

激光探测大气典型气体的研究进展

黄宝库

(华北光电技术研究所,北京 100015)

摘要:利用气体的光谱吸收特性,激光可以被用来探测气体。介绍了一对波长激光对单一气体进行探测,多波长激光探测多种气体的研究。随着新型激光器技术的发展,超连续谱激光探测多种气体已成为新的研究和应用方向。

关键词:激光;超连续谱探测;多种气体

中图分类号:TN249 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2012.11.004

Research progress of laser detecting typical gases in atmosphere

HUANG Bao-ku

(North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015, China)

Abstract: Making use of gas's absorbing spectrum line characteristic, laser can be used to detect gases. This paper introduces the research of a pair of wavelength laser detecting a single gas and multi-wavelength laser detecting various gases. Along with the development of the new laser technology, the use of super-continuum spectrum of laser to detect gases has become a new research and application direction.

Key words: laser; super continuous spectrum detection; gases

1 引言

在过去的几十年中,随着现代工业的发展,环境污染问题也越来越严重。对于大气环境保护,尤其对大气中的某些污染物质,如臭氧(O₃)、二氧化硫(SO₂)、二氧化氮(NO₂)、甲烷(CH₄)、六氟化硫(SF₆)以及气溶胶等的监测,引起了人们的广泛关注。利用气体的光谱吸收特性,激光雷达探测典型气体已经得到了广泛的成功应用。

2 激光探测典型气体研究进展

激光对大气中气体的探测,随着激光技术的进步,已经从一对波长对单一气体的探测到多波长探测多种气体。超连续谱激光探测多种气体的研究刚刚开始,就已展现出其独特的优势。

利用一对波长的激光进行对气体物质的测量构成了最初的差分吸收激光雷达探测系统(DIAL),它可以探测数公里的距离。1981年,美国麻省理工学院(MIT)林肯实验室研发出了一台长程激光雷达探测系统^[1],它采用双波长CO₂激光器为激光源,在

2.7 km 的距离范围内,探测大气中的CO。另外该实验室研发的另一双波长CO₂ DIAL系统,同样在探测距离为2.7km的范围内,可以用来探测蒞、UDMH和MMH,这是第一次用激光来探测剧毒碳氢化合物。1999年,美国空军研究实验室与美国国防部共同开发了处于3~5 μm 区的中红外双波长探测系统^[2],可以用来探测低浓度的化学气体物质,其探测距离超过了5 km,灵敏度可以达到5 ppb,误差率控制在10%以内。2006年,出于对甲烷和硝基丙烷进行探测的目的,立陶宛研制成功了一个基于可调谐OPO的全固态DIAL系统^[3]。2006年,为了分析探测毒剂的DIAL系统的性能,印度设计了一套仿真软件,仿真结果表明,对于一个CO₂ DIAL系统,若其能量为100 mJ,在5 km探测距离范围内,探测浓度可以达到1 ppm^[4-5]。

作者简介:黄宝库(1986-),男,硕士研究生,主要从事激光探测,激光测距等方面的研究。E-mail:huangbaoku2008@163.com
收稿日期:2012-03-26

随着多波长激光器的研制成功,多波长激光探测系统随着激光器技术的进步成为研究的重点。1985年,Russell E. Warren 将双波长探测单种气体物质的激光探测系统推广到了多波长来探测多种气体物质^[6],他将采用似然比检验方法对多种气体物质进行探测成功地应用于频率捷变激光雷达^[7]。1997年,美国加利福尼亚大学 Lawrence Livermore 国家实验室开展了用于多波长激光探测的浓度估计技术的研究^[8],其比较了几种浓度估计方法,采用的数据来自 8 或 10 个中红外波长的外场测试,所采用的方法主要包括联合信号平均、求比值、各种最大似然估计等。1999年,美国军队 Edgewood 化学和生物中心提出了一种多波长算法^[9],该算法针对频率捷变激光雷达来探测和估计一种或多种气体物质的浓度,算法对所有可能的激光脉冲对进行权平均,以此通过不断调整每种气体的浓度值,使激光雷达方程与测量数据达到吻合,可以用来同时探测和估计 DEMP、DIMP 或者 TEMP、DIMP。本世纪初,日本用多波长 DIAL 系统测量低对流层的微量气体,可用多波长测量 SO₂、O₃ 和 NO₂,其测量精度得到提高,可低于 1 ppb^[10-12]。

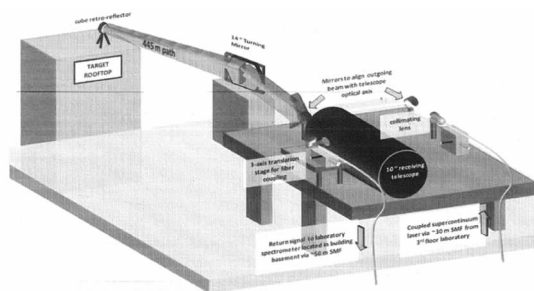
随着超宽光谱源技术的发展,可以产生频谱极宽且平坦的超连续谱,这样的光源为同时更精确地探测更多气体提供了更大的发展空间,采用超连续谱光源的激光雷达称为超连续谱激光雷达。目前国外最先进的主动式超连续光谱探测装置是“白光激光雷达”,在国外的研究中,法国和德国两个国家重点实验室联合耗巨资在研制,如图 1 所示,目前该系统仅对大气中的 H₂O 和 O₂ 等高浓度常规气体进行试验。



