第 47 卷 第 4 期 天 文 学 报 Vol.47 No.4
2006 年 10 月 ACTA ASTRONOMICA SINICA Oct., 2006

提高中性大气折射延迟改正精度的可能途径*

冒 蔚 [1] 张捍卫 [1,2] 李彬华 [3] 杨 磊 [1] 铁琼仙 [1]

(1 中国科学院国家天文台云南天文台 昆明 650011)
(2 徐州师范大学国土信息与测绘工程系 徐州 221116)
(3 昆明理工大学信息工程与自动化学院 昆明 650041)

摘要 针对空间大地测量技术对中性大气折射延迟改正精度的要求，阐述了折射延迟改正值应随测站和随方位而异的必要性. 指出，在尚不能直接测定天文大气折射值的情况下，现有的各种改正模型对大气分布模型的依赖性，不能达到预期的精度和降低观测的截止角. 根据云南天文台低纬子午环的特殊结构，和测定大气折射的实践，提出了提高折射延迟改正精度的新方法，即：利用各观测站不同方位从天顶附近直到低地平高度角的天文大气折射实测数据，求解得到折射率差和映射函数的参数，从而建立随测站和随方位而异的大气折射延迟改正模型. 这一新方法的实施，将能在不需采用大气分布模型的情况下，把天顶延迟的改正精度提高到 1 mm 以内，低地平高度角的折射延迟改正精度提高到厘米级，并且把截止高度角压缩到 5° 以内.

关键词 天体测量学，中性大气，折射延迟
中图分类号： P 128; **文献标识码**： A

1 引言

在球对称大气分布模型的假设下，天文大气折射，在理论上仅与地面大气的折射率和大气密度随高度分布的情况有关，并且仅影响天体的视天顶距，而对天体的方位角没有影响. 一个半世纪以来，人们基于这样的理论，编制过一些稍有差异的大气折射表 [1]，在经典测量仪器的精度范围内，为天体测量学和大地测量学的发展发挥了重要作用. 20 世纪 60 年代以来，随着 VLBI 和 GPS 等空间测量技术的问世，迫使人们转向电磁波大气折射延迟的研究，特别是中性大气折射延迟，也利用大气呈球对称分布的假设，建立了多种理论改正模型，其延迟量也与电磁波传播途径上的大气折射率和大气的密度分布有关. 事实上，由于影响大气折射率的因素很多，各地的折射率差异较大，大气的分布也不是球对称性的，不同测站和一个测站的不同方位，折射率都不会完全相同 [1,2]. 但

2005-08-24 收到原稿， 2006-02-15 收到修改稿
* 云南省基金 (2005A0010R) 资助项目

是长期以来，由于人们尚无法直接测定天文大气折射或折射率，更无法知道不同方向之间的差异，只能在球对称大气模型的基础上，来建立天文大气折射和折射延迟改正的模型．近年来人们为了提高改正精度，有些在折射延迟改正理论模型的形式上下了很大的功夫，也有些通过参数模拟和外部改正等方法来建立经验模型，在提高模型的改正精度方面取得了较好的效果 [3−11]．但是这些理论模型都没有实质上的差别，也都没有达到目前空间大地测量技术的精度要求 [12]，其原因是这些模型几乎都没有涉及到大气分布模型的不同选择和不同方位折射率差异的影响．而经验模型则是通过长期的大量观测资料在事后取得的，即使从处理结果中知道理论模型的改正值与实际折射延迟之间的差异，也难以在理论上解决或模拟出折射延迟改正模型与测站周围环境的关系．文 [13] 较早地注意到了大气折射率存在水平梯度的问题，也就是天文大气折射和折射延迟的量都与方位角有关．之后，学者们开始利用 GPS 和 VLBI 等空间大地测量技术对这一现象进行了检测和验证 [14−17] ．天文大气折射与方位有关这一事实也得到了云南天文台低纬子午环观测的证实 [1]．

