

对流层大气折射延迟改正 (II) : 当前主要研究方向和进展

严 豪 健

(中国科学院上海天文台 上海 200030)

摘 要

在文献 [1] 中, 综述了对流层大气折射延迟改正的基本概念和研究方法。本文中, 介绍在此领域中的主要研究方向和动态, 以及一些最新成果。同时, 还评述和分析了这些研究工作的主要特色和将来的发展方向。在本文的第 8 节, 简要地介绍了作者在大气折射研究中的最新进展——大气折射母函数方法。

关键词 大气效应 — 天体测量

1 引 言

回顾近几十年科学和技术发展的历史, 空间新观测技术的出现和发展可以认为是天文学中的一次重大革命。相比于以往的经典光学观测方法, 新空间技术的观测精度几乎提高了两个数量级^[2]。新技术不仅对天体物理学、方位天文学等直接相关的天文学分支学科带来高精度的最新观测结果, 而且对其他相关学科, 如天体力学、地球物理学等研究领域带来新的冲击。

观测精度的提高必然会促使我们在观测模型的理论研究中重新作进一步的考虑。这意味着, 我们一方面要在理论模型中加入那些在经典方法中因改正量级较小而被忽略的项, 如广义相对论改正等; 另一方面要对原有精度不够高的某些改正公式进行修正。实践证明^[2]: 当前采用的大气折射延迟改正公式的精度几乎和观测精度相当, 深入研究和修正大气折射成为当前新技术中的主要课题之一。

由于大气折射研究上存在着两大困难: 真实大气模型的复杂性和大气折射积分的不可积性^[1], 当今大气折射研究的发展显得比较迟缓, 获得的成果也相对较少。本文中, 我们将主要介绍在中性大气折射问题中一些尝试性和探索性的研究课题; 其中大部分工作还只取得一些局部和阶段性的成果, 因没有突破性的进展而没有当前规范模型所采用。为此, 我们在

1995 年 9 月 28 日收到

中国科学院天文口、射电天文联合实验室和上海天文台台长基金资助项目

文章中将重点分析这些研究课题的思想方法,并提出我们的看法。

在第8节,我们简要地介绍作者在中性大气折射改正中所提出的母函数方法。可以证明,由余误差函数的展开形式所建立的新连分式映射函数模型是迄今最好的数学模型之一。

2 映射函数

映射函数(mapping function)的术语虽然最早出现在Lanyi^[3]的文章中,但是它的雏型应该追溯到Chao和Marini的工作。迄今为止,尤其是Marini的思想仍然被许多人所应用和发展。

Marini的主要贡献之一是引入了完整的连分式形式的映射函数,他把大气折射延迟改正 $\Delta\sigma$ 写成^[4]:

$$\Delta\sigma = 0.0021757 \left[m - \left(\frac{914.40}{R} \right) L^2 \cos^2 \theta_0 \right] (\text{km}), \quad (1)$$

其中 $R(\text{km})$ 是观测目标到测站的距离, θ_0 是目标相对测站的视高度角,而:

$$m = \frac{1}{\sin \theta_0 + \frac{0.00085599}{\sin \theta_0 + \frac{0.0021722}{\sin \theta_0 + \frac{0.0046788}{\sin \theta_0 + 0.11571}}}}, \quad (2)$$

是映射函数, L 是来自:

$$L = 1 - i \sin \theta_0 + 0.0001565i^2. \quad (3)$$

上式中 i 可以认为是天文大气折射(蒙气差改正)的映射函数:

$$i = \frac{1}{\sin \theta_0 + \frac{0.00093424}{\sin \theta_0 + \frac{0.0021183}{\sin \theta_0 + \frac{0.0080511}{\sin \theta_0 + 0.11628}}}}. \quad (4)$$

(1)式右边括号内的第二项是和观测目标距离相关的修正项,可以认为它是对映射函数所作的观测目标距离改正。如果忽略(1)式右边第二项,或者说相对无穷远观测目标,大气折射延迟可简单地写成天顶延迟(zenith delay) $\Delta\sigma_z$ 和 m 的乘积:

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_z \cdot m. \quad (5)$$

按照这样的思想,我们可以认为(1)式中的距离修正项构成了映射函数的一部分。

在方程(1)中,Marini沿用Thayer^[5]以及Rowlandson和Moldt^[6]的指数大气模型;采用的常数如下:测站处大气折射率差 $N_0 = 313$,测站地心距 $\tau_0 = 6373\text{km}$,有效高度 $H = 6.9513\text{km}$ 。

Chao比Marini更早提出一个简化的大气折射改正映射函数模型^[7]:

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_z \frac{1}{\sin \theta + \frac{0.00143}{\tan \theta + 0.0455}}, \quad (6)$$

其中 θ 是观测目标的真高度角。虽然这个公式不可能具有他声称的那么高的精度(在 1° — 90° 高度角范围内,达到1%的相对精度),但是由于它的简洁性,在CfA2.2模型问世以前被广泛地应用在VLBI技术有关的软件之中^[8]。

在 Marini 和 Murray^[9] 给出的卫星激光测距 (SLR) 的大气折射延迟改正公式中 (见文献 [1] 的 (42—47) 式), 我们可以发现如下改进:

(1) 映射函数中的角自变量从视高度角 (或视天顶距) 改成真高度角 (或真天顶距), 而后者可以从历表计算中获得比前者更高的精度;

(2) 映射函数只取两项的连分式形式;

(3) 在天顶延迟的理论值中, 考虑了观测频率修正和重力加速度随纬度和测站高度而变化带来的修正。这意味着我们可以定义天顶延迟的理论值 $\Delta\sigma'_z$ 为:

$$\Delta\sigma'_z = \Delta\sigma_z \frac{f(\lambda)}{W(\phi, h_0)}, \quad (7)$$

其中 $\Delta\sigma_z$ 是 $g = 9784\text{ms}^{-2}$, $\lambda \rightarrow \infty$ 时的天顶延迟, $f(\lambda)$ 和 $W(\phi, h_0)$ 分别是频率修正和重力加速度变化修正;

(4) 在天顶延迟和映射函数的计算中均考虑了测站气象参数的影响, 其中包括大气湿分量对天顶延迟和映射函数的贡献。

十分遗憾的是: Marini 公式中的观测目标距离修正项, 方程 (1) 右边第二项, 在他们的模型中都被忽略了。这在当前观测截止角设置至 15° 或 20° 以上是带来可忽略的影响, 但是对距离小于 1000km 的目标, 观测截止角在 10° 左右时, 有可能引入几厘米的误差。

从大气折射研究历史中可以看到, Marini 等人的两篇论文^[4,8] 和 Chao^[7] 的基本思想在 CfA 2.2 模型问世以前一直被他人所应用, 后人的绝大多数研究工作也仅是在他们公式的基础上作局部的改进、深化和完善。虽然 Chao 以后又对映射函数作了新的改进^[10,11], 但是这些工作的影响并没有超过方程 (6)。

3 大气模型

大气模型是指用一个相对简单的数学理论模型来近似描述测站附近局部的或是全球的复杂大气分布。在文献 [1] 中, 我们已经对大气折射研究中常用的指数大气模型^[5,6]、Hopfield 模型^[12]、Saastamoinen^[13] 以及相似的标准大气模型^[14] 作了介绍。不同的大气模型对方程 (5) 中的天顶延迟 $\Delta\sigma_z$ 和映射函数 m 都有影响。如果我们把 Hopfield 大气模型下的天顶延迟

$$\Delta\sigma_z^H = \frac{10^{-6}}{5} N_{d_0} (h_t - h_0) \quad (8)$$

和标准大气模型下天顶延迟

$$\Delta\sigma_z^S = 10^{-6} N_{d_0} \frac{RT_0}{g} \quad (9)$$

相比较, 可以发现在同样地面气象参数条件下, 两者之差可以达 1cm 左右。在方程 (8,9) 中, 我们只列出干项, 其中 N_{d_0} 是测站上大气折射率差的干分量, 它可以用 Smith-Weintraub 方程^[15] 写成为大气压力 P_0 (mbar) 和大气温度 T_0 (K) 的函数 $N_{d_0} = 77.6P_0/T_0$, 而 h_t 和 h_0 分别是对流层顶和测站的高度, R 是大气气体常数, g 是重力加速度。

