利用 F 区电离层特性参量获取等效中性风的方法及讨论*

刘立波　雷久侯　栾晓莉　万卫星　宁百齐

(中国科学院武汉物理与数学研究所　武汉　430071)

摘　要

讨论利用电离层特性参量获取 F 层峰值高度附近中性风信息的三类方法. 这些方法主要有: 传统的和改进的伺服理论方法、借助电离层模式和数据同化思想的方法和刘立波等提出的方法. 并以美国 Millstone Hill 非相干散射雷达浓度剖面和离子速度数据, 以及澳大利亚 Beveridge (37°S, 144°E) FPI 风场和测高仪数据为个例, 初步考察利用电离层特性数据导出的等效中性风与观测值的一致性.

关键词　伺服理论; 数据同化; 等效风; 电离层

1　引言

电离层高度上中性风、电场信息对认识热层-电离层的形态结构和动力学、电动力学过程等具有重要意义. 人们通过直接 (Fabry-Perot 干涉仪、卫星等) 与间接测量 (如非相干雷达) 获得有关中性风、电场信息. 此外, 利用电离层特性参量获得 F 层峰区附近中性风、电场信息是另一种可行的途径.

除借助卫星的现场探测和分析卫星轨道获得中性风信息外, Fabry-Perot 干涉仪 (FPI) 探测电离层高度上 630 nm 气晖 Doppler 频移来获取中性风和温度等信息 [1], 是直接探测中性风的最重要手段. 非相干散射雷达 (ISR) 获取中性风信息是以 Vasseur 在 1969 年工作为起点, 从非相干散射雷达探测的场向离子速度中提取沿磁力线方向的中性风 [2]. Fabry-Perot 干涉仪对观测条件的严格要求和目前对白天日光和夜间杂散光滤除处理的技术困难, 以及非相干散射雷达昂贵的建站与日常维持费用, 导致难以依赖 Fabry-Perot 干涉仪和非相干散射雷达进行全球多点不间断的常规性观测.

显然, 因为测高仪的长期常规性观测和全球台网分布特点, 测高仪探测电离层特性参量具有较好的时间和空间覆盖率且费用低廉的优势. 利用电离层特性参量估计电离层 F 区高度上中性风、电场信息, 是一个可行的途径, 其能达到的时空覆盖面将显著优于其他手段. 同时, 这也使电离层测高仪应用于新的方向. 本文将简介这些方法, 并利用美国 Millstone Hill 非相干散射雷达数据和澳大利亚 Beveridge (37° S, 144° E) 的 FPI 风场和测高仪数据, 将从电离层数据导出等效中性风的计算结果和观测值进行初步比较, 而在不同条件下的定量比较将另文介绍.

* 国家自然科学基金 (40274054,40134020) 和国家重点基础研究规划项目 (G2000078407) 资助

2002-10-17 收到原稿,　2003-01-09 收到修定稿

2 从电离层参量间接获取中性风信息方法

利用电离层垂测数据间接获取热层风场、电场具有可行性和重要意义. 近年来, 由于难以进行长期的多地区中性风场常规观测, 国际上利用电离层垂测数据推求热层中性风场的研究工作日趋活跃 [3]-[7]. 这些工作所采用方法的物理基础是在 F 层峰及顶部电离层中动力学因素 (中性风和电场) 密切控制这一区域电离层的演变, 特别是峰高的变化. 换而言之, F 层峰高等对中性风和电场等动力学因素的作用很敏感. 研究表明, 中性风通过碰撞拖曳密切影响电离层: 赤道向中性风拖曳等离子体沿磁力线向上漂移, 峰高趋于上升; 极向中性风引起等离子体沿磁力线向下漂移, 使峰高趋于下降. h_mF_2 的大小不仅受中性风的影响, 还受电场的影响, 纬度越低, 电场的作用越大. 由 F 峰处参数得到的等效风是包括了电场和风场的共同贡献. 不过由于电场和风场对磁力线位形的不同依赖性, 电场和风场在不同磁倾角地区对等效风的贡献份额很不一样. 在低磁倾角地区, 等效风实质上绝大部分为电场的作用; 在中纬地区一般情况 (存在大扰动电场的情形除外) 则为中性风的贡献; 在低纬地区, 一般认为, 获得的等效风是中性风和电场的共同贡献. 我们利用武汉 2000 年和 2001 年的数据并借助相关经验模式, 发现在平均或平静情况下, 获得的武汉地区等效风中中性风的贡献要显著大于电场的份额 [8]. 对中低纬地区, 考察平静和平均情况时, 等效风中电场的作用也可以通过借助相关电场经验模式等手段进行分离, 得到相应中性风的信息.

