

# 近海面异常折射对光电探测目标特征的影响分析

李云波<sup>1</sup> 方正<sup>2</sup> 张永刚<sup>1</sup> 王慧丽<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 海军大连舰艇学院军事海洋研究中心, 辽宁 大连 116018

<sup>2</sup> 山东胶南 92771 部队, 山东 青岛 266405

<sup>3</sup> 中国船舶重工集团公司 960 研究所水下测控技术国家级重点实验室, 辽宁 大连 116013

**摘要** 由于可见光和红外等光电设备对近海面(50 m 范围内)的低空目标如海上舰船、掠海导弹和低空飞机进行跟踪探测时,受到大气折射效应影响显著,可导致探测距离的增大或者缩短,尤其是出现的蜃影现象,将增加系统的虚警概率,干扰对目标的跟踪。基于近海面海气通量算法与射线跟踪算法建立海上光电传输特征评估模型,并利用 2009 年 11~12 月在北黄海某海域开展的海上光电探测实验数据,实时评估了特征折射高度,最大探测距离等关键参数,仿真模拟了海上多目标图像,验证了模型的性能。结果表明,基于实时海洋气象环境信息,模型评估最大探测距离准确率较高,并且可以较准确地模拟不同距离上的目标图像。

**关键词** 大气光学;近海面;大气折射;探测距离;蜃影;模拟

**中图分类号** O435.1; P47 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0401001

## Refraction Effects on Electro-Optical Target Characteristic in Near Sea Surface

Li Yunbo<sup>1</sup> Fang Zheng<sup>2</sup> Zhang Yonggang<sup>1</sup> Wang Huili<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Military Oceanography Institute, Dalian Naval Academy, Dalian, Liaoning 116018, China

<sup>2</sup> No. 92771 Army, Qingdao, Shandong 266405, China

<sup>3</sup> National Key Laboratory of Science and Technology on Underwater Test and Control, The 760th Institute of China Shipbuilding Industry Corporation, Dalian, Liaoning 116013, China

**Abstract** When detecting and tracking the low-sky targets (lower than 50 m) such as boats, sea-skimming missile and airplane, visible and infrared electronic optical (EO) systems could be highly affected by atmospheric refraction. The distance from the apparent horizon to an observer can be lengthened or shortened, especially mirage will increase the false alarm odds and the disturbance of detecting and tracking of targets. This paper established optical propagation evaluation model based on air-sea flux algorithm and ray tracing program. Using EO detection trial data in the Northern Yellow Sea, from November to December, 2009, evaluated characteristic refractive heights, the maximum inter-vision ranges (MIVR) as well as some relevant EO propagation parameters, simulated the marine multi-objective image, and has verified the model performance. The model accuracy of MIVR is better, the target image on different distance is simulated accurately.

