光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023071902

带有前置EDFA卫星相干激光通信终端的信噪比分析

宋春奇*，杨　静，李文亮，吉　彬，吕晓萌，崔　岩，陈云鹏，李　涛
（中国电子科技集团公司第二十九研究所，成都 610036）

摘　要： 卫星激光通信链路是一项实现卫星大规模星座组网的关键技术。相干激光链路灵敏度高、抗背景干扰、速率升级空间大，在星间激光链路中应用广泛。文章建立了带有前置掺铒光纤放大器（EDFA）的卫星相干激光通信终端的信噪比分析模型，仿真分析了EDFA功率增益、EDFA噪声系数、本振光功率、信号光功率、光放后端光带宽、基带前端电带宽对终端输出信噪比的影响以及各种输出噪声功率占比的情况，得到了带有前置EDFA卫星相干激光通信终端的信噪比参数特性。

关键词： 卫星激光通信；相干激光通信；光纤放大器；信噪比；误码率
中图分类号： TN929.11　**文章编号：** 1001－5868(2023)05－0723－06

Analysis of Signal-to-Noise-Ratio of Satellite Coherent Laser Communication Terminal with Front EDFA

SONG Chunqi, YANG Jing, LI Wenliang, JI Bin, Lü Xiaomeng, CUI Yan, CHEN Yunpeng, LI Tao
(The 29th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chengdu 610036, CHN)

Abstract: Satellite laser communication link is a key technology for achieving large-scale constellation networking of satellites. Coherent laser link has high sensitivity, resistance to background interference, and large space for rate upgrade, making it widely used in inter-satellite laser link. In this paper, a signal-to-noise-ratio (SNR) analysis model was established for satellite coherent laser communication terminal with front EDFA. The effects of EDFA power gain, EDFA noise figure, local optical power, signal optical power, optical bandwidth, and electrical bandwidth on the terminal output SNR and the power ratio of various output noise were analyzed by simulation. The SNR characteristics of satellite coherent laser communication terminal with front EDFA were obtained.

Key words: satellite laser communication; coherent laser communication; optical fiber amplifier; signal to noise ratio; bit error rate

0　引言

卫星网络不受地域地形限制实现覆盖全球的通信网络，是各方战略必争的网络信息领域。卫星星间通信链路是实现卫星网络组网的关键基础[1]。卫星星间激光通信链路与卫星星间微波通信链路相比，具有通信终端体积小、重量轻、功耗低、通信速率高、抗干扰性强、波束方向性好、频率资源丰富等优势，适合作为卫星有效载荷，能够满足未来航天网络通信需求，是实现卫星大规模星座组网的首选方案，具有广阔的应用前景[2]。国外以美国、德国、日本等为代表对卫星激光通信系统各项关键技术进行了深入全面攻关，研制出了多种卫星激光通信终端，并进行了大量在轨验证试验，技术已经基本成熟，正在开展卫星激光通信网络工程建设工作。国内卫星激光通信研制发展相对国外先进梯队稍有滞后，但也已

收稿日期：2023－07－19.
*通信作者：宋春奇　E-mail：455596098@qq.com

经开展了部分试验型号的在轨验证工作，并已部署规划卫星激光通信星座网络建设[3-7]。

目前卫星激光通信终端研制路线可以根据调制探测方式分为非相干体制和相干体制。非相干体制终端调制解调系统实现简单、光源要求低、利于轻量化和低成本，但非相干体制灵敏度低、易受背景光影响，仅适用于链路距离较近的低轨星座。相干体制终端调制解调系统实现复杂、需要窄线宽高稳定激光器等高性能器件、信号处理补偿算法复杂，但相干体制终端具有高灵敏度性能、抗背景光干扰、速率升级空间大、有利于高速远距离星间链路，适用于高、中、低轨星座的高速激光通信，是未来实现空天全面组网必需路线。因此，对相干体制激光通信终端涉及的各项技术进行全面深入研究具有重要意义[8]。