从电离层垂测特性参量间接获取电离层 F 层峰高附近中性风信息的方法, 主要可概括为传统的 [3] 和经 Buonsanto 等 [2],[4] 和 Titheridge[5] 改进的伺服理论方法, Miller 等借助电离层模式 [6] 和 Richards 的数据同化方法 [7], 以及刘立波等 [8],[9] 提出的新方法.

方法 1 传统的和经 Buonsanto 等和 Titheridge 改进的伺服理论方法

1978 年 Rishbeth[3] 在研究中性风对电离层的作用时提出伺服方程, 以此奠定了分析中性风对电离层作用和从电离层特性参量中获取电离层 F 层峰高附近中性风信息的理论基础. 基于伺服理论, 电离层 F 层峰高相对其平衡高度 (无外加风场和电场作用电离层处于平衡态时的峰高) 的变化 $\Delta(h_mF_2)$ 与引起其变化的中性经向风 U 之间近似有 $U \propto \Delta(h_mF_2)$. Buonsanto 等人 [2],[4] 则通过调整伺服方程中常数, 使之更符合观测结果. Titheridge[5] 改进平衡高度的确定方法, 从另一角度改善伺服理论方法.

与利用非相干散射雷达以及 FPI 仪观测得到的风场数据比较, 发现伺服理论导出的风场与观测具有很好的统计一致性. 由于伺服理论需要假设存在一个无外加风场和电场的电离层平衡态, 并给出相应的平衡高度. 在大多数条件下, 电离层达到平衡态的时间常数很大, 换句话说, 电离层常偏离平衡态, 尤其在电离层峰高较低以及日落日出时平衡高度 h_e 难以确定或正确得到, 可能使得获得的风场误差增大.

方法 2 Miller 等借助电离层模式和 Richards 的数据同化方法

由于难以确定假设的电离层平衡高度, Miller 等 [6] 借助电离层模式计算不同中性风作用下的电离层峰高, 由此得到峰高变化和所施加中性风的关系, 进而得到等效风. 考虑到电离层对中性风的响应存在时间延迟, 这种延迟将使结果带有不定性, Miller 的方法应用存在一定困难.

基于数据同化的思想， Richards[7] 把观测的峰高等作为电离层模式的约束条件，调整模式中性风量值使模式的计算值和相应观测值吻合，认为调整后的中性风即为观测条件下的中性风. 该方法不要确定电离层平衡高度，已成功地获取了一些热层中性风信息. 除峰高和临界频率外，最近的数据同化研究甚至已经把整个电离层电子浓度剖面作为约束条件，无疑将可得到更多的信息. 电离层模式数据同化方法对提高模式的计算精度、分析所考察条件下的动力学因素及与其电离层的作用有其重要意义. 不足之处是，该类方法需要一个电离层模式，计算和处理具有很强的技术性，也显得繁琐、复杂. 得到的中性风精度依赖所采用的电离层理论模式的预报或再现能力，即电离层模式的合理性将有可能影响得到的中性风等的可靠与计算精度.

方法 3　我们的方法

沿用传统伺服理论的部分假设，基于电离层连续性方程和动量方程，可导出从中低纬电离层特性数据获取电离层信息的基本方程 [8],[9]. 这些假设 [3] 包括： (1) O^+ 为电离层 F 层峰高和峰上的最主要离子成分. (2) 顶部电离层剖面可拟合为一个函数 (如 Rishbeth[3] 所用到的假设为 Chapman 层). (3) 顶部和水平输运可以综合表示为峰处产生率、损失率和电子密度变化率的函数. 应指出的是，这 3 个假设也是方法 1 所必需的. 本文计算时取 Rishbeth[3] 所用到的假设为 Chapman 层 (可以是介于 Chapman-α 层或 Chapman-β 层间). 这样的假定至少是适用于大部分平均或磁平静情况，是得到非相干雷达数据支持的 (我们利用 Chapman 层能很好拟合非相干雷达剖面数据).

