

doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2019.04.011

水平非均匀性蒸发波导诊断及其对 雷达探测的影响

王本洪¹, 焦林²

(1. 海军参谋部航海保证局, 北京 100841; 2. 海军大连舰艇学院 军事海洋与测绘系, 辽宁 大连 116018)

摘要: 蒸发波导是发生在海气边界层的一种异常折射现象, 因为其分布广、发生概率大, 所以被认为是海上电子装备影响最为显著的波导类型。然而由于其形成机制复杂, 且在近岸地区存在水平不均匀性, 使得目前非均匀蒸发波导的诊断及其应用还未能落实到实际工作中。针对这一现状, 首先利用 G L Geernaert 的方法修正了 Monin-Obukhov 相似理论, 将其扩展到海洋大气表面边界层不均匀条件下; 其次在 Babin 模式的基础上引入张强普适函数的非线性修正因子与阵性风速, 从而将蒸发波导诊断模式的适用范围拓展到近海沿岸地区和甚低风速条件下。并在此基础上研究了蒸发波导水平非均匀性对雷达探测的影响, 得到了水平非均匀蒸发波导能够改变均匀波导环境下雷达的探测距离及其盲区的分布。

关键词: 水平非均匀性; 蒸发波导; 诊断; 雷达探测

中图分类号: P79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-2029(2019)04-0066-05

大气波导是对流层大气中的一种异常折射(极端超折射)结构, 它能够改变电磁波的正常传播特性, 使得电磁波在波导层中传播损耗减小, 传播距离增大, 因而大气波导能够使雷达实现超视距探测^[1]。

蒸发波导是发生在水面上的一种波导类型, 主要是由于海水蒸发引起湿度锐减造成的。近海沿岸地区由于海陆分布的不均, 常常会造成波导的近岸效应, 有时我们称之为波导的水平非均匀性^[2]。Zhu 等^[3]提出了造成近岸大气波导水平不均匀性的 6 大因素: 海岸地形、海面温度、海陆温差、海岸地貌高度、环境风和中尺度海陆风。K D Anderson 等^[4]通过实验研究了蒸发波导条件下电波超视距传播特性。张金鹏等^[5]采用雷达海杂波方法对蒸发波导非均匀性进行了描述; 郭凯凯等^[6]研究了基于水平非均匀蒸发波导的电波传播非互易性; 庞佳玮等^[7]分析了蒸发波导高度水平非均匀性对路径损耗的影响; 董道广等^[8]建立了基于优化滤波的水平非均匀蒸发波导反演算法。史阳等^[9]的研究表明, 蒸发波导的水平非

均匀性对电波传播特性影响不可忽略。上述研究分析了蒸发波导受近岸水文气象要素影响而产生的差异及其有关特征, 以及大气波导水平非均匀性条件下电磁波的传播损耗特征, 但对于雷达在非均匀蒸发波导条件下的探测情况还未有论述。本文在前人研究的基础上, 建立了水平非均匀条件下的蒸发波导诊断模型, 利用平潭岛铁塔数据和中尺度模式数据, 评估 RM-1070 导航雷达的探测距离, 分析蒸发波导水平非均匀性对雷达探测的影响。研究认为, 水平非均匀蒸发波导能够改变均匀波导环境下雷达的探测距离及其盲区的分布。

1 非均匀蒸发波导的诊断

蒸发波导高度是蒸发波导重要的特征量, 是表征波导强度的重要参数, 也是确定蒸发波导对电子设备影响的一个重要参量。目前, 国内外确定蒸发波导高度的模式有多种, 如 P-J 模式、MGB 模式、

