

# 星地微波光传输链路分析

康子建<sup>1</sup> 韩秀友<sup>1</sup> 李 聪<sup>2</sup> 肖永轩<sup>2</sup> 石暖暖<sup>1</sup> 胡 墅<sup>1</sup> 胡晶晶<sup>1</sup> 谷一英<sup>1</sup> 赵明山<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 大连理工大学物理与光电工程学院, 辽宁 大连 116023)  
(<sup>2</sup> 中国空间技术研究院通信卫星事业部, 北京 100094)

**摘要** 根据星地大容量通信发展需求,研究了基于微波空间光传输技术的星地激光通信链路。在建立星地微波光传输链路模型的基础上,分析了链路光功率衰减、输出微波信号、噪声功率以及在大气湍流信道下系统的误码率。仿真分析了调制器直流偏置电压大小对链路输出信噪比和误码率的影响,结果表明,相对于通常的正交偏置工作点,通过优化控制直流偏置点的位置,可以提高链路输出信噪比和误码率,这种改善程度随着调制系数的减小而增大。该研究为建立星地微波光传输系统提供了有益参考。

**关键词** 光通信;星地激光通信;微波空间光传输;信噪比;误码率;链路分析

中图分类号 TN927 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.1001004

## Analysis of the Radio on Free Space Optical Transmission Link for the Satellite-to-Ground Communication

Kang Zijian<sup>1</sup> Han Xiuyou<sup>1</sup> Li Cong<sup>2</sup> Xiao Yongxuan<sup>2</sup> Shi Nuannuan<sup>1</sup> Hu Shu<sup>1</sup>  
Hu Jingjing<sup>1</sup> Gu Yiying<sup>1</sup> Zhao Mingshan<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Physics and Optoelectronic Engineering, Dalian University of Technology,  
Dalian, Liaoning 116023, China

<sup>2</sup> Institute of Telecommunication Satellite, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China

**Abstract** The radio on free space optical transmission (RoFSO) link is proposed to meet with the large capacity requirement of satellite-to-ground communication. With the established link model, the link optical loss, the output power of microwave signal, noise and the bit error rate (BER) under atmospheric turbulence channel are deduced. The influence of bias voltage of the electro-optic modulator on the signal to noise ratio (SNR) and BER is simulated. The analysis results show that compared with the quadrature bias point, the optimal control of the bias voltage can improve the SNR and BER. And the effect of improvement increases with the decrease of the modulation coefficient. The research gives good foundation for the realization of RoFSO based satellite-to-ground communication system.

**Key words** optical communications; satellite-to-ground laser communication; radio on free space optical transmission; signal to noise ratio; bit error rate; link analysis

**OCIS codes** 010.1330; 060.2605; 350.4010

## 1 引 言

激光通信具有传输容量大、功耗低、重量轻、保密性强等优点,成为世界各国卫星-卫星之间通信技术研究热点以及重要发展方向<sup>[1-4]</sup>。欧洲宇航局的

SILEX 计划实现了 ARTEMIS 与 SPOT-4 (GEO-LEO) 星间激光通信实验;日本 ETS-VI 计划和 OICETS 计划实现了 KIRARI 卫星与 ARTEMIS 卫星 (LEO-GEO) 之间、KIRARI 卫星与地面 (LEO-

收稿日期: 2014-04-02; 收到修改稿日期: 2014-06-19

基金项目: 国防科工局民用航天“十二五”预先研究项目(617010501-02)、中央高校基本科研业务费专项(DUT13JB01)

作者简介: 康子建(1986—),男,博士研究生,主要从事微波光子学方面的研究。E-mail: 980861928@qq.com

导师简介: 赵明山(1960—)男,博士,教授,主要从事聚合物光子集成功能器件和微波光子学等方面的研究。

E-mail: mszhao@dlut.edu.cn(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

地面)之间的激光通信实验;我国在某卫星上首次实现了星地激光通信链路数据传输实验。由于星地之间光传输易受到大气环境、湍流等因素的影响,对激光通信链路提出更严苛的要求;同时,结合目前星地之间以微波(RF)通信传输与处理为主体,为了兼顾星上已有载荷系统功能,并有效利用激光通信大传输容量的优势,本文提出了星地之间微波空间光传输(RoFSO)技术。微波空间光传输是将载有数据信息的微波副载波经过电光转换调制到光载波上,通过星地之间大气传输,在地面站进行接收以及光信号处理。