当前国外正在广泛利用射线跟踪以及其他的外部改正方法，来建立适合本地的大气折射延迟改正经验模型，但效果并不理想，其原因是卫星历表误差、观测站坐标误差和时间比对误差都会对观测结果产生较大的影响．另外，此方法无法普遍推广，要实现射线跟踪必须建立有激光发射和接收的观测站，并且配备有高精度的时频基准，不仅其代价昂贵，也不能移动．理论研究表明，影响大气折射延迟改正精度的主要原因是不能准确地知道地面大气的折射率及其随方位的变化，如果它能够实时精确地获得，则在提高模型理论精度的同时，还能将观测的地平高度角压缩到很小．

前几年，云南天文台创立了一种能在不同方向和不同天顶距测定瞬时大气折射值的有效方法，利用实测数据建立了东、南、西、北 4 个方位的大气折射实测模型 [1]．本文利用这套方法，以及天文大气折射与大气折射延迟之间的内在联系，探讨出了一套提高电磁波折射延迟改正精度的新思路，即利用各测站不同方位的天文大气折射测定值，分别求解折射率差和映射函数的参数，建立随测站和随方位而异的折射延迟改正模型．根据已取得的测定精度，这种方法能将天顶延迟的精度提高到 1 mm 以内、低高度角观测的改正精度提高到厘米量级，并且能把高度截止角压缩到 5° 以内．

2　建立大气折射延迟实测改正模型的必要性

电磁波穿过地球大气层受到的延迟影响分为两部分：一是电离层延迟，延迟量与电磁波穿过电离层的传播途径上电子总量成正比，与电磁波频率的平方成反比，在一天中不同时刻、不同高度角和不同的太阳活动情况下差异很大，量级介于 5—150 m 之间，能采用双频接收机的读数作精确修正；二是中性大气折射延迟，亦称对流层延迟，是电磁波穿过电离层以下的中性大气层时产生的折射延迟，与传播途径上大气的折射率有直接

关系，在不同的高度角介于 2—30 m 之间.

中性大气折射延迟，一般地在形式上都写为天顶延迟与映射函数的乘积 [18], 天顶延迟 (ZTD) 又分为天顶静力学延迟 (ZHD) 和天顶湿延迟 (ZWD) 两部分. 根据霍普菲尔德的理论有 [19,20]:

$$\mathrm{ZHD} = 10^{-6} \times N_D(h_0)\frac{1}{5}(H_T - h_0)\,, \tag{1}$$

$$\mathrm{ZWD} = 10^{-6} \times N_W(h_0)\frac{1}{5}(H_W - h_0)\,. \tag{2}$$

这里的 h_0 为测站的海拔高度， H_T 是对流层顶部 (实际上应为中性大气层顶部) 的高度， H_W 是大气中水汽为零的层高. H_T 与绝对温度 T 之间的经验关系为 [19,20]:

$$H_T = 40136\,\mathrm{m} + 148.72(T - 273.16)\mathrm{m}\,, \quad H_W = 11000\,\mathrm{m}\,. \tag{3}$$

N_D 和 N_W 分别是干大气和水汽引起的地面折射率差，这是折射率的又一种表示形式，其表达式是 [21]:

$$N_D(h_0) = k_1\frac{P_D}{T}Z_D^{-1}\,, \quad N_W(h_0) = k_2\frac{e}{T}Z_W^{-1} + k_3\frac{e}{T^2}Z_W^{-1}\,, \tag{4}$$

其中 P_D 、 e 分别为干大气压和水汽分压 (单位 mbar), 大气可压缩常数 Z_D 和 Z_W 的表达式为 [22]:

$$Z_D^{-1} = 1 + P_D\left[57.90\times10^{-8}(1+\frac{0.52}{T}) - 9.4611\times10^{-4}\frac{T-273.15}{T^2}\right]\,, \tag{5}$$

$$\begin{aligned} Z_W^{-1} \;=\;& 1 + 1650\frac{e}{T^3}[1 - 0.001317(T-273.15) + 1.75\times10^{-4}(T-273.15)^2 + \\ & 1.44\times10^{-6}(T-273.15)^3]\,. \end{aligned} \tag{6}$$

一般都忽略了 (5) 式和 (6) 式中的一阶小量，即把大气看成是理想气体， (4) 式可写为：

$$N_D(h_0) = k_1\frac{P_D}{T}\,, \quad N_W(h_0) = k_2\frac{e}{T} + k_3\frac{e}{T^2}\,. \tag{7}$$

