

文章编号 : 0253-2239(2001)07-0792-04

基于边缘技术的大气激光通信原理研究*

刘金涛¹⁾ 张凯临¹⁾ 王 勇¹⁾ 刘智深²⁾

(1) , 青岛海洋大学海洋遥感教育部重点实验室 , 青岛 266003
(2) , 青岛海洋大学物理海洋教育部重点实验室 , 青岛 266003

摘要 : 介绍了利用边缘技术检测激光频率信号 , 实现大气激光通信的原理。描述了利用碘分子滤波器作为边缘滤波器的原理性实验系统 , 并介绍和分析了实验结果。基于边缘技术的通讯系统拥有很窄的光学带宽和很高的激光频率稳定性 , 系统的光学信号带宽在 400 MHz 以内 , 并且接收系统仅对激光信号的频率敏感 , 可以剔除大气中绝大部分的干扰。对于原理实验的不足之处 , 文中进行了初步的探讨。

关键词 : 边缘技术 ; 边缘滤波器 ; 大气激光通讯

中图分类号 : TN929.12 文献标识码 : A

1 引 言

大气激光通讯以大气为传输介质 , 由于大气中有强烈的背景光、雨、雾和湍流的干扰 , 一直未取得实质性进展。目前 , 大气激光通讯主要应用于海岸与海岸之间、岛与岛之间、舰船之间 , 以及城市高层设施之间等的短距离保密通讯。

边缘技术中^[1] , 窄线宽激光稳定在超窄带光学滤波器的一条透过率沿上。由于透过率沿有陡峭的响应特性 , 因此激光频率(波长) 微小的变化就可以转化为很大的透过率变化。依照此原理 , 在通讯系统的发射端控制激光频率的变化 , 接收端就可利用边缘滤波器检测出相应信号。在该技术中 , 因为使用的激光线宽很窄 , 激光频率稳定性很高 , 所以整个激光通讯系统的光学带宽很窄 , 可以滤除大气中绝大部分的背景光、雨、雾和湍流的干扰。同时 , 接收系统对信号强度不敏感 , 只对激光频率的变化有灵敏的响应 , 可大大消除大气湍流的影响。

文中介绍了利用边缘技术检测激光频率信号的原理。依据此原理 , 利用碘分子滤波器作为边缘滤波器完成了原理性实验。实验结果和理论计算表明该原理实验系统的光学信号带宽小于 400 MHz , 达到了预期的目的。同时 , 该原理实验系统也暴露了调制频率低的缺点 , 这是由于所用激光器频率调节慢造成的 , 文中提出了解决的方法。

2 原 理

图 1 简要地说明了边缘技术检测激光频率信号的原理。

图 1 中曲线 1 为归一化的边缘滤波器(碘分子滤波器) 透过率曲线 , 其光谱透过率函数为 $f(\nu)$, 则激光透过该滤波器的信号 $F(\nu)$ 为

$$F(\nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\nu - \nu') f(\nu') d\nu' , \quad (1)$$

其中 $h(\nu)$ 为激光归一化能量分布函数。

将激光发射频率(波长) 稳定在频率 ν_0 处 , 如果在应用的范围内 $f(\nu)$ 近似为线性函数 , $h(\nu)$ 光谱线宽又远小于该频率范围 , 则 $F(\nu)$ 也近似为线性函数 , 即

$$\Delta F(\nu) = F(\nu_0 + \Delta\nu) - F(\nu_0) = \beta \Delta\nu , \quad (2)$$

其中 β 为 $F(\nu)$ 斜率。

由 (2) 式可知 , 激光透过该滤波器的信号

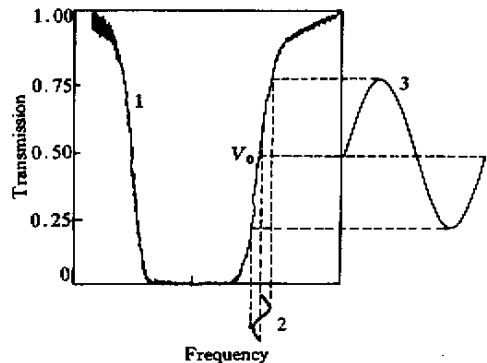


Fig. 1 The schematic of detecting laser frequency signal using edge technology

* 国家自然科学基金(49805001) 资助课题。

收稿日期 2000-04-17 ; 收到修改稿日期 2000-06-23

$\Delta F(\nu)$ 与激光频率变化 $\Delta\nu$ 成正比。如果激光频率成正弦变化,则 $F(\nu)$ 也成正弦变化,这就完成了对激光频率信号的检测。图 1 中曲线 2 为激光中心频率的变化,曲线 3 为透过边缘滤波器输出的光强度变化,即检测得到的信号。

