Theta_0 = 1(F_0 = \infty)$ 。

光束漂移的指向误差方差为 δ_{pc} 。

$$\delta_{pc} = \sqrt{\gamma_c^2} \left[1 - \frac{\frac{\pi^2 w_0^2}{r_0^2}}{1 + \frac{\pi^2 w_0^2}{r_0^2}} \right] \quad (7)$$

光束漂移方差为^[21]

$$\gamma_c^2 = 0.54L^2 \left(\frac{\lambda}{2w_0} \right)^2 \left(\frac{2w_0}{r_0} \right)^3, H > 20 \text{ km} \quad (8)$$

柯尔莫哥洛夫湍流下的相干直径为 r_0 。

$$r_0 = \left[0.423k^2 \sec^2 \zeta \int_{h_0}^H C_n^2(h) dh \right]^{\frac{3}{5}} \quad (9)$$

Rytov 方差为 δ_{Bu}^2 。

$$\delta_{\text{Bu}}^2 = 8.70 \left\{ \text{Re} \int_{h_0}^H C_n^2(h) \left\{ \frac{5}{6} \left[A\xi + i(1 - \bar{\Theta}\xi) \right] \right\}^{\frac{5}{6}} \cdot \left\{ \xi - A^{\frac{5}{6}} \xi^{\frac{5}{3}} \right\} dh \right\} k^{\frac{7}{6}} (H - h_0)^{\frac{5}{6}} \sec^{\frac{11}{6}}(\zeta) \quad (10)$$

其中, $\xi = 1 - \frac{h-h_0}{H-h_0}$ 为系统链接参数, H 和 h_0 分别为卫星和地面发射器的高度, ζ 为天顶角的大小, $\bar{\Theta} = 1 - \Theta$, $C_n^2(h)$ 为大气折射率结构常数。

在星地激光通信链路中, 折射率结构常数随高度变化, 通常使用 Hufngel-Valley6/7 模型来描述^[22]。

$$C_n^2(h) = 0.00594 \left(\frac{v}{27} \right)^2 (10^{-5}h)^{10} \exp\left(-\frac{h}{1000}\right) + 2.7 \times 10^{-16} \exp\left(-\frac{h}{1500}\right) + C_n^2(0) \exp\left(-\frac{h}{100}\right) \quad (11)$$

根据大气湍流中激光传播的马尔可夫近似和几何光学近似, 可得到激光在大气中传输的到达角起伏服从瑞利分布, 其概率密度表达式为^[23]

$$f_\theta(\theta) = \frac{\theta}{\delta_\theta^2} \exp\left(-\frac{\theta^2}{2\delta_\theta^2}\right) \quad (12)$$

综上分析, 在星地激光通信上行链路中, 考虑光强闪烁、光束漂移、到达角起伏的影响, 推导出三者联合作用下 M 分布信道模型的概率密度函数的闭合表达式为

$$f_w(I_1) = A \sum_{i=1}^m w_i \sum_{k=1}^\beta a_k I_1^{-1} \left(\frac{I_1}{\langle I \rangle} \right)^{\frac{\alpha+k}{2}} \cdot G_{0,2}^{2,0} \left[\frac{\alpha\beta I_1}{\langle I \rangle (\eta\beta + \Omega')} \middle| \frac{\alpha-k}{2}, -\frac{\alpha-k}{2} \right] \quad (13)$$

同理, 在下行链路中, 考虑光强闪烁、到达角起伏的综合影响, 推导出 M 分布信道模型概率密度函数的表达式为

$$f_w(I_2) = A \sum_{i=1}^m w_i \sum_{k=1}^\beta a_k I_2^{\frac{\alpha+k}{2}-1}.$$

$$G_{0,2}^{2,0} \left[\frac{\alpha\beta I_2}{\eta\beta + \Omega'} \middle| \frac{\alpha-k}{2}, -\frac{\alpha-k}{2} \right] \quad (14)$$

2.3 星地激光通信链路相干 OFDM 理论分析

在星地激光通信系统中, 相干 OFDM 系统发射终端的子载波采用 64PSK 映射方式时, 系统误码率为^[24]

$$P_{B,\text{PSK}} = \text{erfc} \left(\sqrt{\frac{\gamma I}{N(M-1)}} \frac{3TB}{M} \sin \frac{\pi}{M} \right) \quad (15)$$