从 (1)—(7) 式可以看出，天顶延迟量除了随地面气象读数而变以外，主要决定于系数 k_i, 如果把 k_i 看成是地面的或某种大气状态下的折射率差的变形，则天顶延迟 ZHD 和 ZWD 只与这种折射率差及地面的气象读数有关，与传播路径上各点的折射率无关. 这与天文大气折射理论是一致的. 可见，若能直接测定天文大气折射值，只要能换算为折射率差，就可以得到实测的天顶延迟. 这些系数与大气分布有关，采用不同的探测资料，能得到不同的系数值，文 [21] 拟合的结果是：

$$k_1 = 77.604 \pm 0.014\,, \quad k_2 = 64.79 \pm 0.08\,, \quad k_3 = (3.776 \pm 0.004)\times10^5\,. \tag{8}$$

现在的许多理论模型都采用 (8) 式的数值，得到几乎相同的折射率差，但从 (1) 式和 (2) 式可见，如果要求在 (3) 式的条件下天顶延迟的精度优于 1 mm, 则折射率差的误差 ΔN_D 和 ΔN_W 必须满足：

$$\Delta N_D < 0.125N \text{单位}, \quad \Delta N_W < 0.455N \text{单位}. \tag{9}$$

现在理论模型的折射率差采用值与实际值之间的差异正如文 [2] 指出：将中国各地折射率差 N 的年平均值换算到海平面后，从东向西和从南到北都呈现了幅度较大的递减趋势，西沙比漠河大 16%, 约 60 N 单位，昆明地区比同一经度线上的中蒙边界也大 16%. 这种差异是无法用 (4) 式或 (7) 式中的气象读数来解释和弥补的，都已换算为海平面，气压差异较小，而漠河的年平均气温比西沙低得多，中蒙边界也比昆明地区低，气温较低地区的折射率却小得多. 由此可见，天顶延迟中的参数必须随测站而异，采用本测站的测定值，这为用实测数据建立改正模型提出了明确的要求.

文 [23] 也经过分析指出：目前采用的各种对流层延迟理论模型，即使采用实时记录的气象资料，传播路径延迟改正的残差仍保持在对流层影响的 5% 左右，而且其中的 90% 都来自干延迟. 这种状况，不仅影响了空间大地测量技术的定位精度，也使得这些测量的截止高度角受到限制，究其原因，主要在于改正值对大气分布模型较强的依赖性和所取用的大气分布模型不当所致. 只有通过实测，建立随测站和随方向而异的折射延迟实测改正模型，才能把改正精度提高到预期水平.

另外，在空间大地测量的数据处理中，一定气象条件下的天顶延迟 ZHD 和 ZWD 是作为待解参数参与解算的. 从其结果可见，即使换算到标准大气状态下，它们也是随测站和方位而异的 [3−11]. 这说明，折射率差的理论公式不适合于全球所有的测站，不同方位也应有差异. 如果能够直接测定具体测站不同方位的折射率或天文大气折射，换算成折射率差，就能准确地计算出随方位而异的天顶延迟，直接用于作改正，不必等待事后处理的结果，这无疑会提高空间大地测量的观测精度.

关于实测的精度要求，可以从天文大气折射值 R(E) 与折射延迟主项 $\Delta L_1(E)$ 之间的近似关系：

$$R(E) = \frac{1}{H}\cos(E) \times \Delta L_1(E), \quad H = 7972.5\,\text{m}. \tag{10}$$

这里 E 和 H 分别是观测目标的视高度角和大气的有效高度. (10) 式是在文 [24] 中 (13) 式的基础上作变形后写出的. 如果在地平高度角 5° 处，天文大气折射的测量精度达到 $\pm 0.25''$ (经过多次重复观测取平均，压缩反常折射影响后可以达到), 根据 (10) 式推算，可得到此高度角的大气折射延迟的改正精度为 $\pm 1\,cm$; 在地平高度角 45° 处，则是 $\pm 0.02''$ 对应于 $\pm 1\,mm$. 这就是对测定天文大气折射值的精度要求，根据我们已有的实践经验，这是很容易做到的.