**Key words** atmospheric optics; near sea surface; atmospheric refraction; mirage; simulation

**OCIS codes** 010.1290; 010.1300; 010.4030; 110.3080

## 1 引言

随着海军作战使命的多样化以及考虑到近海面

低空目标对水面舰艇的巨大威胁,舰载光电装备逐渐被应用于水面舰艇部队,主要用以侦察和探测掠

收稿日期: 2010-08-02; 收到修改稿日期: 2010-12-10

基金项目: 水下测控技术国家级重点实验室拓展提高项目资助课题。

作者简介: 李云波(1981—),男,博士研究生,主要从事海洋大气光学、军事海洋及其对武器装备的影响等方面的研究。

E-mail: plalyb@sohu.com

导师简介: 张永刚(1963—),男,教授,主要从事物理海洋学、军事海洋学和战场环境保障等方面的研究。

E-mail: ygzhang0609@163.com

海低空目标,如小型舰船、掠海导弹和低空飞机等,进而提高水面舰艇的自身防卫能力。由于近海面大气温度和湿度等要素的变化,海上的折射环境随之变化,导致光电系统时常遇到“超折射”或“欠折射”现象,使探测距离明显大于或小于正常视距。当遇到欠折射环境时,会使低空目标出现蜃影,这在很大程度上影响了目标的识别跟踪<sup>[1]</sup>。由于国外海军光电武器装备使用比我国早,因此在 20 世纪 70 年代就有关这方面的研究<sup>[2]</sup>,2000 年以来海上实验研究更加频繁,例如 2007 年蓝宝石(SAPPHIRE)实验<sup>[3]</sup>、2005 年 PROTROW 实验<sup>[4]</sup>等,我国在这方面的研究起步较晚,相关研究单位较少,而对光学湍流和气溶胶方面的研究较多<sup>[5,6]</sup>。鉴于此,本文基于近海面海气通量算法与射线跟踪算法建立海上光电传输特征评估模型,实时评估特征折射高度,最大探测距离等关键参数,并实现海上多目标图像仿真,通过 2009 年 12 月在我国北黄海某海域开展的海上光电性能实验进一步验证模型的性能。

## 2 光线传播轨迹数值计算方法

光线传播路径的描述是掌握整个光路上折射环境的关键。充分考虑光线传播所在的海洋边界层折射率梯度的变化,利用斯涅耳(Snell)法则,计算各层内光线弯曲程度即光线的曲率,基于抛物线近似理论,通过积分得到整个路径上的传播情况。

假定有一束光线穿过分层大气,当光线穿过高度为  $h_{i-1}$  和  $h_i$  的分层大气时,如图 1 所示,由于上下两层折射率的不同,光线将发生折射,光路弯曲。根据 Snell 法则,可知  $n \cos \beta = C$ ,其中  $\beta$  是光线与分界

线的夹角, $C$  为常数, $n$  为大气折射指数。图中 1 直角坐标系  $xoz$  中,光线的曲率  $\kappa$  可以表示为

$$\kappa = -\frac{\cos \beta}{n} \frac{dn}{dz}, \quad (1)$$

光线轨迹在直角坐标系下可以利用抛物线近似描述在每一层中的光线传播<sup>[7]</sup>,层高为  $z_i$  的大气层界面的函数表达式可写为: $z = z_i - \frac{x^2}{2R}$ , $R$  为地球半径,取值为 6378.14 km。

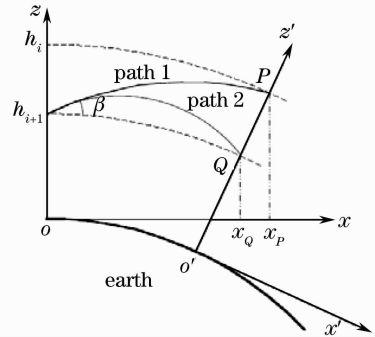


图 1 直角坐标下的光线传播图

Fig. 1 Sketch of light propagation in rectangular coordinate

对于初始点  $(x, z_r)$  以角度  $\beta$  进入的光线的抛物线路径函数为

$$z = z_r + x \tan \beta - \frac{x^2}{2k \cos^3 \beta}, \quad (2)$$

式中  $k$  为光线弧的曲率半径,取值为  $1/\kappa$ 。光线在每一层中传播主要有 4 种可能:1)  $\beta > 0$ , 光线向上传播进入下一层,如 path 1; 2)  $\beta > 0$ , 光线在本层发生回转,如 path 2; 3)  $\beta < 0$ , 光线向下传播进入下一层; 4)  $\beta < 0$ , 光线在本层发生回转。其轨迹的数学表达式分别为

$$\begin{cases} x_P = \frac{Rk_i}{k_i - R} \left\{ -\tan \beta \pm \left[ \tan^2 \beta + \frac{2(h_i - h_{i-1})(k_i - R)}{k_i R} \right]^{1/2} \right\} & 1) \text{ when } \pm \text{ is } +; \quad 3) \text{ when } \pm \text{ is } - \\ x_Q = \frac{2Rk_i \tan \beta}{R - k_i} & 2); \quad 4) \end{cases} \quad (3)$$

式中  $k_i$  表示第  $i$  层中光线的曲率半径,每当光线与分层发生交叉,进入到下一层时,坐标系  $xoz$  重新建立为  $x'o'z'$ ,然后在  $x'o'z'$  平面内重复上述的计算,依次进行直到设定的距离上限。

