

风廓线雷达联合 RASS 监测海岸带 大气湿度的方法研究

苏轼鹏¹, 王华²

(1. 海军大连舰艇学院航海系 大连 116018; 2. 海军大连舰艇学院军事海洋系 大连 116018)

摘要: 海岸带湿度对人类生产生活有较大影响。文章根据风廓线雷达和 RASS (Radio Acoustic Sounding System) 测量湿度的相关理论, 结合实测数据计算某海滨观测站个例的大气湿度分布, 并与探空数据进行比对, 分析误差及其原因。结果表明: 风廓线雷达联合 RASS 测量湿度的方法得到的湿度结果与常规探测结果较为接近, 可进一步研究实现其监测海岸带大气湿度的业务化应用。

关键词: 海岸带; 风廓线雷达; 大气湿度; 大气环境; 海洋监测

中图分类号: P7

文献标志码: A

文章编号: 1005-9857(2017)04-0061-05

Theory of Wind Profile Radar and RASS Inverting Humidity of Coast Zone

SU Shipeng¹, WANG Hua²

(1. Department of Navigation, the Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China;

2. Department of Military Ocean, the Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China)

Abstract: Humidity of coast zone affects people. According to the method of calculating Wind Profile Radar and RASS inverting humidity of coast zone, the single example of station humidity was calculated, and it was compared with WPR and RASS data for analyzing the error and the reasons. It was concluded that the two data are very close, and the method of calculating Wind Profile Radar and RASS inverting humidity of coast zone is a useful way to research atmospheric humidity of coast zone.

Key words: Coast zone, Wind Profile Radar, Atmospheric humidity, Atmospheric environment, Marine monitoring

1 引言

海岸带是海陆的分界线和海陆相互作用的地带, 是人类生存和社会发展的重要场所。由于海—

陆—气等因素的共同作用, 海岸带大气海洋环境极其复杂, 对人类生产生活有较大影响。随着 21 世纪海上丝绸之路战略的正式实施, 深入研究海岸带大

气海洋环境特征将为海洋开发建设做出贡献^[1-4]。尤其是其降水特征具有极强的局地性和不稳定性,难以预测。降水产生的大气背景是水汽条件,即大气的湿度分布状况,这是降水预报的关键问题之一。而目前海岸观测站使用的常规探空方法只能反映 1 天 2 个时次的大气湿度情况,不能实现实时监测;地基 GPS(Globe Position System)水汽探测系统可以反演监测水汽条件的变化,但要达到一定精度需要组网探测,在海岸带难以实现,且探测要素单一。近年来,风廓线雷达(Wind Profile Radar)开始在国内广泛应用,其主要功能是监测高空风场,此外将风廓线雷达嵌入 RASS(Radio Acoustic Sounding System)同时可监测气温的垂直分布,结合其他资料可以分析降水过程^[5]、强对流天气过程^[6]、边界层特征^[7]等。风廓线雷达的观测要素除风外,还有许多其他物理量产品,结合 RASS 的温度产品可扩展其测量内容,如湿度^[8]、湍流耗散率^[9]等;但目前这些伴随产品的应用不足,导致观测资源的浪费,如能实现其对湿度的监测,将有利于海岸带大气环境的研究。鉴于此,本研究利用某海滨观测站的数据个例,研究风廓线雷达和 RASS 测量湿度的理论和方法,将其应用于海滨观测个例的湿度计算中,并与探空资料进行比对,分析其误差和测量的有效性,从而得到有价值的研究结论。

2 原理、方法与数据

2.1 风廓线雷达的探测原理

在对流层区域中,空气垂直方向上的对流混合作用很强,会产生大量的湍流,湍流导致空气不均匀的大气折射率,这是风廓线雷达可以探测到大气后向散射的理论依据。湍流的移动可认为与风是基本一致的,风廓线雷达通过对“湍流”反射的雷达径向速度的测量,反演“湍流”的平均移动速度,并以此作为风的速度。为获得风廓线雷达上空三维风场信息,至少需要 3 个以上正交的波束。由于 5 波束反演风场的精度高于 3 波束,大部分风廓线雷达采用 5 波束,5 波束指向为 1 个垂直指向波束和 4 个倾斜指向波束。倾斜波束一般为正东、正西、正南、正北,倾斜波束的天顶夹角一般在 15°左右,雷达工作时按东、西、天顶、南、北的顺序进行探测,