刘立波等的方法认为电离层所处高度及其变化是中性风和电场等动力学因素和化学过程、双极扩散等过程共同作用的结果. 其从电离层特性数据获取等效风不基于电离层峰高和相应的平衡高度间的差异. 这个方法克服了应用伺服理论需确定平衡高度的问题，不用到平衡高度 h_e. 另外，该方法计算非常简单，也不需借助电离层理论模式. 利用这一方法，我们已进行了一些初步的工作，如武汉地区等效风对太阳活动的依赖性、2000—2001 年等效风的季节特征 [8].

3　基于电离层参量数据获取中性风信息方法的初步比较

3.1　与 Millstone Hill 的非相干散射雷达数据比较

以 1990 年第 177—180 天 Millstone Hill 的非相干散射雷达数据为代表，考察利用这些方法导出等效中性风的计算结果和观测值的吻合程度.

在 1990 年第 170—180 天期间地磁活动较平静，日均 Ap 指数值除在第 178 天为 12 外，其余在 7—8 水平. 图 1 为 1990 年第 177—180 天 Millstone Hill 非相干散射雷达探测的 N_mF_2 和 h_mF_2(已分段最小二乘拟合). 图 2 为利用第 2 节描述的 3 种方法从示于图 1 的电离层数据导出的等效风及 Millstone Hill 非相干散射雷达观测值在垂直方向的投影. 有关 Millstone Hill 非相干散射雷达观测确定中性风值的方法请参阅 Hangan[10] 的介绍. 三种方法的结果与从非相干散射雷达探测导出的等效风接近，以周日分量为主，在白天向下，夜晚向上，这与中低纬地区热层经向风白天主要是极向 (引起等离子体向下漂移)，夜晚主要是赤道向 (引起等离子体向上漂移) 的日变化趋势一致. 伺服理论 (方法 1) 的结果

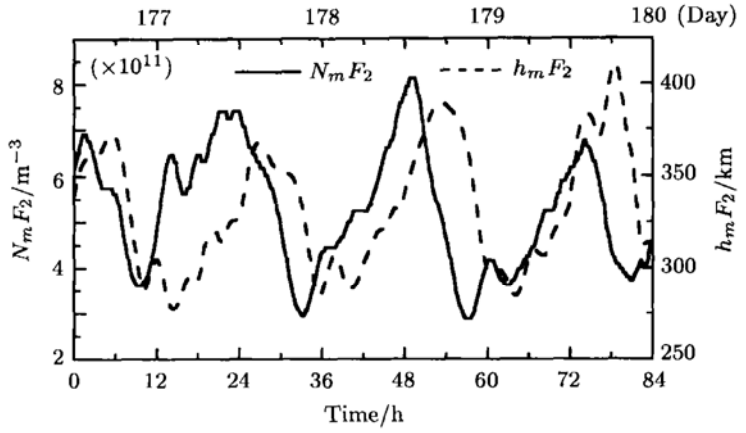


图 1 1990 年第 177—180 天 Millstone Hill 非相干散射雷达探测的 N_mF_2 和 h_mF_2

Fig.1 N_mF_2 and h_mF_2 as a function of universal time during day of year (DOY) 177—180 in 1990 observed with the Millstone Hill Incoherent Scatter Radar

