

海上大气折射率的相似性研究

郭相明^{1,2}, 康士峰², 赵栋梁¹, 张玉生²

(1. 中国海洋大学海洋与大气学院, 山东 青岛 266003; 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, 山东 青岛 266107)

摘 要: 基于边界层相似理论,通过数值模拟的方法研究了大气折射率的相似性,数值模拟结果显示大气折射率在不稳定大气条件和近中性条件下大气折射率近似满足相似理论,在稳定大气条件下大气折射率不满足相似理论假设。其次通过气象梯度塔测量的水文气象参数计算的大气折射率剖面 and 开路测度系统测量的数据计算的相似性特征量,实验研究了大气折射率的相似性,研究也表明大气折射率在稳定大气条件下不满足相似性。

关键词: 大气折射率;相似理论;海洋大气边界层

中图分类号: P732.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2017)03-0071-06

1 引言

大气中的微波传播直接依赖大气折射率的变化特征,为此通常采用大气折射率来描述大气无线电波传播物理机制^[1]。基于大气折射率的垂直梯度特征可划分为4类,即次折射、正常折射、超折射和波导折射。在微波波段,大气折射率可以表达为大气温度、湿度和气压的非线性函数^[2-3],因此可以通过气象传感器测量大气温度、湿度和气压的方式确定大气折射率的结构特征,例如气象上常用的高空探测系统和低空系留探空系统成为探测大气折射率的有效途径。

从20世纪50年代边界层相似理论的提出,对边界层的研究具有开创性的意义,相似性理论在描述大气边界层,特别是近地层研究与应用中发挥了极大的作用^[4-5]。基于相似理论,可以采用近地(海)面一层大气温度、湿度、气压和风速,以及海面温度来确定近海面的大气温度、湿度和风速剖面,为近地海面大气折射率剖面构建提供了理论基础和方法支撑,同时认为近海面大气压近似静态平衡,并满足压高公式,基于此提出了许多基于相似理论的

近海面折射率剖面预测方法和蒸发波导模型^[6-10]。由于大气折射率为大气温度、湿度和气压的非线性函数,于是有研究者也认为大气折射率或其位大气折射率为相似量^[11],不过从20世纪90年代以来,Hill^[12]指出,大气折射率作为相似量是有一定的条件限制,Cook等^[13]通过数值模拟的方式指出,大气位折射率仅在不稳定和近中性条件下可以看作为相似量,在1993年,Sorbjan^[14]指出当重新定义折射率特征量的情况下,折射率方差可以看作为相似量。

长期以来,虽然有学者指出大气折射率不能看作为相似量,但在实际应用中又往往把其看作为相似量,同时由于条件限制,虽然通过数值模拟的方式指出不为相似量,但缺乏有效的实验手段进行验证,为此本文从数值模拟和实验的角度全面阐述大气折射率的相似性。

2 大气折射率相似性原理

2.1 大气折射率及其扰动

在无线电气象学中大气折射指的是电磁波在

大气介质中传播的弯曲特性,其折射程度用折射指数 n 来衡量,定义为电波在自由空间中的传播速度 c (光速)与介质中的传播速度 v 的比值:

$$n = c/v \quad (1)$$

地球表面大气折射指数的正常值一般在 1.000 25 和 1.000 4 之间。对于电波传播研究,由于数值较小, n 值不方便实际应用。因此,定义了一个与折射指数可换算的量即通常使用的大气折射率 N 。在微波及以下频段,大气折射指数 n 或大气折射率 N 可由常规气象要素确定,其关系为:

$$N = (n - 1) \times 10^6 = \frac{77.6}{T} \times \left(p + \frac{4.810e}{T} \right) \quad (2)$$

式中: p 为气压(hPa), e 为水汽压(hPa), T 为气温(K)。考虑水汽压 e 和比湿 q 之间关系为:

$$e = \frac{qp}{\varepsilon + (1 - \varepsilon)q} \quad (3)$$

式中: ε 为气体常数,通常取 0.622。把上式代入式(2)得:

$$N = \frac{77.6p}{T} + \frac{37.3256qp}{T^2[\varepsilon + (1 - \varepsilon)q]} \quad (4)$$

