

一种 2~18 GHz 超宽带模拟控温微波光发射机设计

段洁坪¹,汪滨波²,魏恭³,朱弋¹

(1.四川九洲电器集团有限责任公司,四川 绵阳 621000;

2.四川长虹网络科技有限责任公司,四川 绵阳 621000; 3.空军装备部驻绵阳地区第一军事代表室,四川 绵阳 621000)

摘要:针对当前数字控温的光发射机会引入无法消除的杂散干扰信号问题,设计了一款具有电路精简、结构小巧和功耗低等特点的模拟控温微波光发射机,并给出了光发射机的组成和各模块的详细设计电路。根据直接调制原理搭建了微波链路模拟测试系统,测试了模拟控温光发射机的 S 散射参数、杂散抑制比、谐波抑制比和系统噪声系数等重要指标参数。测试结果表明:S 散射参数链路增益 ≥ -25 dB,增益平坦度为 ± 2 dB;杂散抑制比大于 90 dB,杂散信号基本淹没在系统底噪中;谐波抑制比超过 50 dB,达到了 67 dB 左右;噪声系数控制在 2 GHz@35 dB~18 GHz@56 dB 水平,完全满足实际使用要求。

关键词:模拟控温;光发射机;微波链路;杂散抑制比;噪声系数

中图分类号:TN29 文献标志码:A 文章编号:1002-5561(2022)01-0030-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.01.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Design of a 2–18 GHz ultra wideband analog temperature controlled microwave optical transmitter

DUAN Guping¹, WANG Binbo², WEI Gong³, ZHU Yi¹

(1. Sichuan Jiuzhou Electric Appliance Group Co., Ltd., Mianyang Sichuan 621000, China;

2. Sichuan Changhong Network Technologies Co., Ltd., Mianyang Sichuan 621000, China;

3. The First Military Representative Office of the Air Force Equipment Department in Mianyang, Mianyang Sichuan 621000, China)

Abstract: Aiming at the problem that the current optical transmitter of digital temperature control introduces the stray interference signal that can not be eliminated, an analog temperature controlled microwave optical transmitter with the characteristics of simple circuit, small structure and low power consumption is designed, and the composition of the optical transmitter and the detailed design circuit of each module are given. According to the principle of direct modulation, a microwave link simulation test system is built, and the important index parameters such as S scattering parameters, spurious suppression ratio, harmonic suppression ratio and system noise coefficient of the simulated temperature controlled optical transmitter are tested. The test results show that the link gain of S scattering parameters is greater than or equal to -25 dB, and the gain flatness is ± 2 dB. When the spurious suppression ratio is greater than 90 dB, the spurious signals are basically submerged in the background noise of the system. The harmonic suppression ratio exceeds 50 dB and reaches about 67 dB. The noise coefficient is controlled at the level of 2 GHz@35 dB - 18 GHz@56 dB, which fully meets the practical requirements.

Key words: analog temperature control, optical transmitter, microwave link, spurious inhibition ratio, noise factor

0 引言

光载无线通信(RoF)技术充分结合了光纤通信和

收稿日期:2021-06-25。

作者简介:段洁坪(1989—),女,硕士,四川九洲电器集团有限责任公司副主任设计工程师,主要从事国家重要项目的开发研究工作,包括电子对抗大型系统软件算法设计、光学工程电子设计以及 FPGA 算法等方面的研究。



无线通信的技术优势,能够实现微波信号的大容量、超低损耗、高带宽和高动态范围传输^[1-3]。微波光子通信系统正是基于这种技术,先将微波副载波调制到光载波,并通过光纤传输至接收端,最后将光载波解调成微波信号,从而完成了微波信号的远距离传输^[4-5]。微波光子通信系统中的光发射机激光器是一个温度敏感器件,激光器阈值电流、发光波长和功率都会随着温度变化而变化。因此,为了通信稳定,有必要对半导体激光器的温度进行控制。