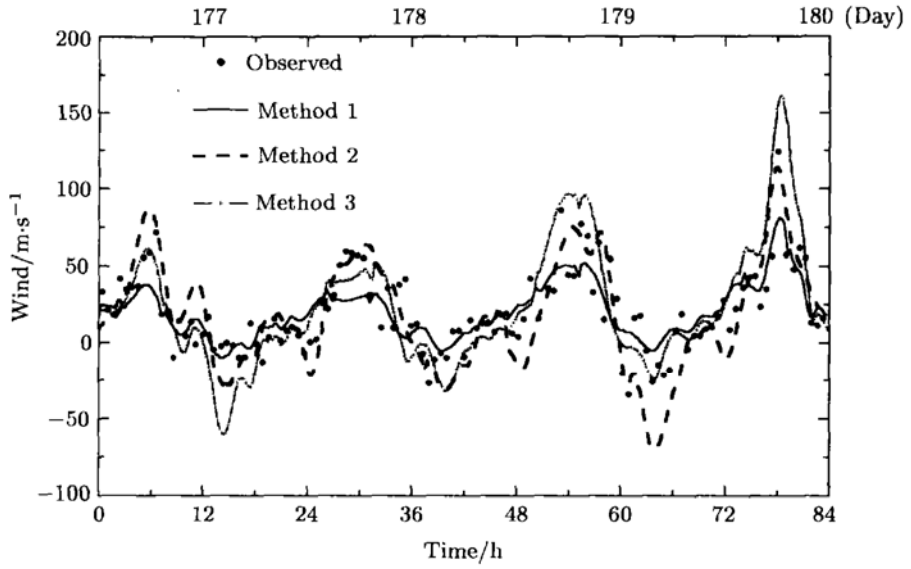


图 2 利用 3 种方法从图 1 数据导出的等效风及 Millstone Hill 非相干散射雷达探测导出的等效风在垂直方向的投影

Fig.2 A comparison of the vertical projection of equivalent winds derived from the critical parameters shown in Fig.1 with three approaches discussed in this paper and with the Millstone Hill Incoherent Scatter Radar observation. The dotted points show the equivalent winds observed with the Millstone Hill Incoherent Scatter Radar. The solid, dashed and dash-dotted lines represent the results derived with methods 1, 2 and 3, respectively

在白天吻合得较好，而夜间的南向速度偏小. Richards 提出利用电离层峰高，可得到等效风场，即方法 2. 在这里，将这一方法进行改进，利用我们建立的电离层模式，运用列维布格-麦奎尔特 (Levenberg-Marguardt) 标准的非线性最小二乘法，调节中性大气的逃逸温度 (T_{ex}) 及等效中性风，使得电子浓度剖面模式值与观测的误差达到最小. 这一数据同

化的方法，能更有效地利用观测数据，来反演未知参量 (关于这一方法的原理我们另文介绍). 图 2 中虚线即为调节后得到的等效风，不仅包括主要的周日分量还包括丰富的谐波分量，除 179 天少数时段北向速度略大外，与探测结果有很好的一致性. 运用方法 3 的结果，除第 177 天的白天峰高较低及第 180 天的夜间峰高较高的少数时段外，与探测结果吻合得相当好.

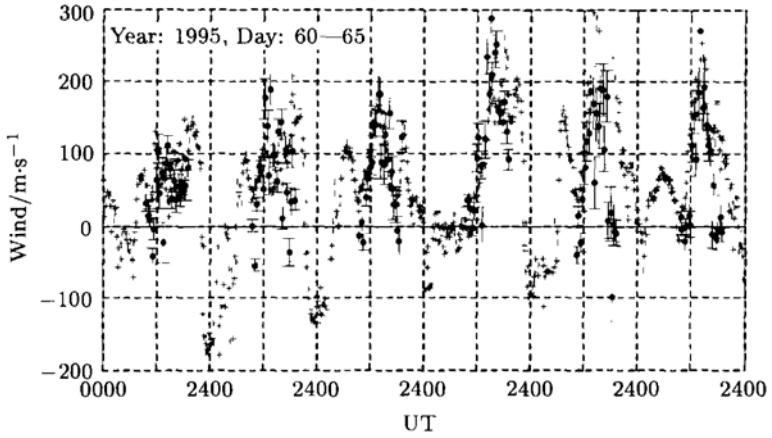


图 3　在 1995 年 3 月 1 日至 6 日澳大利亚 Beveridge (37°S, 144°E) 的 FPI 风场 (带误差棒) 和用方法 3 从 DGS256 测高仪数据导出的等效风场 (小正号点)

Fig.3　A comparison of winds at Beveridge (37°S, 144°E), Australia, derived from critical parameters observed from a DGS-256 and those observed with a Fabry-Perot Interferometer during March 1—6, 1995. Plus symbols show the winds derived with the third approach, and dotted points with error bars for the FPI winds and corresponding errors

3.2　与 Beveridge (37°S, 144°E) 的 FPI 风场观测值的比较

1995 年 3 月 1 日至 6 日期间，此期间的地磁处于活动状态，处在南半球澳大利亚 Beveridge (37°S, 144°E) 的 Fabry-Perot 干涉仪和 DGS256 测高仪在同时观测，对该次观测及此期间地磁活动状态的描述，请参阅 Dyson 等 [11] 的介绍. Beveridge 站 FPI 风场和对应的误差及利用方法 3 从 DGS256 测高仪数据导出的等效中性风以 "+" 号形式示于图 3. Dyson 等 [11] 利用方法 2 进行了该期间等效风和 FPI 数据的对比分析，尽管此期间的地磁处于活动状态，发现等效风和 FPI 风吻合很好. 此外，由于 FP 干涉仪只有夜间观测数据，无法进行白天时段的比较.

对照图 3 和 Dyson 等 [11] 图 1 的结果，可以看到方法 3 的计算结果和观测结果也吻合较好.

