

基于MST雷达垂直风速的大气温度剖面反演*

青海银 张援农 周晨[†] 赵正予 陈昱

(武汉大学电子信息学院空间物理系, 武汉 430072)

(2013年11月17日收到; 2013年12月17日收到修改稿)

本文主要利用MST(mesosphere-stratosphere-troposphere)雷达垂直风速时间序列进行频谱分析, 计算B-V(Brunt-Väisälä)频率, 再根据B-V频率和温度的关系, 本文建立了离散的温度反演模型, 最后反演得到了全高度的温度剖面. 通过计算温度剖面 and 探空仪实测温度剖面比较可见, 二者的符合度非常高, 变化趋势也完全一致. 本文还进一步讨论了, 利用B-V频率和MST雷达的水平风速还可以计算理查德森数, 通过理查德森数可以很清晰的判断大气的稳定性, 进而可以量化大气很多动力学特征以及解释大气中的很多波动现象. 因此, B-V频率的获得是MST雷达对大气动力学研究的又一贡献, 它可以准确地反演大气的温度剖面, 同时获取大气动力学稳定性参数.

关键词: 大气温度, mesosphere-stratosphere-troposphere(MST) 雷达, Brunt-Väisälä(B-V) 频率, 理查德森数

PACS: 43.28.Vd, 84.40.Xb, 92.60.Gn, 94.05.Sd

DOI: 10.7498/aps.63.094301

1 引言

大气温度是大气物理、天气分析与预报及大气环境研究中的一个重要气象参数, 同时大气温度随高度的变化在研究大气湍流结构和大气不稳定性发展过程具有重要的意义. 大气温度信息对研究大气中的光化学和动力学相互作用起着重要作用, 其中臭氧的变化, 大气的各种波动以及高空大气环流都与之有关^[1]. 根据长期的温度实测结果表明, 不同的大气分层模式下的温度变化趋势是不一样的, 基于此, 大气被分为了对流层、平流层和中间层等. 因此, 大气的温度剖面对于研究大气分层进而指导各层大气内模式研究具有非常重要的意义, 世界气象组织(WMO)已经制定了建立全球大气温度观测网的计划. 目前, 低空大气温度测量还主要依靠地面气象台(站)、探空气球以及一些光学雷达. 高空大气温度探测已有的手段主要包括: 火箭、高空探测气球、卫星遥感和激光雷达等^[2-11]. 气象站所获取的温度高度较低, 以

上高度基本都靠模型推演, 与实测大气温度有很大差异; 火箭和高空探测气球费用昂贵, 探测次数受到限制; 光学雷达受天气条件影响, 探测次数得不到保障; 卫星遥感需要地面定标, 并且信号易受干扰; 理论模型研究虽然便捷, 但是很难真实的反映大气的真实温度变化^[12-14]. MST(mesosphere-stratosphere-troposphere)雷达是一种用于大气对流层-平流层-中间层三维风场探测雷达, 它可以做到全天候无人值守探测, 具有较高的时间和空间分辨率.

MST雷达是一种高分辨率的大气探测雷达, 也是目前世界上数量有限的大型地基无线电探测设备之一, 现投入正常工作的MST(或具备其功能的)雷达主要有德国的SOUSY雷达^[15]、加拿大的Resolute Bay雷达^[16]、印度的Gadanki^[17]、日本/印尼的EAR雷达^[18]、瑞典的Estrange雷达^[19]、日本的MU雷达^[20]、中国台湾中坜雷达^[21]、武汉MST雷达^[22-24]和香河MST雷达^[23]. MST雷达是一种晴空探测雷达, 主要是基于布拉格散射对

* 国家自然科学基金青年科学基金(批准号: 41204111)资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: ionolab@whu.edu.cn

一定尺度的湍流进行探测,从而获得大气的三维运动状态及相关参数^[25,26]. 武汉MST雷达坐落于湖北省崇阳县(地理坐标: 114°8'8" E, 29°31'58" N; 地磁纬度约为19.56°), 总占地10000 m². 武汉MST雷达的工作频率是53.8 MHz, 峰值功率大于170 kW, 功率口径积为2.0×10⁸ W·m², 可以进行东、西、南、北、天顶五波数扫描探测, 扫描范围: 20° E—20° W, 20° N—20° S. 根据探测高度, 主要分为三个模式, 包括低模式: 3.5—10 km, 距离分辨率为150 m; 中模式: 11—25 km, 距离分辨率为600 m; 高模式: 60—90 km, 距离分辨率为1200 m. 水平速度分辨率不超过0.5 s/m, 径向速度分辨率不超过0.2 s/m, 系统单模式单波数的最小时间分辨率不超过1 min. MST雷达探测的大气水平风速值可以大于等于35 m/s, 风向范围: 0°—360°(以正北方向为0°, 顺时针旋转).

