

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 2-0194-05

近海红外探测环境特征参数统计分析

李云波¹ 张永刚¹ 吴世华² 姚忠山¹

(¹ 海军大连舰艇学院军事海洋系, 辽宁 大连 116018; ² 东海舰队司令部航保处, 浙江 宁波 315000)

摘要 利用 2002~2008 年间在我国渤海葫芦岛、东海平潭岛、东山岛以及南海的永兴岛等海域开展的海上试验观测数据,通过 Bulk 通量算法与射线程序统计分析了特征高度、折射率结构常数(C_n^2)等物理量以及光电系统相关传播参数的累积概率特征。东山岛海域特征高度大于零的情况占到 90%以上,高 C_n^2 的情况($C_n^2 > 10^{-14}$)出现概率约为 50%,明显高于平潭岛、永兴岛,而葫芦岛试验中由于负折射导致的视距缩短大于 4 km 的概率接近 50%。东山岛和葫芦岛受到较强的湍流影响,相干长度小于 15 cm 的概率分别为 60%和 40%。其统计结果和分析方法可为海上光电系统试验环境保障提供信息支持。

关键词 大气光学;大气折射;光学湍流;统计分析;近海

中图分类号 P427.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200936s2.0194

Statistical Study of Infrared Detection Environment Characteristic Parameters in Littoral Areas

Li Yunbo¹ Zhang Yonggang¹ Wu Shihua² Yao Zhongshan¹

(¹ Department of Military Oceanography, Dalian Naval Academy, Dalian, Liaoning 116018, China)
² Command of East Sea Fleet, Ningbo, Zhejiang 315000, China)

Abstract By using trial observations data from Hulu island in Bohai, Pingtan island, Dongshan island in East China Sea, Woody island in South China Sea during 2002~2008, physical parameters (characteristic refractive heights, refractive structure parameter values) as well as some relevant electro-optical system propagation parameters based on Bulk flux algorithm and ray tracing program are studied statistical in this paper. The accumulative probability of the positive characteristic refractive height in Dongshan island is above 90%, the percent of high refractive-index structure parameter (C_n^2) values ($C_n^2 > 10^{-14}$) is about 50%, which is higher than that in the Pingtan island and Woody island obviously. The cumulative probability of the optical horizon reduction greater than 4 km is close to 50% because of the subrefraction. Dongshan island and Hulu island are under the strong turbulence, the probability of the coherent length smaller than 15 cm is 60%, 40% respectively. Its statistical result and the analysis method may provide the information for the marine electro-optical system test environment safeguard.

Key words atmospheric optics; atmospheric refraction; optical turbulence; statistic study; littoral areas

1 引言

随着探测手段的日益更新,红外与微波雷达已成为目前世界各国普遍采用的探测手段。一般来说,微波雷达的探测距离比红外雷达大很多,但是在空间分辨率方面却比红外系统差^[1,2]。当雷达静默时,被动红外探测更具优势。在实际军事应用中,两者主要用以侦察和探测近海表低空目标(如小型舰

船、掠海导弹、低空飞机),必然受到复杂海洋大气环境的影响。特别是在近海条件下,海面以上 50 m 高度内环境制约作用更加明显。目前,对于微波雷达系统已有很多学者开展了相关的环境影响特征的研究,例如大气波导^[3]、电磁盲区^[4]、异常折射环境等。同样,红外等光电探测系统也会受海洋环境影响,但主要体现为海洋大气的消光作用、大气折射、

基金项目: 国家 863 计划(2002AA639300)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应用方面的研究。E-mail: plalyb@sohu.com

导师简介: 张永刚(1963—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事军事海洋应用方面的研究。E-mail: plalyb@sohu.com

