

激光与光电子学进展

航空平台气动光学效应对激光通信光束影响

曹陈铭¹, 刘智^{2*}, 张肃^{2**}, 林鹏², 蒋青芳³, 王合龙⁴¹长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;²长春理工大学空间光电技术国家地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130022;³长春理工大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130022;⁴中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471000

摘要 针对航空平台气动光学效应影响航空平台激光通信系统性能的问题,研究了航空器在不同飞行速度和海拔条件下,气动光学效应对激光通信系统通信光传输性能的影响。采用大涡模拟方法分别模拟了在不同飞行速度、海拔下激光通信系统周围的气动流场,计算得到流场的密度变化分布,并根据密度数据建立折射率场,采用龙格-库塔方法求解光束传播方程并进行光线追迹,计算并分析了通信光束经过气动流场后的全视场光程差分布和斯特列尔比。仿真计算结果表明:随着飞行速度的增大,流场密度的变化更为剧烈,光程差逐渐增大,斯特列尔比降低;在飞行速度相同的情况下,随着海拔的增加,流场密度波动减小,光程差减小,斯特列尔比有所提升。所研究成果对补偿机载激光通信过程中的气动光学效应产生的影响以及获得更好的通信质量具有一定指导意义。

关键词 机载激光通信; 气动光学; 数值仿真; 光程差; 斯特列尔比

中图分类号 O433.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP232719

Influence of Aero-Optical Effect on Laser Communication of Aircraft Platforms

Cao Chenming¹, Liu Zhi^{2*}, Zhang Su^{2**}, Lin Peng², Jiang Qingfang³, Wang Helong⁴¹School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China;²National and Local Joint Engineering Research Center of Space Optoelectronic Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China;³School of Electronic and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China;⁴Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, Aviation Industry of China, Luoyang 471000, Henan, China

Abstract To solve the problem of aero-optical effect of the aeronautical platform on the performance of the laser communication system of the aeronautical platform, the influence of the aero-optics effect on the optical transmission performance of the laser communication system is examined under the condition of different flight speeds and altitudes. The large eddy simulation method is used to simulate the aerodynamic flow field around the optical terminal of laser communication at different flight speeds and altitudes, the density change of the flow field is calculated, and the refractive index field is established according to the density data. Furthermore, the Runge-Kutta method is used to solve the beam equation, trace the beam, and calculate and analyze the optical path difference distribution and Strehl ratio of the whole field of view of the communication beam passing through the flow field. The simulation results show that as the flight speed increases, the change in flow field density becomes more intense, optical path difference increases gradually, and Strehl ratio decreases. In the case of the same speed, as the flight altitude increases, the flow field density fluctuation decreases, optical path difference decreases, and Strehl ratio increases. The results of this study are of guiding significance for compensating the aero-optical effect in the process of airborne laser communication and obtaining better communication quality.

Key words airborne laser communication; aerodynamic optics; numerical simulation; optical path difference; Strehl ratio

收稿日期: 2023-12-22; 修回日期: 2024-02-07; 录用日期: 2024-02-19; 网络首发日期: 2024-02-25

基金项目: 国家自然科学基金叶企孙科学基金(U2141231)

通信作者: *liuzhi@cust.edu.cn; **susiezhang21@126.com

1 引言

在空间信息网络建设中,动态环境下的信息高速安全组网通信是主要难点之一。航空平台激光通信系统因其灵活性好、成本低且具有一定的可维修性等优点^[1],可作为主要通信节点在空间信息网络建设领域中发挥重要作用。国内外开展了大量航空平台激光通信相关的研究和实验工作,对于机载激光通信的平台搭建和通信性能都进行了全面的研究与论证。2021年,长春理工大学实现飞艇飞行高度为 200 m、主光端机与从机间通信速率为 2.5 Gbit/s、通信距离为 2 km、通信误码率优于 10^{-9} 的性能指标。验证了一对多激光通信终端的设计,建立了按需组网与动态接入、异构信息一体化处理的网络结构^[2]。为获得较大的通信视场,航空平台激光通信系统通常采用半球形凸台结构^[3],如美国 Airborne Aero-Optics Laboratory (AAOL)、Airborne Aero-Optics Laboratory-Transonic (AAOL-T) 等项目均采用该结构作为激光窗口外形结构^[4-6]。但当飞行马赫数(Ma)超过 0.3 Ma 时,头罩的几何结构会引起结构复杂的湍流^[7],从而造成气流的压缩和分离。当光信号穿过流场时,复杂流场会对光学探测系统造成干扰,从而产生像偏移、像模糊、像抖动等一系列的气动光学效应^[8],进而导致通信光束能量衰减,通信性能降低。

近年来,与航空平台激光系统气动光学效应相关的研究日益增多。2012年,Smith等^[9]使用高速 Shack-Hartmann 传感器收集光束的瞬时波前,分析了飞行速度为 0.4~0.6 Ma 时湍流引起的光学畸变,通过分析孔径大小对色散曲线、波前光谱的影响,证实了边界层中气动光学结构的冻结流动假设是有效的。2017年,Morrida等^[10]在机载气动光学实验室中研究了当飞行马赫数为 0.5~0.8 Ma 时,共型窗口和平面窗口产生的激波和尾流对光束的影响,采集了不同视角下的波前数据,研究发现,随着马赫数的增加,激波范围增大,两种窗型尾迹中剪切层结构基本上不受激波的影响。2021年,Sun等^[11]研究了超音速湍流边界层气动光学效应的模拟和验证方法,通过分析网格灵敏度与比较实验数据和理论数据,证明数值编码和适当的网格尺度对湍流和气动光学统计结果都是有效的,并且两个流次的时间周期足以使湍流和气动光学统计的计算误差控制在 1% 左右。2023年,Xu等^[12]系统地分析了马赫数在 0.5~3.0 Ma 范围内的成像偏差,随着马赫数的增加,成像偏差逐渐增大,且增大速度逐渐缓慢;成像偏差斜率随着马赫数的增加逐渐减小,并逐渐趋于零,说明成像偏差对较大马赫数的变化不敏感。2018年,蒋倩雯等^[13]研究了不同拓扑荷数的拉盖尔-高斯(LG)光束与高斯光束在不同马赫数、不同攻角、不同海拔下的斯特列尔比以及成像偏移,发现在同一流场中,LG 光束的拓扑荷数越大,振幅形态保持越好,但光强衰减越大,成像偏移越大。2021年,刘涛^[14]采用三维元胞自动机光学追迹算

