

文章编号: 0253-2239(2005)01-1-5

差分吸收激光雷达回波信号统计模型的研究

尹世荣¹ 王蔚然¹ 李新山²

(¹ 电子科技大学电子工程学院, 成都 610054)
(² 成都军区空军司令部, 成都 610041)

摘要: 差分吸收激光雷达回波信号统计模型是研究差分吸收激光雷达系统的基础,但是现有的统计模型中均没有考虑大气湍流导致的激光闪烁对回波信号的影响。针对已有统计模型的缺陷和应用需要,综合考虑了大气湍流导致的激光闪烁、目标反射斑纹、接收噪声以及发射功率波动对回波信号统计特性的影响,提出了一种改进的长程差分吸收激光雷达回波信号统计模型,分析了该模型的统计特性。仿真结果表明大气湍流导致的激光闪烁对回波信号统计特性的影响十分显著,同时也验证了该统计模型比已有统计模型更精确、更符合实际。

关键词: 大气光学; 回波信号; 统计模型; 差分吸收激光雷达; 大气湍流; 闪烁

中图分类号: TN958.98 文献标识码: A

Research on Return Signal Statistical Model of Differential Absorption Lidar

Yin Shirong¹ Wang Weiran¹ Li Xinshan²

(¹ The College of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054)
(² Air Force Headquarter, Chengdu Military Area, Chengdu 610041)

Abstract: The return signal statistical model of differential absorption lidar (DIAL) is the basis of studying differential absorption lidar. However, the known statistical models ignored the effect of laser scintillation resulting from atmospheric turbulence on return signal. With considering effects of laser scintillation resulting from atmospheric turbulence, target reflective speckle, receiving noise and the fluctuation of transmitted power, a revised return signal statistical model of long-range DIAL is presented and the statistical characteristics of this model are analyzed. The simulation results show that laser scintillation resulting from atmospheric turbulence has an important effect on the statistical characteristics of return signal and verify this statistical model more accurate and reasonable than other known models.

Key words: atmospheric optics; return signal; statistical model; differential absorption lidar; atmospheric turbulence; scintillation

1 引 言

自从 1974 年 Schotland 提出了差分吸收激光雷达的基本理论以来^[1],差分吸收激光雷达技术已经被广泛地用于大气污染检测、环境监测、工业气体泄漏监控以及生化战剂探测等工业民用和军事领域。回波信号统计模型是研究差分吸收激光雷达系统的基础,是计算回波信号功率,预测系统性能的关键,是对整个系统进行设计、仿真和性能评估的出发

点。最早的回波信号模型是在通用激光雷达方程的基础上建立起来的,即在激光雷达方程中加入了由探测气体引入的透过率^[2~4]。Russell^[5]在回波信号统计模型中引入了乘性的斑纹调制因子,得到了更为精确的回波信号统计模型,并且得到了广泛的应用^[6~8],但该模型的不足之处在于没有考虑大气湍流导致的激光闪烁的影响。Mark 等^[9]虽然从理论上阐述了大气湍流导致的激光闪烁统计特性,但他

作者简介: 尹世荣(1977~),女,贵州人,博士研究生,主要从事差分吸收激光雷达系统建模仿真及信息处理研究工作。
E-mail: mail-ysr@163.com。

