doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2019.01.016

蒸发波导环境测量方法对比分析

许　晨, 王心鹏, 刘　宁
(国家海洋技术中心, 天津　300112)

摘　要: 蒸发波导现象显著影响海上电磁波传播, 快速获取大范围精确的修正折射率参数成为了蒸发波导研究热点。文中分析了现有的蒸发波导预测模型, 对其中的经典模型进行了仿真, 对比不同模型的仿真结果, 总结了模型方法预测波导高度及修正折射率廓线的不足。然后从硬件角度出发对比现有蒸发波导测量系统原理、测量精度及适用条件, 分析测量系统引入的误差源进而给出了不同测量系统的改进方向, 总结出修正折射率廓线测量系统应具备的测量精度及数据条件。最后通过方法间对比及蒸发波导实测数据的应用过程分析, 对不同方法未来的研究方向和发展趋势进行了展望。

关键词: 蒸发波导; 大气折射率测量; 预测模型
中图分类号: P714+.3　　**文献标志码**: A　　**文章编号**: 1003-2029(2019)01-0102-09

蒸发波导是海—气分界层常见的大气结构, 由于高度方向上湿度锐减导致折射率指数急剧变化, 该现象会显著影响电磁波传播, 海上目标定位、雷达测距、通信不可避免要受到蒸发波导影响。目前获取海上蒸发波导重要参数主要有 3 种方法: 一是常用的蒸发波导预测模型; 二是将能够测量相应气象参数的硬件测量系统放置在待测海洋环境中获得实测散点数据, 通过曲线拟合方法得到修正折射率廓线进而获得蒸发波导高度和强度; 三是采用雷达实测数据反演修正折射率廓线。

1　蒸发波导预测模型

蒸发波导预测模型的思路是给出模型假设和典型实测数据, 推导出折射率廓线的直接表达式。预测模型依据莫宁-奥布霍夫相似理论 (简称 M-O 理论): 对于定长、水平均匀、无辐射和无相态变化的近地面层, 其运动学和热力学结构仅决定于湍流状况。M-O 理论给出的是一种相对稳定的状态下近地层气象学物理量高度方向上的描述, 定义中的物理量可以认为是折射率, 也可以是计算折射率的气象参数, 两种不同的思路推导出两类不同的模型[1-2], 一类包括最早提出的 P-J 模型和我国学者刘成国等提出的伪折射率模型; 另一类包括 MGB 模型、A 模型、NPS 模型及海气通量模型。蒸发波导预测模型专用于预测海上蒸发波导现象, 但依据 M-O 相似理论给出的气象参数普适函数适用于整个近地层。目前蒸发波导预测模型算法方面突破较少, 近年来研究热点主要集中在 M-O 理论给出的普适函数形式及针对不同模型的实测数据适用性分析两方面。

1.1　P-J 模型

P-J 模型[3-4]是研究最早、应用最广泛的蒸发波导预测模型, 20 世纪 70 年代 Jeske 提出位折射率概念, 假设位折射率是相似变量, 在折射率临界梯度为-0.125 的波导条件, 计算出蒸发波导高度, 经 Paulus 修正得到最终的蒸发波导高度。李诗明等[5]认为虽然蒸发波导高度与奥布霍夫长度 L 之间有某些关系但修正过程没有物理意义, 计算波导高度过高只能说明模型不适用, 获得波导高度这一关键

收稿日期: 2018-04-10
基金项目: 国家重点研发计划重点专项课题资助(2016YFC1400501); 国家海洋技术中心创新基金重点项目资助(K51700403)
作者简介: 许晨(1993-), 男, 硕士研究生, 主要从事海洋观测技术研究。E-mail:1121182898@qq.com

变量后,修正折射率廓线可由相似理论微分形式积分得出。P-J 模型通过气海温差判断大气层结稳定性,其判断依据有局限性,没有充分考虑其它气象因素例如风速、压强变化等对大气层结稳定性的影响,因此一系列学者在衡量大气层结稳定性方面对 P-J 模型进行了研究[6],应用 P-J 模型计算蒸发波导高度及修正折射率廓线的计算流程如图 1 所示。

1.2　NPS 模型

NPS 模型[7-8]使用海面上 6 m 处的气象参数作为输入量,它与 P-J 模型的主要区别在于其首先计算温度、湿度、气压的廓线表达式,然后代入折射率计算公式从而得到修正折射率廓线[13]。

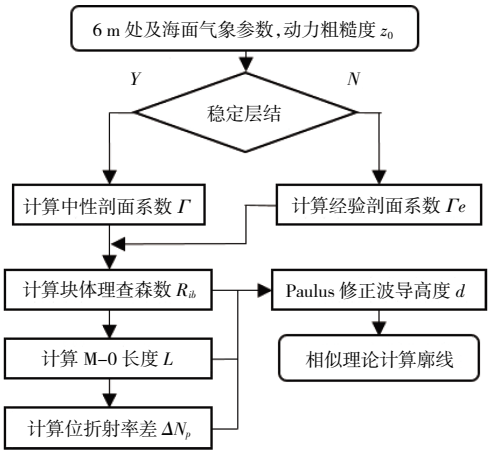


图 1　P-J 模型计算流程

Fig.1　Calculation process of the P-J model

NPS 模型采用 COARE2.6 算法来确定海表层尺度参数和海面粗糙度,海气通量算法[10-11]目前更新至 COARE3.0 版本。COARE3.0 算法通过大量实测经验模型对海表层气象参数进行修正, 同时需要更多气象参数,例如海流、降雨量、热通量等。应用 NPS 模型计算蒸发波导高度及修正折射率廓线流程如图 2 所示。

