

引用本文:尹幸,姚海峰,刘智,等.基于指向误差与不同噪声的星地激光通信系统误码性能分析[J].光通信技术,2023,47(3):31-36.

基于指向误差与不同噪声的星地激光通信系统误码性能分析

尹幸¹,姚海峰^{2,3},刘智^{1,4*},常亦迪¹,董科研⁴,陶小可⁵

(1.长春理工大学 电子信息工程学院, 长春 130022; 2.北京理工大学 光电学院, 北京 100081; 3.中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033; 4.长春理工大学 空间光电技术国家地方联合工程研究中心, 长春 130022; 5.中国人民解放军 32215 部队)

摘要: 为了研究在大气湍流、指向误差以及各种噪声的共同影响下的星地激光通信系统平均误码率性能, 采用 Gamma-Gamma 信道模型, 建立了大气湍流与指向误差的组合衰减模型, 并结合各种噪声推导出关于组合衰减模型的星地激光通信系统平均误码率的闭合表达式。研究结果表明, 当卫星轨道高度为 400 km、天顶角为 45°、波长为 1 550 nm 以及等效波束半径和指向误差位移标准差(抖动)的归一化比值为 4 时, 总噪声、热噪声、背景噪声对应的平均误码率分别为 1.519×10^{-7} 、 6.907×10^{-8} 、 1.357×10^{-8} 。

关键词: 星地激光通信; 指向误差; 各种噪声; Gamma-Gamma 信道; 平均误码率; 相干光通信

中图分类号: TN929.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2023)03-0031-06

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.03.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Bit error performance analysis of satellite-ground laser communication system based on pointing error and different noise

YIN Xing¹, YAO Haifeng^{2,3}, LIU Zhi^{1,4*}, CHANG Yidi¹, DONG Keyan³, TAO Xiaoke⁴

(1. School of Electronic and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 3. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 4. NUERC of Space and Optoelectronics Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China; 5. PLA No.32215 Troop)

Abstract: In order to study the average bit error rate performance of satellite-ground laser communication system under the combined influence of atmospheric turbulence, pointing error and various noises. In this paper, a combined attenuation model of atmospheric turbulence and pointing error is established using the Gamma-Gamma channel model, and a closed expression for the average bit error rate of the satellite-ground laser communication system with respect to the combined attenuation model is derived by combining various noises. The research results show that when the satellite orbit altitude is 400 km, zenith angle is 45°, wavelength is 1550 nm and the normalized ratio of equivalent beam and the pointing error displacement standard deviation (jitter) is 4, the average bit error rates corresponding to total noise, thermal noise and background noise are 1.519×10^{-7} , 6.907×10^{-8} , 1.357×10^{-8} respectively.

Key words: satellite-earth laser communication, pointing error, all kinds of noise, Gamma-Gamma channel, average bit error rate, coherent optical communication

收稿日期:2022-08-17。

基金项目: 国家自然科学基金项目(批准号:U2141231)资助;国家自然科学基金项目(批准号:62105029)资助;博士后站前项目(批准号:2021TQ0035)资助;博士后面上项目(批准号:2021TM700415)资助;应用光学国家重点实验室开放基金项目(批准号:SKLA02022001A11)资助。

作者简介: 尹幸(1997—),女,四川广元人,硕士研究生,现就读于长春理工大学电子信息工程学院电子与通信工程专业。主要研究方向是空间激光通信研究,参与了课题“一对多激光通信组网的光链路误码性能分析其仿真验证”。

***通信作者:** 刘智(1971—),男,博士,教授,主要研究空间激光通信关键技术和武器光电动态性能测试。



0 引言

自由空间光(FSO)通信以激光作为通信载体,具有传输速率高、容量大、安全性好等优势,在未来一对多卫星空间组网中具有广阔的应用前景^[1-2]。但将 FSO 应用在星地激光通信系统时,由于通信距离远、大气湍流、光强闪烁以及各种噪声(如热噪声、背景噪声、量子噪声等)等原因,接收端光信号微弱且不稳定,通信质量受到严重影响^[3]。在大气湍流及指向误差对 FSO 通信系统性能影响的研究中,SANDALIDIS H G 等人^[4]采用差分相移键控(DPSK)研究了在大气湍流、

