

# 用伪折射率和相似理论计算海上蒸发波导剖面

刘成国<sup>1,2</sup>, 黄际英<sup>1</sup>, 江长荫<sup>2</sup>, 蔺发军<sup>2</sup>

(1. 西安电子科技大学理学院, 陕西西安 710071; 2. 中国电波传播研究所, 河南新乡 453003)

**摘 要:** 本文说明了以伪折射率为相似参量用相似理论估算蒸发波导高度的理论方法. 由于海面附近折射率梯度变化可近似认为与气压无关, 所以定义了伪折射率, 推导了其相似公式, 得到了蒸发波导高度满足的方程和一般文献都未给出的  $M$  剖面计算公式. 本文给出了本方法的计算机模拟典型结果, 利用实测海洋资料计算的蒸发波导高度等参数的统计结果蒸发波导剖面以及海上折射率测量结果和本方法预测结果的对比结果等, 这些结果表明本文给出的方法是有效的.

**关键词:** 蒸发波导; 相似理论; 折射率剖面

**中图分类号:** TN011 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 07-0970-03

## Modeling Evaporation Duct over Sea with Pseudo-Refractivity and Similarity Theory

LIU Cheng-guo<sup>1,2</sup>, HUANG Ji-ying<sup>1</sup>, JIANG Chang-yin<sup>2</sup>, LIN Fa-jun<sup>2</sup>

(1. School of Science, Xidian University, Xi'an, Shanxi 710071, China;

2. China Research Institute of Radiowave Propagation, Xinxiang, Henan 453003, China)

**Abstract:** The theoretic method used for calculating evaporation duct height is described based on similarity theory with pseudo-refractivity  $N_p(h)$  as similarity variable. With the approximation of refractivity gradient independent of air pressure in the vicinity of sea surface, a parameter, the pseudo-refractivity  $N_p(h)$  as we call, is defined. The  $M$  profile of evaporation duct, which is always not available in references, is given explicitly. The modeling results of evaporation duct height and the calculated results of evaporation duct parameters from the measured weather data are in agreement.

**Key words:** evaporation duct; refractivity profile; similarity theory

### 1 引言

雷达探测系统和通信系统的设计是基于一定的大气模式的, 例如我国雷达系统使用 GB<sup>[1]</sup> 给出的大气模式. 事实上大气环境通常偏离这些大气模式, 致使系统工作性能不同于设计指标, 特别是波导环境出现时基于这些大气模式的系统性能预测不再适用. 因而实用中需要给出波导结构的存在参数, 以确定处于其中的系统工作性能. 在海上, 蒸发波导的存在往往是永久或半永久性的, 它对海上运作的雷达等无线电系统有很大的影响. 已有研究表明<sup>[2]</sup>, 海上运作的雷达系统的作用范围 (尤其是近海面的作用范围), 在 80% 以上的时间中需要确切获知蒸发波导的参数才能准确预估. 因而国内外都很重视对海上蒸发波导的研究. 出于测量方法的易用性和实时性等方面的考虑, 利用海面气象要素预测蒸发波导参数的方法很受重视. 从 70 年代 Jeske 提出这一方法以后<sup>[3]</sup>, 人们从诸多方面展开了气海作用理论预测蒸发波导参数的研究. R. A. Paulus 在 1985 年提出了一个修正的实用模型<sup>[4]</sup>, 1991 年 John Cook 提出了先预测温湿剖面, 再预测蒸发波导剖面的方

法<sup>[5]</sup>. 国内也有单位开展蒸发波导的研究<sup>[6,7]</sup>. 作者在研究波导的过程中, 注意到折射率是反映大气结构的直接参数, 通过对大气边界层理论的仔细研究, 提出了以伪折射率为相似参量利用相似理论计算蒸发波导高度和剖面的方法. 本文对这一方法的基本理论公式、计算机模拟的基本结果和利用实测数据得到的有关统计结果等作了详细说明.

### 2 蒸发波导高度和蒸发波导剖面的满足的方程式

#### 2.1 蒸发波导的基本描述

海上蒸发波导是由于海水的蒸发而形成的一种贴海波导, 其主要参数是蒸发波导高度 ( $z$ ). 蒸发波导高度不同于其他低空大气波导所指的高度<sup>[6]</sup>, 该高度事实上表明了蒸发波导的厚度和强弱, 它是修正折射率梯度由负变为正时的高度. 由蒸发波导高度可以计算出蒸发波导剖面, 确定蒸发波导修正折射率变化量.

