

文章编号: 1001-3806(2007)05-0500-03

轻霾天气下大气多次散射对激光通信的影响

温 涛,魏急波*,马东堂

(国防科学技术大学 电子科学与工程学院,长沙 410073)

摘要: 为了了解多次散射对轻霾天气下大气激光通信的影响程度,建立了轻霾天气下大气多次散射的模型,并进行了分析,从理论上证明了在轻霾天气下前向散射对光接收的影响可以忽略。这为设计大气激光通信光收发系统提供了理论依据。

关键词: 光通信;多次散射;前向散射;后向散射;大气激光通信

中图分类号: TN929.1 **文献标识码:** A

Analysis of effect of multiple scattering on laser communication in light haze weather

WEN Tao, WEI Ji-bo, MA Dong-tang

(College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In order to understand how the multiple scattering affecting the atmosphere laser communication in haze weather, the multiple scattering model was set up. After analysis, a conclusion was drawn that in light haze weather, the effect of forward scattering on laser communication could be ignored. The theory can be used in atmosphere laser communication system design.

Key words: optical communication; multiple scattering; forward scattering; backward scattering; atmosphere laser communication

引 言

大气激光通信是以激光为载体使其在大气中传输,实现信息交流的通信方式。大气激光通信具有抗干扰能力强、保密性好、机动能力强容量大等优点,但同时由于在大气中传输,受大气信道特性(如天气状况等)的影响明显,大气信道的性能直接决定信息的传输质量。激光大气传输的线性光学效应,包括大气折射、吸收、散射和湍流以及气溶胶对激光的散射和吸收等,是影响激光在大气中传输的重要因素。

森林燃烧所释放出的烟尘,由于含有悬浮微粒、一氧化碳气体等,将会形成所谓的霾而降低能见度。当能见度介于 5km 至 10km 之间时,便称之为轻霾,其大气衰减系数为 $2\text{dB}/\text{km}^{[1]}$ 。

作者主要研究了大气的线性光学效应中的大气多次散射对轻霾天气下大气激光通信接收的影响。

1 大气多次散射对激光通信系统的影响

大气散射对激光传输的影响除了使得接收到的光

作者简介:温 涛(1977-),男,博士研究生,主要研究方向是自动控制、伺服系统控制算法、模式识别和图像处理。

* 通讯联系人。E-mail: wjbhw@nudt.edu.cn

收稿日期:2006-07-03;收到修改稿日期:2006-08-01

在强度上被衰减以外,还会产生一个严重的影响,这就是大气的后向散射和前向散射效应^[2]。如果发射、接收使用相同频率的激光,那么接收端接收到的光信号当中除了有发射端发射的信号光外,还会有本身接收端发出的信号光经后向散射后带来的干扰信号以及发射端发出的信号经过多次散射送来的改变了相位的前向散射光等等^[3]。

在包含许多粒子的一个散射体积中,每个粒子不仅接收到光,而且又散射掉那些已由其它粒子散射了的光^[4,5],见图 1。

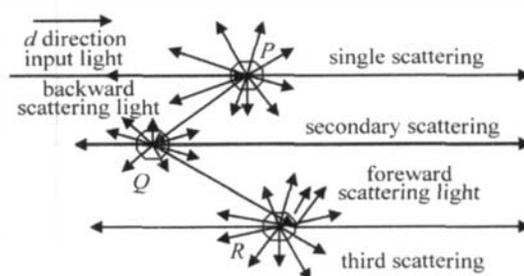


Fig 1 Multiple scattering process

在 P 点的粒子通过向各个方向只散射一次的单次散射作用于入射光;与此同时,一部分单次散射的光到达在 Q 点的粒子上,在此再次发生向各个方向的散射,这称为二次散射;同样地,随后在 R 点的粒子上发生 3 次散射。将多于一次的散射称为多次散射^[4]。由

图 1 显而易见,一些由于单次散射而离开 d 方向的入射光,由于多次散射的作用可以在此方向重新出现。对辐射能在大气中的传输而言,多次散射是一个重要过程,当涉及到云和气溶胶时尤其如此^[4,6]。多次散射的存在会使得一个通信单元一方面接收到本地发射出去的光信号的后向散射干扰信号,另一方面接收到对方通信单元发来的光信号的前向干扰信号。

对光信号的接收采用带滤波的光强接收方式,使用 CCD 和四象限探测器作为接收器件,那么包括背景光在内的干扰光的强度是系统首先需要考虑的因素。由于采用了带滤波的光强接收方式,接收到的光强主要是与信号光波长相同的光信号,其中背景光的强度比例很小,可以忽略。那么在不考虑背景光干扰的情况下,有如下表达式: $S = S_s + S_b + S_f$, 其中, S 是接收到的总的光信号, S_s 是远端发来的光信号, S_b 是本地发射光的后向散射干扰信号,而 S_f 是远端发来的前向散射干扰信号。如果干扰信号的强度大于有用信号的强度,即 $S_b + S_f > S_s$, 因为采用的是光强接收方式,那么有用信号就会被干扰信号淹没,这个激光传输系统便是无效的。

