

海上蒸发波导 PJ 模型在我国海区的适应性初步研究

左 雷, 察 豪, 田 斌, 田树森

(海军工程大学海洋电磁环境研究所, 湖北武汉 430033)

摘 要: 本文简述了海上蒸发波导的测量方法, 分析了气象水文参数测量误差对 Paulus Jeske (PJ) 模型的影响, 利用近两年海上实验采集的我国部分海区在各种气象条件下蒸发波导大气折射率剖面 and 海面气象水文数据, 研究了 PJ 模型的适用条件, 以及 PJ 模型估计出的蒸发波导高度与实测结果的偏差情况, 可为蒸发波导模型的修正和蒸发波导条件下雷达最大探测距离的预测提供参考。

关键词: 大气波导; 蒸发波导; 折射率剖面; 传播因子

中图分类号: TN011 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2009) 05-1100-04

An Initial Study on the Applicability of Paulus-Jeske Model of Evaporation Duct in Chinese Sea Areas

ZUO Lei, CHA Hao, TIAN Bin, TIAN Shu sen

(Institution of Oceanic Electromagnetic Environment, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China)

Abstract: The measurement of evaporation duct over sea is briefly described, and the influence of measuring error of hydrometeorological variable on the Paulus Jeske (abbr. P J) model is also analyzed. According to the refractive index section and the off-shore hydrometeorological data at partial internal sea areas collected experimentally in different weather conditions in recent two years, the conditions applying for P J model and the difference between evaporation duct height estimated by PJ model and that by actual measurement are studied. the result have good refering values for he correction of evaporation duct model and the forecast of the maximum radar detection range in the condition of evaporation duct.

Key words: atmospheric duct; evaporation duct; refractive index section; propagation factor

1 引言

蒸发波导是发生概率最高的海面大气波导, 因此对于海上远程微波通信和雷达超视距探测来说, 也最具利用潜力. 其成因主要是由海面向上几米至几十米空气中的水汽迅速下降, 使得折射率指数随着高度增加迅速减小所致. 蒸发波导通常用修正折射率高度剖面描述, 当修正折射率剖面确定后, 蒸发波导的高度即可求出, 通过电磁波传播模型和算法可以计算蒸发波导条件下, 海平面任意距离点的电磁波传播因子, 从而可以通过修正的雷达方程进行雷达最大探测距离的预估.

修正折射指数 M 由下式确定^[1,2]:

$$M = N + (Z/R_0) \times 10^6 = N - 0.157Z \quad (1)$$

式中 $R_0 = 6.317 \times 10^6 \text{m}$ 为平均地球半径, Z (单位: m) 为地表以上的高度, N 为大气折射指数, 其又可表示为大气温度 T (单位: K)、大气压力 P (单位 hPa) 和水汽压 e (单位 hPa) 的函数 $f(P, T, e)$, 其关系是由下式给出^[1]:

$$N = \frac{77.6}{T} \times \left| P + \frac{4810e}{T} \right| \quad (2)$$

蒸发波导的修正折射率剖面如图 1 所示, $dM/dz = 0$ 处为蒸发波导高度值 d

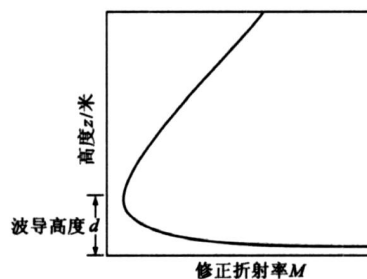


图1 蒸发波导折射率剖面图

从式(2)可以看出, 只要能够获得海面上沿高度向的温度、湿度和气压值, 就可以得到修正折射率剖面. 一般蒸发波导高度不超过 40m ^[3], 然而, 在海上测量这样一个

高度范围内的折射率剖面是非常困难的, 一般没有条件搭建能测量 $0-40\text{m}$ 范围内折射率剖面的平台, 而且也很难得到不受船体热导效应影响的折射率剖面数据. 为了回避测量各个高度上的气象参数值的难题, 人们想到利用一个或两个高度上测量的一组气象参数, 通过模型