3 原理实验系统

图 2 为基于边缘技术的激光通讯原理实验系统框图。

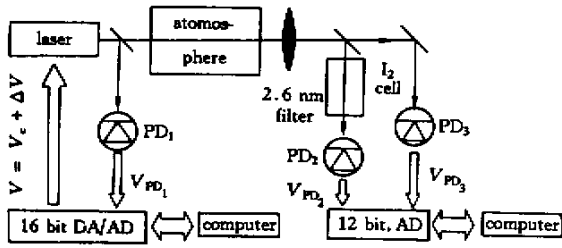


Fig.2 Block diagram of experimental laser communication system

该系统中,激光器为美国 Lightwave 公司的 142 型半导体抽运激光器。输出激光波长为 532.2 nm,线宽为 10 kHz/ms。通过调节激光器外加电压,激光频率可调范围为 10 GHz,并且在该范围内激光频率变化与外加电压成正比。边缘滤波器为碘分子滤波器,实验中使用碘分子 1106 吸收线(即图 1 中曲线 1)一条翼的线性部分检测激光频率信号,该吸收线峰值(图 1 中 A 点)的波数为 18787.12 cm^{-1} [2],在温度为 70 °C 时实际测量的吸收线半高全宽大约为 2 GHz,其线性部分的频率变化范围在 400 MHz 以内(在 532.2 nm 附近相当于光谱宽度 $3.78 \times 10^{-4} \text{ nm}$)。因此,系统发射激光信号的频率变化范围也相应控制在 400 MHz 以内,即该系统的信号带宽小于 400 MHz。激光频率调制的外加电压由计算机控制 16 bit D/A 输出。光电二极管 PD₁ 在发射端监测激光能量输出,由 16 bit A/D 或 D/A 数字化并送入计算机。光电二极管 PD₂ 和 PD₃ 在接收端检测透过碘分子滤波器的激光信号,分别由 12 bit A/D 数字化后送入计算机。

实验时,首先将激光频率调节并稳定在 1106 吸收线 ν_0 点(如图 1 所示),对应的电压为 V_c 。进行激光通讯时 ΔV 按照正弦变化,控制 142 型半导体抽运激光器频率按正弦变化。在接收端,PD₂ 和 PD₃ 检测到的碘分子滤波器透过率信号 V_{PD_2}/V_{PD_3} 也为正弦信号,实现了激光通讯。

本实验主要研究碘分子滤波器检测激光频率信号的可能性和效果,因此实验中没有考虑强背景光的影响,接收端应用了半高全宽为 2.6 nm 的干涉滤光片预先滤除部分背景光干扰。

4 原理实验结果

图 3 为激光经过不同频率、相同幅度正弦电压 ΔV 调制后,在接收端由光电二极管 PD₂ 和 PD₃ 检测到的信号 V_{PD_2}/V_{PD_3} 强度曲线。

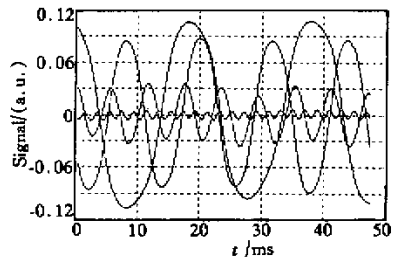


Fig.3 The received laser signals modulated by different frequencies and same amplitude voltages

由图 3 可以看出,碘分子滤波器检测的激光信号在频率信息方面基本没有损失。但是随着调制电压频率的增加,对于相同振幅的调制电压,输出激光信号的振幅减小。这是由于所用 142 型激光器频率的调节速度慢造成的。该激光器频率最快调节速度为 200 MHz/min,当调制电压频率较高时,该激光器响应有明显迟滞。图 4 反映了输出激光信号振幅减小的趋势。

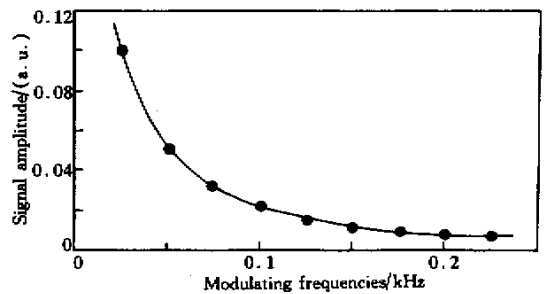


Fig.4 The decrease tendency of the laser signal amplitudes with the increase of modulating frequencies

