

中国东南沿海地区大气反常结构遥感初探

王宁^{1,2}, 郭立新¹, 赵振维², 丁宗华², 林乐科²

1. 西安电子科技大学 物理与光电工程学院, 西安 710071;

2. 中国电波传播研究所 电波环境特性及模化技术重点实验室, 青岛 266107

摘要: 对流层大气作为电波传播的主要媒介, 其大气剖面参数直接影响无线电系统的作用距离和导航、定位精度, 因此, 研究大气剖面的微波遥感技术, 尤其是大气反常结构, 对分析评估无线电信息系统在复杂大气环境条件下工作性能和提供电波折射修正精度等具有重要的应用价值。中国东南沿海地区一直是研究的热点区域, 本文选取青岛、射阳、厦门、海口4个站的气象探空仪观测数据, 统计了这些地区大气波导的平均高度和厚度, 对采用地基多通道微波辐射计的天顶和扫描角亮温遥感其参数的算法进行了初步探索, 提出了改进的组合神经网络算法来判别并遥感大气波导。同时, 使用多年的探空数据对该算法进行了仿真验证, 并用青岛气象站的实测数据验证了该算法的精度。结果表明该算法可用于遥感大气反常结构, 并且与以往的算法相比更加实用、有效, 可为雷达、通信、导航等系统设备提供环境信息保障。

关键词: 大气波导, 学习矢量化(LVQ)网络算法, 径向基函数(RBF), 地基多通道微波辐射计—大气辐射亮温

中图分类号: P407.7 **文献标志码:** A

引用格式: 王宁, 郭立新, 赵振维, 丁宗华, 林乐科. 2017. 中国东南沿海地区大气反常结构遥感初探. 遥感学报, 21(6): 948–954

Wang N, Guo L X, Zhao Z W, Ding Z H and Lin L K. 2017. Primary exploration of the algorithm of retrieving troposphere abnormal structure in the southeast coast of China. Journal of Remote Sensing, 21(6): 948–954 [DOI:10.11834/jrs.20176331]

1 引言

大气环境是电磁波空间传播的重要媒介, 尤其是天气变化多端的对流层。电磁波在近地层中传播, 不仅受到大气折射, 大气中气体分子、气溶胶的吸收、散射还会造成其衰减(刘成国, 2003)。在陷获折射条件下, 电磁波会在大气薄层内来回反射并向前传播, 就像在金属波导管中传播一样, 这种现象叫做大气波导。

大气波导的存在会显著改变电磁波的传播路径和范围, 可能使雷达, 尤其是微波雷达观测到数倍于正常探测距离处的目标, 实现超视距探测。但同时可能存在信号中断、雷达杂波、雷达空洞、雷达盲区等现象, 造成目标丢失、定位失效等问题。在通信上, 可能会对通信链路产生严重、复杂的干扰。此外, 还会引起导航系统较大

的定位误差。因此, 根据实际的大气环境分析、预测和预报大气波导现象而趋利避害, 对提高现有系统的全天候工作能力和设计更合理的无线电探测设备都有重要的研究意义和应用价值。

大气波导的系统性研究可追溯到20世纪60年代, 以Bean和Dutton(1968)提出大气波导存在判据为标志。20世纪70年代开始, 美国率先将研究重点转向大气波导的机理研究。多年来, 形成了较为成熟的经验模型: 美国的PJ模式、欧洲的MGB模式、Babin模式等。以及多种中尺度数值预报模式: NORAPS、COAMPS、GSCL、MM5等。国内的研究工作虽起步较晚, 但诸多学者如开展了大量细致的研究工作, 形成了伪折射率模型、蒸发波导模型、利用雷达杂波反演大气波导等一系列成果(王波等, 2010; 成印河, 2009; 王蕊等, 2015), 并成功的将中尺度预报模式应用于

收稿日期: 2016-08-25; 预印本: 2017-05-28

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 41604129); 电波环境特性及模化技术重点实验室基金项目(编号: A171501016)