本文针对卫星相干激光通信终端设计中的终端输出信噪比性能进行研究。终端输出信噪比直接影响系统的通信灵敏度和通信误码率，是决定系统通信性能优劣的关键。本文基于星间激光相干收发链路基本结构以及星间工况，建立了带有前置掺铒光纤放大器(EDFA)卫星相干激光通信终端的信噪比分析模型，进行了终端的信噪比仿真分析，详细分析了 EDFA 功率增益、EDFA 噪声系数、本振光功率、信号光功率、光放后端光带宽、基带前端电带宽等对终端输出信噪比的影响以及各种输出噪声功率占比的情况，得到了带有前置 EDFA 的卫星相干激光通信终端的信噪比参数特性。研究结果对卫星相干激光通信终端的设计有重要指导意义。

1 相干激光终端信噪比分析模型

卫星相干激光通信终端信噪比分析模型结构如图 1 所示，该模型结构为星间激光相干收发链路基本结构，包括发射端、传输空间、接收端，激光在终端光纤链路中以单偏振形式传播，模型适用于单偏振 BPSK/QPSK/QAM 信号的信噪比分析。在发射端，信号激光器发出窄线宽激光载波，经过 IQ 调制器被数据驱动信号电光调制，然后接入一个高功率 EDFA 进行功率放大，最后通过光学发射光路和天线扩束发射。在接收端，通过光学天线和接收光路接收耦合经过空间传输的调制光信号，调制光信号经过一个低噪声 EDFA 进行放大，然后与本振激光器产生的本振光分别接入 90°光混频器的两个输入口，光混频器输出最终接入两个平衡光电探测器 IQ 进行光电探测，获得基带波形信号，对其进行数字信号处理，恢复数据信息。

在分析模型中，发射端引入的噪声主要为高功率 EDFA 的 ASE 噪声，这部分噪声经过数千上万千米星间链路的几何衰减已经远小于空间热噪底(PSD：−174 dBm/Hz)，同时空间热噪底在接收端低噪声 EDFA 口面处也远小于低噪声 EDFA 的本底噪声(PSD：＞−160 dBm/Hz)。因此，分析模型忽略发射端噪声和空间链路噪底的影响，只考虑接收端的噪声。

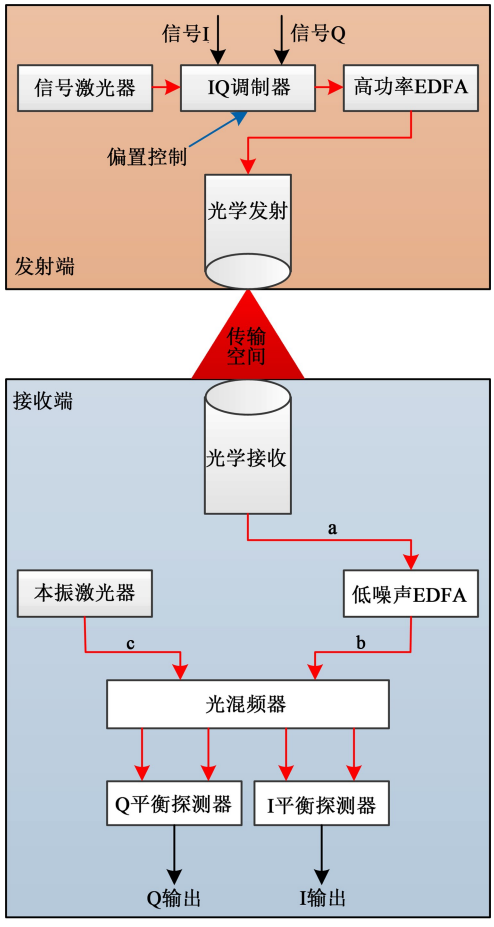


图 1 卫星相干激光通信终端信噪比分析模型结构

在接收端，经过光学接收空间光耦合光纤后，a 点接收到的信号光功率设为 P_{sig}，其经过低噪声 EDFA 后 b 点输出信号功率则为：

$$P_b = GP_{sig} + P_{ASE} \tag{1}$$

式中，G 为 EDFA 的功率增益，P_{ASE} 为 EDFA 输出的 ASE 噪声，功率为：

$$P_{ASE} = n_{sp}hf_0(G-1)B_o = \rho_{ASE}B_o \tag{2}$$

式中，$\rho_{ASE} = n_{sp}hf_0(G-1)$ 为 ASE 噪声的功率谱密度(PSD)，n_{sp} 为自发辐射因子，h 为普朗克常数，f_0 为中心光频率，B_o 为链路光带宽(光放后端带

