

低高度角大气静力学延迟修正的改进*

刘 艳^{1,2†} 郭 鹏³ 刘 敏⁴

(1 中国气象科学研究院 北京 100081)

(2 中国气象局成都高原气象研究所 成都 610071)

(3 中国科学院上海天文台 上海 200030)

(4 上海市卫星遥感与测量应用中心 上海 201100)

摘要 进行低高度角观测是 GPS (Global Positioning System) 气象学的发展趋势, 其中发展高精度的低高度角的大气静力学延迟修正是主要的关键技术. 比较了 3 种计算无线电波从空间到地面接收机的大气静力学延迟修正方法: (1) 在大气球对称假设下用探空气球资料路径积分得到大气静力学延迟; (2) 在大气球对称假设下用 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) 再分析资料得到大气静力学延迟; (3) 用 Niell 的大气静力学映射函数得到大气静力学延迟. 与 2001 年中国地区 89 个探空气球站资料计算得到的大气静力学映射函数比较结果显示: NCEP 再分析资料路径积分的方法在低高度角 (5° 以下) 的精度好于 Niell 映射函数模型约 5 倍.

关键词 大气效应, 方法: 分析

中图分类号: P 126; **文献标识码:** A

1 引言

GPS 在测地学和气象学上的高精度科学应用需要对由于中性层大气折射引起的信号延迟进行修正. 中性大气对电磁波信号的延迟 $\Delta\delta$ 可以写成接收机和信号源之间的光学距离 δ 与几何距离 X 之差:

$$\Delta\delta = \delta - X = \int_L ndL - \int_X dX, \quad (1)$$

式中 L 是接收机和信号源之间的信号路径曲线, X 是连接接收机和信号源的几何直线, n 是大气介质折射指数. 在 GPS 数据处理中, 大气延迟通常被分为静力学或干大气延迟和湿大气延迟两部分, 每一部分都可以写成天顶方向的延迟和映射函数的乘积^[1]

$$\Delta\delta = \Delta\delta_h^z m_h(\varepsilon) + \Delta\delta_w^z m_w(\varepsilon), \quad (2)$$

式中 $\Delta\delta_h^z$ 和 $\Delta\delta_w^z$ 分别为静力学天顶延迟和湿天顶延迟, ε 是观测目标的高度角, $m_h(\varepsilon)$ 和 $m_w(\varepsilon)$ 分别是静力学映射函数和湿大气映射函数. 因为静力学大气比较稳定, 符合理

2009-09-21 收到原稿, 2009-12-02 收到修改稿

* 国家自然科学基金项目 (40605012)、地球空间环境与大地测量教育部重点实验室开放基金资助项目 (07-07)、灾害天气国家重点实验室开放课题 (2009LASW-B10) 及成都高原气象研究所开放课题 (LPM2009013) 资助

† liuyan@cma.gov.cn

想气体状态方程, $\Delta\delta_h^z$ 通常可以用 Saastamoinen 静力学延迟修正表示:

$$\Delta\delta_h^z = 0.0022768P/f(\varphi, h_0), \quad (3)$$

$$f(\varphi, h_0) = 1 - 0.00266 \cos 2\varphi - 0.00028h_0, \quad (4)$$

式中 P 为测站地面压强 (单位为 mbar), φ 为测站纬度, h_0 为测站海拔高度 (单位为 km). 利用一些参数化的映射函数, 可以将静力学天顶延迟投影至高度角方向. 很多学者对大气折射延迟映射函数的结构进行分析和讨论, 其中 Yan 等^[2] 用母函数方法在数学上给出方程 (1) 的近似解析解, 并且利用标准大气模型给出一个改进的连分形式的映射函数; Niell 映射函数模型是最普遍用于 GPS 数据分析的软件, 当高度角大于 10° 时, 其精度满足科学应用的需要, 而且不需要测站大气参数, 依赖于纬度、海拔高度和年首日^[3].

