

文章编号:1001-5078(2021)08-0980-05

· 激光应用技术 ·

基于多波长激光探测海洋大气波导机理及实验研究

吴荣华¹, 李胜勇¹, 任席闯²

(1. 海军工程大学电子工程学院, 湖北 武汉 430033, 2. 91001 部队)

摘要:海洋大气波导是能够影响侦察预警探测装设备和常用民用航型保障设备的重要大气环境因素。本文采用一种基于激光探测遥感探测大气波导的技术,通过分析计算典型海洋大气多波长激光传输特性、光波波段折射率结构常数与激光探测大气波导机理模型。同时通过自主研发的激光雷达在三亚等地进行大量实践大气波导探测,并同步开展探空气球探测低空100 m范围内的温度和湿度剖面,采用温度和湿度剖面获取折射率剖面和激光传输的消光系数垂直分布以及光波段的折射率结构常数分布,实验分析初步表明用激光探测大气波导尤其是海上大气波导尤其是蒸发波导的可行性。

关键词:激光探测;大气波导;消光系数;大气折射率

中图分类号:TB936;TN249 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2021.08.002

Based on multiple wavelength laser detection marine atmospheric duct mechanism and experiment research

WU Rong-hua¹, LI Sheng-yong¹, REN Xi-chuang²

(1. Dept. of Electron Eng., Naval Univ. of Engineering, Wuhan 430033, China; 2. Unit 91001)

Abstract: Ocean atmospheric duct is an important atmospheric environmental factor that can affect reconnaissance warning equipment and civil navigation support equipment. In this paper, a new technique of laser detection of atmospheric duct is introduced, the propagation characteristics of multi-wavelength laser in ocean atmosphere, refractive index structure constant of optical wave band and the mechanism model of multi-wavelength laser detecting atmospheric duct are analyzed. A lot of experiments have been carried out in Sanya and other places by using self-developed lidar, the humidity and the temperature of the atmosphere with different height were measured simultaneously when the return back signal of laser radar was collected. The vertical profile of the temperature and humidity was measured, and then the vertical profile of atmospheric refractivity was calculated. The space distribution and the temporal distribution of the refractive index structure constant were analyzed. It came to the conclusion that the vertical profile of the extinction coefficient had some clear relativity with atmospheric duct, this approved that detecting the atmospheric duct, and especially evaporation duct with laser method was probable.

Keywords: laser detection; atmospheric duct; extinction coefficient; atmospheric refractivity

1 引言

大气波导由于具有能够显著影响无线电系统覆

盖范围等使用效能的特性,使得其具有重要的军事和民用应用价值,一直是世界强国关注的热点问题。

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 41306036)资助。

作者简介:吴荣华(1980-)男,博士,现主要从事激光探测研究。

通讯作者:李胜勇(1976-)男,博士,副教授,主要从事信息对抗技术研究。E-mail:bigbird_tx@126.com

收稿日期:2020-09-26; **修订日期:**2020-11-16

在军事应用上,海上大气波导环境对海上作战至关重要,可以影响舰载和机载雷达、侦察、电子对抗和通信装备的效能,进而直接影响海上超视距打击、防空反导的能力,是指挥人员制订作战预案必须考虑和掌握的海上环境因素;在民用应用上,大气波导可以影响移动通信系统传输能力、通话质量等指标,也可使民用船舶自动识别系统(AIS)、广播式自动相关监视系统(ADS-B)等关乎民用交通安全的设备发生性能增效或降能现象^[1-3]。

受环境条件影响形成的大气湍流也会存在于低空大气波导中,并可以造成大气修正折射率随机变化的混沌现象,进而会造成在低空大气波导中传播的电磁能量泄露和电波传播损耗的随机起伏,使雷达等电子设备性能发生变化。海洋大气波导的非均匀性、湍流扰动性使得在研究低空大气波导时不能简单地将其认为是均匀、无扰动的气层^[4-6]。