法,结合偏移矩阵与光学系统像差理论,对气动光学传输效应成像进行了仿真,并总结了成像效果与飞行高度、飞行速度之间的关系。2020年,陈勇等^[15]对光学吊窗尾迹流动非稳态气动光学效应进行了研究,通过实验和仿真分析了在 10 km 海拔处,吊舱尾流对光束的影响。2022年,李超等^[16]研究了不同形状的凸台在不同飞行速度下光程差受到气动光学的影响,评估了不同曲率对气动流场的影响。2015年,长春理工大学以固定翼飞机为平台,在 4 km、0.3 Ma 飞行条件下,研究了附面层对光束的影响,发现大气附面层对空间激光通信的影响,可以看做是在系统前附加一个焦距在 -530 m 的负透镜造成系统焦距变化、光斑扩散,从而影响通信效果,研究人员还设计了离焦补偿系统,进行了相应的补偿实验^[17]。在以上的研究中,研究者对于各个飞行速度下,不同光束、流场区域的气动光学效应及其影响进行了研究,但较少考虑机载激光通信平台的高度变化和速度变化的联合仿真研究,本文主要研究对象为固定翼飞机上搭载的激光通信系统,因此设置飞行速度在 0.4~0.8 Ma 范围内,海拔在 0~20 km 范围内,得到机载激光通信平台凸台周围流场的变化规律,并通过分析光程差分布和斯特列尔比,研究流场变化对通信光束的影响。

2 航空平台气动光学效应影响分析基本原理

2.1 激光通信系统物理模型构建

安放激光通信装置的凸台结构放置在飞机腹部,远离机翼等结构,受飞机其他结构引起的流场影响较小,因此将模型简化为位于平面中心的凸台,即设置凸台底面圆心位置为(0,0,0)。如图 1 所示,凸台由一个半径为 0.15 m 的半球和一个底面半径为 0.15 m、高为 0.15 m 的圆柱组合而成的。

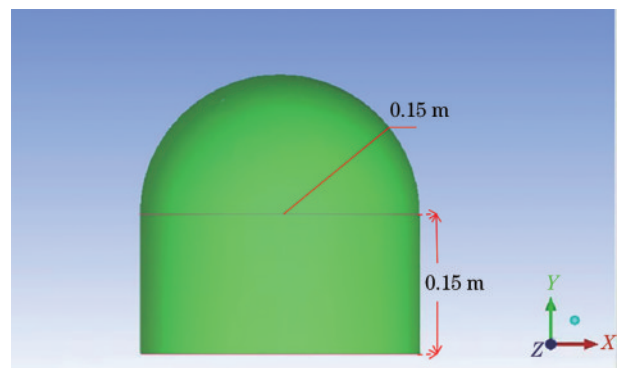


图 1 凸台结构示意图

Fig. 1 Convex structure diagram

设置外流场为 $6\text{ m} \times 6\text{ m} \times 2\text{ m}$ 的长方体区域。定义来流方向沿 X 轴正向,左侧定义为来流入口,右侧为来流出口,如图 2 所示为在 ANSYS 集成、在 ICEM 建立的头罩以及外流场模型。

边界条件设置过程中,将入口、出口和上表面以及

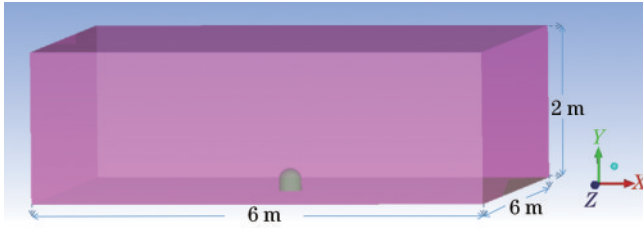


图 2 流场结构示意图

Fig. 2 Schematic of flow field structure

两侧面均设置为压力远场边界条件,将下表面和转塔表面设置为绝热无滑移边界条件。总网格数量为 2.95×10^6 ,并在相应区域进行了加密,能够完整捕捉流场运动。网格划分完成后,采用最小雅可比矩阵与最大雅可比矩阵的比值(Determinant)以及最小内角(Min angle)对网格质量进行评价,如图 3、图 4 所示。一般认为 determinant 均大于 0.3 即可认为网格可计算,本文所划分的网格 determinant 均在 0.8 以上;通常认为最小内角大于 16° 时该网格可计算,且越接近 90° 网格质量越好^[18],本文划分网格内角均大于 54° 。因此所建立的网格满足流体计算要求。

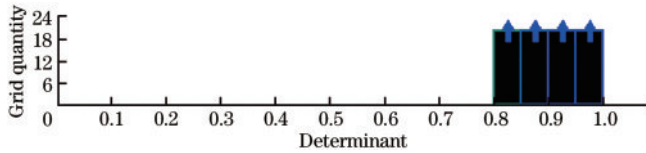


图 3 最小与最大雅可比矩阵之比与网格质量的关系

Fig. 3 Relationship between determinant and grid mesh quality

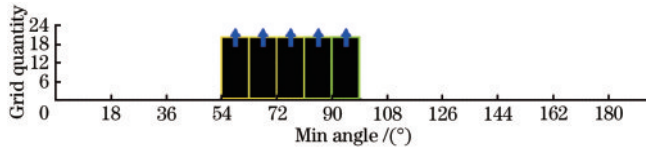


图 4 最小内角与网格质量的关系

Fig. 4 Relationship between min angle and grid mesh quality

为研究机载激光通信在不同条件下所受影响,根据固定翼飞机飞行参数,海拔设置为 $0 \sim 20$ km,来流速度设置为 $0.4 \sim 0.8$ Ma。在计算资源有限的情况下,为获得更为细致的流场结构,本文采用大涡模拟(LES)方法对流场进行仿真计算^[19]。