通过 GPS 观测资料处理, 可以解得 GPS 信号斜路径方向总的对流层大气延迟, 根据大气静力学天顶延迟和静力学映射函数可以计算出静力学大气延迟, 除去静力学大气延迟可以得到斜路径方向的湿大气延迟, 再转化成斜路径水汽^[4-5]. 低高度角的 GPS 观测可以获得更多的观测数据, 同时低高度角的斜路径观测值包含更多的大气信息^[6-7]. 进行低高度角观测是 GPS 气象学的发展趋势, 但是目前最好的映射函数在低高度角时精度也比较差 (1 cm 的大气静力学延迟误差转化到斜路径水汽的误差约 1.5 mm), 因此, 发展高精度的低高度角的静力学大气延迟修正模型是 GPS 气象学的重要任务.

本文通过数值天气分析场资料得到与 GPS 观测资料相同时间和位置的大气温度、湿度、压强廓线, 在大气球对称假设下, 采用直接路径积分方法得到大气静力学延迟. 与传统的参数化静力学映射函数比较, 可以提高低高度角的静力学大气延迟修正. 由于本文只讨论大气静力学延迟修正, 大气的水平不均匀对大气静力学延迟的影响很小, 所以不采用 3D 射线追踪方法计算大气静力学延迟.

2 气象资料

从 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) 获得 2001 年中国区域 89 个探空气球站每天两次的观测资料. 从 NCAR (National Center for Atmospheric Research) 获得的 NCEP 再分析资料, 其格点数据垂直分辨率从大气压强 1000~10 mbar 分成 17 层, 水平分辨率和时间分辨率分别是 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 和 6 h, 并将 NCEP 再分析资料线性插值到探空气球资料的相同时间和位置上. 从 NCEP 再分析资料 10 mbar 以上以及探空气球接收不到资料的地方开始, 一直到 120 km 的高度上, 采用 CIRA86a-Q-U0G 气候模型插值到相同的时间和位置. 该气候模型是以列表的形式给出 0~120 km 的大气参数, 纬度和时间分辨率分别是 10° 和 1 个月.

3 利用大气折射率廓线路径积分计算大气延迟

3.1 大气折射率

无线电信号在中性大气传播的大气折射率表示为

$$N = (n - 1) \times 10^6 = k_1 \frac{P_d}{T} Z_d^{-1} + k_2 \frac{e}{T} Z_w^{-1} + k_3 \frac{e}{T^2} Z_w^{-1}, \quad (5)$$

式中 P_d 和 e 分别为大气干压和水汽分压 (单位 mbar), T 为大气的绝对温度 (单位 K), t 为温度 (单位 $^{\circ}\text{C}$), k_1 、 k_2 和 k_3 分别是经验常数, Z_d 和 Z_w 分别是干空气和湿空气的压缩因子^[8],

$$\begin{cases} Z_d^{-1} = 1 + P_d(57.90 \times 10^{-8}(1 + \frac{0.52}{T}) - 9.4611 \times 10^{-4} \frac{t}{T^2}) \\ Z_w^{-1} = 1 + 1650(\frac{e}{T^3})(1 - 0.01317t + 1.73 \times 10^{-4}t^2 + 1.44 \times 10^{-6}t^3) \end{cases} \quad (6)$$

为了分离出静力学部分和非静力学部分, (5) 式改写为

$$N = k_1 R_d \rho + k'_2 \frac{e}{T} Z_w^{-1} + k_3 \frac{e}{T^2} Z_w^{-1}, \quad (7)$$

上式中右边第 1 项称为干大气折射率 N_d , 后两项称为湿大气折射率 N_w , 准确地说是大气的折射率静力学部分和非静力学部分, 其中

$$k'_2 = k_2 - k_1 \frac{R_d}{R_w}, \quad (8)$$

ρ 为湿大气密度, R_d 和 R_w 分别为干大气和水汽的比大气常数, $k_1=77.604$ K/mbar, $k'_2=17$ K/mbar 和 $k_3=3.776 \times 10^5$ K²/mbar. 根据湿大气理想状态方程可计算湿大气密度

$$\rho = \frac{P}{R_d T_v}, \quad (9)$$

其中

$$T_v = T(1 + 0.608q), \quad (10)$$

$$q = 0.622 \frac{e}{P - 0.378e}, \quad (11)$$

式中 T_v 是虚温 (单位 K), q 是比湿.

