

光放大器对光载微波信号传输效率的改善

肖永川 王超 张浩 张亚标 庾财斌 瞿鹏飞 孙力军

Improvement of transmission efficiency in microwave photonic links using EDFA

XIAO Yong-chuan, WANG chao, ZHANG hao, ZHANG Ya-biao, YU Cai-bin, QU Peng-fei, SUN Li-jun

引用本文:

肖永川, 王超, 张浩, 张亚标, 庾财斌, 瞿鹏飞, 孙力军. 光放大器对光载微波信号传输效率的改善[J]. *中国光学*, 2020, 13(5): 995-1000. doi: 10.37188/CO.2019-0195

XIAO Yong-chuan, WANG chao, ZHANG hao, ZHANG Ya-biao, YU Cai-bin, QU Peng-fei, SUN Li-jun. Improvement of transmission efficiency in microwave photonic links using EDFA[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(5): 995-1000. doi: 10.37188/CO.2019-0195

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2019-0195>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

键合型掺铒纳米晶-聚合物波导放大器的制备

Fabrication of optical waveguide amplifiers based on bonding-type NaYF₄: Er nanoparticles-polymer

中国光学. 2017, 10(2): 219 <https://doi.org/10.3788/CO.20171002.0219>

基于空间光调制器的层析成像技术

Tomography technology based on spatial light modulator

中国光学. 2019, 12(6): 1338 <https://doi.org/10.3788/CO.20191206.1338>

固体激光器与光纤激光器对光子晶体光纤棒耦合的分析与对比

Analysis and comparison of solid-state lasers and fiber lasers on the coupling of rod-type photonic crystal fiber

中国光学. 2018, 11(6): 958 <https://doi.org/10.3788/CO.20181106.0958>

瓦级319nm单频连续紫外激光的实现及铯原子单光子Rydberg激发

Realization of a watt-level 319-nm single-frequency CW ultraviolet laser and its application in single-photon Rydberg excitation of cesium atoms

中国光学. 2019, 12(4): 701 <https://doi.org/10.3788/CO.20191204.0701>

采用BCB平整技术的高速850 nm垂直面发射激光器

High-speed 850 nm vertical-cavity surface-emitting lasers with BCB planarization technique

中国光学. 2018, 11(2): 190 <https://doi.org/10.3788/CO.20181102.0190>

硅光子芯片外腔窄线宽半导体激光器

Narrow linewidth external cavity semiconductor laser based on silicon photonic chip

中国光学. 2019, 12(2): 229 <https://doi.org/10.3788/CO.20191202.0229>

文章编号 2095-1531(2020)05-0995-06

光放大器对光载微波信号传输效率的改善

肖永川^{1*}, 王超^{1,2}, 张浩¹, 张亚标¹, 庾财斌¹, 瞿鹏飞¹, 孙力军¹

(1. 重庆光电技术研究所, 重庆 400060;

2. 模拟集成电路重点实验室, 重庆 400060)

摘要:针对现有微波光传输系统存在电光转换效率不足的问题, 本文设计了一种基于调制器低偏与光放大器相结合的光发射结构, 通过充分利用链路增益与光功率水平之间的平方关系以及低偏链路传输效率与光功率呈近似线性变化的特点, 实现了光载微波信号传输效率的有效提升。经过测试可知, 本方案较常规正交点传输方式在射频增益方面提高了13.5 dB, 同时不会使噪声系数产生明显恶化, 并且本方案可以采用现成产品以实现低成本制作, 在电子信息装备中具有广泛的应用潜力。

关键词:微波光子; 模拟光发射; 调制器低偏; 光放大器

中图分类号: TN29 文献标志码: A doi: [10.37188/CO.2019-0195](https://doi.org/10.37188/CO.2019-0195)

Improvement of transmission efficiency in microwave photonic links using EDFA

XIAO Yong-chuan^{1*}, WANG chao^{1,2}, ZHANG hao¹, ZHANG Ya-biao¹, YU Cai-bin¹,
QU Peng-fei¹, SUN Li-jun¹

(1. *Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, China;*

2. *Science and Technology on Analog Integrated Circuit Laboratory, Chongqing 400060, China*)