第一作者简介: 王宁(1982—), 女, 高级工程师, 研究方向为地基微波辐射计遥感大气参数、电波折射修正、电离层不规则体建模等。

E-mail: wn_22s_cetc@163.com

中国沿海地区大气波导的研究中。目前研究的热点集中在利用多平台、多传感器、多角度遥感大气波导的产生和变化过程。但是利用地基多通道微波辐射计来判别和遥感大气波导，尤其是使用组合的神经网络算法反演大气波导，未见相关报道。本文在前人研究的基础上，利用辐射计天顶和扫描亮温所携带的大气波导信息，对学习矢量化LVQ、径向基函数RBF这两种神经网络算法进行了改进，形成了组合神经网络算法，同时利用历史探空数据和实测数据进行了仿真和实验验证，为利用地基微波辐射计反演大气波导提供了一种新的思路。

2 理论分析

2.1 大气折射及遥感理论

大气环境中，影响电波传播的主要因子是大气折射指数 N 。大气折射指数 N 与大气温度 T 、大气压力 p 和水汽压 e 之间的关系式为

$$N = \frac{77.6}{T} \left(p + \frac{4810e}{T} \right) \quad (1)$$

大气波导的判别以大气折射指数 N 的梯度值为依据

$$\frac{dN}{dh} < 0.157 \text{ m}^{-1} \quad (2)$$

微波辐射计是利用其接收的大气辐射亮温和大气热力学参数之间建立联系来进行遥感和探测的设备。大气无散射热力平衡条件下，前向辐射传输方程给出了辐射亮温 $T_{\text{DN}}(\gamma, \theta)$ 与大气参数之间的关系(Wang, 2011)

$$T_{\text{DN}}(\gamma, \theta) = \sec \theta \int_0^\infty K_\gamma(z) g(z) e^{-\int_0^\infty K_\gamma(z') dz'} \sec \theta dz \quad (3)$$

$K_\gamma(z)$ 为在辐射频率为 γ 时，从地面到高度 z 处大气总的吸收系数， $g(z)$ 为高度 z 处的实际水汽密度剖面， θ 为天顶角。过去的几十年，地基多通道微波辐射计在遥感大气水汽密度、温度、折射率廓线上已经充分显示出其优越性(王波, 2011; 哈斯巴干, 2003; 刘锦丽等, 2003)。因此利用辐射计判别和反演大气波导有一定的可行性。大气波导存在3种基本类型：表面波导、蒸发波导和抬升波导，本文并没有重点放在波导类型的判断上，因为大气辐射亮温为路径上的积分量，要反映出折射率廓线的精细结构，后续还需深入研究。

大气波导与蒸发、平流、下沉逆温、辐射逆温、锋面、湍流等大气现象紧密相连。由于在海陆交接地带大气水平均匀性较差，发生以上现象的概率高于内陆，因此大气波导多发生在沿海地区(李欣欣等, 2011; Cossu等, 2015)。气象探空数据是最常见的大气波导统计分析和遥感的数据源，青岛(QD)、射阳(SY)、厦门(XM)、海口(HK)这4个探空站都处于中国东部或南部沿海的波导高发区，因此选择这4个站的历史探空数据作为研究对象。

2.2 神经网络算法优劣分析

神经网络是模拟人脑神经元处理问题的过程而建立的非线性系统，通过对各层神经元的权值、阈值的反复计算选择生成符合要求的网络，具有高度并行处理、自适应性强、泛化能力高等优点(李欣欣等, 2011; Cossu等, 2015)，因此其应用领域几乎包括各个方面，也是地球物理学发展的重要方向之一，众多学者已经在这一领域取得了巨大的成功。近年来，将神经网络与粗糙集理论、小波分析、模糊理论、混沌理论、分形理论相结合，多位学者对神经网络进行了很好的改进，扩展了其应用范围。

2.2.1 LVQ神经网络算法

自组织映射神经网络已广泛应用于模式分类中，其中的学习矢量化LVQ(Learning Vector Quantization)网络(王波, 2011; 哈斯巴干, 2003; 刘锦丽等, 2003; 李欣欣等, 2011; Cossu等, 2015)融合了自组织和有监督学习的形式，可以对输入矢量被划分到哪一类进行指定。其训练公式如下

$$\begin{cases} \mathbf{W}_{ij}^{\text{new}} = \mathbf{W}_{ij}^{\text{old}} + \eta(\mathbf{x}_i - \mathbf{W}_{ij}^{\text{old}}), & \text{正确} \\ \mathbf{W}_{ij}^{\text{new}} = \mathbf{W}_{ij}^{\text{old}} + \eta(\mathbf{x}_i - \mathbf{W}_{ij}^{\text{old}}), & \text{错误} \end{cases} \quad (4)$$