16QAM 作为相干 OFDM 系统发射终端子载波映射方式时, 系统误码率为

$$P_{B,\text{QAM}} = \phi Q \left(\sqrt{\gamma I^2 \frac{3TB}{N(M-1)}} \right) \quad (16)$$

其中, T 为 OFDM 的符号周期, B 为带宽, N 为子载波个数, M 为星座点映射系数。设置 $\phi = 1.5$, $Q(\sqrt{2}\alpha) = 0.5 \text{erfc}(\alpha)$, 星地激光通信系统误码率可以用积分的形式表示为

$$P_{\text{OFDM}} = \int_{-\infty}^{\infty} f_w(I) P_B(I) dI \quad (17)$$

利用 2 个经典的 Meijer G 函数表达式 $K_\nu(x) =$

$$\frac{1}{2} G_{0,2}^{2,0} \left[\frac{x^2}{4} \middle| \frac{\nu}{2}, -\frac{\nu}{2} \right] \text{ 和 } \text{erfc}(\sqrt{x}) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} G_{1,2}^{2,0} \left[x \middle| \frac{1}{0}, \frac{1}{2} \right],$$

将式(15)和式(16)代入式(17), 可得上、下行链路相干 OFDM 系统的平均误码率。

上行链路采用 PSK 映射方式的平均误码率的闭合表达式为

$$P_{\text{OFDM-PSK}} = A \sum_{i=1}^m w_i \sum_{k=1}^\beta a_k \frac{2}{\pi^2} \left(\frac{\alpha\beta}{\eta\beta + \Omega'} \right)^{-\frac{\alpha+k}{2}} \cdot G_{5,2}^{2,4} \left[\frac{3TB \left(\sin \left[\frac{\pi}{M} \right] \right)^2 \langle I \rangle^2 \bar{\gamma} (\eta\beta + \Omega')}{\alpha\beta} \middle| \frac{1-\alpha}{2}, 1-\frac{\alpha}{2}, \frac{1-k}{2}, 1-\frac{k}{2}, 1 \right] \quad (18)$$

当 OFDM 系统发射终端采用 QAM 映射方式时, 系统误码率的闭合表达式为

$$P_{\text{OFDM-QAM}} = 1.5A \sum_{i=1}^m w_i \sum_{k=1}^{\beta} a_k \frac{2^{\alpha+k-2}}{\pi^{\frac{3}{2}}} \left(\frac{\alpha\beta}{\eta\beta + \Omega'} \right)^{-\frac{\alpha+k}{2}} \cdot G_{5,2}^{2,4} \left[\frac{24TB < I >^2 \bar{\gamma}(\eta\beta + \Omega')^2}{\alpha^2 \beta^2 N(M-1)} \left| \frac{1-\alpha}{2}, 1-\frac{\alpha}{2}, \frac{1-k}{2}, 1-\frac{k}{2}, 1 \right. \right. \\ \left. \left. , 0, 0.5 \right] \quad (19)$$

同理, 下行链路中, OFDM 采用 PSK 映射方式时系统误码率表达式为

$$P_{\text{OFDM-PSK}} = A \sum_{i=1}^m w_i \sum_{k=1}^{\beta} a_k \frac{1}{\pi^{\frac{1}{2}}} \left(\frac{\alpha\beta}{\eta\beta + \Omega'} \right)^{-\frac{\alpha+k}{2}} \cdot G_{5,2}^{2,4} \left[\frac{3TB \left(\sin \left[\frac{\pi}{M} \right] \right)^2 \bar{\gamma}(\eta\beta + \Omega')}{\alpha\beta} \left| \frac{1-\alpha}{2}, 1-\frac{\alpha}{2}, \frac{1-k}{2}, 1-\frac{k}{2}, 1 \right. \right. \\ \left. \left. , 0, 0.5 \right] \quad (20)$$

下行链路 OFDM 采用 QAM 映射方式时, 系统误码率的闭合表达式为

$$P_{\text{OFDM-QAM}} = 1.5A \sum_{i=1}^m w_i \sum_{k=1}^{\beta} a_k \frac{2^{\alpha+k-3}}{\pi^{\frac{3}{2}}} \left(\frac{\alpha\beta}{\eta\beta + \Omega'} \right)^{-\frac{\alpha+k}{2}} \cdot G_{5,2}^{2,4} \left[\frac{24TB \bar{\gamma}(\eta\beta + \Omega')^2}{\alpha^2 \beta^2 N(M-1)} \left| \frac{1-\alpha}{2}, 1-\frac{\alpha}{2}, \frac{1-k}{2}, 1-\frac{k}{2}, 1 \right. \right. \\ \left. \left. , 0, 0.5 \right] \quad (21)$$