大涡模拟方法的基本思想认为湍流的运动由大小尺度的涡组成,大尺度涡获得运动的主要能量,通过相互作用传给小尺度涡,小尺度涡耗散掉其中大部分能量^[8]。其中大尺度涡具有各向异性,可通过直接求解纳维-斯托克斯(N-S)方程得到其运动影响。假设小尺度涡是均匀各向同性的,小尺度涡与大尺度涡之间通过亚格子模型建立联系。将流场瞬态物理量(f)分解为滤波变量(即大尺度分量, \bar{f})和亚格子变量(即小尺度变量, f'),即

$$f = \bar{f} + f', \quad (1)$$

\bar{f} 可以通过滤波函数 $G(\mathbf{r})$ 对 f' 进行滤波得到

$$\bar{f}(\mathbf{r}) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\mathbf{r}') G_i(\mathbf{r}, \mathbf{r}') dx' dy' dz', \quad (2)$$

式中: $\mathbf{r} = (x, y, z)$ 且 $\mathbf{r} = (xi, yj, zk)$, 为流场中某一点的位置,即光线传输路径的位置矢量,其中 i, j, k 为单位向量; $\mathbf{r}' = (x', y', z')$; i 表示 \mathbf{r} 的不同取值。常用滤波函数有加权平均滤波和均匀滤波两种。

2.2 激光通信系统通信光束传输模型

复杂流场的折射率和密度的关系可根据 Gladstone-Dale^[20] 关系进行描述,其表达式为

$$n(\mathbf{r}) - 1 = K_{GD} \rho(\mathbf{r}), \quad (3)$$

式中: $n(\mathbf{r})$ 和 $\rho(\mathbf{r})$ 为该点处的折射率和流场密度; K_{GD} 为 Gladstone-Dale 系数,是与光波长相关的函数,根据经验公式^[21]可表示为

$$K_{GD} = 2.23 \times 10^{-4} \left(1 + \frac{7.52 \times 10^{-15}}{\lambda^2} \right), \quad (4)$$

式中: λ 为光波长。本文中所研究的通信光波长为 1550 nm。

光束通过非均匀介质传播时,根据光沿直线传播理论和光线折射定律可知,光线路径会在复杂流场中发生偏折,其传播路径可以由光线方程描述

$$\frac{d}{ds} \left(n \frac{d\mathbf{r}}{ds} \right) = \nabla n, \quad (5)$$

式中: s 为光线传输路径上的弧长; n 为介质折射率; ∇n 为折射率梯度。该方程是典型的二阶常微分方程,可通过四阶龙格-库塔(Runge-Kutta)方法求解得到光线路径,具体过程为

$$\begin{cases} \mathbf{r} = (x, y, z) \\ \mathbf{T} = n \left(\frac{dx}{ds}, \frac{dy}{ds}, \frac{dz}{ds} \right) \end{cases}, \quad (6)$$

式中: \mathbf{T} 为折射率梯度。令 $dt = \frac{ds}{n}$, 可将传输方程组改写为

$$\begin{cases} \frac{d\mathbf{T}}{dt} = n(\nabla n) = f(t, \mathbf{T}) \\ \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \mathbf{T} = g(t, \mathbf{r}) \end{cases}, \quad (7)$$

折射率 n 随 \mathbf{r} 变化,令 $\mathbf{D}(\mathbf{r}) = n(\nabla n)$, 利用四阶龙格-库塔方法对该方程进行联立求解

$$\begin{cases} \mathbf{T}_i + 1 = \mathbf{T}_i + \frac{h}{6} (\mathbf{k}_1 + 2\mathbf{k}_2 + 3\mathbf{k}_3 + \mathbf{k}_4) \\ \mathbf{r}_i + 1 = \mathbf{r}_i + \frac{h}{6} (\mathbf{I}_1 + 2\mathbf{I}_2 + 3\mathbf{I}_3 + \mathbf{I}_4) \end{cases}, \quad (8)$$

式中: h 为将积分过程分解的计算步长; $\mathbf{k}_i, \mathbf{I}_i$ 为四阶龙格-库塔方法中将计算过程中分解的斜率。其中 $i=1, 2, 3, 4$, 可由以下关系式求得

$$\begin{cases} \mathbf{k}_1 = f(t_i, \mathbf{T}_i) = \mathbf{D}(\mathbf{r}_i) \\ \mathbf{I}_1 = g(t_i, \mathbf{r}_i) = \mathbf{T}_i \end{cases}, \quad (9)$$

$$\begin{cases} \mathbf{k}_2 = f\left(t_i + \frac{h}{2}, \mathbf{T}_i + \frac{h}{2} \mathbf{k}_1\right) = \mathbf{D}\left(\mathbf{r}_i + \frac{h}{2} \mathbf{T}_i\right) \\ \mathbf{I}_2 = g\left(t_i + \frac{h}{2}, \mathbf{r}_i + \frac{h}{2} \mathbf{I}_1\right) = \mathbf{T}_i + \frac{h}{2} \mathbf{D}(\mathbf{r}_i) \end{cases}, \quad (10)$$

$$\begin{cases} \mathbf{k}_3 = f\left(t_i + \frac{h}{2}, \mathbf{T}_i + \frac{h}{2} \mathbf{k}_2\right) = \mathbf{D}\left(\mathbf{r}_i + \frac{h}{2} \mathbf{T}_i + \frac{h^2}{4} \mathbf{D}(\mathbf{r}_i)\right) \\ \mathbf{I}_3 = g\left(t_i + \frac{h}{2}, \mathbf{r}_i + \frac{h}{2} \mathbf{I}_2\right) = \mathbf{T}_i + \frac{h}{2} \mathbf{D}\left(\mathbf{r}_i + \frac{h}{2} \mathbf{T}_i\right) \end{cases}, \quad (11)$$

$$\begin{cases} \mathbf{k}_4 = f(t_i + h, \mathbf{T}_i + h \mathbf{k}_3) = \mathbf{D}\left(\mathbf{r}_i + h \mathbf{T}_i + \frac{h^2}{2} \mathbf{D}(\mathbf{r}_i)\right) \\ \mathbf{I}_4 = g(t_i + h, \mathbf{r}_i + h \mathbf{I}_3) = \mathbf{T}_i + h \mathbf{D}\left(\mathbf{r}_i + \frac{h}{2} \mathbf{T}_i + \frac{h^2}{4} \mathbf{D}(\mathbf{r}_i)\right) \end{cases}. \quad (12)$$