4　讨论与结语

利用测高仪数据获取电离层高度的动力学信息具有重要的学术意义和应用价值. 从 1978 年 Rishbeth 提出伺服理论思想以来，开展了大量与从测高仪数据或峰区电离层参数数据获取电离层 F 层峰区高度等效风 (包含中性风和电场的综合信息) 有关的工作. 其

中，提出或改进的方法可粗分为本文介绍的 3 类方法. 另外，也可分为借助电离层模式的方法 (方法 2) 和不借助电离层模式的方法 (方法 1 和 3) 两类. 这些方法只能导出磁子午面内等效风分量，不能获取等效风在垂直磁子午面的信息.

有 2 点应指出的是，(1) 从电离层垂测数据导出的实际上是电离层等离子体在热层中性风和电场两者共同作用下引起的漂移在垂直方向的投影，常称为等效风场或有效风场 [5]. 在中纬，电场的作用除强磁扰期间外通常可不考虑. 这样，由中纬电离层垂测数据得到的等效风可以认为是电离层峰区高度上的风场. 在低纬，磁倾角相对中纬地区要小，电场对峰高的影响和对等离子体漂移的作用可能不可忽略. 这样，获取包括电场和中性风场信息在内的等效风. 如借助电场模式或有电场观测数据，也还是可以提供低纬热层风场信息. 在磁倾角小的磁赤道地区，从电离层数据获得的主要是电场的信息. (2) 借助电离层垂测数据导出的只是电离层 F 区峰高附近局地的信息. 考虑到黏滞系数随高度指数增加，大部分时间 250 km 以上热层风的高度梯度很小，如假设等效风场主要是中性风 (非强磁活动期间的中纬和倾角较大的低纬地区)，则可以认为代表了 F 区峰高附近及以上区域热层风场.

伺服理论 (方法 1) 和我们的方法 (方法 3) 均要求电离层峰高和 O^+ 离子剖面的峰重合，即 O^+ 为电离层 F 层峰高和峰上的最主要离子成分. 当电离层转换高度较高，甚至接近电离层峰高时，峰高附近分子离子将占相当比例，此时推求的等效风量值将显著偏离实际情况. 这种情况易在太阳活动低年夏季出现. 借助电离层理论模式的数据同化方法虽然不要求电离层峰高和 O^+ 离子剖面峰重合，但由于风场近似是峰高变化的指数关系，当峰高很低时，也将因峰高测量存在误差导致该方法给出的等效风误差显著增大. 尽管存在如上所述的缺陷，通过电离层垂测特性数据获取等效风将极大地丰富对中性风和电场等的认识.

从以 1990 年第 177—180 天 Millstone Hill 非相干散射雷达探测数据为例的考察情况来看，三类方法的结果和从非相干散射雷达探测导出的等效风接近. 考虑到 Millstone Hill 非相干散射雷达探测电子浓度剖面导出 F 层峰高误差约为 20 km，刘立波等提出的方法 (方法 3) 计算更方便，且得到结果与观测结果吻合得较好，反映了我们的方法的有效性. 在 1995 年 3 月 1 日至 6 日澳大利亚 Beveridge 的 FPI 风场和利用方法 3 从 DGS256 测高仪数据导出的等效风场的对照，并参照 Dyson 等 [11] 的结果，从一个事例说明我们方法的可行性.

本文比较只是个例结果，缺乏统计上的意义，但由于本文数据只是根据其时间连续性来选取的，故认为本文结果还是有其部分代表意义的，也反映了我们的方法 (方法 3) 的有效性. 等效中性风与观测的详细比较，及在什么情况下结果可能是不可接受或让人怀疑的，我们将在下一步利用 Millstone Hill 数据进行研究.

致谢 感谢张顺荣教授提供美国 MIT Millstone Hill 非相干散射雷达数据，美国 Alabama 大学 Phil Richards 教授和澳大利亚 La Trobe 大学 M. Parkinson 教授提供 Beveridge 站 FPI 风场和 DGS256 测高仪数据.

