

多通道射频光传输模块增益波动及带内杂散解决方法

贾帅阳,苟源,康仪,赵艳,饶菁

(中国电子科技集团公司 第二十九研究所,成都 610036)

摘要:针对基于波分复用技术的多通道射频光传输模块的通道间隔较小时,因四波混频效应产生的带宽内杂散信号和高低温下波长漂移导致通道增益波动大的问题,基于四波混频原理和光发射机波长调谐原理,设计了多通道射频光传输模块增益波动和带内杂散解决方案,采用波长组合的优化算法计算出满足要求的一组波长值,通过温度调谐光发射机波长,并使用一种基于调谐波长的调试系统进行了实验验证。实验结果表明:该方案可以将杂散信号调试到工作带宽之外,且同通道、同频点的全温增益变化小于 2 dB。

关键词:射频光传输;四波混频;杂散信号;波长漂移;波长调谐

中图分类号:TN256 文献标志码:A 文章编号:1002-5561(2022)03-0093-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.03.020

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Solution of gain fluctuation and in band spurious in multichannel radio frequency optical transmission module

JIA Shuaiyang, GOU Yuan, KANG Yi, ZHAO Yan, RAO Jing

(The 29th Research Institute of CETC, Chengdu 610036)

Abstract: Aiming at the problem that the channel gain of the multi-channel radio frequency optical transmission module based on the wavelength division multiplexing technology is small, the channel gain fluctuates greatly due to the spurious signals in the bandwidth generated by the four-wave mixing effect and the wavelength drift at high and low temperature. Based on the principle of frequency mixing and wavelength tuning of the optical transmitter, a solution to the gain fluctuation and in-band spurious of the multi-channel radio frequency optical transmission module is designed. The optimization algorithm of wavelength combination is used to calculate a set of wavelength values that meet the requirements, and the optical transmitter is tuned by temperature, wavelength, and experimentally verified using a tuning system based on tuned wavelengths. The experimental results show that the scheme can debug the spurious signal outside the working bandwidth, and the full temperature gain change of the same channel and the same frequency point is less than 2 dB.

Key words: radio frequency optical transmission, four wave mixing, spurious signals, wavelength drift, wavelength tuning

0 引言

在电子信息系统中,多通道射频光传输模块具有工作频率高、信号损耗小以及抗电磁干扰较强的特点,主要用于实现电光/光电转换和射频信号远距离传输等功能。与同轴电缆和金属波导等模块相比,多通道射频光传输模块还具备体积小、重量轻等优点,近

收稿日期:2021-10-13。

作者简介:贾帅阳(1988—),男,本科,中国电子科技集团公司第二十九研究所高级制造工程师,主要从事微波光子产品可生产性分析及优化,完成了数十种多通道射频光产品的中试工作,受理发明专利《一种多通道模拟光模块增益一致性的控制方法》1项。



年来在电子信息系统中的应用越来越广泛。

当基于波分复用技术的多通道射频光传输模块的通道间隔较小时(例如间隔 100 GHz),为了保证模块的通道隔离度指标性能,波分复用的 1 dB 带宽很窄(± 0.2 nm),导致多通道射频光传输模块出现 2 个问题:一是模块的公共链路中因四波混频效应而产生的杂散可能会出现在工作频带内,造成模块杂散抑制指标不合格;二是在高低温下,由于光发射机波长的漂移,导致调制边带部分出现在波分复用带宽之外,从而使高频段增益波动比常温的大很多,有约 20 dB 的变化,无法满足模块指标要求。因此,在产品的设计阶段可通过选择合适的光纤、设置通道间隔等方法^[1,3-6]避免

出现上述问题。但是, 选择合适的光纤只能解决四波混频效应产生的杂散问题; 设置合适的通道间隔可以同时有效地解决以上 2 个问题, 前提是通道间隔在 200 GHz 及以上。

在通道间隔为 100 GHz 的多通道射频光传输模块中, 由于每个光发射机在高低温下输出的波长漂移值不同, 且每个波分复用器性能指标存在差异, 无法设置统一的一组波长值, 需要在模块装配完成后, 根据每个模块自身情况, 通过调谐光发射机波长设置合适的通道间隔。为此, 本文基于四波混频原理和光发射机波长调谐原理, 设计一种多通道射频光传输模块增益波动和带内杂散解决方案。