关于一些参数与气象读数的关系：目前采用的映射函数，基本上是下列连分式的变

形 [18]:

$$MF(E)=\cfrac{1}{\sin(E)+\cfrac{a}{\sin(E)+\cfrac{b}{\sin(E)+\cfrac{c}{\sin(E)+\cdots}}}}\,. \tag{11}$$

在不同形式的连分式中，其参数的形式各不相同，有的是常数，有的是地面气象读数和大气模型参数的函数，甚至还有高次项．这些参数的函数表达式都是取用不同的大气探测资料模拟出来的，其共同点就是无法作物理解释，再就是它们之间的一致性很高，甚至在高度角 5° 处，差异也仅达 1%[12]. 我们认为，以 (7) 式的形式把折射率差 $N_D(h_0)$ 和 $N_W(h_0)$ 写成气象读数的函数，是大气密度随着气温、气压而变的需要，由于实际气体与理想气体之间的差异，还应把 $N_D(h_0)$ 的系数，即 k_1, 写成气象读数的函数，而连分式形式的映射函数，其参数仅是电磁波传播途径弯曲程度的体现 [18], 则应该为常数，而且干延迟和湿延迟都采用相同的参数，因为不同气象参数条件下的途径弯曲程度差异已在天顶延迟量的变化中体现出来了．这样的映射函数的参数才有其确切的物理意义.

3 利用实测大气折射值建立大气延迟改正模型的可行性

在指数大气模型下，天顶总延迟 ZTD 是 [25]:

$$ZTD=10^{-6}\times N(h_0)\times H\,. \tag{12}$$

把上式和映射函数代入到 (10) 式，有：

$$R(E)=10^{-6}\times N(h_0)\times\cos E\times MF(E)\,. \tag{13}$$

这样就把天文大气折射写成了折射率与映射函数乘积的形式，在数学形式上与大气折射延迟联系起来了．有了实测的天文大气折射测定值后，根据它们之间的内在联系，可以计算出折射率差和映射函数的参数，进而建立随测站和随方位而异的大气折射延迟改正实测模型．这里仅就建立这种模型的过程作简单的介绍，详细公式的推导将在另文中讨论.

在一个具体的观测站，先将天文大气折射测定值 $R(E)$ 按方位分组，然后按照下列步骤进行：

第一步：为了模拟映射函数参数的需要, 先就测定值 $R(E)$ 作水汽修正 (乘以系数 A_1) 和气温、气压修正 (乘以系数 A_2), 近似计算在标准大气状态下干空气的折射值 $R_0(E)$:

$$R_0(E)=R(E)\times A_1\times A_2\,, \tag{14}$$

$$A_1 = \frac{N_D(h_0)}{N_D(h_0)+N_W(h_0)}\,,\quad A_2 = \frac{1013.25}{P}\times\frac{T}{273.15}\,. \tag{15}$$

这里 $N_D(h_0)$ 和 $N_W(h_0)$ 用 (7) 式计算, 式中 P_D 为总气压读数减去水汽压 e, 单位为 mbar, T 是绝对温度，分别为取得测定值 $R(E)$ 时刻的瞬时气象读数；系数 k_i 先取 (8) 式的数值作为暂用值.

第二步：分别对不同的方位，利用 $R_0(E)$ 乘以被测星光波波长改正系数 $f(\lambda)$, 模拟求解出标准大气状态下电磁波延迟映射函数 MF(E) 的参数和干大气引起电磁波的群折射率差 $N_{D0}(h_0)$, 映射函数模型取用 (11) 式的形式，取到参数 d. 波长改正系数表达式和模拟求解公式 (5 个未知数) 是 [5]:

$$f(\lambda) = 1+\frac{0.01699}{\lambda^2}+\frac{0.0002364}{\lambda^4}\,, \tag{16}$$

$$R_0(E) = 10^{-6}\times N_{D0}(h_0)f(\lambda)\times\cos E\times MF(E)\,. \tag{17}$$

第三步：由直接测定值 $R(E)$ 求解瞬时气象条件下的 (4) 式中的系数 k_1 、 k_2 和 k_3. 这里首先应把 (4) 式中的两式相加，取总气压读数 $P = P_D + e$, 并且对主项作被测星光波波长修正，则有：

$$N(h_0) = N_D(h_0)+N_W(h_0) = J_1 f(\lambda)\frac{P}{T}+J_2\frac{e}{T}+J_3\frac{e}{T^2}\,. \tag{18}$$

