

近海面折射效应对红外探测距离的影响

李云波^{1,2}, 张永刚², 王慧丽³, 齐 异³

(1. 海军水文气象中心,北京 100073; 2. 海军大连舰艇学院 军事海洋研究中心,辽宁 大连 116018;

3. 水下测控技术国家重点实验室,辽宁 大连 116013)

摘要:基于近海面海气通量算法与抛物线近似方法建立光线传播轨迹数学模型,评估最大探测距离(MIVR),阐释蜃影出现的机制.通过数值分析以及海上对比试验验证,在相同的风速条件下,MIVR会随海气温差(ΔT)的减小而减小;当海气温差 ΔT 不变时,随着风速的增大,MIVR逐渐减小; ΔT 越小,MIVR的递减量越趋于平缓;MIVR与高度位置的对应关系几乎是一条标准的斜线,且MIVR随着高度参数的减小而递减;通过实际海上试验验证,模型评估MIVR的准确率较高.

关键词:近海面;红外;负折射;探测距离;蜃影

中图分类号:TN219 **文献标识码:**A

Refraction effects on detection range of infrared system in near sea surface

LI Yun-Bo^{1,2}, ZHANG Yong-Gang², WANG Hui-Li³, Qi Yi³

(1. The Navy Hydro-Meteorological Center of P. L. A., Beijing 100073, China;

2. Military Oceanography Institute, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China;

3. National Key Laboratory of Science and Technology on Underwater Test and Control, Dalian 116013, China)

Abstract: Based on air-sea flux algorithm and parabolic approximation method, mathematical model for the optical propagation tracing was established. Maximum Inter-Visvion Ranges(MIVR) was evaluated, and the root cause of Mirage was analyzed. Numerical analysis and sea experimental results showed that MIVR decreases with the reduction of the temperature difference (ΔT) between the air and sea when wind speed is kept constant. Under the invariant ΔT , MIVR decreases with the increase of wind speed. The decrement of MIVR decreases with ΔT decreasing. The values of MIVR decrease linearly with the height of the sensor-target. The experiment proved that evaluation of MIVR with the model has high accuracy.

Key words: near sea surface; infrared; subrefraction; detection range; mirage

PACS: 42.15. -i, 42.68. -w

引言

随着可见光、红外等成像技术的快速发展,越来越多的光电装备应用到海军水面部队,用以探测跟踪近海低空目标,提高舰船的近程防卫能力.实际应用中,这些装备性能的好坏已不再受系统本身技术的制约,而是受所处海洋环境的影响^[1].除了大气的吸收、散射以及大气湍流效应^[2]外,影响作用较大的是大气折射现象,特别是负折射^[3],它与负折射率材料^[4]不同,它会使大气中传播的电磁波向背离地球表面的方向弯曲,使视距较正常视距明显缩

短,而且伴随出现蜃影^[5],产生多目标干扰,影响目标的识别、跟踪.负折射是海上常见的自然现象,在我国黄渤海海域入冬季节,它的出现概率约在88%左右^[6],全球海域的发生概率高达89%以上^[7].因此,国外在70年代就开展了海洋环境对光电设备探测性能的影响研究,近几年的海上试验更加频繁,例如2007年SAPPHIRE试验^[8]、2005年PROTROW试验^[9]等,而国内对大气光学折射效应的相关研究很少.

准确掌握光电探测距离对于海上军事活动尤为重要,直接测量光电探测距离在时间和空间上十分

收稿日期:2010-08-12,修回日期:2011-04-11

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

作者简介:李云波(1981-),男,河北邯郸人,博士,主要从事海洋大气光学、军事海洋及其对武器装备的影响研究,E-mail: plalyb@sohu.com.

Received date: 2010-08-12, revised date: 2011-04-11

有限,在实际中更不现实.因此,需要依赖数学模型对探测距离进行评估,但传统的评估方法^[10]很少考虑海上大气折射的影响.目前,基于通量算法和光线跟踪技术^[11],利用常规的水文气象数据计算探测距离是较为有效的手段.但通量算法还存在一些不足,主要是经验关系函数多,诊断精度难以保障.例如,Monin-Obukhov 相似理论作为通量计算的基础,其经验关系函数多源于陆地试验,对于下垫面是海洋的试验研究较少;近岸低风速条件下相似理论的适用性问题.此外,国外的数学模型仅适用于各自海域的环境,海上试验也主要是在各自海域进行,Kunz 等人^[1]指出模型计算结果受制于对实际海上气象环境掌握的准确程度,而国内对理论模型和海上试验的研究都很少.

