

采用原子滤光器的新型 激光信标方案研究*

段明浩 孔建坤 汤俊雄

(北京大学电子学系, 区域光纤网与新型光通信系统国家重点实验室, 北京 100871)

摘 要 提出了采用法拉第反常色散滤光器(FADOF)的光电双反馈激光信标新方案。该方案通过数字控制系统和光反馈系统的共同作用, 使激光信标系统的稳定性、抗干扰性和可靠性大大提高, 并实现了上电自动工作。这种新型激光信标的频率稳定度优于 5×10^{-9} , 在 30 ms 内可将半导体激光频率稳定在法拉第反常色散滤光器任一透射峰上。该方案可与采用法拉第反常色散滤光器的新型跟瞄系统匹配使用, 对建立卫星激光通信链路有重要意义。

关键词 原子滤光器, 激光信标, 自由空间激光通信。

1 引 言

激光通信系统与微波通信系统相比, 具有通信码率高、容量大的优点, 而且体积小、重量轻、相互间无干扰。因此, 激光通信将在卫星通信中起重要作用^[1]。

激光通信的研究始于七十年代。NASA 首先提出利用激光实现同步轨道卫星(GEO)之间高码率通信的设想, 并开展了单元技术研究。随着半导体激光器、探测器等技术的发展, 促成了激光通信演示系统(LCDS)计划和其它相关计划的启动, 如空对地的演示等^[2]。美国空军于八十年代开始支持空间激光通信技术的研究, 其中有高码率通信技术、高功率激光源、高灵敏探测技术、空间激光跟瞄技术等。欧洲宇航局(ESA)的 SILEX 计划是以实现低轨道卫星(LEO)与同步轨道卫星的激光通信为目标, 同时还致力于激光通信的光学地面站(OGS)的研究和建立^[3]。日本早在七十年代开始空间激光传输技术的研究^[4], 1987 年开始跟瞄技术的研究, 1993 年开始与欧洲宇航局合作准备进行卫星通信实验^[5]。其研究进展很快, 已与美国的卫星进行了光通信实验, 并且正在进行卫星与地面站之间的光通信实验^[6]。可见, 国外在激光通信领域的研究已有相当水平。在国内, 激光通信的研究尚属起步阶段, 因此, 对激光通信关键技术的研究在现阶段显得格外重要。

空间激光通信系统中, 有几项关键技术:

- 1) 卫星目标的瞄准, 捕捉和高精度跟踪技术(PAT);
- 2) 适合星载的高功率激光器技术;

* 国家自然科学基金资助课题。

收稿日期: 1996 年 8 月 17 日; 收到修改稿日期: 1996 年 10 月 28 日

- 3) 高灵敏探测技术;
- 4) 高码率、大容量通信技术。

通信的前提条件是通信信道的建立, 因此, 第 1) 项技术是空间激光通信的关键。需在通信开始之前, 依靠通信端机上的信标激光(beacon laser) 和瞄准、跟踪系统建立和保持通信信道, 方可进行激光通信。可见, 激光信标是通信端机上不可缺少的部分, 其性能对通信系统的可靠性有直接影响。本文在研究分析国外对激光信标研究的基础上, 提出了一套新的激光信标方案, 并对其进行了初步的实验研究。文献[7] 讨论了采用法拉第反常色散滤光器作为选频元件的光反馈方案, 本文则着重讨论了光反馈方案抗干扰的优点, 而且增加了数字反馈系统, 使之能自动搜寻法拉第反常色散滤光器透射峰, 实现上电自动工作。激光器受到干扰失锁后, 仍能自动恢复锁定。因此, 这种新型激光信标的频率稳定性、可靠性和实用性大为提高。

2 激光信标新方案原理

在空间激光通信过程中, 存在一些随机的和持续的干扰, 比如太阳辐射在通信过程中会通过星际或其它散射体的散射进入接收天线, 造成较强的背景噪声。在通信过程中, 由于光通信信道已经建立, 可使通信激光的发散角(约在 μrad 量级) 和通信接收天线的视场角(与通信激光发散角相匹配) 都很小。这时通过空间滤波, 只有少量的背景光进入接收机, 而进入接收机的通信激光的功率较高。因此, 在通信机中采用几个纳米带宽的干涉滤光器就可有效地滤除背景光的干扰, 但对于跟瞄系统, 情况大为不同, 原因在于:

1) 通信双方只能根据轨道数据库确定对方的大概方位, 通过跟瞄系统快速瞄准、捕捉及精确跟踪对方, 以建立光信道。因此, 希望信标激光的发散角大(与通信激光束发散角相比) 以增大捕捉范围, 减少扫描时间, 同时希望跟瞄系统接收天线的视场角大, 以尽快探测到对方的信标激光;