1 个周期探测约为 5 min。5 波束风廓线雷达波束指向示意如图 1 所示^[10]。除三维高空风外,风廓线雷达测量过程中还有谱宽、Cn² 和信噪比等伴随产品。

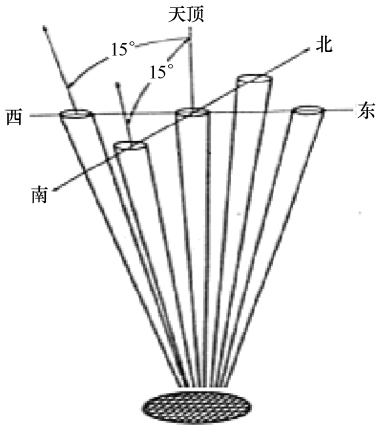


图 1 风廓线雷达 5 波束的几何关系

2.2 RASS 测量虚温原理

无线电一声探测技术(Radio Acoustic Sounding Technology)是一种新兴气象遥感技术,该技术基于声传播理论可反演大气虚温的垂直分布,与风廓线雷达结合可拓展其探测功能。RASS 的探测原理是:声波传播时会使周围空气密度发生变化,导致其折射率随之发生变化,当雷达电磁波经过这些区域会产生后向散射,雷达通过接收这部分能量能测量出不同高度层声传播的速度,并根据声速与虚温的关系得到虚温垂直分布。RASS 反演大气温度的原理如图 2 所示^[11]。

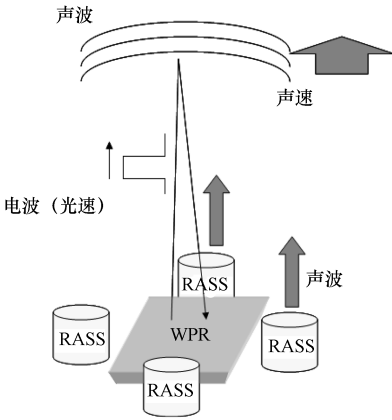


图 2 RASS 反演大气温度的原理

这些声波的速度与大气的虚温存在密切的关系,其表达式为

$$T_v = \frac{c_a^2}{20.046^2} \quad (1)$$

如进行精确计算,可用式(1)将虚温转换为温度,得到实际的大气温度廓线。

2.3 湿度反演的原理

湿度反演理论涉及的许多物理量都可用风廓线雷达直接或间接测量得到,主要包括布维频率、湍流耗散率、湍流结构常数和大气折射梯度等,需首先介绍这些物理量及其计算方法,原理与文献[8]类似。

布维频率 N (Brunt-Vaisala 频率) 是一个与大气静力稳定度有关的参数, N 值越大说明大气稳定度越大,计算式为

$$N^2 = g \frac{\partial \ln \theta}{\partial z} \quad (2)$$

式中: θ 为位温; z 为高度; $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 为重力加速度; θ 可由虚温 T_v 近似计算得到。

湍流耗散率 ϵ 是表征湍流强弱的重要参数, Hocking^[12]、Cohn^[13]、Worthington^[14] 指出湍流耗散率 ϵ 与谱宽 σ^2 之间的关系^[6], 即

$$\epsilon = b N \sigma^2 \quad (3)$$

式中: N 为布维频率; b 为 1 个无量纲常数, Weinstock 指出 $b \approx \alpha_{1-3/2} \approx 0.5$, 本研究 b 值采用 0.6, 与文献[15]相同; α_1 为柯尔莫戈洛夫常数; 谱宽 σ^2 可由风廓线雷达直接测量得到, 描述有效照射体积内散射粒子相对运动的剧烈程度。