收稿日期: 2019-03-17

作者简介: 王本洪(1981-), 男, 硕士, 参谋, 主要从事海洋水文气象学研究。E-mail: abcd9820@sina.com

Babin 模式、NPS 模式等,但其基本原理相同,都是依赖 Monin-Obukhov 相似理论(简称为 M-O 相似理论),只是用于确定近地层通量和特征尺度的方法不同^[1]。然而 M-O 相似理论适用于定常和水平均匀的环境下,对于沿海地区(特别是海陆交界处),该理论适用性受到了制约。本文首先利用 G L Geernaert^[10]的方法修正了 M-O 相似理论,将其扩展到海洋表面层不均匀大气条件下;之后在 Babin^[11]基于 Fairall 改进 TOGA COARE 整体通量算法新模型的基础上引入阵性风速和张强等^[12]的普适函数修正因子,并利用 Liu^[13]的通量廓线关系,来计算蒸发波导高度,从而将蒸发波导诊断模式拓展到甚低风速条件下和近岸沿海地区。

1.1 M-O 相似理论的修正

根据相似理论,每个仅在垂直方向上变化的物理量,无论是在 x 还是 y 方向,均可表示为:

$$\frac{\partial}{\partial(x,y)}(U,T,Q,z_0,\rho,L,z_i,T_0,U_0)=0 \quad (1)$$

式中: $U,T,Q,z_0,\rho,L,z_i,T_0,U_0$ 分别代表风速、气温、湿度、粗糙长度、大气密度、相似长度、混合层高度、海表温度和海表风速。

式(1)仅适用于水平均匀的大气环境,通常取 25 km 作为其应用范围,然而这种水平均匀的假设在许多区域中是不现实的。因此非常有必要研究非均匀大气条件下的相似理论应用。

(1) 不均匀条件下风速的通量廓线关系

假设状态变量在 (x,z) 二维空间变化,则由大气动量守恒方程得到:

$$\frac{Du}{Dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u'w'}{\partial z} = -\rho^{-1} \frac{\partial p}{\partial x} + fv \quad (2)$$

式中: ρ 为大气密度; p 为大气压强; f 为科里奥利参数; v 为横向风速(即 y 方向的风速)。应用尺度分析法,忽略水平通量与平均垂直速度且假设表面层横向风速为零,则上式可变为:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + fv_g = -\frac{\partial u'w'}{\partial z} \quad (3)$$

式中: v_g 为地转风速。为了研究水平非均匀性对风廓线的影响,给出动量通量的一般形式:

$$\overline{u'w'} = -k^2 u^2 \left[\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) - \psi_u \right]^{-2} \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)中,得:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + fv_g = -\frac{\partial}{\partial z} \left[k^2 u^2 \left(\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) - \psi_u \right)^{-2} \right] \quad (5)$$

式(5)经过简单的代数变换,可得:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = (u_*/kz)(1-R-S^*) + (u^2/2u_*^2) \frac{\partial u}{\partial x} + (u/2u_*)fv_g \quad (6)$$

式中: $R = \frac{z}{z_0} \frac{\partial z_0}{\partial z}$, $S^* = z \frac{\partial \psi_m}{\partial z}$; 对于中性大气层结, $\psi_m \approx -\beta z/L$, 所以

$$S^* = -\beta z/L + \beta \left(\frac{z}{L}\right)^2 \frac{\partial L}{\partial x} \quad (7)$$

假设 $\phi_m = 1 + \beta z/L$, 则式(6)变为:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{u_*}{kz} (\phi_m - R - S + W + G) \quad (8)$$

式中: $R = \gamma \frac{z}{z_0} \frac{\partial z_0}{\partial z}$; $S = \beta \gamma \left(\frac{z}{L}\right)^2 \frac{\partial L}{\partial x}$; $W = \frac{kzu^2}{2u_*^3} \frac{\partial u}{\partial x}$;

$G = \frac{kzfv_g u}{2u_*}$ 。为了简化计算, β 在不稳定条件下取 3, 稳定条件下取 5, γ 为坡度在中性条件下通常取 60。

由式(8)可以看出,不均匀条件下的风速通量廓线关系引入了 4 个修正因子即 R, S, W, G , 它们分别表示粗糙度长度的水平梯度因子、大气稳定度的水平梯度因子、风速水平梯度因子、地转风因子。

(2) 不均匀条件下温、湿的通量廓线关系

类似于动量通量的一般形式,可以得到任一物理量 c 的通量形式:

$$\overline{w'c'} = k^2 u(c_0 - c_z) \left(\ln\frac{z}{z_0} - \psi_u \right)^{-1} \left(\ln\frac{z}{z_0} - \psi_c \right)^{-1} \quad (9)$$