#### 2.2 伪折射率

离地面高度  $h$  处的空气折射率  $N(h)$  是空气绝对温度

$T(h)$  湿度  $e(h)$  和压力  $P(h)$  的函数:

$$N(h) = 77.6 \left[ \frac{P(h)}{T(h)} + 4810 \frac{e(h)}{T^2(h)} \right] \quad (1)$$

其中  $T(h)$ 、 $e(h)$  和  $P(h)$  的单位分别为 K、hPa、hPa。将式(1)对  $h$  微分,忽略海面附近参量的变化对各参量梯度系数的影响,取标准大气条件即  $P_0 = 1013.25$  hPa,  $T_0 = 288$  K,  $e_0 = 10.13$  hPa,得折射率的梯度:

$$\frac{dN(h)}{dh} = 0.269 \frac{dP(h)}{dh} - 1.263 \frac{dT(h)}{dh} + 4.495 \frac{de(h)}{dh} \quad (2)$$

通常情况下,对流层中空气压力  $P(h)$  可由指数形式很好地给出,即:

$$P(h) = P_0 \exp(-h/h_0) \quad (3)$$

这里  $P_0$  是地面空气压力,  $h_0$  是均质大气高度,  $h_0 = \frac{RT}{g\mu}$ ,  $R$  为普适气体常数,  $g$  为重力加速度,  $\mu$  是空气分子量。在海平面附近空气为水汽含量较高的湿空气,典型情况下可近似为 28.84,所以海面附近

$$\frac{dP(h)}{dh} = 0.1192 \text{ hPa/m} \quad (4)$$

于是可以得到海面附近空气折射率满足:

$$\frac{dN(h)}{dh} = 0.032 - 1.263 \frac{dT(h)}{dh} + 4.495 \frac{de(h)}{dh} \quad (5)$$

由于在蒸发波导高度  $z$  处:

$$\left. \frac{dN(h)}{dh} \right|_{h=z} = 0.157 \text{ N/m} \quad (6)$$

所以蒸发波导高度  $z$  满足:

$$4.495 \left. \frac{de(h)}{dh} \right|_{h=z} - 1.263 \left. \frac{dT(h)}{dh} \right|_{h=z} = 0.125 \text{ N/m} \quad (7)$$

定义伪折射率  $N_p(h)$  为

$$N_p(h) = 4.495 e(h) - 1.263 T(h) \quad (8)$$

则

$$\frac{dN_p(h)}{dh} = 4.495 \frac{de(h)}{dh} - 1.263 \frac{dT(h)}{dh} \quad (9)$$

显然,  $N_p(h)$  在蒸发波导高度  $z$  处满足:

$$\left. \frac{dN_p(h)}{dh} \right|_{h=z} = -0.125 \text{ N/m} \quad (10)$$

### 2.3 伪折射率的相似表达式与蒸发波导高度的方程

在大气边界层理论参数化理论中,大气参数随高度的变化由相似理论通过相应的尺度通量描述,风速  $U(h)$ 、位温  $\theta(h)$  和比湿  $q(h)$  分别由下式给出<sup>[8]</sup>:

$$U(h) = \frac{U_*}{h} \left[ \ln\left(\frac{h}{z_0}\right) - \phi_M(h/L) \right] \quad (11)$$

$$\theta(h) = \theta_0 + 0.74 \frac{g_*}{k} \left[ \ln\left(\frac{h}{z_0}\right) - \phi_H(h/L) \right] \quad (12)$$

$$q(h) = q_0 + 0.74 \frac{q_*}{k} \left[ \ln\left(\frac{h}{z_0}\right) - \phi_H(h/L) \right] \quad (13)$$

其中  $U_*$ 、 $g_*$  和  $q_*$  分别是风速、位温和比湿相应的尺度通量,  $\theta_0$  和  $q_0$  是位温和比湿初值,  $k$  是冯卡门常数;  $L$  是 Monin Obukov 稳定长度,  $z_0$  是表面粗糙度长度,  $\phi_M(h/L)$ 、