大气折射指数梯度 dn/dz 与大气折射率结构常数之间的关系, 其形式为

$$\left(\frac{dn}{dz} \right)^2 = a C_n^2 N^2 \epsilon^{-2/3} \quad (4)$$

式中: $\frac{dn}{dz}$ 为大气折射指数垂直梯度; ϵ 为湍流耗散率; a 为一系数; C_n^2 为湍流结构常数。湍流结构常数 C_n^2 可利用雷达测量的原始信噪比 S_{NR0} 直接测量得到, 用来描述晴空大气湍流运动对电磁波的后向散射能力。

在大气低层, 比湿的垂直分布表达式为

$$\frac{dq}{dz} + A(z)q = B(z) \quad (5)$$

其中, $A(z) = -\frac{2N^2}{g}$, $B(z) = 1.65 \frac{T^2}{P} \frac{dN}{dz} + \frac{1}{7800} \left(\frac{dT}{dz} + \Gamma \right)$;

Γ 为干绝热递减率, 其值为 $0.0098 \text{ } ^\circ\text{C/m}$, 上述方程的解采用位温 θ 可表示

$$q(z) = \theta^2 \left(\int_{z_0}^z B(z) \theta^{-2} dz + \frac{q_0}{\theta_0^2} \right) \quad (6)$$

式中: z_0 为起始高度; q_0 为起始边界比湿; θ_0 为起始边界位温。

2.4 具体方法

利用位于大连附近海滨观测站的 CFL-16 风廓线雷达和 RASS 数据, 采用的计算方法为: 先由温度计算出布维频率, 再得到湍流耗散率, 加上谱宽和湍流结构常数计算出大气折射指数梯度, 最后根据比湿与大气折射指数梯度的关系计算出大气湿度廓线(图 3)。以该方法计算海岸带大气湿度的垂直分布情况。

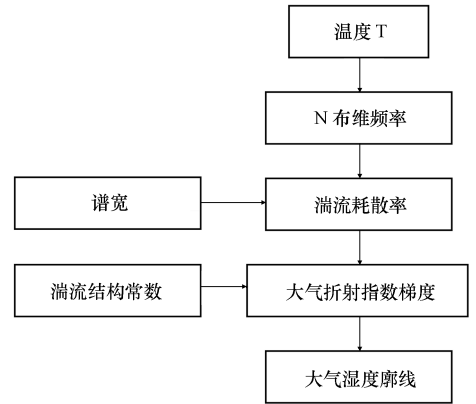


图3 反演大气湿度廓线的计算方法

2.5 实测数据

本研究采用的雷达是航天 23 所研制的 CFL-16 型风廓线雷达, 从探测范围上属于对流层风廓线雷达, 配有 4 个 RASS 发生装置, 位于大连附近海滨观测站。CFL-16 风廓线雷达是以大气湍流为探测目标的脉冲多普勒雷达, 采用全相参相控阵体制, 能够连续提供 $150 \text{ m} \sim 12 \text{ km}$ 高度范围内(垂直分辨率可到 75 m)的大气风场、谱宽、湍流结构常数等气象要素。可按照前述理论和方法得到湿度数据, 并与附近的大连市气象台观测场的标准探空数据进行误差比对分析。大连市气象台观测场与风

廓线雷达与 RASS 均位于海岸带附近,距离约 30 km,在允许的比对范围内。所选数据个例日期为 2015 年 6 月 1 日,但二者时间不同,无线电探空仪测量数据时间为 19 时 15 分,风廓线雷达和 RASS 数据为 17 时 38 分。

3 结果分析

3.1 研究数据

从 6 月 1 日 20 时的地面分析图(图 4)来看,大连地区当天处于鞍形场中,天气形势相对稳定,大气物理特性在一定时间内变化不大。因此,可近似地认为 1738 时刻风廓线雷达+RASS 探测时,气象要素的垂直分布与 1915 时刻基本相同。