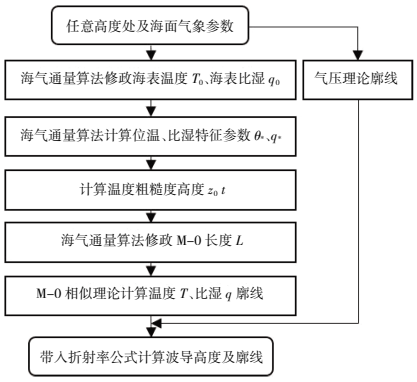


图 2　NPS 模型计算流程

Fig.2　Calculation process of the NPS model

1.3　其它预测模型

MGB 模型[12]、BYC 模型[12-13]是在 P-J 模型基础上对一些不合理假设进行修正后得出的模型,两模型认为中性大气条件下不能将位折射率看成相似变量, 然后从大气折射率梯度表达式出发:MGB 模型依据 M-O 相似理论, 认为位温与比湿是相似变量,采用近地面层通量参数化方法计算位温、比湿尺度参数, 认为气压满足静力平衡计算波导高度,通过 M-O 相似理论及普适函数积分得修正折射率廓线;BYC 模型也采用了 MGB 模型的基础理论,使用 6 m 高度及海面气象参数时使用海气通量模型 COARE2.5 算法对风速、海面动力粗糙度、海面饱和水汽压、奥布霍夫长度及海表温度进行了修正,采用修正后的参数,海气通量模型给出的位温、比湿特征参数 θ_*、q_* 代入相似理论中的普适函数, 给出位温、比湿廓线,与气压理论廓线联立,最终计算出波导高度及修正折射率廓线,MGB/BYC 模型的计算流程如图 3 所示。伪折射率模型提出了伪折射率概念,认为伪折射率是相似变量,可以通过 M-O 相似理论中的普适函数求出,但在求取伪折射率特征参数 Np_* 的过程中使用与 u_*,T_*,e_* 间的关系,u_*,T_*,e_* 采用了海气通量算法对计算过程进行了修正,是一种继承 P-J 模型重要假设的气象模型。

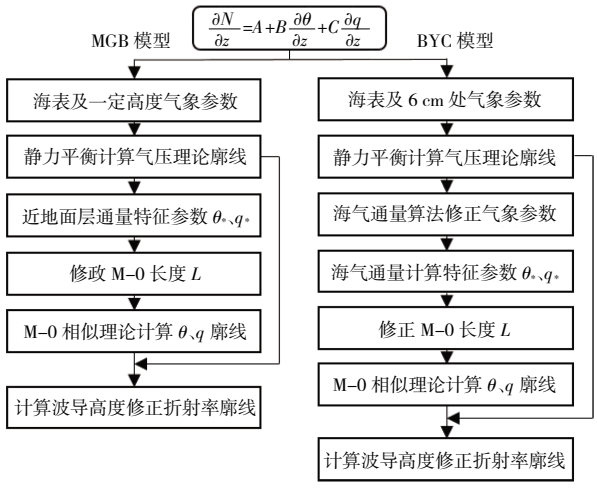


图 3　MGB、BYC 模型计算流程

Fig.3　Calculation process of MGB and BYC model

1.4　模型仿真结果分析

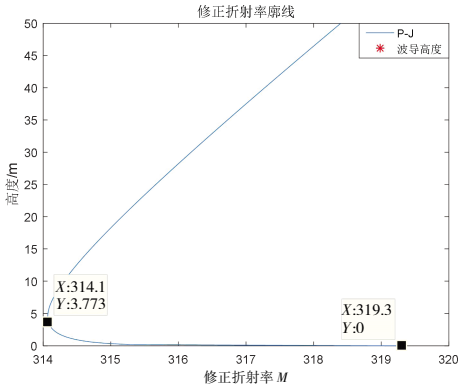
为了对比不同气象模型预测波导高度间差异,采用 P-J、NPS、BYC、伪折射率模型,给定参数对模型预测过程进行仿真,计算波导高度及修正折射率廓线, 表 1 列出不同模型采用气象参数,NPS、BYC 模型不需要海表湿度,除 P-J 模型外其他 3 种模型