2) 信标激光的光强与通信激光相比很弱。因此, 对跟瞄系统的接收信噪比要求非常高。解决的办法在跟瞄接收系统中采用高噪声抑制能力的滤光器, 提高接收视场角及信噪比, 达到快速捕捉信标光的目的。

法拉第反常色散波光器是近几年发展起来的新型滤光器, 它具有超窄带宽(约 0.001 nm)、高噪声抑制比(优于 10^{-5})、高传输效率等特点^[8], 非常适合于强背景噪声下的微弱信号探测。据此, 将法拉第反常色散滤光器作为跟瞄接收系统滤光器, 可以提高其探测灵敏度。但该方案要求信标激光的频率在法拉第反常色散滤光器的通带范围内。因此, 为了与高性能的跟瞄接收系统相匹配, 必须将信标激光锁定在法拉第反常色散滤光器透射峰内。此外, 为了实现无人值守的操作要求, 激光信标应能上电自动工作。根据以上分析, 本文提出采用法拉第反常色散滤光器的光电双反馈激光信标方案。原理框图如图 1 所示。图中 LD 为半导体激光器, S 为分束镜, PD 为光电探测器, M 为全反射镜, FADOF 作为选频元件, Amp 为前置放大器, A/D、D/A 分别为模数、数模转换器, MCU 为单片微处理器。虚线框内为光反馈稳频

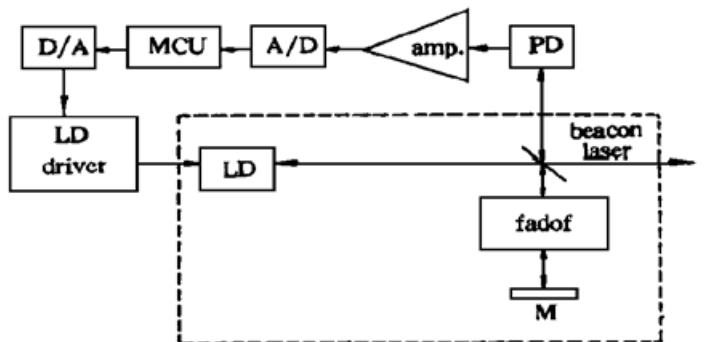


Fig. 1 Schematic diagram of electrical and optical feedback laser beacon using FADOF

虚线框内为光反馈稳频

系统,虚线框外为数字控制部分,实现自动调节 LD 工作频率乃至自动搜寻法拉第反常色散滤光器透射峰的作用。

上述方案上电后,首先 MCU 按一定步长经 D/A 向半导体激光器注入电流。半导体激光器输出频率在法拉第反常色散滤光器透射峰外时,无激光通过它,此时 PD 接收信号电平为零,A/D 无输出。MCU 继续增大半导体激光器注入电流,当半导体激光器输出频率进入法拉第反常色散滤光器透射峰内,PD 可检测到信号,经 A/D 输入 MCU,MCU 进行采样数据的比较,判断半导体激光器输出频率是否已到法拉第反常色散滤光器透射峰顶,如图 2 所示。当 $V_2(t + \Delta t) > V_1(t)$ 时,可判断 $t + \Delta t$ 时半导体激光器输出频率还未到峰顶。当 $V''(t + \Delta t) < V'(t)$,可判断 $t + \Delta t$ 时半导体激光器输出频率已过峰顶,此时 MCU 可减小半导体激光器注入电流使其频率到达峰顶,如此完成激光信标的初始化工作。系统的反馈外腔腔长可调节到适当的长度,使得当半导体激光器输出频率在法拉第反常色散滤光器峰顶时,实现外腔的光反馈稳频,从而将半导体激光器频率控制权部分地移交给光反馈外腔,实现所谓光电双反馈的激光信标。本方案的优点在于:

1) 采用法拉第反常色散滤光器为选频元件,使激光信标与采用法拉第反常色散滤光器的高灵敏跟瞄接收系统相匹配。此外,由于法拉第反常色散滤光器是基于原子的共振跃迁,故其频率对振动等外界条件不敏感; 2) 采用光电双反馈技术。由于光反馈可减小半导体激光器的电调率(即改变单位注入电流时输出频率的变化量)^[9],使其受注入电流波动或温度波动的影响减小,从而大大提高了它的稳定性,即通过光反馈子系统可提高了半导体激光器工作于法拉第反常色散滤光器透射峰的稳定性。由于光反馈稳频不需要对激光频率加调制,因此不受伺服环路截止频率的限制,可方便地抑制激光的高频噪声干扰。而且用光反馈可将半导体激光器频率锁定在法拉第反常色散滤光器透射峰中心,使接收端跟瞄系统中的法拉第反常色散滤光器接收效率也提高。电反馈系统由 MCU 控制,实现了智能化。既能自动地初始化激光信标系统,又能对因温度或电流的波动而致的半导体激光器跳模,乃至使半导体激光器输出频率偏离法拉第反常色散滤光器透射峰顶的现象,在几个指令周期内恢复到峰顶的工作状态。总之,本文提出的光电双反馈激光信标方案有高稳定、高抗干扰、自动工作的优点,同时支持采用法拉第反常色散滤光器的高性能跟瞄接收系统的工作。

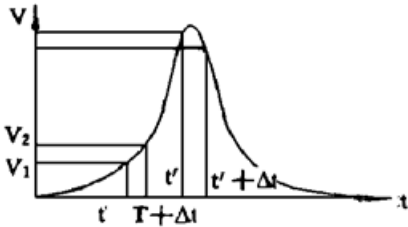


Fig. 2 The comparing of sampling voltage in different sampling time

较,判断半导体激光器输出频率是否已到法拉第反常色散滤光器透射峰顶,如图 2 所示。当 $V_2(t + \Delta t) > V_1(t)$ 时,可判断 $t + \Delta t$ 时半导体激光器输出频率还未到峰顶。当 $V''(t + \Delta t) < V'(t)$,可判断 $t + \Delta t$ 时半导体激光器输出频率已过峰顶,此时 MCU 可减小半导体激光器注入电流使其频率到达峰顶,如此完成激光信标的初始化工作。系统的反馈外腔腔长可调节到适当的长度,使得当半导体激光器输出频率在法拉第反常色散滤光器峰顶时,实现外腔的光反馈稳频,从而将半导体激光器

3 实验结果

以上所提方案及其优点,是对法拉第反常色散滤光器进行研究和对光反馈进行分析的基础上得出的,为了证明方案的可行性及优越性,本文进行了初步的实验研究。

首先对采用法拉第反常色散滤光器为选频元件的反馈子系统进行实验研究。实验装置如图 3 所示。半导体激光器的型号为 HL7838G(日立公司出品)。法拉第反常色散滤光器工作条件为 0.0075 T、90℃,工作波长为 780 nm。法布里-珀罗腔的自由光谱范围为 2 GHz,细度为 70。在无光反馈情形下,法拉第反常色散滤光器的透射谱如图 4 所示,从图中可见,法拉第反常色散滤光器的透射率随半导体激光器工作频率的变化而变化。

以 T_1 峰为例研究光反馈的特点。图 5 示出了 T_1 峰在光反馈发生前后谱结构的变化情况,说明采用法拉第反常色散滤光器为选频元件可实现光反馈。经过测量,无光反馈时 T_1 峰上半

半导体激光器的电调率约为 3 GHz/mA, 有光反馈后, T_1 峰呈现出“平台”现象, 在“平台”上改变半导体激光器注入电流, 透射率不变, 由于法拉第反常色散滤光器的 T_1 峰透射率与半导体激光器工作频率一一对应, 因此, 说明在“平台”上, 半导体激光器的频率稳定性提高, 即半导体激光器激光频率受注入电流波动影响减小。实验同样表明, 温度波动对半导体激光器频率的影响也减小。

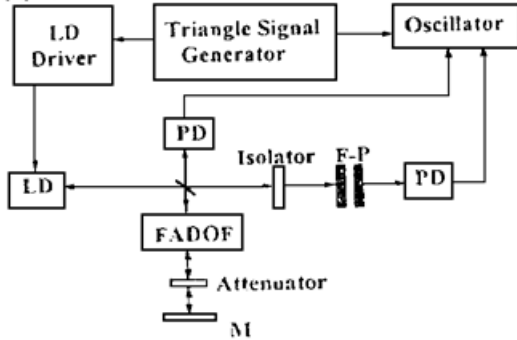


Fig. 3 Experimental setup of optical feedback

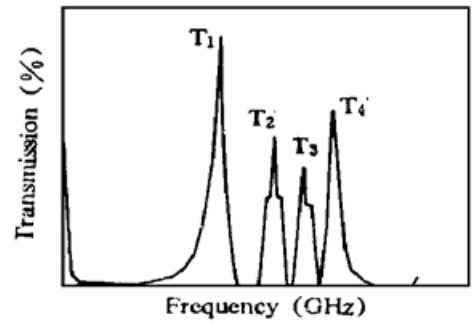


Fig. 4 Transmission spectrum of FADOF without optical feedback

改变外腔中反射镜的反射率, 发现随着反馈光强的减弱, 电调率增大。因此, 实际应用中应保证足够的反馈量。调节全反射镜 M 的位置, 发现腔长与电调率成反比。因此实际应用中外腔腔长不能太短。