1 理论基础

1.1 四波混频原理

四波混频是一种基于三阶光学非线性的非线性效应。当至少 2 个不同频率分量的光一同在非线性介质(如光纤)中传播时可能发生四波混频效应。假设输入光中有 2 个频率分量 f_1 和 f_2 ($f_2 > f_1$), 由于差频的折射率调制的存在, 会产生 2 个新的频率分量: $f_3 = f_1 - (f_2 - f_1) = 2f_1 - f_2$ 和 $f_4 = f_2 + (f_2 - f_1) = 2f_2 - f_1$, 其示意图如图 1 所示。

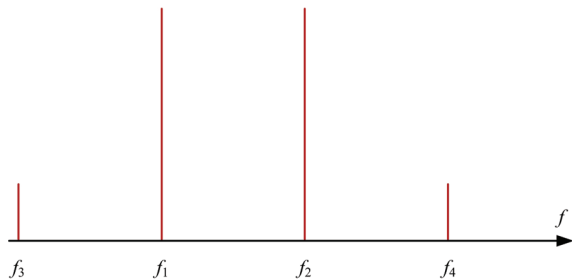


图 1 四波混频产生新频率分量示意图

此时, 如果原先就存在 f_3 或 f_4 , 则表现为 f_3 或 f_4 被放大, 即这个 2 个频率分量经历了参量放大。

当射频光传输模块有 4 个通道对应的光发射机波长为 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$, 频率分量为 f_1, f_2, f_3, f_4 时, 在公共链路中由于四波混频会产生频率分量: $f_1 - 2f_2 + f_3, f_1 - f_2 - f_3 + f_4$ 和 $f_1 - 2f_3 + f_4$ 。

1.2 光发射机波长调谐原理

光发射机原理框图^[2,7-10]如图 2 所示。光发射机主要由激光器、自动功率控制(APC)电路或自动温度控制(ATC)电路组成。其中, 核心器件为激光器, APC 电路和 ATC 电路是 2 种调谐激光器输出波长的电路。当采用 APC 电路调谐激光器输出波长时, 通过改变激光器驱动电流实现波长调谐^[7], 其优点是调谐波长速度

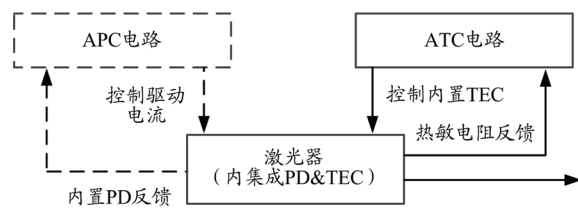


图 2 光发射机原理框图

快, 缺点是波长被调谐的同时, 输出光功率也被改变(电流对输出光功率的影响较大)。当采用 ATC 电路调谐激光器输出波长时, 在半导体中, 温度和能隙之间的经验公式^[7]为

$$E_g(T) = E_g(0) - AT^2 / (T + B) \quad (1)$$

其中, T 为温度值, $E_g(0)$ 为绝对零度时的能隙, A 和 B 为经验参量。温度变化引起能隙变化, 进而引起波长的变化: $\lambda = hc / E_g(T)$, h 是普朗克常量, c 是光的真空速度。所以, 通过控制激光器有源区的温度可以改变半导体激光器有源区的能隙, 从而实现激光器的波长调谐。ATC 电路的优点在于通过温度的改变精确地控制波长且不改变激光器的输出功率, 缺点是温度调谐速度较慢。

从以上 2 种光发射机波长调谐原理可知, 与 ATC 电路相比, APC 电路调谐会改变光发射机输出光功率, 进而影响多通道射频光传输模块的通道增益指标, 导致模块指标不能达到系统要求。因此, 本文选择采用 ATC 电路调谐光发射机波长。

2 方案设计

针对通道间隔为 100 GHz 的四通道射频光传输模块, 本文设计一种多通道射频光传输模块增益波动和带内杂散解决方案, 主要包括: 光发射机 ATC 电路设计、波长组合的优化算法设计和调试系统设计。该方案主要步骤如下:

首先, 需要通过光发射机 ATC 电路高效地进行波长调谐, 并找到可调电阻阻值变化量和波长变化量之间的定量关系, 这种定量关系是波长组合的优化算法中需要的; 其次, 合适的波长组合的优化算法需要快速而又准确地从大量波长组合中找到满足要求的最优波长组合; 最后, 设计一种基于波长调谐的调试系统验证方案的有效性。

2.1 光发射机 ATC 电路设计

ATC 电路的工作原理如图 3 所示。当可调电阻 R_3 的阻值改变后, 使 FB+ 与 FB- 这 2 个管脚之间产生电压差; 电压差受温控芯片监测, 再经过放大器与温度

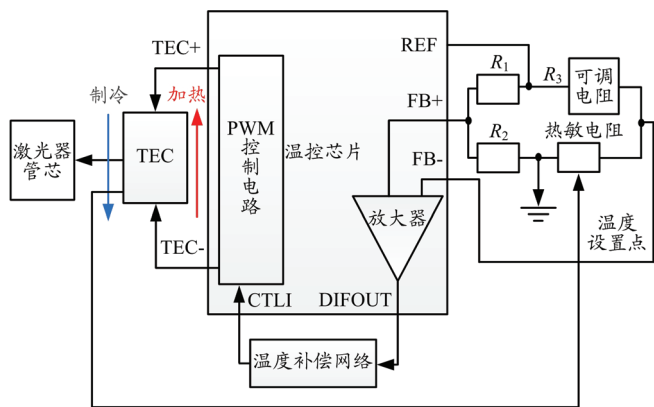


图3 ATC电路工作原理

补偿网络后,脉冲宽度调制(PWM)控制电路改变激光器内部半导体制冷器(TEC)的电流大小和方向,使激光器管芯温度升高或降低,进而使热敏电阻阻值减少或增大,直至FB-电压和FB+电压相等时调谐才达到稳定状态。此时,激光器的管芯温度和电阻 R_3 阻值改变前的管芯温度不同,从而实现了波长调谐。

2.2 波长组合的优化算法设计

四通道射频光传输模块中,4个通道对应的光发射机波长初始值(或频率)为 $\lambda_1(f_1)$ 、 $\lambda_2(f_2)$ 、 $\lambda_3(f_3)$ 和 $\lambda_4(f_4)$,射频工作频率范围为 $f_L \sim f_H$ 。本文需要找到一组波长值(或频率) $\lambda_{1x}(f_{1x})$ 、 $\lambda_{2x}(f_{2x})$ 、 $\lambda_{3x}(f_{3x})$ 和 $\lambda_{4x}(f_{4x})$ 且同时满足以下条件:①高低温下模块通道增益合格;②四波混频产生的杂散信号在工作带宽之外,即式(2)~式(4)需同时满足。

$$|f_{1x} - 2f_{2x} + f_{3x}| < f_L \text{ 或 } |f_{1x} - 2f_{2x} + f_{3x}| > f_H \quad (2)$$

$$|f_{1x} - f_{2x} - f_{3x} + f_{4x}| < f_L \text{ 或 } |f_{1x} - f_{2x} - f_{3x} + f_{4x}| > f_H \quad (3)$$

$$|f_{1x} - 2f_{3x} + f_{4x}| < f_L \text{ 或 } |f_{1x} - 2f_{3x} + f_{4x}| > f_H \quad (4)$$

经分析可得,满足条件的波长组合的优化算法主要包括3个步骤:

①初筛出每个通道常温下增益合格时对应的所有波长集合 N_1 、 N_2 、 N_3 和 N_4 ;

②从集合 N_1 、 N_2 、 N_3 和 N_4 中减去高低温漂移可能导致通道增益不合格的波长值,得到集合 N_1' 、 N_2' 、 N_3' 和 N_4' 。

③使集合 N_1' 、 N_2' 、 N_3' 和 N_4' 满足式(2)~式(4),得出的波长值即是满足要求的波长值。

算法具体步骤如图4所示。

2.3 调试系统设计

本文设计一种基于调谐波长的调试系统,结构图如图5所示。调试系统由光谱分析仪、矢量网络分析仪、直流电源、频谱仪、计算机和波长调试软件组成。光谱分析仪用于测试光发射机的初始波长和调试后