尹幸,姚海峰,刘智,等:基于指向误差与不同噪声的星地激光通信系统误码性能分析

错位衰落、路径损耗等衰落条件下的 FSO 通信系统性能,推导了传播信道衰减误比特率的闭合表达式,找到在给定信噪比(SNR)情况下实现最小误码率的最佳波束宽度。ANTONIO G Z 等人^[5]分析了在具有指向误差的大气湍流信道上,使用强度调制/直接检测(IM/DD)的 FSO 通信系统的渐近误码性能,推导出新的闭合渐近表达式。YANG F 等人^[6]在正态分布信道模型、Gamma-Gamma 分布信道模型下,分别推导了存在光束失准时的系统误码率(BER)及中断概率近似表达式。

近年来,不少科研人员研究了各种噪声对 FSO 通信系统的影响。例如,DING J C 等人^[7]研究并比较了探测器噪声、光束漂移和闪烁对地星光通信系统中最小频移键控(MSK)误码率性能的影响,获得了 BER 与各参数间的关系,得出相同的情况下 MSK 具有更好的误码率性能的结论。XU Z X 等人^[8]采用了 lognormal 和 Gamma-Gamma 信道模型来描述弱到强条件下的湍流,研究了 FSO 通信系统在背景噪声、热噪声和量子噪声影响下的平均误码率和平均信道容量,发现热噪声对 FSO 通信系统具有主导影响。SILVA P E G 等人^[9]研究了不同衰落信道下多进制相移键控(MPSK)调制的平均符号错误率受相位噪声的影响情况。

但以上研究缺少大气湍流、指向误差以及各种噪声共同影响下 FSO 应用在星地激光通信系统的性能分析。针对这一问题,本文结合这 3 个影响因素研究星地激光通信系统的平均误码率(ABER)性能。

1 系统通信模型

1.1 Gamma-Gamma 信道模型

本文采用 Gamma-Gamma 信道模型,该信道衰落 h_a 的概率密度函数(PDF)可以表示为

$$f_{h_a}(h_a) = \frac{2(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} h_a^{(\alpha+\beta/2)-1} \times K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta}h_a), h_a > 0 \quad (1)$$

其中, $\Gamma(\cdot)$ 是第二类阶 Gamma 函数, $K_{\alpha-\beta}(\cdot)$ 是贝塞尔函数^[10]。 α 和 β 是小尺度和大尺度下的有效湍流数^[11], 可以分别表示为

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

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

其中, σ_r^2 为光传输链路的 Rytov 方差即闪烁指数,星地激光通信系统的 σ_r^2 可表示为

$$\sigma_r^2 = 2.25k^{7/6} \sec^{11/6} \zeta \int_{h_0}^H C_n^2(h) (h-h_0)^{5/6} dh \quad (4)$$

其中, ζ 为星地激光通信系统的天顶角; $k=2\pi/\lambda$ 为信号光的波数, λ 为光波长^[12]; h 是卫星高度; h_0 为地面站接收系统的海拔高度; H 为卫星的轨道高度, $H=h_0+L\cos\zeta$, L 为传输距离; $C_n^2(h)$ 为大气折射率结构常数,在 FSO 的应用中, Hufnagel-Valley 模型是应用最广泛的随高度变化大气折射率结构常数模型,可表示为

$$C_n^2(h) = 0.00594 \left(\frac{\omega}{27} \right)^2 (10^{-5}h)^{10} \exp \left(-\frac{h}{1000} \right) + 2.7 \times 10^{-16} \exp \left(-\frac{h}{1500} \right) + B_0 \exp \left(-\frac{h}{100} \right) \quad (5)$$

