

成像激光雷达大气消光系数的反演方法

杨 昭¹, 孙东松¹, 李 强²

- (1. 苏州大学 物理科学与技术学院, 江苏 苏州 215006;
2. 连云港高等师范专科学校, 江苏 连云港 222006)

摘 要:针对成像激光雷达的应用背景,利用 Klett 迭代方法求解水平路程激光大气传播的消光系数,并采用 Monte-Carlo 方法对典型应用背景下的接收信号进行了模拟,结果表明:采用该方法求解的消光系数的理论误差小于 6%;在考虑大气湍流起伏的情况下,消光系数的起伏变化明显,但是与理论模型的变化趋势吻合。

关键词:激光雷达; 气溶胶; 大气消光系数

中图分类号: TN95 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2004)03-0239-04

Retrieval of atmosphere extinction coefficient for imaging laser radar

YANG Zhao¹, SUN Dong-song¹, LI Qiang²

- (1. Department of Physics Science & Technology, Soochow University, Suzhou 215006, China;
2. Lianyungang High Normal College, Lianyungang 222006, China)

Abstract: The atmosphere extinction coefficient for the application of imaging laser radar is solved by Klett iteration method. The Monte-Carlo simulated results for typical conditions of the imaging laser radar operation show that the theoretical error of the extinction coefficient is less than 6%. The fluctuation of the extinction coefficient affected by the atmospheric scintillation is obvious, but the variation trend is coincident with the theoretical model.

Key words: Lidar; Aerosol; Atmospheric extinction coefficient

0 引 言

激光成像雷达具有角分辨率高、距离分辨率和测量精度高等特点,可作为高技术武器应用于军事行动^[1,2],如巡航导弹的低空飞行地形匹配和目标识别、飞行工具的障碍物回避和地形匹配等,这些武器

的应用高度一般距地面 300 m 以下。在各种战场情况下,巡航导弹或低空飞行器在飞行过程中可能遇到由于自然(天气)和人为(燃烧物、爆炸物等)因素造成的大气环境突变,而对激光雷达目标探测产生影响,例如:在晴朗和薄雾天气下的大气消光系数可以相差 5 倍以上,而由爆炸或烟雾引起的混浊大气的消光系数也可以达到通常情况的几倍以上^[3]。常规情况,巡

收稿日期:2003-07-23; 修订日期:2003-09-28

作者简介:杨昭(1974-),女,湖南岳阳人,讲师,硕士生,研究方向为激光遥感测量技术。

航导弹是在几百或上千公里外发射,发射地到目标所在地之间的天气情况或大气消光参数可能不同。如果在行进过程中大气消光系数的变化较大,就会引起激光雷达的误判,产生虚假信号。所以,在成像激光雷达信号处理中,大气衰减或消光系数不能按照普通激光雷达假设均匀的水平大气消光来考虑,而应根据回波信号的分布推演实时的大气消光系数;另外大气消光对成像激光雷达的系统性能影响较大,在强大气消光条件下成像激光雷达可能无法正常工作。

在低大气层(边界层)工作环境下,成像激光雷达的主要大气衰减是气溶胶和烟雾等造成的,对气溶胶的光学特性的研究是气候学、环境学和大气科学长期以来共同关心的问题。气溶胶的光学性质可以通过激光雷达的回波信号确定,对于分布均匀的大气,消光系数可以采用斜程法求解^[4];而在沿激光传播的路径上大气消光变化较大的情况下,可以采用 Klett^[5]的迭代反演方法求解。但是,这种处理以及在其后的修正方法都要面临从一个激光雷达测量信号中确定两个物理变量的问题,即气溶胶后向散射系数和消光系数,所以只有假定二者之间的关系和一个气溶胶消光系数的初值才能求解这个问题。

1 激光雷达方程的迭代求解

对于采用光子探测器的单波长单脉冲激光雷达系统,当激光雷达接收位于 $r \rightarrow r + \Delta r$ 范围内的弹性粒子散射时,接收信号的光电子数可以表示为:

$$n(r) = \frac{\eta c E}{h \lambda r^2} \cdot \Delta r Y(r) A_r \beta_b(r) T_{\text{sys}} e^{-2 \int_0^r \sigma(r') dr'} \quad (1)$$