## 3 近海面环境要素廓线的确定

利用文献[8]的海气通量 Bulk 算法处理,只须已知某一高度上的温度和湿度值,确定温度和比湿

的特征尺度  $\theta_*$ ,  $q_*$ , 则整个高度层内的温度、比湿和气压的垂直分布廓线为

$$T(z) = T_s + \frac{\theta_*}{\kappa} [\ln(z/z_{ot}) - \phi_t(z/L)] - 0.0098z, \quad (4)$$

$$q(z) = q_s + \frac{q_*}{\kappa} [\ln(z/z_{oq}) - \phi_q(z/L)], \quad (5)$$

$$P(z_2) = P(z_1) \exp \left[ \frac{g(z_1 - z_2)}{R_{\text{air}} T_v} \right], \quad (6)$$

式中  $T_s, q_s$  为海表水温与比湿;  $z$  为高度;  $z_{ot}, z_{oq}$  为粗糙度长度;  $P$  为大气压;  $g$  为重力加速度;  $R_{air}$  为干空气气体常数[287.1 J/(kg·K)],  $\bar{T}_v$  为  $z_1$  和  $z_2$  两个高度处的平均虚温;  $L$  为稳定度长度,  $\psi_t$  与  $\psi_q$  为普适函数, 具体形式参考文献[8]。

光波段的大气折射指数  $n_{IR}$  采用 Hill 等<sup>[9]</sup> 提出的函数形式:

$$n_{IR} = 1 + 10^{-6} \times \frac{1}{T} [A(P - e) + Be], \quad (7)$$

式中  $e$  为水汽压; 这里气温  $T$  的单位为  $K$ 。  $A$  和  $B$  是关于波长的函数形式, 具体可参考文献[10]。根据(4)~(7)式, 可以确定大气折射指数廓线和  $dn/dz$ , 进而通过(1)式确定光线的曲率。

## 4 关键环境影响参数的确定

### 4.1 特征折射高度

对于超折射和欠折射环境, 一般采用波导高度和欠折射高度作为折射环境的表征量, 其大小反映出折射环境的强度。将两者统称为特征折射高度  $H_c$ , 区别在于其符号的正负。当海气温差为负值 ( $D_{AST} < 0$ ) 时, 近似认为不稳定状态, 易形成出现欠折射, 此时海面上具有较高的  $dN/dz$ , 并随高度递减, 当  $dN/dz = 0$  时所对应的特征高度  $H_c < 0$ ; 当海气温差大于零 ( $D_{AST} > 0$ ) 时, 可认为稳定状态, 折射率梯度  $dN/dz$  并随高度增大,  $N$  随高度递减, 出现超折射或者波导现象, 一般将  $dN/dz = -0.157$  或  $dM/dz = 0$  所对应的特征高度  $H_c > 0$ , 如图2所示。其中大气折射率为  $N$ , 大气修正折射率为  $M$ , 与

折射指数  $n$  的关系为  $N = (n - 1) \times 10^6$ ,  $M = N + 0.157z$ 。

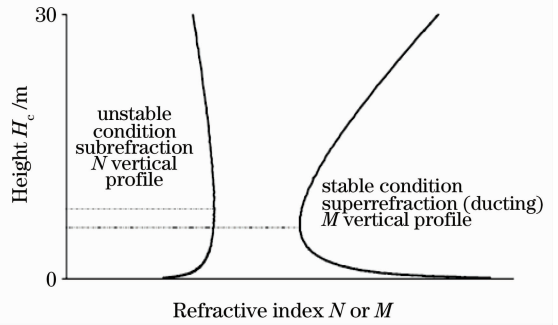


图2 欠折射和超折射环境下的折射率廓线与特征折射高度

Fig. 2 Refractivity profiles and the characteristic refractive height under subrefraction and super refraction environment