将初始光线矢量和光线矢径代入上述方程组中,即可获得光线的传播路径。

光程(OP)定义为光线沿路径对折射率的积分,其表达式为

$$L_{OP} = \int_s n ds. \quad (13)$$

由于光线在密度不均匀的流场中传播会导致不同路径光线的光程差不同,定义为光程差(OPD),其表达式为

$$D_{OPD} = L_{OP_i} - \langle L_{OP} \rangle, \quad (14)$$

式中: $\langle L_{OP} \rangle$ 为光程的空间平均。通常采用斯特列尔比(S_R)对光束的传输质量进行评估,其计算公式^[22]为

$$S_R = \exp\left[-\left(\frac{2\pi}{\lambda} D_{OPD,rms}\right)^2\right], \quad (15)$$

式中: $D_{OPD,rms}$ 为OPD的均方差。

3 仿真结果

3.1 流场仿真结果

根据航空激光通信平台的工作情况,设置飞行速度分别为0.4、0.6、0.8 Ma,海拔分别为0、5、10、15、20 km,在Fluent平台,选取三维双精度密度基瞬态绝对速度求解器进行仿真实验。赋予物质正确的物理性质是对仿真过程具有重要影响。设定流体材料为空气,空气随海拔变化的具体的参数如表1所示。

所研究的湍流属于高速可压缩流体,在对气体黏度的设定中选用了适用于高速可压缩流体的Sutherland定律,气体密度是指为理想气体(Ideal-gas)形态。通信系统外壳材料设置为金属铝,光学窗口属性为硫化锌,具体材料属性如表2所示。

本文中壁面边界条件设置为非气固耦合,影响因素设定主要包括了传热、壁面运动、剪切力条件以及壁面粗糙度等。根据本文仿真需求,将热通量设置为0,壁面的运动状态为静止状态,所以设置为Stationary

表1 大气气体参数与海拔的关系

Table 1 Relationship between atmospheric gas parameters and altitude

Height /km	Temperature /K	Pressure /Pa
0	288.15	1011325.0
5	255.67	54048.0
10	223.25	26499.0
15	216.65	12111.0
20	216.65	5529.3

表2 材料属性

Table 2 Material properties

Material	Density / (kg /m ³)	Specific heat capacity / (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	Thermal conductivity / (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
ZnS	4120	485.7	18.0
Al	2719	871.0	202.4

wall,壁面粗糙度的设定对流动阻力和传热都有影响,在湍流计算中可以通过加入粗糙度影响的方式对壁面做出修正,本文中粗糙高度设置为0.0001 mm,粗糙常量设置为0.5。

通过仿真得到不同飞行速度和海拔下凸台周围流场的密度分布。图5与图6为不同飞行速度和海拔下,流场Z=0平面和Y=0平面的密度云图。

由图5与图6可知,在飞行过程中,头罩迎风面区域气体被压缩,从而形成高密度区,在背风面气流从壁面脱落,从而产生低密度区。通过对比相同海拔下的流场发现,随着飞行速度的增加,流场结构也会发生变化,以0.4 Ma飞行时,流场的流动相对平稳,随着飞行速度的增加,流场密度变化的区域增大,流场密度增大,且变化更为剧烈;当飞行速度为0.8 Ma时,在头罩顶部部分气体流速超过音速,进而产生激波。随着海拔的增加,空气密度和温度均下降,因此在相同飞行速度时,流场的密度变化也逐渐减弱,高密度区域和低密度区域之间的密度差逐渐减小。

3.2 光学计算结果

根据流场密度分布,通过求解光线传输方程,得到整个视场内光束沿不同出射方向出射时的光程差。在此过程中,设置光线从半球形头罩的圆心出射,根据其传输范围,建立光学计算网格,以半球头罩圆心为网格原点(0, 0, 0)建立边长为10 mm的方形坐标系,令光线传输方向为z'其范围为1 m,图7为光学计算网格示意图。通过改变光束出射的转角和仰角即可计算得到整个头罩范围的光程差分布情况,如图8所示,采用转角(θ_{Az})、仰角(θ_{El})定义光线传输方向。

图9为不同飞行速度和海拔下的光程差分布。由图9可知,迎风面的高密度区和背风面的低密度区所造成的光程差较为明显,当海拔为0时,飞行速度从0.4 Ma增加到0.8 Ma,最大光程差从2.9 μm 增大