3.2 路径积分大气延迟

在大气球对称假设下, 通过 Snell 定律可由路径积分得到 GPS 信号路径上的大气延迟^[9]. 图 1 给出 GPS 信号路径示意图. 点 1 和 2 分别对应于接收机和发射机. 球心设为地球参考椭球在点 1 处的局部曲率中心. 在大气球对称假设和几何光学近似下, 信号路径是一个平面曲线, 在点 1 和点 2 之间的信号的相位和弯曲角可分别表示为

$$S = \int_{r_1}^{r_2} n(r) dl, \quad (12)$$

$$\alpha = \int_{r_1}^{r_2} \frac{dl}{R_c}, \quad (13)$$

式中 $dl = \sqrt{dr^2 + r^2 d\theta^2}$ 是长度的微分, R_c 是信号路径的局部曲率半径. 在极坐标下, R_c 可以表示为

$$R_c = (r^2 + r'^2)^{3/2} / (r^2 + 2r'^2 - rr''), \quad (14)$$

式中 $r' = dr/d\theta$, 利用 Snell 定律

$$\frac{r^2 n}{\sqrt{r^2 + r'^2}} = rn \sin \phi = a, \quad (15)$$

式中 ϕ 是信号路径的天顶角, a 是信号的碰撞参数. 相位和弯曲角可以重新改写为

$$S = \int_{r_1}^{r_2} \frac{rn^2}{\sqrt{r^2 n^2 - a^2}} dr = \int_{x_1}^{x_2} \frac{(1 - \frac{x dm}{dx})x}{\sqrt{x^2 - a^2}} dx, \quad (16)$$

$$\alpha = -a \int_{r_1}^{r_2} \frac{dn/dr}{n\sqrt{r^2 n^2 - a^2}} dr = -a \int_{x_1}^{x_2} \frac{dm/dx}{\sqrt{r^2 n^2 - a^2}} dx, \quad (17)$$

式中 $x = rn(r)$ 是折射率半径, $m(x) = \ln[n(x)]$.

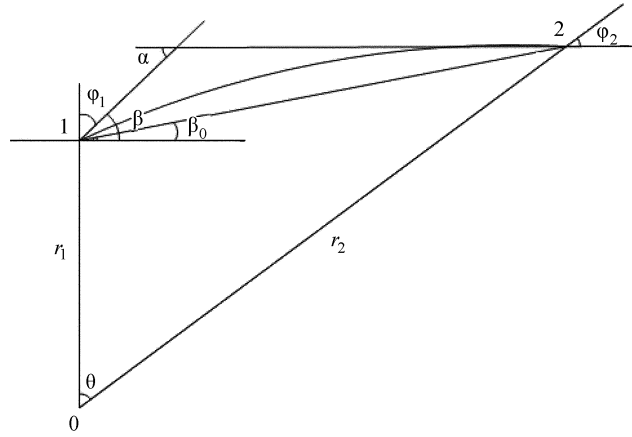


图 1 GPS 信号示意图

Fig. 1 Sketch of a GPS signal

对于 GPS 卫星, 点 2 在大气层以外, $n(r_2) = 1$. 给定 a 、 φ_1 、 r_1 和 r_2 , 点 1 和点 2 之间的中心夹角

$$\theta = \phi_1 - \phi_2 + \alpha = \phi_1 - \arcsin[r_1 n(r_1) \sin \phi_1 / r_2] + \alpha, \quad (18)$$

那么直线仰角 β_0 是

$$\beta_0 = \arctan\left(\frac{r_2 \cos \theta - r_1}{r_2 \sin \theta}\right), \quad (19)$$

点 1 和点 2 之间的距离 S_0 的平方为

$$S_0^2 = r_1^2 + r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos \theta. \quad (20)$$