的粗糙度需要根据海气通量算法计算，因此表中未列出。

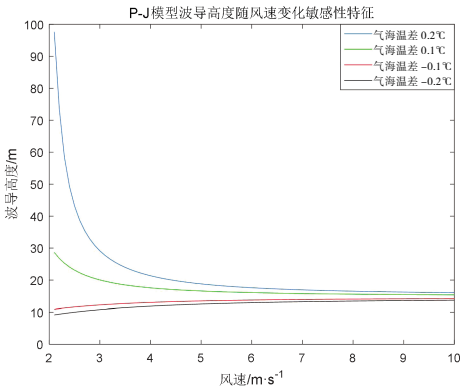
表 1 模型仿真气象参数

Tab.1 List of meteorological parameters used in model simulation

模型	风速 /m·s^{-1}	海表气压 /hPa	海表温度 /℃	6 m 温度 /℃	海表湿度 /%	6 m 湿度 /%	粗糙度 /m
P-J	4.6	1 008	2.2	1.6	99	85	0.000 15
NPS	4.6	1 008	2.2	1.6	–	85	–
BYC	4.6	1 008	2.2	1.6	–	85	–
伪折射率	4.6	1 008	2.2	1.6	99	85	–



(a) 修正折射率廓线

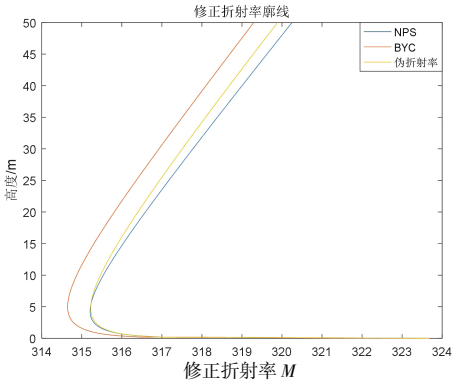


(b) 风速敏感性特征

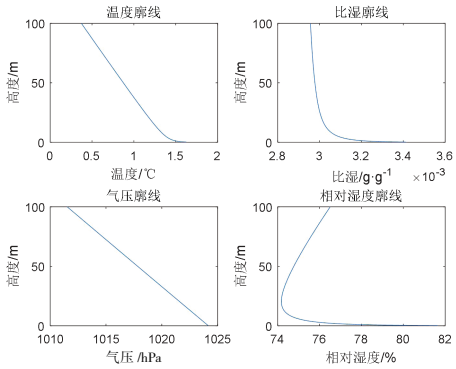
图 4 P-J 模型仿真结果

Fig.4 Simulation results of P-J model

P-J 模型给出的预测结果及波导高度随风速变化敏感性特征如图 4 所示。图(a)给出的 P-J 模型预测波导高度为 3.773 m，强度为 5.2 个单位，图(b)为海表温度 20 ℃、相对湿度 85%的条件下 P-J 模型的风速敏感性特征，在稳定条件下波导高度远远超过 40 m，这也就是很多文章中提到的低风速稳定条件下 P-J 模型失效的情况。相同的参数条件下，其它模型给出的蒸发波导高度及 NPS 模型气象参数廓线如图 5 所示。



(a) 修正折射率廓线



(b) NPS 模型气象参数廓线

图 5 其他模型仿真结果

Fig.5 Simulation results of the other models

从图 5(a)中可以看出，不同模型给出的蒸发波导高度略有差异，说明利用模型来估计蒸发波导高度有不确定性。PJ、BYC、伪折射率模型给出的修正折射率廓线的曲线差异的原因是应用 M-O 相似理论时采用的普适函数[8-9,11,17-19]形式不同，图 5(b)给出了 NPS 模型采用普适函数预测出的气象参数廓线结果，可以看出蒸发波导的成因是海表相对湿度在高度方向上锐减。为了获得精确的修正折射率廓线验证普适函数及预测模型，很多学者研究利用硬件测量设备直接获取大气折射给出波导高度及廓线。

2 蒸发波导硬件测量系统

蒸发波导硬件系统主要有 3 种：利用探空仪对大气温度、湿度、压强分别进行测量，将测量结果代入折射率公式计算折射率；直接使用折射率仪通过共振点频率与折射率的对应关系测量折射率；使用 Raman 激光雷达系统遥测大气温度、湿度，进而代

入折射率计算公式得到折射率,硬件测量方法不存在环境条件局限,实测折射率廓线可以用于验证预测模型理论或现场评估雷达威力范围。

2.1　探空仪测量系统

探空仪通过测量气象参数来计算折射率,国内外生产的探空仪种类很多[20],其中维萨拉探空仪凭借其测量精度及稳定性,通常作为其他探空仪的标定标准。我国探空仪发展起步较晚,主要型号有“五九型”探空仪、GTS1-2 探空仪、GPS 探空仪等,主要品牌包括华云、长峰等。探空仪通过单片机控制传感器测定相关参数并将其代入式(1),其原理如图 6 所示。

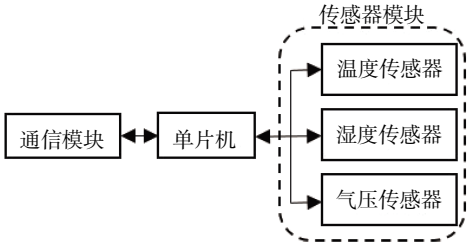


图 6　探空仪测量系统原理

Fig.6　The principle of the measuring system of the sounding instrument

探空仪测量数据包括大气温度、相对湿度、气压,折射率的计算如式(1)。

$$N=77.6\times p/T+3.73\times10^5\times e/T^2 \tag{1}$$

式中:T 为温度(K);P 为气压(hPa);e 为水汽压(hPa),转化为修正折射率 N_m,计算如式(2)。

$$N_m=N+0.157\times h \tag{2}$$

式中:h 为测量点高度(m)。探空仪一旦释放无法回收增加了测量成本而且探空仪释放后获取的数据并非严格同步也无法做到对蒸发波导进行实时观测[21-22],传感器响应迟滞导致测量高度不可控。