收稿日期: 2003-10-13; 收到修改稿日期: 2004-02-16

们的模型主要针对机载系统,所以在研究中没有考虑大气湍流导致的激光闪烁对回波信号的影响。Magnotta 等^[10]在近地面的实验中发现除斑纹等噪声外,大气湍流导致的激光闪烁也会对回波信号产生明显的影响。但是,直到现在差分吸收激光雷达系统的回波信号统计模型一直没有考虑大气湍流导致的激光闪烁的影响。目前,差分吸收激光雷达主要采用地基系统或车载系统进行远距离气体浓度探测,因而要精确地描述回波信号,必须切实考虑大气湍流导致的激光闪烁、目标反射斑纹、接收噪声和发射功率波动的影响。本文正是针对已有模型的缺陷和应用、研究的需要,综合考虑多种因素的影响,提出了一种改进的长程差分吸收激光雷达回波信号统计模型,该模型具有更高的计算精度。另外,本文还对该统计模型进行了数值仿真,把由该模型得到的直接探测信噪比与文献[5, 10]的信噪比进行了比较,结果表明大气湍流导致的激光闪烁将对回波信号的统计特性产生明显的影响,同时也验证了本文所提模型比已有模型更精确、更符合实际。

2 回波信号统计模型

根据反射目标的不同,差分吸收激光雷达可以分为距离分辨差分吸收激光雷达和长程差分吸收激光雷达。长程差分吸收激光雷达由于作用距离较远,而被广泛应用,本文就长程差分吸收激光雷达的回波信号统计模型进行研究。

大气湍流导致的激光闪烁和目标反射斑纹一样属于乘性噪声^[11],这样在统计模型中引入乘性的闪烁调制因子 m_{sc} ,就可得到改进的回波信号统计模型。对于长程差分吸收激光雷达,来自地形目标或合作目标的波长为 λ_i 的回波信号 $P_r(i)$ 有如下形式:

$$P_r(i) = P_t(i)m_{sc}(i)m_{sp}(i)G(R) \times \exp\left\{-2\left[\sum_{l=1}^N \alpha_l^i CL_l + k(i)R\right]\right\} + n(i), \quad (1)$$

其中 $P_t(i)$ 为激光脉冲发射功率; $m_{sc}(i)$ 为闪烁调制因子,下标 sc 表示闪烁(scintillation); $m_{sp}(i)$ 为斑纹调制因子,下标 sp 表示斑纹(speckle); $G(R)$ 为与激光雷达系统和距离有关的参量; N 为同时测量的气体种类数目; α_l^i 为第 l 种气体在波长 λ_i 处的吸收系数; CL_l 为第 l 种气体的浓度-光程积; $k(i)$ 为自然大气的消光系数; R 为发射机到目标的距离; $n(i)$ 为接收噪声。

发射功率的起伏通常在 $\pm 5\%$ 的范围之内,当用

发射功率作为参考功率对回波信号功率进行归一化处理时,这种影响可以忽略。

2.1 闪烁调制因子 m_{sc}

大气湍流导致的激光闪烁属于乘性噪声,并且湍流不会衰减激光能量^[12],所以闪烁调制因子 m_{sc} 是一个均值为 1,方差为 σ_{sc}^2 的正态随机变量。 σ_{sc}^2 即为大气湍流导致的激光归一化光强方差,其计算公式如下:

$$\sigma_{sc}^2 = \frac{\langle [I - \langle I \rangle]^2 \rangle}{\langle I \rangle^2} = \exp(4\sigma_x^2) - 1, \quad (2)$$

其中 I 为激光光强; $\langle \cdot \rangle$ 为统计平均; σ_x^2 为对数幅度方差。通常情况下激光器发射光束为高斯光束,在近轴方向可作球面波近似:

$$\sigma_x^2(L) = 0.56k^{7/6} \int_0^L C_n^2(\eta)(\eta/L)^{5/6}(L-\eta)^{5/6} d\eta, \quad (3)$$

其中 $k = 2\pi/\lambda$ 为波数; $C_n^2(\eta)$ 为大气折射率结构常数; L 为激光在湍流大气中传输的距离。通常大气折射率结构常数 C_n^2 是与离地高度有关的函数,这里采用常用的 Hufnagel-Valley 湍流大气结构模型,即

$$C_n^2(h) = 8.2 \times 10^{-56} W^2 h^{10} \exp(-h/1000) + 2.7 \times 10^{-16} \exp(-h/1500) + A \exp(-h/100), \quad (4)$$