因此,大气温湿度和气压的变化或扰动将引起大气折射率的变化或扰动。在固定高度,大气折射率的扰动 N' 可以表达为^[15]:

$$N' = aT' + bq' + cp' \quad (5)$$

忽略气压扰动,则大气折射率扰动可以表达为^[12]:

$$N' \approx aT' + bq' \quad (6)$$

$$a = \frac{\partial N}{\partial T} = -\frac{77.6p}{T^2} - \frac{746.512pq}{[\varepsilon + (1 - \varepsilon)q]T^3} \quad (7)$$

$$b = \frac{\partial N}{\partial q} = \frac{373.256p(1 - q + \varepsilon q)}{T^2(\varepsilon + q - \varepsilon q)} \quad (8)$$

2.2 标量相似理论和原理

相似性理论是描述大气边界层,特别是近地层研究的有力工具。在近地层相似理论中,采用包括相似长度、摩擦速度、温湿度的尺度参数和其它尺度参数,距离地面海面的高度,来描述边界层大气参数的变化特征。前苏联的莫宁最早在 1946 年采用白汉金 II 定理^[16],将摩擦速度 u_* ,感热通量 $\overline{w'\theta'}$ 以及浮力因子 g/θ 进行组合得到一个具有长度量纲的特征量,现称莫宁-奥布霍夫相似长度来描述的大气的状态,其定义为^[17]:

$$L = -\frac{u_*^2}{\kappa \frac{g}{\theta} \overline{w'\theta'}} = \frac{u_*^2}{\kappa \frac{g}{\theta} \theta_*} = \frac{\theta u_*^2}{\kappa g \theta_*} \quad (9)$$

式中: $k=0.4$, 为卡曼常数; g 为重力加速度; w' 和 θ' 分别为垂直风速和位温脉动量; u_* 和 θ_* 分别为摩擦速度和位温的尺度参数,代表近地(海)面湍流垂直输送的强度;“ $\bar{\cdot}$ ”代表整体平均。莫宁-奥布霍夫长度反映了雷诺应力和浮力做功的相对大小,并定义 $L>0$ 时,大气稳定, $L<0$, 不稳定, $|L| \rightarrow \infty$, 大气中性。随后,1954 年莫宁和奥布霍夫最终提出了完善的近地层相似理论。其中尺度参数的定义:

$$u_* = (-\overline{u'w'})^{1/2} \quad (10)$$

$$\theta_* = (-\overline{\theta'w'})/u_* \quad (11)$$

$$q_* = (-\overline{q'w'})/u_* \quad (12)$$

式中: q' 大气比湿脉动量; q_* 为比湿的尺度参数。需要说明的是,在近地面层由于位温和温度相差很小通常假定 $T_* \approx \theta_*$ 来定义温度特征尺度。

与温湿度尺度参数定义相似,大气折射指数尺度参数或大气折射率尺度参数定义为:

$$n_* = (-\overline{n'w'})/u_* \quad (13)$$

$$N_* = (-\overline{N'w'})/u_* \quad (14)$$

在近地(海)面,风速、温度和湿度的无量纲化普遍廓线方程为:

$$\frac{\kappa z}{u_*} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = \Phi_m(\xi) \quad (15)$$

$$\frac{\kappa z}{\theta_*} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} = \Phi_h(\xi) \quad (16)$$

$$\frac{\kappa z}{q_*} \frac{\partial \bar{q}}{\partial z} = \Phi_q(\xi) \quad (17)$$

式中: $\Phi_m(\xi)$ 、 $\Phi_h(\xi)$ 和 $\Phi_q(\xi)$ 分别为风速、位温和比湿的相似理论普适函数, $\xi = z/L$ 为大气稳定度参数。上式是近地面层相似理论对于平均气象要素廓线表达式的微分形式,对上式积分可以计算出近海面高度的风速和温湿度剖面,进而通过联立流体静力学方程和理想气体定律确定的气压剖面可以确定大气折射率剖面。

