

# 相位调制产生光频率梳的通信实验

欧阳站<sup>1</sup>, 李博<sup>1</sup>, 余志强<sup>1</sup>, 韦慕野<sup>1</sup>, 王侠<sup>1</sup>, 秦祖军<sup>2</sup>

(1. 中国电子科技集团公司 第三十四研究所, 广西 桂林 541004; 2. 桂林电子科技大学 电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004)

**摘要:** 针对宽带光通信系统对密集波分光源的应用需求, 指出了单波长激光器在密集波分系统中存在的不足, 介绍了光学频率梳光源的原理和产生方法。提出了一种基于相位调制产生光频率梳的方法, 并将所产生的光频率梳在宽带光通信系统中进行测试, 验证了光频率梳作为多波长光源在宽带光通信系统应用效果。

**关键词:** 光通信系统; 光频率梳; 相位调制

**中图分类号:** TN914 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2020)09-0034-03

**DOI:** 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.09.008

**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



## Communication experiment of optical frequency comb generated by phase modulation

OUYANG Hong<sup>1</sup>, LI Bo<sup>1</sup>, YU Zhiqiang<sup>1</sup>, WEI Muye<sup>1</sup>, WANG Xia<sup>1</sup>, QIN Zujun<sup>2</sup>

(1. The 34th Research Institute of CETC, Guilin Guangxi 541004, China;

2. School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin Guangxi 541004, China)

**Abstract:** In view of the application requirements of broadband optical communication system for dense wavelength division light source, the shortcomings of single wavelength laser in dense wavelength division system are pointed out, and the principle and generation method of optical frequency comb light source are introduced. This paper presents a method of generating optical frequency comb based on phase modulation, and tests the generated optical frequency comb in broadband optical communication system, and verifies the application effect of optical frequency comb as multi-wavelength light source in broadband optical communication system.

**Key words:** optical communication system; optical frequency comb; phase modulation

### 0 引言

新一代信息技术的应用离不开海量数据的处理、存储, 数据中心作为底层基础设施需要通过大量的光网络进行传输<sup>[1]</sup>。随着光通信网络容量不断增长, 需要使用大量激光器来产生不同波长的激光作为载波, 而大量激光器的应用将提高系统的价格成本和复杂程度<sup>[2]</sup>, 目前光通信波长已应用了 C 波段和 L 波段, 如果继续增加波长通道数, 通道间隔将越来越窄, 会使光

纤非线性效应的抑制增大。光频率梳作为多波长光源可以替代数十个激光二极管传输数据, 从而降低设备及维护成本<sup>[3]</sup>。光频率梳的产生方法可分为以下几类: 锁模激光器法、外调制器法、微环谐振腔法、光电振荡器法和光纤非线性效应法。其中, 锁模激光器法利用了激光谐振腔的固有谐振模式, 在时域上输出周期性脉冲序列, 对脉冲序列做傅里叶变换得到频域上频率间隔相等的光频率梳, 采用该方法能够产生梳齿数量很多的光梳, 有较宽的光谱宽度, 但光梳数目不易控制、平坦度差, 且光梳间隔不确定<sup>[4]</sup>。微环谐振腔法利用微环谐振腔产生光学频率梳<sup>[5]</sup>, 产生的光梳光谱范围广、集成化, 且相干性高, 但该方法波导结构设计和工艺比较复杂。光电振荡器法是利用光电振荡器产生光频率梳, 可以扩展到多波长, 波长在很宽的光谱范围任意调节, 但该方法输出光频率梳的平坦度和边模抑制比容易受器件影响, 对器件要求高。光纤非线性

**收稿日期:** 2020-07-27。

**项目资助:** 桂林市科学研究与技术开发计划项目(20190201-1)资助。

**作者简介:** 欧阳站(1979—), 男, 广西梧州人, 本科, 高级工程师, 主要研究方向是光通信设备、光电子模块、组件研制开发和光电信号处理等。负责完成和在研的国家级、省部级项目 15 项, 获得国防科技进步二、三等奖和中国电科集团科技进步一、二、三等奖各 1 次。



效应法是基于飞秒钛宝石激光器和光子晶体光纤,利用光纤非线性效应产生宽谱飞秒光频率梳<sup>[6]</sup>,能够产生的光频梳数目较多,但存在载波平台度不好、噪声较大。本文提出一种基于相位调制产生光频率梳的方法。

## 1 基于相位调制产生的方法

产生光频率梳的外调制器法可以分为:相位调制器法、强度调制器法、强度与相位调制级联法以及调制器与循环移频回路法等<sup>[7]</sup>。其中,相位调制器产生光频率梳的方案具有光梳间隔稳定、产生方式较为简单的优点,通过大功率射频驱动能够产生较多的光梳数目,因此本文采用基于相位调制器的外调制器法搭建一个光频率梳光源系统,系统组成如图1所示。