光学湍流效应^[5]。其中大气折射除了产生超折射(波导特征)和负折射特征外,还常表现出多目标现象,即在真实目标的上方或者下方出现第二个目标即蜃影(mirage)^[6],它的出现会增加系统的虚警概率,干扰目标的跟踪。另一个重要的特征就是光学湍流,它主要是由短期小尺度折射率的随机变化导致的,一般用大气折射率结构常数(C_n^2)来描述。光学湍流所导致的光强闪烁、相位起伏、光束漂移扩展弯曲、图像模糊都与 C_n^2 有关^[7]。因此,本文主要针对光波段大气折射和光学湍流效应,利用2002~2008年间在我国渤海、东海、南海等海域开展的多次海上试验观测数据,借助射线程序^[6]与海气Bulk通量算法^[8]统计分析了特征高度、 C_n^2 等物理量以及光电系统相关传播参数,揭示环境因素对光电系统效能的影响作用。

2 大气折射与光学湍流特征计算

2.1 大气折射

对于光波波段,很多研究者对大气折射率计算公式进行了不断的研究与完善^[9-12]。由于本文着重研究红外窗区波段,因此采用 R. J. Hill 等^[11]提出的函数形式,可以写成

$$N_{IR} = \frac{1}{T} [A(P - e) + Be], \quad (1)$$

式中

$$A = \left[a_0 + \frac{a_1}{1 - (v/b_1)^2} + \frac{a_2}{(v/b_2)^2} \right] \left(\frac{T_0 + 15}{P_0} \right),$$

$$B = \frac{10^5}{R_w} \left[\frac{0.957 - 0.928\theta^{0.4}(x-1)}{1.03\theta^{0.17} - 19.8x^2 + 8.1x^4 - 1.7x^8} + \frac{3747}{12440 - x^2} \right],$$

A, B 分别代表折射率的干项和湿项; P, e 分别是总气压和水气压,单位为 hPa; T 是气温,单位取 K。 $T_0 = 273.16, P_0 = 1013.25$ hPa, $a_0 = 83.42, a_1 = 185.08, a_2 = 4.11, b_1 = 1.140 \times 10^5, b_2 = 6.24 \times 10^4, \theta = T/273.16, x = 10/\lambda, \lambda$ 为波长,单位 $\mu\text{m}, v$ 为波数,单位为 $\text{cm}^{-1}, v = 10^4 \lambda^{-1}, R_w = 461.0$ J/(kg·K)。考虑到地球曲率的影响,一般引入大气修正折射率 M ,则 $M = N + 0.157z$,其中 z 是高度,单位为 m。

由(1)式可见,近海面大气折射的垂直分布廓线可以利用气压、气温、湿度、风速、水温等环境要素借助 Bulk 通量算法获得。一般说来,当海气温差(ASTD)为负值(ASTD<0)时,近似认为不稳定状态,海面上具有较高的折射率梯度 dN/dz 并随高度递减,导致出现负折射。此时将 $dN/dz = 0$ 时所对

应的高度定义为特征高度 $H_c (H_c < 0)$; 当海气温差大于零(ASTD>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环境^[13]。此时一般将 $dN/dz = -0.157$ 或 $dM/dz = 0$ 所对应的高度定义为特征高度 $H_c (H_c > 0)$ 。因此,可以将 H_c 作为整个电磁波段折射环境的代表量(如图 1 所示),其正负值分别代表负折射高度和波导高度^[14]。图 2 是利用通量算法计算的远红外($10.6 \mu\text{m}$)以及微波波段特征高度 H_c 与海气温差变化关系,图中可见,红外波段受湿度影响的程度明显低于微波波段,这与已有的报道一致,更详尽的分析可见文献^[15]。

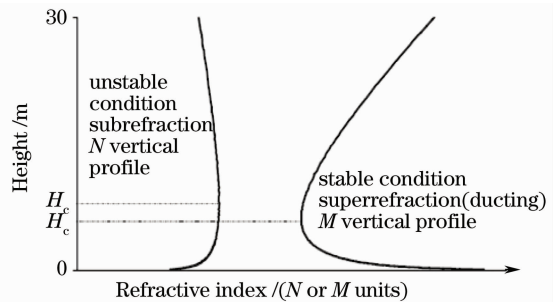


图 1 折射率廓线与不同稳定度条件下特征高度的定义
Fig. 1 Refractivity profiles and definition of the characteristic refractive height for unstable and stable atmospheric conditions