* *Corresponding author, E-mail: xycwqy@163.com*

Abstract: Photonics have long been viewed as an enabling technology that extends the sensing and signal processing performances of Radio Frequency (RF) remoting systems such as radar and electronic-warfare because of its inherent advantages in multi-octave operating frequencies, broad instantaneous bandwidth, low transmission loss, and good phase linearity. In order to improve the efficiency of the analog optical transmitter during electronic-to-optical conversion, an Erbium-Doped Fiber Amplifier (EDFA) combing with a low-bias modulator in an external intensity modulation direct detection link is applied. According to our analysis, the RF gain reduces linearly with modulator's optical power output when the bias becomes close to its minimum. Thus, the gain provided by the EDFA to the optical signal was transferred to increase RF transmission efficiency. Experimental results indicated that the RF gain improved by 13.5 dB compared to that of conven-

收稿日期: 2019-09-25; 修订日期: 2019-11-11

基金项目: 重庆市博士后科学基金项目 (No. CSTC2019jcyj-bshx0103)

Supported by Postdoctoral Science Foundation of Chongqing (No. CSTC2019jcyj-bshx0103)

tional quadrature bias point transmissions. Meanwhile, a small penalty is introduced to system noise. Most importantly, this can be achieved by using off-the-shelf devices, which can drastically reduce the system's cost. Finally, the proposed scheme can be widely used in electronic information equipment.

Key words: microwave photonics; analog optical transmitter; modulator low-bias; optical amplifier

1 引言

微波光子技术是一门结合了光子技术与微波技术各自优势并进行深度融合的新技术,该技术在国内外得到了广泛研究^[1-2]。微波光子技术具有工作频段宽、瞬时带宽大、传输损耗低、相位线性度好、重量轻等优点,微波光子技术在传感、雷达、电子对抗及测控等领域具有广泛的应用潜力^[3-10]。尽管微波光子技术有很多优势,但是光载微波信号传输的电光互转换过程由于受到器件水平的限制,存在转换效率低的不足^[11]。常规微波光传输链路中主要通过直接调制与外调制两种形式来完成微波到光的调制,其中直接调制方式采用单个激光器实现电光转换,而外调制方式采用分立的激光器与电光调制器共同完成,因此外调制方式在优化微波信号传输性能方面具有更高的灵活性。已有文献报导了诸如大功率光源与高阈值功率调制器相结合以及采用相位调制相干解调等方案来提高效率、降低噪声系数及提高动态范围,但是这些方案不仅需要复杂的系统架构,对器件性能参数也提出了非常严苛的要求,会极大地增加光收发部分的体积、重量、功耗及成本,因此,限制了这些方案的工程化应用^[12-14]。

本文针对外调制链路存在传输效率不足的问题,提出采用调制器低偏与光放大器相结合的方式来提高微波光子链路的射频增益,并制作了相应模块对其指标进行测试验证。结果表明链路传输效率提高了 13.5 dB,最重要的是本方案可以采用常规货架产品低成本实现。

2 总体方案

本微波光传输链路架构如图 1(彩图见期刊电子版)所示,它可以分成光发射与光接收两部分,其中光发射部分包括连续光激光器(CW)与驱动控制电路、马赫增德尔型铌酸锂电光调制器

(MZM)与偏置控制电路以及掺饵光纤放大器(EDFA)这 3 个功能单元,光接收部分采用具有平方率响应的 PIN 光电探测器(PD)。激光器驱动控制电路完成自动功率与自动温度控制,保证激光器输出功率与波长的稳定性;调制器驱动电路通过闭环反馈控制让调制器稳定工作在设定的偏置点位置;光放大器用于放大光载微波信号,使其光链路具有合适的光功率水平。在本方案中,将调制器设定在低偏工作点,其输出信号直接送入光放大器,这样,光放大器对光信号的放大作用就会转换为微波信号的有效增益,采用这种方式不仅可以使微波信号得到更高的附加增益,而且还可以避免采用价格昂贵的高输出功率保偏光放大器及耐受高光功率的电光调制器,从而极大地降低整个系统的成本。