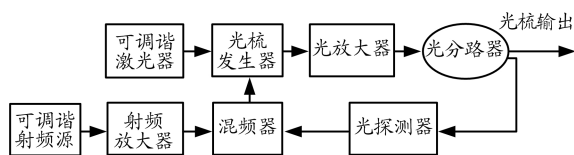


图1 光频率梳光源系统

光频率梳光源中的可调谐激光器输出的激光波长可以在1530~1560 nm范围内调谐,输出激光的线宽小于5 MHz,光功率为14 dBm。可调谐射频源能够输出 $25\text{ GHz}\pm 100\text{ MHz}$ 的射频信号,频率调谐步进为1 MHz,射频功率为15 dBm。由于可调谐射频源输出的功率不足以驱动光梳发生器,因此需要使用射频放大器进行功率放大,经放大后的射频功率可达到2 W。光放大器用于提升光梳发生器的输出光功率,光分路器将光放大器输出的部分光送到光探测器转换为电信号与射频放大器输出信号一起送到混频器,经过混频器处理、输出到光梳发生器,经过多次反馈后最终输出光梳线数可观、平坦度较好的光频率梳。

## 2 光频率梳光源性能测试

首先设置可调谐激光器输出波长为1550.12 nm,射频源的输出频率为25 GHz,光频率梳光源工作稳定后的输出光谱如图2所示,输出的光频率梳光谱宽度超过80 nm(约10 THz)。

本文选择20 nm光谱

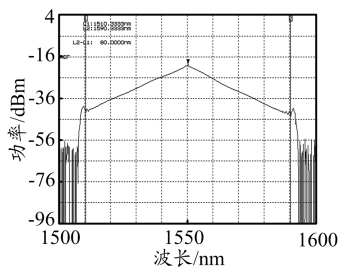


图2 中心波长为1550 nm时的光学频率梳

范围进行平坦度测试,测试结果如图3所示,根据图中数值计算得出所产生光频率梳在1540~1560 nm范围测试的平坦度约为0.58 dB/nm,有较好的平坦度。

每根光梳之间的间隔均为0.2 nm,约25 GHz,如图4所示。光梳间隔的变化为0.1 pm,约12.5 MHz,有较好的稳定性。

光频率梳光源的中心波长可以在1530~1560 nm范围内可调谐。波长调谐的步进取决于可调激光器输出波长的调谐步进。输出中心波长分别为1530 nm、1560 nm时光频率梳光谱如图5、图6所示。可以看出,中心波长分别是1530 nm和1560 nm时的光频率梳光谱宽度都超过80 nm(约10 THz),光梳间隔约0.2 nm,与中心波长为1550 nm时的状态一致。这说明光频率梳光源输出光谱比较稳定。

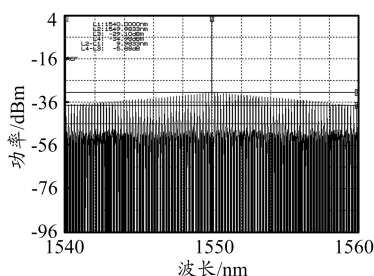


图3 光频率梳平坦度测试图

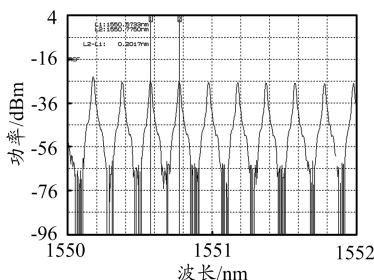


图4 光频率梳间隔

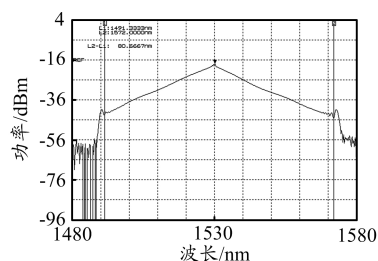


图5 中心波长为1530 nm时的光频率梳

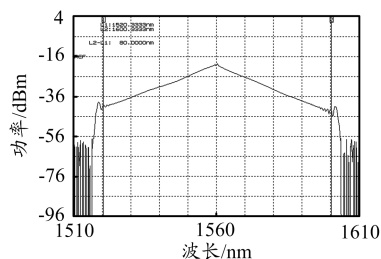


图6 中心波长为1560 nm时的光频率梳

## 3 基于光频率梳光源的光通信系统

本文使用光频率梳光源搭建一个光通信系统,系统组成如图7所示。

光频率梳光源放置在光通信系统的发射端,由于光频率梳光源输出功率不大,需要使用光放大器提升其输出光功率,经放大的光频率梳通过光解复用器将其中几个特定波长的光信号解复用,通过多个电光调制器将多路电信号调制到每一路光信号中,再通过光复用器将几个波长光信号复用入光纤进行传输。在接

