可降水份的误差分析*

刘焱雄[1] 陈永奇[2] H. B. Iz[2]

(1 武汉测绘科技大学GPS研究中心, 武汉市珞喻路129号, 430079)
(2 香港理工大学土地测量与地理资讯学系, 香港九龙红磡)

摘 要 分析了由无线电探空数据计算可降水份中逼近误差和观测误差的影响, 利用香港的无线电探空资料计算出逼近误差和观测误差的影响分别为0.5mm和1.2mm, 两者的综合影响为1.3mm。

关键词 可降水份; 无线电探空数据; 逼近误差; 观测误差
分类号 P207; P228.42; P407

遥感大气中可降水份的含量是地基GPS气象学的主要目标之一。为了证实地基GPS技术遥感可降水份的可行性和准确性, 经常以无线电探空数据(radiosonde)作为标准, 评价可降水份含量的精度[1~3]。

利用无线电探空数据计算可降水份, 采用数值积分方法。理论上, 可降水份是水汽密度沿高程的积分值, 由于水汽密度分布极不规则, 严密的积分值无法得到, 只有利用水汽密度的剖面观测, 采用数值积分方法进行逼近。如果认定逼近足够精确, 必须具备两个前提, 即观测数据足够密集, 而且没有观测误差。实际上, 这两个条件很难满足, 由此引起的逼近误差和观测误差必然传播到可降水份的估值中。

无线电探空技术早已广泛应用于气象服务中, 成百上千的无线电探空站遍布全球。这些无线电探空站每天观测气压、温度和湿度的垂直分布, 为区域天气预报服务。利用数值积分方法, 这些离散的气压、温度和湿度观测值能够转化为可降水份含量。在比较GPS结果和无线电探空结果中, 现有文献并没有考虑无线电探空结果本身的误差[1~3]。本文主要研究上述数值积分中, 数值积分的逼近误差和气象元素的观测误差对可降水份的影响。

1 可降水份的计算方法

可降水份含量是水汽密度的函数, 测站天顶方向的可降水份 PWV 可表示为[1]:

$$PWV = (\int \rho_v \cdot \mathrm{d}h)/\rho \qquad (1)$$

式中, ρ 是液态水的密度; ρ_v 表示高度 h 处的水汽密度。由气态方程, 水汽密度 ρ_v 可写成:

$$\rho_v = e/(R_v \cdot T) \qquad (2)$$

式中, $R_v = 461.495\ \mathrm{J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}}$, 是水汽的气体常数; T 是绝对温度; e 是水汽气压。

无线电探空技术观测不同高度的气压、温度和相对湿度, 这些离散的观测资料好像将大气层分割成许多层。如果将每一个层面的 T 和 e 代入式(2), 就能够得到对应层面的水汽密度 ρ_v。假使每一层的水汽密度为线性变化, 式(1)可由下式数值积分逼近:

$$PWV = \frac{1}{\rho}\sum (h_{j+1} - h_j) \cdot (\rho_{j+1} + \rho_j)/2 \qquad (3)$$

式中, h_{j+1}、h_j 分别表示每一层顶和层底的高度; ρ_{j+1}、ρ_j 分别表示每一层顶和层底的水汽密度。

2 逼近误差

利用式(3)逼近式(1), 首先必须考虑无线电探空数据是否涵盖整个水汽分布区域。无线电探空气球常常上升到20km以上的高空后才破裂, 而大气中的水汽主要集中在地球上12km以内的区域, 所以, 有理由认为现有的无线电探空数据涵盖了整个水汽分布区域。另一个需考虑的因素是观测数据是否足够密集。观测数据越密集, 式(3)逼近式(1)的效果越好。然而, 气象部门保存