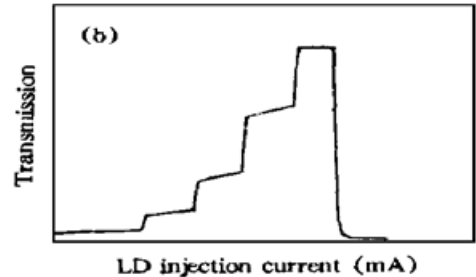
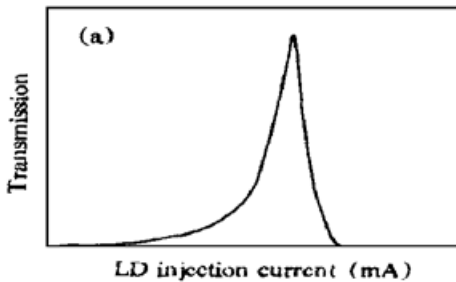


Fig. 5 Spectral chagement of T_1 peak due to optical feedback
(a) before optical feedback; (b) after optical feedback

用法布里-珀罗腔的透射峰作为鉴频曲线, 进行半导体激光器工作于“平台”上的稳定性测量, 得到短期频率稳定度优于 5×10^{-9} , 而且半导体激光器的线宽压窄到 3 MHz。

实验表明用光反馈机制, 可以保证半导体激光器在 12 小时的实验时间内(目前只进行了 12 小时的连续实验)工作于法拉第反常色散滤光器的 T_1 峰上。据此要求数字控制子系统对半导体激光器注入电流的调节应能使其可靠工作在峰顶“平台”电流上。

本文对数字控制子系统进行了设计, 其原理参见图 1 的虚线框外部分, 详细电路图不在此一一列出。MCU 是标准的 8031 单片控制器及外围电路, A/D 采用 12 位逐次比较的 AD574A, 由 LF398 构成其采样/保持电路, D/A 选用 12 位 DAC1230, 由 MC1404 提供 5.0 V 基准电压, 由 LF356 将 DAC1230 的输出电流信号变换为电压信号。自行设计了半导体激光器的精密电流源。电流输出范围 0~ 100 mA。电路初调表明, 数字控制子系统可对半导体激光器进行控制。在此基础上, 并参考光反馈子系统实验结果(即半导体激光器注入电流的数据), 设计控制软件, 基本思想在第 2 节中已描述。经过系统联调, 数字控制子系统可将半导体激光器的工作频率控制在法拉第反常色散滤光器的 T_1 峰顶上。由于光反馈外腔腔长已调节好, 故当数字控制系统将半导体激光器控制于法拉第反常色散滤光器的 T_1 峰顶时, 通过外腔光反馈对

半导体激光器进行稳频,使采用法拉第反常色散滤光器的光电双反馈激光信标进入工作状态。实验表明,该系统上电后 30 ms 内,半导体激光器可搜寻到 T_1 峰,并受光反馈子系统稳频控制。人为遮挡激光束使系统失锁,等取消遮挡后,系统又可在 30 ms 内进入工作状态。改变控制子程序的初值及相关控制判断条件,可使激光信标分别工作于法拉第反常色散滤光器的 T_2 、 T_3 、 T_4 峰上。为了验证程序的正确性,用光差拍法确定信标在相应程序控制下的工作频率。用一扫频的半导体激光器扫出法拉第反常色散滤光器透射谱,显示于示波器上,再由此扫频激光与进入工作状态的信标激光共束,射在另一探测器上。探测器带宽为 50 kHz~ 50 MHz。当两束激光的相减信号在此带宽内,则可由此探测器记录下差拍信号。将此信号与透射谱信号同步显示于示波器上,就得到图 6 所示的差拍实验结果。因此,可根据实际要求,只要使系统执行不同的控制子程序,即可使激光信标工作于不同的频率上。