推出所有高度上的折射率剖面, 由于 0-40m 的范围内恰好是近地层莫宁-奥布霍夫相似理论适用的范围, 对于守恒量在这个范围内都相等, H. Jeske 认为位折射率也是守恒量, 提出了 Jeske 模型^[4], 后经大量实验和 R. A. Paulus^[5]等人的修正基本被学者们认可并装入美海军 IREPS 系统, 得到很好的应用。目前常用的基于相似理论估算蒸发波导方法还有 MODEA 以及伪折射率模型, 但还在进一步完善中。

由于蒸发波导出现概率高, 意味着雷达对海面目标的探测距离起伏不定的概率很高, 因此, 要掌握雷达对海面目标的探测性能, 必须解决海上实际使用条件下通过模型或其它手段获得蒸发波导修正折射率剖面的问题。而我国在海上蒸发波导模型的实验验证工作基本上是空白。因此, 本文的目的是通过我国部分海区实验获得的蒸发波导高度数据与通过 PJ 模型计算得到的高度数据进行对比, 验证 PJ 模型在我国部分海区的适应性, 并研究其适用条件。

2 PJ 模型简介

PJ 模型用的是海面 6m 高度上的气温、相对湿度、风速和海水表面温度作为输入, 它假定海面大气压是常数 1000hPa。通过计算海面和 6m 处的位折射指数 N_p , 饱和水汽压 e_s (hPa) (Kieffer 1941) 和 6m 处水汽压 e 表达式为^[4]:

$$\begin{cases} e_s = 6.105 \exp(25.22t_c/T - 5.31 \ln(T/273.2)) \\ e \approx e_s/100 \end{cases} \quad (3)$$

式中 t_c (单位 $^{\circ}\text{C}$)、 T (单位 K) 指温度, r 是 6m 处的相对湿度。假设位温、位水汽压等于实际温度、实际水汽压, $\partial N_p / \partial z$ 可写为:

$$\frac{\partial N_p}{\partial z} = \frac{\partial N}{\partial z} - \frac{\partial N}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (4)$$

其中 $\partial N / \partial z$ 是折射率梯度, Paulus 利用流体静力学关系和理想气体定律, 得出 $b_c = -0.125$ 是蒸发波导的临界值, 然后用 b_c 代替 $\partial N_p / \partial z$, 解关于 z 的方程, 可求出波导高度。设波导高度为 d , 则海面大气 Z 米高度的大气修正折射率 $M(z)$ ^[6] 为:

$$M(z) = M(z_0) + 0.125(z - z_0) - 0.125 \frac{d}{\phi(d/L)} \int_{z_0}^z \frac{\phi(z'/L)}{z'} dz' \quad (5)$$

其中 z_0 为海面粗糙度, 一般取 0.00015m, z 为海面以上的高度, 单位为 m, L 为 Monin-Obukhov 长度, $\phi(z)$ 为普适函数。

对稳定层结^[6]

$$\int_{z_0}^z \frac{\phi(z'/L)}{z'} dz' = \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) + \frac{\beta}{L} (z - z_0) \quad (6)$$

对不稳定层结

$$\int_{z_0}^z \frac{\phi(z'/L)}{z'} dz' = \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) - \Psi \left(\frac{z}{L} \right) \quad (7)$$

$$\Psi \left(\frac{z}{L} \right) = 1 - \Phi_2 - 3 \ln \Phi_2 + 2 \ln \left[\frac{1 + \Phi_2}{2} \right] + 2 \tan^{-1}(\Phi_2) - \frac{\pi}{2} + \ln \left[\frac{1 + \Phi_2^2}{2} \right] \quad (8)$$

$\Phi_2 = \Phi(z/L)$ 可由下式通过牛顿迭代法得到^[4]

$$\Phi_2^4 - 4\alpha(z/L) \Phi_2^3 = 1, \alpha = 4.5 \quad (9)$$

对中性层结 $\Phi(z/L) = 1$, 则

$$M(z) = M(z_0) + 0.125(z - z_0) - 0.125d \ln(z/z_0) \quad (10)$$

层结稳定性由气象测量计算得到整体理查森数决定。整体理查森数是热力稳定性和风应力的无量纲比值。稳定情况下正值, 中性情况下为零, 不稳定情况为负值。Jeske 定义理查森数 Ri_b 为^[7]:

$$Ri_b = \frac{g \Delta T z}{Tu^2 \Gamma} \quad (11)$$

g 为重力加速度 (9.8ms^{-2}), z 是测量高度 (6m), T 是测量处的温度 (K), ΔT 是气海温差, u 是 6m 的风速, Γ 是剖面系数。 L 为莫宁霍夫长度。

