

·光电探测·

## 大气散射对合成孔径激光雷达回波信噪比的影响

吕旭光<sup>1,2</sup>, 闫飞<sup>1,2</sup>, 郝士琦<sup>1,2</sup>

(1. 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037; 2. 电子工程学院, 安徽 合肥 230037)

**摘要:** 回波信号功率是影响雷达探测分辨率的重要因素。结合大气散射对激光传输的影响, 建立了波长为200~1200 nm的激光传输中大气散射衰减的数学模型, 并对该模型进行了仿真分析, 得出激光大气传输过程中大气散射作用对激光衰减及其回波信噪比影响的规律。

**关键词:** 合成孔径激光雷达; 信噪比; 大气散射; 衰减特性

中图分类号: TN958.98; TN249

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2011)01-0036-04

## Effect of Atmosphere Scattering on Echo Signal SNR of SAL

LV Xu-guang<sup>1,2</sup>, YAN Fei<sup>1,2</sup>, HAO Shi-qi<sup>1,2</sup>

(1 State Key Laboratory of Pulse Power Laser Technology, Hefei 230037, China;

2 Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

**Abstract:** The echo signal power is the important factor that limits detection resolution. Combining the impact of atmosphere scattering on laser transmission, the atmosphere scattering attenuation model of laser with the wavelength from 200 to 1200 nm through the atmosphere is built, and the model is simulated and analyzed. The laws for the impact of atmosphere scattering on laser attenuation and echo signal SNR (signal noise ratio) are obtained.

**Key words:** SAL (synthetic aperture radar); SNR; atmosphere scattering; attenuation characteristic

利用激光器作辐射源的合成孔径激光雷达(SAL)使用了合成孔径技术, 由于工作频率远高于微波, 对于相对运动速度相同的目标可产生更大的多普勒频移, 因此不仅克服了普通激光雷达波束窄、搜索目标困难等缺点, 而且能够提供比SAR更高的方位分辨率, 适合大面积的地表成像。正因为如此, 激光合成孔径雷达的研究工作受到重视<sup>[1-7]</sup>。在SAL系统研究领域, 有上海光机所刘立人初步提出的离焦和相位偏置望远镜接收天线, 空间相位偏置发射望远镜和双向环路结构的发射接收望远镜等技术<sup>[8-10]</sup>; 在合成孔径算法方面, 西电雷达信号处理国家重点实验室分析了理想条件下调频连续波信号模型, 推导出在连续波系统聚焦模式下一一种适用于机载合成孔径激光雷达系统的

频率变标算法<sup>[11]</sup>。在SAL的相关技术研究中, 较少考虑到激光脉冲的大气传输问题, 或仅仅对其作简单近似。然而, SAL系统的激光脉冲在经过大气传输时衰减较为严重, 降低了回波信号的信噪比, 从而降低了系统的分辨率。

近年来半导体激光泵浦技术发展迅速, 某些固体激光雷达, 如输出波长为1.06 μm的掺钕钇铝石榴石激光(Nd:YAG)系统, 其能量转换效率大幅度提高, 体积大大缩小, 因此更适合机载或其他对空间和质量限制较多的场合。大气对激光传输的衰减效应主要分为吸收和散射2种。文中主要研究激光传输中大气散射对波长为200~1200 nm的激光合成孔径雷达系统回波信噪比的影响。

收稿日期: 2010-12-06

作者简介: 吕旭光(1985-), 男, 辽宁丹东人, 硕士研究生, 主要研究方向为激光探测; 闫飞(1978-), 男, 山东潍坊人, 博士, 讲师, 主要研究方向为光电测量; 郝士琦(1963-), 女, 安徽芜湖人, 教授, 主要研究方向为信号处理。