旨在利用海上监测的水文气象要素数据,基于改进的海气通量算法确定气象要素垂直廓线,进而利用抛物线近似的光线跟踪算法计算光电系统最大探测距离,通过模型的数值分析,阐述了海气温差、风速等环境要素,探测位置对最大探测距离的影响,并通过黄海北部海域开展的海上光电性能试验进一步验证了模型的有效性.

1 最大探测距离计算模型

最大探测距离计算模型首先要获取近海面海气通量垂直分布特征,然后计算光线传播轨迹,最终得到最大探测距离.

1.1 近海面海气通量算法

近海面层较整个对流层很薄,通常认为是常通量层,因此基于 Monin-Obukhov 相似理论与大洋试验中的 Bulk 算法^[12],利用某一高度上的风速、温度、湿度以及海表水温数据,就可得到整个空间上的温度垂直分布廓线,进而确定温度梯度 dT/dz .

$$T(z) = T_s + \frac{\theta_*}{k} \left[\ln(z/z_{0t}) - \psi_t \left(\frac{z}{L} \right) \right] - 0.0098z \quad (1)$$

$$L = \frac{\theta_* U^2 [\ln(z/z_{0t}) - \psi_t(z/L)]}{g(\Delta T + 0.61T\Delta q) [\ln(z/z_{0U}) - \psi_u(z/L)]^2} \quad (2)$$

其中, θ_* 为温度的特征尺度;常数 $k = 0.4$; z 为垂直高度,单位为 m; $T(z)$ 为 z 高度处的气温, T_s 为海表皮温度,单位为 $^{\circ}\text{C}$; z_{0t} 、 z_{0U} 为粗糙度长度. L 为稳定度长度; θ_* 为虚位温; U 为平均风速; ΔT 为海气温差; Δq 为比湿差; g 为重力加速度,取 9.8 ; 普适函数 ψ_u 、 ψ_t 是稳定度参数 z/L 的函数.

稳定层结 ($z/L \geq 0$) 条件下,普适函数取为

$$\begin{cases} \psi_u = -[(1+z/L) + 2/3(z/L - 14.28)/\exp(c) + 8.525] \\ \psi_t = -[(1+2/3 * z/L)^{1.5} + 2/3(z/L - 14.28)/\exp(c) + 8.525] \end{cases} \quad (3)$$

其中 $c = \min(50, 0.35z/L)$. 不稳定层结 ($z/L \leq 0$) 条件下,考虑到海上自由对流情况,引入修正项 ψ_c , ψ_c 与 ψ_{tk} 的具体形式可见文献^[12],普适函数表示为:

$$\begin{cases} \psi_u = 2\ln[(X+1)/2] + \ln[(X^2+1)/2] - 2\arctan(X) + \pi/2 \\ \psi_t = (1-f)\psi_{tk} + f\psi_c \end{cases} \quad (4)$$

其中 $X = (1 - 15z/L)^{1/4}$, $f = (z/L)^2/[1 + (z/L)^2]$.

由于近海岸地区,即使水平平均风矢的模为零,垂直对流活动也能引起水平运动.因此,引入阵性风速项 w_g ^[13],修正了新的地面风速 $U = \sqrt{u_x^2 + u_y^2 + w_g^2}$,使经典的相似理论在甚低风速下依然适用.

$$\begin{aligned} w_g &= \beta w_* = \beta (F_b z_i)^{1/3}, \\ F_b &= - \left(\frac{g}{T} \right) \overline{w'T'_v} \quad (5) \end{aligned}$$

其中 w_* 是自由对流速度特征尺度, β 为经验常数,取 1.25 . F_b 为浮力通量项,代表湍流的波动性. z_i 为对流层高度,这里取 600 m .