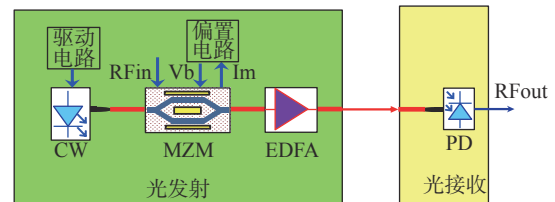


图 1 微波光传输链路构成

Fig. 1 The structure of microwave optical transmission link

为了分析上述链路对微波信号传输效率的影响,根据各器件的数学模型建立了光载微波信号的传递关系。连续光激光器提供光载波注入到调制器,调制器利用电光效应完成对微波信号的调制,调制后的光载微波信号可表示为^[15]:

$$E_{\text{MZM}} = \frac{\sqrt{P_{\text{LD}} L_{\text{MZM}}}}{2} e^{j\omega_c t} (e^{j\theta_{\text{RF}}} - e^{j\theta_{\text{B}}}), \quad (1)$$

其中 $\theta_{\text{RF}} = \frac{\pi V_{\text{RF}} \cos(\omega_{\text{RF}} t)}{V_{\pi\text{RF}}}$, $\theta_{\text{B}} = \frac{\pi V_{\text{B}}}{V_{\pi\text{DC}}}$ 。式中 P_{LD} 为激光器输出光功率, ω_c 为激光器角频率, L_{MZM} 为调制器光插损, V_{RF} 为射频电压, V_{B} 为直流偏置电压, $V_{\pi\text{RF}}$ 为调制器射频半波电压, $V_{\pi\text{DC}}$ 为调制器直流半波电压。

然后, 将调制得到的光载微波信号输入光放大器进行放大处理, 放大后的输出信号可表示为:

$$E_{\text{EDFA}} = \frac{\sqrt{P_{\text{LD}} L_{\text{MZM}} G_{\text{EDFA}}}}{2} e^{j\omega_c t} (e^{j\theta_{\text{RF}}} - e^{j\theta_{\text{B}}}), \quad (2)$$

式中 G_{EDFA} 为光放大器增益。

最后, 在探测器平方率响应特性的作用下, 光载微波信号从光域转换到电域, 恢复出微波信号, 其输出电流可表示为:

$$I_{\text{PD}}(t) = \frac{RP_{\text{LD}} L_{\text{MZM}} G_{\text{EDFA}}}{2} \times \left\{ 1 - \cos \left[\frac{\pi V_{\text{RF}} \cos(\omega_{\text{RF}} t)}{V_{\pi\text{RF}}} + \frac{\pi V_{\text{B}}}{V_{\pi\text{DC}}} \right] \right\}, \quad (3)$$

式中 R 为探测器响应度。

3 光载微波信号传输效率分析

根据公式 (3) 可知, 微波信号在光链路中的传输效率可表示为:

$$G_{\text{RF}} = 10 \lg \left(\frac{P_{\text{RFout}}}{P_{\text{RFin}}} \right) = 10 \lg \left\{ \frac{[RP_{\text{LD}} L_{\text{MZM}} G_{\text{EDFA}} \sin \theta_{\text{B}} J_1 (\pi V_{\text{RF}} / V_{\pi\text{RF}})]^2 Z_{\text{in}} Z_{\text{out}}}{V_{\pi\text{RF}}^2} \right\}, \quad (4)$$

式中 Z_{in} 与 Z_{out} 分别为输入输出阻抗, J_1 为 1 阶第一类贝塞尔函数。从式 (4) 可知, 链路传输效率与激光器出光功率、调制器光插损与射频半波电压、调制器偏置点位置、光放大器增益及探测器响应度有关, 且呈平方关系。

不考虑光放大器的影响, 根据式 (1) 和式 (4) 可分别计算出调制器出光功率与偏置点位置的对应关系以及链路增益随偏置点位置的变化关系, 如图 2 所示。其中调制器出光功率以与正交点对应的输出光功率为参考进行归一化处理, 而链路射频增益则以最大值为基准进行归一化处理。从图 2 可知, 调制器偏置点从 0 到 180° 变化时, 其输出光功率逐渐增大, 且正交点 (90°) 对应的出光功率为最大功率的一半; 而链路增益在正交点处达到最大, 之后, 随着偏置点位置远离正交点, 增益逐渐减小。需要注意的是, 虽然随着偏置点向低偏位置移动导致链路增益减小, 但是其减小的