式中， η 为学习速率，在0—1之间取值，可以抑制权值趋近无穷大。可以看出，分类正确时神经元的权重矢量 $\mathbf{W}$ 与输入矢量 $\mathbf{x}$ 具有最小欧氏范数距离。该算法的优点是输入矢量不需要归一化，但对初值敏感，严重时会导致精度差的分类结果。由于竞争胜利的神经元会获得更多的训练机会，有时会导致局部最优解。

2.2.2 RBF神经网络算法

基本的径向基网络RBF(Radial Basis Function)

仅有一个维数足够高的隐含层(刘锦丽等, 2003; 李欣欣等, 2011; Cossu等, 2015)。隐含层节点由高斯核函数一样的辐射状作用函数构成, 输出层则为线性函数。其神经元的输出为

$$out = G \left[\sum_i^n (x_i - w_{ij})^2 \right] \quad (5)$$

式中, G 为高斯函数。该算法收敛速度快, 应用于遥感领域时已有学者研究发现, 由于高斯函数的特殊性, 该网络难以学习映射的高频部分。

3 改进的组合神经网络算法

在前期的研究中, 利用LVQ神经网络来判别大气波导并利用RBF网络来遥感大气折射率廓线都做尝试, 但是结果不尽如人意。研究发现, 直接将这两种算法拿来使用精度比较低, 必须对其进行改进。

3.1 对LVQ神经网络算法的改进

为了克服LVQ神经网络算法对初值的敏感, 选择自组织特征映射算法SOFM(Self-Organizing Feature Map)先对数据源进行粗分类(哈斯巴干, 2003; 李欣欣等, 2011), 以其输出结果作为LVQ的输入, 避免了初值过大引起的偏差。SOFM由输入、输出两层构成, 输出用下式表示

$$out = \max(I_j) = \max \left(\sum_{i=1}^n (w_{ij} x_i) \right) \quad (6)$$

神经元取全部获胜原则(Winner-Takes-All)而非最小欧氏范数距离。采用改进后的训练公式如下

$$w_{ij}^{new} = w_{ij}^{old} + \eta (x_i - w_{ij}^{old}) + \xi \frac{w_{ij}^{new} - w_{ij}^{old}}{w_{ij}^{old}} \quad (7)$$

式中, ξ 为调整参数, 通过调整 ξ 的值, 使全部神经元均能得到学习, 避免了局部最优解。SOFM训练结束后, 再使用LVQ网络进一步的分类。

3.2 对RBF神经网络算法的改进

确定RBF网络中隐层高斯核函数的方法一般使用聚类方法, 最常见的是K-均值算法(成印河, 2009; 王蕊等, 2015; 王波, 2011; 哈斯巴干, 2003; 刘锦丽等, 2003; 李欣欣等, 2011; Cossu

等, 2015)。模糊c-均值算法是Bezdek(1981)提出的最著名的模糊聚类分析算法, 其优于K-均值算法。而本文中使用的改进模糊c-均值算法。其获胜神经元的选取以Mahalanobis距离最小为依据, 先计算数据的标准协方差矩阵 C , 距离则用下式表示

$$(d_{ik})^2 = (x_k - v_i)^T C^{-1} (x_k - v_i) \quad (8)$$

C -均值向量为

$$v^T = \left(\sum_{k=1}^N (u_{ik})^m x_i / \left(\sum_{k=1}^N (u_{ik})^m \right) \right) \quad (9)$$

式中, N 为预先设定的最大循环步数, T 为实际循环步数, u_{ik} 为隶属度, 取0或1, $m(m \in [1, \infty])$ 为模糊加权指数, 对于如何取 m 最优目前尚未理论指导, 只能通过多次训练得到。

4 仿真及实测结果分析

4.1 仿真过程及结果

第一步: 统计大气波导发生次数、平均高度、厚度。数据源是由中国国家气象局提供的15年的探空数据(已剔除掉雨天、阴天、数据测量高度不够、数据缺失等无效数据)。计算大气折射率廓线梯度, 统计结果如表1所示。