利用激光探测大气波导的技术在国内外文献中有发表,但其基本方法均是利用激光雷达分别测量大气温度、湿度,然后计算大气折射率剖面来作为波导判据。美国 R. Hivey, J. Rosenthal 等人从 1994 年起在这方面做了研究。美国海军 Paul A. Frederickson 等人进行了 RED 实验,在 13 m 高度发射,接收在夏威夷主岛瓦胡岛。美国和荷兰海军支持, A. M. J van Eijk 和 G. J. Kunz 等人在 2001 年开发了 Electro - Optical Signal Transmission and Ranging 软件以研究海面光传输特性的折射、湍流和吸收效应。本文采用基于激光探测大气波导新技术方法,开展对激光回波信号进行分析以实习海洋大气波导遥感探测,该技术能够实习全方位、高实时、高灵活和高保密性等优点,能够很好满足海洋大气环境波导探测的应用需求^[9-11]。

2 理论数据模型与处理算法分析

2.1 激光大气传输衰减理论计算分析

在低空海洋的大气环境中,光的传输特性中散射占主导作用,吸收起相对次要作用。因此通常认为在距离为 R_V 公里范围大气对波长为 λ_0 辐射的透过率由散射决定^[7-8]：

$$\tau_s(\lambda_0, R_V) = \exp[-\delta(\lambda_0) \cdot R_V] \quad (1)$$

根据公式(1)能够推出得到波长 λ_0 的散射系数 $\sigma(\lambda_0)$ 与 R_V 的关系式：

$$\sigma(\lambda_0) = \frac{3.912}{R_V} \quad (2)$$

在近红外波段范围内,波长为 λ 的散射系数可以由下式得到：

$$\sigma(\lambda) = \frac{3.912}{R_V} \left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^{-q} \quad (3)$$

结合一些实际研究中实测的丰富数据,对公式(3)中参数 q 值计算表达式采取了区间分段修正,分段函数细化后,尽量使得结果更为精确,修正分段函数表达式为^[3]：

$$q = \begin{cases} 0 & 0 \text{ km} \leq R_V < 0.5 \text{ km} \\ R_V - 0.5 & 0.5 \text{ km} \leq R_V < 1 \text{ km} \\ 0.16 R_V + 0.34 & 1 \text{ km} \leq R_V < 3.5 \text{ km} \\ 0.585 R_V^{1/3} & 3.5 \text{ km} \leq R_V < 6 \text{ km} \\ 1.3 & 6 \text{ km} \leq R_V < 50 \text{ km} \\ 1.6 & R_V \geq 50 \text{ km} \end{cases} \quad (4)$$

2.2 高分辨率激光断层测量理论建模分析

通过激光雷达主动发射的激光束,在海洋大气中传播同时被其大气气溶胶散射,采用高采样率、高分辨率和宽频带的激光遥感探测系统对不同距离上的能量回波信号进行采样处理分析,得到实时和高精度的大气相关光学参数,结合激光雷达方程能够获取距离为 z_1, z_2 两个相邻采样点上信号回波幅度分别为：

$$P(z_1) = P_0 \cdot Y(z_1) \cdot \frac{c \cdot t_p}{2} \cdot \frac{A_r}{z_1^2} \cdot \beta(z_1) \cdot \exp(-2 \int_0^{z_1} \alpha(z) dz) \quad (5)$$

$$P(z_2) = P_0 \cdot Y(z_2) \cdot \frac{c \cdot t_p}{2} \cdot \frac{A_r}{z_2^2} \cdot \beta(z_2) \cdot \exp(-2 \int_0^{z_2} \alpha(z) dz) \quad (6)$$

在实际应用中所采取的采样间隔通常非常小,因此认为存在下面的关系公式：

$$\beta(z_1) = \beta(z_2) \quad (7)$$

$$T(z) = \exp(-\sigma z) \quad (8)$$

结合公式(5)、(6)、(7)、(8)能够推导得出在海洋大气中的水平消光系数 σ ：

$$\sigma = -\frac{1}{2(z_1 - z_2)} \ln \frac{P(z_1) z_1^2}{P(z_2) z_2^2} \quad (9)$$

在海洋大气环境中垂直方向的光学厚度为：

$$\int_0^z \sigma(z') dz' = \frac{\ln \frac{P(z, \alpha_2)}{P(z, \alpha_1)} + 2 \ln \frac{\csc \alpha_2}{\csc \alpha_1}}{2(\csc \alpha_1 - \csc \alpha_2)} \quad (10)$$