2015 年,肖珊等人^[6]设计了一套基于比例-积分-微分(PID)控制的半导体激光器温度控制系统。2016 年,黄戈里等人^[7]利用模糊理论和 PID 控制对激光器温度控制系统进行组合控制。2017 年,庞慧敏等人^[8]以单片机为主控芯片,用温度传感器实时监控激光器温度变化。2018 年,韩团军等人^[9]设计了一种基于现场可编程门阵列(FPGA)的高精度半导体激光控制系统。2019 年,程前等人^[10]利用 MAX1978 芯片设计了一种温度控制系统。2020 年,赵青杨等人^[11]根据激光器输出光功率与激光器的工作温度之间存在一定的正弦波动关系,对 ADN2830 芯片控温进行改进和验证。上述已有的驱动电路和温控设计对一般场景应用的激光器温度控制都能满足要求,但是这种数字温控电路会引入高频脉宽调制(PWM)开关频率信号,导致光发射机在微波光子通信系统应用环境中不可避免地引入杂散干扰信号,且无法消除,严重影响了微波光子通信质量;同时,此类温控电路结构相对繁杂,未考虑光发射机功耗、体积等因素,温度控制算法也较为复杂,实际应用能力偏低。

本文从光发射机的微波链路通信应用环境、温度控制方法、功率体积要求和提高激光器的适用性角度出发,研究一种模拟控温微波光发射机作为高性能微波光发射机。

1 微波链路系统

模拟控温微波光发射机采用高速光电器件、宽带阻抗匹配网络、鲁棒控制模式、高精度功率控制、高稳定温度控制与集成化装配等技术和光载微波传输的方式。这种光发射机能够将带宽高达 18 GHz 的高速射频/微波信号转换为无失真的光载微波信号,具备低噪声和高功率输出,增加传输距离并降低链路噪声系数,确保大动态范围的无失真微波信号传输;宽带微波光接收机能够将输入功率高达 10 dBm、带宽为 20 GHz 的光载微波信号解调还原成射频/微波信号,其超高的灵敏度和线性度能确保微弱信号的探测与大动态范

围无失真输出。典型的直调型微波光链路架构如图 1 所示。链路系统包括宽带微波光发射机、传输光纤和宽带微波光接收机。在发射机中,输入射频(RF)信号对半导体分布式反馈(DFB)激光器输出的载波光信号进行调制,调制信号耦合进入传输光纤,传输至接收机,光信号在接收机被还原为原始的 RF 信号。

2 模拟控温微波光发射机硬件设计

模拟控温微波光发射机作为高性能微波光发射机,能够对输入带宽 2~18 GHz 的射频信号进行电/光转换。本文设计的模拟控温微波光发射机由高速 DFB 激光器、宽带阻抗匹配电路、自动温度控制(ATC)电路和自动功率控制(APC)电路组成,如图 2 所示。

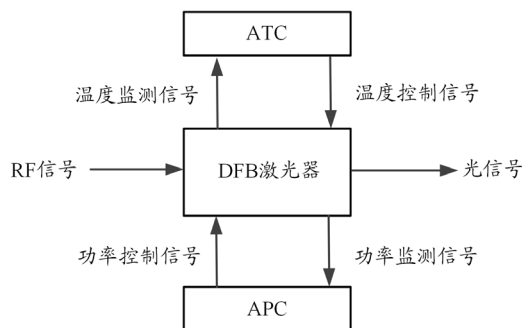


图 2 模拟控温微波光发射机结构框图

2.1 激光器

本文采用 1550 nm DFB 激光器,型号为 EX-DY700X。由于激光器是低阻器件(阻抗约为几欧姆),因此激光器内含有一个宽带阻抗匹配电路将其阻抗转换为 $50\ \Omega$ 。该激光器带宽宽、线性度好和稳定性好,输出功率范围为 10~20 mW,适用于模拟 RF 链接。它内置半导体制冷器(TEC)、热敏电阻(R_{TH})、激光二极管(LD)和监测光电二极管(MPD)等模块,激光器结构内部构造和外围控制框图如图 3 所示。