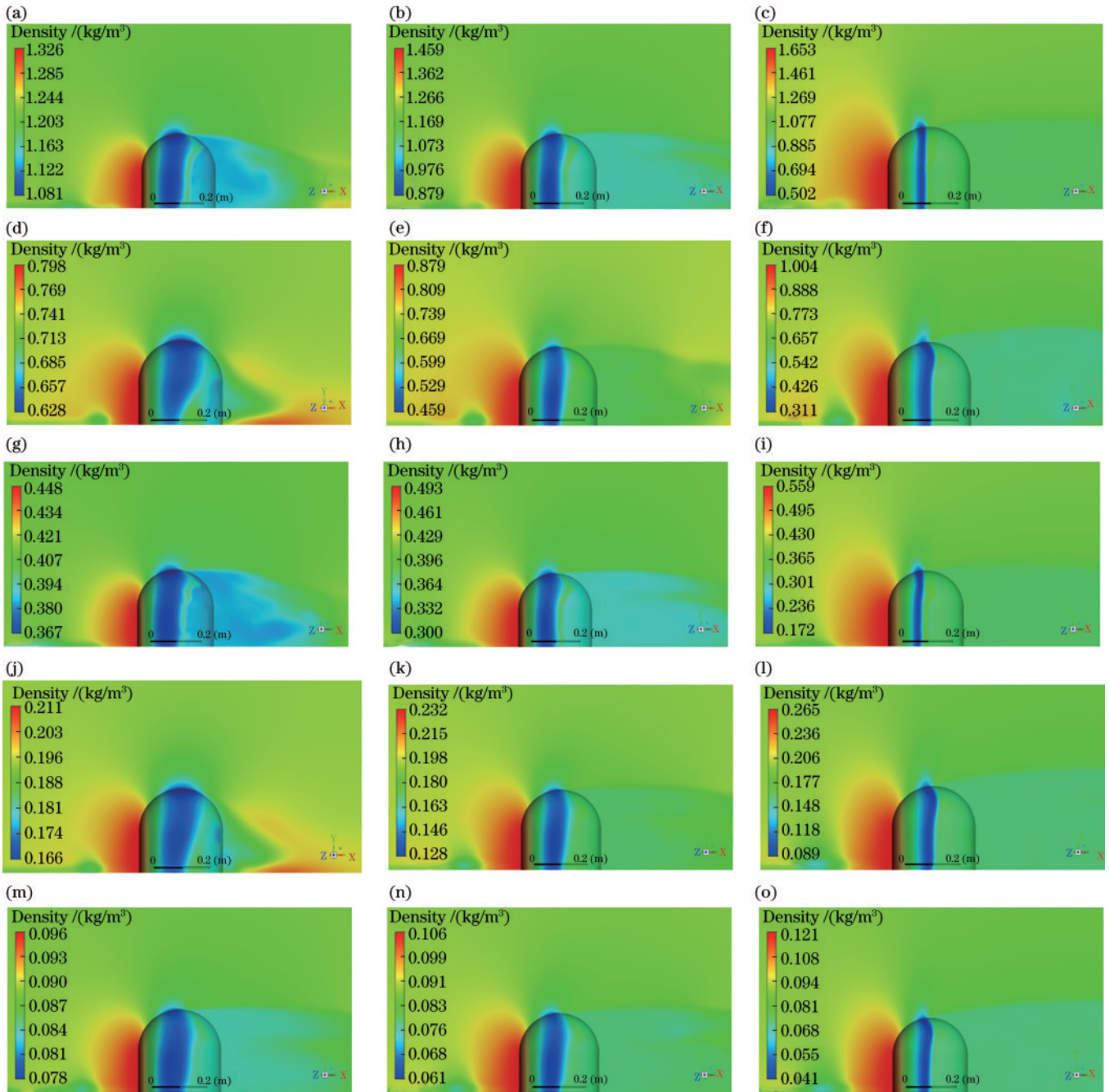


图5 不同飞行速度和海拔下,流场 $Z=0$ 平面密度云图。(a)~(c)海拔为0时的0.4、0.6、0.8 Ma云图;(d)~(f)海拔为5 km时的0.4、0.6、0.8 Ma云图;(g)~(i)海拔为10 km时的0.4、0.6、0.8 Ma云图;(j)~(l)海拔为15 km时的0.4、0.6、0.8 Ma云图;(m)~(o)海拔为20 km时的0.4、0.6、0.8 Ma云图

Fig. 5 Plane density cloud map of flow field $Z=0$ at different flight speeds and altitudes. (a)–(c) 0.4, 0.6, 0.8 Ma cloud map at 0 altitude; (d)–(f) 0.4, 0.6, 0.8 Ma cloud map at 5 km altitude; (g)–(i) 0.4, 0.6, 0.8 Ma cloud map at 10 km altitude; (j)–(l) 0.4, 0.6, 0.8 Ma cloud map at 15 km altitude; (m)–(o) 0.4, 0.6, 0.8 Ma cloud map at 20 km altitude

到 $13.2 \mu\text{m}$,且随着飞行速度的增加,光程差较大的区域范围也随之增大,从 45° 扩展到 70° 。在飞行速度相同的情况下,随着海拔的增加,光程差较大区域的范围没有很大变化,但由于密度的差异,所造成的光程差的值发生了较大变化,当飞行速度为 0.8 Ma 时,飞行高度的增加,最大光程差从 $13.2 \mu\text{m}$ 下降到了 $1.1 \mu\text{m}$ 。如表 3 所示为不同飞行条件下最大光程差数据。

不同方向的光束受气动光学效应影响程度不同,在与中轴线呈 45° 夹角路径上传播的光线在计算区域内时光程差波动较大,因此选取以 $(-1, 0, -1)$ 为法向量的平面为初始平面的光束,计算其经过光学计算网格后的光程差分布,并得到该方向不同飞行条件下的斯特列尔比。由于不同飞行条件下光程差分布结构相似,因此选取气动光学效应最明显的海拔为 0 且飞行速度为 0.8 Ma 条件下的光束经过流场后光程差分布