针对星地之间光传输的特殊性,本文在建立星地微波光传输链路模型的基础上,首先分析了大气层对光链路功率的影响,其次研究了地面站输出微

波信号功率和噪声特性。为了提高光链路的性能,研究了调制器偏置电压对链路增益、信噪比的影响;通过数值仿真模拟了在二进制相移键控(BPSK)调制方式下,误码率(BER)随调制器偏置电压变化的关系,最终得到了在不同大气环境下光链路最佳工作状态。

## 2 星地微波光传输链路建模

### 2.1 星地微波光传输链路结构

星地微波光传输链路系统主要功能是通过RoFSO技术实现星地信道的高速通信,星地微波光传输链路系统的基本结构如图1所示。链路结构可分为三部分:光发射端机、星地传输信道和光接收端机。

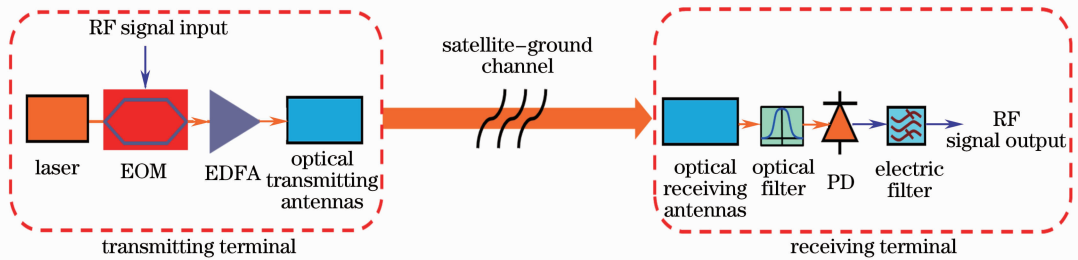


图1 星地微波光传输链路结构示意图

Fig. 1 Link diagram of RoFSO based satellite-to-ground communication system

光发射端机包括:激光器、电光调制器、光放大器、光发射天线等。光发射端机中微波信号通过电光调制器(EOM)调制到光载波上,之后光载微波信号经过掺铒光纤放大器(EDFA)放大后,由光学天线发射,经过星地信道发送至光接收端机。

星地传输信道包括自由空间传输信道和大气信道两部分,光载微波信号经光发射端机输出,由于存在发散角,其经自由空间传输后达到接收机的功率发生衰减;同时,大气信道中大气吸收、散射和湍流效应也会对其产生影响,造成功率衰减和信噪比(SNR)的劣化。

光接收端机由接收光学天线、光带通滤波器、光电探测器(PD)以及电带通滤波器组成。光载微波信号由光学天线接收,光滤波器滤除信号波段以外的干扰光后,传送至光电探测器进行光电转换,输出微波信号,微波滤波器滤除带宽外杂散信号和噪声,之后输出的微波信号再进行下一步的信号处理。

## 2.2 星地微波光传输链路大气信道模型

### 2.2.1 光功率衰减

根据实际链路工作情况和空间环境,星地激光

链路的衰减可分为三类:

1) 大气信道对激光信号产生的衰减,包括:大气散射衰减、大气吸收衰减及大气湍流效应产生光强闪烁等效应带来的衰减。

2) 系统工作产生的损耗,包括卫星光学天线捕获、跟瞄、对准(APT)误差带来的损耗、发射光路系统损耗、接收光路系统损耗等。

3) 激光自由空间传输衰减,是星地激光链路中主要的衰减量。其大小由有效发射光天线增益 $G_t$ 、有效接收光天线增益 $G_r$ 和光波自由空间传输损耗 $L$ 所决定。具体公式表示为<sup>[5]</sup>

$$G_t = \frac{2}{\left(1 - \cos \frac{\theta_b}{2}\right)}, \quad (1)$$

$$G_r = \left(\frac{4\pi}{\lambda^2}\right)S, \quad (2)$$

$$L = \left(\frac{\lambda}{4\pi z}\right)^2, \quad (3)$$

式中 $\theta_b$ 为光束的发散角, $S$ 为光天线接收孔径面积, $\lambda$ 为激光波长, $z$ 为距发射天线出瞳处的距离。

对中轨卫星(MEO)与地面的微波光传输链路进行分析,该星地微波光传输链路的典型参数由

表 1 给出。

表 1 星地微波光传输系统主要参数

Table 1 Main parameters of satellite-to-ground radio on free space optical system

