

# 舰载激光通信传输仰角误差分析与评估

任席闯,王江安,吴荣华

(海军工程大学电子工程学院,湖北 武汉 430033)

**摘要:**阐述了对流层不同波长激光的大气折射率。基于几何光学的方法,用球面分层和平面分层两种大气分层模式对激光在对流层中传输路径以及产生的仰角误差进行分析。用 MATLAB 进行了仿真方法,得出了传输仰角误差角与传输高度、起始仰角和激光波长的关系,并给出了两种分层模式的应用条件。

**关键词:**激光;对流层;折射率;几何光学

**中图分类号:**TN219 **文献标识码:**A

## Analysis and Evaluation of Naval Laser Communication Transmission Declination Angle

REN Xi-chuang, WANG Jiang-an, WU Rong-hua

(Academy of Electronic Engineering, Naval Univ. of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** The tropospheric atmosphere refractivity of different laser wave length is expatiated. Based on geometrical optics, plane layered model and sphere layered model are used to analyze the laser transmission path and the declination angle from direct path. How the transmission altitude, initial elevation angle of the transmission path and laser wavelength contributes to the declination angle is obtained by MATLAB simulation. And the application condition of the twomodel is given.

**Key words:** laser; troposphere; refractive index; geometrical optics

### 1 引言

激光通信由于其传输的单方向性和高速率,可以作为舰船间微波通信的有效补充方式。激光在大气中传播时主要有能量衰减、光束偏折和光斑抖动等效应。大气中温度、湿度、压强等气象因素的不同导致大气折射率的不均匀分布,所以激光在大气层中传输时会发生折射效应,从而使得传输路径并非是一条直线,而是产生一定的弯曲。光束的偏折效应对于激光通信中光束自动捕获、对准、跟踪(APT)以及激光武器的制导有着重要影响<sup>[1-2]</sup>。

本文对激光在大气中传输时的折射率进行分析,采用球面分层和平面分层两种大气分层模式,用几何光学的方法对激光在对流层中传输路径进行分析,并用 MATLAB 进行了仿真,得出了传输仰角误差角与传输高度、起始仰角和激光波长的关系。

### 2 激光在对流层传输大气折射率分析

由于大气折射率的变化范围细微,在研究电磁

波的传输时定义折射指数  $N = (n - 1) \times 10^6$  ( $N$  的范围通常为 250 ~ 400)。

可见光与近红外波段大气折射指数由下式确定<sup>[3]</sup>:

$$N = (n - 1) \times 10^6 = m_1(\lambda) \frac{P}{T} + m_2(\lambda) \frac{e}{T} \quad (1)$$

其中,  $P$  为气压 (hPa);  $e$  为水汽压 (hPa);  $T$  为热力学温度 (K);  $m_1(\lambda)$ ,  $m_2(\lambda)$  分别为波长  $\lambda$  ( $\mu\text{m}$ ) 的函数,由以下两式确定:

$$m_1(\lambda) = 23.7134 + \frac{683.937}{130 - \lambda^{-2}} + \frac{45.473}{38.9 - \lambda^{-2}} \quad (2)$$

$$m_2(\lambda) = 64.8731 + 0.5808\lambda^{-2} - 0.0071150\lambda^{-4} + 0.0008851\lambda^{-6} \quad (3)$$

由式(1)看出激光在大气中折射率除了与激光

基金项目:“十一五”预研项目(No. 4010607020201)资助。

作者简介:任席闯(1982-),男,博士生,研究领域为激光通信。

E-mail: rxcxxx@163.com

收稿日期:2008-09-22

波长有关,还与温度、湿度和大气压强有直接联系。要获得折射率的高度分布,需要知道温度、湿度和压强的高度分布,本文采用标准大气条件计算折射率高度分布。标准大气模型是全球中性大气层的一个平均简化,具有简洁性和广泛性等优点。我国在建立自己的标准大气之前,使用1976年美国标准大气,并以其30km以下部分作为国家标准。1976年美国标准大气在海平面几个重要基本参数的数值假定为<sup>[4-5]</sup>:海平面温度288.15K,气压为1013.25hPa,大气密度为1.225kg/m<sup>3</sup>,加速度为9.80665m/s<sup>2</sup>,地面至11km对流层的气温垂直递减率为0.65℃/100m。

本文对地面至海拔10km范围内温度、湿度和压强垂直分布采用式(4), $H$ 为垂直高(m); $P$ 为气压(hPa); $e$ 为水汽压(hPa); $T$ 为热力学温度(K)。

$$\begin{cases} T = 288.2 - 6.5 \times 10^{-3} H \\ e = 10 - 3.5 \times 10^{-3} H \\ P = P_0 \left(1 - \frac{H}{44300}\right)^{1/0.19} \\ P_0 = 1013.25 \end{cases} \quad (4)$$