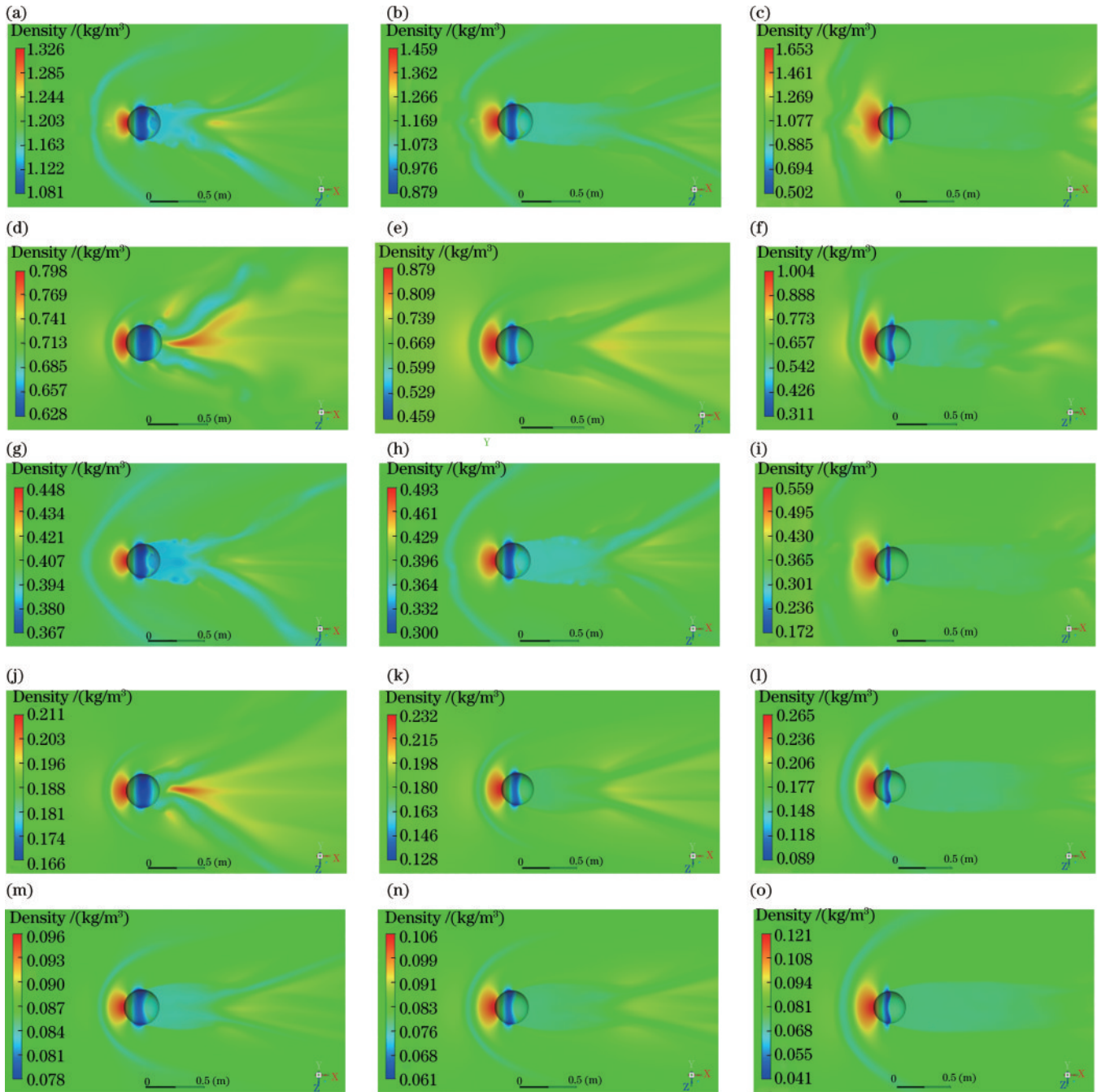


图 6 不同飞行速度和海拔下, 流场 $Y=0$ 平面密度云图。(a)~(c) 海拔为 0 时的 0.4、0.6、0.8 Ma 云图; (d)~(f) 海拔为 5 km 时的 0.4、0.6、0.8 Ma 云图; (g)~(i) 海拔为 10 km 时的 0.4、0.6、0.8 Ma 云图; (j)~(l) 海拔为 15 km 时的 0.4、0.6、0.8 Ma 云图; (m)~(o) 海拔为 20 km 时的 0.4、0.6、0.8 Ma 云图

Fig.6 Plane density cloud map of flow field $Y=0$ at different flight speeds and altitudes. (a)–(c) 0.4, 0.6, 0.8 Ma cloud map at 0 altitude; (d)–(f) 0.4, 0.6, 0.8 Ma cloud map at 5 km altitude; (g)–(i) 0.4, 0.6, 0.8 Ma cloud map at 10 km altitude; (j)–(l) 0.4, 0.6, 0.8 Ma cloud map at 15 km altitude; (m)–(o) 0.4, 0.6, 0.8 Ma cloud map at 20 km altitude

图, 在该方向的计算区域中, 光束截面光程差分布不均匀, 从 $0.008 \mu\text{m}$ 增大到 $0.020 \mu\text{m}$ 。

由表 4 可知, 飞行速度越快, 机载激光通信系统受到气动光学效应的影响越大, 随着飞行速度从 0.4 Ma 增加到 0.8 Ma, 海拔为 0、5、10、15、20 km 所对应的斯特列尔比分别从 0.854 下降到 0.739、从 0.896 下降到 0.794、从 0.953 下降到 0.836、从 0.972 下降到 0.887、从 0.985 下降到 0.957, 各海拔下的斯特列尔比均有所

下降; 在飞行速度相同的情况下, 随着海拔的增加, 斯特列尔比均有所上升, 当飞行速度为 0.8 Ma 时, 海拔从 0 增加到 20 km, 斯特列尔比从 0.739 上升到 0.976; 当飞行速度为 0.6 Ma 时, 海拔从 0 增加到 20 km, 斯特列尔比从 0.797 上升到 0.969; 当飞行速度为 0.4 Ma 时, 海拔从 0 增加到 20 km, 斯特列尔比从 0.854 上升到 0.985。可见海拔越高, 通信系统受到气动光学效应影响会减轻。

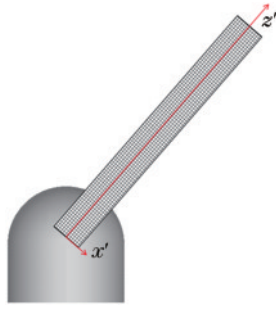


图 7 光学计算区域示意图

Fig. 7 Schematic of optical computing area

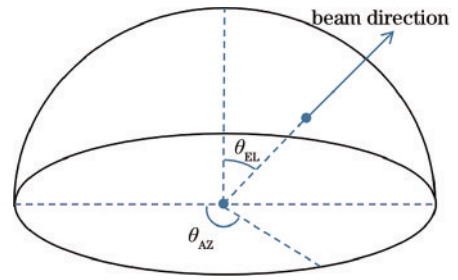


图 8 光束出射方向示意图,其中 θ_{AZ} 为转角, θ_{EL} 为仰角

Fig. 8 Schematic diagram of beam emission direction, where θ_{AZ} is azimuthal angle, θ_{EL} is elevation angle

