

文章编号:1002-2082(2013)03-0547-06

星间微波光子链路调制方式的优化

李 轩,赵尚弘,朱子行,韩 磊,赵 静

(空军工程大学 信息与导航学院,陕西 西安 710077)

摘 要:针对外调制星间微波光子链路输出信噪比优化问题,建立了基于双电极马赫-曾德尔调制器的强度调制直接探测星间微波光子链路模型,通过优化调制器调制方式来提高链路性能。用数值模拟方法得到了单边带、双边带和推挽式3种调制方式下链路输出信噪比,利用曲面投影法求得了最优调制方式时一定信噪比要求下发射端所需最小光放大器增益和对应的调制器直流偏置相位。结果表明:相同输入射频信号功率和发射光功率情况下,双边带调制输出信噪比比单边带调制高3 dB,低直流偏置相位推挽调制可以进一步优化输出信噪比。输入射频信号功率为-20 dBm,输出信噪比为17.3 dB时,所需最小光放大器增益为43.9 dB,对应的直流偏置相位为 0.87π 。

关键词:光通信;微波光子;星间链路;调制方式;信噪比

中图分类号:TN929.13

文献标志码:A

doi:10.5768/JAO201334.0308003

Optimization of inter-satellite microwave photonic link modulation mode

LI Xuan, ZHAO Shang-hong, ZHU Zi-hang, HAN Lei, ZHAO Jing

(School of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: To the output signal-to-noise ratio (SNR) optimization of inter-satellite microwave photonic link, the direct intensity modulation detection inter-satellite microwave photonic link based on dual-electrode Mach-Zehnder modulator (DE-MZM) was modeled, the link performance was improved by optimizing the modulation mode. The link output SNR under single-sideband (SSB), double-sideband (DSB) and push-pull modulation was derived by numerical analysis. The minimum optical amplifier gain of the transmitter and the corresponding optical modulator DC bias point with the given output SNR were obtained by curved surface projection method. The results show that, when the input signal power and the optical emission power remain unchanged, the SNR of DSB modulation is 3 dB higher than SSB modulation, and the optimum SNR is obtained with low DC bias of push-pull modulation. When the input signal power is -20 dBm and the output SNR is 17.3 dB, the needed minimum optical amplifier gain is 43.9 dB, and the corresponding DC bias phase is 0.87π .

Key words: optical communication; microwave photonic; inter-satellite link; modulation mode; signal-to-noise ratio

引言

将微波光子技术应用到卫星通信系统,在增大系统通信带宽、提高信息传输和处理能力的同时可以有效减少星上通信载荷的体积、质量和功

耗^[1-3]。将卫星接收到的射频信号调制到光上,利用星间光链路进行中继传输是星上微波光子技术的一个典型应用。

外调制微波光子系统中调制方式的选择十分

收稿日期:2012-11-22; 修回日期:2012-12-27

基金项目:国家自然科学基金(61108068)

作者简介:李轩(1989-),男,山西运城人,硕士研究生,主要从事微波光子技术研究工作。E-mail:lixuankgd@163.com

重要。在地面光载无线通信系统中,选择合适的调制方式可以抑制光纤色散^[4-5]对传输信号的影响,延长传输距离^[6-7]。在星间微波光子链路中,光信号在真空环境进行传输,无信道非线性效应,然而,星间微波光子链路传输距离远,光信号衰减严重,输出信噪比低,因此需要进行严格的功率预算和链路特性分析。文献[8-10]分析了空间光通信影响因素,提出了功率预算方法,但研究内容为数字光通信。文献[11-12]研究了外调制方式微波光子链路中调制系数对链路性能的影响,但没有考虑调制器直流偏置相位对链路性能的影响。文献[13]中分析了调制器直流偏置相位对链路性能的影响,但引入光放大器非线性特性,影响最优偏置点的选取。