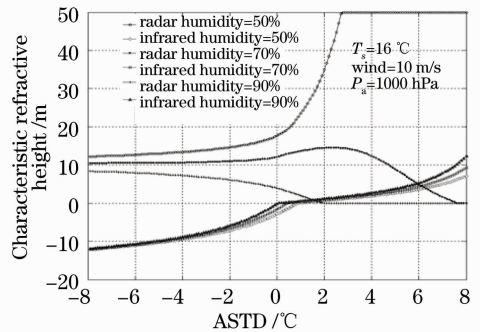


图 2 特征高度随海气温差和湿度变化的分布图
Fig. 2 Variations of the characteristic refractive height versus ASTD, for various humidity values and a 10 m/s wind speed

2.2 光学湍流

光学湍流研究中,一般引入结构函数这一概念来表征湍流的强度, $D_m(z)$ 代表在相距 $z = z_2 - z_1$ 上两点的折射率 $\langle (n_{z_2} - n_{z_1})^2 \rangle$ 相差的时均值,可以表示为^[16]

$$D_m(z) = \langle (n_{z_2} - n_{z_1})^2 \rangle = \langle (dn)^2 \rangle = C_n^2 z^{2/3}, \quad (2)$$

式中折射率结构常数 C_n^2 可以由温度、湿度的结构常数以及温度湿度的相关系数表示为

$$C_n^2 = \left(\frac{\partial n}{\partial T}\right)^2 C_T^2 + \left(\frac{\partial n}{\partial Q}\right)^2 C_Q^2 + 2\left(\frac{\partial n}{\partial T} \frac{\partial n}{\partial Q}\right)^2 C_{TQ}, \quad (3)$$

而温度、湿度的结构常数以及温度、湿度的相关系数与温度、湿度的特征长度 T_*^2, Q_*^2 具有关系^[17]为

$$\begin{aligned} C_T^2 &= z^{-2/3} T_*^2 f_T(z/L) \\ C_Q^2 &= z^{-2/3} Q_*^2 f_Q(z/L) \\ C_{TQ}^2 &= z^{-2/3} \gamma_{TQ} T_* Q_* f_{TQ}(z/L), \end{aligned} \quad (4)$$

式中的 γ_{TQ} 为温度与湿度谱的相关系数, f_T, f_{TQ}, f_Q 是无量纲的函数, 其具体形式可见文献^[17]。由上可见, C_n^2 垂直廓线分布也可以通过 Bulk 通量模型计算得到。

2.3 大气折射对光电系统的影响

超折射或者波导环境会使光波实现超视距传播。但是研究表明, 光波的超视距现象不像微波那么明显, 而且波导高度较低。如果海上出现负折射时, 会缩短探测的距离, 而且可能出现蜃影, 即在真是目标的上方或者下方出现多个目标, 这会增加系统的虚警概率, 干扰目标的跟踪。1995年, D. Dion等^[18]定义了蜃影消失的最大距离为 MIVR, 它主要与观察高度、目标高度、海气温差、风速的影响有关。

2.4 光学湍流对光电系统的影响

光学湍流会导致图像细节精度的损失, 可以用大气相干长度来描述。大气相干长度也称为 Fried 相干长度, 是指对于给定的湍流在没有自适应光学系统用于补偿湍流的影响条件下, 光学系统等效孔径直径的最大极限。假设光束水平传播, 在弱湍流近似下, 对于平面波, 相干长度 r_0 可以表示为^[7]

$$r_0 = 0.1844\lambda^{6/5} \left[\int_0^R C_n^2(r) (r/R)^{5/3} dr \right]^{-3/5}, \quad (5)$$