在垂直方向上的大气光学厚度进行对高度 z 求导,能够推导出在各个高度上的消光系数为:

$$\sigma(z) = \frac{d}{dz} \int_0^z \sigma(z') dz' \quad (11)$$

2.3 折射率结构常数的时间和空间分布

根据激光雷达方程中参数特点,将其分解成平均量和脉动量^[4-7]为:

$$\begin{cases} C = \bar{C} + C' \\ \beta(r) = \bar{\beta}(r) + \beta'(r) \end{cases} \quad (12)$$

同时将其代入激光雷达方程中,推倒得出:

$$\ln[P(r) \cdot r^2] = \ln[\bar{C} + C'] + \ln[\bar{\beta}(r) + \beta'(r)] - 2 \int_0^r \sigma(r') dr' \quad (13)$$

光波波段的折射率结构常数时间分布函数为:

$$\begin{aligned} D_\beta(\tau) &= [\bar{\beta}(t_1) - \bar{\beta}(t_2)]^2 \\ &= \beta^2 \left\{ [\ln P(t_1) - \ln P(t_2)]^2 - \frac{(\Delta C)^2}{C} \right\} \end{aligned} \quad (14)$$

光波波段的折射率结构常数空间分布函数为:

$$D_\beta(r) = \frac{\left[\frac{B(r_1) + B(r_2)}{2} \right]^2}{\left\{ \ln \frac{r_1^2 P(r_1) \cdot \beta(r_2)}{r_2^2 P(r_2) \cdot \beta(r_1)} + 2 \int_{r_1}^{r_2} \sigma(r) dr \right\}^2} \quad (15)$$

3 激光探测大气波导实验分析

根据上面的研究思路,我们再通过详细的设计分析研制了用于大气波导探测试验用的激光雷达设备,该激光雷达设备使用后向散射测量的方法,运用高分辨率激光断层回波信号以建模计算海洋大气环境的衰减参数,进而分析计算与大气波导相关的参数数据。该激光雷达设备系统采用脉冲激光器、接收望远镜和信号检测控制处理系统三个基本模块化设计,设备的主要技术参数如表 1 所示。

表 1 激光雷达测试仪主要技术指标

Tab. 1 The principal technical indicators of laser tester

测量范围:50 ~ 20000 m		精确度: ± 5 %	
工作环境: -50 ~ +50 °C		湿度 0 ~ 100 %	
激光器 Laser		接收光学系统	
工作波长:	1060 nm	口径:	48 mm
脉冲能量:	11 mJ	视场:	7°
光束发散角:	1 m rad	中心波长:	1064 nm
脉冲宽度:	10 ns	透过率:	88 %

针对海洋大气环境下蒸发波导发生的关键因素是由于大气湿度随着高度的急剧下降,为了证明利用本文新的激光探测海洋大气波导技术可行性,我们主要的试验思路是利用探空气球搭载自主研发大气温湿度测量仪器系统,该系统采用无线传输的温度传感器和湿度传感器,在南海某特定海区进行试验测量,具体试验方案是选择海洋大气湿度随高度变化剧烈的海区进行试验,采用探空气球测量与激光雷达实时同步测量以比对数据的真实可行性,同时获取测量特定海区的折射率高度剖面数据和图。

同时利用以上同步测量的试验数据进行理论建模计算,分析获取与之相对应的海洋大气气象条件下的实际测量海洋大气消光系数、温湿度以及能见度等参数之间的数据,通过多波长反演理论计算得到其他多波长的反演计算数据,其中波长分别为 $\lambda_1 = 0.532 \mu\text{m}$, $\lambda_2 = 0.860 \mu\text{m}$, $\lambda_3 = 1.060 \mu\text{m}$,选取实际测量的实验用激光雷达的数据 $\lambda_3 = 1.060 \mu\text{m}$ 作为基础反演其他波长的数据,结果如表 2 所示。

表 2 激光雷达多波长测量反演试验数据

Tab. 2 Inversion data of lidar multiwavelength measurement

序号	$T(^{\circ}\text{C})$	RH	R_V (m)	$\sigma(\lambda_1)$	$\sigma(\lambda_2)$	$\sigma(\lambda_3)$
1	6.4	87	3395	1.1866	0.7764	0.6455
2	5.9	91	2253	1.7773	1.2695	1.0966
3	6.9	86	2313	1.7317	1.2313	1.0614
4	8.1	85	2470	1.6230	1.1402	0.9777
5	7.5	89	3412	1.1808	0.7716	0.6411
6	7.3	90	2236	1.7906	1.2808	1.1069
7	6.7	89	2231	1.7946	1.2841	1.1100
8	5.8	92	4748	0.8513	0.5309	0.4322
9	6.1	92	2301	1.7407	1.2388	1.0683
10	4.3	92	4117	0.9803	0.6249	0.5136
11	6.2	91	2258	1.7734	1.2663	1.0936
12	7.8	88	2532	1.5838	1.1073	0.9476