本文利用我国大陆地区第一部MST雷达的垂直风速, 计算得到当地的B-V(Brunt-Väisälä)频率, 再利用B-V频率反演对流层和平流层的温度剖面, 并将反演结果与无线电探空仪结果进行比较, 证明这种新的大气温度剖面获取方式的可行性和准确性.

2 温度反演模型

对于连续观测的大气垂直速度 $w(h, t)$, 当其分辨率足够高时(根据经验值, 采样时间间隔不能高于2 min), 对其进行傅里叶变化, 可以得到大气垂直风速的扰动频率, 即当地大气的B-V频率. 其中B-V频率的温度表达形式如下^[27]:

$$N^2 = \frac{g}{T} \left(\frac{dT}{dh} + \Gamma \right), \quad (1)$$

式中, N 是B-V频率, 单位: rad/s; T 是大气温度, 单位: K; h 是高度, 单位: km; g 是重力加速度; Γ 是绝热递减率. 反解温度 T 可得

$$T(h) = \frac{1}{I(h)} \left[I(h_0)T(h_0) - \Gamma \int_{h_0}^h I(h)dh \right], \quad (2)$$

$$I(h) = \exp \left(- \int \frac{N^2}{g} dh \right). \quad (3)$$

$I(h)$ 为中间变量, 使得编程计算方便. 对于离散高度采样点, 必须将连续积分进行离散化, 本文利用积分区间中间值进行近似计算, 从而得到离散化的温度反演模型:

$$T(h_i) = \frac{1}{I(h_i)} \left\{ I(h_0)T(h_0) \right.$$

$$\left. - \Gamma \frac{\Delta h}{2} [I(h_i) + 2I(h_{i-1}) + \dots + 2I(h_1) + I(h_0)] \right\}, \quad (4)$$

$$I(h_i) = \exp \left(- \frac{\Delta h}{2g} [N^2(h_i) + 2N^2(h_{i-1}) + \dots + 2N^2(h_1) + N^2(h_0)] \right), \quad (5)$$

其中, h_0 是初始高度, h_i 是离散高度序列.

3 反演试验

3.1 实验数据

2011年9月10日—12日, 武汉大学在MST雷达场地先后组织了10次放球对比试验, 与此同时, MST雷达也进行相应的模式观测, 主要进行的观测模式有: 低模式和中模式全波束观测(获取大气三维风场)以及低模式和中模式垂直波束加密观测(获取连续的高时间分辨率垂直速度). MST雷达通过组合低中两种模式可以获取3—20 km全高度的经纬向风剖面. 本文选择四组MST雷达水平风速和无线电探空仪获取的水平风速对比效果如图1和图2所示^[24].

通过对比计算可以得到图1中的纬向风标准误差(RMSE)分别为1.4589 m/s, 1.7463 m/s, 1.7730 m/s, 1.2097 m/s. 图2中经向风的标准差分别为2.5308 m/s, 2.7582 m/s, 3.1403 m/s, 1.5119 m/s. 从对比图及误差统计结果可以看出, 纬向风具有更高的符合性, MST雷达和探空仪的数据基本完全一致; 对于经向风, 二者的变化趋势也几乎完全一致, 只是探空仪的数据更加平滑, MST雷达数据在一些高度上具有很强的跳变值, 这与二者的探测机理是有联系的. MST雷达是大气晴空湍流探测雷达, 它对于满足一定尺寸(半波长)的湍流运动反应特别灵敏, 而与上下高度的其他情况无关, 几乎探测是本高度的绝对湍流速度; 而无线电探空仪计算的是速度矢量差, 所以前后高度的数据是有相互联系的, 故不可能出现剧烈的跳变值. 分析MST雷达出现速度跳变值的高度大部分在12—16 km, 而这个区域正是其所在纬度区域的对流层顶变化区域, 这个区域的大气受各种因素的影响, 具有很高的不稳定性, 由于各种急流片的存在, 故在一些狭窄的高度层上具有很强的风切变现象. 综合比较可以看出, MST获取的大气三维风场速度是可信的, 其数据精度能够满足大气科学研究的基本要求.