其中, ω 为垂直于传输路径的风速, B_0 为发射端海拔为 0 时的折射率结构常数^[15], 单位为 $m^{-2/3}$ 。

1.2 指向误差

指向误差 h_p 的 PDF^[4,13] 可以表示为

$$f_{h_p}(h_p) = \frac{\varepsilon^2}{A_0} h_p^{\varepsilon^2-1}, 0 \leq h_p \leq A_0 \quad (6)$$

其中, $A_0 = [\text{erf}(v)]^2$, $\text{erf}(\cdot)$ 是误差函数; ε 是接收器处的等效波束半径 ω_{Leq} 与接收器处的指向误差位移标准差(抖动) σ_s 的归一化比值, $\varepsilon^2 = \omega_{Leq}^2 / 4\sigma_s^2$, $\omega_{Leq} = \omega_L$

$$\frac{\sqrt{\pi} \text{erf}(v)}{2\sqrt{\pi} \exp(-v^2)}, v = \frac{\sqrt{\pi} D_u}{2\sqrt{2} \omega_L}, D_u \text{ 为接收光学天线孔径, } \omega_L$$

为大气湍流中 L 处的高斯光束束腰半径,可表示为

$$\omega_L \approx \omega_0 \sqrt{1 + \varepsilon_0 \left[\lambda L / (\pi \omega_0^2) \right]^2} \quad (7)$$

其中, ω_0 为 $L=0$ 处的光束束腰, $\varepsilon_0 = (1 + 2\omega_0^2/\rho_c^2)$, ρ_c 为大气相干长度^[13]。对于星地链路激光系统, ρ_c 可表示为

$$\rho_c = \left[1.46k^2 \frac{1}{\cos\zeta} \int_{h_0}^H C_n^2(h) dh \right]^{-3/5} \quad (8)$$

1.3 组合衰减模型

文献[4]的研究结果表明,传播信号会受到大气湍流诱导衰落、失准衰落(指向误差)和路径损耗的综合影响,综合影响下传播信道随机衰减统计的新闭合表达式,即组合衰减模型 $f(I_s)$ 可以表示为

$$f(I_s) = \frac{\alpha\beta\varepsilon^2}{A_0 h \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} \times$$

$$G_{1,3}^{3,0} \left[\frac{\alpha\beta}{A_0 h_1} I_s \left| \begin{matrix} \varepsilon^2 \\ \varepsilon^2 - 1, \alpha - 1, \beta - 1 \end{matrix} \right. \right] \quad (9)$$

其中, I_s 是衰减系数, $G[\cdot]$ 是 Meijer-G 函数, h_1 是路径损耗。

1.4 接收系统模型

接收到的信号由光电探测器转换为电信号,并使用相应的解调模型进行解调。解调后的信号 y 可以表示为

$$y = IRA\xi m(t) + n(t) \quad (10)$$

其中, R 是光电探测器的响应度, I 是光强度的半峰值, ξ 是调制指数, A 是子载波的振幅, $m(t)$ 是电信号; $n(t)$ 为加性高斯白噪声,服从 $N(0, \sigma_N^2)$ 分布, σ_N^2 是噪声方差^[16]。

为了全面分析不同类型噪声对通信系统的影响,本文考虑了背景噪声、热噪声和量子噪声,总噪声表示为

$$\sigma^2 = \sigma_{bg}^2 + \sigma_{Te}^2 + \sigma_{Qu}^2 \quad (11)$$

其中,背景噪声 $\sigma_{bg}^2 = \frac{2qI_{bg}R_b}{RI_0^2}$, 热噪声 $\sigma_{Te}^2 = \frac{4k_1 T_e R_b}{RR_L I_0^2}$,