大气延迟 $\Delta S = S - S_0$. 其中由于干大气折射率 N_d 和信号弯曲引起的大气延迟部分定义为大气静力学延迟 ΔS_d 和湿大气折射率 N_w 引起的大气延迟部分定义为湿大气延迟 ΔS_w 分别计算为

$$\Delta S_d = \int_{x_1}^{x_2} \frac{1 + 10^{-6} N_d (1 - \frac{xdm}{dx}) x}{n \sqrt{x^2 - a^2}} dx - S_0, \quad (21)$$

$$\Delta S_w = \int_{x_1}^{x_2} \frac{10^{-6} N_w (1 - \frac{xdm}{dx}) x}{n \sqrt{x^2 - a^2}} dx. \quad (22)$$

在数值积分中, 积分步长分别为 10 m (0~2 km)、20 m (2~6 km)、50 m (6~16 km)、100 m (16~36 km) 和 500 m (36~120 km), 积分上限是 GPS 卫星高度 20 200 km. 从气象资料得到干大气折射率和湿大气折射率廓线, 并通过对数线性插值到数值积分格点高度上. 静力学天顶延迟 $\Delta \delta_h^z$ 和湿天顶延迟 $\Delta \delta_w^z$ 分别可以计算为

$$\Delta \delta_h^z = 10^{-6} \int_{r_1}^{r_2} N_d(r) dl, \quad (23)$$

$$\Delta \delta_w^z = 10^{-6} \int_{r_1}^{r_2} N_w(r) dl. \quad (24)$$

这样由路径积分得到的静力学映射函数和湿大气映射函数分别为

$$m_h(\beta_0) = \frac{\Delta S_d}{\Delta \delta_h^z}, \quad (25)$$

$$m_w(\beta_0) = \frac{\Delta S_w}{\Delta \delta_w^z}. \quad (26)$$

由于信号弯曲, 信号路径的高度角 β 大于高度角 β_0 , 而在 GPS 数据处理中, 需要对具体高度角的大气延迟修正. 通过计算一组大气延迟 (信号路径的高度角 β 从 $0^\circ \sim 15^\circ$, 间隔 0.1°), 然后用三次样条插值可以得到任意低高度角 (10° 以下) 的大气延迟修正.

4 统计比较

以探空气象资料路径积分得到的大气静力学映射函数为真值, 统计比较了相对应的 NCEP 再分析资料的路径积分得到的大气静力学映射函数 (以下简称 NCEP_MF) 和 Niell 大气静力学映射函数 (以下简称 NMF) 与真值之差的平均值及其标准差和均方差. 2001 年中国地区 89 个探空气球站每天两次的观测资料分别在 4 组低高度角 (1° 、 2° 、 3° 和 5°) 的统计比较结果如表 1 (已经转换到距离上).

从统计比较的结果可以看出: NCEP_MF 在低高度角 1° 、 2° 、 3° 和 5° 的均方差分别是 6.02 cm、2.91 cm、1.58 cm 和 0.58 cm, 好于 NMF 约 5 倍, 平均值和标准差也均好于 NMF.

图 2 显示在 3° 高度角路径积分情况下 NCEP_MF(图 (a)) 和 NMF(图 (b)) 的大气静力学延迟修正与由 2001 年中国区域 89 个探空站资料计算的大气静力学映射函数之差的

均方差. 可以看出, NMF 的精度从低纬到高纬逐渐变差, 均方根从 4 cm 增加到 14 cm; NCEP_MF 的精度则没有明显的区域变化.

表 1 大气静力学延迟修正统计结果

Table 1 Statistics of atmospheric hydrostatic delay correction

β_0	Model	MEAN(cm)	STD(cm)	RMS(cm)
1°	NCEP_MF	-1.06	5.92	6.02
	NMF	82.00	31.69	87.90
2°	NCEP_MF	-0.69	2.83	2.91
	NMF	2.85	13.57	13.87
3°	NCEP_MF	-0.40	1.53	1.58
	NMF	-2.67	7.37	7.84
5°	NCEP_MF	-0.15	0.56	0.58
	NMF	-1.07	2.70	2.91