Table 1 Main characteristics of available experimental data

Experimental name	Hulu island 2003	Pingtang island 2002	Dongshan island 2008	Woody island 2002
Sea area	Bohai	Taiwan Straits	South Taiwan Straits	South China Sea
Period of the experiment	September~December(17days)	May~June(15days)	January(30days)	February~March(38days)
Quantity of available data sets	1269	895	2976	2734

4 统计结果分析

4.1 特征高度统计特征

图 4 为特征高度累积发生概率图, 从图中可以明显地看到东山岛海域特征高度大于零 ($H_c > 0$) 的情况占到 90% 以上, 这表明当时海上超折射现象发生频繁。与东山岛相比, 平潭岛、永兴岛、葫芦岛特

式中 λ 为波长, R 为光传输路径长度, r 为积分变量, 单位为米。

3 试验数据

试验地点如图 3 所示, 所有的统计数据都是 10 min 的平均数据。数据包括风速、风向、大气温度、海表水温、湿度、气压、水位等要素, 气象数据高度统一为 10 m。数据主要来源于海上船艇以及海边的多层观测铁塔。船上数据依赖于超声风速仪、温湿、气压传感器以及红外水温传感器, 铁塔根据所在海滨的具体情况设为 3 或 5 层, 一般第一层距海面高度在 6 m 左右, 每层都架设风速、温度湿度、气压传感器, 并在第二层架设红外水温传感器。所有数据都是在进行海上传播试验时收集的, 具体情况如表 1 所示。其中葫芦岛和平潭岛主要是进行了雷达探测试验研究, 东山岛和永兴岛主要开展了海上折射环境监测研究。

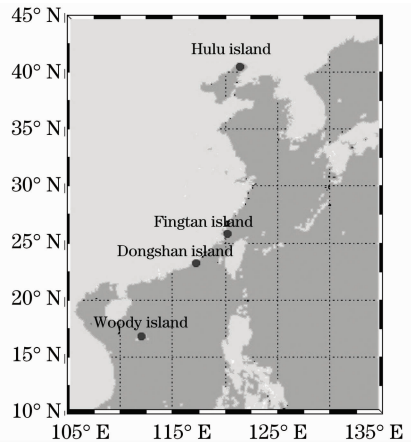


图 3 试验地点示意图

Fig. 3 Geographical origin of experimental data

表 1 试验数据情况一览表

征高度大于零的概率明显降低, 分别为 42.2%, 13.53%, 11.74%。其中 2003 年葫芦岛海上试验中 H_c 小于 -5 m 的概率超过 50%, 说明葫芦岛试验期间负折射出现的概率明显高于其他试验, 计算其平均特征高度为 -5.32 m, 这与 4.3 节探测距离缩减概率分布显示的结果一致。

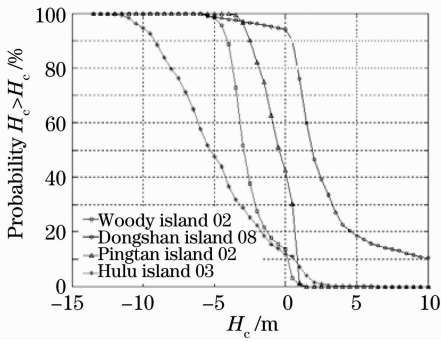


图4 特征高度累积概率分布图

Fig. 4 Cumulative distributions of the characteristic refractive heights

4.2 折射率结构常数 C_n^2 的统计特征

统计4次试验的折射率结构常数 C_n^2 累积发生概率,如图5所示。东山岛试验中高 C_n^2 的情况 ($C_n^2 > 10^{-14}$) 出现概率约为50%,相比之下葫芦岛高 C_n^2 的情况占到42%,这两次试验中高湍流环境明显高于平潭岛、永兴岛。但东山岛和葫芦岛较强的湍流特征成因不同,葫芦岛试验中多出现较强不稳定的环境,海气温差多小于零,层结不稳定,利于湍流的发展。而东山岛试验期间,气温明显大于水温,平均温差高达3℃,进而导致强的湍流环境,所以在试验中必须考虑大气湍流的影响效应。