对于双电极马赫-曾德尔电光调制器(DE-MZM),不同直流偏置相位对应不同的调制方式,优化其调制方式可以提高链路性能。本文建立了基于DE-MZM的强度调制直接探测星间微波光子链路模型,分析了不同调制方式下链路性能,获得了星间微波光子链路最优调制方式以及一定信噪比条件下发射端光放大器最小增益值和调制器最优直流偏置相位。

1 星间微波光子链路模型

星间微波光子链路模型如图1所示,卫星1接

收到的射频信号经放大后进行1:1分路,分别输入DE-MZM两臂进行电光调制,其中一路信号经过移相器产生一定相移。调制光信号经放大后耦合进发射天线,发射传输至卫星2,卫星2接收到的光信号依次通过前置光放大器和光滤波器进行光放大和背景光滤除,然后进行光电探测和带通滤波,得到输出射频信号。受系统复杂度限制,星间微波光子链路采用强度调制直接探测方式。

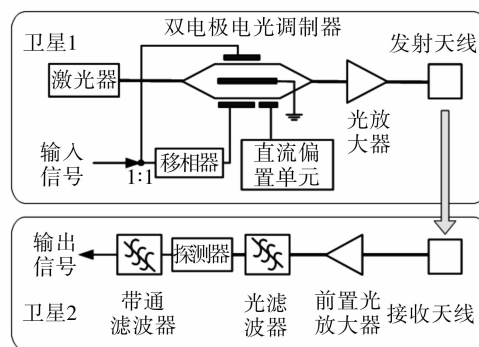


图1 星间微波光子链路

Fig. 1 Inter-satellite microwave photonic link

输入射频信号功率为 P_{rf} ,分路后射频信号为 $v(t) = V_r \cos \omega t$, V_r 和 ω 分别为信号振幅和角频率, $R_{in} P_{rf} = V_r^2$, R_{in} 为输入匹配电阻。激光器输出光功率为 P_{in} ,MZM插入损耗为 L_{mzm} ,则MZM输出光信号强度为

$$P_{mzm}(t) = \frac{P_{in} L_{mzm}}{2} [1 + \cos(\theta + m \cos(\omega t - \beta) - m \cos \omega t)] = \frac{P_{in} L_{mzm}}{2} \left[1 + \cos\left(\theta + 2m \sin \frac{\beta}{2} \sin\left(\omega t - \frac{\beta}{2}\right)\right) \right] = \frac{P_{in} L_{mzm}}{2} \left[1 + \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n\left(2m \sin \frac{\beta}{2}\right) \cos\left(\theta + n\omega t - \frac{n\beta}{2}\right) \right] \quad (1)$$

式中: $\theta = \pi V_{dc} / V_{\pi}$ 为直流偏置相位, V_{dc} 为直流偏置电压, V_{π} 为调制器半波电压; $m = \pi V_r / V_{\pi}$ 为调制系数; β 为移相器相移; $J_n(\cdot)$ 为 n 阶一类贝赛尔函数。由(1)式可知调制光信号中包括直流分量、射频信号及其各次谐波分量。在接收端,天线接收光信号强度和平均光功率分别为

$$P_{re}(t) = G_{OA} L_T G_T G_R L_{add} P_{mzm}(t) \quad (2)$$

$$P_r = \frac{1}{2} P_{in} L_{mzm} G_{OA} L_T G_T G_R L_{add} \left[1 + J_0\left(2m \sin\left(\frac{\beta}{2}\right)\right) \cos\theta \right] \quad (3)$$

式中: G_{OA} 为发射机光放大器增益; L_{add} 为链路附加损耗; L_T 、 G_T 、 G_R 分别为自由空间传输损耗、发射天线增益、接收天线增益,表示为

$$L_T = \left(\frac{\lambda}{4\pi Z}\right)^2 \quad G_T = \left(\frac{\pi D_T}{\lambda}\right)^2 \quad (4)$$

$$G_R = \left(\frac{\pi D_R}{\lambda}\right)^2$$

式中: λ 为光波长; Z 为星间距离; D_T 和 D_R 分别为发射、接收天线孔径。

探测器输出端信号为

$$P_s(t) = \left(RP_{in} L_{mzm} G_{OA} L_T G_T G_R L_{add} G_{pre} J_1 \left(2m \sin \frac{\beta}{2} \right) \sin \theta \right)^2 \frac{R_L}{2} \quad (5)$$