速度比光功率减小的速度慢, 同时, 根据公式 (4) 可知, 链路增益与光功率的变化呈平方关系, 因此, 可以推断出如果在调制器的输出端增加光放大器并将调制器工作在低偏点就可以达到改善链路传输效率的目的。

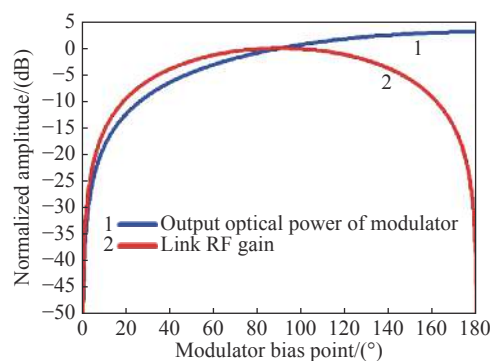


图 2 调制器出光功率及链路增益随偏置点位置的变化关系
Fig. 2 The output optical power of modulator and link RF gain varying with modulator's bias point

考虑到探测器饱和功率的限制, 假设光放大器只补偿由于低偏引起的光功率减少而使进探测器的光功率与正交点时保持一致, 则可以计算出不同偏置位置处光放大器可提供的光增益, 其对应关系如图 3 所示。图 3 还对比了光放大器增益对链路射频传输效率的影响, 图中链路附加增益指低偏与光放大相结合时链路的射频增益与正交点对应的链路增益之差。从图 3 可知, 偏置点位置离最小点越近, 光放大器可以提供的增益越高, 链路附加增益也会越大, 从而达到有效提高链路传输效率的目的。

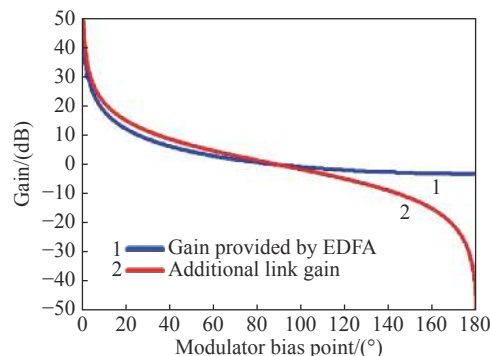


图 3 光放大器有效增益与链路附加增益随偏置点位置的变化关系
Fig. 3 The gain provided by EDFA and the additional link gain varying with modulator's bias point

4 实验结果

根据图 1 的链路架构, 本文制作了如图 4(a) 所示的光发射模块。其中: 激光器采用本单位研制的 50 mW 高功率、低相对强度噪声 DFB 激光

器; 调制器采用本单位研制的 S 波段低半波电压铌酸锂电光调制器; 光放大器采用中国电子科技集团公司第二十三研究所研制的恒功率输出模式掺铒光纤放大器; 而光接收部分采用本单位研制的 GD45220R 型高响应度 PIN 探测器, 如图 4(b) 所示。

