

高速机动下附面层聚焦效应对机载激光通信性能影响

张曦文, 赵尚弘, 侯睿, 李勇军, 邓博于

(空军工程大学信息与导航学院,西安,710077)

摘要 针对机间光通信中的附面层效应问题,通过对附面层结构的分析,将飞机舱壁外侧附面层视为负透镜,在飞机高速机动和高空大气条件下,对其在机载光通信光束传播中的聚焦效应进行了仿真研究。结果表明:保持飞行高度不变,随着飞行马赫数的增加,附面层的聚焦效应增强。位于海平面高度,马赫数为2以上的飞行平台,附面层焦距和平台曲率半径的比值 $-F/R_s$ 下降到8以下;当海拔升高到10 km和15 km,该比值可分别达到16和25;当 $-F/R_s$ 达到6.3以上,则可满足通信误码率条件。

关键词 附面层;聚焦效应;马赫数;飞行高度;误码率

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2015.02.013

中图分类号 V243;TN24 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2015)02-0057-04

Influence of Focusing Effect of Boundary Layer on the Airborne Laser Communication Performance under the High Speed Maneuvering Condition

ZHANG Xi-wen ,ZHAO Shang-hong ,HOU Rui ,LI Yong-jun ,DENG Bo-yu

(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract:By analyzing the structure of boundary layer, the boundary layer outside the plane bulkhead is viewed as negative lens. The focusing effect of light beam transmission in the airborne laser communication is simulated under the high-speed maneuvering and upper atmosphere conditions. The result shows that there is a direct proportion function between the flight Mach number and the focusing effect under a constant flight altitude. At sea level, for Mach number 2 or more high-speed maneuvering platform, the $-F/R_s$ is lowered to less than 8. At the altitudes of 10km and 15km, the ratios can respectively reach to 16 and 25. When the ratio comes up to more than 6.3, the BER can be satisfied.

Key words: boundary layer; focusing effect; Mach number; flight altitude; BER

随着空间激光通信技术的完善、成熟,以及对大气激光通信的深入研究,使机载激光通信技术应用前景更加明朗^[1]。通过在飞机上搭载激光通信光端机,实现机载激光通信,很好地弥补了无线电通信的缺陷。在机载激光通信系统应用中,气动光学效应

对机载激光通信的质量有重要影响。机载激光通信中气动光学效应主要体现在大气附面层影响和大气信道影响两方面。大气信道影响是指:激光在大气信道中传输时受到的大气吸收,散射和湍流等干扰;附面层效应是指:飞机高速飞行时,高速气流将在搭

收稿日期:2014-06-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61401502)

作者简介:张曦文(1992-),女,陕西西安人,硕士生,主要从事激光空天信息技术研究.E-mail:398709144@qq.com

引用格式:张曦文,赵尚弘,侯睿,等.高速机动下附面层聚焦效应对机载激光通信性能影响[J].空军工程大学学报:自然科学版,2015,16(2):57-60. ZHANG Xiwen ,ZHAO Shanghong ,HOU Rui ,et al. Influence of Focusing Effect of Boundary Layer on the Airborne Laser Communication Performance under the High Speed Maneuvering Condition[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2015, 16(2): 57-60.

载的光端机光学头罩表面形成大气附面层^[2-6]。附面层效应会使光束产生斯托列尔(strehl)^[7]损失、相位畸变、光束偏斜、光束扩散等,导致瞄准误差或测量误差,影响通信质量。

低速机动平台通信过程中,附面层影响微小。但对于高速机动平台而言,附面层效应不可忽略。实际工程中,可以用风洞实验测量飞机舱壁大气附面层的大气参数,进而据此分析气动光学效应。然而风洞试验存在实际限制,而且测量成本高昂,所以需研究更经济有效的大气附面层分析方法。