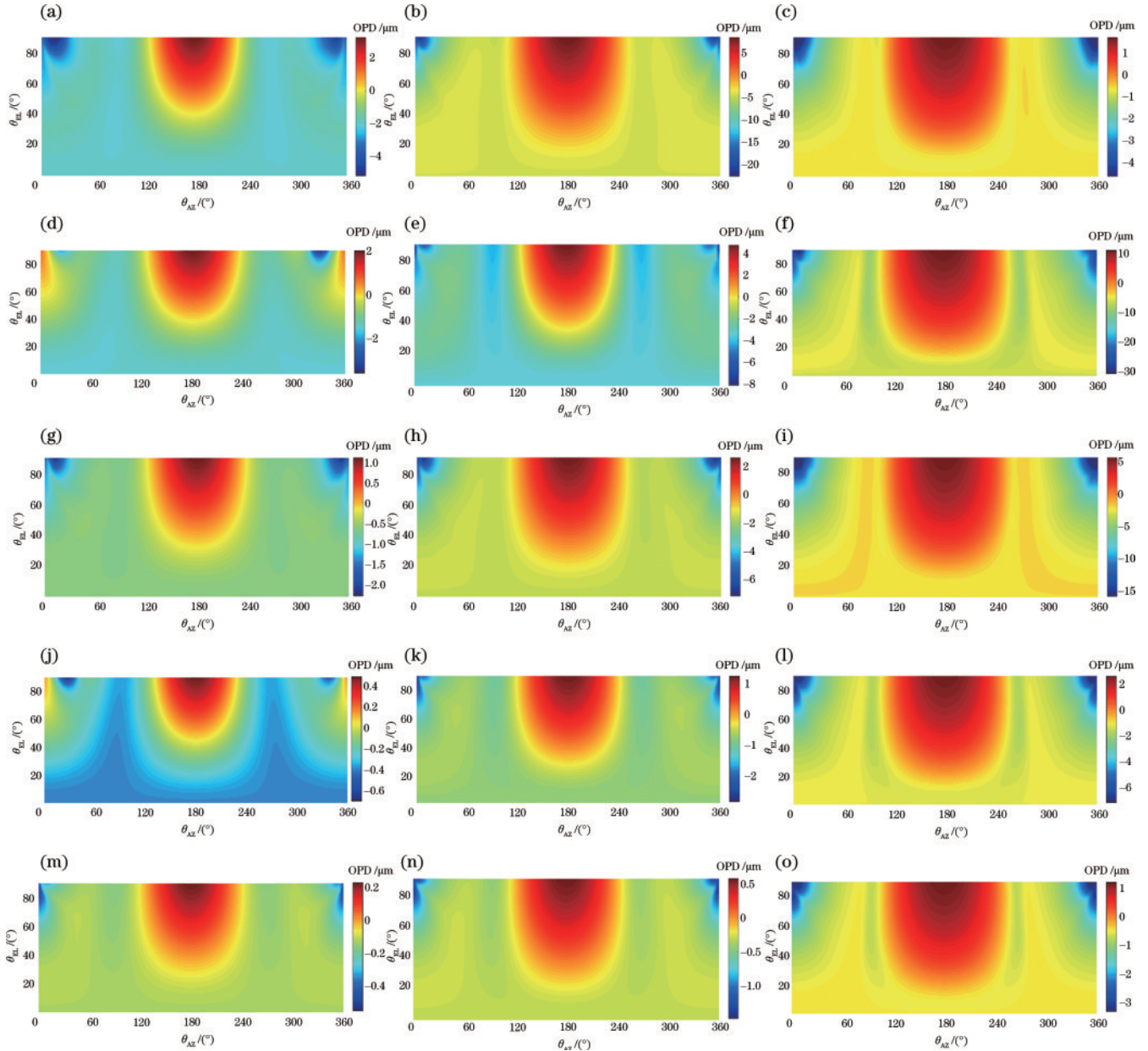


图 9 不同飞行速度和海拔下的光程差分布图。(a)~(c)海拔为 0 时的 0.4、0.6、0.8 Ma 云图；(d)~(f) 海拔为 5 km 时的 0.4、0.6、0.8 Ma 云图；(g)~(i) 海拔为 10 km 时的 0.4、0.6、0.8 Ma 云图；(j)~(l) 海拔为 15 km 时的 0.4、0.6、0.8 Ma 云图；(m)~(o) 海拔为 20 km 时的 0.4、0.6、0.8 Ma 云图

Fig. 9 Distribution of optical path difference at different flight speeds and altitudes. (a)–(c) 0.4, 0.6, 0.8 Ma cloud map at 0 altitude; (d)–(f) 0.4, 0.6, 0.8 Ma cloud map at 5 km altitude; (g)–(i) 0.4, 0.6, 0.8 Ma cloud map at 10 km altitude; (j)–(l) 0.4, 0.6, 0.8 Ma cloud map at 15 km altitude; (m)–(o) 0.4, 0.6, 0.8 Ma cloud map at 20 km altitude

表 3 不同飞行速度和海拔下的最大光程差

Table 3 Maximum optical path difference at different flight speeds and altitudes

Speed /Ma	Maximum optical path difference / μm				
	0	5 km	10 km	15 km	20 km
0.4	2.946	2.058	1.092	0.452	0.232
0.6	7.298	4.594	2.396	1.159	0.553
0.8	13.254	10.196	5.108	2.197	1.132

表 4 不同飞行速度和海拔下的斯特列尔比

Table 4 Strehl ratio at different flight speeds and altitudes

Speed /Ma	Strehl ratio				
	0	5 km	10 km	15 km	20 km
0.4	0.854	0.896	0.953	0.972	0.985
0.6	0.797	0.835	0.893	0.915	0.969
0.8	0.739	0.794	0.836	0.887	0.943

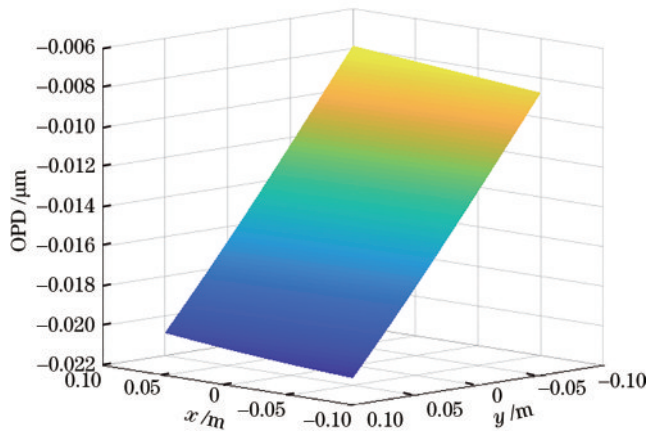


图 10 海拔为 0 且飞行速度为 0.8 Ma 时单光束经过流场后光程差分布图

Fig. 10 Distribution of optical path difference after single beam passes through flow field at altitude of 0 and flight speed of 0.8 Ma

4 结 论

采用大涡模拟方法对机载激光通信系统在不同飞行速度和海拔下的周围流场进行了仿真计算,并对其进行了时域平均,计算得到激光通信系统周围流场的密度分布数据。之后通过求解不同方向上的光线传输方程并对光程进行积分,得到整个半球形视场的光程差分布。在不同的海拔下,随着飞行速度的增加,光程差也随之增大;在相同的海拔下,速度从 0.4 Ma 到 0.8 Ma,光程差增加了将近 5 倍,且光程差较大区域也由 45° 扩大到 70° 。由对比仿真计算的结果可知,对于机载激光通信系统,气动光学影响因素主要为飞行速度和海拔。在相同的海拔下,飞行速度越快,气动流场的变化越剧烈,空气密度变化越明显,从而使得可见光束受到气动光学效应的影响随飞行速度增加而增大;在相同的飞行速度下,随着海拔的增加,气动流场引起的空气密度变化减小,因此激光通信系统受到的气动