在设计光收发系统的时候,本地发射的光信号和远端发射的光信号采用不同的波长,在每一端接收光信号的时候,使用相应的滤光片就可以避免接收到本地发射的后向散射干扰信号 S_b 。所以,只剩下干扰信号 S_f , 下面分析 S_f 对光接收带来的影响。

2 大气多次散射干扰的模型以及分析

辐射在介质中传输时由于与介质相互作用而被衰减。对相距为 L 的两端,如果介质是均匀的,则有下列方程^[4]:

$$I(\nu) = I_0(\nu) \exp[-\mu(\nu)L] \quad (1)$$

式中, $\mu(\nu)$ 为介质的衰减系数, ν 是频率参数, $I(\nu)$ 是光辐射强度函数,这就是布给定律。指数中的乘积 μL 称为介质的光学厚度,记为 I_t , 这是一个常用的无量纲参数。衰减系数 $\mu(\nu)$ 的量纲为 L^{-1} , 常用的单位为 cm^{-1} , 表示光辐射衰减到原值的 $1/e$ 时所经过距离的倒数。对于常用的衰减系数单位 dB/km 与 km^{-1} 的换算关系为:

$$x \text{ dB/km} = x \frac{\ln 10}{10} \text{ km}^{-1} \quad (2)$$

于是对于系统试验环境的 2 dB/km 衰减系数,有 $2 \text{ dB/km} \approx 0.46 \text{ km}^{-1}$ 。

多次散射的大小取决于散射粒子的光学性质、光学厚度,也依赖于发射脉冲、光学系统等一些特性。如果只考虑角度比较窄的范围内的散射问题(小角近似),可以解得视场较大、半径为 R 且位于光轴上距离

光源 z 处的探测器所接收到的光功率^[7,8]:

$$P(z, \mu) = \exp(-\mu z) \left\{ 1 - \exp \left[-R^2 \left(\frac{z}{\beta^2} + \frac{1}{\gamma^2} \right)^{-1} \right] \right\} + \sum_{m=1}^{\infty} \exp(-\mu z) \frac{\mu^m z^m}{m!} [1 - s(m)] \quad (3)$$

其中,

$$s(m) = 2^{m-1} \Gamma(m/2)^0 \int_0^{R(m)\lambda} ds s^{m-1} \times \exp \left[-R^2 \frac{z^2}{\alpha^2} + \frac{1}{\beta^2} + \frac{1}{\gamma^2} \right]^{-1} \quad (4)$$

其中^[9,10],

$$\beta = \frac{kw_0}{2}, \gamma = \frac{2}{w_0} \quad (5)$$

式中, w_0 为光束的最小尺度(束腰宽度), α 为接收视场角的倒数, $k = 2\pi/\lambda$, $\Gamma(x)$ 为伽马函数, $R(m)$ 为 m 次散射粒子的等效半径,其值由下述条件确定:

$$\frac{\pi^{m-2} [R(m)]^m}{\Gamma(1+m/2)} = 2^m \quad (6)$$

定义多次散射情况下的透过率为^[7]:

$$\tau_m(z, \mu) = \frac{P(z, \mu)}{P(z, \mu = 0)} \quad (7)$$

$$\tau_m(z, \mu) = \tau_0(z, \mu) [1 + C(z, \mu)] \quad (8)$$

$\tau_0(z, \mu)$ 为由比尔定律确定的透过率,而:

$$C(z, \mu) = \frac{\sum_{m=1}^{\infty} (\mu^m z^m / m!) [1 - s(m)]}{1 - \exp[-R^2 (z^2 / \beta^2 + 1 / \gamma^2)]} \quad (9)$$

称为修正因子,是一个衡量包括 m 阶多次散射重要性的函数,它依赖于散射系数 μ 、传播距离 z 、光束发散角以及相函数发散度。

对于准直光束,当光束的发散角小于 $6'$ 、光束直径 $d < 100 \text{ cm}$ 、接收视场角与光束发散角相当时,在可见光谱区布给定律适用于 $I_t \leq 25$ 的情况,对于红外光谱区,由于粒子的尺度相对变小和吸收作用增加,适用的范围可能更宽,见图 2^[7],其中,真空中的波长 $\lambda =$

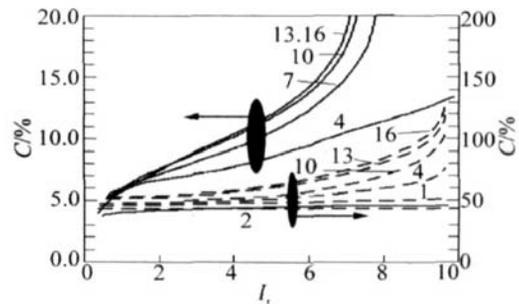


Fig 2 Radiation fog multiple scattering modify factor

$1.06 \mu\text{m}$, $R = 1 \text{ cm}$, $\gamma = 0.35 \text{ cm}^{-1}$, $\alpha = 28.20 \text{ rad}^{-1}$ 。实线对应条件: $\mu = 217.75 \text{ km}^{-1}$, 含水量 $W = 1 \text{ g/m}^3$, 对应于右边的纵坐标;虚线对应条件: $\mu = 21.775 \text{ km}^{-1}$, $W =$