探测器输出端噪声为

$$N = N_{th} + N_{rin} + N_{sh} + N_{a-a} + N_{s-a} + N_{a-sh} \quad (6)$$

式中等号右边各项分别为热噪声 N_{th} 、相对强度噪声 N_{rin} 、光信号产生的散弹噪声 N_{sh} 、自发辐射自混频噪声 N_{a-a} 、信号与自发辐射拍频噪声 N_{s-a} 、自发辐射产生的散弹噪声 N_{a-sh} ，分别表示为^[13-16]

$$\begin{cases} N_{th} = 4kTB \\ N_{rin} = 10^{RIN/10} (RG_{pre} P_r)^2 BR_L \\ N_{sh} = 2q(RG_{pre} P_r + I_d) BR_L \\ N_{a-a} = [\eta F_n (G_{pre} - 1)]^2 B_o BR_L \\ N_{s-a} = 2R\eta q P_r F_n G_{pre} (G_{pre} - 1) BR_L \\ N_{a-sh} = 2qRF_n h\nu (G_{pre} - 1) B_o BR_L \end{cases} \quad (7)$$

式中： k 为玻尔兹曼常数； T 为星上绝对温度； B 为电滤波器带宽； RIN 为相对强度噪声； R_L 为本地阻抗； q 为基本电荷； I_d 为探测器暗电流； $\eta = Rh\nu/q$ 为探测器量子效率； F_n 为前置光放大器噪声指数； B_o 为光滤波器带宽； h 为普朗克常量； ν 为光频率。

发射光功率一定时，接收天线输入平均光功率相等，由(5)式和(7)式可知此时不同调制方式输出信号功率不同，而链路噪声相同，因此不同调制方式对应输出信噪比不同。对于DE-MZM，调制方式有单边带调制、双边带调制和推挽调制。

1.1 单边带调制

$\theta = \pi/2, \beta = \pi/2$ 时为单边带调制方式。将 θ, β 代入(5)式，可得SSB调制时输出信噪比为

$$SNR_{ssb} = \frac{(RP_{in} L_{mzm} G_{OA1} L_T G_T G_R L_{add} G_{pre} J_1(\sqrt{2}m))^2 R_L}{2N} \quad (8)$$

1.2 双边带调制

$\theta = \pi/2, \beta = \pi$ 时为双边带调制方式。将 θ, β 代入(5)式，可得DSB调制时输出信噪比为

$$SNR_{dsb} = \frac{(RP_{in} L_{mzm} G_{OA2} L_T G_T G_R L_{add} G_{pre} J_1(2m))^2 R_L}{2N} \quad (9)$$

1.3 推挽调制方式

$\beta = \pi$ 时MZM为推挽调制方式，DSB调制可以看作是推挽调制方式的一种特殊情况。将 β 代入(5)式，可得推挽调制时输出信噪比为

$$SNR_{pp} = \frac{(RP_{in} L_{mzm} G_{OA3} L_T G_T G_R L_{add} G_{pre} J_1(2m) \sin \theta)^2 R_L}{2N} \quad (10)$$

上式中 $G_{OA1}, G_{OA2}, G_{OA3}$ 分别表示不同调制方式下发射端光放大器增益，调整 $G_{OA1}, G_{OA2}, G_{OA3}$ 使不同调制方式发射光功率相等，链路噪声 N 相同。由(8)式至(10)式可知，链路噪声 N 相同时，SSB和DSB调制输出SNR与调制系数即输入射频信号功率有关，推挽调制时输出SNR与调制系数和直流偏置相位有关。