由此我们认为: 比较从不同大气模型下推出的大气折射延迟的理论值, 如文献 [3] 的图 2-4, 是缺乏现实意义的。有意义的做法是: 在同一大气模型下, 比较在不同高度角时不同延

迟模型之差(这时它们的天顶延迟都相同);或者在不同大气模型下,分别比较它们的天顶延迟和映射函数的差别。这样我们就可以说:我们不仅要用好的大气模型和较严格的大气折射理论公式去改进观测结果,而且有可能用高精度的观测结果去检验大气模型。

现在应该介绍一下 Black 在 Hopfield 大气模型下的大气延迟公式^[16]:

$$\Delta\sigma = 10^{-6} \frac{N_{d_0} h_t}{5} m^H \quad (10)$$

$$m^H = \left\{ 1 - \left[\frac{\cos E}{1 + (1 - \ell_c) \frac{h_t}{r_s}} \right]^2 \right\}^{-\frac{1}{2}}, \quad (11)$$

其中 E 是高度角(Black 在推导中忽略了光线在大气中的弯曲), r_s 是测站地心距,因在(10)式中隐含了测站高度为零,所以 h_t 应解释成相对测站对流层顶高,而参数 ℓ_c :

$$\ell_c = \frac{5}{8} + 0.10612186W(T_c)\exp(R \cdot E) + \sum_{i=1}^3 c_i(T_c) \frac{E}{E_{M_i}} \exp\left[\left(1 - \frac{E}{E_{M_i}}\right) n_i\right], \quad (12)$$

其中:

$$c_i(T_c) = a_i + b_i T_c, \quad (13)$$

$$W(T_c) = 1 + QT_c + ST_c^2, \quad (14)$$

T_c 是地表温度($^{\circ}\text{C}$), $a_i, b_i, E_{M_i}, n_i, Q, R, S$ 为常参数^[16]。Black 工作的主要意义是提供了把 Hopfield 大气模型下映射函数和其他大气模型的映射函数进行比较的可能性。但是在他公式推导中存在着两个缺陷,第一:大气折射数值积分是取自连接目标和测站的弦上。从 Moritz^[17]的结果,我们就发现 Black 的结果至少差一个摄动项(文献[1]的(37)式);第二:求解大气折射积分的数学过程显得过于粗糙。综上分析,他的结果不可应用到较低的高度角。

Lanyi^[3]的工作是基于被积函数的级数展开,由此我们认为它仅可能获得和 Saastamoinen^[13]相类比的精度。他的改进是把 Saastamoinen 公式中的表列改正项都用解析式来表示。从而他的公式就显得十分复杂而难以应用。值得指出的是:他在文章中报道了 VLBI 观测残差和高度角的相关性。这个事实证明映射函数的误差在某些条件下是显著的。进一步研究映射函数的数学结构和建立一个尽可能和真实大气相接近的大气模型,仍然是中性大气折射研究中的两个主要方向。

4 CfA2.2 模型及其改进

自从 Davis 等人^[14]在 1985 年提出 CfA2.2 模型以后,它一直被广泛地应用在 VLBI、GPS 等空间技术中。CfA2.2 模型的计算公式参见文献[1]4.3 节。CfA2.2 模型中接受了这样一个事实:Marini^[4]提出的连分式映射函数比其他人应用的级数展开法更适合来描述大气折射积分;它并且适合于气象条件参数化。

考虑到在 CfA2.2 中某一些气象参数在实践中缺乏现实意义,如对流层顶高和对流层温度梯度,以及测站的地理坐标可能影响到映射函数, Herring 提出了一种包括干、湿两项的映