3 PJ 模型的敏感性分析

为了更好的分析 PJ 模型的适用性, 首先分析一下其对各气象要素的敏感性。输入量为参考高度 (6m) 处的相对湿度、大气温度、风速、气压以及海水温度, 下面分析当其他输入量不变的情况下, 某一因素发生改变对蒸发波导高度产生的影响。设气压为 1000pa 不变, 风速分别为 2.5m, 5m, 7.5m 条件下相对湿度由 50% 等间隔变化到 100%, 气海温差由 -5°C 等间隔变化到 5°C 。气象要素敏感性分析图如图 2-4 所示:

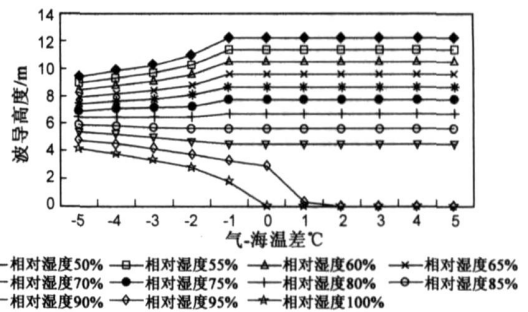


图2 风速2.5m/s, 气压1000pa, 气象要素敏感性分析图

当气-海温差为负时可认为不稳定层结, 为零时为中性层结, 为正时为稳定层结。从图 2, 4 中可以得出:

(1) PJ 模型得到的波导高度对风速和相对湿度的变化较为敏感, 无论什么层结条件下, 当其它条件不变时, 波导高度随风速增加而增加, 随相对湿度增加而降低。

(2) 不稳定层结时, 对气海温差变化也比较敏感。

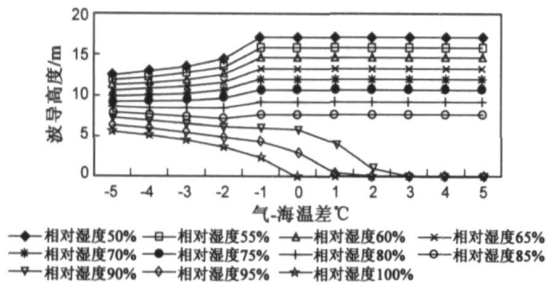


图3 风速5m/s,气压1000pa,气象要素敏感性分析图

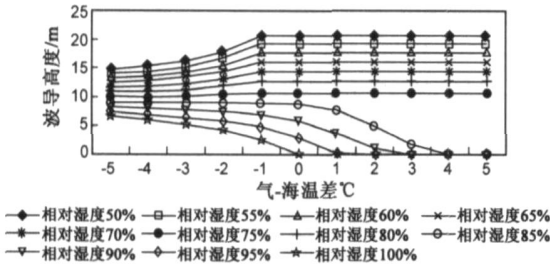


图4 风速7.5m/s,气压1000pa,气象要素敏感性分析图

当气-海温差向 x 轴正方向增大时,相对湿度较低的数据求出的波导高度先增加,当气海温差增大到-1时,波导高度不变,相对湿度较高的数据求出的波导高度随气海温差增大降低。

(3) 稳定层结时,相对湿度较高数据求出波导高度随气海温差增大而降低,相对湿度较低数据求出的波导高度保持不变。

(4) 稳定或中性层结条件下,能求出波导高度不变的相对湿度范围随风速增大而减小。

4 PJ 模型验模实验内容

在我国某三个海域分别进行蒸发波导测量实验,实验在覆盖了三个海区的四个季节,共采集了 900 多组海面气象水文数据和 200 多组探空剖面数据。海面气象水文数据利用架设在小木船上的自动气象站采集,为避免船体辐射影响,自动气象站架设在船头,航向与风向的夹角大于 30° 。温度、湿度、气压和风速、风向传感器距离海面 6m 高,海表温度传感器放入水中,进入水面 20-50cm,船在航行中测量,且测量船距离大陆约 40km,选择海风条件下进行实验,避免陆地气流影响。