2.2　电容式折射率仪

仅靠折射率理论公式及其参数测量并不能准确描述大气折射率。张瑜等[23]设计的电容式折射率仪通过测量谐振腔共振频率的方式获取大气折射率,为折射率测量提供了另一种思路。该方法减小随机误差源的引入从而提升折射率测量精度[24],其测量原理如图 7 所示。

电容式折射率仪体积较大,适合应用于有固定平台的岸边及近海,无法应用于广阔海面,仪器只能测量空间内某一点的折射率,无法同时测量同一位置不同高度剖面数据,改变高度测量会导致测量

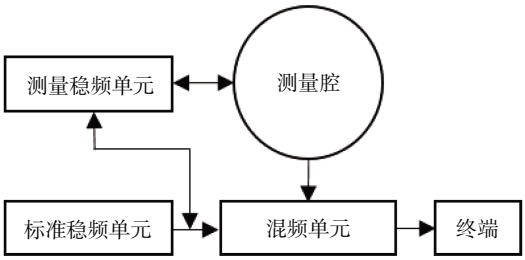


图 7　电容式折射率仪原理

Fig.7　The principle of capacitive refractive index meter

值之间存在时间差。

2.3　Raman 激光雷达系统

探空仪测量结果高度不可控、折射率仪测量位置固定导致两种方法测量数据实时性不足。21 世纪初出现了能够遥测大气温度及相对湿度廓线的 Raman 激光雷达系统 [18],20 世纪 70 年代美国宾夕法尼亚州立大学开始研究可用于测量电磁环境的 Raman 激光雷达,至今已发展到第 6 代,其垂直分辨率可达 3 m,时间分辨率约为 5 min,温度误差不大于 1 K,水汽混合比误差不大于 5%,测量精度与探空仪相当。德国霍恩海姆大学、瑞士洛桑联邦理工学院等都在研究大气探测激光雷达。马征征等[27]对 Raman 激光雷达系统的测量过程进行了仿真,对其原理进行了公式化描述,其水汽压测量公式如式(3)。

$$E(r)=P_{N_2}(r)\times n_{H_2O}/n_{N_2} \tag{3}$$

式中:E 为水汽分压;P_{N_2}为氮气分压;均随高度 r 分布。

激光器发射不同波段的电磁波照射到大气中,接收器获取大气中不同尺度的分子后向散射回波信号,处理后得到不同分子所占比例从而给出大气水汽压参数进而获得相对湿度廓线。Raman 激光雷达系统具有实时性强、数据量大、观测数据连续、操作性强等优势,弥补了传统方法的不足,但也有一些缺点,例如:需要探测起始高度、受光路限制、距离与时间分辨率低,设备复杂难以使用普通舰船搭载至海域中进行观测。

3　雷达反演算法

3.1　雷达海杂波反演算法

雷达海杂波是海表面对雷达发射信号的后向散射回波,存在蒸发波导的海面上,雷达可以接收到超视距海杂波信号,海杂波信号中包含了蒸发波导的空间结构信息,随着雷达技术、电磁波传播理

论和反演算法的不断发展,利用雷达海杂波反演修正折射率廓线的技术取得了较大进展。

雷达海杂波反演修正折射率廓线是一个正演、反演结果匹配的过程,该方法涉及的主要问题是如何选取海杂波模型、大气波导环境模型、传播算法和全局最优化算法。反演算法流程相同,不同算法间的差别主要体现在海杂波模型及全局优化算法,常用的优化算法模型有以下 4 种:

(1) 基于模拟退火算法的反演模型;

(2) 基于马尔科夫链的蒙特卡罗算法反演模型;

(3) 基于序列重要性抽样的反演模型;

(4) 基于神经网络方法的反演模型。

反演算法原理如图 8 所示,王波、左雷等分别采用不同优化算法反演蒸发波导[28-29],反演过程首先给出雷达实测海杂波图, 选择某方位角下的海杂波功率,采用优化算法迭代参数,正向修改参数代入模型, 匹配实测海杂波功率图给出波导参数最优解。

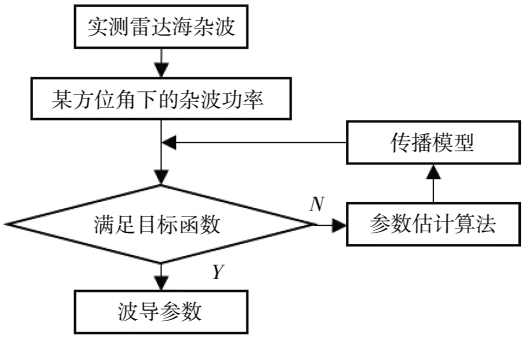


图 8 雷达海杂波反演算法流程

Fig.8 Flow chart of the radar sea clutter inversion algorithm

在实际应用中, 海杂波模型需要海面散射系数、风速、风向、平均浪高等环境参数,需要波浪浮标、气象水文浮标提供数据支持,传播算法及全局优化算法要求硬件设备具有快速的计算能力,实地布放过程受雷达尺寸、发射功率局限。