(b)本地试验装置

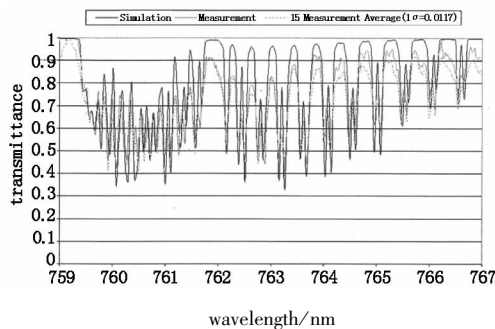
图1 白光激光雷达

2009年,宾夕法尼亚大学一个实验小组 Perry S. Edwards 等人在大于 800 m 的路径内由实验测得的氧气的吸收谱线与 Modtran 仿真几乎吻合^[13],从而有力地验证了超连续谱激光探测气体的巨大优势。如图 2 所示。



MODTRAN™ 5 Simulation for Oxygen Compared with an 890 m Atmospheric Path Measurement

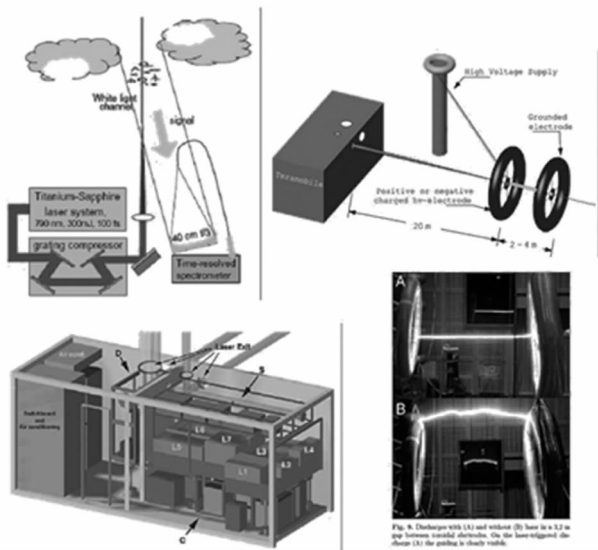
(a)实验装置



(b)实验结果与仿真图形

图2 氧气吸收谱线探测

国内开始对差分吸收激光雷达的研究较晚,20世纪 90 年代才开始对差分吸收激光雷达进行研究。20 世纪 90 年代,东北电力学院初步设计了一套现场测量甲烷的中红外激光探测实验系统^[14]。中国科学院安徽光学精密机械研究所研制成功了我国第一台紫外 DIAL^[15-16],用来对平流层和对流层中的臭氧进行测量。2001 年起,电子科技大学开始进行 DIAL 建模仿真及信息处理算法的研究,在多波长探测多种气体、气体浓度估计算法、回波信号统计等方



(a)系统原理和主要构成

面进行了深入研究^[17-19]。2006年,中国科学院安徽光学精密机械研究所杜小勇、张寅超等利用车载双波长激光探测装置从垂直、水平方向分别测出了北京城区低层大气中污染物 NO₂ 的典型测量数据^[20]。2008年,解放军电子工程学院对双波长激光探测 CO₂ 精度进行了分析^[21]。在超连续谱探测方面,天津大学、中科院半导体所在超连续谱激光器研究上取得了一定进展,华北光电技术研究所对超连续谱激光探测小分子气体进行了初步试验并对超连续谱激光大气传输,探测气体进行了仿真计算。

3 总结

本文介绍了利用气体的光谱吸收特性,激光雷达探测大气气体的发展历程与现状。对大气中气体的探测,最初是一对波长对单一气体的探测,随着激光器技术的进步,多波长探测多种气体已成为了研究的重点,超连续谱激光雷达的研究刚刚开始。随着超宽光谱源技术的发展,包含丰富谱特征信息的超连续谱激光为同时更精确地探测更多气体提供了更大的发展空间,采用超连续谱光源对大气环境进行侦测将成为化学毒剂和大气典型气体主动遥测技术发展新的方向。

参考文献:

- [1] D K Killinger, N Menyuk. Remote probing of the atmosphere using a CO₂ DIAL system [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1981, 17(9): 1917 - 1929.
- [2] Coorg R Prasad, Pierre Kabro, Savyasachee L Mathur, et al. Tunable IR differential absorption lidar for remote sensing of chemicals [J]. Proc. SPIE, 1999, 3757: 87 - 95.
- [3] V Vaicikauskas, Z Kuprionis, M Kaucika, et al. Mid-infrared all solid state DIAL for remote sensing of hazardous chemical agents [J]. Proc. SPIE, 2006, 6214: 62140E - 1 - 62140E - 10.
- [4] Mukesh Kumar Jindal, S Veerabuthiran, Jai Paul Dudeja, et al. A versatile simulation software for performance analysis of DIAL system for the detection of toxic agents [J]. Proc. SPIE, 2006, 6409: 64090E - 1 - 64090E - 8.
- [5] Jai Paul Dudeja, Mukesh Kumar Jindal, S Veerabuthiran. Selection of an averaging technique by simulation study of a DIAL system for toxic agents monitoring [J]. Proc. SPIE, 2006, 6750: 67501E - 1 - 67501E - 9.
- [6] Russell E Warren. Detection and discrimination using multiple-wavelength differential absorption lidar [J]. Applied Optics, 1985, 24(21): 3541 - 3545.
- [7] Russell E Warren. Optimum detection of multiple vapor materials with frequency-agile lidar [J]. Applied Optics, 1996, 35(21): 4180 - 4193.
- [8] Ernst T Scharlemann. Comparison of analysis techniques for multiwavelength DIAL [J]. Proc. SPIE, 1997, 3127: 275 - 285.
- [9] Richard G Vanderbeek, Avishai Ben-David, Francis M D'Amico. Detection and estimation of the column content of one or more vapors with a frequency-agile lidar [J]. Proc. SPIE, 1999, 3757: 103 - 112.
- [10] Tetsuo Fukuchi, Naohiko Goto, Takashi Fujii, et al. Error analysis of SO₂ measurement by multiwavelength differential absorption lidar [J]. Opt. Eng., 1999, 38(1): 141 - 145.
- [11] T Fukuchi, C Nianwen, T Nayuki, et al. Multiwavelength lidar system for measurement of trace SO₂, O₃, and NO₂ in the lower troposphere [C]. The 4th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics, 2001, 1: I - 162 - I - 163.
- [12] Tetsuo Fukuchi, Takuya Nayuki, Nianwen Cao, et al. Simultaneous profiling of O₃ and NO₂ in the lower troposphere by multiwavelength differential absorption lidar [J]. Proc. SPIE, 2002, 4484: 112 - 119.
- [13] Perry S Edwards. Supercontinuum laser sensing of atmospheric constituents [J]. Proc. SPIE, 2009, 7323: 73230S - 1 - 73230S - 8.
- [14] Yuming Qi, Xiaoming Wei. The measurement of methane density by means of He-Ne laser differential absorption [J]. Journal of Inner Mongolia Polytechnic University, 1994, 13(1): 59 - 65. (in Chinese)
齐玉明, 魏晓明. He-Ne 激光差分吸收测量甲烷浓度 [J]. 内蒙古工业大学学报, 1994, 13(1): 59 - 65.
- [15] Hu Shunxing, Hu Huanling, Wu Yonghua, et al. L625 Differential absorption lidar system for tropospheric ozone measurements [J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(5): 597 - 601. (in Chinese)
胡顺星, 胡欢陵, 吴永华, 等. L625 差分吸收激光雷达探测对流层臭氧 [J]. 光学学报, 2004, 24(5): 597 - 601.
- [16] Zhen Wang, Huanling Hu, Jun Zhou, et al. Three-wavelength dual-DIAL method for ozone measurements [J]. Proc. SPIE, 1996, 2831: 268 - 277.
- [17] Shirong Yin. Research on return signal statistical model of differential absorption lidar [J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(1): 1 - 5. (in Chinese)

- 尹世荣. 差分吸收激光雷达回波信号统计模型的研究[J]. 光学学报, 2005, 25(1): 1-5.
- [18] Shirong Yin, Weiran Wang. Novel algorithm for simultaneously detecting multiple vapor materials with multiple-wavelength differential absorption lidar[J]. Chinese Optics Letters, 2006, 4(6): 360-362.
- [19] Shirong Yin, Weiran Wang. Denoising lidar signal by combining wavelet improved threshold with wavelet domain spatial filtering[J]. Chinese Optics Letters, 2006, 4(12): 694-696.
- [20] Xiaoyong Du, Yanchao Zhang. Measurement of lower atmosphere gas NO₂ with mobile lidar[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2006, 1(2): 97-100. (in Chinese)
- 杜小勇, 张寅超. 车载激光雷达探测低层大气中 NO₂ [J]. 大气与环境光学学报, 2006, 1(2): 97-100.
- [21] Xiaohong Tao. Accuracy analysis differential absorption lidar for detecting atmospheric CO₂ [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2008, 3(2): 100-103. (in Chinese)
- 陶小红. 差分吸收激光雷达探测大气 CO₂ 精度分析 [J]. 大气与环境光学学报, 2008, 3(2): 100-103.