表1 大气波导特性统计及仿真结果

Table 1 Atmospheric duct feature statistics and simulation results

站点	波导次数	平均高度/m	平均厚度/m	仿真高度/m	仿真厚度/m
QD	264	870.15	267.85	602.22	200.72
SY	453	895.09	244.87	650.23	180.17
XM	117	1606.65	201.83	1404.87	165.08
HK	159	1381.61	224.09	1157.56	179.28

第二步: 利用改进的SOFM+LVQ神经网络算法找出数据源中存在大气波导的样本, 完成模式分类。计算探空数据在23.8 GHz、31.65 GHz、55.5 GHz、58.5 GHz频率上, 天顶角为90°、60°、45°、30°、20°、15°、10°、5°时辐射亮温值。改进的LVQ网络的输入样本为亮温数据、折射率廓线、波导特性参数、地面温湿压参数组成的集合。SOFM共运行523步完成粗分类, LVQ网络中 η 取0.75, ζ 取2.63, 共运行3179步完成再次分类, 仿真结果如表1所示, 由于篇幅所限, 图1只给出了部分站点的仿真结果。

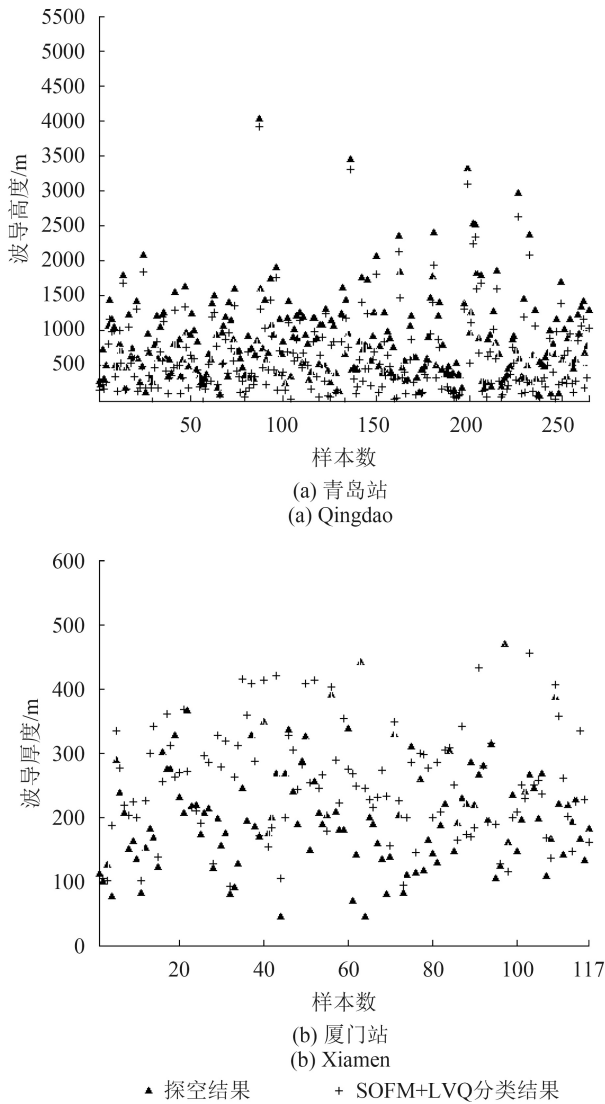


图1 大气波导分类的结果
Fig. 1 Atmospheric duct classification results

将结果对比可以看出，低纬度的厦门和海口站的结果优于较高纬度的青岛和射阳，但总体精度还不是很理想。主要原因是较高纬度的地区波导强度低，低纬度地区波导强度高(Ramesh 等, 2015; Ahn 等, 2016)，并且波导持续时间长，随着研究的深入，后续算法还可继续改进。

第三步：以存在波导的探空数据为输入，利用改进的RBF网络反演大气折射率廓线。由于波导均发生在7 km以下，因此从地面起，100 m一个结点，将每天的数据分成70层。通过仿真验证发现，需增加22 GHz、23 GHz、30 GHz、52.8 GHz、57.28 GHz在8个不同天顶角方向的亮温作为输入。反演结果的精度以标准差来衡量，计算公式如下

$$\delta = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (y_{\text{reto}}^{ji} - y_{\text{radio}}^{ji})^2} \quad (10)$$