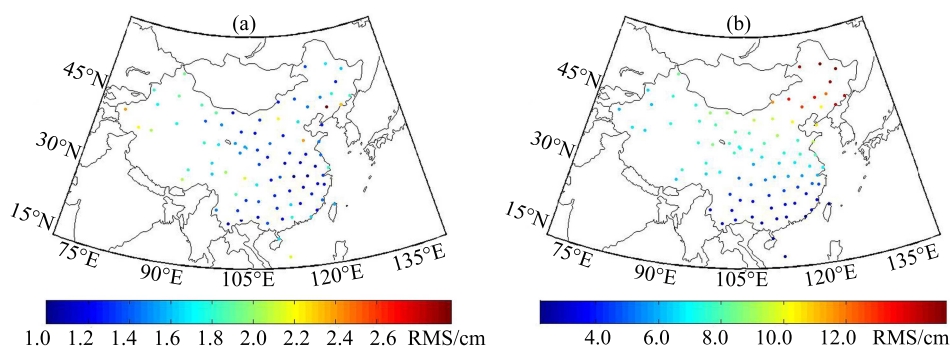


图 2 NCEP_MF (a) 和 NMF (b) 的大气静力学延迟修正与利用 2001 年中国区域探空站资料计算的大气静力学映射函数之差的均方差 (3° 高度角情况下)

Fig. 2 RMS of atmospheric hydrostatic delay correction based on NCEP_MF (a) and NMF (b), compared with those from radiosonde data of China in 2001 (elevation angles are 3°), respectively

NMF 只有纬度参数, 没有经度参数. 我们利用 NCEP_MF 分析经度变化对于大气静力学延迟的影响. 图 3 显示用 2001 年每天大气静力学延迟变化幅度统计得到的均方差随纬度的变化. 从图 3 中可以看出: (1) 在热带, 经度变化对大气静力学延迟影响很小; (2) 南半球的经度变化的影响要小于北半球; (3) 从赤道到高纬, 大气静力学延迟变化幅度变大, 在北纬 50° 左右达到最大值近 6 cm. 因此, 图 2 显示的 NMF 在高纬精度差的原因之一有可能是经度变化对 NMF 的影响在高纬比较大.

在低纬地区 (30° 以下), NMF 的大气静力学延迟修正精度相对比较好. 为了分析比较两种大气静力学延迟修正方法精度的季节变化, 采用低纬地区的资料进行比较. 图 4 显示的是 2001 年低纬地区的 NCEP_MF 在 3° 高度角路径积分 (图 (a)) 和 NMF (图 (b)) 的大气静力学延迟修正与真值之差. NMF 的精度在夏季偏高, 冬季偏低, 而 NCEP_MF 的精度比较稳定, 没有明显的季节变化.