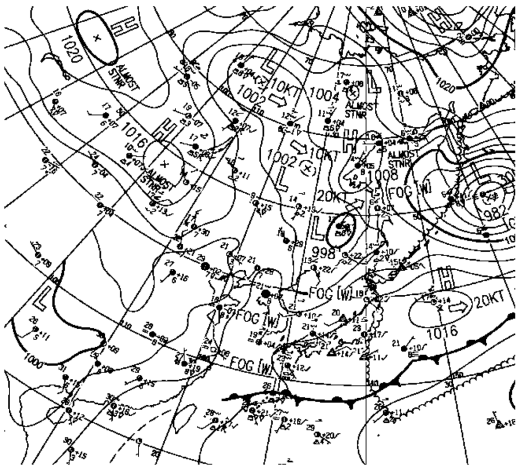


图 4 2015 年 6 月 1 日 20 时地面分析

3.2 数据对比及误差

可按前述理论和方法计算风廓线雷达和 RASS 的数据,计算结果如图 5 所示。布维频率总的趋势是随着高度升高逐渐减小,在 370 m 附近出现极大值,为 $6.255 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}/\text{S}^2$ (图 5(a));由此造成湍流耗散率随高度变化情况与布维频率基本相同,在 295.8 m 处出现极大值,为 0.21(图 5(b));大气湍流结构常数在 370 m 处较大(图 5(c))。可见,风廓线雷达和 RASS 的数据可以反映大气中细微结构变化,这是常规资料无法实现的。

湿度方面,2015 年 6 月 1 日风廓线雷达和 RASS 反演的比湿与无线电探空仪获得的比湿的比较情况如图 6 所示,可见二者吻合较好。

比湿垂直分布的总体趋势是随高度升高而下

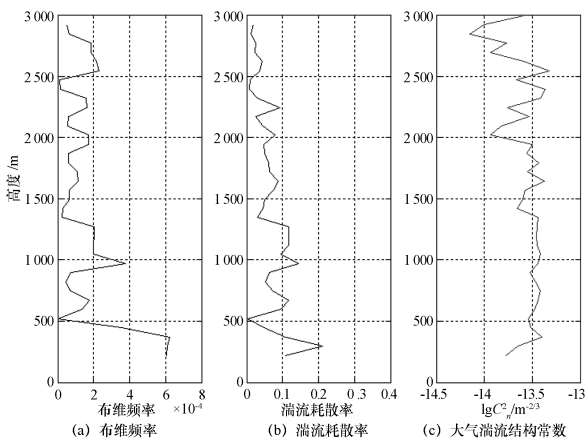


图 5 2015 年 6 月 1 日 1630 时风廓线雷达+RASS 测量数据的计算结果

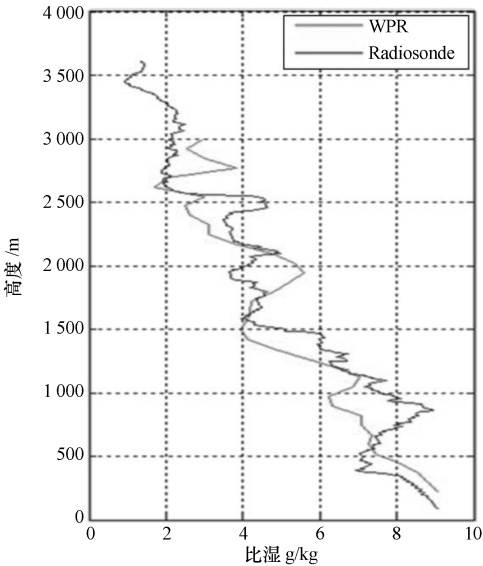


图 6 2015 年 6 月 1 日 1630 时风廓线雷达+RASS 反演的比湿

降,细微差别较为明显,数值差异最大处位于接近 1 000 m 处、2 000 m 附近和 2 500 m 附近,最大误差值超过 2 g/kg;其对应布维频率、湍流耗散率和湍流结构常数在该处附近都有 1 个极大值出现,同时布维频率、湍流耗散率、湍流结构常数在 300 ~ 400 m 附近数值均达到较大值的高度,在 2 种探空资料中都显示为湿度变化剧烈。湿度与这些物理量之间的关系值得深入研究,此外计算湿度采用的温度值是 RASS 测量的,同时 2 个观测地点和时间的差异也是造成误差的原因。

