

## HAP-GEO-HAP 全光中继放大链路模型及其误码性能

丁西峰<sup>1</sup>, 马 赛<sup>2</sup>, 赵尚弘<sup>1</sup>, 王 翔<sup>1</sup>, 郑永兴<sup>1</sup>, 温 泉<sup>1</sup>, 林 涛<sup>1</sup>

(1. 空军工程大学 信息与导航学院, 陕西 西安 710077;

2. 空军工程大学 航空航天工程学院, 陕西 西安 710038)

**摘 要:** 针对几何传播损耗和指向误差联合效应对空间激光链路性能的影响, 研究了 HAP-GEO-HAP 全光中继放大链路通信模型的误码性能。建立了基于 GEO 卫星全光中继放大转发的高空平台激光链路通信模型, 在考虑背景光辐射与放大器引入的自发辐射等因素的条件下, 研究了信道衰减系数的统计特性和各类噪声的强度, 获得链路模型的 Q 因子, 推导出误码率表达式。仿真分析了在不同发射功率、抖动标准差和波束宽度等参数条件下, 链路误码率与比特速率的关系。研究表明: 当比特速率较低时, 增大发射功率、降低抖动标准差或减小波束宽度, 对链路误码率性能的改善程度较为明显; 当比特速率大于 4 Gbps 时, 上述措施对链路误码性能的改善程度较为缓慢。

**关键词:** 高空平台; 全光中继; 放大转发; Q 因子; 误码率

**中图分类号:** TN92    **文献标志码:** A    **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0622003

## BER performance and link model of HAP-GEO-HAP all-optical amplify-and-forward relaying

Ding Xifeng<sup>1</sup>, Ma Sai<sup>2</sup>, Zhao Shanghong<sup>1</sup>, Wang Xiang<sup>1</sup>, Zheng Yongxing<sup>1</sup>, Wen Quan<sup>1</sup>, Lin Tao<sup>1</sup>

(1. Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;

2. Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** Aiming at the combined effects of geometric spreading and pointing errors on space optical links, the bit error rate (BER) performance of the all-optical amplify-and-forward (AOAF) relaying high altitude platform(HAP)-GEO-HAP communication links was researched. The GEO-based satellite AOAF relaying HAP optical communication link was modeled. The statistical characteristics of the channel fading index and the strength of the noises were investigated when the background radiation and the amplified spontaneous emission (ASE) noises were considered. With the help of the obtained Q factor of the proposed link model, the expression of BER was theoretically derived. The relationship between the BER performance and the bit rate under different parameters such as the transmitted optical power, jitter standard deviation and the beam-width was analyzed by simulation. The results show that, the BER performance is obviously improved by increasing the transmitted optical power, reducing the jitter standard deviation or decreasing the beam-width when the bit rate is low. On the other hand, a slight

收稿日期: 2016-10-12; 修订日期: 2016-11-14

基金项目: 国家自然科学基金(61231012); 陕西省自然科学基金(2015JM6060)

作者简介: 丁西峰(1992-), 男, 硕士生, 主要从事空间光通信方面的研究。Email: ding\_xifeng@126.com

导师简介: 赵尚弘(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光空间信息技术方面的研究。Email: zhaoshangh@aliyun.com

improvement of the BER performance is obtained with the same measures when the bit rate is larger than 4 Gbps.

**Key words:** high altitude platform; all-optical relaying; amplify-and-forward; Q-factor; bit error rate

## 0 引言

高空平台(High Altitude Platform, HAP)主要位于普通航空飞机的飞行空间和航天器轨道间,离地面约17~25 km,具有载荷大、造价低、对地面准静止、布设机动灵活、滞留时间长等优点<sup>[1]</sup>,成为构建垂直分层多域的空间信息网络节点的重要组成部分。在临近空间中,由于不存在云、雨、雾等大气现象,激光链路受到大气吸收、散射以及湍流的影响很小,HAP所处的空间环境是激光信号理想的传输信道<sup>[2]</sup>。利用激光链路,基于高空平台在信息获取、传输、处理和分发领域的得天独厚优势,构建空天地一体信息网络,成为空间信息领域研究的热点。与射频传输相比,空间光通信具有数据速率高、功率需求低、无需频谱许可证和安全性高等优势<sup>[3]</sup>。虽然高空平台具有诸多优势,但还存在覆盖能力和远程数据中继能力较弱的不足。采用地球同步轨道卫星(GEO)中继的方案不仅可以避免复杂的端到端的传输协议,而且可以扩大高空平台通信覆盖范围,实现全天候、跨域稳定通信覆盖和海量数据传输。通过将卫星与高空平台互联,组建空间高速骨干网络,可实现卫星和高空平台两者的优势互补。