### 4.2 欠折射环境下最大探测距离

当海上出现欠折射时, 光线向上弯曲, 视距较正常视距明显缩短, 如图3(a)所示, 此时最大的探测距离(MIVR)<sup>[11]</sup>, 主要受观察高度、目标高度、海气温差和风速的影响, 利用光线传输路径图可以提取MIVR。从图3(b)中可见MIVR廓线即为光束的包络线, 不同高度对应的MIVR值即为此高度上的最大探测距离, 图3(b)中的虚线表示几何视距(GHR)  $R_{GH}$ , 即不考虑折射效应的最大探测距离, 其计算公式为<sup>[12]</sup>

$$R_{GH} = \sqrt{2R}(\sqrt{h_s} + \sqrt{h_t}), \quad (8)$$

式中  $h_s$  和  $h_t$  分别代表观测高度和目标高度。

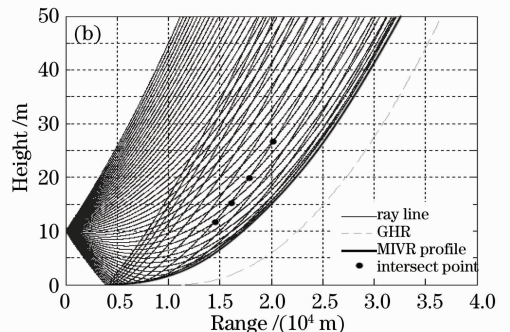
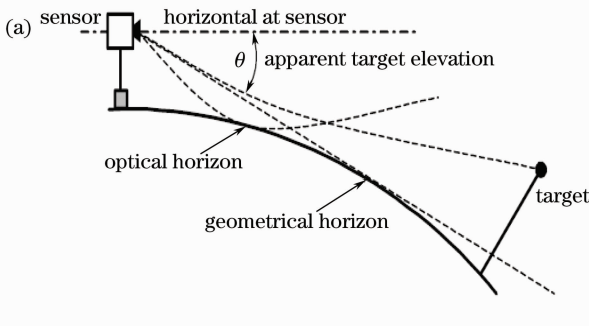


图3 欠折射环境下的典型光路。(a)示意图,(b)模拟结果图

Fig. 3 Typical ray tracing under subrefractive conditions. (a) sketch map, (b) simulation result

### 4.3 蜃影的仿真模拟

如图3(b)所示, 由于折射效应的影响在光线路径图上存在一个扇形的交叉网状区域, 区域中每一个交叉点代表在两个不同的抬升角度上看到真实目标的同一个部分, 因此在成像面上会出现两个目标

物。借助真实视角与视在视角的对应关系可以更加直接地反映蜃影的成因。图4(a)是图3(b)的变换曲线图, 表示观测者在10 m度处所看到  $-10^\circ \sim 10^\circ$  范围内的真实视角和视在视角的对应关系, 由图4(a)可见  $-4' \sim 4'$  的任一真实视角存在着两个视在视角

与之对应,即出现蜃影。Lehn 等<sup>[13]</sup>提出了一种模拟蜃影的方法,只需要光路图确定的变换曲线和原始未受到折射影响的目标图像就可以实现图像模拟。首先将原始图像尺度化,计算每一个像素所代表的实际高度,使每一条光线对应原始图像上的每

一行像素,基于变换曲线将原始图像上每一行像素信息投影到蜃影图像上,当真实视角与视在视角不是一一对应时,将在蜃影图像两个不同位置上出现原始图像同一部位,当所有光线投射完成时,蜃影图像形成,如图 4(b)所示为蜃影的模拟示意图。