式中 E 是激光发射脉冲能量; η 是光电子探测器的量子效率; A_r 是接收机有效面积; T_{sys} 是激光雷达收发系统的光学效率; β_b 是包含大气分子和气溶胶粒子的后向散射系数; $\sigma(r')$ 是包含大气分子和气溶胶粒子的大气消光系数; c 是光速; $Y(r)$ 是激光雷达收发重叠因子,可以通过激光雷达系统校准后获得。上式的变量 β_b 和 $\sigma(r')$ 反映了大气的消光特性,激光雷达方程的求解就是根据接收的光电子信号解出这两个变量。通常将公式(1)的形式改写为:

$$U(r) = \ln[r^2 n(r)] = \ln[CY(r)\beta_b(r)] - 2 \int_0^r \sigma(r') dr' \quad (2)$$

式中 C 是与激光雷达系统和结构有关的参数。根据 Klett 的分析^[5],公式(2)的收敛迭代解为:

$$\sigma(r) = \frac{\exp\left(\frac{U(r) - U(r_0)}{k}\right)}{\sigma^{-1}(r_0) + \frac{2}{k} \int_r^{r_0} \exp\left(\frac{U(r') - U(r_0)}{k}\right) dr'} \quad (3)$$

式中 r_0 是选定的参考距离。对于弹性散射,可以假设 β 和 k 满足下面的关系^[5]:

$$\beta(r) = a \sigma^k(r) \quad (4)$$

式中 a 是常数; k 是与激光雷达波长和气溶胶粒子尺度有关的系数。公式(3)的一个稳定解条件是积分的变量范围满足 $r \leq r_0$, 即反向积分。在求解公式(3)时,首先需要确定 k 值和参考距离处的大气消光系数 $\sigma(r_0)$ 。对于激光成像雷达,求解大气消光系数分布,是为了解决远距离弱回波信号在受到大气消光影响时探测性能降低,或者由于强大气消光回波信号而产生的误判等问题,因此处理回波信号的大气消光问题可以为随大气消光变化的可编程的信号门限阈值提供依据。这里不需要对大气消光作精确的测量,只需要提供变化的规律,因此可以采用近似的估算方法。选取 $k=1$, 如果 $\sigma(r_0)$ 的选取采用简单的斜程法估算,即:

$$\sigma(r_0) = \frac{1}{2} \frac{U(r_b) - U(r_0)}{r_b - r_0} \quad (5)$$

式中 r_b 是在 r_0 附近的距离。在强信噪比或信号起伏较小的情况下,公式(5)可以给出较好的初值。这时可以利用回波信号距 r_0 后向 1 km 处 r_b 所对应的 $U(r)$ 来估算公式(5)的大气消光系数,或者对于确定的成像激光雷达参数,可以采用一帧图像内 $\sigma(r_0)$ 的近似平均值。

当激光雷达接收的信号存在起伏,尤其在远距离噪声相对较大,接收信号的起伏明显时,公式(5)的计算不能反映 $\sigma(r_0)$ 在 $r_b \rightarrow r_0$ 的平均值。因此采用线性拟合计算 $\sigma(r_0)$, 即,如果在 $r_b \rightarrow r_0$ 范围内的信号

数据量为 n 个,则可以采用最小二乘法得到大气消光迭代初值:

$$\sigma(r_0) = \frac{1}{2} \frac{\overline{r \cdot U} - \bar{r} \cdot \bar{U}}{\overline{r^2} - \bar{r}^2} \quad (6)$$

式中 \bar{X} 表示 X 的平均值。

2 数值分析与计算

根据成像激光雷达的应用背景,大气消光在激光束传播过程中可能的突变情况归纳为三种:从弱大气消光到强大气消光、从强大气消光到弱大气消光和局部的强大气消光,如图 1 所示。图中选取的最大和最小的大气能见度分别为 5 km 和 1.5 km(薄雾),对应的大气消光系数(σ)分别为 0.323/km 和 4.092/km (相当于一股烟雾的消光)。