宽)。单偏振 EDFA 中 n_{sp} 等效为 EDFA 噪声系数 F_n,其值大于 1(0 dB)。本振激光在 c 点功率设为 P_{lo}。b 路含有 ASE 噪声的放大信号光和 c 路的本振光经过光混频器接入 IQ 平衡光电探测器进行光电转换,获得输出基带波形。

单光电探测器信号光和本振光零差检测输出信号功率表示为:

$$P_{信号}=4R^2GP_{lo}P_{sig}L^2R_L \tag{3}$$

式中,R 为单光电探测器响应度(A/W),L 为光混频器插损,R_L 为负载阻抗。IQ 两路输出波形信噪比特性一致,本文模型以一路输出进行终端信噪比分析,单光电探测器零差探测输出噪声成分主要包括:(1)光电探测器热噪声;(2)光电探测器散粒噪声;(3)本振光相对强度噪声;(4)ASE 噪声与 ASE 噪声拍频噪声;(5)ASE 噪声与信号光拍频噪声;(6)ASE 噪声与本振光拍频噪声。其中,前两项噪声是光电探测器本身受温度和功率影响产生的白噪声,第三项噪声是本振光波动造成的拍频噪声,后三项噪声是 ASE 噪声与自身、信号光、本振光引起的拍频噪声。根据光电探测原理和光波混频原理[9-10],单光电探测器输出的各噪声功率表示为:

$$P_{热噪声}=4k_BTB_e \tag{4}$$

$$P_{散粒噪声}=2e(RP_{lo}L+RGP_{sig}L+I_n)B_eB_L \tag{5}$$

$$P_{RIN噪声}=rinR^2P_{lo}^2L^2B_eR_L \tag{6}$$

$$P_{ASE\text{-}ASE噪声}=2R^2\rho_{ASE}^2L^2B_oB_eR_L \tag{7}$$

$$P_{ASE\text{-}SIG噪声}=4R^2\rho_{ASE}GP_{sig}L^2B_eR_L \tag{8}$$

$$P_{ASE\text{-}LO噪声}=4R^2\rho_{ASE}P_{lo}L^2B_eR_L \tag{9}$$

式中,k_B 为玻尔兹曼常数,T 为热力学温度,B_e 为链路电带宽(基带前端带宽),e 为基本电荷量,I_n 为探测器暗电流(纳安量级可以忽略),rin 为相对响应度噪声系数。

平衡探测器最终输出是由两个单光电探测器输出相减获得。根据 90°光混频器特性,d 路和 e 路的信号场强分别表示为:

$$E_d=E_b+E_c \tag{10}$$

$$E_e=E_b-E_c \tag{11}$$

式中,E_b 和 E_c 代表 b 路和 c 路信号场强,可以得到 d,e 两路单光电探测器输出中的 E_b 与 E_c 自拍频输出符号相同相减抵消、E_b 和 E_c 互拍频输出符号相反相减倍增。因此,RIN 噪声、ASE-ASE 噪声、ASE-SIG 噪声被抵消抑制,有用信号和 ASE-LO 噪声被倍增加强。此外,热噪声和散粒噪声为两个单光电探测器独立的随机白噪声,功率为倍增加强。考虑平衡探测器中两个单光电探测器的不一致性,定义共模抑制比 $c=1/(1-k_{bpd})^2$,k_{bpd} 为两个光电探测器的一致性系数。

根据上述分析,平衡探测器零差探测时的输出信噪比最终表示为:

$$\begin{aligned}SNR=&[2P_{信号}]/[(P_{RIN噪声}+P_{ASE\text{-}ASE噪声}+\\&P_{ASE\text{-}SIG噪声})/c+2(P_{ASE\text{-}LO噪声}+P_{热噪声}+\\&P_{散粒噪声})]=[GP_{lo}P_{sig}/B_e]/[(rinP_{lo}^2+\\&2\rho_{ASE}^2B_o+4\rho_{ASE}GP_{sig})/8c+\rho_{ASE}P_{lo}+\\&k_BT/R_LR^2L^2+e(P_{lo}+GP_{sig})/2RL]\end{aligned} \tag{12}$$