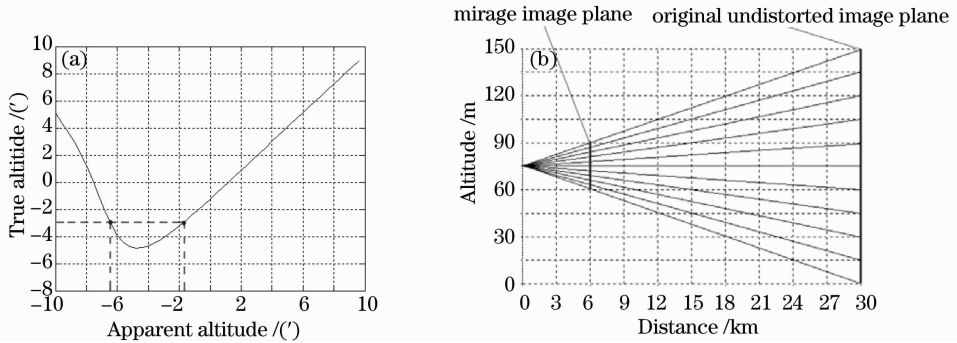


图 4 (a)图 3(b)的变换曲线图,(b)蜃影模拟的示意图

Fig. 4 (a) Transfer curve of Fig. 3(b), (b) simple mirage simulation

## 5 实验分析

### 5.1 实验介绍

2009 年 11,12 月在黄海北部某海域进行了海上实验,码头伸出海岸 80 m,东南~西南(100°~245°)方向为开阔海面,码头距水面高度约为 5 m。自动气象观测站使用了 R. M. Young 公司生产的 81000 三维超声风速仪,Young 41372 温湿传感器, Everest 红外水温传感器(4000. 3ZL)和气压传感器,观测支架架设于码头前沿,高度为 4.8 m,水平距海岸 6.8 m,实时记录大气温度、湿度、风速风向、海表水温和气压数据。

光电探测设备使用了 FLIR 公司的远红外热像仪(参数如表 1 所示)获取远红外波段目标探测特征,距海面 7 m;使用 Cannon EOS 5D Mark II 相机采集可见光波段的海上目标图像,距海面 7 m;使

表 1 FLIR 远红外热像仪 SC3000 主要参数

Table 1 Main parameter of FLIR

ThermaCAM (SC3000)

Field of view	20°×15°
Spatial resolution (instantaneous field of view)	1.1 mrad
Image frequency	50/60 Hz
Detector	GaAs, Quantum well infrared planar
Number of elements	320 pixel×240 pixel
Spectral band	8~9 μm
Lenses field of view/minimum focus distance	2.5°×1.88°/45 m

用博冠 BOMA 天文望远镜(马卡 150/1800)耦合 Sony XC75 CCD 摄像头,实时高频记录目标图像信息,距海面 8 m,采样率 30 Hz;军民导航雷达常用波段岸基导航雷达架设高度距水面约为 20 m,配合实验进行目标的跟踪与测距。被测目标主要为该海域固定航线上的客船等移动目标以及岛屿等固定固定目标。

### 5.2 实验验证与分析

2009 年 12 月 15 日,天气晴朗,能见度远于 10 km,气温为-5 °C~0 °C明显低于海面水温 2 °C~5 °C,北风,6~7 级,相对湿度小,不足 50%,全天出现明显的欠折射现象。上午 10:40~11:00 跟踪观测海上客船,此时气温约为-1.6 °C,海表温度为 4.9 °C,海气温差  $\Delta T = -6.5$  °C,气压 1034.9 kPa。FLIR 记录客船关键时刻的红外图像,如图 5 所示。图中亮点对应客船的烟囱,烟囱实际所在高度 23.5 m,当距离 13.2 km 时,烟囱即将进入蜃影区;距离 16 km 时客船已经进入蜃影区,监测图像中出现 2 个亮点,其中下方的为欠折射导致烟囱出现的蜃影;距离 17.5 km 时两个“烟囱”逐渐接近;距离 19.5 km 时客船即将离开蜃影区逐渐消失,至 20 km 处消失,达到红外最大探测距离。湿度 36.3%,风速 13.0 m/s,模型评估温度、湿度以及  $N$  廓线如图 6(a)所示,特征折射高度为-12.1 m。

图 6(b)是通过光线传播轨迹数学模型计算的最大探测距离 MIVR 以及蜃影存在的区域,图中最右边的三角线是此时的几何视距,虚线的 4 个交叉点对应图 6 中的 4 个图像序列,则模型计算出现蜃影的最小

距离和MIVR分别为12.8 km和19.7 km,比实测的13.2 km和20 km偏低,MIVR差值为0.3 km,误差约为1.5%。

图7是根据当时环境模拟的图5的结果,其中图7(a)是通过光路图得到的变换曲线,图7(b)是假设的客船原始图像,船尾部的黑色梯形即为客船的烟囱,高23.5 m。图(c)~(e)分别对应14.5、17.5