并且有：

$$k_1 = J_1\,,\quad k_2 = J_1+J_2\,,\quad k_3 = J_3\,. \tag{19}$$

如前面所述, 考虑到实际气体与理想气体之间的差异, 应把 $N(h_0)$ 写成气象参数的函数, 考虑到上式第一式占总延迟量 90%—100%, 这里只需把它的系数 J_1 写成气象参数的函数，以取代把映射函数的参数写成气象参数函数的做法，并且包含 (5) 式和 (6) 式可压缩常数的成分，即：

$$J_1 = J_{10}+J_{11}(P-1013.25)+J_{12}(T-273.15)+J_{13}e\,. \tag{20}$$

代入下式, 并利用第二步已经得到的映射函数的参数, 求解系数 J_{10} 、J_{11} 、J_{12} 、J_{13} 、J_2 和 J_3:

$$R(E) = 10^6\times\left[J_1 f(\lambda)\frac{P}{T}-J_2\frac{e}{T}+J_3\frac{e}{T^2}\right]\cos E\times MF(E)\,. \tag{21}$$

第四步：将 $N_{D0}(h_0)$ 与 $J_{10}\times 1013.25\div 273.15$ 作比较，如果相差较大，则利用 (20) 和 (21) 式新求解出的系数模拟值 J_i 代入 (19) 式，计算 k_i, 代替 (8) 式的数值，再代入 (7) 式，重复第一步到第三步的步骤，直到它们之差小于 0.0005 为止.

第五步：构建本地的各方位的干延迟和湿延迟改正模型.

$$\Delta L_{1D} = A_D\times MF(E)\times 10^{-6}\times N_D(h_0)\times H_D\,, \tag{22}$$

$$\Delta L_{1W} = A_W \times MF(E) \times 10^{-6} \times N_W(h_0) \times H_V\,, \tag{23}$$

这里， H_D 和 H_V 分别是干大气和湿大气的有效高度采用值， A_D 和 A_W 为待定比例常数，用该测站从卫星轨道位置和测站位置拟合的干延迟和湿延迟的改正量来确定．这两个待定常数的设置，相当于通常测量的零点校正，可以消除 H_D 和 H_V 的误差影响，因为这里虽然不必选用某一大气分布模型，但是不同的大气分布，却有不同的大气有效高度，得到不同的天顶延迟量.

(22) 式和 (23) 式，就是随测站和随方位而异的电磁波中性大气折射延迟改正实测模型.

4 结论与展望

长期以来，不能直接测定天文大气折射的主要障碍： (1) 无法得到不含系统误差影响的恒星位置， (2) 从未得到过不受大气折射修正值残差影响的瞬时天文纬度测定值，(3) 无法得到不受仪器误差修正值残差影响的视天顶距测定值．现在，随着依巴谷星表的问世，第一个障碍已不存在．后两个问题已在云南天文台新研制的低纬子午环上得到解决，它为测定瞬时大气折射值，探讨出了用子午方向以外各地平经圈上的星过记录时刻求解瞬时天文纬度测定值的方法 [1]，该仪器还能在视天顶距测定值中消除仪器重力变形、热变形、磨损和环境变化影响，排除各种系统误差来源.

在低纬子午环研制成功后，我们通过足够量的观测数据成功地建立了东、南、西、北 4 个方位的天文大气折射实测模型，模型参数的精度都优于 $0.01''$. 因此，建立多方位的电磁波中性大气折射延迟改正实测模型，甚至模拟测站上空实际大气分布模型的某些参数，条件已经成熟．如前所述，只要观测纲要编制妥当，各天顶距区段的观测次数根据压缩反常大气折射影响的要求安排，就能保证在地平高度角 5° 处，天文大气折射的测量精度达到 $\pm 0.25''$，在其他各区段也达到相应的精度．根据我们已累积的观测、处理和建立实测模型的经验，这样的精度和要求是能达到的．本文方法的实施，将把低高度角处的折射延迟改正精度提高到厘米级，把截止高度角压缩到 5° 以内，而且在建立实测改正模型时，不采用任何大气分布模型，避免了模型误差带进的影响.