$\phi_H(h/L)$  是反映风速剖面、位温和比湿剖面偏离中性层结的函数,大气研究的结果已得到它们分别满足的关系式,参见有关文献<sup>[8]</sup>。 $\phi_M(h/L)$  是和无量纲风切变  $\phi_M(h/L)$  相联系的:

$$\phi_M(h/L) = 1 - h \left( \frac{dM}{dh} \right) \quad (14)$$

$\phi_H(h/L)$  也具有相同的关系式。

在海面附近可认为位温  $\theta(h)$  和比湿  $q(h)$  分别正比于空气温度  $T(h)$  和湿度  $e(h)$ 。这样温度和湿度具有和相似关系式(12)~(13)相同形式的相似关系:

$$T(h) = T_0 + 0.74 \frac{T_*}{k} \left[ \ln\left(\frac{h}{z_0}\right) - \phi_H(h/L) \right] \quad (15)$$

$$e(h) = e_0 + 0.74 \frac{e_*}{k} \left[ \ln\left(\frac{h}{z_0}\right) - \phi_H(h/L) \right] \quad (16)$$

其中  $T_*$  和  $e_*$  是与  $U_*$  等具有同样意义的参量。

将式(15)和(16)代入式(8),可得伪折射率的相似关系为:

$$N_p(h) = N_{p0} + 0.74 \frac{N_p^*}{k} \left[ \ln\left(\frac{h}{z_0}\right) - \phi_H(h/L) \right] \quad (17)$$

其中  $N_p^*$  是和  $T_*$  等意义相同的参量,它满足:

$$N_p^* = 4.495 e_* - 1.263 T_* \quad (18)$$

利用式(10)的关系可知蒸发波导高度  $z$  满足方程:

$$0.74 N_p^* \phi_H(h/L) = -0.125 k z \quad (19)$$

### 2.4 蒸发波导剖面

利用相似关系式(17),有伪折射率  $N_p(h)$  梯度

$$\frac{dN_p(h)}{dh} = 0.74 \frac{N_p^*}{kh} \phi_H(h/L) \quad (20)$$

将式(19)、关系式(14)代入可得

$$dN_p(h) = - \frac{0.125 z}{\phi_H(h/L)} \left[ \frac{dh}{h} - d\phi_H(h/L) \right] \quad (21)$$

对上式从紧贴海面的  $z_0$  到  $z_0 + h$  积分可得

$$N_p(h) = - \frac{0.125 z}{\phi_H(h/L)} \left( \ln \frac{z_0 + h}{z_0} - \left[ \phi_H\left(\frac{z_0 + h}{L}\right) - \phi_H\left(\frac{z_0}{L}\right) \right] \right) \quad (22)$$

而由式(2)、(4)和(9)有:

$$N(h) = N(0) + N_p(h) - 0.032 h \quad (23)$$

修正折射率  $M(h)$  和折射率  $N(h)$  的关系为:

$$M(h) = N(h) + \frac{h}{6.37} \quad (24)$$

于是

$$M(h) = M(0) - \frac{0.125 z}{\phi_H(z/L)} \left\{ \ln \frac{z_0 + h}{z_0} - \left[ \phi_H\left(\frac{z_0 + h}{L}\right) - \phi_H\left(\frac{z_0}{L}\right) \right] \right\} + 0.125 h \quad (25)$$

这就是蒸发波导剖面。通过函数  $\phi_H(h/L)$  和  $\phi_M(h/L)$  式(19)和(25)就反映了空气稳定性的影响。

这样利用上述各式,只要测出一定高度  $z_1$  上的空气温度  $T_1$  空气湿度  $e_1$  风速  $U_1$  和海水表面温度  $T_0$ ,利用迭代法即可求出蒸发波导高度  $z$ 。

## 3 计算机模拟结果和有关试验结果

用上述理论对不同气海界面条件下蒸发波导高度的计算

机模拟结果表明,气海温差对蒸发波导高度的影响一般是在 -1 以下时,其变化不明显,而在 0~2 时有很大的变化. 作为典型例子本文给出海水温度为 15 时,湿度为 90%、30% 的情况下不同风速 (m/s) 不同气海温差所对应的蒸发波导高度图图 1,海水温度 15°,  $v$ 、 $r$  表示风速和相对湿度. 从中可明显看出不同气海温差的影响.