量子噪声 $\sigma_{Qu}^2 = \frac{2qR_b}{RI_0^2}$, q 是基本电荷, I_{bg} 是背景辐照度,

R_b 是符号率, I_0 是平均接收光强, k_1 是波尔兹曼常数, T_e 是温度, R_L 是接收器电路的负载电阻。基于信号强

度和噪声, SNR 可以表示为 $S_{nr} = \frac{(IRA\xi)^2 P_m}{\sigma^2}$, 其中 P_m

是副载波信号功率。

2 系统误码率理论分析

组合衰减模型下星地激光通信系统的 ABER 闭合表达式可以表示为

$$P_e = \int_0^\infty P_{ber}(I_s) f(I_s) dI \quad (12)$$

其中, P_{ber} 是具有二进制相移键控(BPSK)调制和相干检测的星地激光通信系统的 BER, 其表达式^[8]为

$$P_{ber} = \int_0^\infty \frac{1}{\sqrt{\pi} \sigma} \exp \left[-\frac{(i_d + 0.5IRA\xi)^2}{\sigma^2} \right] di_d = Q \left(\frac{RIA\xi}{\sqrt{2}\sigma} \right) \quad (13)$$

其中, $Q(\cdot)$ 是 Q 函数^[8], $Q(x) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} G_{1,2}^{2,0} \left[\frac{x^2}{2} \left| \begin{matrix} 1 \\ 0, 1/2 \end{matrix} \right. \right]$,

i_d 是基带信号。

本文进一步研究了星地激光通信系统在组合衰减模型下的 ABER, 通过在式(12)中插入式(8)和式(13), ABER 可以写为

$$P_e = \int_0^\infty Q \left(\frac{RAI}{\sqrt{2}\sigma} \right) \frac{\alpha\beta\varepsilon^2}{A_0 h_1 \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} \times G_{1,3}^{3,0} \left[\frac{\alpha\beta}{A_0 h_1} I \left| \begin{matrix} \varepsilon^2 \\ \varepsilon^2 - 1, \alpha - 1, \beta - 1 \end{matrix} \right. \right] dI \quad (14)$$

归一化 SNR 表示为 $\gamma = \frac{R^2 A^2}{\sigma^2}$, 则式(14)表示为

$$P_e = \int_0^\infty \frac{\alpha\beta\varepsilon^2}{2\sqrt{\pi} A_0 h_1 \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} \times G_{1,2}^{2,0} \left[\frac{\gamma I^2}{4} \left| \begin{matrix} 1 \\ 0, \frac{1}{2} \end{matrix} \right. \right] \times G_{1,3}^{3,0} \left[\frac{\alpha\beta}{A_0 h_1} I \left| \begin{matrix} \varepsilon^2 \\ \varepsilon^2 - 1, \alpha - 1, \beta - 1 \end{matrix} \right. \right] dI \quad (15)$$

按照文献[14]中的 Meijer-G 计算规则, 式(15)可以进一步表示为

$$P_e = \frac{2^{\alpha+\beta-4} \varepsilon^2}{\pi^{3/2} \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} \times G_{7,4}^{2,6} \left[\frac{\gamma}{2^5} \left(\frac{A_0 h_1}{\alpha\beta} \right)^2 \left| \begin{matrix} \frac{1-\varepsilon^2}{2}, \frac{2-\varepsilon^2}{2}, \\ 0, \frac{1}{2}, \frac{\varepsilon^2}{2}, \\ \frac{1-\alpha}{2}, \frac{2-\alpha}{2}, \frac{1-\beta}{2}, \frac{2-\beta}{2}, 1 \\ \frac{1-\varepsilon^2}{2} \end{matrix} \right. \right] \quad (16)$$

3 数值结果与讨论

根据上文推导的星地下行链路激光通信系统 ABER 闭合表达式, 本文采用 Matlab 仿真平台仿真分析了星地激光通信系统性能的影响因素, 仿真参数设置如表 1 所示。