Parameter	Downlink channel	Uplink channel
Distance /km	10000	10000
Wavelength of LD /nm	1550	1550
Beam divergence angle / $\mu$ rad	12	12
Transmitting telescope diameter /m	0.3	0.3
Receiving telescope diameter /m	1	0.3

将表 1 中的参数值分别代入(1)~(3)式,可以计算得到链路各因素造成的光学损耗及上下行链路的总光学损耗,结果如表 2 所示。表 2 中天线发射效率、接收效率、APT 偏差损耗、大气衰减及大气闪烁衰减参考 ETS-VI(GOLD)系统典型值<sup>[6]</sup>。

表 2 星地微波光传输链路中光功率损耗参数

Table 2 Satellite-to-ground radio on free space optical system power loss parameters

Parameter	Downlink channel	Uplink channel
Transmitting antennas loss /dB	-5.30	-5.20
Optical transmitting antennas gain /dB	110.45	110.45
Free space transmission loss /dB	-278.17	-278.17
Atmospheric attenuation and the atmospheric scintillation loss /dB	-2.00	-3.00
Optical receiving antennas gain /dB	126.14	115.68
Receiving antennas loss /dB	-4.40	-10.1
APT misalignment loss /dB	-0.50	-2.00
Total loss $l_{total}$ /dB	-53.78	-72.44

## 2.2.2 大气湍流影响

大气温度的微小随机变化,使得大气折射率随机变化,形成不同尺度的涡旋元,大尺度和小尺度的涡旋元循环变化形成大气湍流运动。大气湍流对光信号的影响主要表现为光强闪烁。Gamma-Gamma 模型把光强闪烁描述为大尺度涡旋元和小尺度涡旋元联合作用的结果,可以较为准确地描述光强闪烁的分布概率。其概率分布函数可表示为<sup>[7]</sup>

$$P(A) = \frac{2(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} A^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta A}), A > 0, \quad (4)$$

式中  $A$  为归一化光强, $\Gamma$  函数为 Gamma 函数, $K_m(x)$  是  $m$  阶第二类修正的贝塞尔函数。 $\alpha$  为大尺度闪烁系数, $\beta$  为小尺度涡旋元闪烁系数,其中由于链路信道不同,上行链路和下行链路的  $\alpha$  值也不同,具体定义为

$$\alpha = \begin{cases} \left\{ \exp\left[\frac{0.49\sigma^2}{(1+1.11\sigma^{12/5})^{7/6}}\right] - 1 \right\}^{-1}, & \text{downlink channel} \\ \left\{ \exp\left[\frac{0.49\sigma^2}{(1+0.56\sigma^{12/5})^{7/6}}\right] - 1 \right\}^{-1}, & \text{uplink channel} \end{cases}, \quad (5)$$

$$\beta = \left\{ \exp\left[\frac{0.51\sigma^2}{(1+0.69\sigma^{12/5})^{7/6}}\right] - 1 \right\}^{-1}, \quad (6)$$

式中  $\sigma^2$  为 Rytov 指数,根据闪烁原理和 Kolmogorov 湍流模型, $\sigma^2$  可表示为

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

式中  $k$  为波数, $H$  为卫星轨道高度, $h_0$  为地面站高度, $\Psi$  为天顶角。 $C_n^2(h)$  采用 Hufnagel-Valley (H-V) 模型描述折射率结构常数  $C_n^2$  随海拔高度的变化,即

$$C_n^2(h) = 0.00594\left(\frac{v}{27}\right)^2(10^{-5}h)^{10}\exp\left(\frac{-h}{1000}\right) + 2.7 \times 10^{-16}\exp\left(\frac{-h}{1500}\right) + M \cdot \exp\left(\frac{-h}{100}\right), \quad (8)$$