$0.1\text{g}/\text{m}^3$, 对应于左边纵坐标。图中数字为散射的阶数。可以看到, 衰减系数和光学厚度不大时 (对应虚线条), 多次散射的影响是很小的, 而当衰减系数很大 (也即含水量 w 很大) 时 (对应实线条), 即使光学厚度不大 ($I_t < 4$), 多次散射的影响仍然不可忽视。

3 结论

对大气的多次散射的产生原因及其对激光通信的影响进行了分析, 对于后向散射干扰, 通过对收、发系统使用不同频率的信号光的办法来剔除, 即在接收端使用滤光片滤除本身发射的后向散射干扰光, 而只接收与发射端发射的频率相同的信号光。这种方法在实验中取得了非常好的效果, 大大消除了在较恶劣天气下的后向散射干扰。

对于轻霾天气状态, 在衰减系数为 0.46km^{-1} ($2\text{dB}/\text{km}$ 衰减, 相当于能见度约 1.6km 的霾雾天气)、传输距离在 15m 以内的情况下, 由于 $I_t = 0.46 \times 15 = 6.9 \leq 25$, 完全可以不考虑多次散射, 所以前向散射的干扰也可以不考虑。

参 考 文 献

[1] NETTLETON J E, BURTON J H. US army ultra light laser designator

development [OL/EB]. <http://www.dtic.mil/ndia/2004/amaments/2004amaments.html>, 2004-06-14.

- [2] WANG L, YANG Zh J, LI G P *et al* Research of backscattered laser energy within the energy measurement for large caliber high energy lasers [J]. *Laser Technology*, 2006, 30 (1): 45~48 (in Chinese).
- [3] LU Y M, HUANG T X, YANG Z K Study on lidar receiver field of view [J]. *Laser Technology*, 1999, 23 (1): 46~50 (in Chinese).
- [4] SONG F Zh Foundation of applied atmospheric optics [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1990. 1~231 (in Chinese).
- [5] ZHANG Y X, CHI Z Y. Optical wave propagation and imaging in atmosphere [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1997. 1~241 (in Chinese).
- [6] CHENG Y B, SU X Q, ZHAO M H *et al* Analysis of the signal detection of laser scattering in the air [J]. *Laser Technology*, 2006, 30 (3): 277~279 (in Chinese).
- [7] TAM W G, ZARDECKIA. Multiple scattering correction to the Beer-Lambert law 1: open detector [J]. *Appl Opt*, 1982, 21 (13): 2405~2412.
- [8] DEEPAK A, FARRUKH U O, ZARDECKIA. Significance of higher-order multiple scattering for laser beam propagation through hazes, fogs, and clouds [J]. *Appl Opt*, 1982, 21 (3): 439~447.
- [9] ZARDECKIA, TAM W G Multiple scattering correction to the Beer-Lambert law, 2: detector with a variable field of view [J]. *Appl Opt*, 1982, 21 (13): 2413~2420.
- [10] WANG H, SUN X, LIU S Sh Advanced Mathematics [M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 1998. 1~292 (in Chinese).

(上接第 499 页)

- [4] ROYO P, KODA R, COLDREN A. Vertical cavity semiconductor optical amplifiers: comparison of fabry-perot and rate equation approaches [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2002, 38 (3): 279~284.
- [5] BJÖRLIN S E. Carrier-confined vertical-cavity semiconductor optical amplifiers for higher gain and efficiency [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2003, 9 (5): 1374~1384.
- [6] ADAMS J M, COLLINS V J, HENNING D I Analysis of semiconductor laser optical amplifiers [J]. *IEEE Proceedings*, 1985, 132 (1): 58~63.
- [7] SAIIHOH T, MUKAITI T. Theoretical analysis and fabrication of antire-

reflection coatings on laser diode facets [J]. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 1985, 3 (2): 288~293.

- [8] XU J H, LUO B, PAN W *et al* Optical design of the gain bandwidth of vertical-cavity semiconductor optical amplifiers based on the coupled cavities [J]. *Laser Technology*, 2006, 30 (1): 60~63 (in Chinese).
- [9] GUO Ch Zh, CHEN Sh L. On micro cavity effect in vertical cavity surface emitting quantum well laser with multilayer hetero-structure reflectors [J]. *Acta Physica Sinica*, 1997, 46 (9): 1731~1743 (in Chinese).
- [10] ZHAO Zh, PAN W, LUO B *et al* Numerical analyses on gain properties of vertical-cavity semiconductor optical amplifiers [J]. *Laser & Infrared*, 2004, 34 (2): 116~118 (in Chinese).