

通过半导体光放大器抑制光通信噪声的方法研究

王徐啸^{1,2}, 叶全意^{2*}, 胡兴柳³

(1. 南京邮电大学电子与光学工程学院, 江苏 南京 210003; 2. 金陵科技学院网络与通信工程学院, 江苏 南京 211169; 3. 金陵科技学院智能科学与控制工程学院, 江苏 南京 211169)

摘要:提出一种通过半导体光放大器(SOA, semiconductor optical amplifiers)抑制光通信系统中激光器的相对强度噪声, 进而提升信噪比的方法。该方案利用半导体光放大器增益饱和特性, 检测光信号和半导体光放大器的输出信号的噪声功率以及信噪比。通过 optisystem 仿真发现, 使用 SOA 放大的光信号系统输出信号的噪声功率远小于激光器直接生成光信号系统输出信号的噪声功率。

关键词: 半导体光放大器; 光通信; 相对强度噪声; 噪声抑制; 激光器

中图分类号: TN722

文献标识码: A

文章编号: 1672-755X(2019)03-0032-05

A Method of Suppressing Signal Noise of Optical Communication by Semiconductor Optical Amplifier

WANG Xu-xiao^{1,2}, YE Quan-yi^{2*}, HU Xing-liu²

(1. Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China;

2. Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China)

Abstract: In this paper, a method of suppressing the relative intensity noise of laser in optical communication system by semiconductor optical amplifiers (SOA) is proposed, which can improve the signal-to-noise ratio (SNR). The scheme utilizes gain saturation characteristics of semiconductor optical amplifier, and detects noise power and signal-to-noise ratio of optical signal and output signal of semiconductor optical amplifier. Optisystem simulation shows that the noise power of the output signal of the optical signal system amplified by SOA is much less than that of the output signal of the optical signal system directly generated by laser.

Key words: semiconductor optical amplifiers; optical communication; relative intensity noise; noise suppression; laser

射频光信号传输 RoF(Radio over Fiber)链路系统是结合了光通信技术的大容量、高带宽和微波通信技术抗干扰优势的综合应用, 并在民用光通信、军用雷达等领域发挥了巨大的作用^[1-2]。RoF 链路一般由激光器、调制器、传输光纤以及解调器组成。其中, 激光器产生激光, 需要传输的信号通过调制器调制到光载波上再通过光纤进行传输, 在接收端由探测器接收将其还原成电信号^[3]。

对于 RoF 链路系统而言, 噪声的存在使得链路的性能包括其动态范围等受到限制^[4]。如何抑制光通

收稿日期: 2019-05-25

基金项目: 江苏省高校自然科学研究面上项目(16KJB510010); 江苏省自然科学基金(BK201711114); 金陵科技学院孵化项目(jit-fhxm-201606); 金陵科技学院人才引进项目(jit-rcyj-201604)

作者简介: 王徐啸(1995—), 男, 陕西渭南人, 硕士研究生, 主要从事微波光子学研究。

通信作者: 叶全意(1982—), 女, 江西婺源人, 副教授, 博士, 主要从事微波光子学、光通讯方面的研究。

信系统中的噪声是其大规模应用的关键,国内外已有不少研究^[4-6]。山西大学张靖等提出通过反馈回路抑制激光器输出光强噪声的光电反馈法^[5],河南大学的曹雪提出通过外接电信号补偿传输信号相位噪声的相位补偿法^[6],北京交通大学刘振提出通过锁相环锁定电信号相位来抑制相位噪声的锁相环路法^[7]。传统抑制光通信系统噪声的方法普遍有结构复杂、容易引入外来噪声等缺点。本文利用半导体光放大器(SOA)的饱和工作区域抑制激光器的相对强度噪声的特性,以此抑制输出信号的噪声功率,比传统反馈法结构简单并可以避免引入外界噪声。而且,半导体光放大器未来可以集成光源和调制器,这样可进一步降低系统的体积。