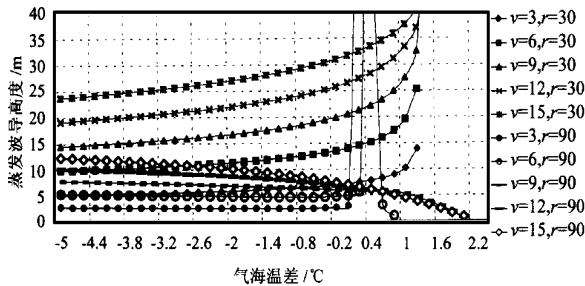


图 1 利用气海作用理论模拟蒸发波导高度

利用 1997 年 10 月份在崇武和东山的测量数据,我们计算了两地的蒸发波导高度等电波传播研究感兴趣参数和蒸发波导剖面. 图 2 给出的是两地的蒸发波导高度分布. 图 3 给出了其中一天中 08、14、20 时的蒸发波导剖面的计算结果. 2000 年 1 月用微波折射率仪和 ADAS 系统在南海测得有波导出现的概率 74%, 本方法计算结果有蒸发波导出现的概率为 70%, 两者结果的吻合率达到 52%.

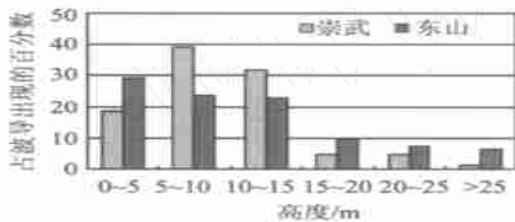


图 2 1997 年 10 月崇武和东山海域的蒸发波导高度分布

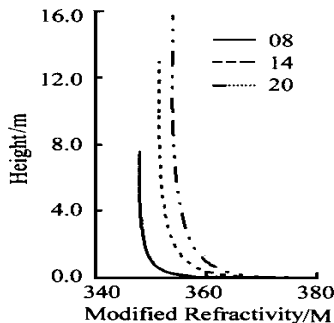


图 3 1997 年 10 月某天中 08、14、20 时东山海域的蒸发波导剖面的计算结果

## 4 讨论

本文利用伪折射率和相似理论详细地推导了蒸发波导高度、剖面的方程和公式,该方法从开始就充分考虑了空气稳定

度的影响,推导基于普通的物理参量,易于理解,其结果分别由式(19)和(25)给出. 由于在中性条件下,参数  $n(h/L)$  和  $\phi_H(h/L)$  分别为 0 和 1,则中性条件下式(25)变成:

$$M(h) = M(0) + 0.125(h - z_0) \ln \frac{z_0 + h}{z_0} \quad (26)$$

该式和文献[3]的结果完全相同. 图 2 的统计结果在不同地域允许的差别下和已有的统计结果吻合<sup>[3]</sup>,再加上试验测试结果,都表明这一方法是可行的. 在战场环境中它的输入数据可以方便的测定,具有直接测量其剖面所无法比拟的优势,所以也具有实用意义.

## 参考文献:

- [1] 江长荫,等. 雷达电波传播折射与衰减手册 [M]. 国防科学技术委员会,1997:3-4.
- [2] Jeske, H. The state of radar range prediction over sea [A]. in Tropospheric radio wave propagation, Part [C], AGARD CP-70, pap. 50, 1971.
- [3] 刘成国译. 海上蒸发波导统计分析 [J]. 电波与天线, 1995, 3: 5-9.
- [4] R A Paulus. Practical application of an evaporation duct model [J]. Radio science, 1985, 20(4): 887-896.
- [5] John Cook. A sensitivity study of weather data inaccuracies on evaporation duct height algorithms [J]. Radio science, 1991, 26(3): 731-746.
- [6] 刘成国,等. 中国低空大气波导出现概率和特征量的统计分析 [J]. 电波科学学报, 1996, 11(2): 60-66.
- [7] 戴福山. 海上蒸发波道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] 张杏珍,等译. 中尺度气象模拟 [M]. 气象出版社, 1990 年.

## 作者简介:



刘成国 男, 1966 年 8 月生于河南丰丘. 高级工程师, 1991 年成都科学技术大学应用物理所获硕士, 同年到中国电波传播研究所工作至今, 现为西安电子科技大学博士生, 主要研究领域为对流层电波传播研究和对流层电波环境研究.

黄际英 男, 1962 年毕业于武汉大学物理系, 现任西安电子科技大学教授, 博士导师, 中国电子学会会士, 主要从事随机媒质中电波传播和电磁散射等方面的研究.

江长荫 男, 研究员, 中国电子学会会士, 清华大学 1959 年无线电技术专业毕业, 1963 年无线电物理专业研究生毕业, 目前主要从事通信与雷达的电波传播理论研究.