射函数 m_h 和 m_w ^[18]:

$$m_h(\varepsilon) = \frac{1 + \frac{a_h}{1 + \frac{b_h}{c_h}}}{\sin \varepsilon + \frac{a_h}{\sin \varepsilon + \frac{b_h}{c_h}}}, \quad (15)$$

$$m_w(\varepsilon) = \frac{1 + \frac{a_w}{1 + \frac{b_w}{c_w}}}{\sin \varepsilon + \frac{a_w}{\sin \varepsilon + \frac{b_w}{c_w}}}, \quad (16)$$

而

$$\left. \begin{aligned} a_h &= [1.2320 + 0.0139 \cos \phi - 0.0209h_0 + 0.00215(T_0 - 10)] \cdot 10^{-3} \\ b_h &= [3.1612 - 0.1600 \cos \phi - 0.0331h_0 + 0.00206(T_0 - 10)] \cdot 10^{-3} \\ c_h &= [71.244 - 4.293 \cos \phi - 0.149h_0 + 0.0021(T_0 - 10)] \cdot 10^{-3} \\ a_w &= [0.583 - 0.011 \cos \phi - 0.052h_0 + 0.0014(T_0 - 10)] \cdot 10^{-3} \\ b_w &= [1.402 - 0.102 \cos \phi - 0.101h_0 + 0.0020(T_0 - 10)] \cdot 10^{-3} \\ c_w &= [45.85 - 1.91 \cos \phi - 1.29h_0 + 0.015(T_0 - 10)] \cdot 10^{-3} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

以上公式中, ε 是真高度角, ϕ 和 $h_0(\text{km})$ 是测站地理纬度和高度, $t_0(^{\circ}\text{C})$ 是地面温度。Herring 的模型已经在 VLBI 的 OCCAM 3.3 版本中被应用。

5 有限距离目标

在众多的新空间技术中, 除了 VLBI 以外, 大部分技术的观测目标是绕地球运动的人造卫星。从几何上分析, 映射函数都是对无穷远处目标而建立的。对地面高度仅有数千以至数百千米的卫星而言, 观测目标距离改正显得有意义。

从物理本质而言, 观测目标距离改正与信号在大气层中的弯曲相联系。此项改正的深入讨论必然会涉及蒙气差改正。从文献上看, Marini^[4] 的公式(本文方程(1))还是能较好地修正此项改正。特别应该指出的是: 在方程(3)和(4)中, 他已经把连分式形式的映射函数引入到蒙气差改正之中。根据我们的试算结果, 如果把方程(3)和(4)运用到很广的观测高度角范围(例如 3° — 90°), 那么它的精度就受到限制。

6 大气折射改正湿分量

由于水汽在大气中分布的不规则性, 大气折射改正中的湿分量成为当前中性大气延迟中的主要研究方向之一。从量级上^[19], 大气折射湿分量最多只占 10% 左右, 也就是说在天顶方向可以达 20cm 以上; 但是它的误差却一般在几厘米, 这个数值取决于选用的解算方法、气象条件等因素。目前解算湿大气延迟的主要方法可分成直接测量和基于地面气象参数的理论模型。

6.1 直接测量法

在条件许可的情况下, 大气水汽的直接测量是解决水汽分布不规则的首选方法。在实践中可供选用的仪器有无线电探空器(radiosonde)、红外光谱湿度计(infrared spectral hygrometer)(IRSH)和水汽辐射计(water vapour radiometer)(WVR)^[19]。

无线电探空器可以对几十千米高度内各个大气层的气压、温度、湿度进行直接测量。它对湿度测量的精度是在 5%—10% 之内。但这种方法的致命缺点是：费用大，不能直接测量视线方向，不能连续测量（对指定的空间点进行一段时间测量），测量周期长（约一个半小时）而无法反映湿分量的快速变化。但是重要的一点是：无线电探空器在某些气象站每天定时测量数次，这对建立局部地区的大气模型是十分重要的；它也是检验目前所应用的大气模型的主要手段。

红外光谱湿度计测量背景源（太阳或月亮）分别在水汽谱线和不在水汽谱线上的辐射之比。这种测量方法具有费用低、操作方便和能连续工作等优点；但是它的测量目标是有限的背景源，也不能做其他选定视线方向的测量，而且它对大气层内的凝聚态水（如雾、云等）十分敏感而受气象条件限制。红外光谱湿度计的精度大致和无线电探空器相似。它的结果中可能含有一个仪器校准误差。