图5 海上探空数据采集实验

风速、风向按十分钟平均,其它参数采集按 1 分钟平均。系留探空气球也选择在实验船上释放,确保测量的剖面与自动气象站在同一地理位置。探空球携带有探空 RS-90 传感器,采集数据包括温度、湿度、气压、风速和风向,采样间隔时间为 2s。释放时速度控制在 0.5m/s,高度在 40m 以下。设置初始测量高度为 3m,各传感器精度列于表 1 和表 3。

表1 探空 RS-90 传感器精度范围

气温	相对湿度	气压
0.2°C	2%	0.5hPa

表2 ZQZ-CY 移动式自动气象站传感器技术指标

传感器	测量范围	单位	准确度
气压	550~1060	hPa	±0.3
风速	0~75	m/s	±(0.3+0.03V)
气温	-50~+50	°C	±0.15
水温	-20~+50	°C	±0.15
湿度	0~100%	%RH	±2%RH(0~90RH) ±3%RH(90~100RH)

5 与实测对比结果

实测蒸发波导高度的判断方法为^[8]

$$M = f_0 z - f_1 \ln(z + 0.001) + f_2 \quad (13)$$

其中 f_0, f_1, f_2 为代估系数, z 为波导高度,利用探空数据中的高度序列(一般每米取一个点)以及所求得修正折射率序列,利用 Matlab 中的非线性最小二乘估计函数 lsqcurvefit 能够求得代估系数,则通过上面的公式可以绘制出修正折射率廓线得出实测蒸发波导高度。以东海某日测量为例实测与 PJ 模型计算的蒸发波导高度曲线图 6。

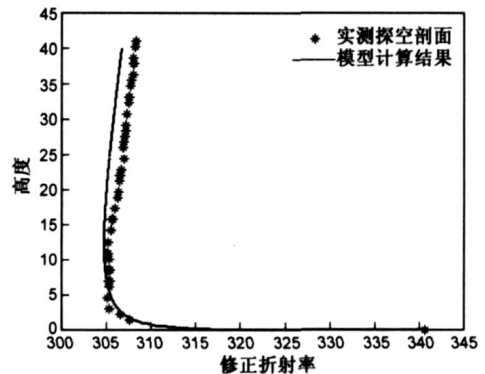
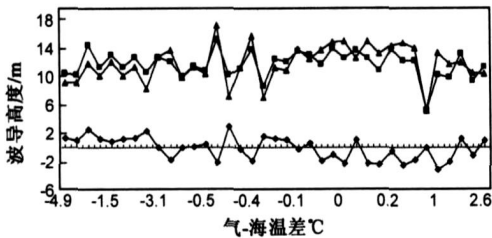


图6 某时段PJ模型所得剖面与实测对比图

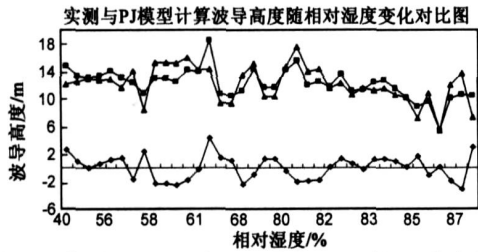
根据实验采集的气象水文数据和探空剖面数据,经过数据处理,取自动气象站与释放探空球时间吻合的气象数据,除去外部环境干扰较多的部分数据进行计算分析,如图 7 所示,取 37 个较为代表的实测剖面用最小二乘估计而得到蒸发波导的高度与 6m 处气象参数带入 PJ 模型计算结果得到的蒸发波导高度偏差图。