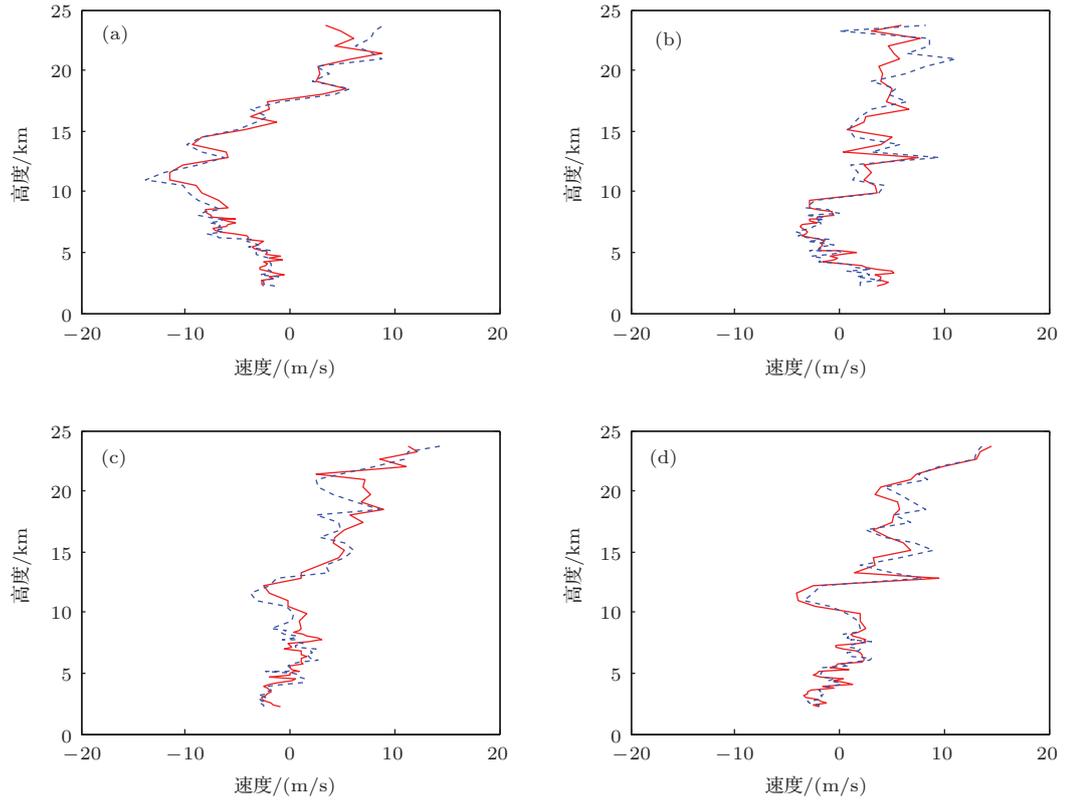


图1 纬向风比较 (a) 2011年9月10日 17:15; (b) 2011年9月11日 16:52; (c) 2011年9月12日 06:46; (d) 2011年9月12日 09:21(红实线为MST雷达数据, 蓝点线为无线电探空仪数据)