其中 h 为离地高度; W 为风速; A 为近地面大气折射率结构常数。对于图 1 所示的单基地激光雷达倾斜斜传输情况,即发射机和接收机高度为 H ,目标高度为 h_0 ,倾斜距离为 R 的情况,(3) 式可修改为

$$\sigma_x^2 = 1.12k^{7/6} \int_0^R C_n^2\left[h_0 + (R-\eta) \frac{H-h_0}{R}\right] \times [\eta/(2R)]^{5/6} (2R-\eta)^{5/6} d\eta. \quad (5)$$

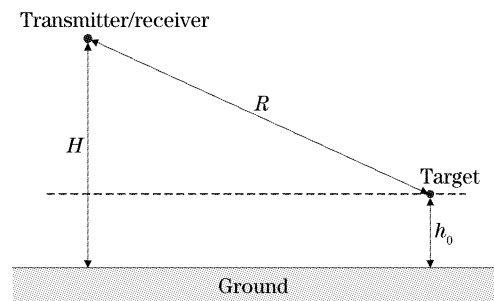


图 1 倾斜传输几何关系

Fig. 1 Geometry involved in slant path propagation calculations

2.2 斑纹调制因子 m_{sp}

来自目标反射斑纹的噪声也属于乘性噪声^[5,11],

斑纹调制因子 m_{sp} 是正态随机变量, 其均值为 1, 方差为 σ_{sp}^2 。接收孔径内的斑纹方差为^[13]

$$\sigma_{sp}^2 = 1/R_{sp}^2 = \frac{1}{S^2} \iint R_S(\Delta x, \Delta y) |\mu_A(\Delta x, \Delta y)|^2 d\Delta x d\Delta y, \quad (6)$$

其中 R_{sp} 为斑纹信噪比; S 为接收孔径面积; $R_S(\Delta x, \Delta y)$ 为接收孔径自相关函数, 只与孔径形状有关; $\mu_A(\Delta x, \Delta y)$ 为复相干系数。

对于 TEM₀₀ 横基模高斯光束和圆形接收孔径, 斑纹方差可简化为^[9]

$$\sigma_{sp}^2 = (1 + D_{rec}/D_{corr})^{-2}, \quad (7)$$

其中 D_{rec} 为接收孔径; D_{corr} 为斑纹相干直径, 其计算公式为

$$D_{corr} = 4\lambda R/(\pi D_{tar}), \quad (8)$$

其中 $D_{tar} = 2\sqrt{2}\rho_s + R\theta$ 为目标处的光束直径, ρ_s 为短期光束扩展后的半径, θ 为光束束散角。

2.3 接收噪声 n

目前, 已有大量文献对接收噪声进行了讨论^[7, 14~16], 这里只对接收噪声做一个简要的分析。接收噪声主要包括光子噪声、探测器噪声和放大器噪声。光子噪声主要是由信号和背景光引起的散粒噪声; 探测器噪声主要包括自身暗电流噪声、热噪声、电流噪声等; 放大器噪声主要是反馈电阻和前端晶体管产生的热噪声。背景噪声包括来自太阳的直接辐射或者地物、天空、云块和月亮、星体对阳光的反射或散射。热噪声主要与工作温度和负载电阻有关, 降低工

作温度, 增大负载电阻均可降低热噪声。电流噪声的特点是其噪声功率谱密度与频率成反比, 当工作频率大于 1 kHz 时, 这种噪声可以不考虑。工程上, 散粒噪声、暗电流噪声和热噪声可近似于带限白噪声。差分吸收激光雷达系统中, 若用噪声等效功率 P 来表述接收噪声, 则

$$P = \sqrt{P_s^2 + P_b^2 + P_d^2 + P_j^2}, \quad (9)$$

其中 P_s 为信号光引起的散粒噪声等效功率; P_b 为背景光引起的散粒噪声等效功率; P_d 为探测器暗电流噪声等效功率; P_j 为探测器和放大器的热噪声等效功率。