→ 实测-PJ模型高度差 → 实测波导高度 → PJ模型计算波导高度

图7 实测与PJ模型计算波导高度随气海温差变化图

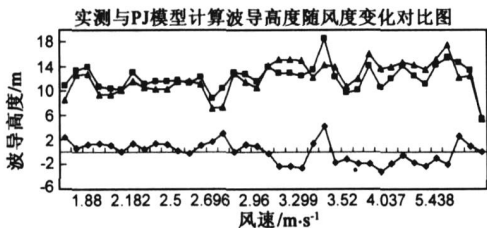
小, 大部分在 2m 之内。不稳定条件下模型计算结果整体偏低; 中性和稳定条件下模型计算结果整体偏高。



→ 实测-PJ模型高度差 → 实测波导高度 → PJ模型计算波导高度

图8 6米处对应相对湿度变化曲线

从图 8 中可以看出, 相对湿度在 80% 以上的时候, 整体上模型计算波导高度和实测波导高度都随相对湿度的增加而降低。符合 PJ 模型敏感性的分析。另外, 相对湿度在 75% ~ 85% 范围内的偏差比其它范围内的要小。



→ 实测-PJ模型高度差 → 实测波导高度 → PJ模型计算波导高度

图9 6米处对应风速变化曲线

由图 9 中可以看出, 风速在 3m 以下时, 模型计算结果整体偏低; 风速在 3m 以上时, 模型计算结果整体偏高。

6 结论与误差分析

通过 PJ 模型的敏感性分析和实测波导高度与模型计算结果比较可以看出:

(1) 模型对相对湿度和风速变化比较敏感, 相对湿度在 80% 以上的时候, 模型计算和实测波导高度都随相对湿度的增加而降低。风速较大时模型计算结果偏差也随之大。

(2) 不稳定条件和风速在 3m 以下时, 模型计算结果整体偏低; 中性与稳定条件和风速在 3m 以上时, 模型计算结果整体偏高。

(3) 相对湿度在 75% ~ 85% 范围内的偏差比其它

范围内的要小, 即 PJ 模型在此范围内更适用。

在实验中, 存在一些不可避免的误差, 如传感器的自身存在精度范围, 而海上风浪大时所引起的船体上下浮动也可能导致测量的高度误差, 当实验船在海上航向变动时, 对风速的影响也可能使修正起来出现一定误差。因此, 从实验结果上看, PJ 模型在我国更适合应用在相对湿度 75% ~ 85% 的小风速条件下的海区。

参考文献:

- [1] Bean B R, Dutton E J. *Radiometry* [A]. New York: Dover Publication Inc, 1968. 435.
- [2] 阿林贝尔格. 公尺波与公分波的传播[M]. 北京: 国防工业出版社, 1959. 259.
- [3] 姚展予, 赵柏林, 李万彪. 大气波导特征分析及其对电磁波传播的影响[J]. 气象学报, 2000, 58(5): 605-616. Yao Zhanyu, et al. The analysis on characteristics of atmospheric duct and its effects on the propagation of electromagnetic wave [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2000, 58(5): 605-616. (in Chinese)
- [4] H Jeske. The state of radar range prediction over sea. *Tropospheric radio wave propagation, part II* [A]. Advisory Group for Aerospace Research and Development, [C] Paris, France: 1971. 50-1-50-10.
- [5] Paulus R A. Practical Application of an Evaporation Duct Model [J]. *Radio Science*, 1985, 20(4): 887-896.
- [6] 戴福山. 海洋大气近地层折射指数模式及其在蒸发波导分析上的应用[J]. 电波科学学报, 1998, 13(3): 280-286. Dai Furshan. The refractivity models in the marine atmospheric surface layer and their applications in the evaporation duct analysis [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 1998, 13(3): 280-286. (in Chinese)
- [7] 戴福山. 海上蒸发波导高度的确定及其敏感性试验[J]. 空军气象学院学报, 1997, 18(4): 290-300.
- [8] 姜健飞, 等. 数值分析及其 MATLAB 实验[M]. 北京: 科学出版社, 2004. 102-103.

作者简介:



左 雷 男, 工程师, 海军工程大学博士在读, 研究方向为海上大气环境下的雷达探测规律研究. E-mail: zoulehaode2005@163.com

蔡 豪 男, 海军工程大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为雷达总体技术, 在国家和军队科研项目中多次获奖。