2 数值模拟与分析

链路中各参数值选取如表1。链路输出端噪声分布情况与发射光功率 $P_T = G_{OA} P_{mzm}$ 关系如图2所示。不同发射光功率时，输出端主导噪声不同，在 $25 \text{ dBm} < P_T < 45 \text{ dBm}$ 范围内 N_{s-a} 为主导噪声。

表1 链路参数值

参数	值
LD输出光功率 P_{in}/mW	50
MZM半波电压 V_π/V	4
MZM插入损耗 L_{mzm}/dB	5
星间距离 Z/km	40 000
收发天线增益孔径 $D_R, D_T/\text{cm}$	25
附加损耗 L_{add}/dB	10
星上绝对温度 T/K	500
光滤波器带宽 B_o/GHz	125
探测器响应度 $R/(\text{A/W})$	0.8
前置光放大器增益 G_{pre}/dB	25
前置光放大器噪声指数 F_n/dB	3
电滤波器带宽 B/MHz	500

设发射光功率 P_T 为40 dBm。图3为SSB和DSB调制时输出信号功率与输入射频信号功率关系。由于贝塞尔函数项影响，在小信号情况下DSB调制比SSB调制输出信号功率高3 dB，输入射频信号功率足够大时输出信号产生振荡。对于星间微波光子链路，由于输入射频信号功率低，因此在相同发射光功率情况下，DSB调制比SSB调制输出SNR高3 dB。SSB和DSB调制输出SNR与输入射频功率关系如图4所示。SNR随 P_{in} 增大而增大，当射频信号功率为-20 dBm时，SSB和

DSB 调制输出 SNR 分别为 -1.4 dB 和 1.6 dB, 不能够满足通信要求。

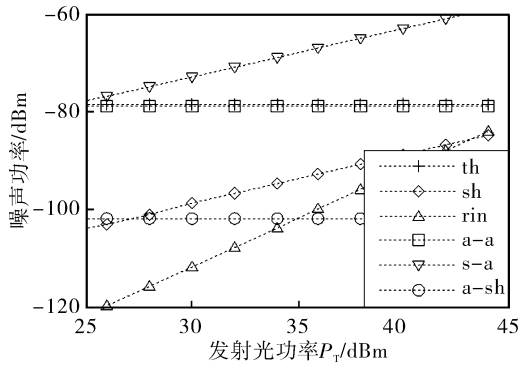


图 2 输出端噪声功率与发射光功率关系

Fig. 2 Output noise power versus optical emission power

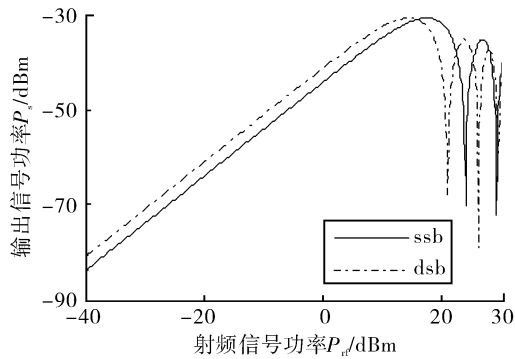


图 3 SSB 和 DSB 调制时输出信号功率与输入射频功率关系

Fig. 3 Output signal power versus input signal power while SSB and DSB modulation

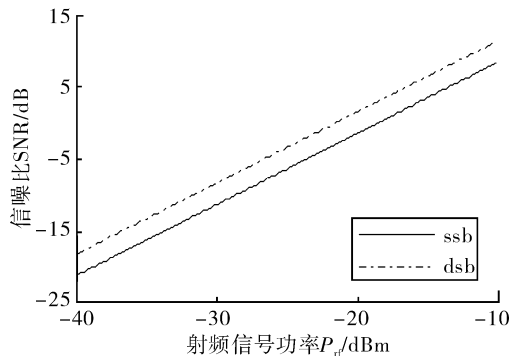


图 4 SSB 和 DSB 调制时输出信噪比与输入射频功率关系

Fig. 4 Output SNR versus input signal power while SSB and DSB modulation

图 5 为推挽调制方式下, 发射光功率为 40 dBm, P_{if} 分别为 -40 dBm、 -30 dBm、 -20 dBm 时, 输出信号功率与调制器直流偏置相位关系。 P_{if} 一定时, P_s 随着 θ 增大而增大, 但在偏置相位 π 附近 P_s 发生突变, 这是因为偏置相位 π 附近非线性失真使一阶光边带功率急剧减小。理论上在低