3 统计特性分析

在(1)式的参量中除 P_t 、 m_{sc} 、 m_{sp} 和 n 外, 均认为是存在随机波动的。 P_t 和 m_{sc} 、 m_{sp} 引入乘性噪声, 而 n 引入加性噪声。 P_t 的均值和方差表示为 $\langle P_t \rangle$ 和 $\sigma_t^2 = \langle P_t^2 \rangle - \langle P_t \rangle^2$; 闪烁调制因子 m_{sc} 的均值为 1, 方差为 $\sigma_{sc}^2 = \langle m_{sc}^2 \rangle - 1$; 斑纹调制因子 m_{sp} 的均值为 1, 方差为 $\sigma_{sp}^2 = \langle m_{sp}^2 \rangle - 1$; 接收噪声 n 的均值为 0, 方差为 σ_n^2 。用上述参量, 并考虑到大气湍流导致的激光闪烁和目标反射斑纹是两个相互独立的随机过程, 回波信号 P_r 的一、二阶统计特性为

$$\langle P_r \rangle = \langle P_t \rangle P_{0i}, \quad (10)$$

$$\langle P_r^2 \rangle = \langle P_t^2 \rangle \langle m_{sc}^2 \rangle \langle m_{sp}^2 \rangle P_{0i}^2 + \sigma_n^2, \quad (11)$$

其中 P_{0i} 为非随机函数, 其表达式为

$$P_{0i} = G(R) \exp\left\{-2 \left[\sum_{l=1}^N \alpha_l^2 CL_l + k(i)R \right]\right\}, \quad (12)$$

由(10)式~(12)式, 可得回波信号的方差为

$$\sigma_{P_r}^2 = \langle P_r^2 \rangle - \langle P_r \rangle^2 = \langle P_t \rangle^2 P_{0i}^2 \left[\sigma_{sc}^2 \sigma_{sp}^2 + \sigma_{sc}^2 + \sigma_{sp}^2 + \frac{\sigma_t^2}{\langle P_t \rangle^2} (\sigma_{sc}^2 \sigma_{sp}^2 + \sigma_{sc}^2 + \sigma_{sp}^2 + 1) \right] + \sigma_n^2, \quad (13)$$

在差分吸收激光雷达系统中, 发射功率的波动可以忽略, 则(13)式可简化为

$$\sigma_{P_r}^2 = \langle P_t \rangle^2 P_{0i}^2 (\sigma_{sc}^2 \sigma_{sp}^2 + \sigma_{sc}^2 + \sigma_{sp}^2) + \sigma_n^2, \quad (14)$$

由(10)式和(14)式, 可以得到直接探测信噪比的平方为:

$$R^2 = \frac{\langle P_t \rangle^2}{\sigma_{P_r}^2} = (\sigma_{sc}^2 \sigma_{sp}^2 + \sigma_{sc}^2 + \sigma_{sp}^2 + R_c^2)^{-1}, \quad (15)$$

其中 $R_c = \langle P_t \rangle P_{0i} / \sigma_n$ 为载噪比。忽略大气湍流的影响, (15) 式与文献^[5~8]的信噪比公式相同。

4 数值仿真及讨论

本文提出的统计模型充分考虑到大气湍流导致的激光闪烁的影响, 比其它统计模型具有更高的计算精度。为了直观地说明激光闪烁对回波信号统计特性的影响, 下面给出采用 Hufnagel-Valley5/7 湍流大气结构模型(即 $W=21$ m/s, $A=1.7 \times 10^{-14}$ m^{-2/3}) 时, 用本文的统计模型和文献^[5]的统计模型得到的信噪比的仿真结果。对于水平传输的长程中红外(3.66 μ m)和远红外(10.59 μ m)直接探测差分吸收激光雷达系统, 图2和图3分别给出了离地高度为