同样,通常基于大气折射率是温度和湿度函数的原理,假定大气折射率同样满足相似理论,即

$$\frac{\kappa z}{N_*} \frac{\partial \bar{N}}{\partial z} = \Phi_N\left(\frac{z}{L}\right) \quad (18)$$

$$N_* = aT_* + bq_* \quad (19)$$

式中: $\Phi_N(z/L)$ 定义为大气折射率普适函数。与确定温、湿度是否满足相似性一样, 为了确定大气折射率是否满足相似理论, 需要通过实验确定上式是否成立, 即确定大气折射率普适函数在不同的大气稳定性条件下是否为确定性函数。

3 基于数值模拟的大气折射率相似性研究

3.1 数值模拟方法

首先采用数值模拟的方式确定大气折射率是否可以看作为相似量, 是否满足相似理论。基于相似理论, 式(15)—(17)对应的积分形式, 即近地层内水平风速 u 、位温 θ 、比湿 q 的垂直廓线表示为^[18]:

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \left[\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) - \psi_m\left(\frac{z}{L}\right) \right] \quad (20)$$

$$\theta(z) - \theta(z_{0\theta}) = \frac{\theta_*}{\kappa} \left[\ln\left(\frac{z}{z_{0\theta}}\right) - \psi_h\left(\frac{z}{L}\right) \right] \quad (21)$$

$$q(z) - q_{sea} = \frac{q_*}{\kappa} \left[\ln\left(\frac{z}{z_{0q}}\right) - \psi_q\left(\frac{z}{L}\right) \right] \quad (22)$$

基于位温剖面确定的温度剖面为:

$$T(z) - T_{sea} = \frac{\theta_*}{\kappa} \left[\ln\left(\frac{z}{z_{0\theta}}\right) - \psi_h\left(\frac{z}{L}\right) \right] - \Gamma_d z \quad (23)$$

式中: $u(z)$ 、 $\theta(z)$ 、 $q(z)$ 分别是高度 z 处的水平风速、位温和比湿; $z_{0\theta}$ 和 z_{0q} 分别为温度和湿度粗糙度; ψ_h 和 ψ_q 分别位温和湿度普适函数, 通常取二者相等; Γ_d 为干绝热递减率, 约等于 0.009 76 K/m; T_{sea} 、 q_{sea} 分别是海面温度和比湿, 且考虑海水盐度对比湿的影响, $q_{sea} = 0.98q_{sat}(T_{sea})$ 、 $q_{sat}(T_{sea})$ 为基于海面温度计算的海面饱和比湿。目前主要采用海洋-大气耦合响应试验 (Tropical Oceans Global Atmosphere, TOGA-Coupled Ocean Atmosphere Response Experiment, COARE) 发展起来的海气通量整体算法 COARE 进行位温 θ 、比湿 q 的特征尺度 θ_* 、 q_* 的计算^[19], 考虑到目前海气通量整体算法已更新到 3.0 版本^[20], 因此本文采用最新发布的 COARE3.0 算法确定海表层尺度参数和海面粗糙度, 进行大气温湿剖面的计算。

为了确定近海面大气折射率剖面, 还要确定大气压剖面, 通过联立流体静力学方程和理想气体定律并积分得到, 即^[18]

$$P(z) = P(z_1) \exp\left(\frac{g(z_1 - z)}{R\bar{T}_v}\right) \quad (24)$$

式中: R 为干空气气体常数; g 为重力加速度; $P(z_1)$ 测量高度 z_1 的气压, $P(z)$ 为计算高度 z 的气压; \bar{T}_v 为高度 z_1 和高度 z 处的平均虚温。根据式(20)—(24)确定的温度、比湿和气压剖面, 代入折射率公式就可以确定大气折射率剖面, 进而可以确定不同的大气稳定度条件下, 不同高度的大气折射率梯度。