1 光通信 RoF 链路的噪声

光通信系统输出信号的信噪比是判断信号质量的重要参数,信噪比 SNR(Signal Noise Ratio)定义为信号的平均功率 $\overline{P_s}$ 与噪声功率 δ_{noise}^2 的比值。

$$\text{SNR} = \frac{\overline{P_s}}{\delta_{\text{noise}}^2} \quad (1)$$

光通信系统噪声主要来源于光源的相对强度噪声、元器件的热噪声、光子涨落的散弹噪声等^[8-9]。一定时间 T 内光源的相对强度噪声^[2]为

$$\delta_{\text{rin}}^2 = \bar{I}^2 t_r T \quad (2)$$

由约翰逊公式得,一定时间 T 内热噪声为

$$\delta_{\text{tem}}^2 = \frac{4KT_{\text{tem}}}{TR} \quad (3)$$

由肖特基公式可得,一定时间 T 内散弹噪声

$$\delta_{\text{shot}}^2 = \frac{2e\bar{I}}{T} \quad (4)$$

上式中, e 为电子电量, $\bar{I}$ 为平均光电流, t_r 表示光的自相干时间。

比较相对强度噪声、热噪声、散弹噪声可以看出:玻尔兹曼常数的数量级是 10^{-23} 级,这导致热噪声量级最小;相对强度噪声与平均光电流平方 $\bar{I}^2$ 成正比;散弹噪声与平均光电流 $\bar{I}$ 成正比,在光电流较小时散弹噪声为主,而在光电流较高时,相对强度噪声则为主。当光功率较高时,激光器相对强度噪声占系统噪声的主要地位,通过抑制这部分噪声,就能降低输出信号噪声功率,并提高信噪比。

2 半导体光放大器(SOA)

SOA 的非线性放大特性对于光源的相对强度噪声有抑制效果,当光放大器接收到光源信号时可以得到半导体激光器速率方程^[8]。

$$\begin{aligned} \frac{\partial W}{\partial z} - \frac{1}{v_g} \frac{\partial W}{\partial t} &= [\Gamma g(N) - S_{\text{int}}] W \\ \frac{\partial N}{\partial t} &= \frac{I}{qv} - \frac{N}{t_s} - \frac{\Gamma}{h\nu A} g(N) W \end{aligned} \quad (5)$$

式中, W 为光源功率, N 为内部的载流子密度, v_g 为群速度, Γ 为光源信号的耦合效率, S_{int} 为 SOA 内部损耗系数, $g(N)$ 为元件增益参数, I 为输入光放大器的电流密度, q 为电子电荷量, h 为普朗克常数, A 为 SOA 有源层面积, t_s 为载流子寿命, ν 为输入激光频率。

$\bar{W}$ 为光源功率平均值, $\bar{N}$ 为 SOA 的载流子密度平均值,对式(5)做傅立叶变换可得:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta W}{\partial z} &= j \frac{\omega}{v_g} \Delta W + [\Gamma g(\bar{N}) - S_{\text{int}}] \Delta W + \Gamma \alpha \Delta N \bar{W}(z) \\ \Delta N &= - \frac{\Gamma g(\bar{N}) \Delta W}{h\nu A} \cdot \frac{1}{j\omega + \frac{1}{t_s} + \frac{\Gamma S \bar{W}}{h\nu A}} \end{aligned} \quad (6)$$

ΔW 、 ΔN 分别为光源和载流子密度在工作频率 ω 处的噪声大小,式(7)表示了光源强度噪声 ΔW 和光源载

流子密度 ΔN 在工作频率为 ω 时沿着 SOA 工作方向的变化趋势。由式(7)可以看出 $\Delta N \propto -\Delta p$, 当输入的光源功率增大时, 载流子密度会减小; 当输入光源功率减小时, 载流子密度会增大。

SOA 沿 z 方向为 0 到 l , 光源强度噪声变化率为^[9]:

$$a_{\text{rin}} = 20 \lg \left[\frac{\left(\frac{\bar{W}(l)}{\bar{W}(0)} \right)}{\left(\frac{\Delta W(l)}{\Delta W(0)} \right)} \right] = 20 \lg \exp \left\{ \frac{\Gamma g(\bar{N}) - S_{\text{int}} \left(j\omega + \frac{1}{t_s} + \frac{\Gamma S \bar{W}}{A h v} \right)}{\left(j\omega + \frac{1}{t_s} + \frac{\Gamma S \bar{W}}{A h v} \right) j \frac{\omega}{v_g} - S_{\text{int}} + \Gamma g(\bar{N}) \left(j\omega + \frac{1}{t_s} \right)} \right\} \quad (7)$$