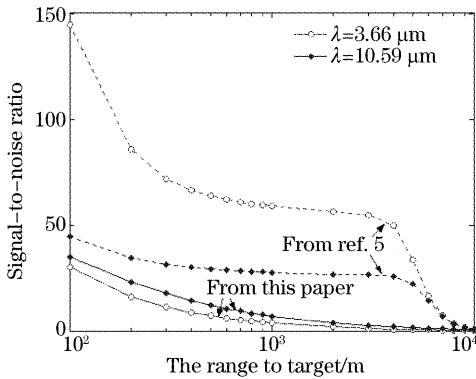


图 2 高度为 0.1 km 的信噪比

Fig. 2 Signal-to-noise ratio at the height of 0.1 km

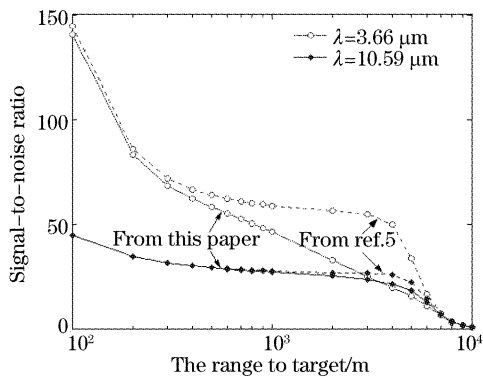


图 3 高度为 10 km 的信噪比

Fig. 3 Signal-to-noise ratio at the height of 10 km

0.1 km 和 10 km 的信噪比, 图中实线的信噪比来自本

表 1 信噪比比较

Table 1 Comparison of signal-to-noise ratio

| R / m | Source | $C_n^2 = 1.1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3},$ | $C_n^2 = 6.7 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3},$ | $C_n^2 = 2.61 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3},$ |
|----------------|------------|---|---|--|
| | | $D_{\text{rec}} = 0.35 \text{ m}$ | $D_{\text{rec}} = 0.10 \text{ m}$ | $D_{\text{rec}} = 0.05 \text{ m}$ |
| 240 | Ref. [10] | 58.82 | 27.78 | 12.50 |
| | This paper | 64.88 | 25.85 | 12.60 |
| | Ref. [5] | 569.29 | 166.94 | 86.47 |
| 450 | Ref. [10] | 43.48 | 13.33 | 6.80 |
| | This paper | 36.27 | 14.10 | 6.29 |
| | Ref. [5] | 306.42 | 91.83 | 48.92 |

5 结 论

本文在已有统计模型的基础上,考虑了大气湍流导致的激光闪烁对回波信号的影响,提出了一种改进的长程差分吸收激光雷达回波信号统计模型,并对其统计特性进行了分析。此外,本文还仿真了水平传输的长程中红外和远红外直接探测差分吸收激光雷达系统的信噪比,先将仿真结果与文献[5]的信噪比进行比较,结果表明大气湍流导致的激光闪烁将对回波信号统计特性产生显著的影响,再将仿真结果与文献

文,虚线来自文献[5]。

图 2 中,本文统计模型得到的信噪比与文献[5]的信噪比相差较大,尤其是中红外波长的情况。图 3 中,在距离小于 200 m 时,本文的信噪比与文献[5]的基本吻合;随着距离的增加,中红外波长信噪比的差别越来越大,远红外波长的信噪比仍然比较接近。从上面的分析可以看出,大气湍流导致的激光闪烁对短波长的影响更加明显;在强湍流情况下(近地面),激光闪烁将对回波信号的统计特性产生严重的影响;在弱湍流情况下(高空),激光闪烁对远红外波长的影响可以忽略,在距离大于 200 m 后,激光闪烁对中红外波长的影响仍然比较明显。