3.2 数值模拟结果

假定在 10 m 高度处测量的空气温度从 12 °C 变化到 21 °C, 间隔 0.25 °C, 相对湿度取 80%, 风速 4 m/s, 气压 1 022.07 hPa, 海表温度 18 °C, 按照上述方法分别计算大气的稳定度和对应的式(18)的左端, 结果见图 1。与图 1 条件类似, 图 2 给出了相对湿度从 40% 变化到 95% 时, 其它模拟条件不变时, 大气折射率相似函数的变化情况。

由图 1、2 可见, 所有的计算曲线并没有完全在一条曲线上, 但在不稳定或近中性大气条件下, 曲线近似在一条直线上, 而在稳定大气条件下, 特别是强稳定条件下曲线更为发散。因此, 可以初步确

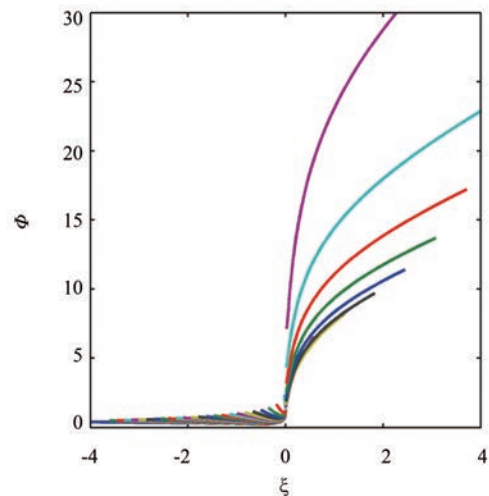


图1 不同气-海温差下的大气折射率相似函数 Φ_N 变化

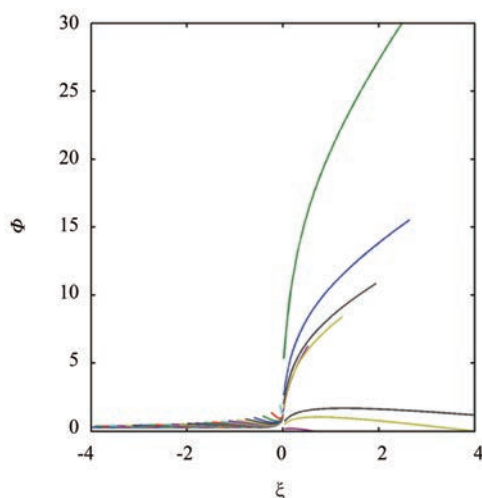


图2相对湿度变化时大气折射率相似函数 Φ_N 变化

定大气折射率在稳定大气条件下不满足相似理论。

4 基于实验数据的大气折射率相似性研究

4.1 实验简介与数据处理

为研究大气折射率的相似性,在渤海某海域开展了实验^[18]。观测仪器架设某小岛岸边的铁塔上,铁塔塔基大部时间被海水所淹没,在海风作用下近似代表了附近海域大面积海洋下垫面的特性,在维萨拉海用自动气象站MAWS420的基础上进行了传感器扩展^[21],在距离塔基平台6、10、15、20、27、34 m处架设温湿度传感器,在6、15、27 m处架设风速传感器,同时在第二层观测平台上(10 m)安装了气压传感器和红外海温传感器,所有气象传感器采集的数据存储在采集卡中,所有数据的采样频率为每分钟一次,具有实时和连续的优点。在塔基高度10 m处,在铁塔上架设涡动开路协方差系统,为了尽可能地避免塔体对测量的影响,CSAT3 三维超声风速仪和LI7500 开路气体分析仪尽量远离塔体架设(距塔体约2 m)。涡动协方差系统采样频率为10 Hz,采样时间每次30 min。基于原始观测资料,经过去趋势、坐标旋转等处理后计算出近海层特征尺度(u_* 、 θ_* 、 q_*)、稳定度参数 ξ 等,进而确定折射率特征尺度。