式中， N 为样本总数， M 为层数， y_{radio} 为探空数据中每层的大气折射率值， y_{reto} 为反演的每层折射率值。最大循环步数设定为20000步，反复训练多次，最终 m 取4.81时标准差小于 $4N$ 。图2和表2给出了结果。

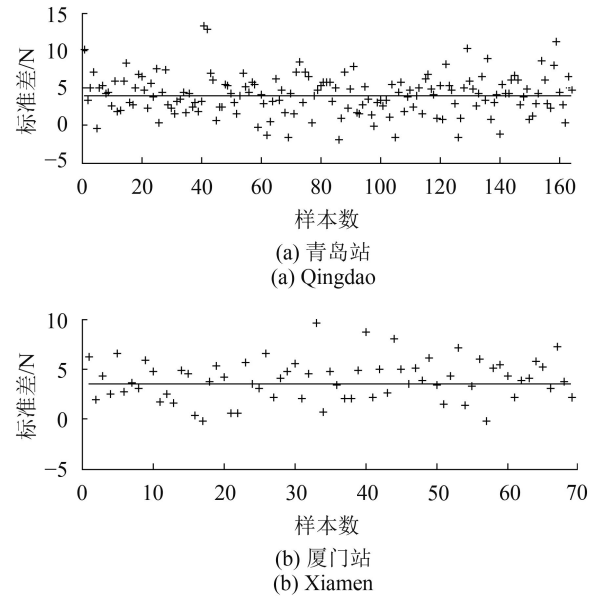


图2 各站标准差结果
Fig. 2 Standard deviation results

表2 RBF神经网络算法标准差对比
Table 2 Standard deviation using RBF net

站点	RBF算法	改进后的RBF算法
QD	4.29	3.99
SY	5.03	3.83
XM	4.62	3.53
HK	4.11	3.55

由以上的结果可以看出，利用组合的神经网络算法分类并反演大气波导可行(Rambabu 等, 2014; Araki 等, 2015)，改进后的算法明显提高了精度，射阳和厦门站的标准差提高大于1N，其余两个站的精度提高了大约0.3N。

4.2 实测数据验证结果

中国电波传播研究所自2011年起购买美国Radiometric公司的MP-3000型微波辐射计用于常规

观测以来积累了大量的实测数据。同时其自研的QFW-6000型多通道微波辐射计已应用于多个遥感及折射修正项目中,精度达到国内领先。本文中采用的实测数据均来自于这两台设备,设备的部分参数在表3中列出。

表3 设备部分参数比较
Table 3 Parts of equipment parameters

站点	QFW-6000	MP-3000
通道 (即频率)	16个(8个K波段、 8个V波段)	35个(21个K波段、 14个V波段)
测量范围	0–500 K	0–400 K
灵敏度	0.2 K	0.13 K
准确度	1 K	0.8 K
分辨率	5°(K波段) 2.5°(V波段)	6°
扫描精度	0.1°	0.45°
反演算法	BP神经网络	BP神经网络
反演层数	60	58

采用两台设备同步观测时2015年6月到8月的数据与青岛气象局提供的探空数据比较,剔除掉雨天、错误数据等,可用数据共有176组,有大气波导存在的数据共17组。这里只使用两台设备天顶方向和不同仰角方向的辐射亮温,不采用其自带的神经网络算法,因为在前期测试中发现,设备自带的神经网络算法的反演均方差均大于5,远高于新的算法,采用本文中的改进组合算法进行大气波导的遥感,分类后波导的平均高度、厚度和遥感大气折射率剖面的标准差结果见表4、图3。

表4 青岛站大气波导参数遥感结果
Table 4 Retrieving duct results in Qingdao

参数	探空值	MP-3000	QFW-6000
波导高度/m	393.3529	496.0823	511.4137
波导厚度/m	241.0588	286.5202	317.2554
标准差/N	—	3.1994	4.0806

以上结果可以看出,本文提出的改进组合神经网络算法在青岛地区是适用的,其他站点后续可以采集实验数据继续进行验证。其中自研的QFW-6000辐射计的结果比国外的MP-3000辐射计精度差的原因可能是辐射计天线旁瓣大带来的亮温误差等引起的。图4给出了2015年7月7日遥感和