水汽辐射计是目前空间测量技术中讨论得最多的仪器^[19]。WVR 一般工作在水汽中心频率 22.235GHz 附近。它的基本原理是测量不同频率（一般两个）的天空亮度温度（sky brightness temperature）来解出大气折射中的湿项。它是一种可以进行视线方向直接测量的仪器。由于它的采样频率高而可以进行时间上和方位上的连续测量。水汽辐射计的结果可以用来消除水汽分布在空间和时间上的变化的影响。它的精度被认为在天顶方向可能好于 1cm^[20,21]，这个结果部分地与所选取的两种工作频率有关。WVR 的操作方便，价格上不算很贵，已经被许多台站所选用。WVR 研究的主要方向除了分析它在各种新技术，如 GPS^[20] 和 VLBI^[21] 中的结果外，还可以包括：

(1) WVR 的精度分析、归算模型的精化、与无线电探空器结果的比较和考虑两类仪器观测结果之间的互相补充^[22]；

(2) 研究大气折射湿分量变化的时间尺度，它来自于 WVR 的较长时间连续工作；

(3) 改进 WVR 对天空亮度温度的绝对测量精度。观测结果表明：WVR 在短时间（几十分钟）中是稳定的，但在数小时的较长时段中呈现漂移现象，它可能来自于仪器内部温度变化^[23]。

6.2 理论模型

由于条件所限，不可能期望大部分测站都配备水汽辐射计。这样，以地面气象资料为参数的湿大气延迟映射函数的种种理论模型也随之而发展起来。这种理论的基本出发点是把大气延迟写成独立的干分量和湿分量之和：

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_d m_d + \Delta\sigma_w m_w, \quad (18)$$

其中 $\Delta\sigma_d$ 和 $\Delta\sigma_w$ 分别是天顶延迟的干和湿分量， m_d 和 m_w 是相应的映射函数。

较早的湿分量映射函数出现在 Chao 的文章中^[11]，他把映射函数的干分量和湿分量都写成两项连分式形式。以后 Black^[16]、Lanyi^[3] 用被积函数展开的方法也给出了湿分量的映射函数。我们的看法是：级数展开法的结果不可能好于连分式形式的最小二乘法参数拟合结果；这个结论从 Saastamoinen^[23] 和 CfA2.2^[14] 的干分量映射函数的比较中就可以得出。还有一点值得指出的是：他们三人的结果都用了 Hopfield 的多方大气模型，因为这样做在作积分运算时比较方便。

Herring^[18] 的干、湿两项映射函数（本文 15—17 式）都是从 10 个分布在 VLBI 站附近的无线电探空器资料中得到的，它们应该具有更高的可靠性。而 Marini 和 Murray^[9] 的公式中

(文献 [1] 的 6.2 节)，隐含着这样一个假设：干、湿两项用相同的映射函数。其原因是中性大气折射中永久偶极项的贡献在激光波段中变得并不显著。

由于水汽在大气中的分布不规则性，从 GPS^[20] 和 VLBI^[21] 的观测中都得到这样的结论：用水汽辐射计直接测量的大气折射湿分量的精度要比理论公式的估算好一倍左右；而用卡尔曼滤波法求得的天顶延迟与水汽辐射计相当^[2]。也就是说：在测地应用中，卡尔曼滤波法可以在天顶延迟的求解中代替耗费相对比较大的水汽辐射计。

7 大气折射率差水平梯度

为了在高度角下降到 10° — 20° 或更低的范围时仍然保持好于厘米级的精度，我们在大气折射改正中还应该考虑大气折射率差水平梯度的影响，以后简称水平梯度。水平梯度的引入是大气折射研究从球对称大气模型向非球对称大气模型的发展。观测和计算的结果表明：水平梯度的影响在高度角下降到 10° 时可以达到 3—4cm；在高度角为 20° 左右时仍然可能有 1cm 的残差改正；即使在天顶附近也可能产生毫米级的误差^[23,24]。后者来源于水平梯度产生的天顶方向的光线弯曲效应。