式中  $h$  为海拔高度, $v$  为风速大小,一般取  $v$  为 21 m/s。 $M$  是近地面的折射率结构常数  $C_n^2(0)$ 。一般认为:近地面  $C_n^2(0) \geq 10^{-12} \text{ m}^{-2/3}$  为强湍流, $10^{-14} \leq C_n^2(0) < 10^{-12} \text{ m}^{-2/3}$  为中湍流, $10^{-16} \leq C_n^2(0) < 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$  为弱湍流。

根据文献[8-9]中公式所示,光强闪烁会对系统误码率产生影响,当传输信号为 BPSK 信号时,则系统误码率为

$$R_{BE} = \frac{(\alpha\beta)^{\alpha-\beta-3}}{\pi^{3/2}\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} G_{5,2}^{2,4} \left[ \frac{2^4 R_{SN}}{(\alpha\beta)^2} \middle| \begin{matrix} \frac{1-\alpha}{2}, \frac{1-\beta}{2}, \frac{2-\alpha}{2}, \frac{2-\beta}{2}, 1 \\ 0, \frac{1}{2} \end{matrix} \right], \quad (9)$$

式中  $G$  函数为 MeijerG 函数, $R_{SN}$  为链路平均信噪比。

## 2.3 输出微波信号功率

与数字激光通信链路不同,微波光传输链路中,微波信号由电光调制器(如图 1)调制到激光器输出

的光载波上。以马赫-曾德电光调制器(MZM)作为研究对象,则调制器的输出功率为<sup>[10]</sup>

$$P_{\text{out,MZM}} = \frac{l_{\text{MZM}} P_{\text{in}}}{2} \left\{ 1 + \cos \left[ \frac{\pi V_{\text{d}}}{V_{\pi}} + \frac{\pi V_{\text{RF}} \cos(2\pi f_{\text{RF}} t)}{V_{\pi}} \right] \right\}, \quad (10)$$

式中  $l_{\text{MZM}}$  为调制器差损,  $P_{\text{in}}$  为 MZM 输入光功率,  $V_{\pi}$  为 MZM 半波电压,  $V_{\text{d}}$  为直流驱动电压,  $V_{\text{RF}} \cos(2\pi f_{\text{RF}} t)$  为射频驱动电压,  $V_{\text{RF}}$  为射频电压的幅度,  $f_{\text{RF}}$  为射频频率。

在小信号调制条件下,将(10)式进行 Bessel 展开,忽略高阶项,只考虑一阶项得到:

$$P_{\text{out,MZM}} = \frac{l_{\text{MZM}} P_{\text{in}}}{2} \left[ 1 + \cos \left( \frac{\pi V_{\text{d}}}{V_{\pi}} \right) J_0(m) - 2 \sin \left( \frac{\pi V_{\text{d}}}{V_{\pi}} \right) J_1(m) \cos(2\pi f_{\text{RF}} t) \right], \quad (11)$$

式中  $m = \pi V_{\text{RF}} / V_{\pi}$  为调制系数,  $J_0(m)$  为零阶贝塞尔函数,  $J_1(m)$  为一阶贝塞尔函数。

信号经 EDFA 放大后输出的平均光功率为

$$\overline{P_{\text{out}}} = \frac{l_{\text{MZM}} G P_{\text{in}}}{2} \left[ 1 + \cos \left( \frac{\pi V_{\text{d}}}{V_{\pi}} \right) J_0(m) \right], \quad (12)$$

式中  $G$  为 EDFA 的增益。当 EDFA 工作在饱和输出区间时,输出平均光功率  $\overline{P_{\text{out}}}$  为定值,则 EDFA 增益表示为

$$G = \frac{2 \overline{P_{\text{out}}}}{l_{\text{MZM}} P_{\text{in}} \left[ 1 + \cos \left( \frac{\pi V_{\text{d}}}{V_{\pi}} \right) J_0(m) \right]}. \quad (13)$$

经 EDFA 放大后的光信号,由卫星上的光学天线发射进行传输,传输过程中受到传输信道衰减和大气湍流影响,则 PD 输出光电流通过带通滤波器,滤去直流分量,输出信号为

$$i = A \eta l_{\text{total}} l_{\text{MZM}} G P_{\text{in}} \sin \left( \frac{\pi V_{\text{d}}}{V_{\pi}} \right) J_1(m) \cos(\omega_{\text{RF}} t), \quad (14)$$