该公式为零差检测时信噪比结果,外差检测信噪比结果在该公式基础上降低 3 dB。该公式即为带有前置 EDFA 的卫星相干激光通信终端信噪比分析的理论依据。

2　信噪比仿真分析

本章根据相干激光终端信噪比分析模型进行信噪比仿真分析,讨论系统信噪比影响因素和噪声成分,主要包括:EDFA 功率增益 G 的影响、EDFA 噪声系数 F_n 的影响、本振激光功率 P_{lo} 的影响、信号激光功率 P_{sig} 的影响、光放后端带宽 B_o 的影响、基带前端带宽 B_e 的影响以及各个噪声功率对比。各项仿真分析的共性参数见表 1 所列。

表 1　仿真共性参数

光载波中心频率 f_0/THz	193.414 4
窄线宽激光器 RIN 系数 rin/(dB/Hz)	−140
90°光混频器插损 L/dB	10
单光电探测器响应度 R/(A/W)	0.8
平衡探测器共模抑制比 c/dB	20
光电探测器结温 T/K	333.15
输出负载阻抗 R_L/Ω	50

2.1　EDFA 功率增益 G 影响分析

本项分析将 EDFA 功率增益 G 仿真范围设为 1～90 dB、步进为 1 dB,EDFA 噪声系数 F_n 全增益区间设为理想值 0 dB,EDFA 输出光滤波器带宽 B_o 设为 1.6 nm(200 GHz),基带前端带宽 B_e 设为 1 GHz,信号光功率 P_{sig} 设为 −55 dBm,本振光功率 P_{lo} 设为 0 dBm,仿真结果如图 2 所示。根据仿真结果可以得出,星间相干激光通信终端中 EDFA 的功率增益设置有最优区间,使得终端输出信噪比最优,过大或过小的 EDFA 功率增益设置均会导致输出信噪比恶化,终端需要保证 EDFA 功率增益工作在最优区间内。

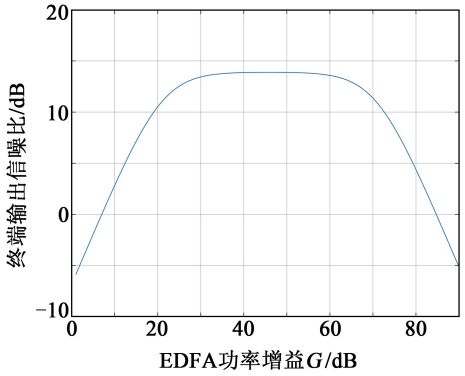


图 2 EDFA 功率增益对输出信噪比的影响

2.2 EDFA 噪声系数 F_n 影响分析

本项分析将 EDFA 功率增益 G 仿真范围设为 1～90 dB、步进为 1 dB，EDFA 噪声系数 F_n 仿真范围为 0～3 dB、步进为 0.5 dB，EDFA 输出滤波器光带宽 B_o 设为 1.6 nm(200 GHz)，基带前端带宽 B_e 设为 1 GHz，信号光功率 P_{sig} 设为－55 dBm，本振光功率 P_{lo} 设为 0 dBm，仿真结果如图 3 所示。根据仿真结果可以得出，随着 EDFA 噪声系数的增加，终端中 EDFA 的最优增益区间和信噪比包络没有变化，但最优区间下的最优信噪比等倍数降低，也就是 EDFA 噪声系数增加 1 dB，终端中 EDFA 最优增益区间的信噪比降低 1 dB，越小的 EDFA 噪声系数使得系统具有更优的信噪比，终端需要限定 EDFA 噪声系数满足信噪比要求。