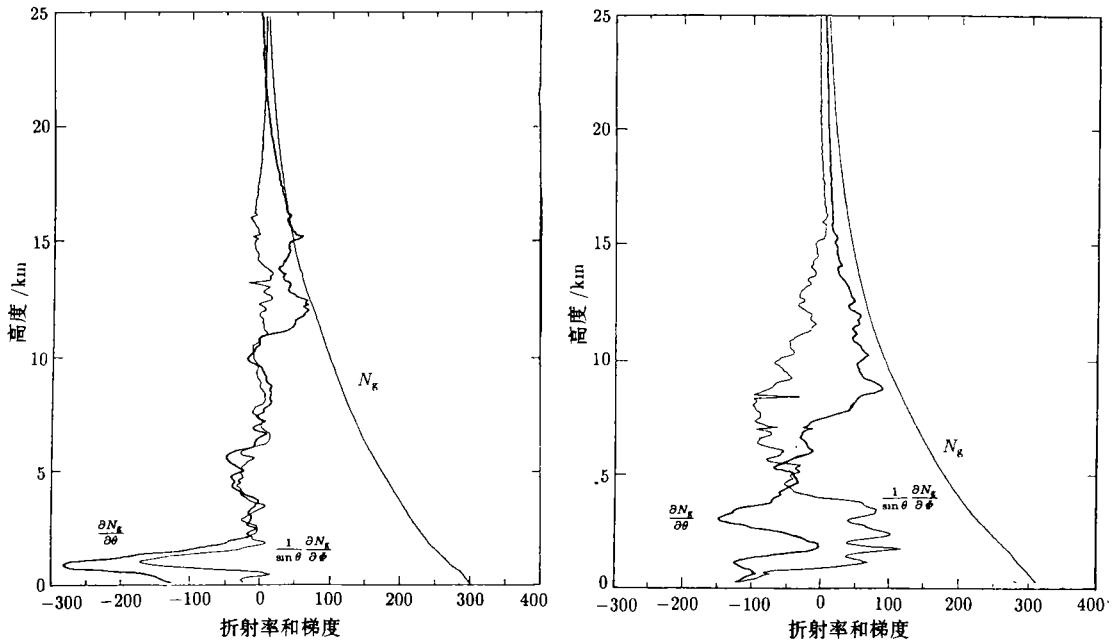


图 1 群折射率差 N_g 的南北水平梯度 $\frac{\partial N_g}{\partial \theta}$ 和东西水平梯度 $\frac{\partial N_g}{\partial \phi} \cdot \frac{1}{\sin \theta}$ (在瑞典 54 号测站)

左图为 1970 年 2 月 16 日 11^h30^mGMT；右图为 1970 年 1 月 21 日 23^h30^mGMT

水平梯度的物理机制可以归结成两个方面。第一，大地水平面上大气折射率差存在着一个全球性的从较温暖的赤道区向较寒冷的极区逐渐增加的趋势，这种分布构成大气折射率差水平梯度的南北分量；第二，由于测站地区地貌、气象、气候等因素带来大气折射率差的局部性水平方向扰动^[25]。

水平梯度的直接测量可以在一个地区内同时释放多个无线电探空器的方法来实现。这样同时可以获得大气折射率差和它的水平梯度的高度分布^[23,26]。图1给出水平梯度的实测例子,可以看出水平梯度随高度的变化趋向还是显著的^[25]。

水平梯度模型下的大气折射率差可以用一个简单的数学表达式来表示:

$$N(h, \Delta\phi, \Delta\theta) = N(h, 0, 0) + \frac{\partial N}{\partial \phi} \Delta\phi + \frac{\partial N}{\partial \theta} \Delta\theta, \quad (19)$$