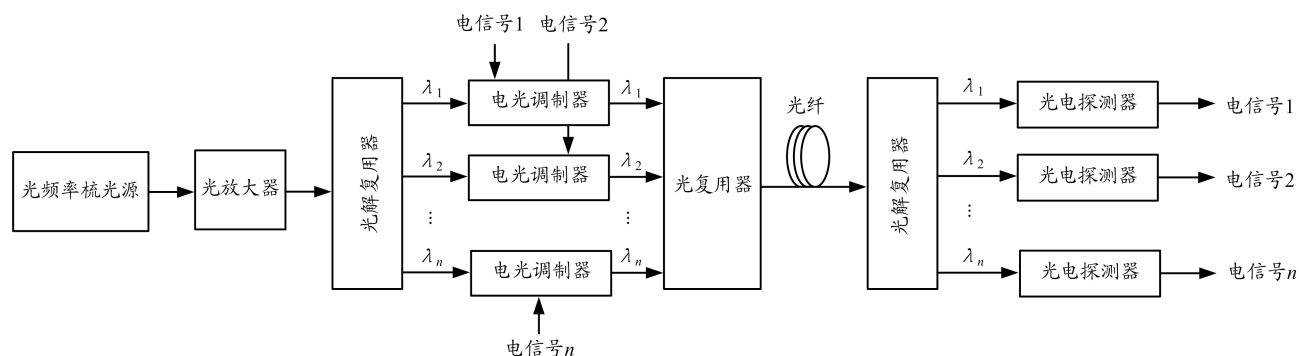


图7 基于光频率梳光源的光通信系统图

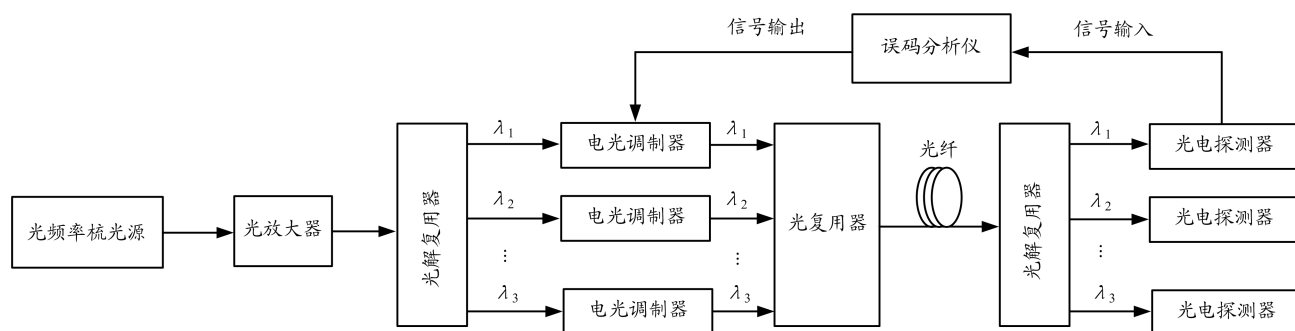


图8 误码测试框图

收端通过光解复用器将接收到的光信号解复用,分别通过光电探测器转换为电信号后进行检测。

为了检验光频率梳光源作为通信系统光源的效果,本文抽取光梳中的  $\lambda_1=1530.33\text{ nm}$ 、 $\lambda_2=1550.12\text{ nm}$  和  $\lambda_3=1560.61\text{ nm}$  3 个波长分别进行 2.5 Gb/s 和 10 Gb/s 的误码测试,每次测试 30 min,测试框图如图 8 所示。

误码分析仪分别输出 2.5 Gb/s 和 10 Gb/s 电信号,通过电光调制器将电信号先后调制到解复用的 1530.33 nm、1550.12 nm 和 1560.61 nm 3 个光梳波长中,经通信系统传输后利用光电探测器恢复成电信号输入误码分析仪进行误码检测。经误码测试,3 个波长光梳的 2.5 Gb/s 和 10 Gb/s 误码率均小于  $10^{-12}$ 。

#### 4 结束语

本文利用光频率梳光源搭建了一套光通信系统,并抽取光梳光源中 3 个波长进行误码测试,误码率均小于  $10^{-12}$ ,能够满足通信系统使用要求。由于所搭建的光频率梳光源输出光功率不高,需要通过掺铒光纤放大器放大后才能进行通信测试,测试中所用的掺铒光纤放大器仅能对 C 波段光梳进行放大,导致 S 波段

和 L 波段的光梳功率较弱,无法进行误码测试。此外,所产生的光频率梳平坦度指标还需要进一步提升,以提高光频率梳光源在光通信系统中的实用性。

综上所述,光频率梳光源以其产生光波长数量多、光谱宽和波长间隔稳定等优势,将会在通信及测量领域有较好的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] 解云鹏,雷波. “新基建”带来数据中心大发展的新契机[J]. 通信世界, 2020(7): 18-19.
- [2] 张萌. 光学频率梳的生成及应用技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015.
- [3] 谢淑平. 光学频率梳的产生及其应用[D]. 南京: 南京大学, 2014.
- [4] 黄保,冯鸣,陈新东,等. 基于锁模光纤激光器的光学频率梳[J]. 激光杂志, 2009(2): 16-19.
- [5] 王元武,张敏明,夏历,等. 基于微环谐振腔产生光频率梳的色散控制的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2014(6): 1-8.
- [6] 李媛洁. 应用于大容量光纤传输系统的梳状谱生成机制及系统方案研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2011.
- [7] 邵茜. 基于外调制器的光梳产生技术与微波频率梳产生技术的研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2016.