探空大气折射率和修正折射率剖面的对比图,波导高度为1062 m,厚度为445 m,从图4中可以看出遥感结果反映出了大气波导的存在。

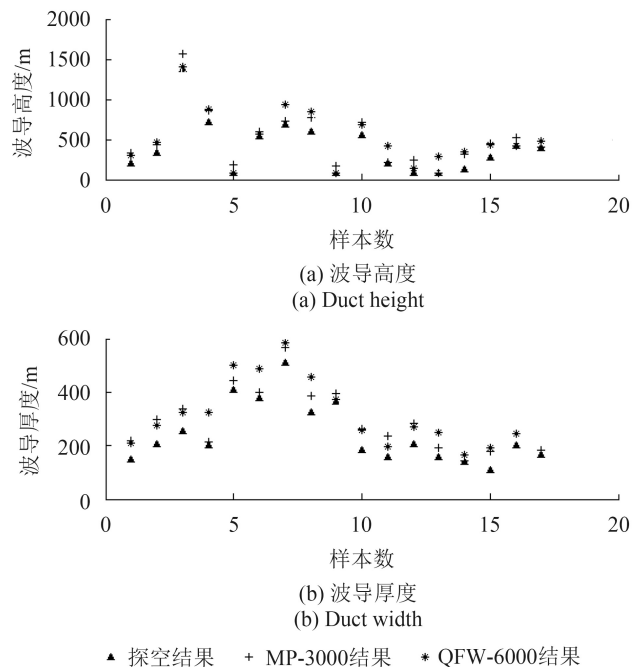


图3 青岛站大气波导分类结果
Fig. 3 Duct classification in Qingdao

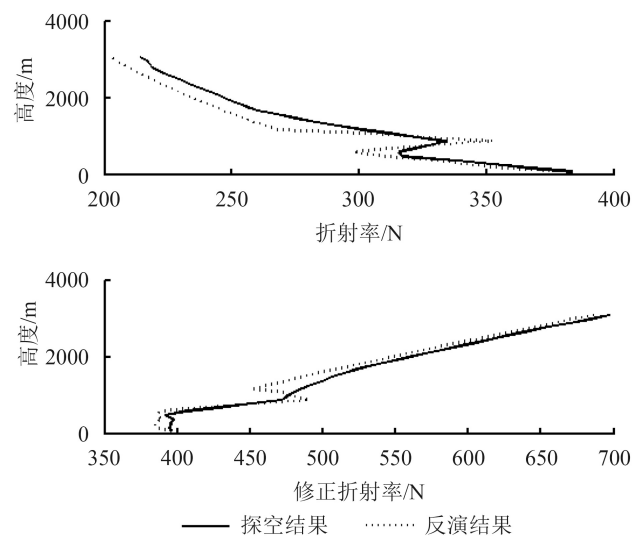


图4 2015年7月7日08时大气折射率和修正折射率廓线
Fig. 4 Refractive index and modify refractive index profile at 8:00 in July 2015

4.3 问题与讨论

通过以上的比较结果可以看出,微波辐射计具备遥感大气波导廓线的能力,为大气波导的后续研究提供了一种新的思路,但是由于研究不够

深入,算法还有很大的提升空间。目前的问题一:对于神经网络训练来说,大量的样本会包含更多的信息,如果从探空数据中提取更多大气波导的样本,反演精度还会提高。问题二:在模式分类时,没有对大气波导的类型进行判断,同时由于想得到高分辨率的结果,建模时间较长,后续希望通过对算法的改进和调整可以缩短耗时。

5 结 论

本文中利用改进的LVQ+RBF组合神经网络算法,验证了采用地基多通道微波辐射计遥感大气波导的可行性,并且发现在低纬度地区的反演结果优于高纬度地区。在前人研究的基础上,拓展了利用地基微波辐射计反演大气波导的方法,首先,提出了将两种神经网络方法相结合,其次引入模糊理论、聚类理论等对其进行深入的改进和优化,使算法的实用性、可操作性和精度得到了很大的提升。由于微波辐射计较其他设备有隐蔽性和可靠性,可提供连续廓线,在为各类电子信息系统提供无线电气象数据支持方面具有较大的优势。后续随着研究的深入和算法的改进,反演精度和建模时间还有较大的改进和提升空间。

大气波导问题涉及电磁波领域、无线电气象以及数值天气预报等等。在后续的研究中,应综合低仰角大气微波辐射计、应用卫星、天气雷达等多手段测量设备重点研究对大气波导的甄别及反演,并结合数值天气预报等方式联合开展大气波导环境数据获取的研究,提高大气波导预报的可靠性和准确度。

志 谢 本文中使用的数据有中国国家气象局提供的探空仪观测数据和中国电波传播研究所第三研究部提供的地基多通道微波辐射计数据,在此表示感谢!