目前,中继所采用的技术主要分为两大类:一是解码转发(Decode-and-Forward, DF),二是放大转发(Amplify-and-Forward, AF)。在DF系统中,中继卫星对接收的信号进行解码,将解码后的信号重新转发;而在AF系统中,中继卫星仅对接收的信号进行放大转发。其中AF系统有光-电-光中继<sup>[4]</sup>和全光中继两种方案。目前的研究主要集中在前者,该中继方案通过光-电-光转换,将光信号转换为电信号进行放大处理,再将放大后的电信号转换为光信号进行转发。由于星上电处理器和光电硬件性能的限制,该方案难以满足Gbps量级的高速空间光通信的需求。全光AF中继由于数据速率高、信号处理复杂度低,被广泛研究。参考文献[5-7]分别对自由空间光通信的

全光AF中继方案进行了研究。其中,参考文献[5]提出采用固定增益光放大器或光再生器的中继方案,在弱大气湍流条件下,通过蒙特卡洛仿真对系统误码率性能进行分析;参考文献[6]采用掺铒光纤放大器(EDFA)实现两跳和多跳的全光中继,在对数正态分布大气模型条件下,考虑ASE噪声的影响,对比分析光-电-光中继和全光中继对系统中断概率的影响;参考文献[7]针对Gamma-Gamma大气分布模型,研究了固定增益全光中继放大转发光链路的性能。然而上述文献仅考虑大气湍流效应的影响,未考虑平台振动引起的指向误差因素对光链路的影响。

临近空间高空平台与GEO之间的光链路受大气损耗和大气湍流效应的影响较小,且光束传输距离较长,几何传播损耗和指向误差的影响更为严重<sup>[8]</sup>。文中建立了基于全光AF中继的HAP-GEO-HAP光链路模型,针对几何传播损耗、指向误差、背景光噪声、ASE噪声等因素对HAP-GEO信道和GEO-HAP信道的影响,分析了光链路接收信号和信道噪声的统计特性,获得光链路模型的Q因子,推导出误码率的表达式,研究了不同发射功率、抖动标准差、波束宽度等参数下,HAP-GEO-HAP光链路误码性能与比特速率的关系。

## 1 链路模型

为实现高速、全天候持续通信并进一步扩大通信覆盖范围,建立了基于全光AF中继的HAP-GEO-HAP光链路通信模型,如图1所示。源HAP-1利用GEO卫星的中继实现与目的HAP-2的通信。GEO采用全光AF中继方案,对接收到的光信号进行滤波、放大并重新转发至HAP-2。光滤波器用于消除信号频带外的背景光辐射和ASE噪声的影响。光放大采用具有等效固定增益的级联EDFA,一是为了补偿长距离链路的信道衰减;二是为扩大增益调节范围。HAP-2对接收到的信号进行滤波、放大后送给光检测器。HAP-2上的前置放大器EDFA是