为了确定不同高度的大气折射率梯度,基于气

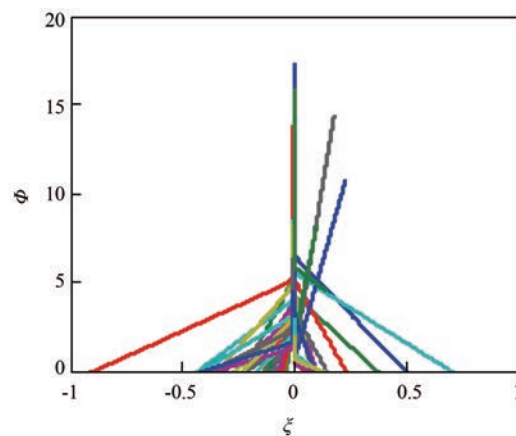


图3 实验期间大气折射率相似函数 Φ_N 剖面随大气稳定度 ξ 的变化

象梯度塔测量的大气参数和海面温度,进行同时间段30 min的平均,在静力平衡和理想气体假设下,利用压高公式将10 m处气压换算到其他高度层上,然后利用式(2)和(3),可以计算不同高度层上的M值,假定海面相对湿度为100%,确定海面大气折射率,然后对7层修正折射率进行非线性最小二乘拟合,可以确定大气修正折射率剖面所用的拟合公式为:

$$M = f_0 z - f_1 \ln(z + 0.001) + f_2 \quad (25)$$

式中: M 代表修正折射率; z 代表高度; f_0 、 f_1 、 f_2 为拟合系数。在此需要指出的是在近海面大气折射率的计算中,采用了海面为饱和水汽的假设,同时在实际的计算过程中,必须考虑潮位的影响,本文在数据处理过程中,利用潮汐数据对气象传感器的实际距离海面的高度进行了订正。根据大气折射率和修正折射率的关系则可确定对应的大气折射率剖面,可确定不同高度的大气折射率梯度值。

4.2 实验结果

取对应时间段涡动开路协方差采集的数据和气象梯度仪采集的数据计算大气折射率特征量、大气稳定性和对应高度的大气折射率梯度值,计算不同稳定度条件下大气折射率普适函数。图3给出了实验期间,海风影响下大气折射率普适函数随大气稳定度变化情况。

由图3可见,所有的曲线并没有完全在一条曲线上,在不稳定大气条件下与数值模拟结果不同,表现出更加的分散性,这可能受实验条件的限制,在海岸区域受来自陆地气流的影响,不能完全代表广阔海域的实际海洋环境,虽然在数据处理过程中考虑了测量误差,但是不可避免的也存在测量误差和环境代表性问题,使得在不稳定大气条件也显示出很强的分散性。在稳定大气条件下所有的曲线相对模拟结果表现出更强的分散性。不过在近中性条件下,曲线还是表现出一定的汇聚趋势。因此,也可以初步确定大气折射率在海上实验环境下表现出不满足相似量的假设,不满足标量相似理论,特别是在稳定大气条件下。

5 结论与讨论

长期以来,考虑大气折射率为温度、湿度和气压的函数,以及大气温湿度在近地(海)面层满足相似理论,将其看作为相似量,并在许多方面得到了广泛的应用。例如折射率结构常数的确定和近海面蒸发波导模型的构建等。本文通过数值模拟和观测实验两种途径论述了大气折射率是否满足相似理论,大气折射率是否可以看作为相似量,基于数值模拟和实验结果显示大气折射率梯度在稳定大气条件下不满足相似理论,大气折射率不为相似量。

在此需要指出,(1)由于受实验条件的限制,试验结果显示在不稳定大气条件下大气折射率梯度也不满足相似理论,与数值模拟结果不一致,需要开展海上实验进一步验证;(2)大气折射率不仅是温、湿度的函数,同时大气压强也是一个重要的量,在上述定义大气折射率特征尺度量时忽略了大气压强的影响;(3)在折射率结构常数的定义中,考虑了温度和湿度的相关性对折射率结构常数的影响,因此在定义大气折射率特征尺度时考虑大气温度和湿度在不同的稳定度条件下相关性对大气折射率的影响,大气折射率梯度有可能满足相似理论;(4)在相似函数的定义中,仅考虑了大气稳定度对大气参数梯度的影响,Fairall等^[19]指出,除了大气稳定度外,边界层高度、海面粗糙度等也是一个重要的因素,因此发展更为完善的相似理论也有可能