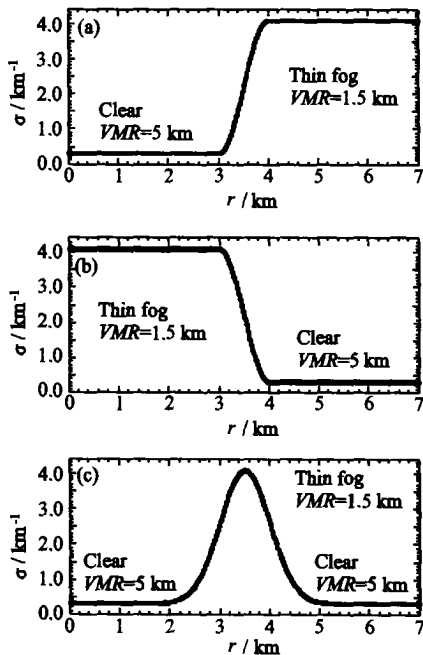


图 1 成像激光雷达的大气消光分布模型

Fig. 1 Models of atmospheric extinction for imaging laser radar

针对上述三种典型的大气消光分布情况,根据成像激光雷达系统参数(如表 1 所示),利用激光雷达方程即公式(1),给出在散粒噪声限下接收信号的模拟计算结果,如图 2 所示。图 2 的横坐标是激光脉冲传播距离,纵坐标是接收信号功率 P_r (任意单位),其中大气消光与后向散射系数的比选为 10。可以看出,由于大气消光的变化,接收信号出现了突变或类似于

表 1 成像激光雷达的参数指标

Tab. 1 Parameters for image laser radar

| | Item | Parameter |
|-------------|---------------------|-------------------|
| System | Telescope diameter | 254 mm |
| | Maximum range | 7000 m |
| Transmitter | Wavelength | 1064 nm (Nd:YAG) |
| | Energy | 200 μ J/pulse |
| | Pulse width | 12 ns |
| | PRF | <100 kHz |
| | Optical efficiency | 95% |
| Receiver | Interference filter | 0.1 nm@1064 nm |
| | Filter transmission | 45% |
| | Optical efficiency | 90% |
| | Quantum efficiency | 3.5% |
| | Dark count | 50 cps |

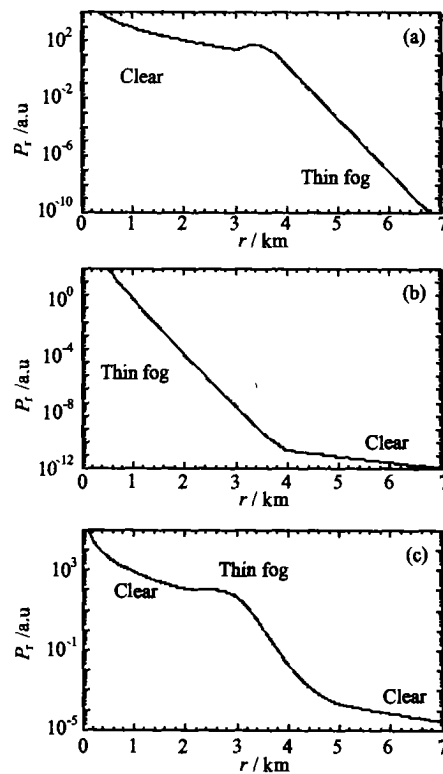


图 2 三种大气消光分布下激光雷达接收信号

Fig. 2 Received signal of laser radar for three extinction profiles

目标的散射信号,如图 2(a)和(c)所示,这种突变在激光雷达目标测量中会产生误判,即虚假目标。

利用公式(3)和公式(6)对图 2 的接收信号进行迭代计算,得到反演的大气消光系数,如图 3 所示。三种情况的结果都随距离靠近而收敛。在不同的消光分布情况下,最大迭代误差不超过 6%;在远距离或靠近参考距离处的迭代结果误差较大,但是随着距