142 型激光器长时间的频率漂移可以控制在 1 MHz 以内,对应的碘分子滤波器透过率约为 0.1%,即小于 0.1% 的电压调制激光信号与激光本身噪声就无法分辨。又因为调制激光信号在振幅方面信息有损失,所以本实验系统应有频率响应上限。由图 4 可以拟合得到调制后光信号振幅 I 与调制频

率 ω 的关系:

$$I = 0.4768 \exp(-8.9257\omega). \quad (3)$$

由上式计算出调制振幅 I 大于 0.1% 的调制频率 ω 上限约为 0.5 kHz。实验中,由于 16 位 AD/DA 速度和其它因素的限制,没有达到频率的上限,测到的最高调制电压的频率上限约为 0.3 kHz。

为了进一步验证碘分子滤波器检测激光频率信号的方法在激光通讯中的应用可能,实验中利用该系统传输了两幅图像,如图 5。其中,第一幅图像的大小为 630 bytes,第二幅图像的大小为 32758 bytes。传输时对数字数据采用频率调制的方法,即将数字信号 0 调制成频率为 0.2 kHz 的正弦信号,将数字信号 1 调制成频率为 0.04 kHz 的正弦信号。图 6 为实际传输的信号中的一部分。

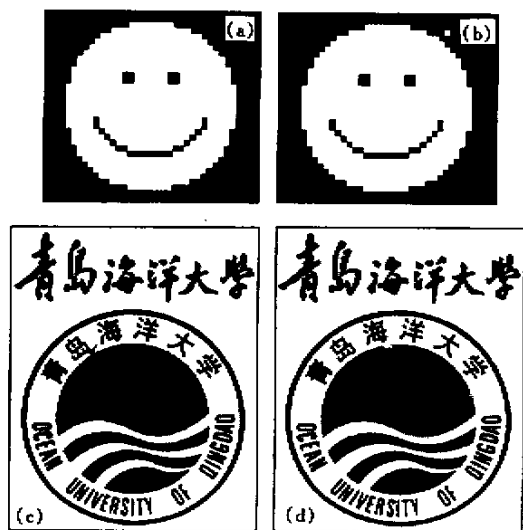


Fig.5 The two images used in experiments. (a) The transmitted image ;(b) The received image ;(c) The transmitted image ;(d) The received image

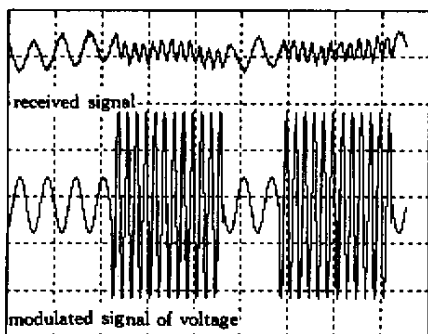


Fig.6 Part of signals transferred in experiments

将原图像与传输图像相比较,第一幅图像的传输中有 2 个数据出错,第二幅图像中有 22 个数据传

输出错,因此误码率为 8.4×10^{-5} 。在实际应用中,如此高的误码率是不行的。造成如此高误码率的原因主要有以下两方面:1)在接收信号时,对于信号 0 和 1 的检测只是使用了一个简单的算法,这是因为本实验主要研究边缘滤波器对激光频率检测的效果。如果采用完善的算法,误码率将会大大降低。2)实验中,为了抑制激光频率的漂移,在 142 型激光器上外加一稳频控制电压。通讯时,需用正弦调制电压信号替代原有的稳频控制电压,从而由激光频率漂移造成的碘分子滤波器的透射率变化大于原有的 0.1% 精度。这样实际接收到的激光信号在宏观上有起伏,造成了检测信号时出现误码,这也与检测信号的算法简单有关。

5 讨 论

该实验仅是原理性实验,未考虑强背景光的影响,也没有雨、雾等衰减的干扰和湍流等方面的影响。大气通讯中,太阳背景光的干扰是实际应用中的最大障碍。探测器接收到的太阳背景光的强度可由下式计算^[3]:

$$B_S = A\tau\eta_e\eta_o d\Omega\Delta\lambda W, \quad (4)$$

其中假设,接收面积 $A = 314 \text{ cm}^2$ (望远镜直径为 200 mm),测量时间 $\tau = 1 \text{ s}$,量子效率 $\eta_e = 0.2$,光学效率 $\eta_o = 0.3$,视场角 $d\Omega = 5 \times 10^{-3} \text{ sr}$,光谱宽度 $\Delta\lambda = 0.1 \text{ nm}$ 。对于本实验系统,激光信号的光谱宽度为 $3.78 \times 10^{-4} \text{ nm}$,所以选择光谱宽度为 0.1 nm 的滤色片进行计算是合理的。 W 为太阳光谱强度,在 532 nm 附近, $W \approx 8 \times 10^{-3} \text{ Wcm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}\text{sr}^{-1}$ 。利用上述数据计算得到太阳背景光的强度 B_S 为 $7.536 \times 10^{-8} \text{ W}$ 。对于功率至少为毫瓦级的激光通讯信号,探测器可以有足够高的信噪比。