由于 ΔN 和 Δp 的负相关特性, Δp 越大, $-\Delta N$ 就越大, 对 Δp 增加时的抑制力就越大, 此时光源相对强度噪声曲线变化率 a_{rin} 会变小, 强度噪声增大速率会越来越慢。当输入功率达到一定大小时, 增速会变成 0, 如图 1 所示。

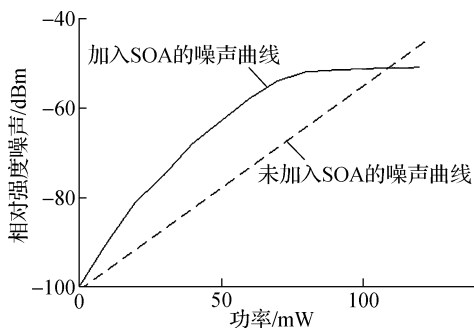


图 1 SOA 对相对强度噪声曲线的影响

根据图 1 可见, 随着光信号功率逐渐升高, 光信号的相对强度噪声逐渐增大。当功率达到 80 mW 以后, 加入 SOA 的光信号噪声逐渐达到稳定值, 约为 -50 dBm。当功率达到 100 mW 以后, 加入 SOA 的光信号, 相对强度噪声会得到明显的抑制, 结论符合公式(7)对光强度噪声的分析, 结合公式(2)一式(4)大功率下相对强度噪声的抑制会降低输出信号的噪声。

3 SOA 噪声抑制效果的仿真实验

3.1 确定 SOA 饱和工作电流

使用 optisystem 7 软件进行仿真, 将激光器与 SOA、光功率计连接。设激光器输出光功率为 10 mW, 调节 SOA 工作电流得到不同驱动电流下的输出功率, 如图 2 所示。

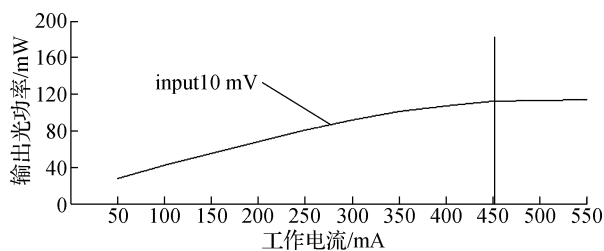


图 2 不同驱动电流下的输出功率

根据图 2 可知, 输出光功率增速随驱动电流增大而逐渐减小。当驱动电流达到 450 mA 后输出功率随驱动电流变化曲线变得接近直线, 此时 SOA 达到饱和状态, 因此选用 450 mA 作为后续仿真实验 1 与仿真实验 2 中光放大器的工作电流。

3.2 仿真实验 1: SOA 抑制激光器相对强度噪声

以 450 mA 作为 SOA 驱动电流。仿真结构如图 3: 两个激光器, 一个连接 SOA 一个不连接, 在两个激光器输出端和 SOA 输出端连接光功率计、光谱仪, 同步调节两个激光器的输出功率并记录检测装置的数据, 得到饱和光电流区域 SOA 噪声抑制效果(图 4)。