1 附面层效应的产生

由于大气作用,飞机在高空高速运动的过程中,飞机舱壁外侧附近会形成激波和附面层。只有当飞机加速穿过跨声区进入超声区时,激波才会出现并增强。在一般的飞行过程中,激波的影响可以忽略。飞机光学窗口附近的气体流动产生的附面层为光束发射和接收的主要影响因素。由于飞机表面不是绝对光滑的并且空气具有粘性,所以高速飞行的飞机表面出现了沿物面法线方向流速逐渐增加的薄层空气,形成附面层。附面层的产生使入射或出射光线发生畸变,产生瞄准误差。

影响光束传播的粘性流场分为层流和湍流 2 种状态。当流体以低速流过管道时,流线光滑而清晰,流体处于层流状态;当流速不断增加,到达某一数值后,整个流体开始不规则运动,变为湍流状态。附面层流动和管流一样有层流附面层和湍流附面层之分。用 R_e 进行区分:

$$R_e = 2vR/\mu \tag{1}$$

式中: v 、 R 分别为流体的特征速度和尺度; μ 为运动流体黏滞度,其物理意义是湍流能与耗散能的比值。湍流能与耗散能的比值存在一个临界值 R_{ecr} 。

气流从飞机前缘开始,先形成层流附面层。当雷诺数值超过临界雷诺数 $R_e > R_{ecr}$ 时气流出现湍流,逐渐过渡为湍流附面层。见图 1。

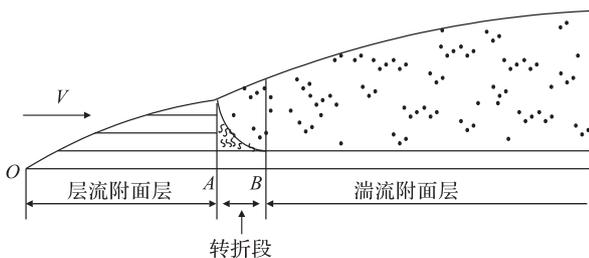


图 1 附面层结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the boundary layer

附面层从飞机头部开始,厚度沿机身向后从 0

变化到几十 mm,随着附面层厚度的增加,对光线影响增大,达到最大值。在平板上的附面层厚度有^[8]:

$$\delta_{层流} = 5 (\mu x/v)^{1/2} \tag{2}$$

$$\delta_{湍流} = 0.37 [x (\mu x/v)^{-1/5}] \tag{3}$$

式中: x 为表面距离。由式(2)、(3)可知机身层流和湍流附面层的厚度分别正比于 $x^{1/2}$ 和 $x^{4/5}$ 。

2 附面层效应对光束传播特性的影响

附面层的流线曲率会引起聚焦效应。将附面层视为一个光学透镜。在平板表面,附面层流线曲率引起的聚焦效应可以忽略,但由于附面层的当地非平行表面引起的角偏折,对于曲面物体及由此形成的曲面附面层产生的聚焦则不可忽略,平行入射光通过附面层发生折射,传播方向发生变化。离开不同介质间圆形弯曲面的成像距离表示为:

$$n_1/S_1 + n_2/S_2 = (n_2 - n_1)/R_s \tag{4}$$

式中: R_s 为曲率半径; S_1 和 S_2 为 2 种介质近似距离; n 为折射率。壁面和附面层外缘的折射率反映了附面层对光源的折射能力。设入射光是平行的,最终点离开附面层距离为有效焦距 F ,见图 2。

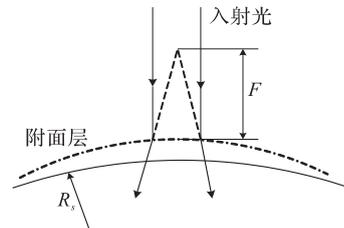


图 2 附面层对入射光的散射作用

Fig.2 Scattering of the boundary layer on the incident

根据折射率的公式,可以得到有效焦距 F 和飞机表面曲率半径 R_s 的关系式:

$$F/R_s = n_w/(n_w - n_\infty) \tag{5}$$

式中: n_∞ 为当地自由折射率,由天气状况,飞行高度等条件确定; n_w 为壁面折射率,和壁面温度有关。空气温度会随海拔高度发生变化,本文研究的是针对飞机的气动光学效应,主要考虑 30 km 以下的大气。下面引进位势高度 H ^[9]:

$$H = r_0 z/(r_0 + z) \tag{6}$$

式中: z 为几何高度; r_0 为 6 356.766 m 地球有效半径。自由气体温度 T_∞ 随高度的变化关系为:

$$T_\infty = T_b + L_b (H - H_b) \tag{7}$$

$b = 0$ 时, $T_b = 288.15$ K 为海平面的标准温度值, $H_b = 0$ 为标准位势高度, $L_b = -6.5$ K/km。

飞机飞行过程中,飞机表面的气体被压缩,此过程被视为绝热,其温度变化关系为:

$$T_w = bT_\infty \left[1 + \alpha \frac{\gamma + 1}{2} M_0^2 \right] \quad (8)$$

式中: T_w 为壁面温度; M_0 为自由气流马赫数; α 为回收参数; γ 为绝热指数, 在大多数气动光学条件下约为 1.4; b 为恒压反射真空气体效应, 马赫数低于 6 时约等于 1, 马赫数超过 8 时为 0.5。

气体状态方程中温度与气体密度成反比:

$$\rho_w / \rho_\infty = T_\infty / T_w \quad (9)$$

由式(8)~(9)可得密度关系式:

$$\rho_w = \rho_\infty \left[1 + \alpha \frac{\gamma - 1}{2} M_0^2 \right]^{-1} \quad (10)$$

式中: ρ_w 为壁面密度; ρ_∞ 为自由气体密度。空气密度变化引起折射率的变化关系式:

$$n = 1 + \rho K_{GD} \quad (11)$$

由式(5)、(10)、(11)可得到终点离开附面层有效焦距 F 和飞机表面曲率半径 R_s 的比值与飞行马赫数的关系式:

$$\frac{F}{R_s} = - \left(\frac{1}{K_{GD} \rho_\infty} \right) [5\gamma^{-1} (M_0)^{-2} + 1] - 5\gamma^{-1} (M_0)^{-2} \quad (12)$$

式中: K_{GD} 为 Gladstone-Dale 参数, 它是气体的一种特性 ($K_{GD} = 0.2191 \text{ cm}^3/\text{g}$)^[8]。式中的负号表明附面层产生负透镜的效果, 使入射平行光发散。 F/R_s 的绝对值越大, 有效焦距越长, 附面层对入射平行光的发散效应越弱。

入射平行光经过附面层到达接收机时光束被发散, 由于接收孔径有限, 不能被完全接收。接收机接收信号时产生误码, 误码率表示为:

$$\text{BER} = \frac{1}{2} [\text{erfc}(Q/\sqrt{2})] \quad (13)$$

式中: 参数 $Q = (I_1 - I_0)/(n_1 + n_0)$, 其中 I_1, I_0 分别表示“1”码和“0”码所对应的平均光强, n_1, n_0 分别表示“1”码和“0”码处噪声引起的光强的均方根。“0”码所对应的平均光强 $I_0 = 0$ 。参数 Q 的值反映噪声一定情况下的接收光强。接收到的光强越弱, 通信误码率越高。

3 大气附面层效应数值分析

3.1 飞行马赫数对附面层效应影响分析

民用飞机多为亚音速或高亚音速, 马赫数在 0.8 以下。先进战斗机速度大约在 2.3~2.5 Ma 左右, XB-70、米格-25 等可达到 3 Ma , 美国的 SR71 黑鸟侦察机甚至可以达到 3.5 Ma 。

由图 3 可知, $-F/R_s$ 的比值随马赫数增大而下降。在马赫数小于 1 时附面层焦距趋于无穷大,

则民用飞机附面层聚焦效应所产生的光学影响可忽略不计。对于马赫数在 2 以上的高速飞行平台, 附面层焦距下降到平台曲率半径的 8 倍以下, 产生明显的光束发散, 接收探测器上的接收功率下降, 通信误码率增大。在马赫数达到 6 以上, 比值趋于稳定, 附面层影响达到极限, 极限值为 $(K_{GD} \rho_\infty)^{-1}$, 此时接收机接收到的光信号非常微弱, 通信误码率极高。