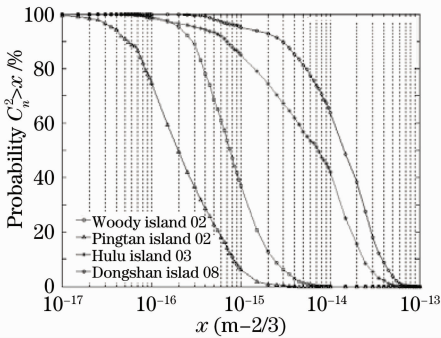


图5 折射率结构常数 (C_n^2) 累积概率分布图

Fig. 5 Cumulative distributions of the refractive index structure parameter (C_n^2)

4.3 折射效果统计分析

为进一步体现2.3节所述的折射影响,假设观察高度距海面20m,目标高度5m,标准中性大气条件下(光波段折射梯度为-25 N/km),最大视距为25 km^[1]。图6主要表明与正常最大视距相比,实际环境视距缩短量的累积频率分布。很明显统计仅考虑每次试验中的负折射情况,并剔除大雾降雨等天气个数,另外由于只讨论折射效应,所以这里不考虑分子和气溶胶的吸收和散射衰减。

图6中括号中的百分数对应该次试验中负折射

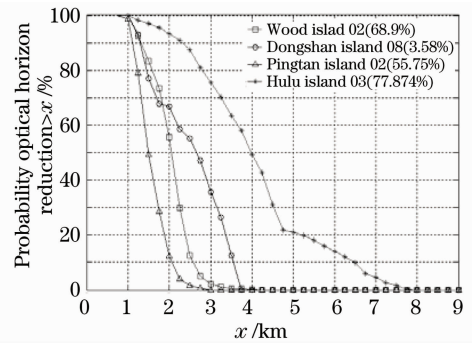


图6 负折射导致的视距缩短量累积概率分布

Fig. 6 Cumulative distributions of the optical horizon reduction due to subrefraction

情况所占的百分比。从图6中,可以清楚的看出,葫芦岛试验中负折射导致的视距缩短明显高于其他3次试验,缩短距离大于4 km的概率接近50%,表明试验中负折射的影响较大,严重地使视距缩短7 km的情况也可以出现。

4.4 湍流影响效果统计分析

图7为利用大气相干长度计算公式(4)统计了4次试验的累积概率分布。这里假设海上目标高度5m,观测高度距海面20m,距目标点15km,在正常视距以内,评估波长为10.6 μm。图7中可见,东山岛和葫芦岛受到较强的湍流影响,相干长度小于15 cm的概率分别为60%,40%。由此可见,如果接收孔径为15 cm,在这两次试验中光学湍流所导致成像模糊将比较严重,特别是东山岛试验,湍流效应对海上光电试验的影响不容忽视。

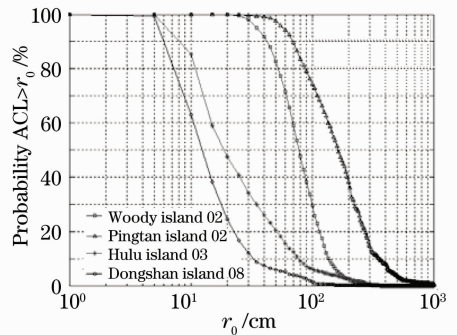


图7 大气相干长度累积概率分布

Fig. 7 Cumulative distributions of the atmospheric coherence length

5 结 论

通过对与海上光电传输特征密切相关的各特征量的统计分析,利用累积概率分布图清晰地说明了历次试验的计算结果,同时还说明了利用较容易获取的海洋气象水文数据,通过Bulk通量算法和射线

跟踪程序计算可较方便地得到各种特征信息,评估折射和大气光学湍流对光电系统的影响效果,这为实时掌握海上光电系统的特征信息提供了方法。另外,本文的计算方法也可应用在雷达传播环境的评估中,这也为雷达和光电综合有效配置提供了统一方法,其统计结果也为军事应用环境保障提供了信息支持。然而,由于试验条件所限,试验数据还比较缺乏,例如海上能见度数据、气溶胶浓度数据等。如果具备更全面的环境信息数据就可以进一步计算海上光电传输损耗特征,完善统计结果以及基于气象信息的海上光电设备效能评估算法。