3.2 雷达威力范围反演算法

雷达威力范围反演算法与海杂波反演算法原理相同,模型的匹配参数是雷达探测距离。近年来随着海洋观测的发展,我国近海蒸发波导的发生区域及高度分布特征更加明显,焦林、张鹏[30-31]等结合了不同尺度的再分析数据及 P-J 模型预测了我国部分海区的蒸发波导高度,为实现雷达威力范围反演蒸发波导高度提供了实验时间、区域指导;田斌等进一步结合电磁波传播的抛物方程,给出了蒸发波导发生情况下的最低陷获频率[32],为雷达频段选择提供了参考。

一些学者在我国近海蒸发波导频发区域进行了雷达威力范围反演试验,闫仲钰等[33]结合雷达方程、抛物方程及 P-J 模型,得到海上实测雷达探测距离与模型预测距离在超视距传播条件下十分吻合的结论;崔萌达等[34]对蒸发波导预测模型中的海表水温参数测量过程进行了修正,并将修正结果应用至反演算法中使模型预测距离更接近真值。

雷达反演修正折射率廓线具有响应快、遥测数据、测量范围广等优势,但也有一些不足,例如无法控制反演过程中通过全局优化算法计算出的波导结构参数误差,雷达回波中包含体杂波、干扰及噪声信号,影响测量值进而最终影响反演结果。

4 三类方法误差分析

测量系统给出的修正折射率测量结果存在误差,可以分为系统误差和随机误差两部分。系统误差通常可以控制在一定范围内,随机误差可以通过提升输入参数精度减小。三类方法的测量结果均包含系统误差和随机误差,但误差源不同,因此需要采取不同的方法提升精度。

4.1 预测模型误差

预测模型的系统误差来源于模型结构,M-O 理论假设气象参数水平均匀分布会带来误差,通量算法中参数计算大量使用经验公式也会导致计算误差, 其中最重要的误差源是相似理论中的重要假设——某时某地总结出的普适函数能否适用于不同时刻的其它区域,这一假设简化了近地层运动的物理过程, 直接给出了近地层相似变量的普适形式, 其结果是否准确对预测结果有决定性影响,因此结合实测数据进一步修正 M-O 相似理论中的普适函数对提升预测精度更有效。随机误差来源于输入模型的气象参数,模型结果对相对湿度误差最敏感,减小这部分误差有助于提升模型预测精度。

4.2 硬件测量误差

4.2.1 *探空仪元器件及其误差* 探空仪的系统误差由折射率计算公式引入,式(1)为半经验公式,计算折射率存在 0.5%的误差。随机误差由温度、湿度、压强传感器测量参数引入,郭启云等[35-36]分析了航天科工集团和中国华云技术开发公司国产 GPS 探空仪的测量结果,程显海提出了各个参量测量误差

的具体衡量标准及来源,其认为温度测量误差主要是感应元件滞后误差和辐射误差,其次是由于元件沾湿和敏感元件表面水蒸发状况[37];气压测量误差是由于金属膜盒本身由于温度变化产生的误差;相对湿度测量误差是由于测量元件本身受温度影响,尤其在低温情况下几乎无法测量湿度,主要表现为滞差。为了解决这个问题,罗毅等[38]提出了用于探空仪的加热式湿度传感器及测量电路提升相对湿度测量精度。

4.2.2　*折射率仪误差*　电容式折射率仪的测量误差是随机误差,由于其直接测量折射率,因此理论上不存在系统误差,表 2 总结了 3 种主要测量系统测量精度。

表 2　不同测量系统折射率误差

Tab.2　Refractive errors of different measurement systems

	探空仪	电容式折射率仪	Raman 激光雷达
折射率误差	±3	±1.5	±6.3

4.2.3　*Raman 激光雷达误差*　Raman 激光雷达的系统误差由式(1)引入,随机误差来源于接收器对于不同波段散射信号的处理过程及光学部分获得的测量误差，这两部分误差影响气象参数的测量结果。表 3 给出了两种利用气象参数计算折射率的方法测量误差。探空仪数据较 Raman 激光雷达数据精度高,因此 Yong Han 等[39]采用探空仪数据来评估 Raman 激光雷达的测量结果。现有 Raman 激光雷达的测量结果不能满足实时监测蒸发波导精细结构的测量要求,水汽压,氮气分压不均影响其计算精度，计算过程中所采用的吸收模型例如 RTE76、RTE93 等不准确也会带来误差,Raman 激光雷达测量修正折射率的技术尚未成熟。

表 3　气象参数误差

Tab.3　Meteorological parameter errors

测量系统	温度/K	湿度/%	压强/hPa
激光雷达	±1	±5	–
探空仪	±0.3	±2	±1.5

4.3　海杂波反演算法误差

雷达海杂波反演算法的系统误差包括最优化算法对波导参数估计误差、蒸发波导固定模型形式带来的曲线拟合误差、蒸发波导中电磁波传播模型的计算误差。随机误差包括雷达海杂波图测量过程中引入的电磁环境噪声,硬件设备噪声,另外雷达海杂波反演算法需要精确的波导场边界条件,边界条件参数不准确也会带来随机误差。该方法系统误差源多,随机误差受环境参数影响大,在实际应用中反演结果不稳定,计算结果精度不高。