文献[10]对中红外长程差分吸收激光雷达系统进行了近地面的实验研究,其作用距离分别为 240 m 和 450 m,目标处光束直径 D_{tar} 为 0.3 m,在不同大气折射率结构常数和接收孔径下,采用信号平均得到的信噪比如表 1 所示。在相同参量条件下,用本文统计模型和文献[5]的统计模型计算出的信噪比也列在表 1 中。

从表 1 的数据可以看出,在三种大气折射率结构常数和接收孔径下,用本文统计模型计算出来的信噪比与文献[10]的实验数据相当吻合,文献[5]的模型没有考虑湍流导致的激光闪烁的影响,其信噪比远大于实验数据。

[10]的实验数据进行比较,验证了本文提出的统计模型更精确、更符合实际。本文的贡献在于根据红外差分吸收激光雷达系统中大气湍流导致的激光闪烁、目标反射斑纹、接收噪声以及发射功率波动对回波信号统计特性影响的实际考虑,提出了表达更为精确的长程差分吸收激光雷达回波信号统计表达式(1),以及直接探测信噪比表达式(15)。

参 考 文 献

1 James C. Sentell. Dual-use DIAL applications and performance

- predictions[C]. *Proc. SPIE*, 1994, **2271**: 2~12
- 2 Dennis K. Killinger, Norman Menyuk. Remote probing of the atmosphere using a CO₂ DIAL system [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1981, **17**(9): 1917~1929
- 3 William B. Grant. Effect of differential spectral reflectance on DIAL measurements using topographic targets[J]. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(13): 2390~2394
- 4 N. Menyuk, D. K. Killinger. Assessment of relative error sources in IR DIAL measurement accuracy [J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(17): 2690~2698
- 5 Russell E. Warren. Detection and discrimination using multiple-wavelength differential absorption lidar[J]. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(21): 3541~3545
- 6 J. A. Dowling, B. T. Kelly, J. D. Gonglewshi *et al.*. Design and performance simulations for an airborne DIAL system for long-range remote sensing applications[C]. *Proc. SPIE*, 1997, **2956**: 96~106
- 7 Bradly J. Cooke, Bryan E. Laubscher, Maureen Cafferty *et al.*. Analysis and design methodology for the development of optimized, direct-detection CO₂ DIAL receivers[C]. *Proc. SPIE*, 1997, **3122**: 128~161
- 8 Christopher M. Gittins, William G. Lawrence, William J. Marinelli. Frequency-agile bandpass filter for direct detection lidar receivers[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(36): 8327~8335
- 9 Mark Schmitt, Brian McVey, Brad Cooke *et al.*. Comprehensive system model for CO₂ DIAL[C]. *Proc. SPIE*, 1996, **2702**: 95~103
- 10 F. Magnotta, J. R. Morris, W. A. Neuman *et al.*. Mid-wave infrared DIAL noise phenomenology[C]. *Proc. SPIE*, 1997, **3127**: 268~274
- 11 E. T. Scharlemann. Comparison of analysis techniques for multiwavelength DIAL[C]. *Proc. SPIE*, 1997, **3127**: 275~285
- 12 Clifton S. Fox. *The Infrared and Electro-Optical System Handbook* [M]. Michigan: Infrared Information Analysis Center, 1993. 157~232
- 13 Edward P. MacKerrow, Mark J. Schmitt. Measurement of integrated speckle statistics for CO₂ lidar returns from a moving, nonuniform, hard target[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(27): 6921~6937
- 14 Clifton S. Fox. *The Infrared and Electro-Optical Systems Handbook* [M]. Michigan: Infrared Information Analysis Center, 1993. 87~99
- 15 Brad Cooke, Mark Schmitt, Roy Goeller *et al.*. CO₂ DIAL transmitter/receiver noise characterization and related correlated noise issues[C]. *Proc. SPIE*, 1996, **2702**: 2~14
- 16 Wang Weiran, Sun Bing. Digital receiver for laser imaging radar[C]. *Proc. SPIE*, 2002, **4484**: 304~310