用来克服信道衰减所带来的功率损耗。

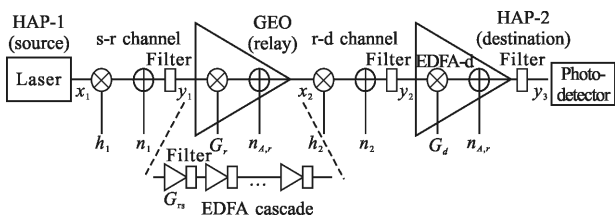


图 1 HAP-GEO-HAP 链路模型  
Fig.1 HAP-GEO-HAP links model

假定链路采用开关键控(OOK)强度调制/直接检测(IM/DD)方式,信道具有加性高斯白噪声,独立同分布,无记忆平稳遍历,且信道状态信息在发送端和接收端都可以利用<sup>[9]</sup>。源 HAP-1 发送信号光功率为  $x_1$ ,单位为 dBW,当发送“1”时  $x_1=P_r$ ,  $P_r$  为一个定值;当发送“0”时  $x_1=0$ 。经过信道衰减和光滤波后,GEO 接收到的光信号  $y_1$  可表示为:

$$y_1=h_1x_1+n_1B_o \quad (1)$$

式中: $h_1$  为无量纲的 s-d 信道衰减因子; $n_1$  为加性高斯白噪声功率谱密度<sup>[10]</sup>,单位为 W/Hz; $B_o$  为光滤波器带宽,单位为 Hz。

中继卫星 GEO 对接收到的信号进行滤波、放大,补偿因长距离传输而产生的功率损耗,并将其以功率  $x_2$  重新发送给 HAP-2。 $x_2$  包含放大后信号功率和由级联 EDFA 引入的 ASE 噪声功率两部分:

$$x_2=G_r y_1+n_{A,r} B_o=G_r(h_1x_1+n_1B_o)+n_{A,r} B_o \quad (2)$$

式中: $G_r$  为级联 EDFA 的等效固定增益,  $G_r=(x_2+hfn_{sp}B_o)/(E[h_1]x_1+n_1B_o+hfn_{sp}B_o)$ ;  $n_{A,r}$  为级联 EDFA 引入的 ASE 噪声功率谱密度;  $n_{A,r}=hfn_{sp}(G_r-1)$ ;  $h$  为普朗克常数;  $f$  为光载波频率;  $n_{sp}$  为放大器自发辐射系数;  $E[\cdot]$  为求期望运算。假定 GEO 中继放大器组是由  $m$  个相同增益为  $G_{rs}$  的 EDFA 级联构成,则级联 EDFA 的等效增益  $G_r$  和相应的  $n_{sp}$  分别为:

$$G_r=G_{rs}^m \quad (3)$$

$$n_{A,r}=hfn_{sp}(G_{rs}-1)(G_{rs}^{m-1}+G_{rs}^{m-2}+\dots+1)=hfn_{sp}(G_{rs}^m-1)=hfn_{sp}(G_r-1) \quad (4)$$

因此,经过信道衰减和光滤波器,HAP-2 接收到的信号功率  $y_2$  可表示为:

$$y_2=G_d h_1 h_2 x_1+G_d h_2 n_1 B_o+h_2 n_{A,r} B_o+n_2 B_o \quad (5)$$

式中: $h_2$  为无量纲的 r-d 信道衰减因子; $n_2$  为加性高

斯白噪声功率谱密度<sup>[10]</sup>,单位为 W/Hz。HAP-2 设置放大器 EDFA-d 用于提高端到端光信噪比。HAP-2 将放大后的光信号利用光检测器将其转换为电信号。光检测器的输入光信号功率  $y_3$  可表示为:

$$y_3=G_d G_r h_1 h_2 x_1+(G_d G_r h_2 n_1 B_o+G_d n_2 B_o)+(G_d h_2 n_{A,r} B_o+n_{A,r} B_o) \quad (6)$$

式中: $y_{3,s}=G_d G_r h_1 h_2 x_1$  为有用信号部分; $y_{3,nb}=G_d G_r h_2 n_1 B_o+G_d n_2 B_o$  为链路背景光辐射噪声部分; $y_{3,na}=G_d h_2 n_{A,r} B_o+n_{A,r} B_o$  为 ASE 噪声部分。 $G_d$  为 HAP-2 前置放大器 EDFA-d 的增益, $n_{A,d}$  为放大器 EDFA-d 引入的 ASE 噪声功率谱密度, $n_{A,d}=hfn_{sp}(G_d-1)$ 。