式中  $A$  为归一化光强,  $\eta$  为 PD 的响应度,  $l_{\text{total}}$  为链路光功率总衰减,可由表 2 得到。

根据(4)式,可得归一化光强期望  $E^2(A)^2 = 1$ ,则由(13)式和(14)式可得平均输出微波信号功率为

$$P_{\text{RFout}} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\eta l_{\text{total}} \overline{P_{\text{out}}}}{\left[ 1 + \cos \left( \frac{\pi V_{\text{d}}}{V_{\pi}} \right) J_0(m) \right]} \sin \left( \frac{\pi V_{\text{d}}}{V_{\pi}} \right) J_1(m) \right\}^2 R, \quad (15)$$

式中输出端等效负载电阻  $R = 50 \Omega$ 。

## 2.4 输出噪声功率

微波光传输链路的噪声主要包括相对强度噪声、散弹噪声、热噪声、EDFA 噪声。其中 EDFA 的

噪声又包括自发辐射拍频噪声以及信号和自发辐射之间的拍频噪声。散弹噪声功率为

$$N_{\text{shot}} = 2qI_0 BR = \eta l_{\text{total}} l_{\text{MZM}} G P_{\text{in}} \left[ 1 + \cos \left( \frac{\pi V_{\text{d}}}{V_{\pi}} \right) J_0(m) \right] BRq, \quad (16)$$

式中  $q$  为电子电荷,  $B$  电滤波器带宽。

热噪声功率为

$$N_{\text{thermal}} = (1 + G_{\text{RF}}) k_{\text{B}} TB, \quad (17)$$

式中  $k_{\text{B}}$  为玻尔兹曼常数,  $T$  是绝对温度,  $G_{\text{RF}}$  为链路微波增益,  $G_{\text{RF}} = 10^{(P_{\text{RFout}} - P_{\text{RFin}})/10}$ , 其中  $P_{\text{RFin}}$  和  $P_{\text{RFout}}$  单位为 dBm。

相对强度噪声功率为

$$N_{\text{RIN}} = 10 \left( \frac{I_{\text{RIN}}}{I_0} \right) I_0^2 RB = 10 \left( \frac{I_{\text{RIN}}}{I_0} \right) RB \left\{ \frac{\eta l_{\text{total}} l_{\text{MZM}} G P_{\text{in}}}{2} \left[ 1 + \cos \left( \frac{\pi V_{\text{d}}}{V_{\pi}} \right) J_0(m) \right] \right\}^2, \quad (18)$$

式中  $I_{\text{RIN}}$  是激光器输出的相对强度噪声密度。

光放大器引入的自发辐射噪声为<sup>[11-12]</sup>

$$P_{\text{ase}} = \frac{qF(G-1)l_{\text{total}}B_0}{\eta}. \quad (19)$$

可得信号和自发辐射之间的拍频噪声功率为

$$N_{\text{s-ase}} = 2\eta^2 P_{\text{r}} P_{\text{ase}} R = 2\eta P_{\text{r}} F(G-1)l_{\text{total}} RB_0, \quad (20)$$

式中  $P_{\text{r}}$  为 PD 接收到的平均光功率,其值为  $l_{\text{total}} \overline{P_{\text{out}}}$ 。

自发辐射拍频噪声功率为

$$N_{\text{ase-ase}} = (\eta P_{\text{ase}})^2 R = \{qF[(G-1)l_{\text{total}}]B_0\}^2 R, \quad (21)$$

式中  $F$  为 EDFA 的噪声系数,  $B_0$  为光滤波器带宽。

综上,系统噪声功率如下:

$$N_{\text{total}} = N_{\text{shot}} + N_{\text{thermal}} + N_{\text{RIN}} + N_{\text{s-ase}} + N_{\text{ase-ase}}. \quad (22)$$

## 3 链路仿真与分析

根据上述建立的星地微波光传输链路模型和输出微波信号功率及噪声功率表达式,采用表 3 中的典型光电子器件参数,对星地微波光传输链路的特性进行仿真与分析。这里考虑星地下行信道的传输特性,由表 2 可知,信道总光学衰减为 -53.78 dB。仿真分析不同调制系数  $m$  下,输出微波信号功率和噪声功率随直流偏置电压变化的关系。