收稿日期: 1999-09-10.
*香港理工大学资助项目, 编号V366。

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的无线电探空数据格式总是按50mbar或100mbar的气压采样间隔[2,4]。香港天文台保存的无线电探空数据格式按如下方式:从地面到250mbar气压线按50mbar的气压间隔;从225mbar到对流层顶按25mbar的气压间隔。为检查这种存储格式的无线电探空数据对逼近结果的影响,笔者跟踪保存了50天(1998年)无线电探空的实时数据。这些数据的采样方式为:探空气球升空后的前5min,每10s记录一次;之后,每30s记录一次,相应的气压间隔小于5mbar。实时记录的无线电探空数据比前一种方式密集得多,由此得到的可降水份积分值比前一种精确得多。本文将实时数据的积分值作为可降水份的"真值",前一种记录方式计算的可降水份与真值的差异称为逼近误差。图1显示了上述50天的逼近误差(可降水份误差),这些逼近误差小于1mm,其平均值为0.11mm,且绝大多数分布在-0.5mm~+0.5mm,平均值中误差为0.44mm。因此,本文认为上述逼近误差为0.5mm。

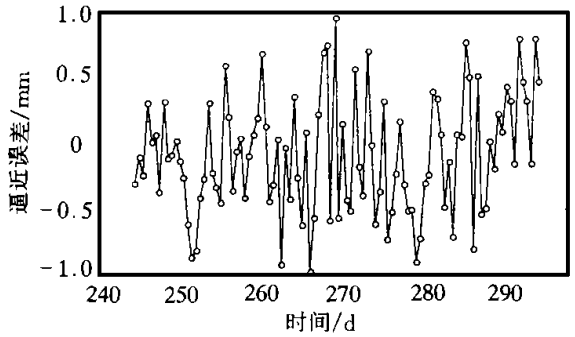

图1 逼近误差的大小

Fig.1 The Difference between Two Different PWV Records with Different Sampling Frequencies

3 水汽气压及其精度

无线电探空技术不能直接测定水汽气压,只能测量温度和相对湿度。水汽气压是温度和相对湿度的函数,其转换公式为[6]:

$$e = RH \cdot \exp(-37.246\ 5 + 0.213\ 166 \cdot T - 2.569\ 08 \times 10^{-4} \cdot T^2) \quad (4)$$

式中,RH表示相对湿度;T为绝对温度;e代表水汽气压。显然,温度和相对湿度的观测误差决定了水汽气压的精度。微分式(4)得:

$$de = \frac{e}{RH} \cdot dRH + e \cdot (0.213\ 166 - 5.138\ 16 \times 10^{-4} \cdot T) \quad (5)$$

假设温度和相对湿度的观测误差分别为σ_T和σ_{RH},而且两种观测值相互独立。对式(5)应用方差传播定律,得:

$$\sigma_e = [e^2 \cdot (\frac{\sigma_{RH}}{RH})^2 + e^2 \cdot (0.213\ 166 - 5.138\ 16 \times 10^{-4} \cdot T)^2 \cdot \sigma_T^2]^{1/2} \quad (6)$$

为了检查观测误差可能引起的最大水汽气压误差σ_e,首先讨论式(6)的第二项,温度观测误差σ_T的系数必须取极大值,为此,水汽气压e必须最大,温度T取极小值。水汽气压是温度的升函数,温度上升,水汽气压变大,因此,最小温度T时不可能出现最大的水汽气压e。然而,水汽气压e的衰减速度比温度大得多。实际上,当温度在-100℃~+100℃变化时,括号内值的变化介于0.02~0.12,而大气中水汽气压的变化介于0~40mbar。为此,取最大的温度来保证最大的水汽气压。在香港地区,最大的水汽气压为40mbar,最高的温度为313.16 K(40℃),考虑$\sigma_T = 0.2$K[5],于是式(6)变为:

$$\sigma_e = \left[e^2 \cdot (\frac{\sigma_{RH}}{RH})^2 + 0.14\right]^{1/2} \quad (7)$$