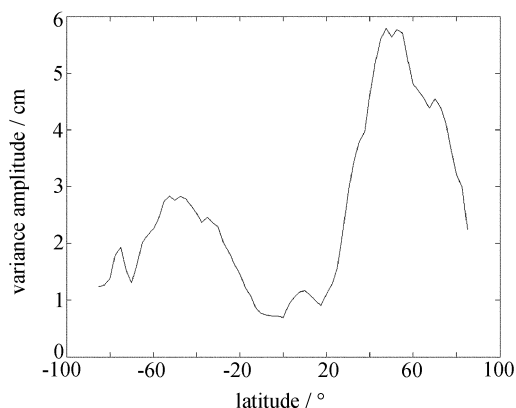


图 3 大气静力学延迟随纬度的变化

Fig. 3 Variation of atmospheric hydrostatic delay with latitude

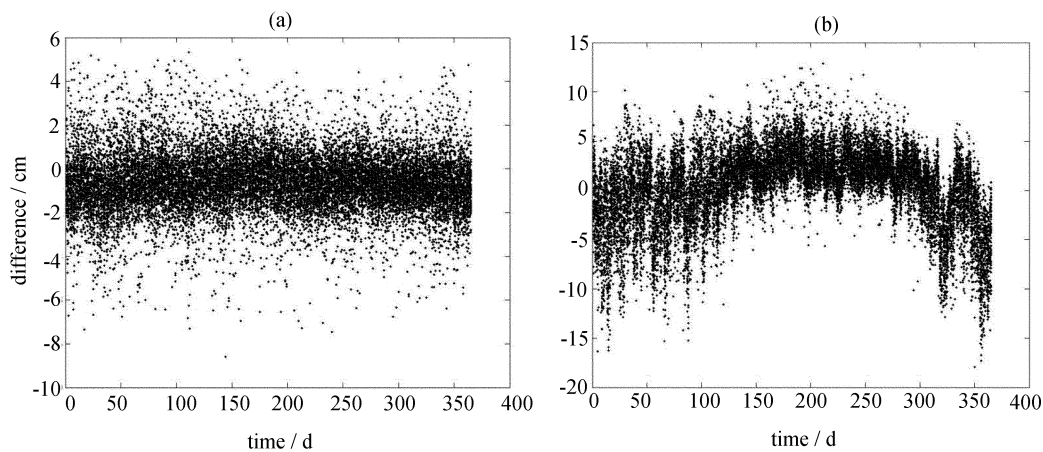


图 4 低纬地区 NCEP_MF (a) 和 NMF (b) 的大气静力学延迟修正与真值之差

Fig. 4 The differences at low latitudes between true data and atmospheric hydrostatic delay correction using NCEP_MF reanalysis (a) and NMF (b), respectively

5 小结

传统的映射函数依赖于地面气象参数或季节性变化,不能很好地反映全球对流层的时空动态变化^[10].在低高度角 GPS 观测中,利用数值天气再分析资料进行路径积分方法对大气静力学延迟修正的精度和稳定性大大高于采用传统的参数化大气静力学映射函

数方法, 例如 NMF 模型. 在实时应用中, 通过获取数值天气预报资料插值到测站点的时间和空间上, 进行路径积分修正大气静力学延迟是可行的. 如果将该方法结合 GPS 处理软件, 例如 GIPSY、Bernese 等, 可以获得高精度低高度的水汽斜路径延迟, 从而得到更多的气象信息, 将这些信息同化到数值天气预报模式, 有可能提高模式的分析精度.

参 考 文 献

- [1] Davis J L, Herring T A, Shapiro I I, et al. *RaSc*, 1985, 20: 1593
- [2] Yan H J, Ping J S. *AJ*, 1995, 110: 934
- [3] Niell A E. *JGR*, 1996, 101: 3227
- [4] 宋淑丽, 朱文耀, 程宗颐, 等. *天文学报*, 2004, 45: 338
- [5] 毛辉, 毛节泰, 毕研盟, 等. *中国科学 (D)*, 2006, 36: 1177
- [6] Flores A, Ruffini G, Rius A. *AGp*, 2000, 18: 223
- [7] Braun J, Rocken C, Ware R. *RaSc*, 2001, 36: 459
- [8] Owens J C. *ApOpt*, 1967, 6: 51
- [9] Rocken C, Sokolovskiy S, Obukhov A M, et al. *JAOT*, 2001, 18: 1205
- [10] Yan H J, Zhang G X, Guo P, et al. *Terr. Atm. & Ocean. Sci.*, 2002, 13: 563

Improvement of Atmospheric Hydrostatic Delay Correction at Low Elevation Angle

LIU Yan^{1,2} GUO Peng³ LIU Min⁴

(1 *Chinese Academy of Meteorology Sciences, Beijing 100081*)

(2 *Institute of Plateau Meteorology, China Meteorology Administration, Chengdu 610071*)

(3 *Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030*)

(4 *Shanghai Center for Satellite Remote-sensing and Application, Shanghai 201100*)

ABSTRACT It is a tendency of GPS (Global Positioning System) meteorology to carry out observations at low elevation angle. The correction of high precision atmospheric hydrostatic delay at low elevation angle is a key issue. Three different methods, which calculate atmospheric hydrostatic delay of radio waves propagating from space to a ground-based receiver, are compared. They are: (1) path integration under the assumption of atmospheric spherical symmetry using radiosonde data; (2) the same method as above, but using NCEP (National Centers for Environmental Prediction) reanalysis data; (3) the Niell's hydrostatic mapping function. Compared with the atmospheric hydrostatic delay correction calculated from the 89 radiosonde data of China in 2001, the accuracy of method (2) is about 5 times better than that of method (3) on condition that the elevation angles are less than 5° .

Key words atmospheric effects, methods: analytical