3 仿真结果与分析

星地激光通信系统中仿真参数的选取如表 1 所示, 弱、强湍流的大气折射率结构常数分别为 7.5×10^{-17} 、 1.7×10^{-13} 。

星地激光通信中特有的天顶角是可以改变大气湍流参数的一个重要物理量。星地激光通信 M 分布弱、强湍流相干 OFDM 和 DPSK 调制天顶角与误码率的关系如图 3 所示。从图 3 可以看出, 星地激光通信链路中, 最好的误码率性能出现在天顶角为 0° 时, 相干 OFDM 和 DPSK 这 2 种调制方式下,

系统性能随着天顶角的增加不断恶化。这表明大气湍流的影响在高天顶角时比低天顶角时更严重。为实现系统通信最低要求所需的误码率 10^{-5} , 上行链路中, 在弱湍流情况下, 相干 QPSK (quadrature phase shift keying) 调制所需要的最大天顶角为 60° ; 在强湍流条件下, 相干 QPSK 调制所需要的最大天顶角为 36° ; 弱、强湍流条件下, 当天顶角大于 0° 时, 相干 DPSK 的误码率均大于 10^{-5} 。因此, 在星地激光通信上行链路系统的参数设计中, 相干 QPSK 天顶角范围可设置为 $0^\circ \sim 36^\circ$, 相干 DPSK 不能满足大气湍流条件下成功传输的最低要求。下行链路中, 相较于相干 DPSK 调制, 相干 QPSK 调制所需的天顶角范围较大, 为 $0^\circ \sim 38^\circ$ (该范围是在下行链路强大气湍流下得到的)。在实际卫星终端传输过程中, 较大的天顶角增加了单颗卫星的覆盖面积, 有利于系统对天线角度的控制。考虑到性能优化以及系统的成本, 多载波相干 QPSK 调制是星地激光通信系统的较好选择。

表 1 星地激光通信系统仿真参数

系统参数	符号	取值
卫星地面站高度/km	H	3 600
发射机距地面高度/m	h_0	100
光波长/ μm	λ	1.55
传输半径/m	w_0	0.1
接收直径/m	D	0.2
LoS 和耦合到 LoS 散射项的确定相位差	$\varphi_a - \varphi_b$	$\frac{\pi}{2}$
天顶角	ζ	30°
OFDM 符号周期	T	10
带宽	B	26
子载波数	N	256

星地激光通信链路 M 分布弱、强湍流相干 OFDM 与 DPSK 调制接收孔径与误码率的关系如图 4 所示。从图 4 可以看出, 在星地激光通信系统中, 相干 OFDM 与相干 DPSK 这 2 种调制方式的误码率都随接收孔径的增大而降低, 这主要是因为孔径增大带来的入射光功率提高逐渐体现, 从而使误码率降低。相干 OFDM 的 3 种映射方式下, QPSK 映射效果最佳, 64PSK 效果最差。上行链路中弱湍流情况下, 当系统误码率为 10^{-5} 时, 相干 QPSK 调制所需的接收孔径为 0.6 m, 相干 DPSK 调制所需的接收孔径大于 2 m, 因此在通信性能相同的情况下,

多载波相干 QPSK 调制所需的接收孔径相对较小。下行链路情况与之相同。在星地激光通信系统中,较小的接收口径可以节省发射成本和星上功耗,减小光学畸变对通信和跟踪性能的影响,还可以有效避