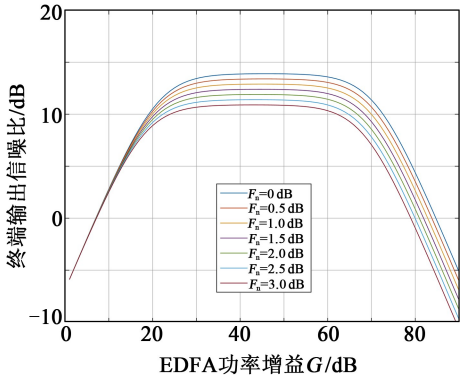


图 3 EDFA 噪声系数对输出信噪比的影响

2.3 本振光功率 P_{lo} 影响分析

本项分析将 EDFA 功率增益 G 仿真范围设为 1～90 dB、步进为 1 dB，EDFA 噪声系数 F_n 全增益区间设为理想值 0 dB，EDFA 输出滤波器光带宽 B_o 设为 1.6 nm(200 GHz)，基带前端带宽 B_e 设为 1 GHz，信号光功率 P_{sig} 设为－55 dBm，本振光功率 P_{lo} 仿真范围设为－15～15 dBm、步进为 3 dBm，仿真结果如图 4 所示。根据仿真结果可以得出，当本振光功率较小时，随着本振光功率的增大，终端中 EDFA 的最优增益区间和最优信噪比增加，当本振光功率增大到一定值时，随着本振光功率的增大，终端中 EDFA 的最优增益区间增加而最优信噪比不变。终端需要限定本振光功率，以满足信噪比和接收动态要求。

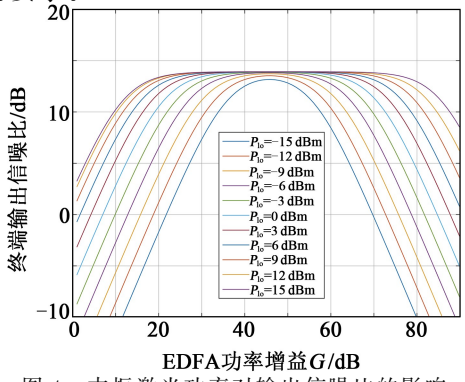


图 4 本振激光功率对输出信噪比的影响

2.4 信号光功率 P_{sig} 影响分析

本项分析将 EDFA 功率增益 G 仿真范围设为 1～90 dB、步进为 1 dB，EDFA 噪声系数 F_n 全增益区间设为理想值 0 dB，EDFA 输出滤波器光带宽 B_o 设为 1.6 nm(200 GHz)，基带前端带宽 B_e 设为 1 GHz，信号光功率 P_{sig} 仿真范围设为－60～－50 dBm、步进为 2 dB，本振光功率 P_{lo} 设为 0 dBm，仿真结果如图 5 所示。根据仿真结果可以得出，随着入射信号光功率的增加，终端中 EDFA 的最优增益区间和信噪比包络没有变化，但最优区间下的最优信噪比等倍数增加，入射信号光功率越大使得系统信噪比越高，终端需要足够的入射光功率，以保证信噪比要求。

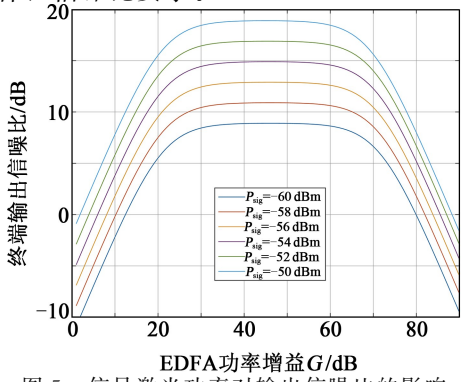


图 5 信号激光功率对输出信噪比的影响

2.5 光放后端带宽 B_o 影响分析

本项分析将 EDFA 功率增益 G 仿真范围设为 1～90 dB、步进为 1 dB，EDFA 噪声系数 F_n 全增益区间设为理想值 0 dB，EDFA 输出滤波器光带宽 B_o

仿真范围设为 1.6～16 nm、步进为 1.6 nm (200 GHz)，基带前端带宽 B_e 设为 1 GHz，信号光功率 P_{sig} 设为 −55 dBm，本振光功率 P_{lo} 设为 0 dBm，仿真结果如图 6 所示。根据仿真结果可以得出，随着 EDFA 后端光滤波器带宽的增加，终端中 EDFA 的最优增益区间变小，EDFA 大功率增益时的信噪比恶化，导致终端动态变小，终端需要增加较小带宽的 EDFA 后端光滤波器，以保证终端工作动态范围要求。