## 1 大气散射对激光传输的衰减特性

信噪比是表征激光雷达探测性能的重要指标,为信号电流均方与噪声电流均方之比。在背景噪声特定的情况下,SAL系统回波信噪比主要取决于回波信号的功率,而SAL系统激光脉冲功率在大气传输过程中受到大气衰减效应的影响较为严重,因此,大气衰减直接影响了SAL系统回波的信噪比,从而影响整个系统的分辨率。

大气是由多种元素和化合物混合而成,大致可以分为干洁的大气、水蒸气以及其他悬浮的固体和液体粒子,其中水蒸气对辐射的衰减影响特别严重。悬浮的固体和液体粒子,一般称为气溶胶粒子。它的一个重要概念就是尺度分布,因为不同尺度的粒子对不同波长光波的散射不一样。当激光在大气中传播时,部分能量因散射而偏离原来的传播方向(即辐射能量在空间重新分配),部分光辐射能量被吸收而转变为其他形式的能量(如热能等),吸收和散射的总效果使传输的光辐射受到衰减,这就是所谓的大气衰减,其满足衰减定律为

$$\tau = \exp[-\gamma_{ext}(\lambda)r] \quad (1)$$

式中, $r$ 表示激光在大气中的传输距离; $\gamma_{ext}(\lambda)$ 为波长为 $\lambda$ 激光的衰减系数(1/km); $\tau$ 为激光在大气中传输的透过率,表明光强度随传输光程的增加呈指数规律衰减。

### 1.1 大气分子散射

由于大气密度的起伏破坏了大气的光学均匀性,当光波在大气中传输时,次波的相干性遭到破坏;另外,大气分子使光波的传播方向发生改变,导致光在各个方向的散射。大气分子散射所引起的衰减直接由折射率决定,而折射率可以通过温度、气压、湿度、CO<sub>2</sub>浓度计算,如图1所示为大气分子散射对透过率的影响。在大气温度为15 °C且1个标准大气压下,CO<sub>2</sub>浓度为450 ppm,则大气折射率为<sup>[2]</sup>

$$n_s = 1 + 10^{-8} \left( \frac{k_1}{k_0 - \sigma^2} + \frac{k_3}{k_2 - \sigma^2} \right) \quad (3)$$

式中, $\sigma$ 为波长的倒数( $\mu\text{m}^{-1}$ ); $k_0 = 238.0185 \mu\text{m}^{-2}$ ;  $k_1 = 5792105 \mu\text{m}^{-2}$ ;  $k_2 = 57.362 \mu\text{m}^{-2}$ ;  $k_3 = 167917 \mu\text{m}^{-2}$ 。

对于任意的气温 $T$ 和气压 $p$ ,其折射率为<sup>[3]</sup>

$$n = 1 + (n_s - 1) \frac{T_s}{T} \frac{p}{p_s} \quad (4)$$

式中, $T_s$ 和 $p_s$ 为标准大气的温度和压强。

则大气分子散射所引起的衰减系数与折射率的关系可表示为<sup>[3]</sup>

$$\gamma_{ms} = b \frac{(n^2 - 1)^2 T_0/T}{N_0 \lambda^4 p/p_0} \quad (5)$$

式中, $b = 87.727$ ;  $T_0 = 273.16 \text{ K}$ ;  $p_0 = 1 \text{ atm}$ ;  $N_0 = 2.68731 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 。

当忽略温度和压强对折射率的影响时,令 $T = 288 \text{ K}$ ,  $p = 1 \text{ atm}$ ,由于 $n$ 略大于1,近似得 $n^2 - 1 = (n + 1)(n - 1) \approx 2(n - 1)$ ,则

$$\gamma_{ms} = l_0 \left( \frac{1}{k_0 \lambda^2 - 1} + \frac{l_1}{k_1 \lambda^2 - 1} \right)^2 \quad (6)$$

式中, $l_0 = 4.1527 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$ ;  $l_1 = 0.029$ 。