偏置相位处可以获得高功率输出信号, 因为此时光载波得到很好抑制, 而恒定的发射功率使一阶光边带功率得到放大, 但低直流偏置点处 MZM 输出平均光功率很低, 需要足够高的 OA 增益, 实际中难以做到。因此需要考察一定输出 SNR 条件下所需最小 OA 增益值和对应的直流偏置相位。

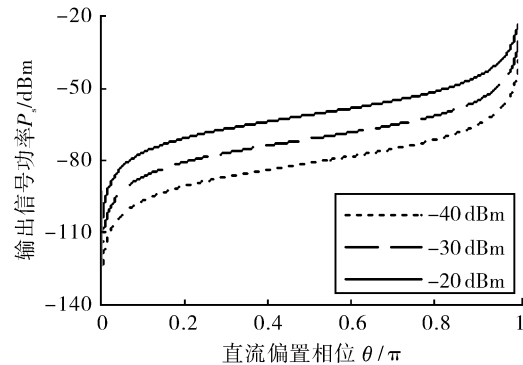


图 5 输出信号功率与 MZM 直流偏置相位关系

Fig. 5 Output signal power versus DC bias phase of MZM

对于一定输出 SNR 要求的链路, 可以利用曲面投影法求得所需最小 G_{OA} 值和对应的最优直流偏置相位。设 P_{if} 为 -20 dBm, SNR 不小于 17.3 dB, 图 6 为 SNR 与 G_{OA} 和 θ 关系。当 θ 一定时, SNR 随 G_{OA} 增大而增大, 但增大速度变慢。当 G_{OA} 一定时, SNR 随 θ 增大先变大然后减小, 在大于 0.5π 某直流偏置相位处存在最大值。不同 G_{OA} 值对应的最优直流偏置相位不同, G_{OA} 值越大, 最优直流偏置相位越靠近 π 。

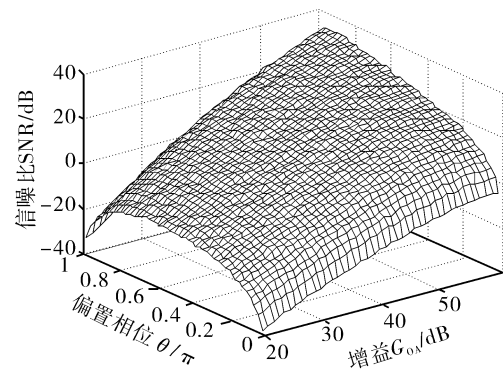


图 6 输出信噪比与 OA 增益和 MZM 直流偏置相位关系

Fig. 6 Output SNR versus OA gain and DC bias phase of MZM

将图 6 曲面投影至 G_{OA} -SNR 轴确定的平面上, 所得图形如图 7 所示。图中曲面投影上边缘曲线表示 OA 增益值和所能得到的最大输出 SNR。SNR 值为 17.3 dB 时, 所需最小 G_{OA} 值为 43.9