式中: c 表示温度、湿度, c_0, c_z 表示 z_0 与 z 高度处的物理量值; ψ_u, ψ_c 分别表示风速、温度或湿度普适函数。

依据不均匀条件下的风速通量廓线关系的推导过程,可得到不均匀条件下温、湿的通量廓线关系:

$$\frac{\partial c}{\partial z} = \frac{c_*}{kz} (\Phi_c - W_c - S_c^*) - C_c^* + Y_c^* - U_c^* - \Sigma^* \quad (10)$$

式中: $\Phi_c = \phi_c(z/L) - \gamma z/z_c \frac{\partial z_c}{\partial x} - \gamma \beta (z/L)^2 \frac{\partial L}{\partial x}$; $W_c = \gamma \frac{z}{z_c} \frac{\partial z_c}{\partial x}$; $S_c^* = \gamma \beta \frac{z}{L^2} \frac{\partial L}{\partial x}$; $C_c^* = \frac{u(c-c_0)}{w'c'}$; $Y_c^* = \gamma \frac{\partial c_0}{\partial x}$;

$U_c^* = -\frac{c_0 - c}{2u C_D} \frac{\partial u}{\partial x}$; $\Sigma^* = \frac{c_0 - c}{w'c'}$; C_D 为拖曳系数, $C_D = k^2 / (\ln(z/z_0) - \psi_u)^2$; γ 为坡度,在中性条件下通常取 60。

由式(10)可以看出,不均匀条件下的温、湿通量廓线关系引入了 6 个修正因子,即 $W_c, S_c^*, C_c^*, Y_c^*, U_c^*$ 和 Σ^* , 它们分别表示粗糙度长度的水平梯度因

子、大气稳定度的水平梯度因子、温度及湿度水平梯度因子、近海面温度及湿度水平梯度因子、风速水平梯度因子和温湿化学源汇因子。

为有效计算水平非均匀性对垂直廓线的影响, Geernaert 对上述修正因子做了定量的简化, 最终得到适用于水平非均匀条件下的通量廓线关系如下:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{u_*}{kz} \phi_m + \frac{1}{2C_D} \frac{\partial u}{\partial x} \quad (11)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{T_*}{kz} \phi_T - \frac{1}{C_T} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{T_*}{2u_* C_T} \frac{\partial u}{\partial x} \quad (12)$$

$$\frac{\partial q}{\partial z} = \frac{q_*}{kz} \phi_q - \frac{1}{C_E} \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{q_*}{2u_* C_E} \frac{\partial u}{\partial x} \quad (13)$$

1.2 非均匀蒸发波导诊断模型的建立

蒸发波导是在大气折射指数垂直梯度小于 -157 N/km 或 -0.157 N/m 时产生的, 大气折射指数垂直梯度可通过式(14)计算:

$$\frac{dN}{dz} = C_1 + C_2 \frac{d\theta}{dz} + C_3 \frac{dq}{dz} \quad (14)$$

因而, 为了确定蒸发波导的高度, 需要确定温度和湿度的垂直梯度结构。首先在 Babin 模式^[11]的基础上引入非均匀条件下的通量廓线关系式(12)~式(13), 大气温度 T 用位温 θ 替代, 于是改写为如下形式:

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{\theta_*}{kz} (\phi_H - A_\theta + B_\theta) \quad (15)$$

$$\frac{\partial q}{\partial z} = \frac{q_*}{kz} (\phi_q - A_q + B_q) \quad (16)$$

$$\text{式中: } A_\theta = \frac{kz}{\theta_* C_T} \frac{\partial \theta}{\partial x}; B_\theta = \frac{kz}{2u_* C_T} \frac{\partial u}{\partial x}; A_q = \frac{kz}{C_E q_*}$$

$$\frac{\partial q}{\partial x}; B_q = \frac{kz}{2u_* C_E} \frac{\partial u}{\partial x}。$$