显然,水汽气压的精度取决于湿度的相对精度,表1列出了两者间的几种对应关系。在当前的仪器条件下,湿度的相对精度约为2%[5],因此,水汽气压的精度优于1mbar。

表1 σ_e与σ_{RH}/RH的对应关系

Tab.1 σ_e for Various σ_{RH}/RH

σ_{RH}/RH	σ_e/mbar	σ_{RH}/RH	σ_e/mbar
1%	0.55	4%	1.64
2%	0.88	5%	2.03
3%	1.26		

4 观测误差的影响

可降水份是温度、湿度和高程观测值的函数,这些值的观测误差必然传递给可降水份。温度和湿度的观测误差主要传递给水汽密度,微分式(2)得:

$$d\rho_v = \frac{de}{R_v \cdot T} - \frac{e \cdot dT}{R_v \cdot T^2} \quad (8)$$

微分式(3)得:

$$d(PWV) = \frac{1}{2\rho}\sum[(\rho_v^{j+1} + \rho_v^j) \cdot (dh_{j+1} - dh_j) + (h_{j+1} - h_j) \cdot (d\rho_v^{j+1} + d\rho_v^j)] \quad (9)$$

假设上述测量值互不相关,对式(8)和式(9)应用方差传播定律,得:

$$\sigma_0 = [G^2 \cdot \sigma_h^2 + H^2 \cdot \sigma_e^2 + S^2 \cdot \sigma_T^2]^{1/2} \quad (10)$$

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

式中, σ_0 表示观测误差对可降水份的影响; 系数 G、H 和 S 定义如下:

$$G^2=\frac{\sum(\rho_v^{j+1}+\rho_v^j)^2}{2\rho^2}$$

$$H^2=\frac{1}{4\rho^2\cdot R_v^2}\sum(h_{j+1}-h_j)^2\cdot\left(\frac{1}{T_j^2}+\frac{1}{T_{j+1}^2}\right) \quad (11)$$

$$S^2=\frac{1}{4\rho^2\cdot R_v^2}\sum(h_{j+1}-h_j)^2\cdot\left[\left(\frac{e^j}{T_j^2}\right)^2+\left(\frac{e^{j+1}}{T_{j+1}^2}\right)^2\right]$$

上述系数的严密计算值不可能得到, 表 2 列出了系数 G、H 和 S 的经验值, 这些经验值是基于香港 13 个月的无线电探空数据计算而得的。

表 2　系数 G, H 和 S 的经验值

Tab. 2　The Empirical Values for G, H and S

	G^2	H^2	S^2
最大值	0.58×10^{-8}	1.87×10^{-10}	0.32×10^{-8}
最小值	0.88×10^{-10}	1.81×10^{-10}	0.28×10^{-10}
平均值	0.26×10^{-8}	1.85×10^{-10}	0.12×10^{-8}

高程的观测精度优于 1m, 特别是 GPS 应用于无线电探空系统中, 温度观测误差为 0.2℃, 水汽气压的精度优于 1mbar, 将这些值和表 2 的结果代入式(10), 并将可降水份的单位化成 mm, 可得 $\sigma_{0_{max}}=1.21$mm; $\sigma_{0_{min}}=1.18$mm; $\sigma_{0_{average}}=1.19$mm。由此可见, 可降水份误差的最大值与最小值互差很小, 所以, 气象元素的观测误差对可降水份的影响约为 1.2mm。

5　结　论

GPS 气象学中, 由无线电探空数据计算的可降水份含量, 常常作为标准检验 GPS 遥感水汽含量的精度。本文的研究表明, 无线电探空数据计算的可降水份受到逼近误差 σ_a 和气象元素观测误差的影响。实测数据的计算结果显示, 逼近误差 σ_a 约为 0.5mm, 气象元素观测误差的影响 $\sigma_0=1.2$mm。显然, 这两种误差互不相关, 其综合影响 σ_{PWV}为:

$$\sigma_{PWV}=\sqrt{\sigma_a^2+\sigma_0^2}=1.3\text{mm} \quad (12)$$

这一结果定量地反映了无线电探空数据计算可降水份的精度, 有利于更好地揭示 GPS 遥感水汽含量的可行性和准确度。在当前的技术条件下, GPS 遥感的可降水份精度介于 1~2mm, 所以, 由无线电探空数据计算可降水份, 1.3mm 的可降水份误差并不影响评价 GPS 遥感的水汽结果。但是, 随着 GPS 技术的不断革新, GPS 遥感可降水份的精度不断提高, 再利用无线电探空资料评定 GPS 结果并不合适。

致谢: 本文无线电探空数据由香港天文台提供, 在此深表感谢!