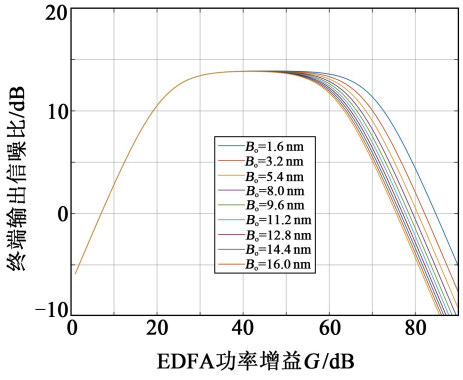


图 6　光放后端带宽对输出信噪比的影响

2.6　基带前端带宽 B_e 影响分析

本项分析将 EDFA 功率增益 G 仿真范围设为 1～90 dB、步进为 1 dB，EDFA 噪声系数 F_n 全增益区间设为理想值 0 dB，EDFA 输出滤波器光带宽 B_o 设为 1.6 nm (200 GHz)，基带前端带宽 B_e 仿真范围设为 0.1～6.4 GHz、带宽成倍增加，信号光功率 P_{sig} 设为 −55 dBm，本振光功率 P_{lo} 设为 0 dBm，仿真结果如图 7 所示。根据仿真结果可以得出，随着基带前端带宽的增加，终端中 EDFA 的最优增益区间和信噪比包络没有变化，但最优区间时的最优信噪比降低，基带前端带宽增加一倍最优信噪比降低 3 dB，终端设计需要基带前端带宽匹配通信符号速率，以保证信噪比最优。

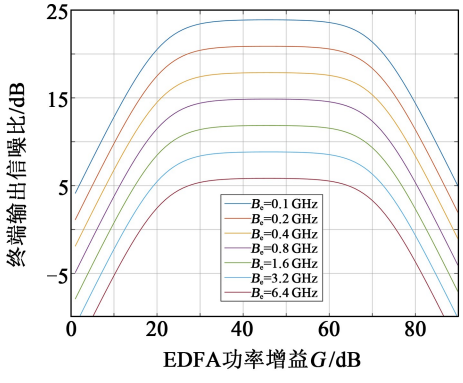
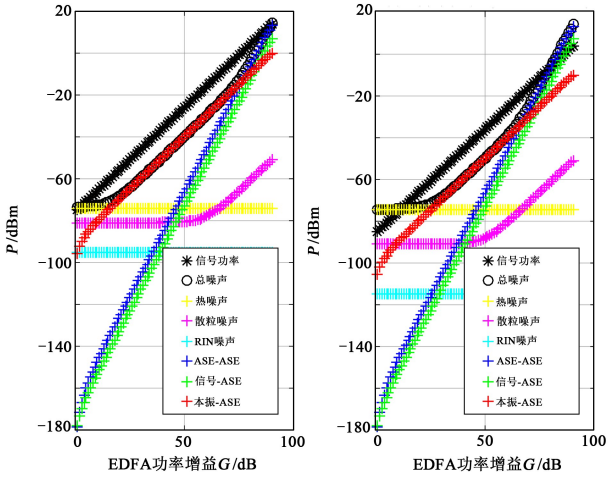


图 7　基带前端带宽对输出信噪比的影响

2.7　噪声功率对比分析

本项分析将 EDFA 功率增益 G 仿真范围设为 1～90 dB、步进为 1 dB，EDFA 噪声系数 F_n 全增益区间设为理想值 0 dB，EDFA 输出滤波器光带宽 B_o 设为 1.6 nm (200 GHz)，基带前端带宽 B_e 设为 1 GHz，信号光功率 P_{sig} 设为 −55 dBm，本振光功率 P_{lo} 设为 5，−5 dBm 两种工况，仿真结果如图 8 所示。根据两种工况仿真结果可以得出，当 EDFA 功率增益较小时，终端输出噪声主要由热噪声决定，当 EDFA 功率增益逐渐增大时，终端输出噪声主要由 ASE 噪声与本振光拍频噪声决定，当 EDFA 功率增益过大时，终端输出噪声主要由 ASE 噪声与 ASE 噪声拍频噪声决定。同时可以得出，当 ASE 噪声与本振光拍频噪声占据噪声功率主导地位时，终端输出有最好的信噪比性能，也就是 EDFA 功率增益最优区间，此时输出信噪比近似为：$SNR \simeq (P_{sig})/(n_{sp}hf_0B_e)$。