将式(15)~式(16)代入式(14), 并令 $\frac{dN}{dz} = -0.157$, 得到蒸发波导高度 z_d 为:

$$z_d = \frac{-(C_2 \theta_* + C_2 \phi_H - C_2 A_\theta + C_2 B_\theta + C_3 q_* + C_3 \phi_q - C_3 A_q + C_3 B_q)}{k(C_1 + 0.157)} \quad (17)$$

Babin 模式中通常认为普适函数 $\phi_H = \phi_q$, 这在水平均匀大气条件下是适用的, 然而在近岸沿海地区由于海陆风、地形等效应使得水平大气并非均匀, 从而该关系不再适用。这里引入张强等^[12]提出的非线性修正因子 α_v , 其中:

$$\alpha_v = \frac{\phi_q}{\phi_H} \approx \frac{1+2z/L}{1+5.4z/L} \quad (18)$$

为将相似理论推广到甚低风速下, 引入阵性风

速 w_g , 用新的地面风速 $S = u_x^2 + u_y^2 + w_g^2 = u^2 + w_g^2$ 的平方根代替风速值。

$$w_g = \beta w_* = \beta (F_b z_i)^{1/3} \quad (19)$$

$$F_b = -\left(\frac{g}{T}\right) \overline{w T'_v} \quad (20)$$

式中: w_g 为阵性风速; w_* 是自由对流速度特征尺度; β 为经验常数, 其量级为 1.0, 一般取 1.25^[14]; F_b 为浮力通量项, 代表湍流的波动性; $\overline{w T'_v}$ 为垂直虚温通量; Z_i 为对流混合层高度。

1.3 非均匀性蒸发波导环境的监测

美国从 1989 年 1 月份开始, 在加州圣迭戈进行了蒸发波导监测和雷达探测试验^[15], 图 1 显示的是 1991 年 1 月 30 日 12 时 23 分 (UTC) 试验中测量的不同距离上的蒸发波导廓线特征。

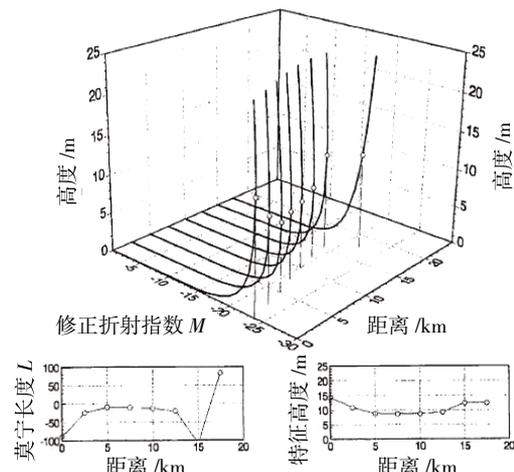


图 1 实测不同距离上的蒸发波导非均匀特征

从图中可以看出: 实测不同距离上的蒸发波导高度、蒸发波导廓线都存在差异, 图 1 左下图说明了 $M=0$ 长度随距离的变化特征, 右下图说明了蒸发波导高度随距离的变化特征。实际海洋大气环境中的蒸发波导普遍存在这种非均匀特征分布, 尤其是在近岸海域表现得更为明显。造成蒸发波导非均匀性的主要原因有: 海陆不同的热力学差异、由陆地吹向海上的大陆风、不同地点太阳辐射通量的差异。

2 非均匀性蒸发波导环境对雷达探测的影响

在开阔海域, 蒸发波导具有良好的水平均匀性。然而, 在近岸海域, 总是存在海陆气象条件的差

异,使蒸发波导的水平均匀性遭到破坏。由于蒸发波导水平非均匀性的监测方面存在较多的技术限制,在蒸发波导对雷达探测评估方面通常使用单一测点所在海域的折射廓线结构代表整个海域的波导环境,这种做法会造成雷达探测距离评估的误差。因而研究非均匀蒸发波导环境对雷达探测的影响非常有意义。