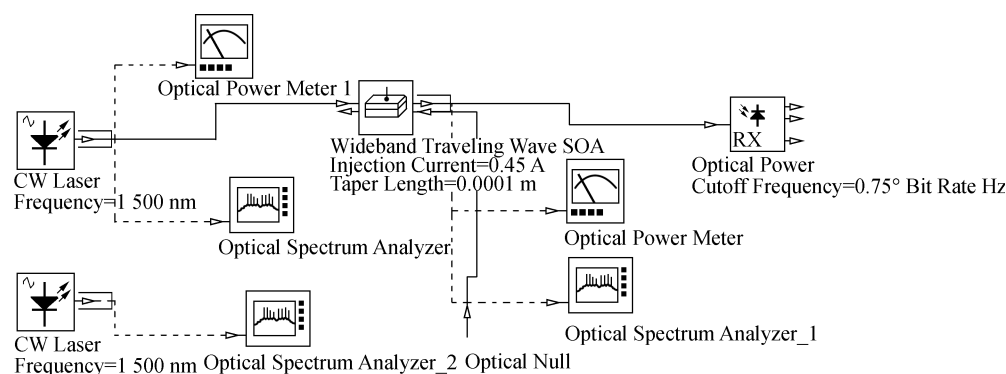


图3 SOA抑制激光器相对强度噪声的系统仿真结构

如图4所示:随着输入光功率增大,输出噪声功率也在增大。加入SOA的输出信号噪声会得到明显改善,且功率越大,噪声功率改善效果越好。当功率达到100 mW时,加入SOA的信号噪声峰会降低18 dBm左右,信号功率达到300 mW时,加入SOA的信号噪声峰降低26 dBm。可见饱和状态下输入光功率越高,SOA抑制光源相对强度噪声的效果越好。

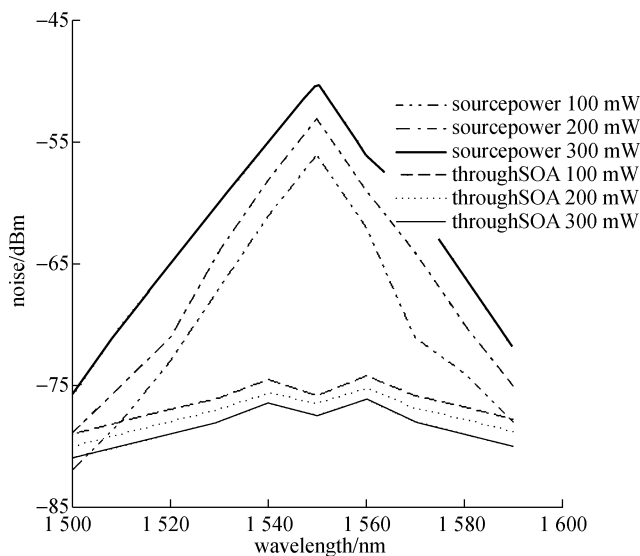


图4 饱和光电流区域SOA噪声抑制效果

3.3 仿真实验2:SOA抑制输出射频信号噪声

仿真结构如图5:激光器与SOA、强度调制器相连,强度调制器与光电检测器(PD)、信号发生器相连,激光器输出端连接光功率计,PD输出端连接频谱仪与示波器。SOA工作电流为450 mA,输入PD前的光功率为201 mW。根据仿真结果得到输出信号噪声功率对比,如图6所示,信号输出情况如表1所示。

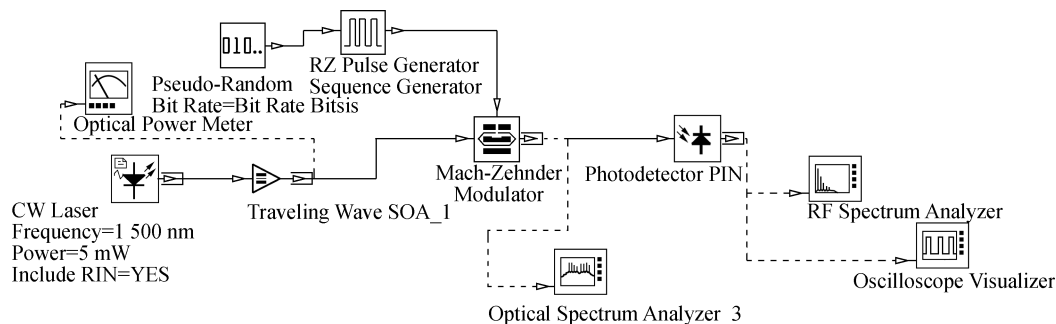


图5 SOA抑制输出射频信号噪声的系统仿真结构

由仿真结果可知,输入 PD 前都是 201 mW 的光强,未加入 SOA 的输出信号噪声谱密度集中在 $-65\sim-70\text{ dB}\cdot\text{Hz}^{-1}$ 。加入半 SOA 的输出信号噪声谱在 $-85\sim-95\text{ dB}\cdot\text{Hz}^{-1}$ 。加入 SOA 的输出信号噪声降低了 $20\text{ dB}\cdot\text{Hz}^{-1}$ 。由此可见饱和区域下 SOA 可以抑制 RoF 链路中激光器相对强度噪声并降低输出信号的噪声功率。