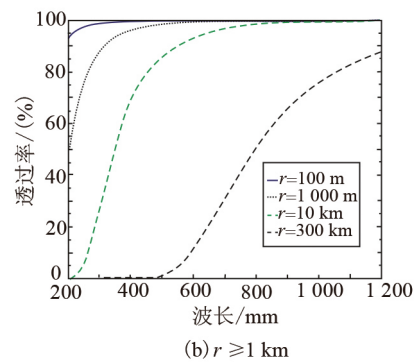
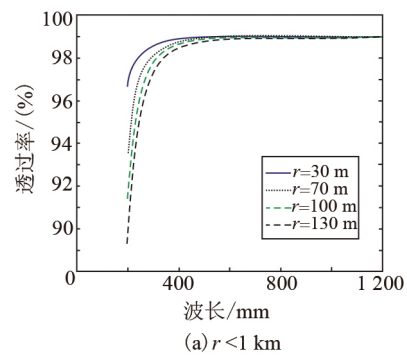


图1 大气分子散射对透过率的影响( $T = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $p = 1 \text{ atm}$ )

### 1.2 气溶胶散射

实际上,大气中除大气分子外,还会有大量的粒子在 $0.03 \sim 2000 \mu\text{m}$ 之间的固态和液态微粒,它们都是尘埃、烟粒、微水滴、盐粒以及有机微生物等。其中大多数固态微粒不但直接使大气混浊(称为霾),而

且也是水蒸气的凝结中心,对于形成云、雾、雨、雪具有很大作用。由于这些微粒在大气中的悬浮成胶溶状态,所以通常又称为大气气溶胶。

处理大气气溶胶散射一般采用米散射理论和瑞利散射理论来近似分析。但为了从理论上预测气溶胶散射所导致的衰减,必须对气溶胶粒子在激光传输路径上的分布状态做一个近似表述,图2为气溶胶散射对透过率的影响。气溶胶散射所引起的衰减系数可用能见度 $V$ 的函数表示为<sup>[5]</sup>

$$\gamma_{as} = \left[ \frac{c}{V} - \gamma_{ms}(550) \right] \left[ \frac{\lambda}{550} \right]^{-dV^{1/3}} \quad (7)$$

式中,  $\gamma_{ms}(550) = 0.01045 \text{ km}^{-1}$ ;  $c = 3.912$ ;  $d = 0.585 \text{ km}^{-1/3}$ ;  $\lambda$  的单位为 nm;  $V$  的单位为 km。气象上对能见度定义为:在白日水平天空背景下,对于  $0.55 \mu\text{m}$  的光(人眼视觉最敏感的波长),可分辨足够大的绝对黑体(目标物)的最远视程。标准晴朗天气是指  $V = 23.5 \text{ km}$ ,相对湿度小于 20% 的大气状态。

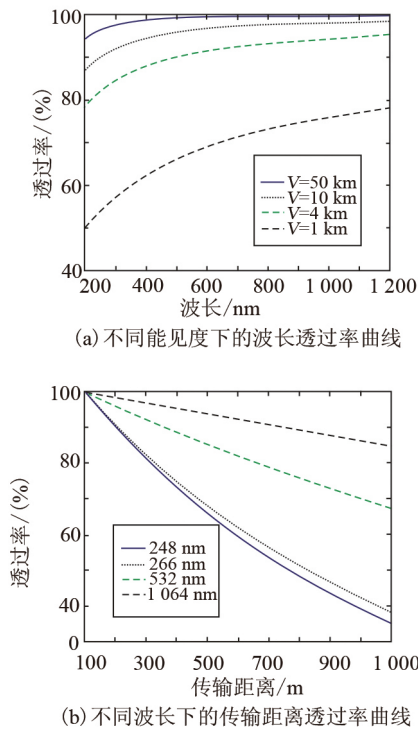


图2 气溶胶散射对透过率的影响( $T = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $p = 1 \text{ atm}$ )