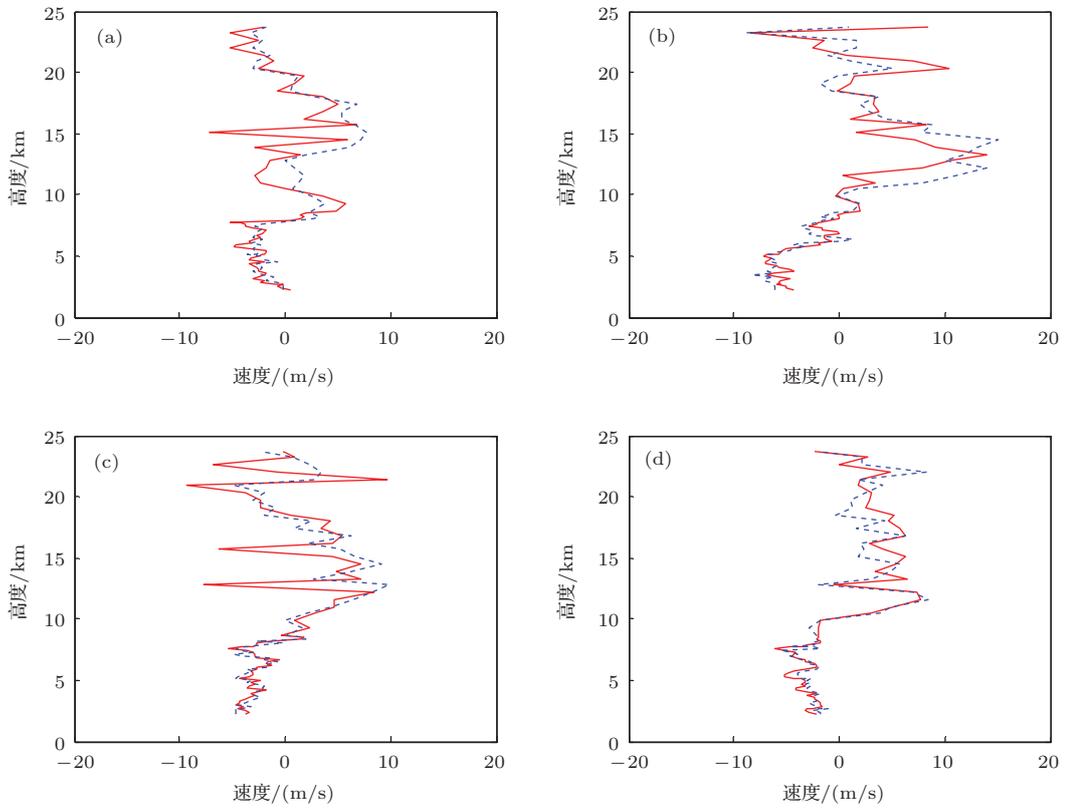


图2 经向风比较 (a) 2011年9月10日 17:15; (b) 2011年9月11日 16:52; (c) 2011年9月12日 06:46; (d) 2011年9月12日 09:21(红实线为MST雷达数据, 蓝点线为无线电探空仪数据)

表 1 雷达参数

探测模式	脉冲周期/ μs	脉冲宽度/ μs	天线增益/dB	脉间积累	谱平均	时间分辨率/s	持续时间/s
低模式	160	8	33	128	5	32	3200
中模式	320	32	33	64	5	63	5040

为了获取分辨率更高和更加准确的B-V频率,本次试验垂直风度采用垂直波束直接计算获得,从而可以避免多波数校正消耗时间,持续时间约为1 h. 雷达设定的单模式单波束探测参数及时间分辨率如表 1 所示.

由表 1 可知,低模式(中模式)全剖面垂直风速采样时间 32 s(63 s),总共采样 100 点(80 点),总时间长度为 3200 s(5040 s),对应的频谱分辨率为 0.0003125 Hz(0.0001984 Hz),奈奎斯特频率区间为 0.0156 Hz(0.00794 Hz). 低模式的探测起始时间是 9 月 10 日 14:57,中模式的探测起始时间是 9 月 11 日 18:57. 通过每个高度的垂直速度时间序列的傅里叶变换,频谱最大幅值对应的频率即为当地的 B-V 频率,应用低模式的观测数据,计算得到几个高度的垂直速度频谱如图 3 所示.

从图 3 中可以看出,几个高度的速度频谱都具有明显的峰值,可以很准确的捕获该高度的主频(即 B-V 频率),本文用同样的方法计算了低模式(3.15—16.65 km)和中模式(3—34.8 km)各个高度的 B-V 频率,如图 4 所示.

从图 4 中可以看出,对流层区域的 B-V 频率基本都比平流层的低,对流层 B-V 频率的平均值基本在 0.02 rad/s 左右,而平流层 B-V 频率的平均值在 0.06 rad/s 左右,同时在对流层顶处 B-V 频率有明显的跳变值,对于低模式观测的时间区间, B-V 频率跳变值发生在 12 km 处,即此时的对流层顶高度约为 12 km;对于中模式观测时间区间, B-V 频率跳变值发生在 12.6 km 处,即此时的对流层顶高度约为 12.6 km.