dB,此时曲面中 SNR 与 θ 关系如图 8 所示,MZM 最佳直流偏置相位为 0.87π ,发射光功率为 41.5 dB。

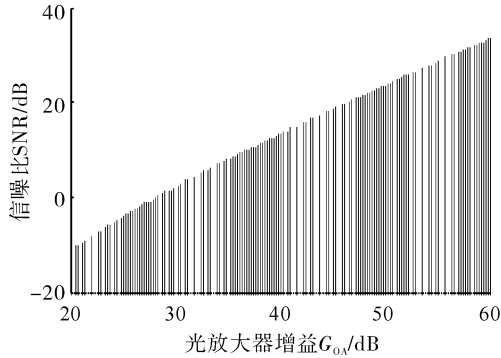


图 7 G_{OA} -SNR 平面上投影平面

Fig. 7 Curved surface projection plane in G_{OA} -SNR plane

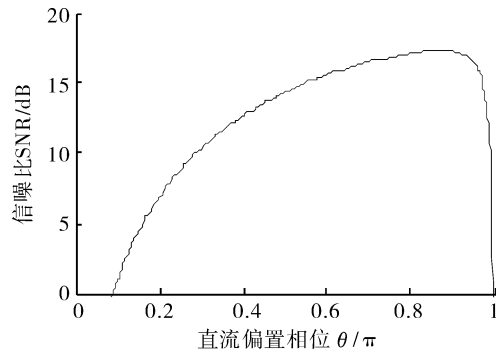


图 8 $G_{OA} = 43.9$ dB 时输出信噪比与 MZM 直流偏置相位关系

Fig. 8 Output SNR versus DC bias phase of MZM while $G_{OA} = 43.9$ dB

3 结论

本文建立了基于 DE-MZM 的外调制星间微波光子链路模型,分析了 SSB、DSB 和推挽调制方式下链路性能,结果表明,输入射频信号功率和发射光功率相同时,DSB 比 SSB 调制输出信噪比高 3 dB,推挽调制方式输出信噪比与调制器直流偏置相位有关,选择合适的直流偏置相位可使链路输出信噪比达到最优。利用曲面投影法得到了一定信噪比要求下发射端所需最小 OA 增益值和对应的最优 MZM 直流偏置相位,输入射频信号功率为 -20 dBm,SNR 值为 17.3 dB 时,所需最小 G_{OA} 值和最优直流偏置相位分别为 43.9 dB 和 0.87π ,对应的发射光功率为 41.5 dB。若需要进一步提高输出 SNR,可以适当增大输入射频信号功率或在接收端采用相干探测方式。

参考文献:

- [1] BENAZET B, SOTOM M, MAIGNAN M, et al. Microwave photonics cross-connect repeater for telecommunication satellites[J]. SPIE, 2006, 6194: 1-7.
- [2] SOTOM M, BENAZET B, LE KERNEC A, et al. Microwave photonic technologies for flexible satellite telecom payloads[C]. Vienna, Australia: ECOC, 2009: 20-24.
- [3] VANZI B M. Optoelectronic devices product assurance guideline for space application[C]. Rhodes, Greece: ICSO, 2010: 8-13.
- [4] YANG Ai-ying, WU De-ming, XU An-shi. A simulation model for polarization mode dispersion in long single mode fibers[J]. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(12): 1461-1463.
- [5] 周光涛,张晓光,沈昱,等. 10Gb/s 光通信传输系统中一阶 PMD 自适应补偿实验[J]. 光子学报, 2004, 33(4): 448-451.
ZHOU Guang-tao, ZHANG Xiao-guang, SHEN Yu, et al. The first-order PMD adaptive compensation experiment in 10Gb/s optical communication system[J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(4): 448-451. (in Chinese with an English abstract)
- [6] 曾军英,翟懿奎,李澄非. 毫米波副载波在光无线通信系统中的传输性能[J]. 电路与系统学报, 2011, 16(3): 8-10.
ZENG Jun-ying, ZHAI Yi-kui, LI Cheng-fei. Transmission performance of the millimeter-wave subcarrier in ROF system[J]. Journal of Circuits and Systems, 2011, 16(3): 8-10. (in Chinese with an English abstract)
- [7] 杨旭生,黄旭光,谢金玲,等. 基于单边带调制的光毫米波产生及其传输性能研究[J]. 光电子·激光, 2011, 22(5): 706-710.
YANG Xu-sheng, HUANG Xu-guang, XIE Jin-ling, et al. Investigation of generation and transmission performance of millimeter-wave based on single-sideband modulation[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2011, 22(5): 706-710. (in Chinese with an English abstract)
- [8] 刘立人. 卫星激光通信 iv 链路和终端技术[J]. 中国激光, 2007, 34(1): 1-18.
LIU Li-ren. Laser communications in space iv optical link and terminal technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(1): 1-18. (in Chinese with an English abstract)