蒸发波导是海洋大气特有的异常折射结构,它能够使舰载雷达对海上目标实现超视距探测,同时会造成雷达的波导顶空盲区^[16]。通常情况下的办法是利用雷达所处位置的蒸发波导环境来评估雷达的探测距离,包括美国的 SEAWASP 系统也是如此。然而在实际中,由于蒸发波导具有水平非均匀性,仅用发射源一点的蒸发波导来评估雷达探测距离会产生误差。为准确评估蒸发波导条件下的雷达探测距离,本文综合考虑距雷达不同距离处的蒸发波导环境,分别利用 2002 年 5 月 20 日平潭岛铁塔数据和中尺度模式数据,评估 RM—1070 导航雷达的探测距离,分析蒸发波导水平非均匀性对雷达探测的影响。

图 2 表示发射源处蒸发波导环境下的雷达探测范围,从图中看出此时雷达最大探测距离 70 nmile,顶空有两个盲区孔,第一盲区孔的位置距离发射源 31 n mile、30 m 高处。图 3 表示水平非均匀性蒸发波导环境下的雷达探测范围,从图中看出此时雷达最大探测距离 70 n mile,顶空有 3 个盲区孔,第一盲区孔的位置距离发射源 40 n mile、22 m 高处。可见蒸发波导水平非均匀性改变了雷达顶空盲区的分布特征。

3 结论

蒸发波导能够影响电磁波的正常传播,而非均匀的波导环境又会改变均匀波导环境下电磁波的传播特性,给雷达探测造成显著的影响。本文通过建立非均匀蒸发波导诊断模型,以及模拟蒸发波导

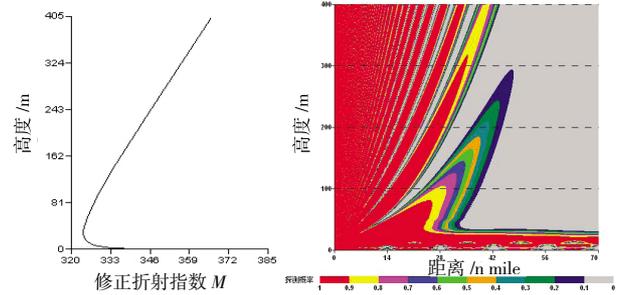


图 2 2002 年 5 月 20 日平潭岛单点蒸发波导环境下的雷达探测距离

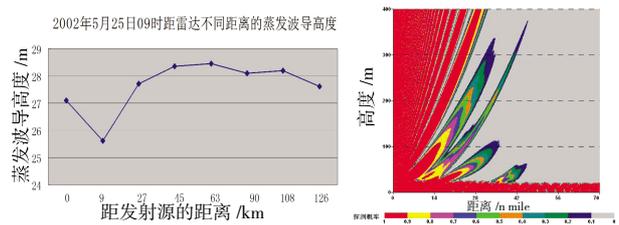


图 3 2002 年 5 月 20 日平潭岛不同距离蒸发波导环境下的雷达探测距离

水平非均匀性对雷达探测的影响,得到如下结论:

(1) 目前国内外蒸发波导诊断模式中均未考虑蒸发波导的近岸效应(水平非均匀性),本文利用 G L Geernaert 的方法以及张强通量廓线关系中普适函数的非线性修正因子很好地解决了这一问题。

(2) 通过利用铁塔数据和中尺度模式数据评估蒸发波导水平非均匀性对雷达探测的影响,得到水平非均匀的蒸发波导环境改变了均匀波导环境下的雷达顶空盲区分布特征。

此外,本文仅对蒸发波导的水平非均匀性进行了详细论述,表面波导的检测通常采用无线电探空法,探空设备包括火箭无线电探空仪和下投式无线电探空仪,悬空波导的检测一般采用高空气象探测法,探空设备需要高空气象探测雷达。因目前的实验条件所限,表面波导和悬空波导的非均匀性及其对雷达探测的影响有待于进一步的研究。

参考文献:

[1] 戴福山,李群. 大气波导及其军事应用[M]. 北京:解放军出版社,2002.
 [2] 黄小毛. 大气波导环境及其对雷达异常性能影响评估研究[D]. 大连:大连舰艇学院,2006.
 [3] M Zhu, B W Atkinson. Simulated climatology of atmospheric ducts over the Persian Gulf [J]. Boundary-Layer Meteorology,2005,115(1): 433-452.