和19.2 km的模拟生成的目标图像。图7(c)为距离14.5 km时客船进入蜃影区,在烟囱的下方出现了被压小的倒立的烟囱图像,当到达17.5 km时,仿真的客船图像的船身已经消失,烟囱的上半部还可以看到蜃影,直到19.2 km,烟囱仅仅剩下顶端的一点,整个仿真过程与实际图5的观测过程十分吻合,反映出图像模拟方法的有效性。

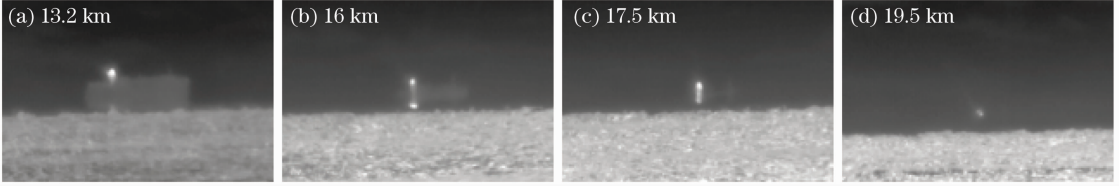


图5 10:40~11:00 远红外热像仪记录的目标图像序列

Fig. 5 Target image series were recorded by the FLIR sensor from 10:40 to 11:00

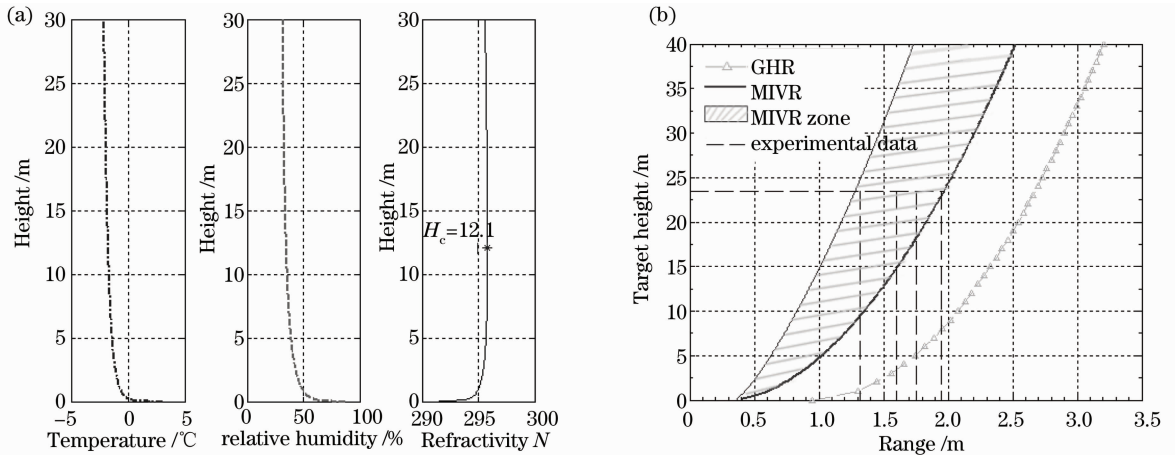


图6 图5观测过程模型的计算结果。(a)环境要素廓线,(b)MIVR计算结果

Fig. 6 Calculated results of observation process model in Fig. 5. (a) environmental factors profile, (b) calculated result of MIVR