使大气折射率满足相似理论。

致谢:感谢中科院大气物理所王介民研究员编著的《涡动相关通量观测指导手册》2012版对实验和数据处理的指导。

参考文献:

- [1] Atkinson B W, Li J G, Plant R S. Numerical modeling of the propagation environment in the atmospheric boundary layer over the Persian Gulf[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2000, 40(3): 586-603.
- [2] Babin S M, Dockery G D. LKB-based evaporation duct model comparison with buoy data[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2001, 41(4): 434-446.
- [3] Bean B R, Dutton E J. *Radio meteorology*[M]. Washington D.C.: United States, Government Printing Office, 1966: 435.
- [4] Businger J A, Wyngaard J C, Izumi Y, et al. Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1971, 28(2): 181-189.
- [5] Gryning S E, Batchvarova E, Brümmner B, et al. On the extension of the wind profile over homogeneous terrain beyond the surface boundary layer[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2007, 124(2): 252-268.
- [6] Paulus R A. Practical application of an evaporation duct model[J]. *Radio Science*, 1985, 20(4): 887-896.
- [7] Babin S M, Young G S, Carton J A. A new model of the oceanic evaporation duct[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1997, 36(3): 193-204.
- [8] Ivanov V K, Shalyapin V N, Levadnyi Y V. Determination of the evaporation duct height from standard meteorological data[J]. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2007, 43(1): 36-44.
- [9] Newton D A. COAMPS modeled surface layer refractivity in the roughness and evaporation duct experiment 2001[D]. California: Naval Postgraduate School, 2003: 7-9.
- [10] Ding J L, Fei J F, Huang X G, et al. Development and validation of an evaporation duct model. Part II: evaluation and improvement of stability functions[J]. *Journal of Meteorological Research*, 2014, 29(3): 482-495.
- [11] Gossard E E. The height distribution of refractive index structure parameter in an atmosphere being modified by spatial transition at its lower boundary[J]. *Radio Science*, 1978, 13(3): 489-500.
- [12] Hill R J. Implications of Monin-Obukhov similarity theory for scalar quantities[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1989, 46(14): 2236-2244.
- [13] Cook J, Burk S. Potential refractivity as a similarity variable[J]. *Bound-Layer Meteorology*, 1992, 58(1-2): 151-159.
- [14] Sorbjan Z. Monin-Obukhov similarity for refractive index revisited [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1993, 50(21): 3677-3684.
- [15] Gossard E E. Refractive index variance and its height distribution

- in different air masses[J]. *Radio Science*, 1977, 12(1): 89-105.
- [16] 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.
- [17] 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 大气物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003: 247-250.
- [18] 郭相明, 康士峰, 韩杰, 等. 蒸发波导数据库及中国海域的统计分析[J]. *电波科学学报*, 2013, 28(6): 1152-1157, 1182.
- [19] Fairall C W, Bradley E F, Rogers D P, 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.
- [20] Fairall C W, Bradley E F, Hare J E, et al. Bulk parameterization of air-sea fluxes: updates and verification for the COARE algorithm [J]. *Journal of Climate*, 2003, 16: 571-591.
- [21] 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.

Study on the similarity of ocean atmospheric refractivity

GUO Xiang-ming^{1,2}, KANG Shi-feng², ZHAO Dong-liang¹, ZHANG Yu-sheng²

(1. College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266003 China;

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

Abstract: Based on Monin-Obukhov similarity theory, using the numerical method to validate whether the radio refractivity behave as a similarity variable, numerical results show that the vertical gradient of radio refractivity does not collapse to a single atmospheric stability universal function, but under unstable and near neutral conditions the radio refractivity approximately behave as a similarity variable. Using the hydrometeorology parameters measured by the meteorology grads tower to determine the radio refractivity profile, and with the turbulence data observed using the open path eddy covariance system, experiment results show that the vertical gradient of radio refractivity also does not collapse to a single atmospheric stability universal function when the atmosphere condition is stable.

Key words: radio refractivity; similarity theory; marine atmospheric boundary layer