## 2 信道模型

此链路模型主要考虑几何损耗和指向误差对信号功率的衰减。根据几何传播损耗和指向误差理论,对于信道衰减因子  $h_i, i=1,2$ , 分别表示 s-r 信道和 r-d 信道,信道模型可表示为<sup>[9]</sup>:

$$f_{h_i}(h_i)=\frac{\xi_i^2}{A_i} h_i^{\xi_i^2-1}, 0 \leq h_i \leq A_i \quad (7)$$

$$v_i=\sqrt{\pi} a_i/(\sqrt{2} w_i) \quad (8)$$

$$w_{ieq}^2=w_i^2 \sqrt{\pi} \operatorname{erf}(v_i)/[2v_i \exp(-v_i^2)] \quad (9)$$

式中: $\xi$  为接收端处等效光束半径与指向误差偏移量标准差之间的比值,  $\xi_i=w_{ieq}/(2\sigma_i)$ ,  $A_i=[\operatorname{erf}(v_i)]^2$ ,  $w_{ieq}$  为接收端等效波束宽度,  $\sigma_i$  为接收端处指向误差偏移量标准差(抖动);  $\operatorname{erf}(\cdot)$  为误差函数;  $w_i$  为距离  $z_i$  处波束宽度,  $w_i=\theta_i z_i$ ;  $\theta_i$  为光束发散角;  $a_i$  为接收端检测器的半径。

## 3 误码率模型

链路采用开关键控(OOK)强度调制/直接检测(IM/DD)方式。链路终端 HAP-2 采用光前置放大器 EDFA-d 对接收的光信号进行放大,并用光探测器将放大后的光信号转换为电信号。发送“1”码、“0”码的情况下,光探测器输出端的信号光电流可表示为:

$$\begin{cases} I_1=Ry_3|_{x_1=P_r} \\ I_0=Ry_3|_{x_1=0} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $R$  为光探测器的响应度。光探测器输出端的噪声功率可表示为:

$$\sigma^2=\langle I_{shot}^2 \rangle+\langle I_D^2 \rangle+\langle I_{th}^2 \rangle+\sigma_{beat}^2 \quad (11)$$

式中: $\langle I_{shot}^2 \rangle$ 、 $\langle I_D^2 \rangle$ 、 $\langle I_{th}^2 \rangle$ 、 $\sigma_{beat}^2$  分别为散粒噪声、暗电

流噪声、热噪声和拍频噪声,各噪声之间相互独立,计算为<sup>[11]</sup>:

$$\langle I_{\text{shot}}^2 \rangle = 2qRy_3B_e \quad (12)$$

$$\langle I_D^2 \rangle = 2qI_D B_e \quad (13)$$

$$\langle I_{\text{th}}^2 \rangle = \frac{4k_B T B_e}{R_L} \quad (14)$$

式中: $q$ 为电子电荷量; $B_e$ 为电滤波器带宽; $I_D$ 为暗电流; $k_B$ 为玻尔兹曼常量; $R_L$ 为负载阻抗; $T$ 为噪声绝对温度。拍频噪声可计算为:

$$\sigma_{\text{beat}}^2 = \sigma_{\text{sig-b}}^2 + \sigma_{\text{sig-ASE}}^2 + \sigma_{\text{b-b}}^2 + \sigma_{\text{ASE-ASE}}^2 \quad (15)$$

式中: $\sigma_{\text{sig-b}}^2$ 表示信号光电流与背景光辐射噪声光电流拍频产生的拍频噪声; $\sigma_{\text{sig-ASE}}^2$ 表示信号光电流与 ASE 噪声光电流拍频产生的拍频噪声; $\sigma_{\text{b-b}}^2$ 表示背景光辐射噪声光电流之间拍频产生的拍频噪声; $\sigma_{\text{ASE-ASE}}^2$ 表示 ASE 噪声光电流之间拍频产生的拍频噪声。分别计算<sup>[6,11]</sup>为:

$$\sigma_{\text{sig-b}}^2 = 4R^2 y_{3,\lambda} y_{3,na} B_e / B_o \quad (16)$$

$$\sigma_{\text{sig-ASE}}^2 = 4R^2 y_{3,\lambda} y_{3,na} B_e / B_o \quad (17)$$

$$\sigma_{\text{b-b}}^2 = (Ry_{3,na} / B_o)^2 (2B_o - B_e) B_e \quad (18)$$

$$\sigma_{\text{ASE-ASE}}^2 = (Ry_{3,na} / B_o)^2 (2B_o - B_e) B_e \quad (19)$$

由公式(11)~(19)得链路“1”和“0”码时的噪声功率为:

$$\begin{cases} \sigma_1^2 = (\langle I_{\text{shot}}^2 \rangle + \langle I_D^2 \rangle + \langle I_T^2 \rangle + \sigma_{\text{beat}}^2) |_{X_i=P_i} \\ \sigma_0^2 = (\langle I_{\text{shot}}^2 \rangle + \langle I_D^2 \rangle + \langle I_T^2 \rangle + \sigma_{\text{beat}}^2) |_{X_i=0} \end{cases} \quad (20)$$

Q 因子是与信噪比相关的系统指标,可用来表征一个通信系统的性能,其定义为<sup>[12]</sup>:

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (21)$$

联立公式(10)~(21)可得,中继链路 Q 因子的表达式为:

$$Q_{\text{OOK}} = \frac{G_d G_r h_1 h_2 P_t}{\sqrt{\sigma_1^2} + \sqrt{\sigma_0^2}} \quad (22)$$

Q 因子是在最佳判决门限下得到的<sup>[12]</sup>,则衰减因子  $h_1, h_2$  条件下的误码率可表示为:

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{Q_{\text{OOK}}}{\sqrt{2}} \right) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{G_d G_r h_1 h_2 P_t}{\sqrt{2} (\sqrt{\sigma_1^2} + \sqrt{\sigma_0^2})} \right) \quad (23)$$

式中: $\operatorname{erfc}(\cdot)$ 为误差补函数。联立公式(7)和(16)得中

继链路平均误码率,  $P_e^{av}$  为:

$$P_e^{av} = \int_{0 \leq h_1 \leq A_1} \int_{0 \leq h_2 \leq A_2} \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{G_d G_r h_1 h_2 P_t}{\sqrt{2} (\sqrt{\sigma_1^2} + \sqrt{\sigma_0^2})} \right) \frac{\xi_1^2 \xi_2^2}{A_1 A_2} h_1^{\xi_1-1} h_2^{\xi_2-1} dh_1 dh_2 \quad (24)$$

## 4 仿真结果

为了研究不同参数对基于全光 AF 中继的 HAP-GEO-HAP 光链路误码率的影响,依据上述的理论进行仿真分析。系统中参数设置如表 1 所示。为简化分析,假定源和中继的发送功率、指向误差偏移量标准差及波束宽度均相等,即  $x_1=x_2, \sigma_1=\sigma_2, w_1=w_2$ 。

表 1 仿真参数

Tab.1 Simulation parameters

Parameters	Value
Wavelength $\lambda/\text{nm}$	1 550
Distance between transmitter and receiver $z_1, z_2/\text{km}$	40 000
Receiver aperture radius $a_1, a_2/\text{cm}$	12.5
Optical BPF bandwidth $B_o/\text{GHz}$	80
Electrical BPF bandwidth $B_e/\text{Hz}$	$R_b$
Dark current $I_D/\text{nA}$	2
Amplifier spontaneous emission factor $n_{sp}$	5
EDFA gain of destination $G_d/\text{dB}$	20
Photo-detector load resistance $R_L/\Omega$	50
Background radiation psd $n_1, n_2/\text{W} \cdot \text{Hz}^{-1}$	$10^{-18}$
Photodetector responsivity $R$	0.8
Receiver noise temperature $T/\text{K}$	300

图 2 为两跳抖动标准差  $\sigma_i$  均为 120 m, 两跳接收端处波束宽度  $w_i$  均为 200 m, 不同发射功率  $P_t$  条件下,中继链路平均误码率 BER 与比特速率  $P_b$  的关系曲线。从图中可以发现,随着比特速率的增大,中继链路平均误码率增大,通信性能恶化,但可通过增大发射功率,降低链路平均误码率,改善通信性能。这是因为在比特速率、抖动标准差以及波束宽度一定条件下,根据 Q 因子定义公式(22),增大链路发射功率,提升中继链路的 Q 因子,从而使得中继链路平均误码率降低。当比特速率为 1 Gbps 时,发射功