参 考 文 献

- 1 J. Claverie, Y. Hurtaud. Statistical study of EO propagation parameters in coastal areas[C]. *SPIE*, 2003, **4884**: 140~149
- 2 Xu Jun. Research on the Detection of Small and Dim Targets in Infrared Images [D]. Xi'an: Xian University of Science and Technology, 2001
徐 军. 红外图像中弱小目标检测技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2001
- 3 Huang Xiaomao, Zhang Yonggang, Wang Hua *et al.*. Evaluation and experimental analysis of radar anomalous detection influenced by atmospheric ducts [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2006, **34**(4): 723~725
黄小毛, 张永刚, 王 华等. 大气波导对雷达异常探测影响的评估与试验分析[J]. *电子学报*, 2006, **34**(4): 723~725
- 4 Jiao Lin, Zhang Yonggang. Study of the shadow zone of the radar in the atmospheric duct[J]. *J. Xidian University*, 2007, **34**(6): 989~995
焦 林, 张永刚. 大气波导条件下雷达电磁盲区的预报研究[J]. *西安电子科技大学学报*, 2007, **34**(6): 989~995
- 5 Zhang Jianqi, Fang Xiaoping. *Infrared Physics* [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2004. 126~183
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. 126~183
- 6 W. H. Lehn, W. Friesen. Simulation of mirages [J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**: 1267~1273
- 7 Ma Xiaoshan, Zhu Wenyue, Rao Ruizhong. Large aperture laser scintillometer for measuring the refractive index structure constant of atmospheric turbulence[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 898~902
马晓珊, 朱文越, 饶瑞中. 测量大气折射率结构常数的大口径激光闪烁仪[J]. *中国激光*, 2008, **35**(6): 898~902
- 8 C. W. Fairall, E. F. Bradley, D. P. Rogers *et al.*. Bulk parameterization of air-sea fluxes for tropical ocean-global atmosphere coupled-ocean atmosphere response experiment [J]. *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**: 3747~3764
- 9 B. Edlén. The refractive index of air [J]. *Meteorol.*, 1966, **2**: 71~80
- 10 Owens. Optical refractive index of air: dependence on pressure, temperature and composition [J]. *Appl. Opt.*, 1967, **6**(1): 51~59
- 11 R. J. Hill, R. S. Lawrence. Refractive index of water vapor in infrared windows [J]. *Infrared Phys.*, 1986, **26**(6): 371~376
- 12 P. E. Ciddor. Refractive index of air: new equations for the visible and near infrared[J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**: 1566~1573
- 13 J. L. Forand. Method to estimate infrared and radio-frequency synergy [J]. *Opt. Eng.*, 2007, **46**(12): 1~9
- 14 G. Kunz, E. Heemskerck, L. V. Eijk. Comparison of atmospheric refraction at radar and optical wavelengths [C]. *SPIE*, 2005, **5981**: 1~12
- 15 Li Yunbo, Zhang Yonggang, Wang Hua *et al.*. The influence of marine abnormal refraction environmental on infrared and microwave transmission [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(s3): 254~259
李云波, 张永刚, 王 华等. 异常大气折射环境对红外与微波传输的影响[J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(s3): 254~259
- 16 K. L. Davidson. Verification of the bulk method for calculating overwater optical turbulence [J]. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(17): 2919~2924
- 17 Dai Fushan, Li Youkuan. Estimation of the optical turbulence in the marine atmospheric surface layer based on meteorological data [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 191~196
戴福山, 李有宽. 利用气象要素估算海洋大气近地层光学湍流 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 191~196
- 18 D. Dion. Refraction effects on EO system detection ranges in coastal environment[R]. Agard CP-567, 1995