参考文献(References)

- Ahn M H, Won H Y, Han D, Kim Y H and Ha J C. 2016. Characterization of downwelling radiance measured from a ground-based microwave radiometer using numerical weather prediction model data. *Atmospheric Measurement Techniques*, 9(1): 281–293 [DOI: [10.5194/amt-9-281-2016](https://doi.org/10.5194/amt-9-281-2016)]
- Araki K, Murakami M, Ishimoto H and Tajiri T. 2015. Ground-based microwave radiometer variational analysis during no-rain and rain conditions. *SOLA*, 11: 108–112 [DOI: [10.2151/sola.2015-026](https://doi.org/10.2151/sola.2015-026)]
- Bean B R and Dutton E J. 1968. *Radio Meteorology*. New York: Dover Publication Inc: 7-8, 132-134
- Cheng Y H. 2009. A Study on Atmospheric Ducts over the Sea Retrieved with AMSR-E Satellite Data and Its Numerical Simulation. Qingdao: The Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences: 320-368 (成印河. 2009. 海上低空大气波导的遥感反演及数值模拟研究. 青岛: 中国科学院海洋研究所: 320-368)
- Cossu F, Hocke K and Mätzler C. 2015. A 10-year cloud fraction climatology of liquid water clouds over Bern observed by a ground-based microwave radiometer. *Remote Sensing*, 7(6): 7768–7784 [DOI: [10.3390/rs70607768](https://doi.org/10.3390/rs70607768)]
- Hasi B. 2003. The research on the Neural Network Algorithm and Its Combination Usages in Remote Sensing Data Classifications. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences: 212-249 (哈斯巴干. 2003. 神经网络及其组合算法的遥感数据分类研究. 北京: 中国科学院研究生院: 212-249)
- Li X X, Zhang L X, Jiang L M, Zhao S J and Zhao T J. 2011. Simulation and measurement of relief effects on passive microwave radiation. *Journal of Remote Sensing*, 15(1): 100–110 (李欣欣, 张立新, 蒋玲梅, 赵少杰, 赵天杰. 2011. 被动微波辐射特征地形效应模拟与实验. 遥感学报, 15(1): 100–110) [DOI: [10.11834/jrs.20110108](https://doi.org/10.11834/jrs.20110108)]
- Liu C G. 2003. Research on Evaporation Duct Propagation and Its Applications. Xi'an: Xidian University: 268-330 (刘成国. 2003. 蒸发波导环境特性和传播特性及其应用研究. 西安: 西安电子科技大学: 268-330)
- Liu J L, Lv D R, Zhang L and Duan S. 2003. Space-borne remote sensing on liquid water content of precipitating cloud. *Journal of Remote Sensing*, 7(3): 227–232 (刘锦丽, 吕达仁, 张凌, 段树. 2003. 降水云中液水含量的空基遥感. 遥感学报, 7(3): 227–232) [DOI: [10.3321/j.issn:1007-4619.2003.03.011](https://doi.org/10.3321/j.issn:1007-4619.2003.03.011)]
- Rambabu S, Pillai J S, Agarwal A and Pandithurai G. 2014. Evaluation of brightness temperature from a forward model of ground-based microwave radiometer. *Journal of Earth System Science*, 123(4): 641–650 [DOI: [10.1007/s12040-014-0439-7](https://doi.org/10.1007/s12040-014-0439-7)]
- Ramesh K, Kesarkar A P, Bhate J, Venkat Ratnam M and Jayaraman A. 2015. Adaptive neuro-fuzzy inference system for temperature and humidity profile retrieval from microwave radiometer observations. *Atmospheric Measurement Techniques*, 8(1): 369–384 [DOI: [10.5194/amt-8-369-2015](https://doi.org/10.5194/amt-8-369-2015)]
- Wang B, Wu Z S, Zhao Z W and Wang H G. 2010. Improved method to retrieve low altitude atmospheric refractivity profiles from radar clutter. *Systems Engineering and Electronics*, 32(8): 1652–1656 (王波, 吴振森, 赵振维, 王红光. 2010. 雷达杂波反演低空大气折射率剖面的改进算法. 系统工程与电子技术, 32(8): 1652–1656) [DOI: [10.3969/j.issn.1001-506X.2010.08.21](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2010.08.21)]
- Wang B. 2011. Method and Experiment of Atmospheric Ducts Estima-