4 结论与展望

本研究利用 CEL-16 型风廓线雷达和 RASS 的实测数据,采用风廓线雷达联合 RASS 测量湿度的方法,计算海岸带实测个例的大气湿度分布。从本次海岸带湿度个例计算结果可得到结论。

(1)风廓线雷达联合 RASS 测量湿度的方法得到的湿度结果与常规探测结果较为接近,误差较小,可进一步进行误差订正研究,在业务应用中作为常规探空手段的补充。

(2)风廓线雷达联合 RASS 的伴随产品,包括布维频率、湍流耗散率和湍流结构常数等,与海岸带大气湿度有一定的相关性,可用来进一步深入研究海岸带大气的微观结构和机理。

本研究也存在不足和需要进一步深入研究的问题:首先,风廓线雷达联合 RASS 测量湿度的垂直分辨率低于探空资料,本个例应用的 CEL-16 风廓线雷达垂直分辨率为 75 m,低于常规探空资料;其次,比对数据的时间地点不一致以及计算湿度应用 RASS 测量温度,是带来误差的原因;最后,可结合风廓线雷达测量的三维风场与其湿度场相结合,得到海岸带大气环境的综合状况。

总之,随着对风廓线雷达联合 RASS 测量方法开展进一步深入研究并实现其对海岸带大气湿度的监测,将为海岸带天气过程演变、海岸带气象预报等相关研究提供有益参考。

参考文献

[1] 郑崇伟,潘静,孙威,等.经略 21 世纪海上丝绸之路之海洋环境特征系列研究[J].海洋开发与管理,2015,32(7):4-9.

[2] 郑崇伟,李崇银,杨艳,等.巴基斯坦瓜达尔港的风能资源评估[J].厦门大学学报(自然科学版),2016,55(2):210-215.

[3] 郑崇伟,黎鑫,陈璇,等.经略 21 世纪海上丝路:地理概况、气候特征[J].海洋开发与管理,2016,33(2):3-10.

[4] 郑崇伟,李崇银.中国南海岛礁建设:重点岛礁的风候、波候特征分析[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2015,45(9):1-6.

[5] 耿建军,李浚河,杜佳,等.2013 年北京地区一次强对流降水天气成因分析[J].气象与环境科学,2016,39(1):52-58.

[6] 曾瑾瑜,夏丽花,陈文键.福建省风廓线雷达资料在一次强对流天气过程中的应用[J].气象与环境科学,2014,37(3):40-48.

[7] 邱繁,王静,王栋成,等.济南章丘大气边界层风温场特征研究[J].气象与环境科学,2015,38(2):36-41.

[8] 孙康远.风廓线雷达反演比湿廓线的试验研究[D].南京:南京信息工程大学,2013.

[9] 张彩云,董德保,翁宁泉.对风廓线雷达的谱宽分析及湍流耗散率的变化特征初步研究[J].大气与环境光学学报,2009,6(4):406-413.

[10] 何平.相控阵风廓线雷达[M].北京:气象出版社,2006.

[11] 谭剑波,彭扬.RASS 声发射系统的设计[J].现代电子,2002(2):17-20.

[12] HOCKING W K.Measurement of turbulent eddy dissipation rates in the middle atmosphere by radar techniques:A review[J].Radio Sci,1985(20):1403-1422.

[13] COHN S A. Radar measurements of turbulent eddy dissipation rate in the troposphere: A comparison of techniques[J].J.Atmos.Oceanic Technol,1995(12):85-95.

[14] WORTHINGTONSTON R M.Tropopausal turbulence caused by the breaking of mountain waves[J].J. Atmos.Sci. Terr. Phys, 1998,60:1543-1547.

[15] CAROI, ANNF, CLAYSON. On Turbulence and Mixing in the free atmosphere inferred from high-resolution soundings[J].J. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2008(6):833-852.