图 2 给出了在不同调制系数条件下输出微波信号功率随直流偏置电压变化的关系曲线。可以看出,对于固定的调制系数  $m$ ,适当增加直流偏置电压,可以提高输出微波信号的功率值,且存在一个最

优的直流偏置电压,使得输出的微波信号功率最大。这是因为经过 MZM 调制器输出的是光载微波双边带信号,当直流偏置电压偏离正交偏置点(增大方向)时,可以在一定程度上抑制中心光载波的幅度,在 EDFA 输出功率为定值的条件下,相比于正交偏置点,此时 EDFA 为两边带提供了更高的增益,进而在接收端获得了更高的输出微波信号功率。但当中心光载波抑制过小时,边带信号和载波拍频输出功率减小,因此到达最优的直流偏置电压后继续增加电压,输出微波信号功率随之减小。

表 3 链路模拟条件

Table 3 Link simulated conditions

Parameter	Value
Power of LD $P_{in}/\text{dBm}$	16
PD responsivity $\eta / (\text{A} \cdot \text{W}^{-1})$	0.8
Modulator insertion loss $L_{MZM}/\text{dB}$	-4.5
Switching voltage $V_{\pi}/\text{V}$	4.5
Relative intensity noise $R_{\text{RIN}}/(\text{dB} \cdot \text{Hz}^{-1})$	-154
Electric band $B/\text{MHz}$	500
Optical filter band $B_0/\text{GHz}$	5
EDFA output power $\overline{P}_{\text{out}}/\text{dBm}$	36.99
EDFA noise figure $F/\text{dB}$	5.5

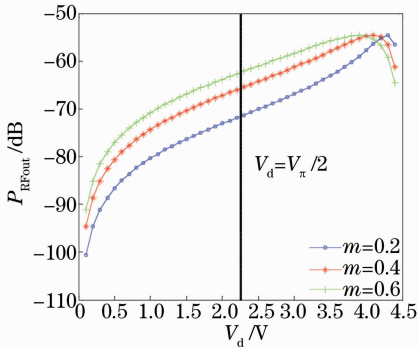


图 2 接收端输出微波功率随偏置电压变化的关系

Fig. 2 RF output power versus the bias voltage

在不同的调制系数下链路增益相比于正交偏置点改善程度有所不同,当  $m=0.2, 0.4, 0.6$  时,对应的最优调制器偏置电压分别为 4.3, 4.1, 3.9 V, 最大改善值分别为 17.02 dB, 11.10 dB, 7.74 dB。可知调制系数越小时改善程度越大,即当输入微波信号为小信号时,偏置点对链路的改善程度要大于较大信号输入时的改善程度。

根据(16)~(22)式,分析偏置电压改变对输出噪声功率的影响,结果如图 3 所示。由图 3 可以看出当偏置电压逐渐变大时噪声功率随之变大,但增加的幅度很小(小于 0.001 dB)。这是由于经过星地信道长距离传输后,到达接收机的光功率很小,因此由强度噪声、散弹噪声、EDFA 引入的噪声不是噪

声的主要成分,热噪声占主导。当链路衰减很大时热噪声约等于定值,因此噪声功率的变化程度小于链路微波增益的变化程度。

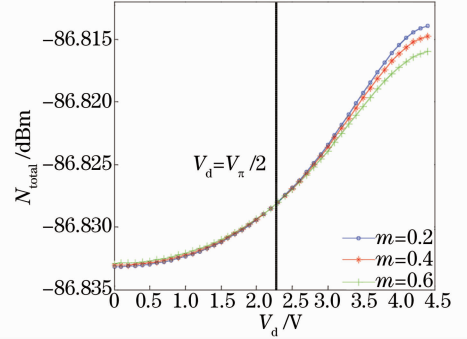


图 3 输出噪声功率随偏置电压变化的关系

Fig. 3 Output noise power versus the bias voltage

综上,由(15)式和(22)式得出系统输出信号的平均信噪比为

$$R_{\text{SN}} = \frac{\left\{ \frac{\eta^l \overline{P}_{\text{out}}}{\left[ 1 + \cos\left(\frac{\pi V_d}{V_{\pi}}\right) J_0(m) \right]} \sin\left(\frac{\pi V_d}{V_{\pi}}\right) J_1(m) \right\}^2 R}{2N_{\text{total}}} \quad (23)$$