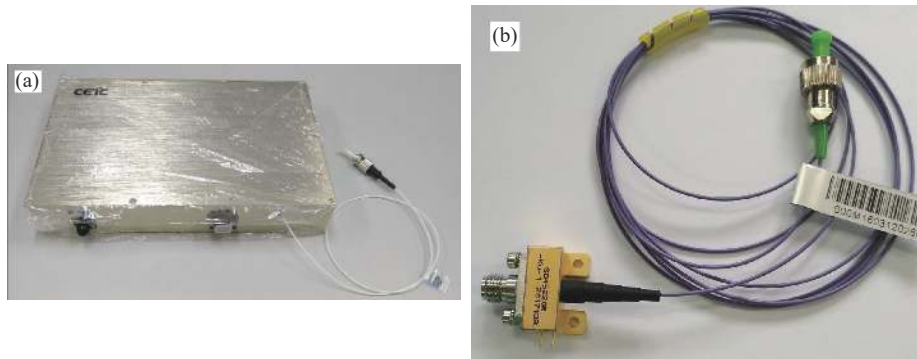


图 4 (a)光发射模块与(b)光电探测器

Fig. 4 (a) Optical transmitter and (b) photo-detector

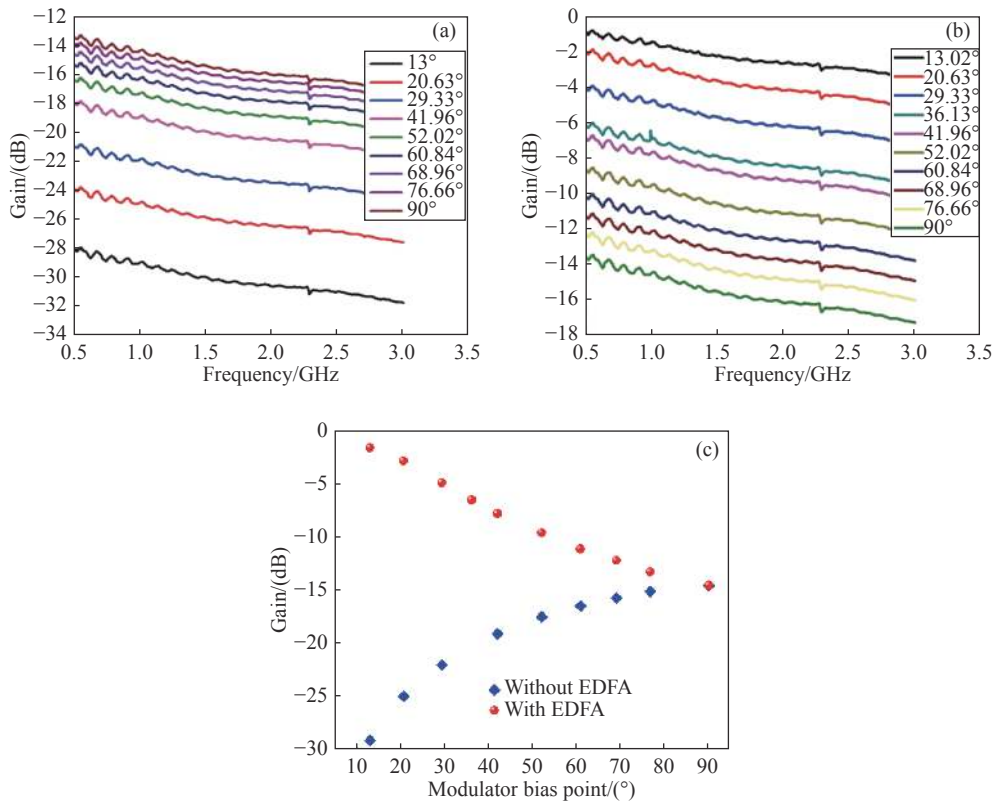


图 5 不同偏置点条件下链路增益随频率的变化情况。(a)不加光放大器;(b)加光放大器;(c)在 1 GHz 频点处增益随偏置点位置的变化情况

Fig. 5 The RF gain versus RF frequency under the condition of different bias points. (a) Without EDFA; (b) with EDFA; (c) gain versus position of bias point at the frequency of 1 GHz.

本文测试了在不加光放大器时, 不同调制器偏置点位置条件下, 链路增益随频率的变化关系, 如图 5(a)(彩图见期刊电子版)所示。此外, 对比测试了调制器输出端增加恒输出功率光放大器后, 链路增益随频率的变化关系, 如图 5(b)(彩图见期刊电子版)所示。并分析了在 EDFA 的作用下 1 GHz 频点处传输效率随偏置位置的变化关系, 如图 5(c) 所示, 从图 5 可知, 采用光放大器与调制器低偏相结合的方式, 链路传输效率最大可以提高约 13.5 dB。需要注意的是, 采用这种方式可获得的最大附加增益与调制器的消光比、光放大器的动态范围及输入射频信号的强度相关。