参　考　文　献

1　Bevis Michael, Businger S, et al. GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System. Journal of Geophysical Research, 1992, 97(D14): 15 787~15 801

2　Coster A J, Niel A E, Solheim F S, et al. Measurements of Precipitable Water Vapor by GPS, Radiosondes, and a Microwave Water Vapor Radiometer. In: The Proceedings of the 9th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS' 96). Missouri, 1996. 625~634

3　Rocken, Christian, Ware R, et al. Sensing Atmospheric Water Vapor with the Global Positioning System. Geophysical Research Letter, 1993, 20(23): 2 631~2 634

4　Rocken, Christian, Hove T V, et al. GPS/STORM-GPS Sensing of Atmospheric Water Vapor for Meteorology. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1995, 112: 468~478

5　Vaisala Company. RS80 Technical Specifications. [Serial online] 1999. Available from: http://www.vaisala.com/

6　刘基余, 李征航, 王跃虎, 等. 全球定位系统原理和应用. 北京: 测绘出版社, 1993

刘焱雄, 男, 31 岁, 讲师, 博士生, 现主要从事 GPS 气象学研究。代表成果: 地基 GPS 技术遥感香港地区水汽含量。

E-mail: pendian@public.wh.hb.cn

(下转第 112 页)

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

guity, then a suitable searching space is constructed through the integer Gauss transformation, and a point is searched whose whole sum of squares of residuals is the least by using a method of the reordering of the conditional variances. Using this method, when new observations need be added, it is not necessary to process all of the old and new observations but only to calculate the changes of the residues caused by the new observations, which decreases the memory and the time of resolution and also improves the conditions of the search space of ambiguities. Therefore, determining the ambiguities by the new method is rapider than by other methods. The numerical results of experiments on different length baselines show that the new method is rapid and stable in relative positioning with single-frequency GPS receivers.

Key words GPS ambiguity; integer Gauss transformation; the LAMBDA method; single-frequency GPS receiver

JI Shengyue, male, 25, master. His major research orientation is GPS rapid positioning.

(上接第 107 页)

The Effect of Approximation Error and Observation Error on Precipitable Water Vapor

LIU Yanxiong[1] *CHEN Yongqi*[2] *H. B. Iz*[2]

(1 GPS Research Center, WTUSM, 129 Luoyu Road, Wuhan, China, 430079)

(2 Department of Land Surveying and Geo-Informatics, The Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Kowloon, Hong Kong)

Abstract The determination of precipitable water vapor (PWV) is one of the basic objectives of GPS meteorology. *PWV* calculated from radiosonde data is usually used as a reference to assess GPS derived *PWV*. The radiosonde-based *PWV* is derived by integrating the water vapor density along a balloon's uprising path which is a function of the observed temperature, relative humidity at different heights. Hence, the meteorological observations errors propagate to the calculated *PWV*. Moreover, these meteorological observations are discrete, and a numerical integration scheme is employed to calculate the *PWV*. Therefore, the density of observations also influences the accuracy of the *PWV* (approximation error). In this study, we analyze these two error sources in the determination of *PWV* using 50-day Hong Kong radiosonde data. We estimate an approximation error of 0.5 mm and observation error of 1.2 mm in calculating *PWV*. The total impact of the both error sources is about 1.3mm.

Key words precipitable water vapor (PWV); radiosonde data; approximation error; observation error

LIU Yanxiong, male, 31, lecturer, doctoral candidate. His research orientation is GPS meteorology.
Email: pendian@public.wh.hb.cn

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net