免大口径接收带来的造价成本高、加工难度大等问题。因此,在星地激光通信系统中采用多载波相干 QPSK 调制技术性能较优。

图 5 给出了信噪比与误码率的关系。在星地激

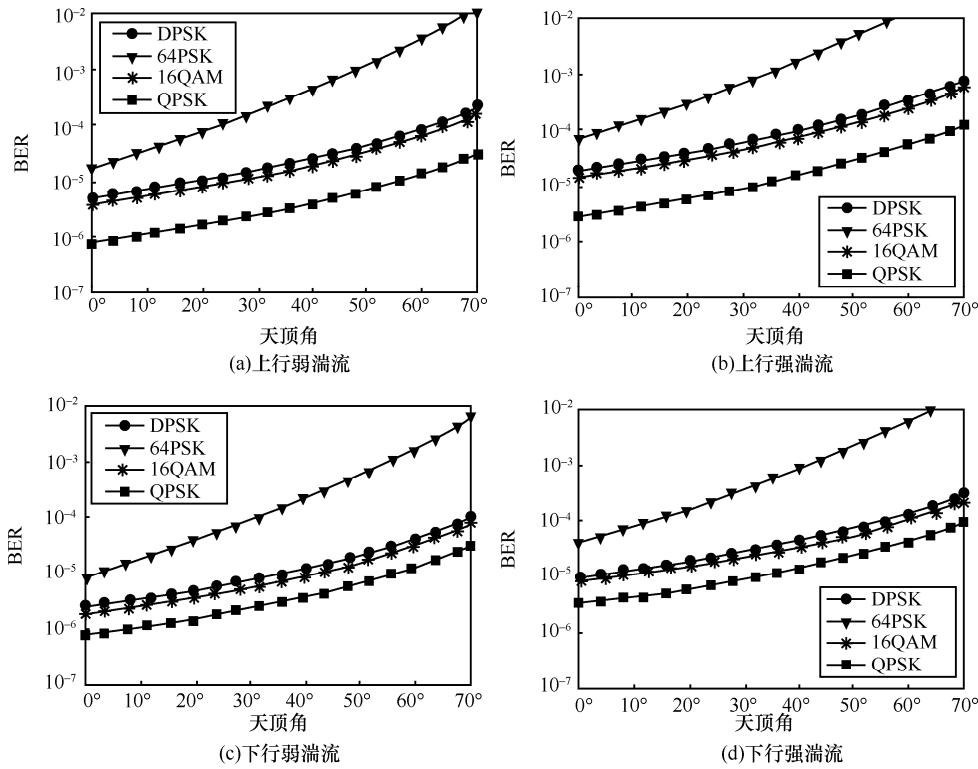


图 3 星地激光通信 M 分布弱、强湍流相干 OFDM 和 DPSK 调制天顶角与误码率的关系

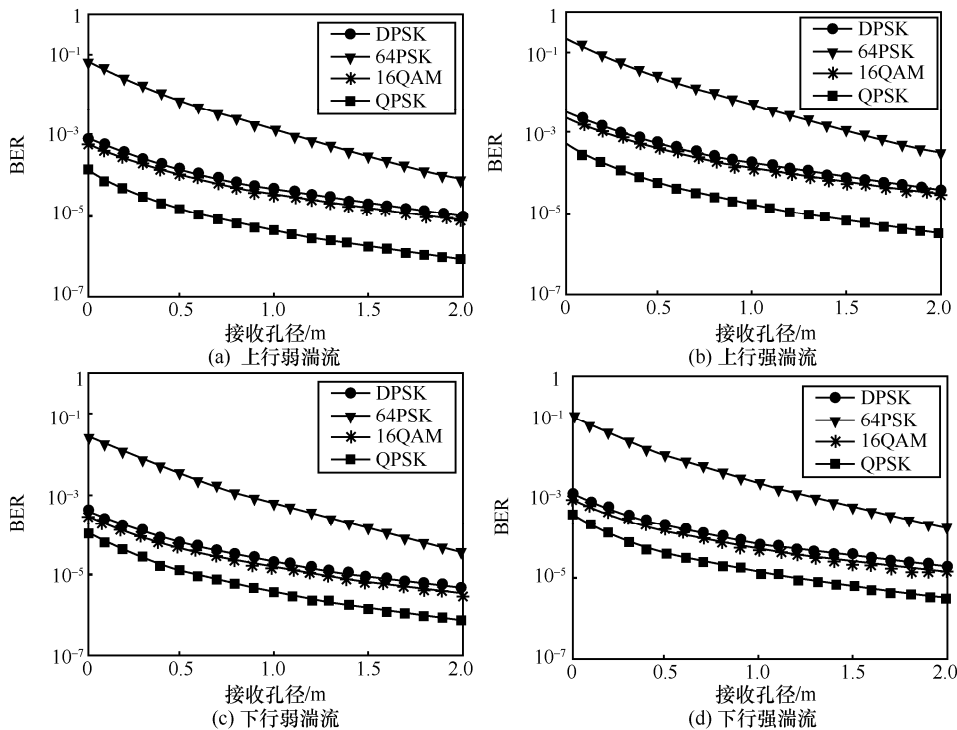


图 4 星地激光通信链路 M 分布弱、强湍流相干 OFDM 与 DPSK 调制接收孔径与误码率的关系

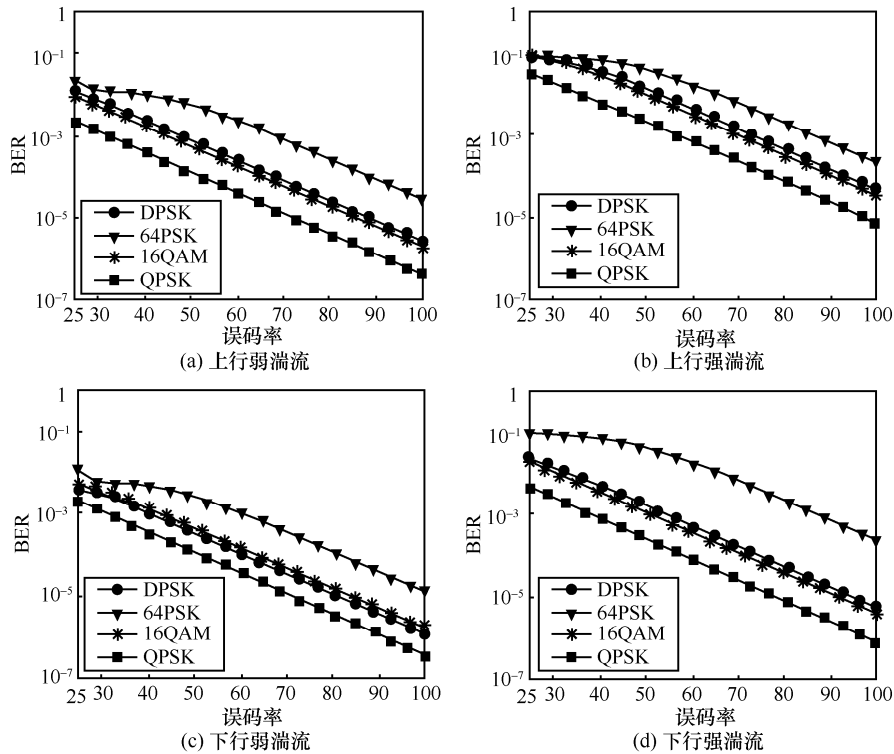


图 5 星地激光通信链路 M 分布弱、强湍流相干 OFDM 与 DPSK 调制信噪比与误码率的关系

光通信链路系统中,随着信噪比的增加,2种调制方式下系统的误码率均逐渐降低。当信噪比较小时,相干 64PSK 和 DPSK 这 2 种调制方式系统性能差别不大;随着信噪比的增大,相干 64PSK 调制系统的误码率性能迅速变差。信噪比相同时,相干 OFDM 调制与 DPSK 调制相比,映射采用 QPSK 时,弱、强大气湍流下相干 QPSK 系统的误码率最低;误码率相同时,相干 QPSK 调制系统的信噪比最小。在上行链路卫星运行的空间环境中,对功率较大的激光器进行温控会增加系统的设计难度和星上终端的复杂度;下行链路中,当误码率达到 10^{-5} 时,弱湍流条件下,相干 QPSK 与 DPSK 调制系统所需的信噪比分别为 68 dB 与 75 dB,前者比后者所需的信噪比少 7 dB。对于下行链路来说,信噪比越小,对地面站发射功率的要求越低,进而可以减少传输成本。因此,在星地激光通信链路系统中,多载波相干 QPSK 是一种较合理的方案,在不增加发射功率的前提下,能有效降低系统的误码率。

发射激光光束的束散角大小会引起接收光强的强弱不同,从而影响系统的误码率。星地激光通信链路 M 分布弱、强湍流相干 OFDM 与 DPSK 调制束散角与误码率的关系如图 6 所示。不同大气湍流影响下,相干 OFDM 与 DPSK 调制方式下的系