tion Using Radar Clutter and GNSS. Xi'an: Xidian University: 110-265 (王波. 2011. 基于雷达杂波和GNSS的大气波导反演方法与实验. 西安: 西安电子科技大学: 110-265)

Wang R, Yan W, Shi S W and Lu W. 2015. Environmental parameter

sensitivity analysis for polarimetric microwave radiometer. Journal of Remote Sensing, 19(3): 375–390 (王蕊, 严卫, 史顺文, 陆文. 2015. 全极化微波辐射计对环境参数敏感性分析. 遥感学报, 19(3): 375–390) [DOI: [10.11834/jrs.20154111](https://doi.org/10.11834/jrs.20154111)]

Primary exploration of the algorithm of retrieving troposphere abnormal structure in the southeast coast of China

WANG Ning^{1,2}, GUO Lixin¹, ZHAO Zhenwei², DING Zonghua², LIN Leke²

1. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China;

2. National Key Laboratory of Electromagnetic Environment, China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao 266107, China

Abstract: As the main medium of radio wave propagation, atmospheric profiles influence the operating range of radio systems and the accuracy of navigation and location systems. Therefore, the research on the techniques of microwave remote sensing for atmospheric profiles, especially their abnormal structure, is important for evaluating the performance of radio information systems and improving the accuracy of radio refraction correction in complex atmospheric environment.

A microwave radiometer provides continuous thermodynamic (temperature, water vapor and moisture) soundings during clear and cloudy conditions. The radiometric profiler observes radiation intensity along with zenith infrared and surface meteorological measurements. Historical radiosonde and neural network or regression methods are used for profile retrieval. The southeast coastal area of China has always been a research hot spot. In this study, radiosonde data of Qingdao, Sheyang, Xiamen and Haikou were selected to compute the average height and thickness of the atmospheric waveguide. We carried out a preliminary exploration to retrieve algorithms. We put forward the combined neural network algorithm to discriminate and retrieve the atmospheric waveguide. Meanwhile, the feasibility of this method was demonstrated with the results simulated by historical data in Qingdao, Sheyang, Xiamen and Haikou and measured data in Qingdao.

This method is used for remote sensing the atmospheric abnormal structure, and the radiometer can retrieve the atmospheric waveguide. In this study, a new idea is provided for the following atmosphere waveguide. However, improvement is still warranted, considering the lack of depth of the study. Two problems are discussed in this study. First, inversion accuracy is low because of the few samples of atmospheric waveguides extracted from the radiosonde data. Second, the type of atmospheric waveguide is not judged, and the model time is long because of the high resolution. We hope to overcome these problems by improving and adjusting the algorithm in the future.

Radiometric profiling provides continuous temperature and humidity soundings up to 10 km height in clear and cloudy conditions and low-resolution cloud liquid soundings. The accuracy of the radiometric temperature and humidity soundings is equivalent to that of the radiosonde soundings. Ground-based multi-channel microwave radiometry has been proven to be a powerful tool for sensing atmospheric waveguide as compared with past methods. It can retrieve continuous atmospheric waveguide and provide environmental information for radar, communication, and navigation systems. The issue of atmospheric waveguide involves electromagnetic fields, radio meteorology, and numerical weather forecasts. Future work should use multiple devices and study atmospheric duct inversion in combination with numerical weather prediction methods to retrieve the waveguide and improve the accuracy of duct prediction.

Key words: atmospheric waveguide, learning vector quantization neural network algorithm, radical basis function, ground-based multi-channel microwave radiometer-brightness temperature

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.41604129); National Key Laboratory Foundation of Electromagnetic Environment (No. A171501016)