5　结 论

本文通过对比分析三种获取蒸发波导参数及修正折射率廓线方法的原理、优势及不足,得出了如下结论:

(1) 蒸发波导预测模型计算出的波导高度及修正折射率廓线有一定理论依据,刘爱国等[40]采用 P-J 模型结果评估海上电磁波传播损耗，但是其预测精度不高[41],其预测结果只能用作辅助决策,不同模型间差异主要是 M-O 理论的应用方法及普适函数的选择，需要大量有效数据改进参数预测模型,提高预测精度，对于近岸不符合 M-O 理论假设的情况,需要寻找新的理论支持。

(2) 三种硬件测量系统给出的蒸发波导高度及修正折射率廓线是实测结果,但受限于设备本身硬件条件及观测范围、波导水平不均的情况下,设备测量得到单一位置的修正折射率廓线无法应用于雷达威力范围评估及预测模型分析,而且测量器件存在误差,因此需要更精确的、大范围实时监测蒸发波导的测量系统。

(3) 利用雷达数据反演修正折射率廓线具响应快、测量范围广等优势,但反演结果易受海况、反演算法误差影响,反演精度无法保证,因此还需要与实测数据对比,从最优化算法设计和环境参数获取两方面提升其可靠性。

参考文献:

[1] 漆随平,王东明,郭颜萍,等. 海上蒸发波导的预测方法综述[J]. 海洋通报, 2012, 31(3):347-353.
Qi Suiping, Wang Dongming, Guo Yanping, et al. A review of the prediction methods of ocean evaporation waveguide [J]. Ocean Bulletin, 2012, 31(3):347-353. (in Chinese)

[2] 斯塔尔. 边界层气象学导论[M]. 青岛:青岛海洋大学出版社, 1991.
Stahl. Introduction to boundary layer meteorology [M]. Qingdao:Qingdao Ocean University Press, 1991.(in Chinese)

[3] Paulus R. Practical application of an evaporation duct model [J]. Radio Science, 1985, 20(4):887–896.

[4] Jeske H. State and limits of prediction methods of radar wave propagation conditions over sea [M]. Modern Topics in Microwave Propagation and Air–Sea Interaction. Springer Netherlands, 1973:130–148.

[5] 李诗明,陈陟,乔然,等. 海上蒸发波导模式研究进展及面临的问题[J]. 海洋预报, 2005, 22(z1):128–139.
Li Shiming, Chen She, Qiao Ran, et al. Research progress and problems of ocean evapotranspiration waveguide model [J]. Ocean Prediction, 2005, 22(z1):128–139. (in Chinese)

[6] 郭相明,康士峰,张玉生,等. 蒸发波导模型特征及其适用性研究[J]. 海洋预报, 2013, 30(5):75–83.
Guo Xiangming, Kang Shifeng, Zhang Yusheng, et al. Characteristics and applicability of evaporation waveguide model [J]. Ocean Prediction, 2013, 30(5):75–83. (in Chinese)

[7] 杨少波,李醒飞,吴建宾,等. 基于 NPS 蒸发波导预测模型的适应性研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(12):1899–1906.
Yang Shaobo, Li Xingfei, Wu Jianbin, et al. Research on adaptability of prediction model of evaporation waveguide based on NPS [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(12):1899–1906. (in Chinese)

[8] Fairall C, Bradley E, Rogers D, et al. Bulk parameterization of air–sea fluxes for tropical ocean–global atmosphere coupled–ocean atmosphere response experiment[J]. Journal of Geophysical Research Oceans, 1996, 101(C2):3747–3764.

[9] Beljaars A, Holtslag A. Flux Parameterization over Land Surfaces for Atmospheric Models[J]. Journal of Applied Meteorology, 1987, 30 (3):327–341.

[10] 刘立行,李煜斌,等.基于非迭代海 – 气通量算法的蒸发波导预测模型研究[J].应用海洋学学报,2017(4):474–486.
Liu Lixing, Li Yubin, et al. Study on evaporative waveguide prediction model based on non–iterative sea–air flux algorithm [J]. Journal of Applied Oceanography,2017(4):474–486. (in Chinese)

[11] Fairall C, Bradley E, Hare J, et al. Bulk Parameterization of Air Sea Fluxes: Updates and Verification for the COARE Algorithm[J]. Journal of Climate, 2003, 16(4):571–591.

[12] Musson–Genon L, Gauthier S, Bruth E. A simple method to determine evaporation duct height in the sea surface boundary layer[J]. Radio Science, 2016, 27(5):635–644.

[13] Babin S, Young G, Carton J. A new model of the oceanic evaporation duct.[J]. Journal of Applied Meteorology, 1997, 36(3):193–204.

[14] Babin S, Dockery G. LKB–based evaporation duct model comparison with buoy data [J]. Journal of Applied Meteorology, 2010, 41(4): 434–446.