以上实验证明,本文提出的采用法拉第反常色散滤光器光电双反馈激光信标方案是可行的,达到了研究的目标。

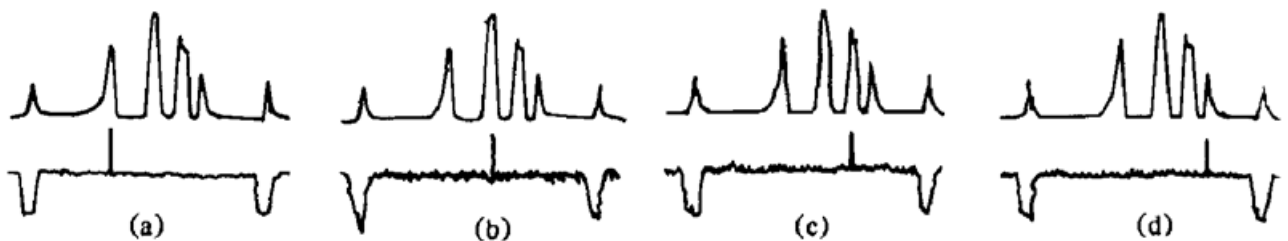


Fig. 6 Experimental results of frequency beat

(a) output of T_1 sub-program; (b) output of T_2 sub-program; (c) output of T_3 sub-program; (d) output of T_4 sub-program

综上所述,本文提出的采用法拉第反常色散滤光器的光电双反馈激光信标新方案,通过实验,证明了该方案可行,并具有高抗干扰、高稳定等优点,实现了上电自动工作的目标。该激光信标系统将对提高卫星激光通信系统中跟瞄接收系统的信噪比有重要作用。

参 考 文 献

- [1] G. Stephen Mecherle, Chair/Editor., Proc. Free-Space Laser Communication Technologies. *Proc. SPIE*, 1994, **2123**; 1995, **2381**; 1996, **2699**
- [2] James R. Lesh, Ramon Depaula, Overview of NASA R&D in Optical Communications, Proc. Free-Space Laser Communication Technologies VII, USA, *Proc. SPIE*, 1995, **2381**: 4~ 11
- [3] Reinhard H. Czichy, Zoran Sodnik, Bernhard Furch *et al.*, Design of an Optical Ground Station for In-Orbit check-out Free Space Laser Communication Payloads, Proc. Free-Space Laser Communication Technology VII, USA, *Proc. SPIE*, 1995, **2381**: 26~ 37
- [4] K. Araki, Y. Arimoto, M. Shikatani *et al.*, Performance evaluation of Laser Communication equipment onboard the ETS-VI satellite, Proc. Free-Space Laser Communication Technologies VII, USA, *Proc. SPIE*, 1996, **2699**: 52~ 59
- [5] Keizo Nakagawa, Akio Yamamoto, Preliminary design of laser utilizing communication equipment (LUCE) installed on optical inter-orbit communication engineering test satellite (OLCETS), Proc. Free-Space Laser Communications Technologies VII, USA, *Proc. SPIE*, 1995, **2381**: 14~ 20
- [6] K. E. Wilson J. R. Lesh, K. Araki *et al.*, Preliminary results of the ground/orbiter lasercomm demonstration experiments between table mountain and the ETS-VI satellite, Proc. Free-Space Laser Communication Technologies VIII, USA, *Proc. SPIE*, 1996, **2699**: 121~ 132
- [7] Kyunam choi, Optical feedback locking of a diode laser using a cesium Faraday filter. *Opt. Commun.*, 1993, **96**(4, 5, 6): 240~ 244

- [8] 陈怀林, 彭玉峰, 汤俊雄等 一种新型原子共振滤光器研究. 光学学报, 1992, **12**(9) : 841~ 845
- [9] Govind P. Agrawal, Line narrowing in a singlemode injection laser due to external optical feedback. *IEEE J. Quant. Electron.* , 1984, **QE-20**(5) : 468~ 471

A Novel Scheme of Laser Beacon

Duan Minghao Kong Jiankun Tang Junxiong

(*Electronics Department*

Local Fiber Optic Communication Networks and Advanced Optical Communication System

Peking University, Beijing 100871)

(Received 17 August 1996; revised 28 October 1996)

Abstract This paper presents a novel scheme of laser beacon which employ the FADOF as frequency selecting device. By applying electronic and optical feedback to control beacon system, the stability, reliability and ability of overcoming interference of laser beacon could be enhanced. The system could also be initiated automatically. The frequency stability of the laser beacon was better than 5×10^{-9} , and the LD frequency of the system could be stabilized at any peak of FADOF within 30 ms. This scheme could meet the need of novel pointing, acquisition and tracking (PAT) system using FADOF, and will have a big influence in buiding laser communication link between satellite.

Key words atomic filter, laser beacon, free space laser communication.