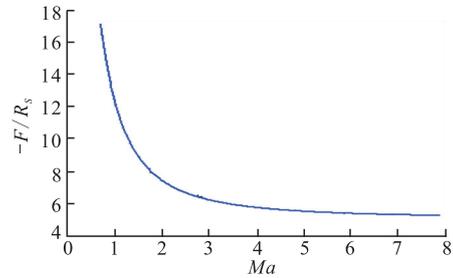


图 3 马赫数与附面层聚焦效应的关系

Fig.3 The relationship between Mach number and focusing effect of boundary layer

3.2 海拔高度对附面层效应影响分析

在相同马赫数的条件下, 随着飞行高度的增加, 大气密度减小, 附面层聚焦效应也会发生相应改变。

图 4 为海平面, 海拔高度为 10 km、20 km 的情况下, 随马赫数增加 $-F/R_s$ 比值的变化的情况。由图可知, 相同马赫数条件下, 随海拔高度的增加, $-F/R_s$ 的比值整体增大, 飞机表面形成的附面层负透镜作用减小, 其对光束的发散减小, 接收光功率增加, 误码率得到有效控制。随马赫数增加, 海拔高度越高曲线斜率变化越显著。对于飞行马赫数在 2 以上的高速飞行平台进行分析, 当海拔高度分别为 0 km, 10 km 和 15 km 时, 附面层焦距最大可以达到平台曲率半径的 8, 16 和 25 倍。在马赫数超过 6 时, 不同海拔高度同时达到附面层影响的极限。

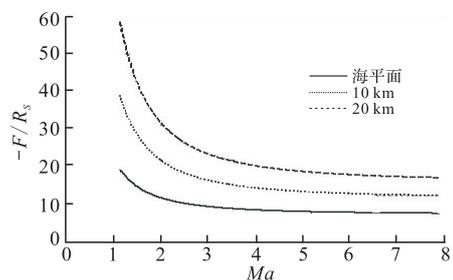


图 4 不同海拔条件下马赫数与附面层聚焦效应的关系

Fig.4 The relationship between Mach number and focusing effect of boundary layer in different altitudes

3.3 附面层效应对误码率影响分析

参数 Q 的值可以反映噪声固定情况下的接收光强。接收光强和附面层对光束的发散作用成反比。通信链路采用波长为 1550 nm 通信光源进行通信。为保障通信质量, 通信误码率要满足 $\text{BER} <$

10^{-12} 的条件。

由图5可知,随 $-F/R_s$ 比值的增加,附面层对光束的发散减弱,到达接收机接收平面的光强增加,通信误码率下降。当附面层产生负透镜的焦距达到飞机表面曲率半径的6.3倍以上,通信误码率可满足 $BER < 10^{-12}$ 的条件。

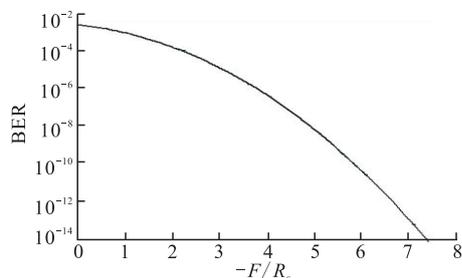


图5 附面层效应与通信误码率的关系

Fig.5 The relationship between Mach number and BER of communication

根据机型结构不同,飞机背部的曲率半径约为头部和尾部曲率半径的10~20倍,在飞行高度马赫数相等条件下,表征平台曲率半径物理量 R_s 直接影响附面层焦距,曲率半径越大附面层对光束发散作用越小;从飞机头部至飞机尾部,附面层厚度不断增加,飞机头部处于产生层流附面层对光束传播影响较小。在实际操作过程中综合考虑这两方面因素,选择光学窗口安装位置,以达到较小附面层对光束发散作用,增加接收光功率,控制误码率的目的。