2.2 ATC 电路

ATC 采用模拟控温方式,这样可以避免高频干扰,提高控制精度,延长 TEC 使用寿命。整个模拟控温由温度检测电路、误差放大电路、比例-积分-微分

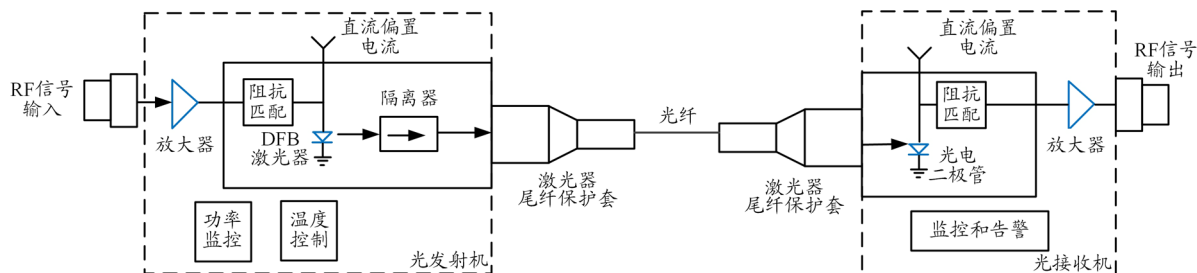


图 1 直调型微波光链路系统框图

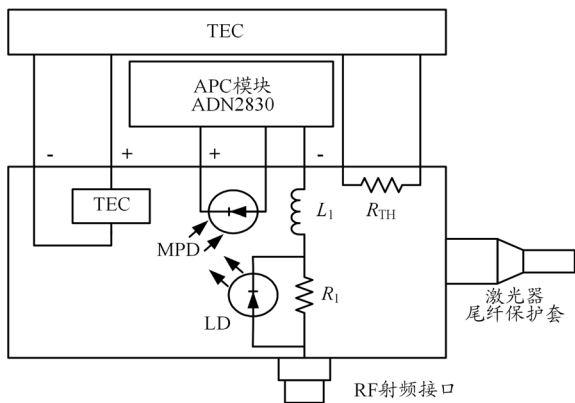


图3 EX-DY700X 激光器结构图

(PID)补偿电路和TEC驱动电路^[12-13]构成,如图4所示。其中,设置温度电压是一个外部参考电压值,代表的是目标温度,其与实际温度电压经过误差放大电路后得到误差电压,再经过PID补偿电路,补偿电路的输出控制TEC驱动电路,改变流过TEC的电流大小和方向,当系统达到平衡后,TEC的工作电流大小和方向才趋于稳定。

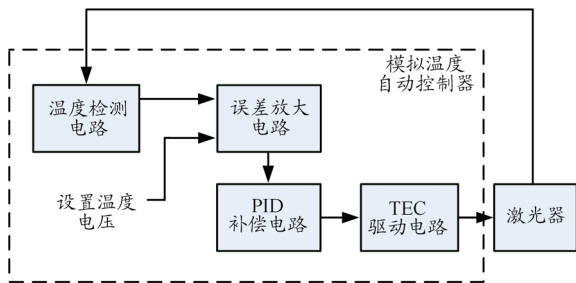


图4 模拟控温结构图

2.2.1 温度检测与误差放大电路

温度检测电路用于将激光器内部热敏电阻的阻值变化转化为代表激光器实际温度的电压信号,如图5所示。电阻-电压的转换通过一个惠更斯电桥实现,电路中设置了一个电压跟随,为电桥提供一个稳定的参考电压。电桥后接一个运算放大器,用于实现电阻-电压信号的放大。误差放大电路将温度设定信号和温度