大气湍流是设计水平路径传输与星地卫星传输光通信信道的主要障碍, 因为大气湍流中大气折射率常数会根据卫星轨道高度 H 的变化而变化, 因此本文用卫星轨道高度 H 的变化表征大气湍流变化, 研究了卫星轨道高度 H 以及归一化 SNR 共同影响下的 ABER 变化, 仿真结果如图 1 所示。可以看出, 当归一化 SNR 一定时, ABER 随 H 的增加而增加; 当 H 不变时, 随着归一化 SNR 的增大, ABER 随之降低。例如: 当 $H=500$ km, 归一化 SNR 从 20 增大到 40 时, ABER

尹幸,姚海峰,刘智,等:基于指向误差与不同噪声的星地激光通信系统误码性能分析

表 1 星地链路中模拟参数值

参数	值	参数	值
激光波长/nm	1 550	接收电路 负载电阻/ Ω	50
卫星轨道高度/km	400	温度/K	400
天顶角/ $^{\circ}$	45	元电荷/C	1.602×10^{-19}
折射率 结构常数/ m^{-23}	1.7×10^{-14}	波尔兹曼 常数/(J/K)	1.38×10^{-23}
风速/(m/s)	21	符号率/(b/s)	1.55×10^8
地面站高度/km	0	带宽/(b/s)	10^{-3}
发射端孔径/cm	20	背景辐射 辐照度/A	$\frac{4}{\pi} \times 0.6^2 \times 10^{-6} + 5.5 \times 10^{-5}$
光电检测器响应度	1		

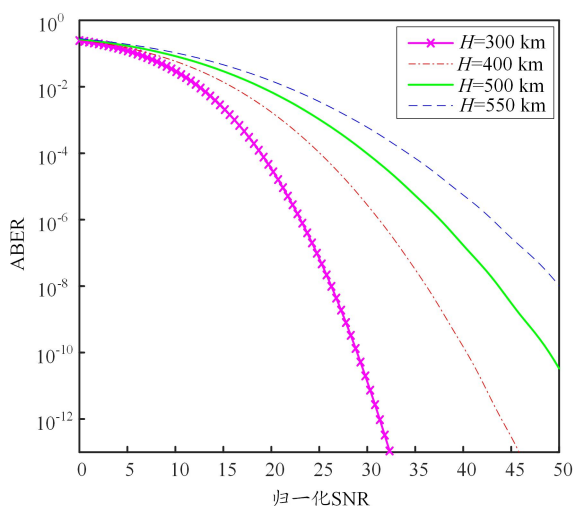


图 1 不同卫星轨道高度情况下,归一化 SNR 对 ABER 的影响

从 6.926×10^{-3} 降低至 1.708×10^{-7} ; 当 $H=400$ km, 归一化 SNR 从 20 增大到 40 时, ABER 从 1.729×10^{-3} 降低至 1.494×10^{-9} 。

其它仿真参数设置不变, 改变天顶角 ζ 和激光波长 λ 的取值, 研究天顶角 ζ 和激光波长 λ 对 ABER 影响, 结果如图 2 所示。可以看出, 随着 ζ 的增大, ABER 变大。这是因为 ζ 增大后, 光束在大气信道中传输的距离会随之增大, 则进入接收天线孔径的光信号功率变小, 链路对应的大气湍流增强, 指向误差引起的接收信号幅度抖动越发明显, 从而影响星地激光通信性能。当 $0^{\circ} \leq \zeta \leq 40^{\circ}$ 时, 随着 ζ 的增大, $\lambda=1\ 500$ nm、 $\lambda=1\ 550$ nm 的系统 ABER 增大趋势缓慢; 当 $\zeta > 50^{\circ}$ 时, 随着 ζ 的继续增大, ABER 增大明显, 这与参考文献[17]