4 结论

本文在高速机动条件下,通过对飞机表面附面层聚焦效应的分析得出以下结论:光学窗口位置选择影响光束传输,将光学窗口尽可能安装在机体靠前的位置,并安装整流罩,可明显减小附面层影响;附面层产生的光学透镜作用随马赫数变化发生改变,马赫数越大,入射光的发散越明显,通信误码率越大;相同马赫数条件下,增加飞行高度可以减小附面层对光学性能的影响。飞行高度及飞行马赫数仅是影响附面层聚焦效应的两个因素,在实际应用过程中,应将大气的湿度、风向、风力以及飞机螺旋桨产生的气流等对附面层产的影响进行综合考虑。

参考文献(References):

[1] 邓代竹,荣健.大气对近地面无线激光通信链路的影响[J].红外与激光工程,2004,33(3):243-247.
DENG Daizhu, RONG Jian. Atmospheric Effects on the Link near the Earth of Optical Wireless Communication[J]. Infrared and Laser Engineering, 2004, 33(3): 243-247. (in Chinese)

[2] 姜会林,刘志刚,佟首峰,等.机载激光通信环境适应性及关键技术分析[J].红外与激光工程,2007,36(SD):299-302.
JIANG Huilin, LIU Zhigang, TONG Shoufeng, et al. Analysis for the Environmental Adaptation and Key Technologies of Airborne Laser Communication System[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(SD): 299-302. (in Chinese)

[3] ALONSO A, REYES M, SODNIK Z. Performance of Satellite-to-Ground Communication Link between ARTEMIS and the Optical Ground Station[C]//Proceedings of SPIE, Optics in Atmospheric Propagation and Adaptive Systems VII, 2004, 5572: 372-383.

[4] 黄明,夏智勋,王林.临近空间“空-空”激光通信链路传输特性分析[J].红外与激光工程,2009,38(4):660-664.
HUANG Ming, XIA Zhi-xun, WANG Lin. Analysis on “Air-to-air” Link Transmission Characteristic of Laser Communication in Near Space[J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(4): 660-664. (in Chinese)

[5] 韩立强,王祁,信太克归.大气湍流下自由空间光通信中断概率分析[J].红外与激光工程,2010,39(4):660-663.
HAN Liqiang, WANG Qi, SHIDA Katsunori. Outage Probability of Free Space Optical Communication over Atmospheric Turbulence[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(4): 660-663. (in Chinese)

[6] 韩成,杨华民,佟首峰,等.大气附面层对空地激光通信链路影响的研究与仿真[J].红外与激光工程,2006,35:358-362.
HAN Cheng, YANG Huamin, TONG Shoufeng, et al. Study and Simulation of Air Boundary Layer's Influence on Laser Communication Link between Space and Land[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35: 358-362. (in Chinese)

[7] 王英俭,吴毅,龚知本.大气湍流相干长度和Strehl比的统计特征[J].光学学报,1996,16(8):1109-1113.
WANG Yingjian, WU Yi, GONG Zhiben. Atmospheric Turbulence Coherent length and the Statistical characteristics of the Strehl ratio[J]. Acta Optica Sinica, 1996, 16(8): 1109-1113. (in Chinese)

[8] 李桂春.气动光学[M].北京:国防工业出版社,2007:71-73.
LI Chungui. Aero-Optics[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2007: 71-73. (in Chinese)

[9] 殷兴良.气动光学原理[M].北京:中国宇航出版社,2003:147-149.
YIN Xingliang. The Principle of Aero-Optics[M]. Beijing: China Aerospace Press, 2003: 147-149. (in Chinese)

[10] GLANDSTONE J H, JODIE. On the Influence of Temperature on the Refraction of Light[J]. Philtrans, 1958: 148-887.

(编辑:姚树峰)