在图 6(a) 和图 6(b) 中, 测试了不同偏置点条件下链路噪声系数随频率的变化关系, 图 6(c) 为 1 GHz 频点处噪声系数随偏置点位置的变化情况。从图 6 可知, 在不加光放大器时, 随着偏置点从正交点向最小点移动, 噪声系数先减小再增加。其主要原因是随着偏置点从正交点逐步向低

频点移动时, 链路增益的减小速度慢于光功率的减少速度。当调制器工作在正交点时, 输出噪声由激光器相对强度噪声与探测器散粒噪声共同决定, 因此, 随着调制器低偏的进行, 输出噪声功率减小的速度快于射频增益减小的速度, 从而使得链路噪声系数减小。当调制器低偏接近最小点时, 输出噪声逐步受限于热噪声, 因此, 输出噪声功率达到恒定, 而链路增益进一步降低, 从而造成噪声系数迅速增大。接着, 对比测试了增加光放大器时的噪声系数变化情况, 从图中可知引入光放大器后, 由于光放大器自发辐射噪声的影响, 在正交点处噪声系数恶化程度接近 5 dB, 但是随着调制器低偏程度的增加, 噪声系数仍然按照先减小再增大的规律变化。可以看出, 最小噪声系数与不加光放大器时差别不大, 说明即使加了光放大器也可以通过调制器低偏使其对链路整体噪声有较小的影响。

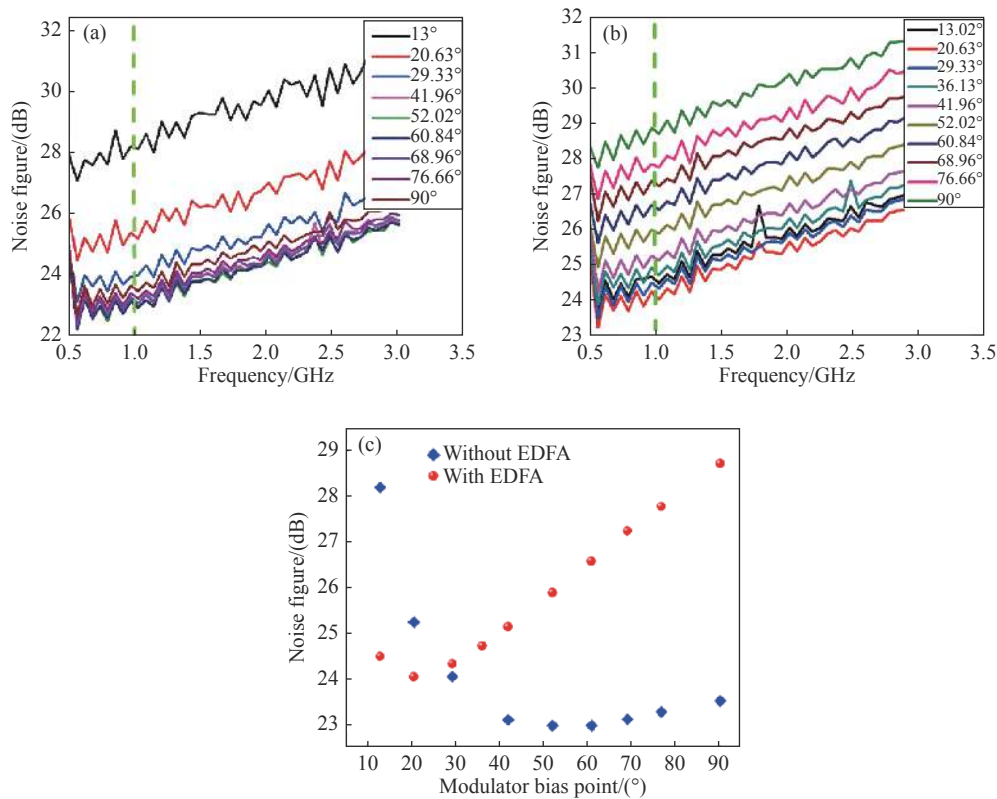


图 6 不同偏置点条件下链路噪声系数随频率的变化情况。(a)不加光放大器; (b)加光放大器; (c)在 1 GHz 频点处噪声系数随偏置点位置的变化情况

Fig. 6 Noise figure versus RF frequency under the condition of different bias points. (a) Without EDFA; (b) with EDFA; (c) noise figure versus position of bias point at the frequency of 1 GHz.