1.2 抛物线近似光线跟踪算法

对于光波波段,大气折射指数 n 可以表示为^[14]

$$n = 1 + \alpha(\lambda)P/T \quad (6)$$

其中, $\alpha(\lambda) = (77.6 + 0.584\lambda^{-2}) \times 10^{-6}$, λ 为波长,单位 μm ; P 是大气压,单位为 hPa ; T 是气温,单位取 K ; 折射指数梯度可表示为:

$$\frac{dn}{dz} = \frac{\alpha(\lambda)}{T^2} \left(T \frac{dP}{dz} - P \frac{dT}{dz} \right) \quad (7)$$

根据流体静力学平衡以及气体状态方程可以得到

$$\frac{dP}{dz} = -g\varepsilon \frac{P}{T}; \quad \varepsilon = 3.485 \times 10^{-3} \quad (8)$$

将式(8)代入式(7)则有

$$\frac{dn}{dz} = - \frac{\alpha(\lambda)P}{T^2} \left(g\varepsilon + \frac{dT}{dz} \right) \quad (9)$$

假定有一束光线穿过海上分层大气,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 β 是光线与分界线的夹角, C 为常数.直角坐标下的光线传播图如图 1 所示,直角坐标系 XOZ 中,该束光线的曲率 κ 可以表示为:

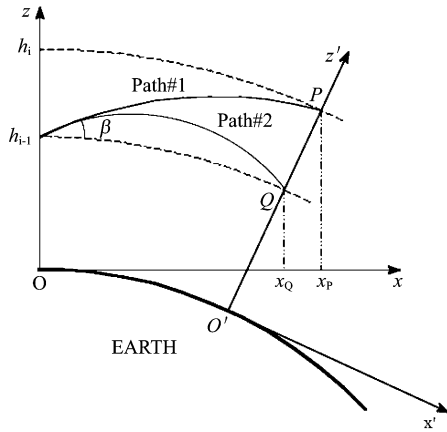


图1 直角坐标下的光线传播图
Fig. 1 Refraction geometry for a spherically symmetric atmosphere in right-angle coordinate

$$\kappa = -\frac{\cos\beta}{n} \frac{dn}{dz} \quad (10)$$

由式(9)可知,折射指数梯度主要受温度梯度的影响,当海气温差 $\Delta T = dT = T - T_s < 0$,其垂直梯度 $dT/dz < 0$,由于近海面层温度梯度的量值较大,导致 $dn/dz > 0$. 据式(10)可得,此时曲率 $\kappa < 0$,光线向上弯曲,背离地球表面上传播,即为负折射.

根据式(1)温度垂直廓线确定海面上的大气垂直分层结构,利用抛物线近似^[15]描述从点 (x, z_r) 进入的一束光线可以写成抛物线函数的形式

$$z = z_r + x \tan\beta - \frac{x^2}{2r \cos^3\beta} \quad (11)$$

其中 z 为光线高度, x 为水平传播距离,单位均为 m, r 为光线弧的曲率半径等于 $1/\kappa$. 光线在每一分层中的轨迹主要有 $\beta > 0$, 光线向上传播进入下一层,如 Path#1; $\beta > 0$, 光线在本层发生回转,如 Path#2; $\beta < 0$, 光线向下传播进入下一层; $\beta < 0$, 光线在本层发生回转这四种可能. 每当光线进入到下一层时,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,逐次进行,直到设定的距离上限,最终可以获得整个空间内的光线路径图,如图 2 所示.

1.3 最大探测距离的确定

由图 2 可见,海上出现负折射环境时,光线向上弯曲,视距较几何视距(Geometrical Horizon Range, GHR)明显缩短,此时最大的探测距离(Maximum Inter-Vision Ranges, MIVR)^[16],即为视场内所有光路的外包络线. 通过在光线束垂直断面上自下而上追踪水平距离的最小值,从而确定整个高度上的 MIVR 廓线,见图 2 中的粗实线. 廓线上不同高度对

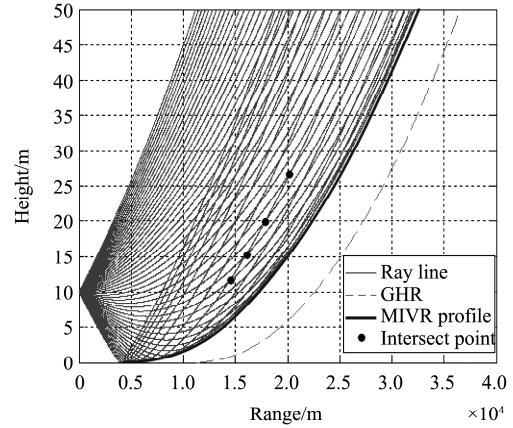


图2 模型计算的负折射环境下的光线路径图
Fig. 2 The typical ray trace under sub-refractive conditions calculated with the model

应的水平距离值即为此高度上的最大探测距离. 此外,图中还可见光线的交叉网状区域,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,在成像面上会出现两个目标物,因此产生多目标蜃影现象.