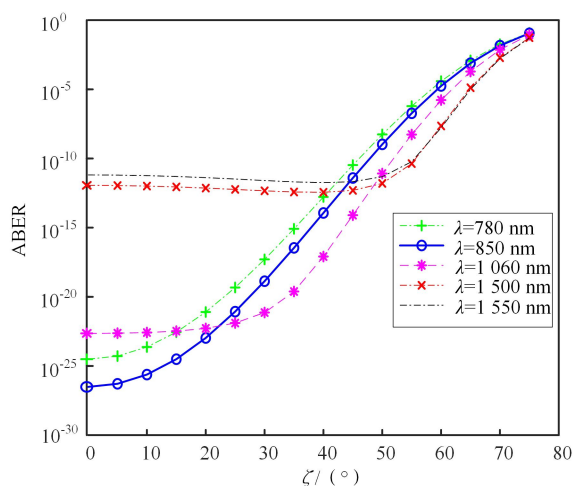


图 2 天顶角 ζ 和激光波长 λ 对 ABER 的影响

中所得结果一致。同时, 波长对 ABER 的影响也随着 ζ 的增大而发生改变。在 $\zeta < 25^{\circ}$ 时, λ 越小 ABER 越小, 例如: 当 $\zeta=30^{\circ}$ 时, 780、850、1 550 nm 波长对应的 ABER 分别为 1.572×10^{-17} 、 1.176×10^{-19} 、 2.100×10^{-11} ; 当 $\zeta=45^{\circ}$ 时, 780、850、1 550 nm 波长对应的 ABER 分别为 2.137×10^{-11} 、 6.588×10^{-12} 、 2.043×10^{-11} ; 当 $\zeta > 65^{\circ}$ 时则反之, 波长越大 ABER 越小; 当 $\zeta=75^{\circ}$ 时, 780、850、1 550 nm 波长对应的 ABER 分别为 1.24×10^{-2} 、 1.110×10^{-2} 、 8.114×10^{-5} 。

仿真参数设置不变, 研究归一化比值 ε 和接收天线孔径 D_u 对 ABER 的影响, 结果如图 3 所示。可以看出, 在 D_u 不变的情况下, 随着 ε 增大, ABER 相应减小, 而当 $\varepsilon > 4$ 后, ABER 变化趋势逐渐不受影响; 当 $D_u=40$ cm 时, ε 从 2.5 增大到 4.5, 对应的 ABER 从 6.616×10^{-7} 降低到 6.119×10^{-9} 。另外, ABER 会随着 D_u 增大而

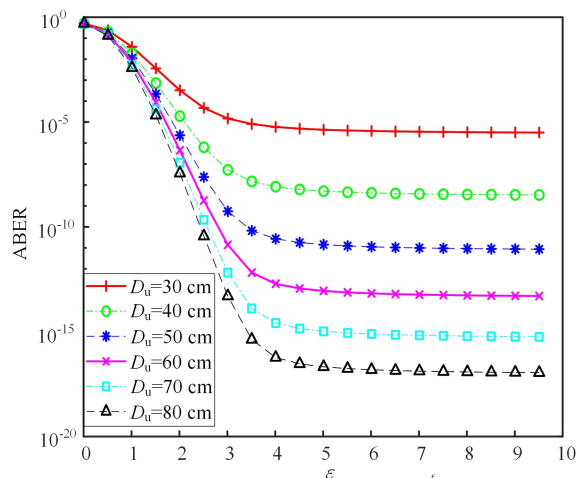


图 3 归一化比值 ε 和接收天线孔径 D_u 对 ABER 的影响

减小,但 D_u 越大,接收天线增益越大,而 D_u 的大小应兼顾系统实现成本,满足系统功率预算,特别是卫星端接收孔径一般要更小。遵循卫星端体积能耗尽量小的原则, D_u 大小的选取可以在 40~50 cm 之间,当 $\varepsilon=4$ 时, $D_u=50$ cm 对应的 ABER 最小为 2.743×10^{-11} 。