5 结 论

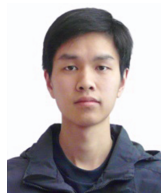
本文采用调制器低偏与光放大器相结合的方式提高微波信号在光链路中的传输效率。文中对比分析了低偏对链路传输效率的影响以及增加光放大器后对链路传输效率的改善,并采用常规货

架产品制作了相应的光收发模块。经过测试可知,调制器低偏与光放大器相结合的架构较常规正交点传输方式在链路增益方面提高了 13.5 dB,同时噪声系数没有产生明显恶化。由此可知,将调制器低偏与光放大器相结合可有效改善微波光链路的传输效率,该光收发模块在射频拉远、功分网络及信号标校等系统中有潜在的应用价值。

参考文献:

- [1] CAPMANY J, NOVAK D. Microwave photonics combines two worlds[J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(6): 319-330.
- [2] YAO J P. Microwave photonics[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(3): 314-335.
- [3] 李丽, 林玉池, 付鲁华, 等. 光纤光栅空分光复用传感系统的研究[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(4): 473-477.
LI L, LIN Y CH, FU L H, *et al.*. Research on spatial division multiplexing of fiber Bragg grating sensors[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(4): 473-477. (in Chinese)
- [4] HERVÁS J, RICCHIUTI A L, LI W, *et al.*. Microwave photonics for optical sensors[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, 23(2): 560-2013.
- [5] PAN SH L, YAO J P. Photonics-based broadband microwave measurement[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(16): 3498-3513.
- [6] 李冠鹏, 王辉, 张邦宏, 等. 用于雷达回波仿真的小型化微波光纤延迟线[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(5): 1206-1212.
LI G P, WANG H, ZHANG B H, *et al.*. Compact microwave fiber delay line for radar echo simulation[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(5): 1206-1212. (in Chinese)
- [7] GHELFI P, LAGHEZZA F, SCOTTI F, *et al.*. A fully photonics-based coherent radar system[J]. *Nature*, 2014, 507(7492): 341-345.
- [8] 王云新, 李静楠, 杜浩峥, 等. 基于强度-相位级联调制的微波光子下变频法[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(4): 827-834.
WANG Y X, LI J N, DU H ZH, *et al.*. Microwave photonic down-conversion method using intensity-phase cascaded modulation[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(4): 827-834. (in Chinese)
- [9] ZOU X H, BAI W L, CHEN W, *et al.*. Microwave photonics for featured applications in high-speed railways: communications, detection, and sensing[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(19): 4337-4346.
- [10] SALES S, BARREA D, HERVÁS J, *et al.*. Microwave photonics for optical fiber sensors[C]. *Proceedings of 2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition*, IEEE, 2019: 1-3.
- [11] CAPMANY J, LI G F, LIM C, *et al.*. Microwave photonics: current challenges towards widespread application[J]. *Optics Express*, 2013, 21(19): 22862-22867.
- [12] KARIM A, DEVENPORT J. High dynamic range microwave photonic links for RF signal transport and RF-IF conversion[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, 26(15): 2718-2724.
- [13] LI Y F, XU L T, JIN SH L, *et al.*. Wideband OPLL photonic integrated circuit enabling ultrahigh dynamic range PM RF/photonic link[J]. *Optica*, 2019, 6(8): 1078-1083.
- [14] KARIM A, DEVENPORT J. Optimization of linearity figure of merit for microwave photonic links[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, 21(13): 950-952.
- [15] URICK V J, BUCHOLTZ F, MCKINNEY J D, *et al.*. Long-haul analog photonics[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(8): 1182-1205.

作者简介:



肖永川(1987—),男,重庆人,博士,高级工程师,2015年于吉林大学获得博士学位,主要从事微波光传输与处理技术方面的研究。E-mail: xycwqy@163.com