图 4 给出了链路系统输出信号信噪比与输入微波信号功率和直流偏置电压的关系,其中,输入微波信号功率为  $P_{\text{RFIn}} = 10 \lg[1000 \cdot (V_{\text{RF}}/R)^2 \cdot \frac{1}{2}]$ 。由于噪声功率随直流偏置电压的变化幅度小于链路微波增益的变化幅度,因此链路信噪比与输出功率变化趋势相同。当直流偏置电压一定时,随着输入功率增大,信噪比随之增大,直到输入信号到达调制器非线性区链路增益下降,此时信噪比发生劣化。

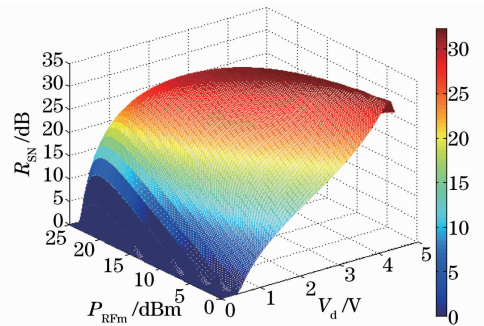


图 4 链路输出信噪比与偏置电压和输入射频功率的关系

Fig. 4 Output SNR versus the bias voltage and the input RF power

#### 4 调制器偏置电压优化对系统性能改善

由(9)式和(23)式可得在大气湍流情况下星地



微波光传输链路误码率闭合表达式:

$$R_{BE} = \frac{(\alpha\beta)^{\alpha-\beta-3}}{\pi^{3/2} \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} G_{5,2}^{2,4} \left\{ \frac{8}{(\alpha\beta)^2} \frac{\left\{ \frac{\eta^l \text{total} \overline{P_{out}}}{\left[ 1 + \cos\left(\frac{\pi V_d}{V_\pi}\right) J_0(m) \right]} \sin\left(\frac{\pi V_d}{V_\pi}\right) J_1(m) \right\}^2}{N_{total}} \right\} \Big|_{\substack{\frac{1-\alpha}{2}, \frac{1-\beta}{2}, \frac{2-\alpha}{2}, \frac{2-\beta}{2}, 1 \\ 0, \frac{1}{2}}} \quad (24)$$

图5给出输入信号为10 dBm时,链路在不同大气湍流强度下的误码率随偏置电压变化情况。从图中可以看出,在不同湍流强度下偏置电压向低偏置点靠近都会优化系统性能,但在较强湍流影响下,系统误码率产生较大劣化。对(24)式求导得出最优偏置电压表达式为

$$V_{d0} = \frac{V_\pi}{\pi} \arccos[-J_0(\pi V_{RF}/V_\pi)]. \quad (25)$$

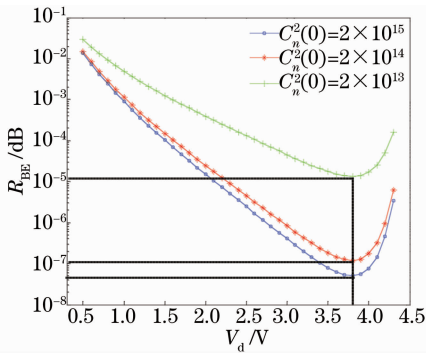


图5 不同湍流强度下链路误码率随偏置电压变化的关系

Fig. 5 BER of the link versus the bias voltage under different turbulence intensities