采用上述自主设计的探空气球温度湿度测量系统和大气波导激光雷达探测设备同步获取的特定海区的试验测量数据,对两者的实时同步数据进行分析计算和处理,结合同时出现海洋环境下大气波导的探空气球数据和激光探测数据进行波导预测的判据比对分析,详细的试验数据结果和剖面图如表 3 和图 1,图 2 所示。

表3 特定海区测量数据
Tab.3 Specific sea area survey data

高度/m	温度/(°C)	湿度/%	折射率 M
1	32.01	89.6	432.18
5	32.2	86.5	428.64
10	32.5	83.2	426.99
15	32.6	80.1	422.26
20	32.7	78.2	419.92
25	32.96	72.0	408.73
30	33.15	67.1	400.25
35	33.21	63.5	393.61
40	33.20	60.4	388.68
45	33.51	58.2	385.29
50	33.71	54.0	379.19
55	33.92	50.2	372.40
60	33.95	48.4	369.78
70	34.20	48.2	373.15
75	34.51	48.3	374.15
80	34.35	46.6	372.29
85	34.29	46.1	371.31
90	34.50	44.5	368.51

根据以上激光雷达设备获取的海洋大气环境的高分辨率断层回波信号用斜程数据计算垂直高度的消光系数,根据激光光波段的消光系数高度曲线和常规雷达波段的修正折射指数曲线,两者在曲线拐点的修正折射指数拐点高度具有相似一致性。该结论分析表明,由于在海洋大气环境下海上近洋面不同海况风浪等因素影响,海洋大气水气分子源源不断的融入到大气中,致使近海面湿度非常高,同时叠加了海面上温度剧烈变化,从而造成了海上近洋面雾气层结,在海上试验测试同步获取了典型海面雾气层结构,近海面这种明显的雾气层结构出现明显的分层边界,同时对激光雷达测量的激光回波信号传输形成较大影响,造成消光系数产生波动变化。在分界层结构的下层存在大气气溶胶湿度高同时致使消光系数较大,而在分层结构的上层由于大气气溶胶湿度相比较小致使消光系数偏小,以上测量数据分析结论与通过建模仿真具有很好的一致性。

4 总 结

本文采用理论建模与试验测量相结合的技术对海洋非均匀大气介质中多波长激光传输进行分析研究,给出了利用单波长激光反演多波长激光传输衰减特性的理论建模与试验测量结果,进而应用于多波长激光探测海洋大气波导机理与试验之中,分析了出现大气波导时,对光波段传输影响的主要因素,在此基础上分别对出现大气波导的两种情况,即随高度升高出现大气逆温和湿度锐减,对光波段的传输影响进行了分析。理论计算与试验仿真结果表明,出现大气波导现象与无波导现象出现时,光波段的传输效果也有明显差别,处于海洋大气环境下波导产生的关键因素是湿度变化产生的,在湿度层的分界面上光波段的消光系数出现拐点,实验分析初步表明用激光探测大气波导尤其是海上蒸发波导的可行性。

参考文献:

[1] Maha Achour, Ph. D. Simulating atmospheric Free-Space optical propagation, part II : haze, fog and low clouds attenuations[J]. Proceedings of SPIE, 4873, 2002: 1 - 12.
[2] Michael. Mishchenko, Larry D. Travis, Andrew A. Lacis. Scattering, absorption, and emission of light by small particles [M]. Press Syndicate of the University of Cam-