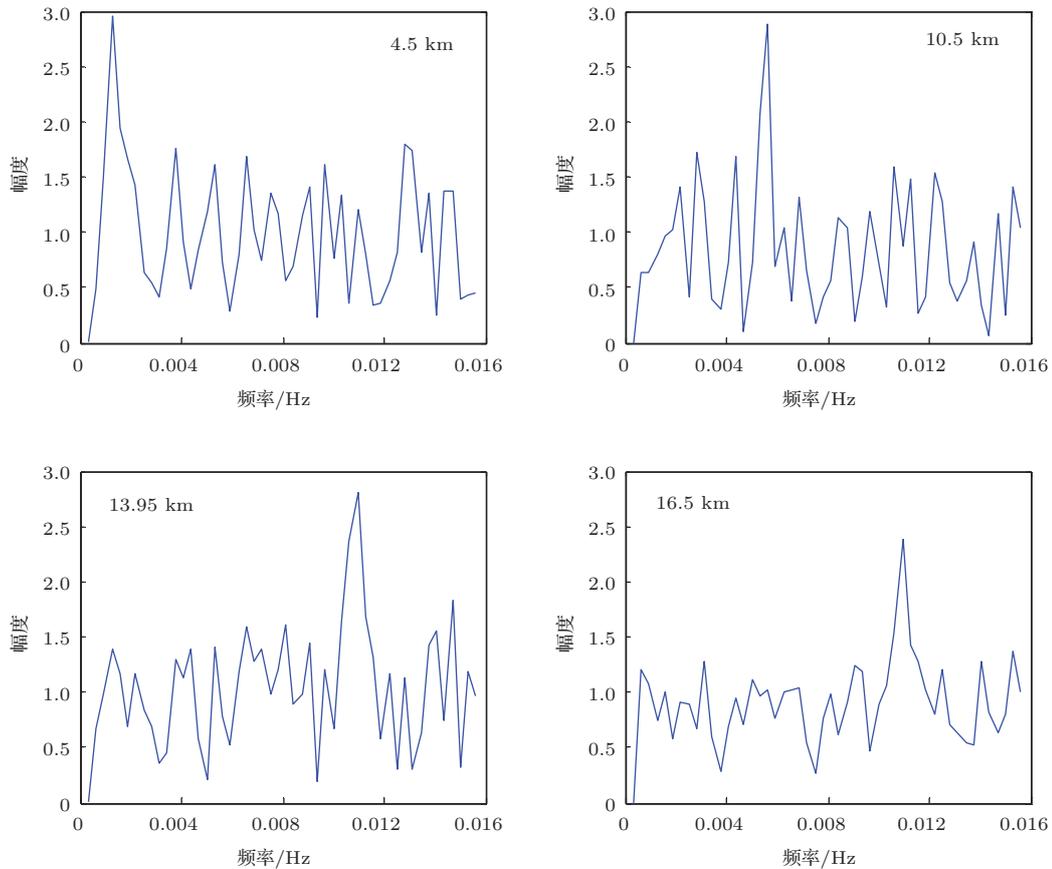


图 3 垂直速度频谱

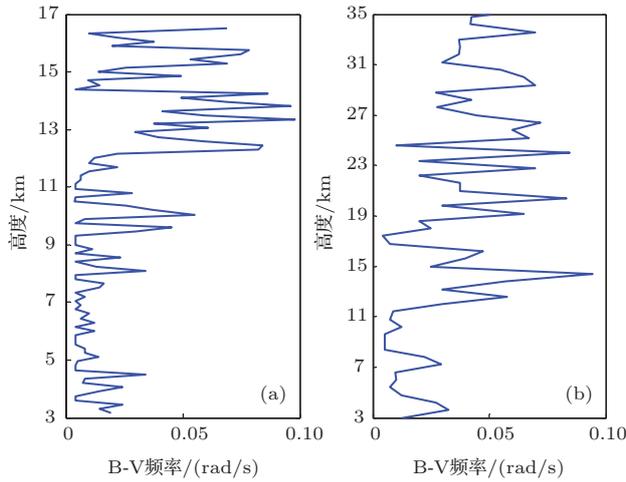


图4 B-V 频率剖面 (a) 低模式 B-V 频率; (b) 中模式 B-V 频率

3.2 反演结果及对比

为了反演温度剖面, 本文首先要计算两个基本值: 1) 初始高度温度; 2) 绝热递减率. 对于初始高度温度, 本文选择利用地面实测温度, 然后再假设以 5 K/km 的递减率 (通过实测的 10 组地面温度和探空仪在 3 km 处的温度差的平均值除以 3 而得到) 来计算 3 km 高度的温度. 低模式观测期间地面平均温度是 30 °C; 中模式观测期间地面温度是 21 °C. 对于整个高度上的绝热递减率, 因为在中国地区没有完整的统计数据, 本文利用 NRLMSISE-00 模型直接计算得到 [28,29]. 利用 (4) 和 (5) 式迭代计算, 可以得到完整的温度剖面, 如图 5 所示. 同时, 本文利用计算反演的温度剖面与当时的无线电探空仪实测数据进行比较, 其中低模式主要比较高度为 3—12 km, 中模式比较高度为 3—14 km 和 21—25 km, 14—21 km 高度数据由于探空仪数据缺失而无法比较, 比较结果如图 5 所示.

从图 5 可以看出, 通过温度反演模型可以计算得到完整的温度剖面, 同时根据相应的探空仪比对结果可以看出, 计算温度和实测温度具有很高的相似性, 趋势完全一致, 数据差别也很小, 在低模式最大绝对误差为 5.1 K, 在中模式最大绝对误差为 7.4 K. 由此可见通过本文的方法反演温度剖面是完全可行的, 结果也是可靠的. 同时也说明, 本文利用垂直速度时间序列计算的 B-V 频率是正确的, 那么通过 B-V 频率和水平风速 (MST 雷达的基本数据) 还可以通过如下关系式计算得到理查德森数.

$$Ri = \frac{N^2}{(dU/dh)^2}, \quad (6)$$

其中, U 是水平风速, 单位 m/s; h 是高度, 单位: m. 理查德森数是一个非常重要的衡量大气稳定性的参数, 当 $Ri < 0.25$, 大气动力不稳定性发生, 伴随着会有较强的风切变或对流发生, 图 6 给出了一组低模式数据计算的结果. 一般在对流层顶区域, 理查德森数比较小, 此时的大气运动很不稳定, 所以基于此也可以确定对流层顶高度; 同时理查德森数也可以用来很好的解释大气的一些波动现象, 比如讨论重力波的源 [30-37].