- [4] K D Anderson. Radar measurements at 16.5 GHz in the oceanic evaporation duct[C]// IEEE Transactions on Antennas and Propagation 1989, 37(1):100–106
- [5] 张金鹏, 张玉石, 吴振森, 等. 基于雷达海杂波的区域性非均匀蒸发波导反演方法[J]. 物理学报, 2005, 64(12):136–146.
- [6] 郭凯凯, 杜晓燕. 基于水平非均匀蒸发波导的非互易性[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018, 16(3):458–463.
- [7] 庞佳玮, 杜晓燕, 张水莲, 等. 蒸发波导高度水平非均匀性对路径损耗的影响[J]. 电波科学学报, 2013, 28(6): 1054–1062.
- [8] 董道广, 芮国胜, 康健, 等. 基于优化滤波的水平非均匀蒸发波导反演算法[J]. 火力与指挥控制, 2016, 41(7):77–81
- [9] Shi Yang, Kun De Yang, Yi Xin Yang, et al. Experimental verification of effect of horizontal inhomogeneity of evaporation duct on electromagnetic wave propagation.[J]. Chinese Physics B, 2015, 24(4): 193–201.
- [10] G L Geernaert. On extending the flux–profile similarity theory to include quasi–homogeneous conditions in the marine atmospheric surface layer [J].Boundary–Layer Meteorology, 2002, 105(1): 433–450.
- [11] Babin S M. A new model of the ocean evaporation duct and its comparison with current models [D]. Maryland: University of Maryland at College Park, 1996.
- [12] 张强, 胡隐樵. 热平流影响下湿润地表的通量—廓线关系[J]. 大气科学, 1995(1):8–20.
- [13] Liu W T, K B Katsaros, J A Businger. Bulk parameterization of air–sea exchanges of heat and water vapor including the molecular constraints at the interface [J]. Atmos Sci, 1979, 36(1): 1722–1735.
- [14] Michael A Brunke, Chris W Fairall, et al. Which bulk aerodynamic algorithms are least problematic in computing ocean surface turbulent fluxes?[J]. Journal of Climate, 2003, 2(1):619–636.
- [15] Anderson K D. Radar detection of low–altitude targets in a maritime environment: final analysis [R]. Tech Rep 1630, NCCOSC RDT&E Division, 1993.
- [16] 焦林, 张永刚. 大气波导条件下雷达电磁盲区的研究[J]. 西安电子科技大学学报, 2004, 31(5): 815 – 820.

Diagnosis of the Horizontal Inhomogeneity Evaporation Duct and Its Influence on Radar Detection

WANG Ben–hong¹, JIAO Lin²

1. *Naval Staff Navigation Guarantee Bureau, Beijing 100841, China;*

2. *Dalian Naval Academy, Dalian 116018, Liaoning Province, China*

Abstract: Evaporation duct is a kind of anomalous refraction phenomenon in the marine boundary layer. Because of its wide distribution and high probability of occurrence, it is considered to be the most significant type of the duct, which has an important effect on the electronic equipment on the sea. However, due to the complex formation mechanism and the horizontal inhomogeneity in the offshore zone, the diagnosis and the application of the inhomogeneous evaporation duct have not been implemented in practical work. For the present situation, firstly the Monin–Obukhov similarity theory was modified by using the method proposed by G L Geernaert (2002), and it was extended to the conditions of the inhomogeneous atmosphere in the ocean surface layer. Secondly, based on the Babin model, the nonlinear correction factor proposed by Zhang Qiang and gust velocity item are introduced, so that the field of the application for the evaporation duct diagnosis model can be extended to the coastal areas and the very low wind speed. Thirdly, the influence of the horizontal inhomogeneous evaporation duct on the radar detection is studied, and the result shows that the horizontal inhomogeneous evaporation duct can change the detection distance and the distribution of the shadow zone for the radar.

Key words: horizontal inhomogeneity; evaporation duct; diagnosis; radar detection