2 数值分析

2.1 海气温差与风速对最大探测距离的影响

最大探测距离 MIVR 主要受海气温差、风速、观察高度、目标高度等因素的影响. 假设探测器所在高度为 10 m,海上目标高度也为 10 m,海气温差在 $-5 \sim 0^\circ\text{C}$ 区间变化,风速分别取 2 m/s、4 m/s、8 m/s、12 m/s,计算 MIVR 的变化情况,为了便于比较,利用 MIVR 与 GHR 的比值进行分析,见图 3.

从图 3 看出,当 $\Delta T = 0^\circ\text{C}$ 时,大气层结表现为中性状态,此时最大探测距离 MIVR 和 GHR 的比值接近 1;当 $\Delta T < 0^\circ\text{C}$ 时, MIVR 小于正常的几何视距 GHR,比值小于 1;在相同风速条件下, MIVR 会随海气温差 ΔT 的减小而减小,而 MIVR 递减趋势趋于平缓;当 ΔT 不变时, MIVR 会随着风速的增大而逐渐减小. 可见 MIVR 对于海气温差、风速的变化较为敏感.

2.2 位置高度参数对最大探测距离的影响

最大探测距离除了与气象环境要素变化有关,还与观测者和目标的相互位置 (h_s, h_t) 有关. 不同海洋气象环境下 MIVR 随观测和目标高度位置的变化情况见图 4. 图中横坐标 $H = \sqrt{h_s} + \sqrt{h_t}$,由图可见, MIVR 与 H 的关系几乎是一条标准的直线, MIVR 随着 H 的减小而递减,这说明 h_s 与 h_t 任何一个高度值

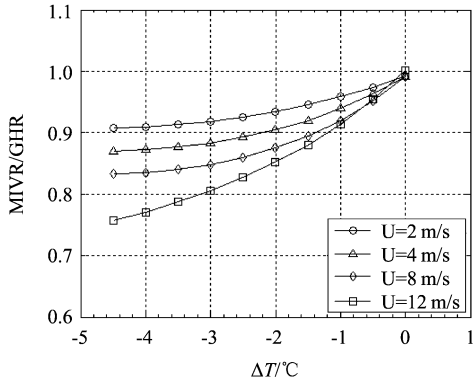


图3 MIVR/GHR 随海气温差 ΔT 、风速的变化分布图
Fig.3 MIVR/GHR versus ΔT at different wind speed

增大都会使 MIVR 增大,这符合实际观测的情况.由图4还可以看出,相同 ΔT 的两条近乎平行的直线在垂直方向的移动距离不一样,这反映出 H 相同时, ΔT 越小,MIVR 的变化量越大,与图3的结论一致.

3 模型的试验验证

3.1 试验概述

2009年11~12月在黄海北部某海域进行了海上红外探测试验.试验码头伸出海岸80m,东南—西南($100^\circ \sim 245^\circ$)方向为开阔海域.利用R. M. Young 81000 三维超声风速仪,Young 41372 温湿传感器, Everest 红外海表水温传感器,气压传感器建立的自动气象观测站,24h记录大气温度、湿度、风速风向、海表皮温度、气压数据,监测高度约9.8m,采样率为1Hz.

试验中使用 FLIR 公司的远红外热像仪(SC3000, $8 \sim 9 \mu\text{m}$, $\text{IFOV} = 1.1 \text{ mrad}$)获取远红外波段目标探测特征,架设高度距海面7m;使用JRC公

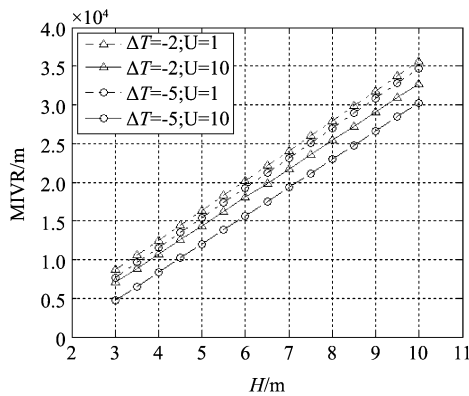


图4 不同 ΔT 、风速条件下 MIVR 随高度参数 H 的变化图
Fig.4 The variation of MIVR with the sensor-target height parameter H for various ΔT and wind speed

司 X 波段岸基导航雷达配合试验进行目标的跟踪与测距.探测目标主要为该海域固定航线上的客船.