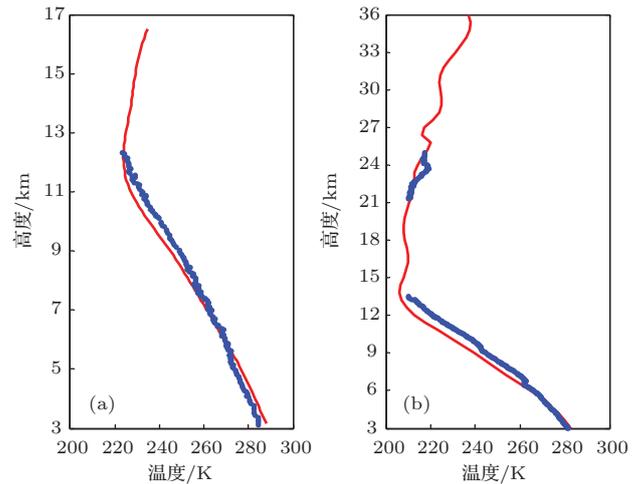


图5 温度剖面 (红实线为计算温度; 蓝点线为实测温度) (a) 低模式对比结果; (b) 中模式对比结果

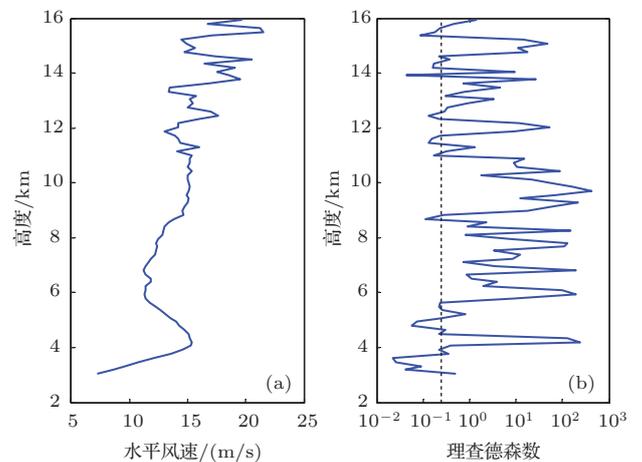


图6 计算的理查德森数 (a) 水平风速高度剖面 (时间为 2011 年 9 月 10 日 14:35); (b) 由低模式 B-V 频率及水平风速计算得到的理查德森数 (进行了对数显示, 虚线代表了 $Ri = 0.25$)

从图 6 的计算结果可以看出, 在 3—5 km 区域存在 $Ri < 0.25$, 对于此高度区间的水平风速存在一个明显的切变, 在 11—16 km 区域也存在多个高度的 $Ri < 0.25$, 而此高度区间这是该地区对流层顶所处的区域, 因此大气动力学非常不稳定, 对比

左图的水平风速剖面也可以看出, 在对流层顶区域的风速变化比较剧烈.

4 结 论

通过MST雷达水平风速和探空仪数据对比可以看出, MST雷达获取的三维风场信息是可信的. 本文主要利用MST雷达垂直风速时间序列进行频谱分析, 计算B-V频率, 计算结果与张绍东等人用探空仪统计的B-V频率基本一致^[38], 并且从MST雷达垂直速度计算出的B-V频率在对流层顶处有更剧烈的跳变值, 对于对流层顶高度的判别非常灵敏, Siddarth, Padmavati 和 Satheesan 等也用此方法来判读对流层顶的高度和检测大气湍流强度^[39-47]. 根据B-V频率和温度的关系, 本文建立了离散的温度反演模型, 最后计算得到了全高度的温度剖面. 通过计算温度剖面 and 探空仪实测温度剖面比较可见, 二者的符合度非常高, 变化趋势也完全一致, 本文和Revathy利用Gadanki MST雷达计算的结果基本一致^[27]. 本文还进一步讨论了, 利用B-V频率和MST雷达的水平风速计算理查德森数, 通过理查德森数可以很清晰的判断大气的稳定性, 进而可以量化大气的很多动力学特征以及解释大气中的很多波动现象. 因此, B-V频率的获得是MST雷达对大气动力学研究的又一贡献, 它可以准确的反演大气的温度剖面, 同时获取大气动力学稳定性参数.