率为 1 dBW 时,平均误码率为  $4.939 \times 10^{-4}$ ;发射功率为 2 dBW 时,平均误码率为  $3.901 \times 10^{-5}$ ,降低一个量级;发射功率为 3 dBW 时,平均误码率为  $1.339 \times 10^{-6}$ ,又降低一个量级;发射功率为 4 dBW 时,平均误码率为  $1.564 \times 10^{-8}$ ,降低两个量级。因此,在  $R_b=1$  Gbps,  $\sigma_j=120$  m,  $w_j=200$  m 时,若要中继链路平均误码率不高于  $10^{-8}$ ,则需将发射功率增大至 4 dBW 以上,方可满足链路性能要求。随着比特速率的增加,链路误码率逐渐增大并趋于稳定值;随着比特速率的增加,增大发射功率对链路平均误码率的降低程度越来越缓慢,当比特速率较低时,增大发射功率对链路平均误码率的改善程度较大;当比特速率较高时,增大发射功率所获误码性能改善程度不甚明显。根据 Q 因子定义公式(22)和误码率的计算公式(23)可知,当比特速率较高时,Q 因子值较小,此时 Q 因子取值的改变对于链路误码率变化量的影响较小。所以,相比于比特速率较低的情况,此阶段下虽然增大同等的发射功率能够获得同等的链路 Q 因子增加量,但相应的误码率的降低程度却较小。当比特速率增大至 4 Gbps 时,将发射功率从 1 dBW 增加至 4 dBW,链路平均误码率从  $4.916 \times 10^{-2}$  降低至  $2.765 \times 10^{-3}$ ,仅降低一个量级。

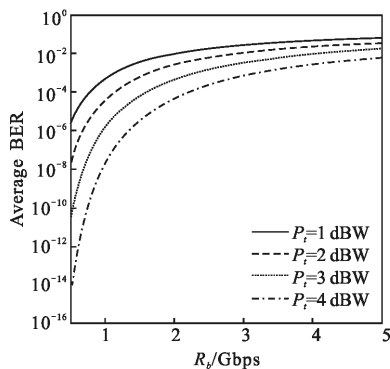


图 2 当  $\sigma_j=120$  m,  $w_j=200$  m 时,不同发射功率  $P_t$  下的平均误码率与比特速率的关系

Fig.2 Average BER versus the bit rate  $R_b$  with different transmitted power  $P_t$  when  $\sigma_j$  is 120 m and  $w_j$  is 200 m

图 3 为当发射功率  $P_t=2$  dBW,波束宽度  $w_j=200$  m,不同抖动标准差  $\sigma_j$  条件下,中继链路平均误码率 BER 与比特速率  $R_b$  的关系曲线,与图 2 具有相同的变化规律。这表明采取一定措施减小抖动标准差,无需增大发射功率,同样可改善链路误码率性能。这是因为减小抖动标准差,使得 HAP-GEO 链路和

GEO-HAP 链路的光束对准更加精确,降低了因平台振动带来的指向误差对信号光功率的衰减,提升中继链路的 Q 因子,从而使得中继链路平均误码率降低。当  $R_b=1$  Gbps 时,  $\sigma_j=140$  m 时,平均误码率为  $3.443 \times 10^{-4}$ ;  $\sigma_j=120$  m 时,平均误码率为  $3.901 \times 10^{-5}$ ,降低一个量级;  $\sigma_j=100$  m 时,平均误码率为  $2.246 \times 10^{-6}$ ,降低一个量级;  $\sigma_j=80$  m 时,平均误码率为  $6.005 \times 10^{-8}$ ,降低两个量级。因此,在  $R_b=1$  Gbps,  $P_t=2$  dBW,  $w_j=200$  m 时,无需增大发射功率,将抖动标准差从 140 m 减少至 80 m,也可满足中继链路平均误码率不高于  $10^{-8}$  的要求。但随着比特速率的增加,减小抖动标准差对链路平均误码率的改善程度越来越小。同样,相比于比特速率较低的情况,此阶段下虽然减小同等的抖动标准差获得同等的链路 Q 因子增加量,但相应的误码率的降低程度却较小。当比特速率增大至 4 Gbps 时,将抖动标准差从 140 m 减少至 80 m,链路平均误码率从  $4.426 \times 10^{-2}$  降低至  $3.978 \times 10^{-3}$ ,仅降低一个量级。