3.2 试验验证分析

12月15日,天气晴朗,能见度 $> 10 \text{ km}$,气温($-5 \sim 0^\circ\text{C}$)明显低于海面水温($2 \sim 5^\circ\text{C}$),北风6~7级,相对湿度小,不足50%,全天出现明显的负折射现象.上午10:40~11:00跟踪观测海上客船,见图5,此时气温约为 -1.6°C ,海表温度为 4.9°C ,海气温差 $\Delta T = -6.5^\circ\text{C}$,气压1034.9 hpa,湿度36.3%,风速13.0 m/s.

如图5所示,FLIR记录客船关键时刻的红外图像,图中亮点对应客船的烟囱,烟囱实际所在高度23.5m.当距离为13.2km时,烟囱即将进入蜃影区;距离为16km时,客船已经进入蜃影区,监测图像中出现2个亮点,其中下方的为负折射导致烟囱出现的蜃影;距离为17.5km时,两个“烟囱”逐渐接近;距离为19.5km时,客船即将离开蜃影区逐渐消失,至20km消失,达到红外最大探测距离.

由图5的观测过程模型计算的 MIVR 结果,见图6.图中所示是通过光线传播轨迹数学模型评估的最大探测距离 MIVR 以及蜃影存在的区域,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5中的4个图像序列,则模型计算 MIVR 和出现蜃影的最小距离分别为19.7km,12.8km,比实测的20km,13.2km偏低.模型计算的 MIVR 与实测值相差0.3km,误差约为1.5%.

通过2个月的海上试验验证,该海域在入冬季节多发负折射现象,可导致海上高度0~30m以内的目标出现蜃影,而且海气温差 ΔT 越小,蜃影区会

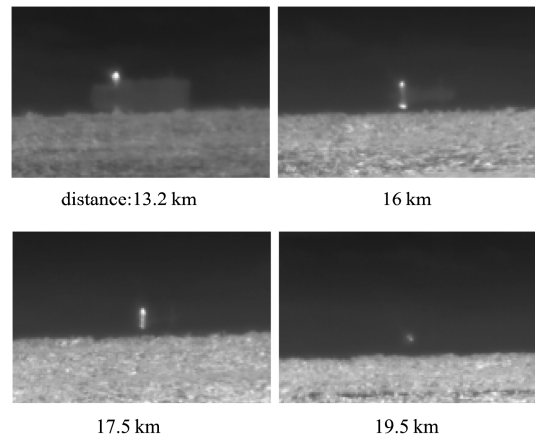


图5 10:40~11:00 远红外热像仪记录的目标图像序列
Fig.5 The target images recorded with the FLIR sensor on 10:40~11:00

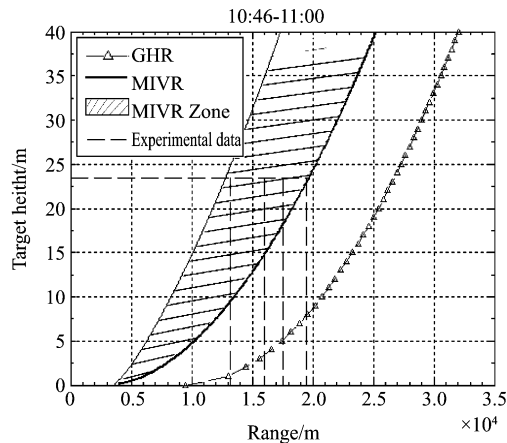


图6 观测过程模型计算的MIVR结果

Fig. 6 MIVR results of the ray tracing model

变得越窄, MIVR 也相应减小, 这与数值分析的结果一致。

4 结论

应用海气通量算法和抛物线近似方法建立光线路径数学模型, 利用气象环境要素信息计算光路图, 评估光电系统的最大探测距离, 并分析了蜃影出现的机制. 通过数值分析以及海上试验的对比模型的有效性得出, 在相同的风速条件下, MIVR 会随海气温差 ΔT 的减小而减小; 当 ΔT 不变时, MIVR 会随着风速的增大而逐渐减小, 并且 MIVR 随 ΔT 的减小, 递减率逐渐减小, 最终趋于平缓; 当 $\Delta T < 0$ 时, MIVR 与 H 对应关系几乎是一条标准的直线, 并且 MIVR 随着 H 的减小而递减; 试验海域在入冬季节多发负折射现象, 可导致海上 0 ~ 30 m 以内的目标都可以出现蜃影; 试验结果统计表明模型评估 MIVR 的准确率较高, 平均误差在 8% 以内。