本项成果使用国家重大科技基础设施项目子午工程科学数据, 在此表示最诚挚的感谢.

参考文献

- [1] Chen X, Wang X, Wu K, Cheng Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 7327 (in Chinese)[陈曦, 王霞, 吴锴, 成永红 2010 物理学报 **59** 7327]
- [2] Bi Y, Liao M, Zhang P, Feng G 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 159301 (in Chinese)[毕研盟, 廖蜜, 张鹏, 马刚 2013 物理学报 **62** 159301]
- [3] Liu X Q, Hu S X, Weng N Q, Li C, Hu H L, Zhang Y C 2006 *Journal of Atmospheric and Environmental Optics* **1** 188 (in Chinese) [刘小勤, 胡顺星, 翁宁泉, 李深, 胡欢陵, 张寅超 2006 大气与环境光学学报 **1** 188]
- [4] Zhao J N, Ai Y, Wang J F 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 129401 (in Chinese)[赵江南, 艾勇, 王敬芳 2011 物理学报 **60** 129401]
- [5] Peng C, Zhang Z Q 2012 *Meteorological Monthly* **38** 1033 (in Chinese) [彭冲, 张祖强 2012 气象 **38** 1033]

- [6] Li W, Xing Y, Ma S Q 2009 *Meteorological Monthly* **35** 97 (in Chinese) [李伟, 邢毅, 马舒庆 2009 气象 **35** 97]
- [7] Bu L, Guo J, Tian L, Huang X, Liu B, Feng Y 2010 *High Power Laser and Particle Beams* **22** 1449 (in Chinese) [卜令兵, 郭劲秋, 田力, 黄兴友, 刘博, 冯永伟 2010 强激光与粒子束 **22** 1449]
- [8] Jiang Y, Sheng Z, Shi H Q 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 039205 (in Chinese)[江宇, 盛峥, 石汉青 2013 物理学报 **62** 039205]
- [9] Xu Z Y, Liu W Q, Liu J G, He J F, Yao L, Ruan J, Chen J Y, Li H, Yuan S, Geng H, Kan R F 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 234204 (in Chinese)[许振宇, 刘文清, 刘建国, 何俊峰, 姚路, 阮俊, 陈玖英, 李晗, 袁松, 耿辉, 阚瑞峰 2012 物理学报 **61** 234204]
- [10] Zhu H C, Zhang C M, Jian X H 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 893 (in Chinese)[朱化春, 张淳民, 简小华 2010 物理学报 **59** 893]
- [11] Wang M, Hu S X, Fang X 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5091 (in Chinese)[王敏, 胡顺星, 方欣 2009 物理学报 **58** 5091]
- [12] Zhi R, Gong Z Q, Zheng Z H 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2113 (in Chinese)[支蓉, 龚志强, 郑志海 2009 物理学报 **58** 2113]
- [13] Liu D, Wang F, Huang Q X 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4812 (in Chinese)[刘冬, 王飞, 黄群星 2008 物理学报 **57** 4812]
- [14] Han L S, Zhu H L, Zhang C 2013 *Chin. Phys. Lett.* **30** 108501
- [15] Rudiger R, Jurgen K, Jurgen R 1986 *IEEE T. Geosci. Remote.* **24** 966
- [16] Hocking W K, Kelley M, Rogers R 2001 *Radio Sci.* **36** 1839
- [17] Rao P B, Jain A R, Kishore P 1995 *Radio Sci.* **30** 1125
- [18] Fukao S, Hashiguchi H, Yamamoto M 2003 *Radio Sci.* **38** 1053
- [19] Phillip B, Chilson, Sheila K 1999 *Radio Sci.* **34** 427
- [20] Shoichiro F, Toru S, Toshitaka T 1985 *Radio Sci.* **20** 1155
- [21] Rttger J, Liu C H, Chao J K 1990 *Radio Sci.* **25** 487
- [22] Zhao Z, Chen G, Li C 2011 *XXXth URSI Istanbul*, Aug. 13-20, 2011 p1-4
- [23] Wang C 2012 *Chinese J. Space Sci.* **30** 382
- [24] Zhao Z, Zhou C, Qing H 2013 *Radio Sci.* **48** 326
- [25] Eswaraiyah M, Venkat S, Ratnam 2011 *J. Geophys Res.* **116** D 22117
- [26] Chen, Hassen S 2008 *Radio Sci.* **43** RS 4020
- [27] Revathy K, Prabhakaran Nair S R, Krishna Murthy B V 1996 *Geophys. Res. Lett.* **23** 285
- [28] Picone M, Hedin A E, Drob D <http://modelweb.gsfc.nasa.gov/atmos/nrlmsise00.html/> [2013-12-5]
- [29] Picone J M, Hedin A E, Drob D P, Aikin A C 2002 *J. Geophys Res.* **107** A12,SIA-15
- [30] Sanjay K, Krishna Murthy B V, Narayana Rao D, Venkat Ratnam M, Parameswaran K, Rajeev K, Suresh Raju C, Kusuma G 2008 *J. Geophys Res.* **113** D7
- [31] Cui X P 2008 *Chin. Phys. B* **17** 2304
- [32] Li Z L 2009 *Chin. Phys. B* **18** 4074
- [33] Sasi M N, Krishna Murthy B V, Geetha R, Satheesan K, Parameswaran K, Rajeev K, Sunilkumar S V 2003 *Adv. Space Res.* **32** 813