离的减小迭代结果迅速收敛。因此,应尽可能地选取远离需要反演消光系数的距离范围的参考点 r_0 。

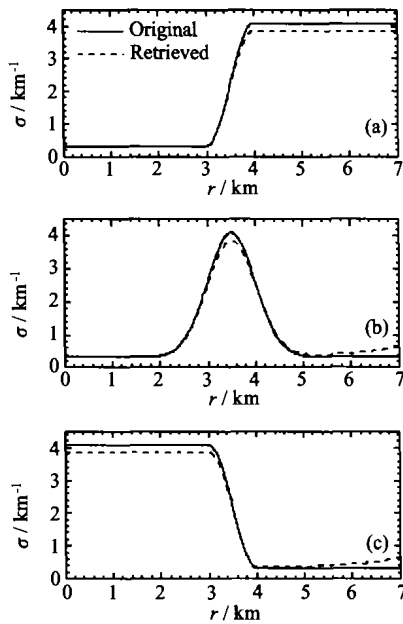


图 3 大气消光系数反演误差

Fig. 3 Retrieval errors of atmospheric extinction coefficients

3 Monte-Carlo 模拟分析

从上面的讨论可以看出,对理想的接收信号,利用公式(3)和公式(6)可以准确地反演出大气消光系数。但是由于系统噪声或大气湍流的起伏,实际接收的信号不是光滑的曲线分布,而是含有各种噪声的信号。包括:背景噪声、探测器的暗电流噪声、信号的散粒噪声和信号的大气起伏噪声等,这些噪声将影响反演结果。由于背景噪声和信号的散粒噪声都可以利用提高接收信号的方法加以抑制,下面仅讨论大气起伏噪声的影响。如果发射激光束近似为平面波,则水平路程的信号强度的对数强度方差为^[6]:

$$\sigma_x^2 = 0.307k^{7/6}r^{11/6}C_n^2 \quad (7)$$

式中 k 是波数; r 是水平距离; C_n^2 是折射率结构常数。根据 Miller 和 Zieske 提出的 SLC 模型^[7],在 300 m 高度以下的 C_n^2 值为 2.5×10^{-16} 。采用 Monte-Carlo 方法模拟图 2 的三种情况,包含噪声的接收信号的反演结果如图 4 所示。同样,消光系数也具有类似噪声的起伏特点,对于大气消光系数,起伏也较大;由于湍流随距离的增大起伏变大,因此近距

离的收敛性很好,而远距离表现出较大的起伏误差;总体的消光系数变化趋势基本保持与模型相同;由低消光到高消光系数的变化情况如图 4(a)所示,其中,高端消光系数的起伏非常大。另外,在模拟计算中发现,当信号远端(远距离)信噪比较小时,这种迭代方法偏离模型较大(未深入讨论)。

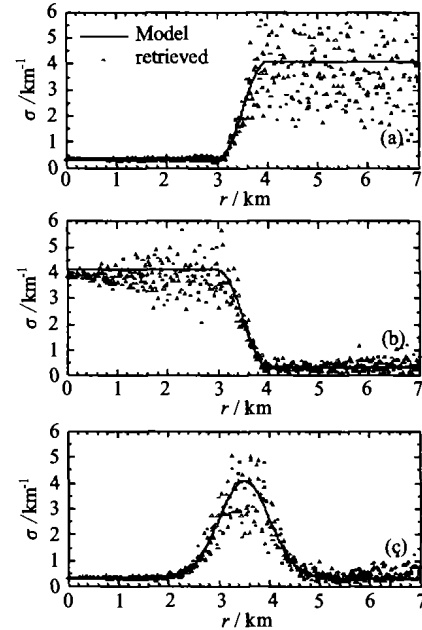


图 4 含有大气湍流影响的消光系数反演结果

Fig. 4 Retrieval extinction coefficient with the effect of atmospheric scintillation

5 结束语

从前面的模拟结果可以看出,在激光束传播过程中,如果大气消光发生显著变化,例如遇到烟雾或雾天等,接收信号会出现类似目标的强回波,于是可能产生误触发或误判,这就降低了激光成像雷达系统的性能。因此,利用激光雷达的回波信号反演大气消光信息对提高系统探测概率非常重要。通过对成像激光雷达系统典型工作状态的 Monte-Carlo 方法模拟,证明了 Klett 迭代方法在强信噪比的情况下迭代误差不超过 6%,对于 300 m 高度以下的大气湍流影响,迭代有较好的收敛性和变化趋势。但是在大气消光值相对较大时,大气湍流影响明显,误差较大(可达 50%);对于低信噪比的接收信号,Klett 反演方法得到的结果偏离模型较大,这时需要采用后向和前向综合的迭代方法。(下转第 281 页)