- [9] 刘智颖,胡源,张磊,等. 光通信中的功率计算与通信距离等效验证[J]. 光学学报, 2008, 28(S2): 188-190.
LIU Zhi-ying, HU Yuan, ZHANG Lei, et al. Power calculation and communication distance equivalent demonstration for optical communication [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(S2): 188-190. (in Chinese with an English abstract)
- [10] 詹伟达,李洪祚,王志坚,等. 深空光通信链路特性分析及功率预算[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2011, 12(4): 55-60.
ZHAN Wei-da, LI Hong-zuo, WANG Zhi-jian, et al. Link identity analysis and power budget for deep space optical communications [J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2011, 12(4): 55-60. (in Chinese with an English abstract)
- [11] 朱子行,赵尚弘,么周石,等. 双音调制下星上微波光子系统的交调失真分析[J]. 光学学报, 2012, 32(7): 0706004-1-0706004-7.
ZHU Zi-hang, ZHAO Shang-hong, YAO Zhou-shi, et al. Inter-modulation distortion analysis for on-board microwave photonics system under dual-tone modulation [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(7): 0706004-1-0706004-7. (in Chinese with an English abstract)
- [12] 朱子行,赵尚弘,么周石,等. 交调失真下星间微波光子链路接收灵敏度优化[J]. 光学学报, 2012, 32(9): 0906002-1-0906002-7.
ZHU Zi-hang, ZHAO Shang-hong, YAO Zhou-shi, et al. Receiver sensitivity optimization of intersatellite microwave photonics link considering the effect of intermodulation distortion [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(9): 0906002-1-0906002-7. (in Chinese with an English abstract)
- [13] ZHU Zi-hang, ZHAO Shang-hong, LI Yong-jun, et al. Optimization of intersatellite microwave photonic links by utilizing an optical preamplifier under dual-tone modulation [J]. Applied Optics, 2012, 51(28): 6818-6823.
- [14] SABIDO D J M, KAZOVSKY L G. Dynamic range of optically amplified RF optical links [J]. Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2001, 49(10): 1950-1955.
- [15] POLISHUK A, ARNON S. Optimization of a laser satellite communication system with an optical preamplifier [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2004, 21(7): 1307-1315.
- [16] ARNON S. Performance of a laser satellite network with an optical preamplifier [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2005, 22(4): 708-715.

(上接第 541 页)

- [8] HE Zong-hu, TIAN Fei, ZHU Yi-nian, et al. Long-period gratings in photonic crystal fiber as an optofluorescent label-free biosensor [J]. Biosensors and Bioelectronics, 2011, 26(12): 4774-4778.
- [9] ZHU Yi-nian, HE Zong-hu, DU H. Detection of external refractive index change with high sensitivity using long-period grating in photonic crystal fiber [J]. Sensors and Actuators B, 2008, 131(1): 265-269.
- [10] SERAJI F E, CHEHREGHANI A L, FARSIN-EZHAD S. Design of compact long-period grating imprinted in optimized photonic crystal fibers [J]. Applied Physics B, 2009, 97(2): 425-429.
- [11] ERDOGAN T. Fiber grating spectra [J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(8): 1227-1294.
- [12] 陈卫国, 娄淑琴, 王立文, 等. 光子晶体光纤长周期光栅的特性 [J]. 中国激光, 2009, 36(3): 699-704.
CHEN Wei-guo, LOU Shu-qin, WANG Li-wen, et al. Properties of long period gratings in photonic crystal fibers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(3): 699-704. (in Chinese with an English abstract)
- [13] QIU Min. Analysis of guided modes in photonic crystal fibers using the finite-difference time-domain method [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2001, 30(5): 327-330.