## 2 大气散射衰减对合成孔径激光雷达回波信噪比的影响

考虑光学系统的增益以及光学系统衰减的影

响,并对接收信号进行线性调频脉冲压缩和合成孔径处理,则信噪比<sup>[7]</sup>为

$$\text{SNR} = \frac{\pi \sigma \eta_q T_{opt} \left( \frac{r}{R} \right)^3 P_{av}}{8hcF_n v_a} \quad (8)$$

式中,  $T_{opt}$  为雷达光学系统的透过率;  $P_{av}$  为平均发射功率;  $\sigma$  为目标的散射截面;  $h$  为普朗克常数;  $\eta_q$  为探测器量子效率;  $F_n$  为接收器的噪声系数;  $v_a$  为平台与目标的相对运动速度。目前,激光雷达的峰值功率  $P_t$  可达  $10^6 \text{ W}$ 。

令  $P_{av} = 100 \text{ W}$ ,  $\sigma = 0.5$ ,  $\eta_q = 0.8$ ,  $F_n = 1.5$ ,  $v_a = 100 \text{ m/s}$ ,则透过率与信噪比的关系如图3所示。

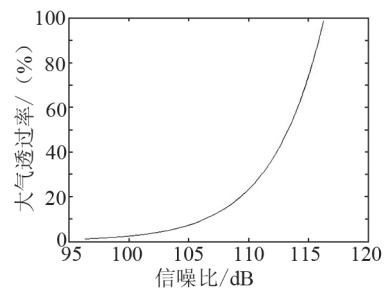


图3 大气透过率对信噪比的影响

## 3 结论

由以上分析和仿真可知,对于大气分子散射,波长越长,散射越弱;波长越短,散射越强烈。故可见光比红外光散射强烈,蓝光又比红光散射强烈。在晴朗天空,蓝光散射最强,故明朗的天空呈现蓝色。随着传输距离的增长,大气透过率也越来越低。

对于气溶胶散射,随着可见度的下降,传输率也随之下降。气溶胶对不同波长的散射衰减也不同,波长越短,衰减越严重。

可见,随着探测距离的增大,大气透过率下降, SAL系统的回波信噪比急剧下降。在相同外部条件下,激光波长越长,传输时受到的大气衰减越小,回波的信噪比越高,仅从这个角度讲,合成孔径激光雷达采用长波的激光可以获得较高的探测距离;但短波长可以使得雷达获得更高的成像分辨率。

## 参考文献

- [1] 蓝信钜.激光技术[M].北京:科学出版社,2005.
- [2] P E Ciddor. Refractive index of air[J]. Appl.Opt., 1996, 35:1566-1573.

- [3] R Penndorf. Tables of the refractive index for standard air and the Rayleigh scattering coefficient for the spectra region between 0.2 and 20 $\mu\text{m}$  and their application to atmospheric optics[J]. Opt.Soc.Am., 1957, 47: 176-182.
- [4] ITU. Development of a weather-model for free space optical propagation[R]. ITU Document 3J/78-E, 2004.
- [5] E M Patterson, J B Gillespie. Simplified ultraviolet and visible wave-length atmospheric propagation model[J]. Appl. Opt., 1989, 28: 425-429.
- [6] A Ferrero. A theoretical study of atmospheric propagation of laser and return light for stand-off laser induced breakdown spectroscopy purposes[J]. Spectrochimica Acta Part B, 2008, 63: 305-311.
- [7] Thomas J Karr. Synthetic aperture lidar for planetary sensing[J]. Proc. of SPIE, 2003, 5151: 44-52.
- [8] 刘立人. 合成孔径激光成像雷达( I ):离焦和相位偏置望远镜接收天线[J]. 光学学报, 2008, 28(5): 997-1000.
- [9] 刘立人. 合成孔径激光成像雷达( II ):空间相位偏置发射望远镜[J]. 光学学报, 2008, 28(6): 1197-1200.
- [10] 刘立人. 合成孔径激光成像雷达( III ):双向环路发射接收望远镜[J]. 光学学报, 2008, 28: 1405-1410.
- [11] 郭亮,邢孟道,梁毅,等. 一种机载合成孔径成像激光雷达聚束模式成像算法[J]. 光学学报, 2008, 28(6): 1183-1190.
- [12] 张瑜,杨豪强,张明高. 激光在大气中的传输损耗实用计算方法[J]. 光通信技术, 2007, 31(3): 62-64.
- [13] 时建群,魏山城,韩雪云,等. 激光大气传输吸收衰减效应研究[J]. 河南师范大学学报, 2008, 36(3): 56-58.
- [14] 刘波涛. 大气对激光传输的影响[J]. 光散射学报, 2007, 19(1): 43-48.
- [15] 阴俊燕,尹福昌,陈明,等. 影响激光大气传输因素分析[J]. 红外与激光工程, 2008(S3).