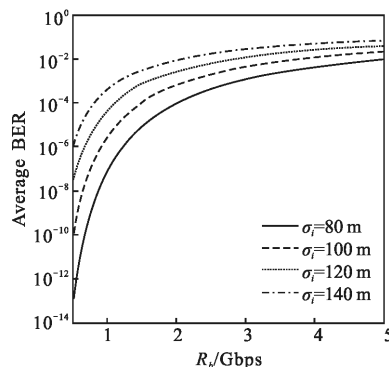


图 3 当  $P_t=2$  dBW,  $w_j=200$  m 时,不同抖动标准差  $\sigma_j$  下的平均误码率与比特速率  $P_b$  的关系

Fig.3 Average BER versus the bit rate  $P_b$  with different jitter standard deviation  $\sigma_j$  when  $P_t$  is 2 dBW and  $w_j$  is 200 m

图 4 为当发射功率  $P_t=2$  dBW,抖动标准差  $\sigma_j=120$  m,不同波束宽度  $w_j$  条件下,中继链路平均误码率 BER 与比特速率  $R_b$  的关系曲线,其变化规律与图 2、图 3 相同。这表明在发射功率和抖动标准差不变的条件下,减小波束宽度,可改善链路误码率性能。因为在发射功率以及抖动标准差一定条件下,减小波束宽度,能够降低因几何传播带来的信号光功率损耗,提升中继链路的 Q 因子,从而使得中继链路平均误码率降低。当  $R_b=1$  Gbps,  $w_j=240$  m 时,平均

误码率为  $2.608 \times 10^{-4}$ ;  $w_i=200$  m 时, 平均误码率为  $3.901 \times 10^{-5}$ , 降低一个量级;  $w_i=160$  m 时, 平均误码率为  $4.171 \times 10^{-6}$ , 降低一个量级;  $w_i=120$  m 时, 平均误码率为  $3.655 \times 10^{-7}$ , 降低一个量级。波束宽度每减小 40 m, 可获得链路平均误码率一个量级的改善。但随着比特速率的增加, 减小波束宽度对链路平均误码率的改善效果越不明显。同样, 相比于比特速率较低的情况, 此阶段下减小同等的波束宽度虽然获得同等的链路 Q 因子增加量, 但相应的误码率的降低程度却较小。当比特速率增大至 4 Gbps 时, 将波束宽度从 240 m 减少至 120 m, 链路平均误码率从  $4.085 \times 10^{-2}$  降低至  $6.504 \times 10^{-3}$ , 仅降低一个量级。

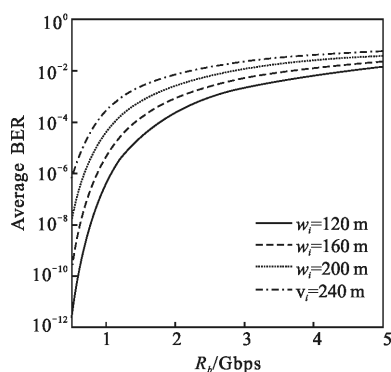


图 4 当  $P_t=2$  dBW,  $\sigma_r=120$  m 时, 不同波束宽度  $w_i$  下的平均误码率与比特速率  $P_b$  的关系

Fig.4 Average BER versus the bit rate  $P_b$  with different beam-width  $w_i$  when  $P_t$  is 2 dBW and  $\sigma_r$  is 120 m