选取大气激光通信常采用的激光波长1.55μm计算折射率分布,通过MATLAB编程仿真,式(4)作为温度、湿度、压强的垂直剖面,带入式(1),计算折射率指数的垂直剖面,如图1所示。

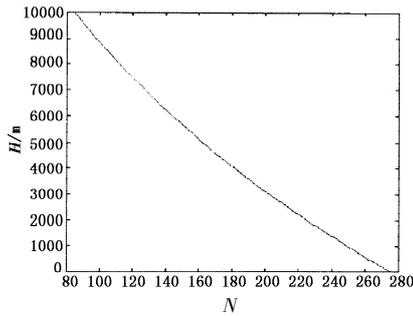


图1 标准大气下1.55μm波长激光的大气折射率高度分布图

### 3 大气分层模型进行路径分析

由于大气折射率的不均匀性,电磁波在大气中传输会发生折射,因此会发生光路的偏折。通常情况下认为激光在大气中直线传输,这样就会与真实的传输情况有偏差,为了研究偏差大小及影响因素,引入仰角误差来衡量偏差的大小<sup>[6]</sup>。用平面分层和球面分层两种分层方法模拟对流层大气,按不同高度将大气分成不同层,各层的折射率梯度由该层的气象因素决定,并认为各层内部水平气象因素不变,即气象因素的改变只在垂直剖面上发生。

#### 3.1 球面分层模型和平面分层模型

球面分层方法在研究超短波的传播时被广泛采用,将大气分成平行于地球表面的同心环状薄层结构,各层内部折射率为定值<sup>[7-8]</sup>。如图2所示,激光

在地球表面A点以一定仰角 $\theta_0$ 发射,在传输光路上折射率只在由一层进入另一层时发生变化,经过一定高度传输后到达B点,传输过程中的折射效应使得传输路径为一曲线。而通常认为激光直线传播,仰角处理为 $\alpha_0$ ,可用两个角度之间的差来定义仰角误差。

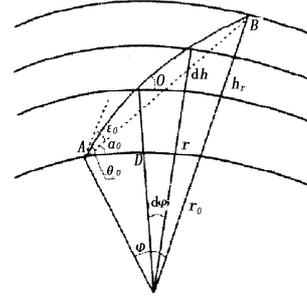


图2 大气球面分层模型

根据球面折射的Snell定律:

$$Rn\cos\theta = R_0n_0\cos\theta_0 = K \quad (5)$$

式中, $K$ 为常数;传输仰角 $\theta$ ;传输地面距离为 $D$ ;传输高度为 $H$ ; $\varphi$ 为传输对应的地球球心偏角,光路起始点折射率和仰角分别为 $n_0$ 和 $\theta_0$ ,则相互之间关系有:

$$\begin{cases} D = \int_0^{H_0} \frac{KR_0}{\sqrt{n(H)^2 R^2 - K^2}} dH \\ \varphi = \int_0^{H_0} \frac{KdH}{\sqrt{n(H)^2 R^2 - K^2}} \\ \alpha_0 = \text{actan} \frac{(r_0 + H) \cos\varphi - r_0}{(r_0 + H) \sin\varphi} \\ \varepsilon_0 = \theta_0 - \alpha_0 \end{cases} \quad (6)$$

一种简化的分层就是忽略地球的球状,认为地球表面水平<sup>[9]</sup>,如图3所示,将大气分成水平的薄层,与球面分层可有类似的定义方式。根据平面分层的Snell定律, $ncos\theta = n_0cos\theta_0 = K'$ ,对应的有:

$$\begin{cases} D = \int_0^{H_0} \frac{K}{\sqrt{n(H)^2 - K^2}} dH \\ \alpha_0 = \text{actan} \frac{H}{D} \\ \varepsilon_0 = \theta_0 - \alpha_0 \end{cases} \quad (7)$$

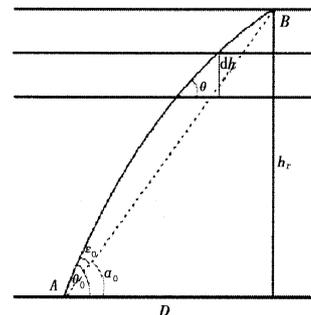


图3 大气平面分层模型

由两种分层方式的误差角计算可以看出误差角与传输初始角、传输高度和距离以及折射率的垂直分布有关,采用 MATLAB 仿真分别计算各种因素对误差角的影响。

### 3.2 起始仰角与误差影响

为了研究误差角  $\varepsilon_0$  与起始仰角  $\theta_0$  的关系,选择固定传输高度 3km,选取激光波长  $1.55\mu\text{m}$ ,以标准大气环境计算折射率高度分布,分别计算采用两种不同大气分层模式,计算起始仰角从 0 到  $\pi/2$  范围内误差角的变化规律。由图 4 看出两种大气分层模式情况下折射产生的仰角误差都随起始仰角的增大而减小,这是因为在相同的传输高度情况下,起始仰角越大,传输路径越短,由大气折射产生的角度误差自然就小。