仅针对海上负折射环境以及该环境下的蜃影现象进行了研究, 方法同样适用于其他光波波段. 此外, 由于实际海上大气环境的吸收效应、湍流效应对红外探测亦有影响, 因此更多的结论有待更深入的研究。

REFERENCES

- [1] Kunz G J, Moerman, M M, van Eijk A M J, et al. EOSTAR-an electro-optical sensor performance model for predicting atmospheric refraction, turbulence, and transmission in the marine surface layer[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, **5237**:81-93.
- [2] RAO Rei-Zhong. *Optic propagation in the turbulence atmosphere* [M]. Anhui: Anhui science and technology press (饶瑞中. 光在湍流大气中的传输. 安徽: 安徽科技出版社), 2005.
- [3] Stein K, Polnau E, Seiffer D. IR propagation through the marine boundary layer-comparison of model and experimental data[J]. *SPIE Proceedings*, 2003, **4884**:84-94.
- [4] HUANG Yong, CUI Yi, WANG Jun. Thermal emission characteristics of a negative index semitransparent thin film [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (黄勇, 崔熠, 王浚. 负折射率半透明薄膜的热发射特性研究. *红外与毫米波学报*), 2009, **28**(4):289-293.
- [5] Lehn W H, Friesen W. Simulation of mirages[J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(9):1267-1273.
- [6] LI Yun-Bo, ZHANG Yong-Gang, WU Shi-Hua, et al. Statistical study of EO detection environment characteristic parameters in coastal areas[J]. *Chinese journal of lasers* (李云波, 张永刚, 吴世华, 等. 近海红外探测环境特征参数统计分析. *中国激光*), 2009, **36**(S2):194-198.
- [7] Degache MAC, Hammel S. Finding the range to a distant object near the sea surface [J]. *SPIE Proceedings*, 2007, **6708**(67080U):1-12.
- [8] De Jong, A N, Fritz P J. Refraction measurements and modelling over the Chesapeake Bay during the NATO (TG-51) SAPPHERE trials [J]. *SPIE Proc.*, 2007, **6747**(674707):1-12.
- [9] Stein K, Seiffer D, Weiss-Wrana K. Results of the EO measurements during the experiment PROTROW [R]. *FGAN-FOM report*, 2007.
- [10] WANG Wei-Hua, NIU Zhao-Dong, CHEN Zeng-Ping. Research on the operating range of staring IR imaging system in sea-sky background[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (王卫华, 牛照东, 陈曾平. 海空背景凝视红外成像系统作用距离研究. *红外与毫米波学报*), 2006, **25**(2):150-152.
- [11] HUANG Yong, TAN He-Ping, XIA Xin-Lin. Apparent emitting characteristic of semi-transparent isothermal medium layer with graded index[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (黄勇, 谈和平, 夏新林. 梯度折射率半透明等温介质的表现发射特性. *红外与毫米波学报*), 2001, **20**(5):348-353.
- [12] LI Yun-Bo, ZHANG Yong-Gang, TANG Hai-Chuan, et al. Oceanic evaporation duct diagnosis model based air-sea flux algorithm[J]. *Journal of applied meteorological science* (李云波, 张永刚, 唐海川, 等. 基于海气通量算法的海上蒸发波导诊断模型. *应用气象*), 2009, **20**(5):628-633.
- [13] Fairall C W, Hare J E, Edson J B, et al. Parameterization and micrometeorological measurement of air-sea gas transfer[J]. *Bound.-Layer Meteorol*, 2000, **96**(1-2):63-105.
- [14] ZHANG Yi-Xin, CHI Ze-Ying. *Optic propagation and imaging in the atmosphere* [M]. Beijing: national defence industry press (张逸新, 迟泽英. 光波在大气中的传输与成像. 北京: 国防工业出版社), 1997.
- [15] Lehn W H. A simple parabolic model for the optics of the atmospheric surface layer[J]. *Appl. Math. Model*, 1985, **9**(6):447-453.
- [16] Dion D. Refraction effects on EO system detection ranges in coastal environment[R]. *AGARD CP-567*, 1995.