基于低纬子午环的观测原理和测量方法，可以研制出小型轻便、可移动的专用测量仪器，供各纬度带的测站使用．估计在一个测站只需进行约 80 个晴夜的观测，即能为建立 16 个均布方位的模型提供所需的测量数据.

参 考 文 献

1 冒蔚，铁琼仙，杨磊．天文大气折射 (M). 昆明：云南科技出版社， 2004
2 黄捷．电波大气折射误差修正 (M). 北京：国防工业出版社， 1999
3 MacMillan D S, Ma C. Journal of Geophysical Research, 1994, 99(B1): 637
4 Emardson T, Elgered R G, Johansson J M. Journal of Geodesy, 1999, 73: 373

5 Mendes V B, Langley R B. Physics and Chemistry of the Earth(Part A), 2000, 25(12): 809
6 Niell A E. Journal of Geophysical Research, 1996, 101(B2): 3227
7 Niell A E. Earth Planets and Space, 2000, 25: 699
8 Niell A E, Coster A J, Solheim F S. et al. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2001, 18(6): 830
9 Bar-Sever Y E, Kroger P M, Borjesson J A. J Geophys Res, 1997, 103(B3): 5019
10 YAN Haojian, PING Jinsong. The Astronomical Journal, 1995, 110(2): 934
11 YAN Haojian. The Astronomical Journal, 1996, 112(3): 1312
12 李廷兴. 中国地震, 1998, 14(1): 21
13 Gardner C S. Applied Optics, 1977, 16: 2427
14 Chen G, Herring T A. Journal of Geophysical Research, 1994, 99(B1): 637
15 Bar-Sever Y E, Kroger P M. Borjesson J A. Journal of Geophysical Research, 1998, 103(B3): 5019
16 MacMillan D S. Geophysical Research Letters, 1995, 22: 1041
17 MacMillan D S, Ma C. Geophysical Research Letters, 1997, 24: 453
18 Marini J W. Radio Science, 1972, 7(2): 223
19 Hopfield H S. Journal of Geophysical Research, 1969, 74(18): 4487
20 Hopfield H S. Radio Science, 1971, 6(3): 357
21 Thayer G D. Radio Science, 1974, 9(10): 803
22 Owens J C. Applied Optics, 1967, 6(1): 51
23 王惠南. GPS 导航原理与应用 (M). 北京：科学出版社, 2003
24 严豪健，平劲松，陈义，等. 测绘学报, 1995, 25(1): 67
25 Rowlandson L G, Moldt R G. Radio Science, 1969, 4(10): 927

A Feasible Way for Improving the Correction Accuracy of Neutral Atmosphere Refraction Delay

MAO Wei[1]　ZHANG Han-wei[1,2]　LI Bin-hua[3]　YANG Lei[1]　TIE Qiong-xian[1]

(1 *National Astronomical Observatories/ Yunnan Observatory, Chinese Academy of Sciences, Kunming* 650011)

(2 *Department of Territory Information and Mapping Engineering, Xuzhou normal university, Xuzhou* 221116)

(3 *Institute of information engineering and automatization, Kunming university of science and technology, Kunming* 650041)

Abstract　Based on the light of the requirements of space geodesy for the correction accuracy of neutral atmospheric refraction delay, it is necessary to put that the refraction delay correction value should change with the station and azimuth. Under the condition that the astronomical atmospheric refractive value can't be directly determined yet, the reason why the available various correction models can not meet the anticipated requirement of accuracy and reduce the cut-off height angle for the dependency of the correction values on the model of atmospheric distribution are pointed out. On the special structure of the Lower Latitude Meridian Circle and the practice of determining astronomical refraction in Yunnan observatory, a new method for improving the correction accuracy of the atmospheric refraction delay is proposed: the determined data of the astronomical atmospheric

refraction values with different azimuths are utilized to find the refractivity and the parameters of mapping functions for modeling the atmospheric refraction delay correction, which changes with the observing stations and azimuths. Under the condition that the adoption of the atmospheric distribution model is avoided the implementation of this new method will improve the correction accuracy of the zenith delay within 1mm,that of the refraction delay of centimeter's magnitude, at low altitude angle, and reduce the cut-off height angle by degree 5 or less.

Key words Astrometry neutral atmosphere, refraction delay