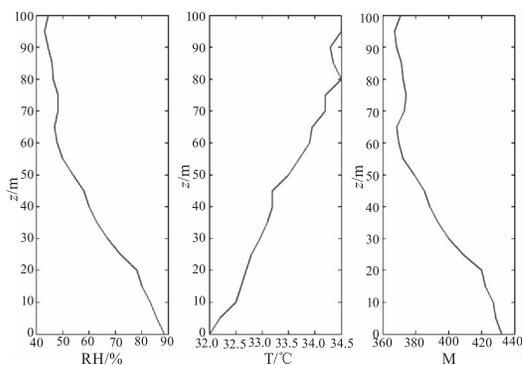


图1 海面温度、湿度、折射率剖面图

Fig.1 The profile of temperature, humidity and refractivity near sea surface

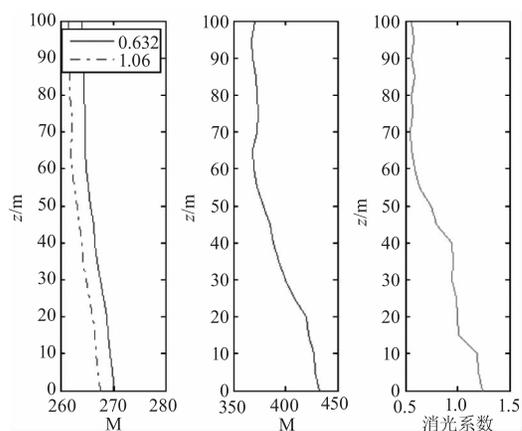


图2 光波段与雷达波折射率比较

Fig.2 Comparison of optical and radar refractivity

- bridge, 2002.
- [3] Jiang Bingli. Theoretical analysis and implementation of laser backscattering visibility measurement instrument [D]. Wuhan: Naval University of Engineering, 2006. (in Chinese)
蒋冰莉. 激光后向散射式能见度测量仪的理论分析与实现[D]. 武汉: 海军工程大学, 2006.
- [4] Ren Xichuang, Wang Jiangan, Wu Ronghua. Comparison of refractive index structure parameter for optical and microwave band[J], *Laser & Infrared*, 2010, 40(8): 870 – 873. (in Chinese)
任席闯, 王江安, 吴荣华. 近海面光学与微波波段大气折射率结构常数相关性研究[J]. *激光与红外*, 2010, 40(8): 870 – 873.
- [5] Ren Xichuang, Wang Jiangan, Wu Ronghua. The research of extinction coefficient measurement of 1064 nm wavelength by backscatter visibility measuring Set[J]. *Infrared Technology*, 2009, 31(1): 32 – 35. (in Chinese)
任席闯, 王江安, 吴荣华. 后向散射式能见度测试仪测量 1064 nm 波长激光大气传输消光系数研究[J]. *红外技术*, 2009, 31(1): 32 – 35.
- [6] Ren Xichuang, Wang Jiangan, Wu Ronghua. The properties of aerosol scattering by evaporation ducts [J]. *Huazhong Univ. of Sci. & Tech: Natural Science Edition*, 2010, 38(11): 129 – 132. (in Chinese)
任席闯, 王江安, 吴荣华. 基于蒸发波导的气溶胶散射特性[J]. *华中科技大学学报: 自然科学版*, 2010, 38(11): 129 – 132.
- [7] Wu Ronghua, Wang Jiangan, Kang Sheng, et al. Correlativity of atmospheric extinction coefficient and real-time inversion computation for multi-wavelength laser [J]. *Infrared Mliilm. Waves*, 2009, 28(3): 224 – 227. (in Chinese)
吴荣华, 王江安, 康圣, 等. 多波长激光的大气消光系数相关性及时反演计算研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2009, 28(3): 224 – 227.
- [8] Valtr P, Pechac P. Tropospheric refraction modeling using Ray-Tracing and parabolic equation [J]. *Radio Engineering*, 2005, 14(4): 98 – 104.
- [9] DAI Fushan. Atmospheric duct and its military application [M]. Beijing: Chinese People's Liberation Army Publishing House, 2002. (in Chinese)
戴福山. 大气波导及其军事应用[M]. 北京: 中国人民解放军出版社, 2002.
- [10] Xue Ming, Droegemeier K K, Wong V. The Advanced Regional Prediction System (ARPS) - a multi-scale nonhydrostatic atmospheric simulation and prediction tool. part I: model dynamics and verification [J]. *Meteor. Atmos. Phy.*, 2000, 75: 161 – 193.
- [11] Crahan K K, Hegg D, Covert D. Johnson H. Speciation of organic aerosol and their relationship to light scattering during RED [C] // 12th Conf. on Interactions of the Sea and Atmosphere, Amer. Meteor. Soc. Long Beach, CA. 2003: CD-ROM, 9.9.