- [34] Ramkumar T K, Niranjana kumar K, Sanjay K 2010 *J. Geophys Res.* **115** D24
- [35] Sunilkumar S V, Parameswaran K 2005 *J. Geophys Res.* **110** D13
- [36] Parameswaran K, Sasi M N, Geetha R, Prabha R, Deepa V, Krishna B V 2000 *J. Atmos. Sol-Terr. Phy.* **62** 1327
- [37] Hocking W K 1997 *Radio Sci.* **32** 6
- [38] Zhang S D, Yi fan, Huang C M, Chen Z Y 2008 *Ann. Geophys.* **26** 2005
- [39] Siddarth S D, Ghosh A K, Satheesan K, Jain A R, Uma K N 2010 *Radio Sci.* **45** 4
- [40] Bijoy V, Sunilkumar S V, Parameswaran K 2009 *J. Geophys Res.* **114** D8
- [41] Padmavati K, Ramachandran S, Bhavani Kumar Y, Narayana Rao D 2008 *J. Geophys Res.* **113** D17
- [42] Satheesan K, Krishna Murthy B V 2005 *J. Atmos. Sol-Terr. Phy.* **67** 878
- [43] Satheesan K, Krishna Murthy B V 2004 *Q. J. Roy. Meteor. Soc.* **130** 599
- [44] Parameswaran K, SunilKumar S V, Krishna Murthy B V, Satheesan K 2003 *Atmos. Res.* **69** 29
- [45] Satheesan K, Krishna Murthy B V 2002 *J. Geophys Res.* **107** D1
- [46] Kim K, Jung E, Bernard C, Heo B 2001 *J. Meteorol. Soc. Jpn.* **79** 1093
- [47] Andreas M, Phillip B, David A, Robert D 2001 *Q. J. Roy. Meteor. Soc.* **127** 572

Atmospheric temperature profiles estimated by the vertical wind speed observed by MST radar*

Qing Hai-Yin Zhang Yuan-Nong Zhou Chen[†] Zhao Zheng-Yu Chen Gang

(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

(Received 17 November 2013; revised manuscript received 17 December 2013)

Abstract

Atmospheric temperature is an important parameter for studying the process of atmospheric dynamics and photochemistry, and is a significant sign of the atmospheric vertical stratification structure. It is a challenge in atmospheric science research to obtain temperature profiles with high space-time resolution all the time. MST (mesosphere-stratosphere-troposphere) radar, which is the modern large-scale ground-based radio remote sensing equipment, can measure 3D atmospheric winds with high space-time resolution and unattended 24 hours a day. This paper uses the time series of vertical wind observed by MST radar to make spectral analysis and calculate B-V (Brunt-Väisälä) frequency. Then this paper builds the discrete model of temperature inversion based on the relationship between B-V frequency and temperature. Compared with actual measurement of temperature from radiosondes, the agreement between the radiosonde profile and the profile from MST radar data is quite good. Furthermore, the Richardson number can also be obtained by using the B-V frequency and horizontal winds, which can judge the atmospheric stability, quantize many of the dynamic characteristics, and explain the wave phenomenon. So the acquisition of B-V frequency is MST radar's another outstanding contribution to atmospheric dynamics research. It can accurately calculate the atmospheric temperature profiles and attain dynamic stability parameters.

Keywords: atmospheric temperature, mesosphere-stratosphere-troposphere radar, Brunt-Väisälä frequency, Richardson number

PACS: 43.28.Vd, 84.40.Xb, 92.60.Gn, 94.05.Sd

DOI: 10.7498/aps.63.094301

* Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41204111).

† Corresponding author. E-mail: ionolab@whu.edu.cn