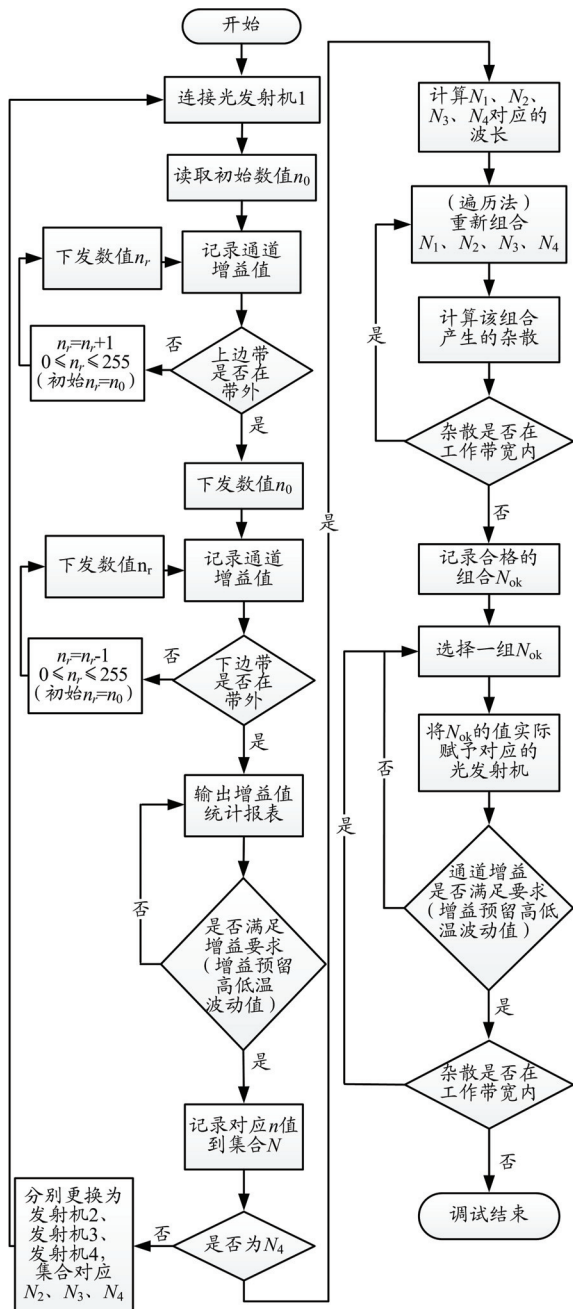


图4 波长组合的优化算法步骤

的波长;矢量网络分析仪用于测试模块的通道增益;直流电源用于给多通道射频光传输模块供电;频谱仪用于测试杂散信号;计算机用于控制光发射机调谐波长和矢量网络分析仪,读取通道增益数据;调试软件通过计算机控制光发射机、矢量网络分析仪,并根据波长组合的优化算法计算出满足要求的一组波长值。