根据(25)式可知最优偏置点偏置电压值,当输入功率为10 dBm时,最优偏置电压为3.8 V。当 $C_n^2(0)$ 为 $2 \times 10^{15}$ 是弱湍流情况,偏置点为正交点时误码率为 $6.08 \times 10^{-6}$ ,对应最优偏置点误码率为 $5.08 \times 10^{-8}$ ,误码率改善 $8.4 \times 10^{-3}$ ;当 $C_n^2(0)$ 为 $2 \times 10^{14}$ 是中湍流情况,偏置点为正交点时误码率为 $1.05 \times 10^{-5}$ ,对应最优偏置点误码率为 $1.2 \times 10^{-7}$ ,误码率改善 $1.14 \times 10^{-2}$ ;当 $C_n^2(0)$ 为 $2.27 \times 10^{15}$ 是较强湍流情况,对应正交点误码率为 $2.29 \times 10^{-4}$ ,对应最优偏置点误码率为 $1.35 \times 10^{-5}$ ,误码率改善了 $5.9 \times 10^{-2}$ 。由此可知对应不同湍流强度系统改善有所不同,随着湍流强度的增强误码率改善幅度有所下降。

## 5 结 论

研究了星地微波光传输通信链路系统,在EDFA输出光功率保持不变的情况下,推导出链路输出信噪比和系统误码率与偏置电压和输入微波

功率的关系,结果表明通过优化控制调制器直流偏置工作点可以提高系统输出信噪比和系统误码率,在小信号输入时,这种改善效果更加显著。

初步研究结果表明,在不同大气湍流环境下,优化的直流偏置电压接近于调制器的载波抑制工作点都可以有效改善系统性能,但随着大气湍流加剧链路改善程度有所下降,下一步工作可考虑采用多孔径方式进一步改善系统性能。

## 参 考 文 献

- Zhao Shanghong, Wu Jili, Li Yongjun, *et al.*. Present status and developing trends of satellite laser communication [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(9): 092801.
- 赵尚弘, 吴继礼, 李勇军, 等. 卫星激光通信现状与发展趋势 [J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(9): 092801.
- M Toyoshima, Y Takayama. Ground-to-satellite laser communication experiment [J]. *IEEE A & E System Magazine*, 2008, 23(8): 10-18.
- M Toyoshima, T Takahashi. Laser beam propagation in ground-to-OICETS laser communication experiments [C]. *SPIE*, 2007, 6551: 65510A.
- Morio Toyoshima, Yasushi Munemasa, Hideki Takenaka. Introduction of a terrestrial free-space optical communications network facility: IN-orbit and networked optical ground stations experimental verification advanced testbed (INNOVA) [C]. *SPIE*, 2014, 8971: 89710R.
- Jiang Huilin, Tong Shoufeng, Zhang Lizhong. *The Technologies and Systems of Space Laser Communication* [M]. Beijing: National Defense Industrial Press, 2010. 83-86.
- 姜会林, 佟首峰, 张立中. *空间激光通信技术与系统* [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010. 83-86.
- Jia Xu, Li Shaohui. Analysis on satellite-to-ground laser communications experiment and its link budget in foreign countries [J]. *Spacecraft Engineering*, 2013, 22(1): 120-126.
- 贾旭, 李少辉. 国外星地激光通信实验及链路分析 [J]. *航天器工程*, 2013, 22(1): 120-126.
- L C Andrews, R L Phillips, C Y Hopfen. Scintillation model for a satellite communication link at large zenith angles [J]. *Opt Eng*, 2000, 39(12): 3272-3280.
- W Lim, C Yun, K Kim. BER performance analysis of radio over free-space optical systems considering laser phase noise under Gamma-Gamma turbulence channels [J]. *Opt Express*, 2009, 17(6): 4479-4484.
- Yi Xiang, Yue Peng, Liu Zengji, *et al.*. SER performance analysis of radio over free space optical systems [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2012, 23(7): 1309-1313.
- 易湘, 岳鹏, 刘增基, 等. 无线光载射频通信系统误码率性能分析 [J]. *光电子 • 激光*, 2012, 23(7): 1309-1313.
- Charles H Cox. *Analog Optical Links Theory and Practice* [M]. New York: Cambridge University Press, 2004. 37-38.
- Zhang Xiupu, Mitchell Alan. A simple black box model for erbium-doped fiber amplifiers [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2000, 12(1): 28-30.
- Zhu Zihang, Zhao Shanghong, Li Yongjun, *et al.*. Optimization of optically pre-amplified inter-satellite microwave photonic links [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2013, 24(3): 500-507.
- 朱子行, 赵尚弘, 李勇军, 等. 带前置光放大的星间微波光子链路性能优化 [J]. *光电子 • 激光*, 2013, 24(3): 500-507.

栏目编辑: 王晓球