(上接第 19 页)

件控制激光单脉冲能量,聚焦光学系统将激光光斑聚焦到石英玻璃上,使飞秒激光在经过石英介质时产生自聚焦效应,发生自相位调制,导致光谱展宽。

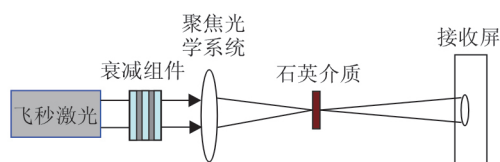


图2 飞秒激光经过石英玻璃产生白光实验示意图

实验结果表明,当到达石英玻璃等固体透明介质时,当激光功率达到一定值时,在后面的接收屏上出现明显的白光光斑,如图3所示。

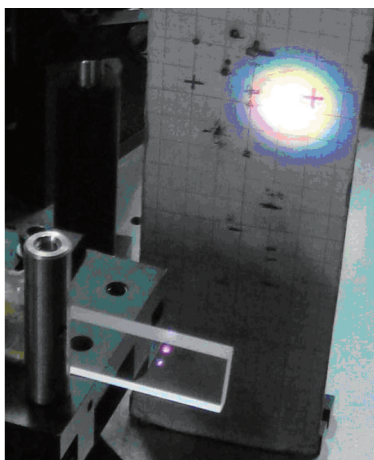


图3 飞秒激光通过石英介质产生白光激光

由图3可以看出,白光激光光斑边缘从内到外,按照波长由长到短分布,并且通过实验验证得到:白光光谱覆盖了可见光到近红外波段,且具备良好的相干性。

## 4 结论

通过对激光在透明介质中传输的简要理论分析,得到白光激光产生的机理和特性,结合实验研究,验证了白光激光产生机理和部分白光辐射特性。证明了这种白光激光具有良好的相干性,决定了其远距离传输效果必将优于其他可见光宽谱光源,此外相比传统激光器,白光激光又具备光谱极宽的特性。

## 参考文献

- [1] 成纯富,王晓方,鲁波. 飞秒光脉冲在光子晶体光纤中的非线性传输和超连续谱产生[J]. 物理学报, 2004, 39(3): 210-214.
- [2] 陈笑,苏玉成,王义全,等. 大气中飞秒激光等离子体丝上荧光特性的研究[J]. 中央民族大学学报, 2009, 18(1): 12-15.
- [3] Fibich G, Ilan B. Self-focusing of elliptic beams: an example of the failure of the aberrationless approximation[J]. J. Opt. Soc. Am., 2000, B17(10).
- [4] Jisha C P, Kuriakose V C, Porsezian K. Variational approach to spatial optical solitons in bulk cubic-quintic media stabilized by self-induced multiphoton ionization[J]. Phys. Rev., 2005, E71: 056611.
- [5] 强希文,刘晶儒. 超短强激光脉冲大气传输效应建模[J]. 激光与红外, 2005, 34(3): 12-15.