(a) P_{lo} = 5 dBm　　(b) P_{lo} = −5 dBm

图 8　噪声功率成分分析

3　结论

本文基于星间激光相干收发链路基本结构以及运行工况，建立了带有前置 EDFA 的卫星相干激光通信终端的信噪比分析模型，进行了终端的信噪比仿真分析，详细分析了 EDFA 功率增益、EDFA 噪声系数、本振光功率、信号光功率、光放后端光带宽、基带前端电带宽对终端输出信噪比的影响以及各种输出噪声功率占比的情况，得到了卫星相干激光通信终端的信噪比参数。本文结果可以用于带有前置 EDFA 的卫星相干激光通信终端设计，根据系统功能性能指标要求以及链路其他约束条件，合理设计

终端相关设备器件参数，以保证满足系统要求，具有重要的设计指导意义。

参考文献：

[1] 高铎瑞，谢 壮，马 榕，等. 卫星激光通信发展现状与趋势分析(特邀)[J]. 光子学报，2021，50(4)：1-21.
Gao Duorui，Xie Zhuang，Ma Rong，et al. Development current status and trend analysis of satellite laser communication (Invited)[J]. Acta Photonica Sinica，2021，50(4)：1-21.

[2] 李 锐，林宝军，刘迎春，等. 激光星间链路发展综述：现状、趋势、展望[J]. 红外与激光工程，2023，52(3)：133-147.
Li Rui，Lin Baojun，Liu Yingchun，et al. Review on laser intersatellite link：Current status，trends，and prospects[J]. Infrared and Laser Engineering，2023，52(3)：133-147.

[3] Robinson B S，Boroson D M，Burlanek D，et al. The NASA lunar laser communication demonstration—Successful high-rate laser communications to and from the moon[C]// 13th Inter. Conf. on Space Operations.，2014：1-7.

[4] Israel D J，Edwards B L，Staren J W. Laser communications relay demonstration (LCRD) update and the path towards optical relay operations[C]// 2017 IEEE Aerospace Conf.，2017：1-6.

[5] Jono T，Takayama Y，Shiratama K，et al. Overview of the inter-orbit and the orbit-to-ground laser communication demonstration by OICETS[J]. Proc. SPIE，2007，6457：645702.

[6] Araki T. Current trends in space optical communication around the world and its R&D activitie in JAXA[J]. IEICE Trans. on Fundamentals of Electronics，Communications and Computer Sciences，2018，101(1)：161-166.

[7] 高铎瑞，李天伦，孙 悦，等. 空间激光通信最新进展与发展趋势[J]. 中国光学，2018，11(6)：901-913.
Gao Duorui，Li Tianlun，Sun Yue，et al. Latest developments and trends of space laser communication[J]. Chinese Optics，2018，11(6)：901-913.

[8] 叶紫晴，丁宸聪，周海军. 卫星相干激光通信系统与技术发展[J]. 电讯技术，2022，62(4)：547-552.
Ye Ziqing，Ding Chencong，Zhou Haijun. Satellite coherent laser communication：System and technical progress[J]. Telecommunication Engineering，2022，62(4)：547-552.

[9] Matthias S. High-Order Modulation for Optical Fiber Transmission[M]. Berlin：Springer，2009：59-118.

[10] Deen M，Kumar S. Fiber Optic Communication Fundamentals and Applications[M]. West Sussex：John Wiley & Sons，2014：189-288.

作者简介：

宋春奇(1993—)，男，黑龙江省齐齐哈尔市人，博士，工程师，主要研究方向为星间激光通信、微波光子学。