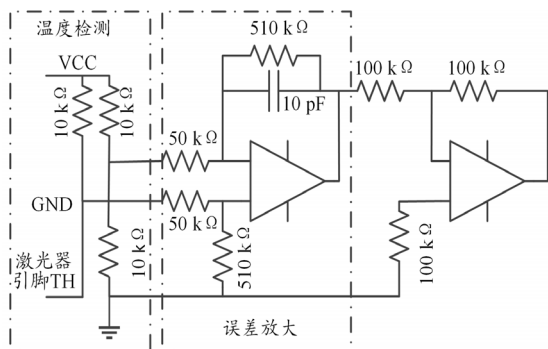


图5 温度检测与误差放大电路

检测信号相减、放大得到误差信号,该误差信号代表了激光器实际温度和设定温度相差的程度。

2.2.2 PID 补偿电路

PID补偿电路用于将误差放大电路输出的误差信号进行补偿,以调节整个温度控制系统的响应时间和温度控制稳定性。本文采用运算放大器搭建了一个PID补偿电路,如图6所示。比例、积分和微分常数需要经过反复验证才能确定,其中,微分电路根据设计需求选择是否添加。

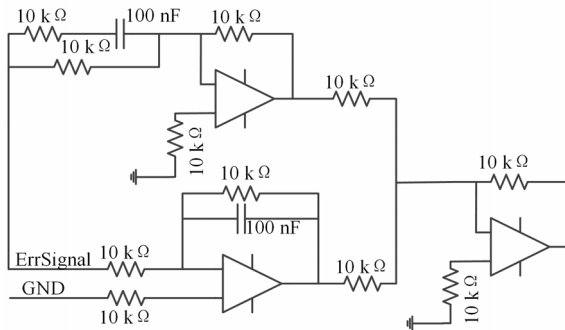


图6 PID 补偿电路

2.2.3 TED 驱动电路

TEC驱动电路用来为激光器内部TEC提供驱动电压,同时控制驱动电压的大小和方向,如图7所示。TEC两端的电压 V_{TEC} 与经过PID补偿后的信号电压 $V_{TEC_{IN}}$ 和TEC驱动电路参考电压 $V_{REF_{TEC}}$ 满足如下关系:

$$V_{TEC} = 2(V_{TEC_{IN}} - V_{REF_{TEC}})$$

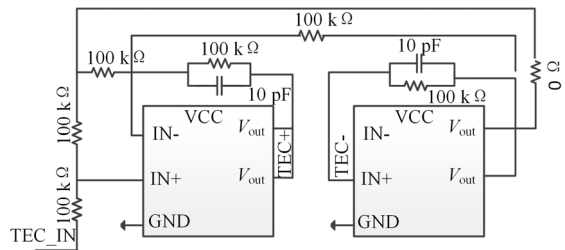


图7 TEC 驱动电路

2.3 APC 电路

文献[14]采用芯片ADN2830进行激光器自动控制电路设计,如图8所示。ADN2830是平均光功率控制器,采用APC装置使功率保持为与时间和温度无关的常数^[15]。其工作原理是通过激光器的MPD产生监测电流,经过PSET引脚反馈回ADN2830,ADN2830的控制器根据监测电流持续调整输入激光器的偏置电流 I_{bias} ,从而影响激光二极管阈值电流和发光效率的变化,PSET引脚和低电平端之间电阻的变化会引起反馈量的变化。