## 5 结论

在背景光辐射、ASE 噪声、几何传播损耗和指向误差的影响下, 建立全光中继放大转发 HAP-GEO-HAP 激光链路模型。仿真分析了在不同发射功率、抖动标准差以及波束宽度等参数条件下, HAP-GEO-HAP 光链路误码率性能与比特速率的关系。结果表明, 随着比特速率的增加, 链路误码性能逐渐增大并趋于稳定值, 且增大发射功率、降低抖动标准差以及减小波束宽度, 对误码率性能的改善程度越来越缓慢。当比特速率为 1 Gbps 时, 每增大发射功率 1 dBW、或降低抖动标准差 20 m、或减小波束宽度 40 m, 可使误码率降低至少一个量级; 但当比特速率为 4 Gbps 时, 增大发射功率 3 dBW、或降低抖动标准差 60 m、或减小波束宽度 120 m, 才能使误码率降低

一个量级。这为临近空间高空平台中继链路的参数优化以及性能评估提供了参考。实际上, 文中只考虑了相同高度 HAP 经由 GEO 一次转发的情形, 而不同高度 HAP 经由 LEO 或 GEO 多次转发, 以及对于构建基于高空平台的、垂直分层多域的空间光网络结构, 还要做进一步深入研究。

## 参考文献:

- [1] Fidler F, Knapek M, Horwath J, et al. Optical communication for high-altitude platforms [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2010, 16(5): 1-13.
- [2] Wang Xiang, Zhao Shanghong, Li Yongjun, et al. Effect of high altitude platforms position instability on performance of PPM on inter-platforms optical links [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(11): 3122-3126. (in Chinese)  
王翔, 赵尚弘, 李勇军, 等. 高空平台位置不稳定性对平台间 PPM 调制光链路性能的影响 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(11): 3122-3126.
- [3] Wang Yi, Wang Deli, Du Fan, et al. Analysis of channel capacity employing circle polarization shift keying over Gamma-gamma atmospheric turbulence channel [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(10): 3084-3091. (in Chinese)  
王怡, 王德丽, 杜凡, 等. 大气 Gamma-gamma 湍流信道中采用圆偏振位移键控的信道容量分析 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(10): 3084-3091.
- [4] Aggarwal M, Garg P, Puri P. Exact capacity of amplify-and-forward relayed optical wireless communications systems [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2015, 27(8): 903-906.
- [5] Kazemlou S, Hranilovic S, Kumar S. All-optical multi-hop free-space optical communication systems [J]. *J Lightw Technol*, 2011, 29(18): 2663-2669.
- [6] Bayaki E, Michalopoulos D S, Schober R. EDFA-based all-optical relaying in free-space optical systems [J]. *IEEE Trans Commun*, 2012, 60(12): 3797-3897.
- [7] Kashani M A, Rad M M, Safari M, et al. All-optical amplify-and-forward relaying system for atmospheric channels [J]. *IEEE Commun Lett*, 2012, 16(10): 1684-1687.
- [8] Wang Xiang, Zhao Shanghong, Shi Lei, et al. Performance analysis of high altitude platform multi-hop optical communication with variable gain relay [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(10): 1-5. (in Chinese)  
王翔, 赵尚弘, 石磊, 等. 高空平台多跳光链路可变增益中继性能分析 [J]. *中国激光*, 2013, 40(10): 1-5.

- [9] Han Liqiang, You Yahui. Performance of free space optical communication with combined effects from atmospheric turbulence and pointing errors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(11): 1–6. (in Chinese)  
韩立强, 游雅晖. 大气湍流及瞄准误差联合效应下自由空间光通信的性能[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1–6.
- [10] Ke Xizheng, Deng Lijun. *Wireless Optical Communications* [M]. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese)  
柯熙政, 邓莉君. 无线光通信 [M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [11] Li Yuanping, Zhu Yong, Xiang Peng, et al. *Digital Optical Communications* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011. (in Chinese)  
黎原平, 朱勇, 项鹏, 等. 数字光通信[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [12] Wu Chongqing. *Introduction to Optical Communication* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008. (in Chinese)  
吴重庆. 光通信导论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.