统误码率随着束散角的增大呈现出先减小而后增大的趋势。因此,2种调制方式都存在使误码率达到最小的最佳束散角。在上行链路中弱湍流情况下,当系统误码率达到最小时,相干 QPSK、DPSK 调制系统所需的束散角分别为 38×10^{-5} rad、 39×10^{-5} rad,前者的束散角更大。下行链路相干 QPSK 相比于相干 DPSK 调制系统,束散角也比较大。在星地激光通信系统中,束散角的压缩是比较困难的。因此,采用多载波相干 QPSK 调制方式,更易获得最佳束散角,从而使系统达到较好的性能,并且该调制技术对发射激光质量和接收终端灵敏度的要求也较低。

在星地激光通信链路系统中,相干 OFDM 与 DPSK 这 2 种调制方式下发射半径与误码率的关系如图 7 所示。2 种调制方式都具有使误码率达到最小的最佳发射半径。在相同大气湍流下,当系统达到最佳发射半径时,相干 16QAM 和 DPSK 的误码率性能差别较小,此时采用 2 种调制方式中的任何一种对系统的性能影响都不大。从图 7 可以看出,在上行链路中,相干 QPSK 与 DPSK 调制相比,其误码率性能差别较大。而在下行链路中,两者误码率曲线间隔较小,因此,相干 QPSK 调制在上行链路考虑光束漂移影响下体现出更优的性能。由图 7 可