光学效应减弱。本文实验结果对于航空平台激光通信及其组网建设,以及气动光学效应对通信质量影响的补偿提供了理论基础和指导依据。

参 考 文 献

- [1] 郑运强, 刘欢, 孟佳成, 等. 空基激光通信研究进展和趋势以及关键技术[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(6): 20210475.
Zheng Y Q, Liu H, Meng J C, et al. Development status, trend and key technologies of air-based laser communication[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(6): 20210475.
- [2] 徐森, 史浩东, 王超, 等. 空间目标多维度探测与激光通信一体化技术研究[J]. 中国激光, 2021, 48(12): 1206002.
Xu M, Shi H D, Wang C, et al. Technology for integrating space object multidimensional detection and laser communication[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(12): 1206002.
- [3] Porter C, Gordeyev S, Zenk M, et al. Flight measurements of aero-optical distortions from a flat-windowed turret on the airborne aero-optics laboratory (AAOL) [C]//Proceedings of the 42nd AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, June 27-30, 2011, Honolulu, Hawaii. Reston: AIAA Press, 2011: 3280.
- [4] Jumper E J, Zenk M, Gordeyev S, et al. Airborne aero-optics laboratory[J]. Optical Engineering, 2013, 52(7): 071408.
- [5] Jumper E J, Gordeyev S, Cavalieri D, et al. Airborne aero-optics laboratory-transonic (AAOL-T) [C]//Proceedings of the 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting, January 5-9, 2015, Kissimmee, Florida. Reston: AIAA Press, 2015: 0675.
- [6] Kalensky M, Gordeyev S, Jumper E J. In-flight studies of aero-optical distortions around AAOL-BC [C]//Proceedings of the AIAA Aviation 2019 Forum, June 17-21, 2019, Dallas, Texas. Reston: AIAA Press, 2019: 3253.
- [7] de Lucca N, Gordeyev S, Jumper E. Comparison of

- aero-optical measurements from the flight test of full and hemispherical turrets on the airborne aero-optics laboratory [C]//43rd AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, June 25-28, 2012, New Orleans, Louisiana. Reston: AIAA Press, 2012: 2985.
- [8] 殷兴良. 气动光学原理[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2003: 1,158-163.
Yin X L. Principles of aero-optics[M]. Beijing: China Aerospace Press, 2003: 1, 158-163.
- [9] Smith A, Gordeyev S, Jumper E. Aperture effects on aero-optical distortions caused by subsonic boundary layers[C]//Proceedings of the 43rd AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, June 25-28, 2012, New Orleans, Louisiana. Reston: AIAA Press, 2012: 2986.
- [10] Morrida J, Gordeyev S, de Lucca N, et al. Shock-related effects on aero-optical environment for hemisphere-on-cylinder turrets at transonic speeds[J]. Applied Optics, 2017, 56(16): 4814-4824.
- [11] Sun X W, Yang X L, Liu W. Validation method of aero-optical effect simulation for supersonic turbulent boundary layer[J]. AIAA Journal, 2021, 59(1): 410-416.
- [12] Xu L, Zhao S W, Xue W, et al. Computation and analysis of aero-optic imaging deviation of a blunt nosed aircraft with Mach number 0.5-3[J]. Optoelectronics Letters, 2023, 19(1): 55-59.
- [13] 蒋倩雯, 辛煜, 张淇博, 等. 拉盖尔-高斯光束在凸台周围的气动光学效应[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(4): 040101.
Jiang Q W, Xin Y, Zhang Q B, et al. Aero-optical effect of Laguerre-Gaussian beams around turret[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(4): 040101.
- [14] 刘涛. 三维元胞自动机光线追迹高超音速气动光学效应仿真[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.
Liu T. Simulation of hypersonic aero optical effects by 3D cellular automata ray tracing[D]. Xi'an: Xidian University, 2021.
- [15] 陈勇, 谢伟明, 路大举, 等. 吊窗尾迹流动非稳态气动光学效应研究[J]. 光学学报, 2020, 40(16): 1601001.
Chen Y, Xie W M, Lu D J, et al. Study on unsteady aero-optical effect of turret wake[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(16): 1601001.
- [16] 李超, 王德恩, 袁强, 等. 高速流场下凸台周围的气动光学效应[J]. 强激光与粒子束, 2022, 34(3): 210319.
Li C, Wang D E, Yuan Q, et al. Aero-optical effect around turrets in high speed regime[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2022, 34(3): 210319.
- [17] 高天元, 胡源, 姜会林, 等. 机载空间激光通信大气附面层影响及补偿技术研究[J]. 兵工学报, 2015, 36(12): 2278-2283.
Gao T Y, Hu Y, Jiang H L, et al. The effect of atmosphere boundary layer on airborne space laser communication and its compensation technology[J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(12): 2278-2283.
- [18] 蒋倩雯. 拉盖尔-高斯光束的气动光学效应[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
Jiang Q W. Aero-optical effect of Laguerre-Gaussian vortex beams[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2018.
- [19] Wang K, Wang M. Aero-optical distortions by subsonic turbulent boundary layers[C]//Proceedings of the 42nd AIAA Plasma dynamics and Lasers Conference, June 27-30, 2011, Honolulu, Hawaii. Reston: AIAA Press, 2011: 3278.
- [20] Tromeur E, Garnier E, Sagaut P, et al. Large eddy simulations of aero-optical effects in a turbulent boundary layer[J]. Journal of Turbulence, 2003, 4: N5.
- [21] Malley M M, Sutton G W, Kincheloe N. Beam-jitter measurements of turbulent aero-optical path differences [J]. Applied Optics, 1992, 31(22): 4440-4443.
- [22] Mahajan V N. Strehl ratio for primary aberrations in terms of their aberration variance[J]. Journal of the Optical Society of America, 1983, 73(6): 860-861.