大气中的雨、雾和湍流等的干扰,也会对激光通讯造成影响。其中,雨和雾的影响主要是增加大气的衰减,从而减小激光在大气中的传输距离。由于光只能近似地沿直线传播,通讯距离不可能很远,同时光电探测器件有足够高的灵敏度,因此雨和雾对大气激光通讯的影响并不十分严重。大气湍流主要影响大气的折射率场,其影响可用折射率结构常数 C_n^2 表征。 C_n^2 的量级约在 $10^{-18} \text{ m}^{-2/3} \sim 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ 左右^[4]。大气折射率场的变化会造成通讯接收端的信号能量不规则的起伏,这对于以检测能量为主的激光通讯技术是十分严重的影响。由前述原理可知,基于边缘技术的大气激光通讯仅对激光信

号的频率变化有灵敏的响应,对于激光信号的能量起伏并不敏感,这就在根本上克服了大气湍流的影响。同时,由于接收端使用了超窄带光学滤波器,这在很大程度上剔除了背景光能量起伏的干扰。

本原理实验系统利用激光器外加调制电压控制激光信号频率。由于实验设备的限制,该原理性实验系统实现的最高调制频率仅为 0.3 kHz 左右。LightWave 142 型系列激光器频率最快调节速度为 200 MHz/min,在原则上可以实现更高调制频率通讯。但是,该激光器频率的调节速度慢是限制本实验系统通讯速率低的根本原因。因此可使用其它频率调节速度快的半导体抽运激光器以提高调制频率。或者,在激光发射端利用声光调制控制激光信号频率,不仅可以获得高的激光调制频率,而且也不需要可调谐激光器,这就大大减弱了对激光器性能

的要求,比本实验系统方案更优越。

总之,基于边缘技术的大气激光通讯技术简单,系统有很好的频率稳定性和很窄的线宽,可以大大减小大气中的种种干扰,在原理上是可行的。

参 考 文 献

- [1] Korb C L , Gentry B M , Weng C Y. Edge technique : theory and application to the lidar measurement of atmospheric wind. *Appl. Opt.* , 1992 , **31**(21) : 4202 ~ 4212
- [2] Arie A , Byer R L. Laser heterodyne spectroscopy of $^{127}\text{I}_2$ hyperfine structure near 532 nm. *J. Opt. Soc. Am. (B)* , 1993 , **10**(11) : 1990 ~ 1997
- [3] Kildal H , Byer R L. Comparison of laser methods for the remote detection of atmospheric pollutants. *Proc. IEEE* , 1971 , **59**(12) : 1644 ~ 1663
- [4] 吴 健 , 乐时晓. 随即介质中的光传播理论. 成都 : 成都电讯工程学院出版社 , 1988. 140 ~ 142

Principle Study on Atmospheric Laser Communications Based on Edge Technology

Liu Jintao¹⁾ Zhang Kailin¹⁾ Wang Yong¹⁾ Liu Zhishen²⁾

(1) , *Ocean Remote Sensing Laboratory of Ministry of Education of China , Ocean University of Qingdao , Qingdao 266003*
 (2) , *Physical Oceanography Laboratory of Ministry of Education of China , Ocean University of Qingdao , Qingdao 266003*

(Received 17 April 2000 ; revised 23 June 2000)

Abstract : A principle study of detecting laser frequency signals based on edge technology for atmospheric laser communications is presented. An experimental system is built up in which an iodine cell is used as the edge filter. The experimental results were analyzed in detail. Applying edge technology the communication system has two main advantages , the narrow optical bandwidth and the high stability of laser frequency. So an ultra-narrow optical filter with bandwidth about 400MHz can be used in the receiver. The receiver is only sensitive to the frequencies of the laser signals. Most of the interference of background light field can be eliminated. Some problems exposed in the experiments are discussed.

Key words : edge technology ; edge filter ; atmospheric laser communication