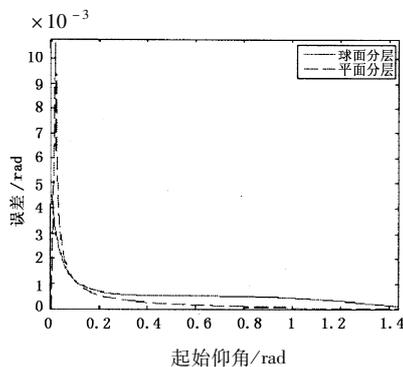


图4 起始仰角与误差角关系

### 3.3 传输高度对误差影响

为了研究传输高度对误差角的影响,固定起始仰角,以  $0.1\text{rad}$  和  $0.2\text{rad}$  为例,采用  $1.55\mu\text{m}$  激光波长,计算仰角误差与传输高度的关系。图 5 可以看出在起始仰角一定的情况下,采用两种分层方式获得的仰角误差都随传输高度的增加而增加。在相同条件下,球面分层方式获得的角误差比平面分层方式获得的角误差更大。

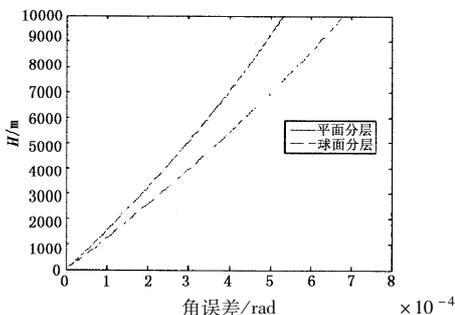


图5 传输高度与误差角的关系

### 3.4 激光波长对误差的影响

固定传输高度 8km,起始仰角  $0.1\text{rad}$ ,选取  $0.3 \sim 3\mu\text{m}$  波长范围,以标准大气环境计算折射率高度分布,求取不同波长激光传输获得的仰角误差,如图 6 所示,可以观察到仰角误差随激光波长增大而减小,

且采用球面坐标获得仰角误差更大。从宏观角度来讲,相同条件下,激光波长越大,透射性能越好,越接近于直线传输,获得的角误差越小。

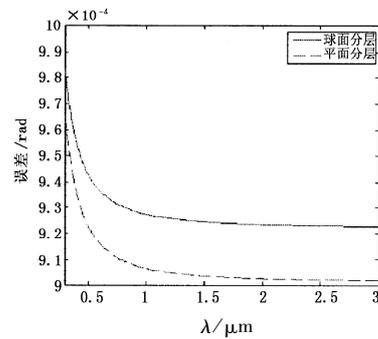


图6 激光波长对误差影响

## 4 结论

用红外波段折射率的计算公式和几何气象因素的垂直分布获得折射率的垂直分布,通过对流层大气的两种不同分层方式的分析,计算激光在对流层传输过程中由折射产生的传输误差角与传输高度、起始仰角、激光波长的关系。结果表明采用标准大气计算的误差角在毫弧度数量级;在传输距离和传输高度小时,两种分层方法结果比较接近,为了简化计算,通常可采用平面分层方式进行处理;在传输距离远时,两种分层方法之间产生误差较大,如星地激光通信,远程制导时必须采用球面分层方式。

### 参考文献:

- [1] 柯煦政,席晓莉.无线激光通信概论[M].北京:北京邮电大学出版社,2004:244.
- [2] 李双刚,聂劲松,孙晓泉.大气折射和色散对激光传输的影响[J].量子电子学报,2004,21(5):2.
- [3] 梁毅.对流层折射误差分析[D].成都:四川大学电气信息学院,2006.
- [4] M E Thomas, D D Duncan. Atmospheric transmission. The Infrared Electro-optical Systems Handbook [M]. Atmospheric propagation of radiation, SPIE Press, 1993, (2): 1-156.
- [5] 郭冠军,李树楷.对流层内激光垂直精密测距研究[J].光子学,2001,12(4):400.
- [6] 黄捷.电波大气折射误差修正[M].北京:国防工业出版社,1999.
- [7] Stephen Doss-Hammel. The geometrical optics approach to atmospheric propagation models [C]//Proceedings of SPIE, 2003, 4976:60-69.
- [8] J Förster, J Riechen. Measurements of refractive variability in the marine boundary layer in comparison with mesoscale meteorological model predictions [C]// Proceedings of SPIE, 2006, 6364(2):1-15.
- [9] Stephen Doss-Hammela, Dimitri Tsintikidisa, Alexander van Eijkb, et al. Refractive Effects, Turbulence, and the EOSTAR model [C]// Proceedings of SPIE, 2002, 5406: 733-742.