[15] 刘成国,黄际英,江长荫,等. 用伪折射率和相似理论计算海上蒸发波导剖面[J]. 电子学报, 2001, 29(7):970–972.
Liu Chengguo, Huang Jiying, Jiang Changyin, et al. Calculation of Marine evaporative waveguide profile using pseudo refractive index and similarity theory [J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(7):970–972. (in Chinese)

[16] 田斌,察豪,李杰,等. 蒸发波导伪折射率模型特性[J]. 火力与指挥控制, 2010, 35(12):73–75.
Tian Bin, Cha Hao, Li Jie, et al. Characteristics of pseudo–refractive index model of evaporative waveguide [J]. Fire and Command and Control, 2010, 35(12):73–75. (in Chinese)

[17] Panofsky H. Determination of stress from wind and temperature measurements [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1963, 89(379):85–94.

[18] Businger J. Flux profile relationships in the atmospheric surface layer[J]. J Atmos Sci, 1971, 28(28):181–189.

[19] Grachev A, Fairall C, Bradley E. Convective Profile Constants Revisited[J]. Boundary–Layer Meteorology, 2000, 94(3):495–515.

[20] 王悦,王春雨. 基于大气折射指数的多点数据采集系统设计[J]. 电子科技, 2013, 26(10):76–78.
Wang Yue, Wang Chunyu. Design of multi–point data acquisition system based on atmospheric refraction index [J]. Electronic Science and Technology, 2013, 26(10):76–78. (in Chinese)

[21] 翁锦辉,罗建平,王凡,等. 气象探空数据动态比对中误差计算方法研究[J]. 气象研究与应用, 2010, 31(3):75–77.
Weng Jinhui, Luo Jianping, Wang Fan, et al. Research on the calculation method of median error in dynamic comparison of meteorological sounding data [J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2010, 31(3):75–77. (in Chinese)

[22] 马颖,姚雯,黄炳勋. 59 型与 L 波段探空仪温度和位势高度记录对比[J]. 应用气象学报, 2010, 21(2):214–220.
Ma Ying, Yao Wen, Huang Bingxun. Comparison of temperature and geopotential height records of type 59 and l–band sonde [J]. Chinese Journal of Applied Meteorology, 2010, 21(2):214–220. (in Chinese)

[23] 张瑜,师帅涛. 精确测量大气折射率的微波折射率仪[J]. 海军工程大学学报, 2009, 21(4):26–29.
Zhang Yu, Shi Shuaitao. Microwave refractive index meter for accurate measurement of atmospheric refractive index [J]. Journal of Naval Engineering University, 2009, 21(4):26–29. (in Chinese)

[24] 张爱丽,王艳军,张瑜. 蒸发波导测量仪器的精度分析与检验[J]. 西安电子科技大学学报:自然科学版, 2012, 39(4):191–196.
Zhang Aili, Wang Yanjun, Zhang Yu. Precision analysis and test of evaporative waveguide measurement instruments [J]. Journal of Xi 'an University of Electronic Science and Technology (Natural Science Edition), 2012, 39(4):191–196. (in Chinese)

[25] Sun Y, Mao J. The design of signal acquisition and processing of Rotational Raman temperature measuring lidar system[C]//Control and Decision Conference. IEEE, 2016:4330–4333.

[26] 范建业,高山红,康士峰,等. 基于气象梯度仪的蒸发波导探测[J]. 无线电工程, 2012, 42(11):32–33.
Fan Jianye, Gao Shanhong, Kang Shifeng, et al. Evaporation waveguide detection based on meteorological gradiometer [J]. Radio Engineering, 2012, 42(11):32–33. (in Chinese)

[27] 马征征,王晓宾. 悬空波导的激光雷达探测能力个例研究[J]. 电波科学学报, 2014, 29(5):928–931.
Ma Zhengzheng, Wang Xiaobin. A case study on the lidar detection capability of a suspended waveguide [J]. Journal of Radio Wave Science, 2014, 29(5):928–931. (in Chinese)

[28] 王波,吴振森,赵振维,等. 基于蚁群算法的雷达海杂波反演蒸发波导研究[J]. 电波科学学报, 2009, 24(4):598–603.
Wang Bo, Wu Zhensen, Zhao Zhenwei, et al. Research on radar sea clutter inversion evaporative waveguide based on ant colony algorithm [J]. Journal of Radio Wave Science, 2009, 24(4):598–603. (in Chinese)

[29] 左雷, 王春雨, 金丹,等. 基于雷达海杂波与蒸发波导模型参数化的反演方法研究[J]. 舰船电子工程, 2017, 37(3):78–82.
Zuo Lei, Wang Chunyu, Jin Dan, et al. Research on the inversion method based on the parameterization of radar sea clutter and evaporation waveguide model [J]. Ship Electronic Engineering, 2017, 37(3):78–82. (in Chinese)

[30] 焦林,李云波,张永刚.中国近海蒸发波导区划研究[J].海洋技术学报,2017,36(3):7–12.
Jiao Lin, Li Yunbo, Zhang Yonggang. Study on the zoning of China's offshore evaporative waveguide [J]. Journal of Ocean Technology, 2017,36(3):7–12. (in Chinese)