设 $D_u=45$ cm, $\varepsilon=4$,结合各种噪声的表达式,研究不同类型噪声下平均光强 I_0 对 ABER 的影响,结果如图 4 所示。可以看出,ABER 随着 I_0 的增大而增大;对总噪声而言,热噪声占比最大,其次是背景噪声,量子噪声占比最小,噪声占比约大,对应的 ABER 越大。例如:当 $I_0=-30$ dBm 时,总噪声对应的 ABER 为 1.519×10^{-7} ,热噪声对应的 ABER 为 6.907×10^{-8} ,背景噪声对应 ABER 为 1.357×10^{-8} ,量子噪声太小可以忽略不计。参考文献[9]也得到了类似结果,进一步证明了本文理论推导的正确性。

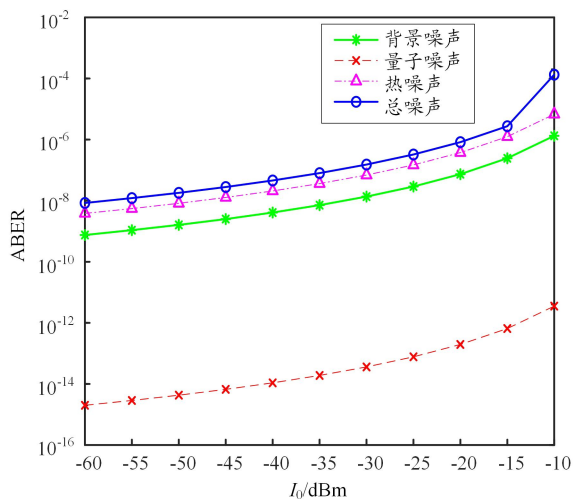


图 4 不同类型噪声下平均光强 I_0 对 ABER 的影响

仿真参数设置不变,仿真研究不同符号率 R_b 情况下平均光强 I_0 对 ABER 的影响,结果如图 5 所示。可以看出,在 R_b 不变的情况下,随着 I_0 的增大,ABER 也随着增大,例如: $R_b=10$ Gb/s,当 I_0 从 -35 dBm 增大到 -25 dBm 时,ABER 从 2.144×10^{-11} 增大至 1.095×10^{-10} 。另外, R_b 与 ABER 的变化成非线性正比关系,例如: $I_0=-25$ dBm, R_b 分别为 0.115、10、50、110 Gb/s 时对应的 ABER 依次为 2.183×10^{-15} 、 1.053×10^{-10} 、 5.418×10^{-9} 、 2.906×10^{-8} 。虽然 R_b 越大 ABER 越大,但是随着航天事业的不断发展,未来低轨星地激光通信系统必定会朝着大容量和高速率的方向发展,因此,今后如何满足低轨星地光通信系统高速率的发展需求仍是待解决的难题之一。