效果愈佳。

表1分析比较了对实时图中噪声进行不同处理后的SNR值。表中, Fig. 1中实时图 $w(i, j)$ 为图1(b)、参考图 $f(i, j)$ 为图1(a), Fig. 2中实时图 $w(i, j)$ 为图2(b)、参考图 $f(i, j)$ 为图2(a)。可以看出,用本文提出的方法处理噪声点,SNR值最大,消除噪声影响的效果更好。

表1 信噪比SNR的比较

Tab. 1 Comparison of the SNR results of different filtering algorithms

| Image | SNR | |
|-------------------------|-----------|-----------|
| | Fig. 1 | Fig. 2 |
| Original image | 5.658998 | 6.330538 |
| Median method | 6.436582 | 9.468562 |
| Average method | 7.598992 | 10.536457 |
| The method in the paper | 11.739797 | 14.687460 |

表2为在实际匹配中,用中值滤波法、均值滤波法以及标记噪声点法对图像处理后的配准概率 P_m 的比较结果。从中可以看出,中值滤波和均值滤波使得配准概率有所下降,这主要由于二者对边缘的模糊作用不利于后续的边缘相关匹配。而本文提出的方法

表2 匹配概率 P_m 的比较

Tab. 2 Comparison of the matching probability of different filtering algorithms

| Filtering algorithm | No filtering | Median filtering | Average filtering | The algorithm in the paper |
|---------------------|--------------|------------------|-------------------|----------------------------|
| P_m | 63.8% | 55.4% | 59.0% | 69.9% |

(上接第242页)

参考文献:

- [1] 陈德煌. 机载障碍告警激光雷达[J]. 电光与控制, 1994, 6(1): 41-42.
- [2] 付伟. 军用激光技术的发展现状[J]. 电光与控制, 1996, 2(1): 23-24.
- [3] Milham M E, Anderson D H. Obscuration sciences smoke data compendium: standard smokes[R]. AD-B077078. 1983.

则在消除噪声对匹配影响的同时保持了边缘特征,从而配准概率得以提高,效果更佳。

3 结束语

本文在分析了夜间实时图像中斑状噪声特征的基础上,提出了一种新的用于图像相关匹配的斑状噪声预处理方法。与传统的均值滤波、中值滤波算法相比,本方法可以更好地消除斑状噪声影响,同时具有更佳的图像保真能力,且有助于提高匹配性能。

参考文献:

- [1] 谢亚滨,张万清,张天序. 一种基于边缘地相位相关算法[J]. 飞航导弹, 1996, (5): 59-62.
- [2] Teramoto A, Horiba I, Sugie N. Improvement of image quality in MR image using adaptive K-nearest neighbor averaging filter [A]. Proceedings of 1997 International Conference on Information, Communications and Signal Processing[C]. 1997, 1(4): 190-194.
- [3] Czerwinski R N, Jones D L, O'Brien W D Jr. Ultrasound speckle reduction by directional median filtering [A]. International Conference on Image Processing[C]. 1995, 1(10): 358-361.
- [4] Davies E R. Image distortions produced by mean, median and mode filters [A]. IEE Colloquium on Non-Linear Signal and Image Processing[C]. 1998, 6. 1-5.
- [5] 陈东,李飏,王炜华,等. SAR图像斑点噪声消除算法的研究[J]. 红外与激光工程, 2000, 29(4): 9-12.
- [6] 章毓晋. 图像处理和分折[M]. 北京:清华大学出版社, 1999.

- [4] Collis R T H. Lidar: a new atmospheric probe [A]. Quart J Roy Meteorol Soc [C]. 1966, 92. 220-236.
- [5] Klett J D. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns [J]. App Opt, 1981, 20(2): 211-220.
- [6] Smith F. Atmospheric propagation of radiation. The Infrared and Electro-Optical Systems Handbook [M]. USA: SPIE Optical Engineering Press and Infrared Information Analysis Center, Environmental Research, 1993. 125.
- [7] Miller M G, Zieske P L. Turbulence environment characterization [R]. RADC-79-131, ADA072379. Rome Air Development Center, 1979.