[31] 张鹏,张守宝,等.区域海面蒸发波导预报与监测试验对比分析[J].电波科学学报,2017,3(2):215–220.
Zhang Peng, Zhang Shoubao, et al. Comparative analysis of prediction and monitoring experiments of regional surface evaporation waveguide [J]. Journal of Radio Wave Science,2017,3(2):215–220. (in Chinese)

[32] 田斌,葛义军,等.西印度洋峡湾海区蒸发波导对电磁波传播影响研究[J].四川大学学报:工程科学版,2017,49(4):104–110.
Tian Bin, Ge Yijun, et al. Study on the influence of evaporation waveguide on electromagnetic wave propagation in the western Indian Ocean fjord [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition),2017,49(4):104–110. (in Chinese)

[33] 闫仲钰,张利军,等.蒸发波导环境测量与雷达探测性能分析[J].雷达科学与技术,2017,15(3):301–305,311.
Yan Zhongyu, Zhang Lijun, et al. Environmental measurement and radar detection performance analysis of evaporative waveguide [J]. Radar Science and Technology,2017,15(3):301–305,311. (in Chinese)

[34] 崔萌达,察豪,田斌.雷达威力预报技术中海表温度测量及修正方法[J].哈尔滨工业大学学报,2017,49(5):116–121.
Cui Mengda, Cha Hao, Tian Bin. Measurement and correction of SST in radar power prediction technology[J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2017,49(5):116–121. (in Chinese)

[35] 郭启云,李峰,郭凯,等. 新型 GPS 探空仪与业务 GTS1–2 探空仪对比分析[J]. 气象科技, 2015, 43(1):59–64.
Guo Qiyun, Li Feng, Guo Kai, et al. Comparative analysis of new GPS sonde and service gts1–2 sonde [J]. Meteorological Science and Technology, 2015, 43(1):59–64. (in Chinese)

[36] 李伟,赵培涛,郭启云,等. 国产 GPS 探空仪国际比对试验结果[J]. 应用气象学报, 2011, 22(4):453–462.
Li Wei, Zhao Peitao, Guo Qiyun, et al. International comparison test results of domestic GPS sonde [J]. Chinese Journal of Applied Meteorology, 2011, 22(4):453–462. (in Chinese)

[37] 程显海,张玉生,等. 基于气象探空数据计算的大气折射率误差分析[J]. 电波科学学报, 2014, 29(5):951–956.
Cheng Xianhai, Zhang Yusheng, et al. Analysis of atmospheric refractive index error based on meteorological sounding data [J]. Journal of Radio Wave Science, 2014, 29(5):951–956. (in Chinese)

[38] 罗毅,施云波,杨昆,等. 用于探空仪的加热式湿度传感器及测量电路[J]. 光学精密工程, 2014, 22(11):3050–3060.
Luo Yi, Shi Yunbo, Yang Kun, et al. Heating humidity sensor and measuring circuit for sonde [J]. Optical Precision Engineering, 2014, 22(11):3050–3060. (in Chinese)

[39] Han Y, Snider J, Westwater E, et al. Comparison of water vapor measurements by microwave radiometers and Raman lidar [C]// Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1994. IGARSS '94. Surface and Atmospheric Remote Sensing: Technologies, Data Analysis and Interpretation. International. IEEE Xplore, 1994:2046-2049 vol.4.

[40] 刘爱国, 察豪. 海上蒸发波导条件下电磁波传播损耗实验研究[J]. 电波科学学报, 2008, 23(6):1199-1203.
Liu Aiguo, Cha Hao. Experimental study on propagation loss of electromagnetic wave under sea evaporative waveguide [J]. Journal of Radio Wave Science, 2008, 23(6):1199-1203. (in Chinese)

[41] 蔺发军,刘成国,潘中伟. 近海面大气波导探测及与其它研究结果的比较[J]. 电波科学学报, 2002, 17(3):269-272.
Lin Fajun, Liu Chengguo, Pan Zhongwei. Detection of near-surface atmospheric waveguide and comparison with other research results [J]. Chinese Journal of Radio Wave Science, 2002, 17(3):269-272. (in Chinese)

Comparative Analysis of the Methods for Obtaining the Evaporation Duct Environmental Parameters

XU Chen, WANG Xin-peng, LIU Ning

National Ocean Technology Center, Tianjin 300112, *China*

Abstract: The evaporation duct has a significant effect on the propagation of electromagnetic waves on the sea. The rapid acquisition of large scale accurate refractive index parameters has become a research hotspot of evaporation duct. This paper firstly analyzes the existing prediction model of evaporation duct and simulates the classical model. Then the prediction model of evaporation duct height is established and the lack of correct refractive index profile is summarized by comparing the simulation results of different models. In order to sum up the measurement accuracy and data conditions that the measuring system should have, and analyze the error source introduced by the measurement system aiming at the improvement direction of different measurement systems, this paper compares the original principle, measurement accuracy and applicable conditions of the existing evaporation duct measurement system from the perspective of hardware. Finally, the future research direction and development trend of different methods are summarized through the comparison of the methods and the analysis on the application process of the measured data used in evaporation duct environmental parameter calculation.

Key words: evaporation duct; refractive index measurement; prediction model