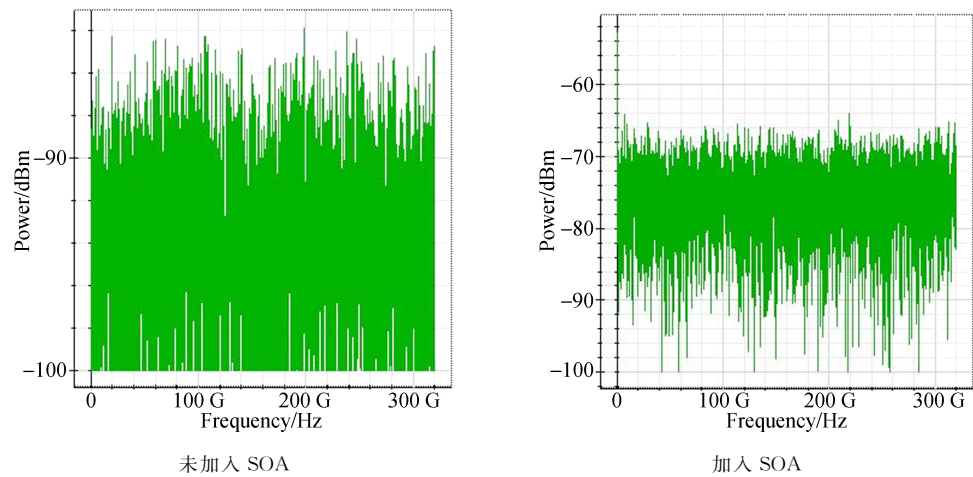


图 6 输出信号噪声功率对比

表 1 信号输出情况

项目	信号功率/W	噪声功率/W	信噪比/dB
加入 SOA	2.403×10^{-3}	2.539×10^{-9}	59.76
不加入 SOA	2.438×10^{-3}	2.058×10^{-6}	30.74

可以看出进入调制器前都是 201 mW 的光信号,加入 SOA 的输出信号功率不变,噪声功率降低 3 个数量级,信噪比提高了 29 dB。可见饱和状态下 SOA 可以有效地抑制光通信系统输出信号的噪声,并改善信噪比。

4 结 语

本文分析了光通信 RoF 链路的几种噪声,并对噪声成因与影响进行分析,通过抑制相对强度噪声来改善输出信噪比。通过理论分析确定饱和和工作电流下的 SOA 可以有效抑制 RoF 链路相对强度噪声。Optisystem 仿真模拟验证了饱和和工作电流下的 SOA 的抑噪特性,此时加入 SOA 的 RoF 链路相比未加入的,输出信噪比得到了较大的改善。

参考文献:

[1] CHEN L, WEN H, WEN S C. A RoF system with a novel scheme for millimeter-wave generation and wavelength reuse for up-link connection[J]. IEEE Photon, 2006(18): 2056 – 2058

[2] 蒲涛, 闻传花. 微波光子学原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015: 88 – 92

[3] 李晶, 宁提纲. 基于偏振调制的最优接收灵敏度的 RoF 链路研究[J]. 红外与激光工程, 2016(6): 151 – 154

[4] 张凯明, 吴新星. 基于 DFT 扩频的 60 GHz 光毫米波 OFDM-RoF 系统[J]. 光通信技术, 2019(3): 125 – 130

[5] 张靖, 马红亮. 光电负反馈抑制全固化单频激光器的强度噪声[J]. 光学学报, 2001(9): 1031 – 1035

[6] 曹雪. 光纤通信系统色散补偿方案的优化[J]. 激光技术, 2014, 38(1): 101 – 104

[7] 刘振. 高速 QPSK×OTDM 光通信系统相位噪声分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2017

[8] 张桂才, 林毅, 马林. 采用半导体放大器抑制 SFS 相对强度噪声[J]. 中国惯性技术学报, 2015(2): 109 – 112

[9] ZHAO M, MORTIER G, BAETS R. Analysis and optimization of intensity noise reduction in spectrum-sliced WDM systems using a saturated semiconductor optical amplifier[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2002, 14(3): 390 – 392

(责任编辑: 湛 江)