参 考 文 献

[1] Burnside R G, Tepley C A. Optical observations of thermospheric neutral winds at Acrecibo between 1980 and 1987. *J. Geophys. Res.*, 1989, **94**(A3):2 711—2 716

[2] Buonsanto M J, Salah J E, Miller K L, Oliver W L, Burnside R G, Richards P G. Observations of neutral circulation at Mid-latitude during the Equinox transition study. *J. Geophys. Res.*, 1989, **94**(A12):16 987—16 997

[3] Rishbeth H, Ganguly S, Walker J C G. Field-aligned and field-perpendicular velocities in the ionospheric F_2 layer. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1978. **40**:767—784

[4] Bounsanto M J *et al.* Comparison of techniques for derivation of neutral meridional winds from ionospheric data. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**(A7):14 477—14 484

[5] Titheridge T E. The calculation of neutral winds from ionospheric data. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1995, **57**(9):1 015—1 036

[6] Miller K L, Torr D G, Richards P G. Meridional winds in the thermosphere derived from measurement of F_2 layer height. *J. Geophys. Res.*, 1986, **91**(A4):4 531—4 535

[7] Richards P G. An improved algorithm for determining neutral winds from the height of the F_2 peak electron density. *J. Geophys. Res.*, 1991, **91**(A4):4 531—4 535

[8] Liu Libo, Luan X, Wan W, Lei J, Ning B. Seasonal behavior of equivalent winds over Wuhan derived from ionospheric data in 2000—2001. *Adv. Space Res.*, 2003, in press

[9] Luan Xiaoli, Liu Libo, Lei Jiuhou, Wan Weixing, Ning Baiqi. Deriving equivalent winds from ionospheric F-layer data. *Chin. J. Space Sci.*, 2002, **22**(2):119—128. in Chinese (栾晓莉, 刘立波, 雷久侯, 万卫星, 宁百齐. 用电离层特性参量提取等效风场信息. 空间科学学报, 2002, **22**(2):119—128)

[10] Hagan M E. Quiet time upper thermospheric winds over Millstone Hill between 1984 and 1990. *J. Geophys. Res.*, 1993, **98**(A3):3 731—3 739

[11] Dyson P L, Davies T P, Parkinson M L, Reeves A J, Richards P G, Fairchild C E. Thermospheric neutral winds at southern mid-latitudes: A comparison of optical and ionosonde h_mF_2 methods. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**(A12):27 189—27 196

A COMPARISON OF APPROACHES TO DERIVING EQUIVALENT WINDS FROM IONOSPHERIC F-LAYER CRITICAL PARAMETERS

LIU Libo　LEI Jiuhou　LUAN Xiaoli　WAN Weixing　NING Baiqi

(*Wuhan Institute of Physics and Mathematics, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan* 430071)

Abstract

Dynamic information (neutral winds and electric fields) near the peak of the ionospheric F-layer can be obtained from ionospheric critical parameters (f_0F_2 and h_mF_2) with different approaches. The physical basis of these approaches is the fact that neutral winds and electric fields strongly control the evolution of the ionosphere near and above the F-layer peak, especially the peak height of the F-layer.

These approaches can be classified into three calegories: traditional and revised servo approaches, data assimilation and approaches with the aid of ionospheric models, and the new approach introduced by Libo Liu. The first kind of approaches is based on the servo theory which was originally proposed by Rishbeth *et al.* (1978). A key point of this kind of approaches is that the equivalent wind is assumed to be proportional to the displacement of the peak height of the ionospheric F-layer from its equilibrium height without wind. Although it has achieved great success (Titheridge, 1995), the servo theory approach needs the no-wind equilibrium height, which is difficult to be accurately determined due to the large time constants for the ionosphere reaching an equilibrium state, especially in the day time. The second one includes those with the aid of an ionospheric theoretical model. Some need only an ionospheric model to provide the relationship between the neutral winds and the height displacements. In essence, they should belong to the serve theory approaches. The others make use of the idea of data assimilation, i.e., making the parameters from the model consistent with the observations as well as possible. The adjusted atmospheric parameters during the calculations are assumed to be the values at the actual situations. The approach proposed by Libo Liu avoids deducing equivalent winds from the displacement of the observed peak height from the no-wind equilibrium height, thus it is very simple and does not need to determine the no-wind equilibrium height which may limit the accuracy of the deduced winds as the servo theory approaches did.

Equivalent winds derived from F-layer critical parameters by using these approaches are compared with the measurements with Millstone Hill Incoherent Scatter Radar during day 177—180 of the year 1990. Another example shows the consistence of an observation of the FPI wind at Beveridge (37°S, 144°E), Australia, with the equivalent winds derived from the Digisonde 256 observation at the same site. Both case comparisons can qualitatively evaluate the validity of the third approach.

Key words Servo theory, Data assimilation, Equivalent wind, Ionosphere