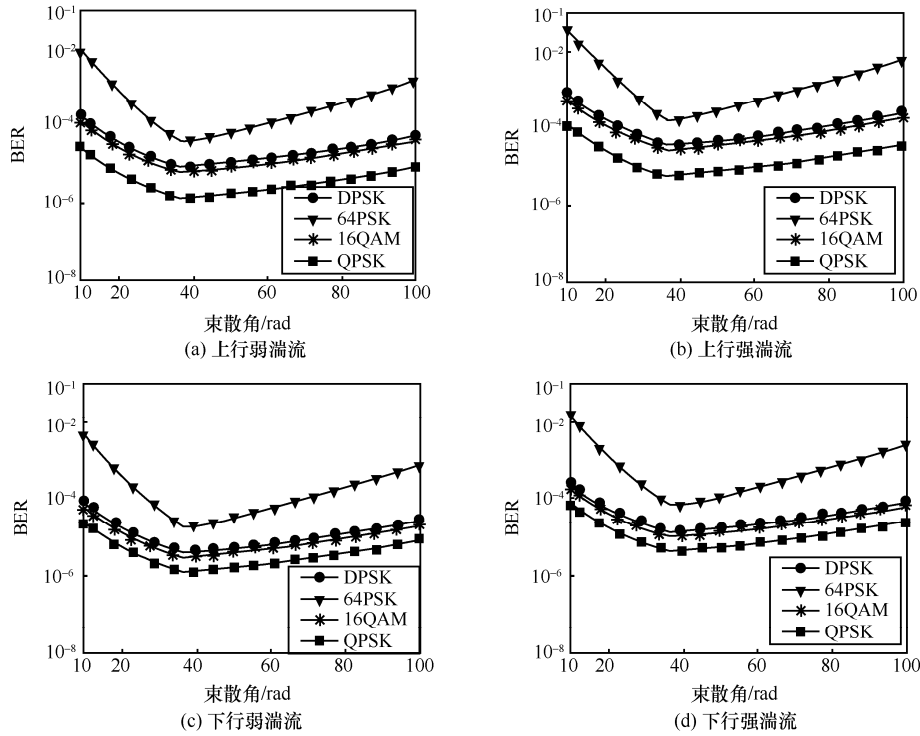


图 6 星地激光通信链路 M 分布弱、强湍流相干 OFDM 与 DPSK 调制束散角与误码率的关系

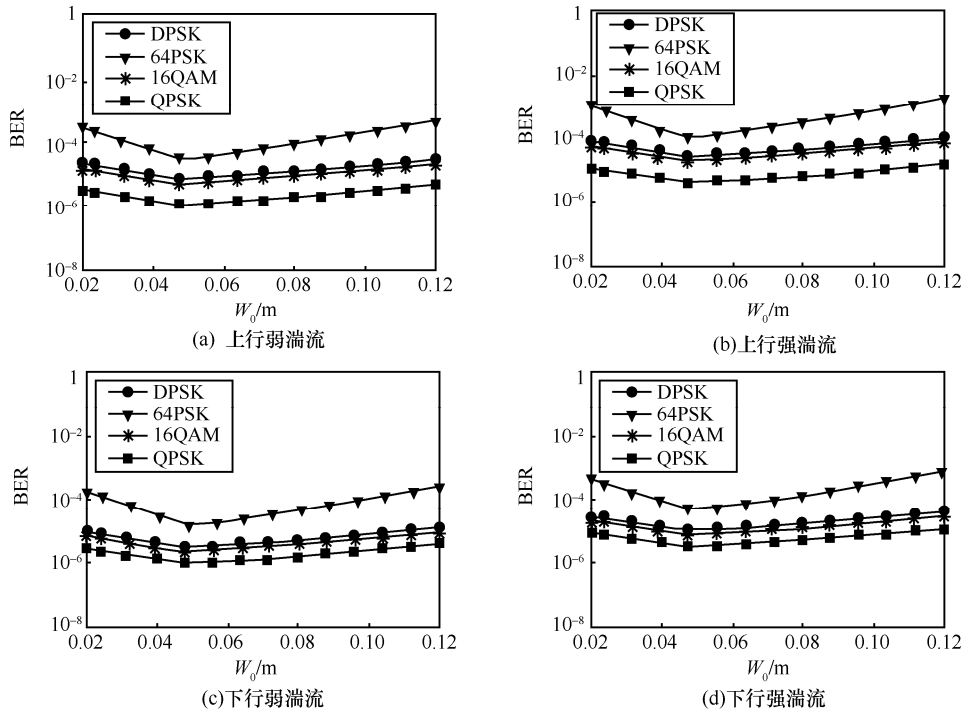


图 7 星地激光通信链路 M 分布弱、强湍流相干 OFDM 与 DPSK 调制发射半径与误码率的关系

知，相干 OFDM 采用 QPSK 映射的调制系统与相干 DPSK 调制系统相比，前者给出了最低的误码率以及最大的波束发射半径平坦范围。在实际应用中，发射光束半径可能不会在最佳值处一直保

持不变，发射半径范围越大，激光束就越容易控制系统。因此，在星地激光通信系统中，相干 OFDM 采用 QPSK 映射方式时系统可以维持一个相对小而稳定的误码率，从而使星地激光通信系

统保持较优的通信效果。

4 结束语

本文基于 M 分布信道模型, 针对星地激光通信上行和下行链路影响因素的不同采用多载波相干 OFDM 调制, 在弱和强大气湍流情况下, 分别推导了上行链路和下行链路误码率的闭合表达式, 通过仿真研究了星地激光通信系统误码率与天顶角、接收孔径、信噪比、束散角、发射半径的关系, 并与相干 DPSK 调制进行对比。仿真结果表明, 星地激光通信链路中, 多载波相干 QPSK 调制系统的性能优于相干 DPSK 调制系统。在实际星地激光通信中, 多载波相干 QPSK 被认为是一种合理方案, 在不增加接收机功率的前提下, 可有效降低系统的误码率。此外, 多载波相干 OFDM 调制子载波映射方式的选取也是对系统性能产生影响的因素之一。本文研究为星地激光通信系统工程应用参数的选择和设计提供了有效参考。

参考文献:

- [1] CAMBOULIVES A R, VELLUET M T, POULENARD S, et al. Statistical and temporal irradiance fluctuations modeling for a ground-to-geostationary satellite optical link[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(4): 709-721.
- [2] HENNIGER H, LUDWIG A, HORWATH J. Performance bounds of DPSK and OOK for low elevation optical LEO downlinks[J]. *Radio Engineering*, 2010, 19(4): 589-595.
- [3] LI J, LIU J Q, TAYLOR D P. Optical communication using subcarrier PSK intensity modulation through atmospheric turbulence channels[J]. *IEEE Transactions on Communication*, 2007, 55(8): 1598-1606.
- [4] ARIKAWA M, ITO T. Performance of mode diversity reception of a polarization-division-multiplexed signal for free-space optical communication under atmospheric turbulence[J]. *Optics Express*, 2018, 26(22): 28263-28276.
- [5] MA J, JIANG Y, TAN L, et al. Influence of beam wander on bit-error rate in a ground-to-satellite laser uplink communication system[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(22): 2611-2613.
- [6] WANG Y, ZHANG A, MA J. Effect of non-Kolmogorov turbulence on BER performance in uplink ground-to-satellite laser communication [J]. *Optics Communication*, 2016, 380: 134-139.
- [7] CUI L, XUE B, CAO X, et al. Angle of arrival fluctuations considering turbulence outer scale for optical waves' propagation through moderate-to-strong non-Kolmogorov turbulence[J]. *Journal of the Optical Society of America A-Optics Image Science and Vision*, 2014, 31(4): 829-835.
- [8] BELMONTE A, TAYLOR M T, HOLLBERG L. Effect of atmospheric anisoplanatism on earth-to-satellite time transfer over laser communication links[J]. *Optics Express*, 2017, 25(14): 15676-15686.
- [9] WEN W, CHU X, CAI Y. Dependence of the beam wander of an airy beam on its kurtosis parameter in a turbulent atmosphere[J]. *Optics & Laser Technology*. 2014, 68: 6-10.
- [10] 胡宗敏, 汤俊雄. 大气无线光通信系统中数字脉冲间隔调制研究[J]. *通信学报*, 2005, 26(3): 75-79.
- HU Z M, TANG J X. Digital pulse interval modulation for atmospheric optical wireless communication[J]. *Journal on Communications*, 2005, 26(3): 75-79.
- [11] JIANG Y, TAO K, SONG Y. Packet error rate analysis of OOK, DPIM, and PPM modulation schemes for ground-to-satellite laser uplink communications[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(7): 1268-1273.
- [12] DING J, LI M, TANG M. BER performance of MSK in ground-to-satellite uplink optical communication under the influence of atmospheric turbulence and detector noise [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(18): 3488-3491.
- [13] SANDALIDIS H G. Performance of a laser earth-to-satellite link over turbulence and beam wander using the modulated gamma-gamma irradiance distribution[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(6): 952-961.
- [14] LI K, LIN B, MA J. DPSK modulated multiple apertures receiver system for satellite-to-ground heterodyne optical communication[J]. *Optics Communications*, 2020, 454: 1-5.
- [15] WANG Y, WANG D, MA J. On the performance of coherent OFDM system in free-space optical communication[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(4): 1-10.
- [16] XU J, KONG M, LIN A, et al. OFDM-based broadband underwater wireless optical communication system using a compact blue LED[J]. *Optics Communications*, 2016, 369: 100-105.
- [17] DIMITROV S, SINANOVIC S, HAAS H. Clipping noise in OFDM-based optical wireless communication systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2012, 60(4): 1072-1081.
- [18] PRABU K, CHEEPALLI S, KUMAR D S. Analysis of PolSK based FSO system using wavelength and time diversity over strong atmospheric turbulence with pointing errors[J]. *Optics Communications*, 2014, 324: 318-323.
- [19] LI R, LUO Y, DANG A. Unified expression of ASEP over Malaga(M) turbulence channel[J]. *Optics Communications*, 2018, 423: 74-80.
- [20] ANDREWS L C, PHILLIPS R L, SASIELA R J, et al. PDF models for uplink to space in the presence of beam wander[C]//Conference on Atmospheric Propagation IV. Bellingham: SPIE Press, 2007: 1-12.
- [21] MA J, JIANG Y, YU S, et al. Packet error rate analysis of OOK, OPIM and PPM modulation schemes for ground-to-satellite optical communication[J]. *Optics Communication*, 2010, 283(2): 237-242.
- [22] ZILBERMAN A, GOLBRAIKH E, KOPEIKA N S. Propagation of electromagnetic waves in Kolmogorov and non-Kolmogorov atmospheric turbulence: three-layer altitude model[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(34): 6385-6391.
- [23] RODRIGUEZ-GOMEZ A, DIORS F, RUBIO J, et al. Temporal statistics of the beam-wander contribution to scintillation in ground-to-satellite optical links: an analytical approach[J]. *Applied Optics*, 2005, 44: 4574-4581.
- [24] NISTAZAKIS H E, STASSINAKIS A N, SANDALIDIS H G, et al. QAM and PSK OFDM RoFSO over M-turbulence induced fading channels[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(1): 1-11.

[作者简介]



王怡 (1980-), 女, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 中国计量大学教授, 主要研究方向为自由空间光通信、石油矿山光信息探测、海洋光信息感知等。

王亚萍 (1995-), 女, 河南商丘人, 中国计量大学硕士生, 主要研究方向为自由空间光通信、星地激光通信。