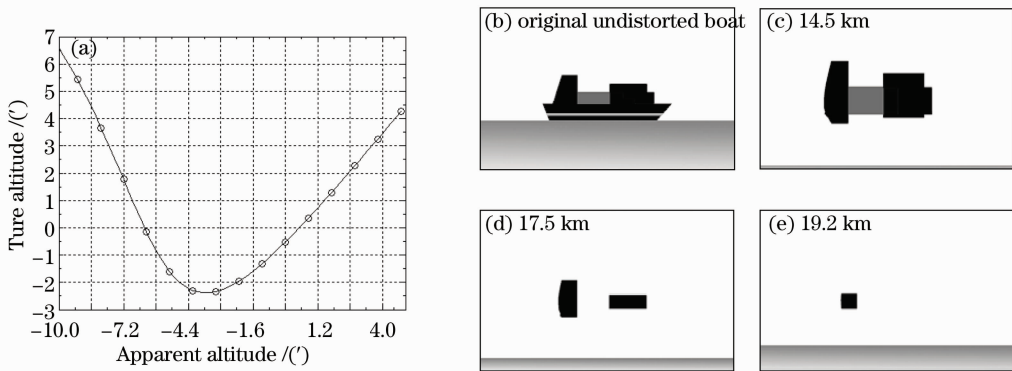


图7 图5的变换曲线和模拟图像

Fig. 7 Transfer curve of Fig. 5 and the simulation image

## 6 结 论

应用几何光学和抛物线近似方法建立光线轨迹数学模型,并基于海气通量算法与相似理论确定近

海面气象要素廓线和折射率垂直廓线,得到海上光线传播路径图,进而确定最大探测距离、蜃影区和变换曲线,并实现目标图像的模拟。最后,通过海上实

验的对比验证表明:模型评估欠折射环境下的最大探测距离准确率较高,并且可以较准确地模拟不同距离上的蜃影图像。

## 参 考 文 献

- 1 G. J. Kunz, M. M. Moerman, A. M. J. van Eijk. EOSTAR—an electro-optical sensor performance model for predicting atmospheric refraction, turbulence, and transmission in the marine surface layer[C]. *SPIE*, 2004, **5237**A717582: 81~93
- 2 R. Feinberg, H. V. Hitney, H. G. Hughes. Marine boundary layer refractive effects in the infrared [R]. Storming Media, 1994: A717582
- 3 De Jong, A. , Fritz, P. Refraction measurements and modelling over the Chesapeake Bay during the NATO (TG-51)SAPPHIRE trials[C]. *SPIE*, 2007, **6747**: 1~12
- 4 K. Stein, D. Seiffer, K. Weiss-Wrana. Results of the EO measurements during the experiment PROTROW [R]. FGAN-FOM report, 2007
- 5 Zhang Jianqi, Fang Xiaoping. Infrared Physics [M]. Xi'an: University of Electronic Science and Technology Press, 2004  
张建奇, 方小平. 红外物理[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2004
- 6 Rao Ruizhong. Optic Propagation in the Turbulence Atmosphere [M]. Anhui:Anhui Science and Technology Press, 2005  
饶瑞中. 光在湍流大气中的传输[M]. 安徽:安徽科技出版社, 2005
- 7 W. H. Lehn. A simple parabolic model for the optics of the atmospheric surface layer[J]. *Appl. Math. Model*, 1985, **9**(6): 447~453
- 8 Li Yunbo, Zhang Yonggang, Tang Haichun *et al.*. Oceanic evaporation duct diagnosis model based air-sea flux algorithm[J]. *J. Applied Meteorological Science*, 2009, **20**(5): 628~633  
李云波, 张永刚, 唐海川等. 基于海气通算法的海上蒸发波导诊断模型[J]. *应用气象*, 2009, **20**(5): 628~633
- 9 R. J. Hill, R. S. Lawrence. Refractive index of water vapor in infrared windows[J]. *Infrared Physics*, 1986, **26**(6): 371~376
- 10 Li Yunbo, Zhang Yonggang, Hang Xiaomao. Difference between the refraction character of infrared and microwave under marine abnormal environment[J]. *J. Microwaves*, 2009, **25**(5): 24~28  
李云波, 张永刚, 黄小毛. 异常海洋大气条件下红外与微波折射特征差异研究[J]. *微波学报*, 2009, **25**(5): 24~28
- 11 D. Dion Jr. , J. L. forand, L. Gardenal *et al.*. Calculation and simulation of atmospheric refraction effects in maritime environments[C]. *SPIE*, 2001, **4167**: 1~9
- 12 D. Dion. Refraction effects on EO system detection ranges in coastal environment[R]. AGARD, 1995: N96-14391
- 13 W. H. Lehn, W. Friesen. Simulation of mirages[J]. *Appl. Opt.* , 1992, **31**(9): 1267~1273