3 实验验证

本文首先使用设计的调试系统对产品进行调试,然后测试杂散信号和全温增益指标。

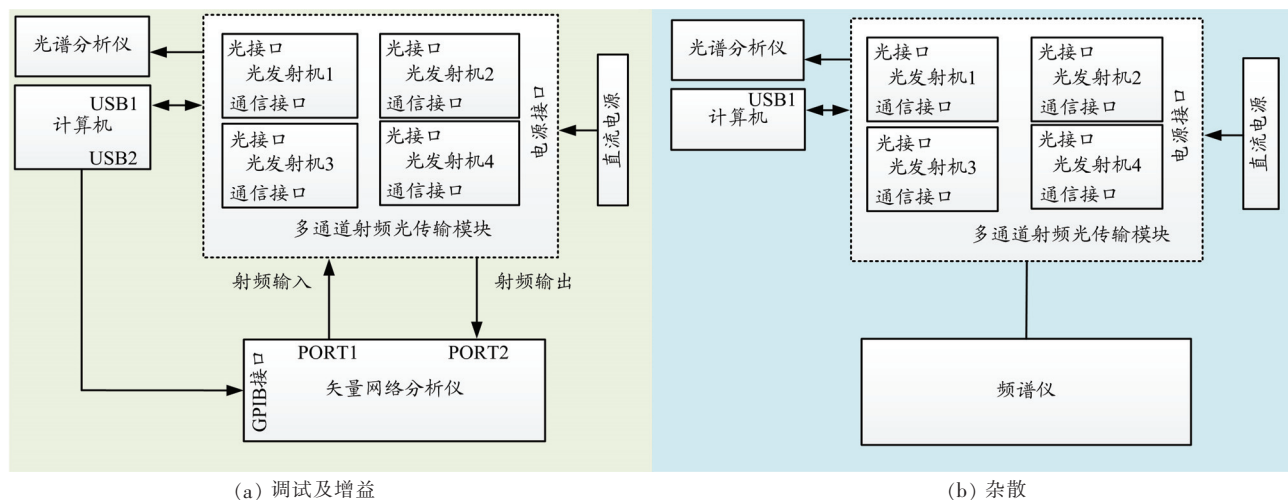


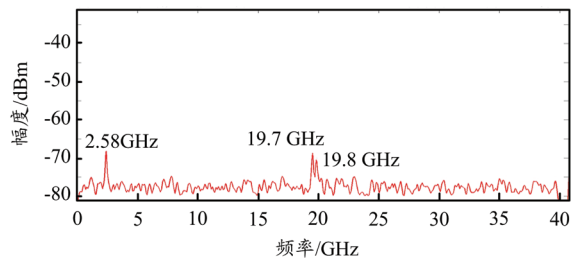
图5 调试及增益、杂散验证框图

调试后产品增益测试情况如表1所示。可以看出,与常温的通道增益值相比,高低温时同通道、同频点的增益变化均小于2 dB;与调试前的十几dB变化相比,其通道增益提升明显,且调试后增益变化满足了系统要求。

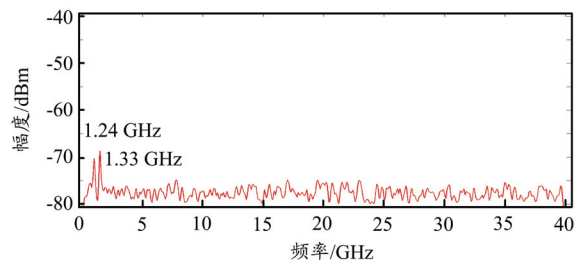
表1 调试后产品增益测试

温度	通道	不同带宽的通道增益/dB				
		2 GHz	6 GHz	10 GHz	14 GHz	18 GHz
常温 (+25 ℃)	1	-27.8	-30.4	-33.7	-35.1	-30.9
	2	-28.8	-31.5	-35.0	-36.0	-30.9
	3	-29.5	-32.1	-35.1	-35.1	-31.1
	4	-26.8	-29.2	-32.4	-34.4	-30.8
低温 (-55 ℃)	1	-26.7	-28.2	-31.8	-34.4	-30.5
	2	-27.9	-29.6	-33.5	-36.0	-31.4
	3	-28.9	-30.5	-34.1	-34.8	-31.8
	4	-26.6	-28.1	-31.5	-33.4	-30.9
高温 (+70 ℃)	1	-28.0	-30.1	-33.8	-34.4	-31.0
	2	-29.1	-31.3	-35.4	-35.2	-31.2
	3	-30.0	-32.0	-35.6	-34.3	-31.4
	4	-27.6	-29.6	-33.4	-33.5	-31.1

调试前、后杂散信号测试结果如图6所示。可以看出,调试前系统射频工作频率范围在2~20 GHz内出现了2.58 GHz、19.7 GHz和19.8 GHz共3个杂散信号;调试后,杂散信号为1.24 GHz和1.33 GHz,在工作频率之外。这说明了本文所设计的方案可以解决因模块工作频率内四波混频效应产生的杂散信号和高



(a) 调试前



(b) 调试后

图6 调试前、调试后杂散信号

低温下波长漂移导致通道增益波动大的问题。

进一步分析发现,使用调试系统输出的波长值通过四波混频原理计算的杂散信号频率(0.5 GHz)和测试的频率(1.24 GHz\1.33 GHz)分别存在0.74 GHz和0.83 GHz的差异,原因如下:

- ①光谱分析仪的波长精度不高;
- ②热敏电阻阻值随温度变化的曲线部分是非线性的;
- ③数字电位器阻值的设置值和实际值之间的差异。

由于每个光发射机中热敏电阻及数字电位器的差异,所以通过数字电位器阻值变化量线性估算波长变化量,然后计算调试后的光发射机波长有一定的误

差。通过实测代替估算调试后的光波长值, 可避免上述原因②和③对理论计算的杂散频率和测试频率差异的影响, 此时其误差均来自光谱分析仪的波长精度。

本文使用光谱分析仪实测调试出的光发射机波长值, 根据四波混频原理计算的杂散信号频率(0.25 GHz)和测试的频率(1.24 GHz/1.33 GHz)分别存在 0.99 GHz 和 1.08 GHz 的差异。

调试系统中的光谱分析仪(横河 AQ6370D-22)在 1520~1580 nm 的波长精度为 ± 0.01 nm, 换算成射频近似为 ± 1.25 GHz。使用此光谱分析仪时, 理论计算的杂散频率和测试频率存在的最大误差会达到 1.25 GHz, 与实测误差值较为吻合。这验证了光谱分析仪的波长精度是造成杂散频率和测试频率存在差异的主要原因。如果需要将最大误差降低到 0.125 GHz 及以下, 则需要其波长精度优于 ± 1 pm, 鉴于目前的条件, 无法进行实验验证。理论上, 如果将图 5 中的光谱分析仪替换为光波长计(横河 AQ6151, 波长精度 ± 0.3 pm), 即可将最大误差降低到 37.5 MHz。

4 结束语

针对基于波分复用技术的多通道射频光传输模块的通道间隔较小时, 产生带内杂散信号和高低温增益波动大的问题, 设计了一种多通道射频光传输模块增益波动和带内杂散解决方案。实验结果表明: 该方案可以将杂散信号调试到 2~20 GHz 工作带宽之外, 且同通道、同频点的全温通道增益变化可以控制在

2 dB 以内。因此, 全温通道增益及杂散信号测试数据充分验证了方案设计的正确性。对于杂散信号理论计算频率和实测频率有一定差异的问题, 进一步研究发现, 误差主要来源为光谱分析仪的波长精度。理论上, 波长精度更高的波长分析仪可降低误差。

参考文献:

- [1] 龙琼, 翁文华, 曾焱. 光传输中四波混频效应及其抑制方法[J]. 飞通光电子技术, 2003(6): 95-97.
- [2] 唐永常. 光发射机波长的调谐与精确控制 [J]. 中国有线电视, 2010(4): 470-472.
- [3] 沈建华, 邵钟浩. 四波混频对 DWDM 系统的影响[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2001(4): 6-9.
- [4] 郑涛, 贺海霞, 张琛. 四波混频原理及其应用[J]. 红外, 2008(12): 9-14.
- [5] 关雅莉, 龚岩栋, 文冀萍, 等. 光纤中的四波混频及其受色散的影响[J]. 光通信技术, 1998(4): 279-283.
- [6] 肖学智. 光纤中的四波混频(FWM)效应及其带来的利弊[J]. 光通信技术, 1999, 23(2): 131-137.
- [7] 谢建平, 王沛, 许立新, 等. 半导体激光器的波长调谐和波长稳定技术[J]. 量子电子学报, 2002(4): 97-103.
- [8] 黄邦菊. 高速宽波长范围可调谐光纤激光器[J]. 光学技术, 2016(9): 401-407.
- [9] 张瑞君. 波长可调谐 DFB 激光器及其进展 [J]. 集成电路通讯, 2006(6): 42-47.
- [10] 田军, 高繁荣, 颜伟, 等. 可调谐激光器波长控制[J]. 光通信研究, 2008(2): 44-46.
- [11] 毛昕蓉, 寇召飞, 张建华. 抑制光传输中四波混频效应的两种改进方法[J]. 激光与光电子学进展, 2017(54): 080601-1-080601-7.
- [12] 齐丽云, 石家伟, 高鼎三. 波长(频率)可调谐半导体激光器[J]. 半导体光电, 1999, 20(5): 320-325.