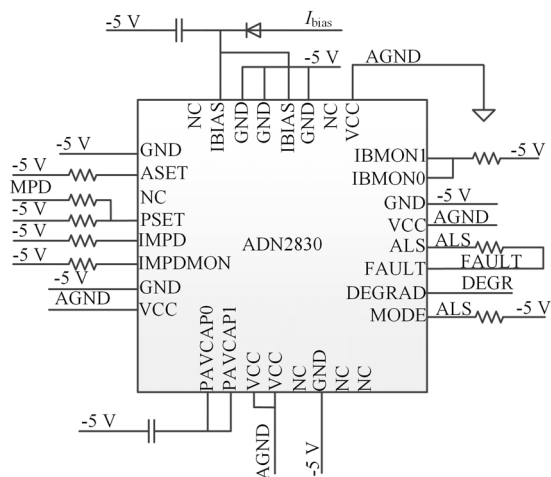


图 8 ADN2830 电路图

3 链路性能测试

微波链路系统原理框图如图 9 所示,包括光发射机、光接收机、高频信号发生器、频谱仪和矢量网络分析仪等。除此之外,根据具体的应用要求,可以加入其它部件进行完善。例如,可在前端或后端加入低噪声放大器以补偿链路损耗,改善噪声系数。本文根据图 1 和图 9 的微波链路搭建微波系统测试平台,设计的小体积、低功耗光发射机和接收机如图 10 所示。

评价微波链路性能的重要指标非常多,包含 S 散射参数、杂散抑制比、谐波抑制比、噪声系数、无杂散动态范围、三阶交调和功率 1 dB 压缩点等。本文重点测试光链路系统的 S 散射参数、杂散抑制比、谐波抑制比和链路噪声系数 4 个指标。

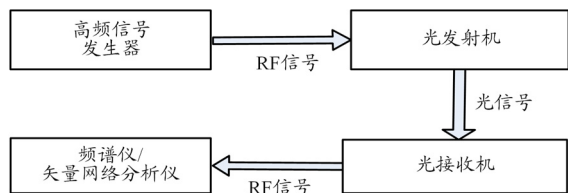


图 9 微波链路系统原理框图



图 10 光发射机与接收机

3.1 S 散射参数测试

本文使用矢量网络分析仪对该微波光链路系统进行 S 散射参数测试,射频输入功率为 0 dBm,测试结果如下:链路系统输入、输出反射系数均小于 2,在链路测试环境不含前 RF 放大器的情况下,链路增益 ≥ -25 dB,增益平坦度为 ± 2 dB。

3.2 杂散抑制比和谐波抑制比测试

直接数据频率合成器因能产生频率捷变且残留相位噪声性能卓越而著称,输出频谱中存在杂散噪声,比如相位截断杂散、与相位-幅度转换过程相关的杂散等。实际设计中,相位截断杂散与信号有限相位有关,而相位-幅度转换过程中产生的噪声是幅度分辨率造成的结果。本文用模拟控温微波光发射机搭建微波测试系统测试杂散抑制比,射频信号输入功率为 0 dBm,射频信号测试输入频率范围为 0.1~18 GHz,激光器输出光功率为 8.5 mW。测试结果表明:因为模拟控温微波光发射机彻底消除了数字温控型发射机的高频 PWM 噪声干扰,在整个 2~18 GHz 频段内避免了引入链路杂散,杂散抑制比大于 90 dB 以上,杂散都淹没在底噪信号中,大大提高了杂散控制精度。

谐波是一系列的正弦波,其频率是基波的整数倍系列的正弦波,存在无数种频率不同、幅值不同的频率波,这些正弦波会造成电力系统中的正弦电流和电力系统电压不对称,对系统造成非常严重的危害,抑制谐波是一种依据谐波产生的原因来抑制谐波影响的技术。本文对谐波抑制比进行了测试,测试结果表明:谐波抑制比超过 50 dB,达到了 67 dB 左右,完全满足实际应用的要求。

3.3 噪声系数测试

噪声系数是用于衡量信号链路中输入信噪比到输出信噪比衰减的参数,表征放大器的噪声性能恶化程度的一个参量。噪声系数越大,说明在传输过程中掺入的噪声也就越大,反映了器件或者信道特性不理想。模拟光链路噪声系数的测量框图如图 11 所示。