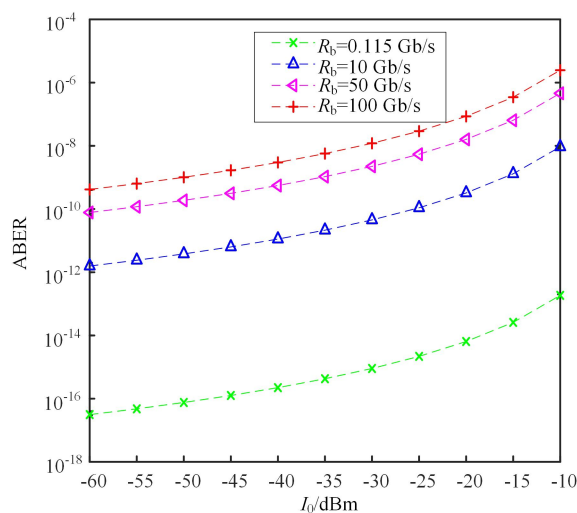


图 5 不同符号率 R_b 情况下平均光强 I_0 对 ABER 的影响

4 结束语

本文研究了大气湍流、指向误差以及各种噪声对星地激光通信系统误码性能的影响,采用 Gamma-Gamma 通信信道模型建立了大气湍流与指向误差影响下的星地激光通信系统信道组合衰减模型,并结合各种噪声的影响,推导出星地激光通信系统 ABER 的闭合表达式。研究发现,卫星轨道高度、波长、等效波束与指向误差位移(抖动)的归一化比值、接收孔径以及平均光强等都对星地激光通信系统的 ABER 有一定影响;随着卫星轨道高度增加,ABER 也随之增大;为了接收到高质量星地激光通信链路的通信信号,链路天顶角在 0~50°内最佳,接收孔径可在 50~60 cm 间选择;与其它类型的噪声相比,热噪声对总噪声的影响更明显;理论上存在一个最优的符号率使系统 ABER 最小。综上所述,通过调整参数可以抑制噪声或改善湍流,同时选择适当的接收孔径,星地激光通信系统的误码性能将表现更好。

参考文献:

- [1] 姜会林,安岩,张雅琳,等. 空间激光通信现状、发展趋势及关键技术分析[J]. 飞行器测控学报,2015,34(3):207-217.
- [2] CHOWDHURY M Z, HASAN M K, SHAHJALAL M, et al. Optical wireless hybrid networks: trends, opportunities, challenges, and research directions [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2020, 22 (2): 930-966.
- [3] 张晓玉,崔晨,刘德明,等. 星地下行链路中多孔径相干光接收机性能分析[J]. 激光与光电子学进展,2019,56(21):9-16.
- [4] SANDALIDIS H G, TSIFTIS T A, KARAGIANNIDIS G K. Optical

尹幸,姚海峰,刘智,等:基于指向误差与不同噪声的星地激光通信系统误码性能分析

wireless communications with heterodyne detection over turbulence channels with pointing errors [J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(20): 4440–4445.

[5] ANTONIO G Z, BEATRIZ C V, CARMEN C V. Asymptotic error-rate analysis of FSO links using transmit laser selection over gamma-gamma atmospheric turbulence channels with pointing errors [J]. Optics express, 2012, 20(3): 2096–2109.

[6] YANG F, CHENG J L, TSIFTIS T A. Free-space optical communication with nonzero boresight pointing errors[J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62(2): 713–725.

[7] DING J C, LI M, TANG M H, et al. 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.

[8] XU Z X, XU G J, ZHENG Z Q. BER and channel capacity performance of an FSO communication system over atmospheric turbulence with different types of noise[J]. Sensors, 2021, 21(10): 3454.

[9] SILVA P E G, SOUZA R A A D, COSTA D B D, et al. Error probability of m-phase signaling with phase noise over fading channels [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(99): 6766 – 6770.

[10] 吴晗玲,李新阳,严海星. Gamma-Gamma 湍流信道中大气光通信系

统误码特性分析[J]. 光学学报, 2008, 28(s2): 99–105.

[11] ANDREWS L C, PHILLIPS R L. Laser beam propagation through random media, second edition[M]. Orlando: Scopus Export 2000S, 2005.

[12] MA J, LI K N, TAN L Y, et al. Performance analysis of satellite-to-ground downlink coherent optical communications with spatial diversity over Gamma – Gamma atmospheric turbulence[J]. Applied Optics, 2015, 54(25): 7575–7585.

[13] ANDREWS L C, PHILLIPS R L, WAYNE D, et al. Near-ground vertical profile of refractive-index fluctuations [C]//SPIE. Atmospheric Propagation VI, Orlando: SPIE, 2009: 11–22.

[14] ADAMCHIK V S, MARICHEV O I. The algorithm for calculating integrals of hypergeometric type functions and its realization in REDUCE system [C]// IEEE. Proceedings of 2016 IEEE International Symposium on Information Theory, Barcelona: IEEE, 2016: 220–224.

[15] 李康宁. 空间光通信多孔径接收系统性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017: 63–88.

[16] LI J, LIU J Q, TAYLOR D P. Optical communication using subcarrier PSK intensity modulation through atmospheric turbulence channels [J]. IEEE Transactions on Communications, 2007, 55(8): 1598–1606.

[17] 孙晶,黄普明,么周石. 大气湍流与平台微振动影响下的星地激光通信性能[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(3): 108–113.