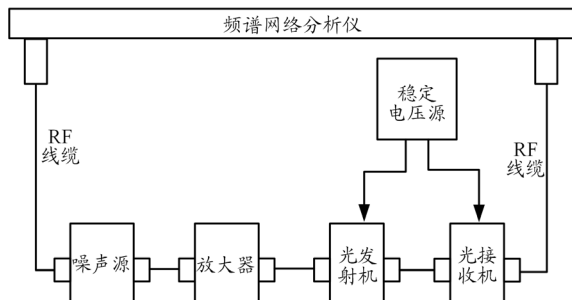


图 11 模拟光链路的噪声系数测量框图

本文根据图 11

表 1 光链路的噪声系数

频率/ GHz	噪声系数/dB
2	35.51807322
4	39.10318399
6	43.44307096
8	45.80655263
10	48.17404525
12	50.17244796
14	54.63426912
15	52.8430044
16	54.3596483
18	56.19075152

搭建了测试系统,系统的激光器输出光功率为 9.25 mW。经测试,得到了模拟控温微波光发射机微波链路噪声系数如表 1 所示。可以看出,链路噪声系数随着 RF 信号频率的增高而相应增大,但其值在 2 GHz@35 dB~18 GHz@56 dB 之间,完全满足实际使用的要求。

4 结束语

本文设计了一种模拟控温的直接调制微波光发射机,该光发射机采用模拟控温,消除了数字温控型发射机的 PWM 脉冲高频噪声干扰,避免引入链路杂散,提高了链路系统控制精度。同时,发射机电路精简、结构体积小巧和低功耗等特点使得整套链路十分适合军用飞机的微波链路信号传输应用环境。但是,受直接调制的原理限制,模拟控温的直接调制微波光发射机的谐波抑制比受到一定的限制,有待进一步探讨改进和完善。

参考文献:

- [1] 陈国帅,杨艳锋,谢嘉威. 一种宽带直调 RoF 链路的模块化设计[J]. 光通信技术,2017,41(6):31-33.
- [2] 赵尚弘. 卫星微波光子通信系统原理与技术[M]. 北京:电子工业出版社,2015.
- [3] 田中成,靳学明,朱玉鹏. 微波光子电子战技术原理与应用[M]. 北京:科学出版社,2018.
- [4] 聂海江,侯文栋,张方正,等. 基于微波光子的雷达通信一体化技术研究[J]. 航天电子对抗,2020,36(5):34-39.
- [5] 邹卫文,杨光,于磊. 基于微波光子的雷达通信对抗一体化系统:201610782815[P]. 2016-08-31.
- [6] 肖珊,鲁五一. 基于 PID 控制的半导体激光器温度控制系统的设计[J]. 激光杂志,2015,36(6):39-42.
- [7] 黄戈里,秦燕燕. PID 控制的激光器温度控制系统的设计与实现[J]. 激光杂志,2016,37(10):142-145.
- [8] 庞慧敏,李林书,周哲海. 基于单片机的大功率半导体激光器温度控制系统的设计[J]. 数字技术与应用,2017(10):176-177.
- [9] 韩团军,韦平平,黎高峰. 基于 FPGA 的高精度半导体激光器温度控制系统设计[J]. 激光杂志,2018,39(9):47-50.
- [10] 程前,邓秋华. 半导体激光器驱动电路及温控系统设计[J]. 电子器件,2019,42(5):1185-1189.
- [11] 赵青杨,原霞,赵鹏飞,等. 基于 ADN8830 的激光器温度控制系统电路改进设计[J]. 中北大学学报(自然科学版),2020,41(3):277-282.
- [12] 何方洋,蒋金锋,刘平,等. 一种线性驱动 TEC 温控系统的设计[J]. 分析仪器,2015(1):1-6.
- [13] 潘天泽. 一种 H 桥电路驱动 TEC 的设计. 现代信息科技[J]. 2019,20(3):49-50.
- [14] 凌茂真,张兴,高传顺,等. 高稳定性半导体激光器驱动电路的设计[J]. 半导体光电,2014,35(5):916-918.
- [15] 陈晓,贾华宇,郭燕. 基于单片机的激光发生器的驱动电路设计[J]. 应用光学,2015,36(1):134-139.