其中 $N(h, 0, 0)$ 是二维地理坐标为 ϕ_0, θ_0 的测站上垂直方向大气折射率差; $\frac{\partial N}{\partial \phi}, \frac{\partial N}{\partial \theta}$ 是它的水平梯度南北和东西分量, $N(h, \Delta\phi, \Delta\theta)$ 是空间点 $(h, \phi_0 + \Delta\phi, \theta_0 + \Delta\theta)$ 的相应值。而消除水平梯度改正的比较粗略的做法是可以引入一个方位改正。如果想从(19)式导出大气折射改正的严格解析表达式,还要依赖于水平梯度随高度分布的模型。迄今为止,还没有有十分令人信服的大气折射率差水平梯度的定量分析和全球适用的观测证据。

从 Chao^[27] 得到类似(19)式的结果以来,几乎所有的研究者都是从无线电探空器的实测资料来进行数值分析和模拟计算^[23-26,28]。

水汽辐射计可以用来直接测量湿分量的水平梯度。观测结果表明:在水平梯度中,水汽的贡献占了很重要的地位^[19]。水平梯度的湿分量还呈现了快速的时间变化特性。在10—15min的时间段内,它的变化可达50%^[29]。这意味着精确的水平梯度改正模型中还可能包括时间变量。这个事实使水平梯度的最终解决变得更加困难。

在水平梯度的研究中,目前可以开展的主要工作包括以下两个方面:第一,充分利用无线电探空器的观测,尤其是在一个范围内同时发射几个无线电探空器的资料;第二,水平梯度改正理论模型的建立以及与实测资料的比较。我国幅员广阔,气象资料丰富,在水平梯度研究中是可以做出成绩的。

8 大气折射积分的母函数方法

Moritz^[17] 提出了大气折射的保形理论。他用源和接收点的弦上积分代替沿光学路径的积分是大气折射积分的近似逼近过程。

作者研究了这个方法在非对称大气模型和非规范大气模型下的推广^[30]。关于这个方法在对称大气模型下的应用,我们已经证明:在指数大气模型下,大气折射积分的一级近似可以表示成余误差函数形式^[31]:

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_z \frac{1}{\cos \xi_0} I \sqrt{\pi} e^{I^2} \operatorname{erfc}(I), \quad (20)$$

其中 ξ_0 是目标相对测站的真天顶距;而正规化天顶距参数 I 定义成:

$$I = \sqrt{\frac{r_0}{2H}} \cot \xi_0, \quad (21)$$

这里 r_0 是地球半径; H 是大气有效高度,它和大气折射率差相联系:

$$H = \frac{1}{N_0} \int_{h_0}^{\infty} N(h) dh, \quad (22)$$

而 $\operatorname{erfc}(I)$ 是熟知的余误差函数

$$\operatorname{erfc}(I) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_I^{\infty} e^{-y^2} dy. \quad (23)$$

因此, 我们称余误差函数是大气折射积分的近似母函数, 并称大气折射的这种研究方法为大气折射积分母函数方法。与余误差函数相联系的一种改进的连分式形式可以作为映射函数的最佳表示:

$$m(\xi_0) = \frac{1}{\cos \xi_0 + \frac{D_1}{I^2 \sec \xi_0 + \frac{D_2}{\cos \xi_0 + \frac{D_3}{I^2 \sec \xi_0 + D_4}}}}, \quad (24)$$

上式中, 由标准大气模型推出的测站气象和地球物理条件参数化系数 $D_i (i=1,2,3,4)$, 请参见文献 [32]。以沿信号路径的数值积分值为标准值, 和 CfA2.2 模型相比, (24) 式的精度达到一个量级的提高, 新模型在 $2^\circ.5$ 高度角以上, 在广泛的气象条件下其精度均好于 1cm; 而且它在接近 0° 的近水平大气折射中, 也不会发散。

作者并且证明了 [31,32]: 这种母函数方法和映射函数概念也可以引入到天文大气折射研究中, 其详细结果将在文献 [33] 给出。

9 讨论和建议

综观本文中介绍的中性大气折射研究的主要方向, 我们提出如下看法:

(1) 无论是 Saastamoinen^[13]、Lanyi^[3]、Black^[16] 等人所采用的被积函数级数展开法, 还是 Chao^[7,10,11]、Marini^[4]、Davis^[14]、Herring^[18] 等人所猜测的连分式形式, 都不能解决映射函数在极低高度角观测的精度。相比之下, 连分式映射函数不仅形式简洁, 而且精度高, 适用的高度角较广。但是它缺乏一个数学上的证明, 这就是即使 Marini 在 1972 年提出完整的连分式思想以后, 还有很多人在级数展开法的道路上寻求映射函数新形式, 以致导出十分繁杂的、使用不方便、精度上又不高的映射函数^[3,16]。寻求数学上完善、应用上方便、高度角覆盖广、精度高的映射函数是大气折射研究中的一个重要任务。

比较以往的映射函数模型, 在第 8 节介绍的大气折射母函数方法明显具有理论上完善、形式上简明的特色。由此导出的新连分式映射函数具有精度高、适用高度角广、收敛性好等一系列优点。它可推广到目前 VLBI、SLR、GPS 等新空间技术中, 替代目前使用的公式。

(2) 大气模型的差别对天顶延迟和映射函数都有影响。一方面, 我们可以分析不同大气模型下的大气折射改正, 或者考虑直接应用无线电探空器的资料^[18], 建立局部性大气折射模型; 另一方面, 我们可以从高精度观测结果的残差分析中检验大气模型。

(3) 大气湿分量的讨论在以后相当长时间中仍然将是大气折射研究的主要内容。在缺乏水汽辐射计的条件下, 如何用经验性的局部地区水汽模型去改正大气折射仍然是讨论的题目之一。

(4) 在目前使用的各种工作软件中都没有考虑水平梯度, 其原因是它的局部地区性特征比较显著。依我们的看法, 全球性因素引起的水平梯度可以在通用软件中出现, 而地区性因素的影响对具体的台站则需要分别处理。

(5) 对近地目标, 尤其是高度为几百千米的卫星, 需要建立一个高精度的、实用的距离改正公式。

(6) 对残差按高度角分布进行分析是检验大气模型(球对称)和映射函数的一种实用手段; 而残差的方位分析也是水平梯度的一种研究方法。

参 考 文 献

- [1] 严豪健. 天文学进展, 1995, 13: 380
- [2] Herring T A, Davis J T, Shapiro I I. JGR, 1990, B8: 12561
- [3] Lanyi G. In: Somogyi J, Reigber C. eds. Proceedings of international symposium of space techniques for geodynamics, Sopron, Hungary, 1984, IAG/COSPAR, 1984: 184
- [4] Marini J W. Radio Sci., 1972, 7: 223
- [5] Thayer G D. J. Res. NBS, Radio Propagat., 1961, 65D(2)
- [6] Rowlandson L G, Moldt R G. Radio Science, 1969, 4: 927
- [7] Chao C C. JPL Tech. Memo. 391-129, 1970
- [8] Ma C. NASA Tech. Memo. 79582, 1978, 65
- [9] Marini J W, Murray C W. NASA Tech. Rep. X-591-73-351, 1973
- [10] Chao C C. Tech. Memo. Calif. Inst. Technol. JPL, 391-350, 1972a, 17
- [11] Chao C C. JPL Tech. Report 32-1526, Pasadena, California: JPL, 1972b XIV: 33
- [12] Hopfield H S. JGR, 1969, 74: 4487
- [13] Saastamoinen J. Bull. Geod., 1972a, 105: 279; 1972b, 106: 383; 1973, 107: 13
- [14] Davis J L, Herring T A, Shapiro I I et al. Radio Sci., 1985, 20: 1593
- [15] Smith E K Jr, Weintraub S. Proc. IRE, 1953, 41: 1035
- [16] Black H D. JGR, 1978, 83: 1825
- [17] Moritz H. In: Ledersteger K ed. Proc. of inter. symp. figure of the Earth and refraction, Vienna, 1967, Vienna: Austrian Geodetic Commission, 1967: 323
- [18] Herring T A. Proc. of the symp. refraction of transatmospheric signals in geodesy, Hague, Netherlands, 1992, Netherlands Geodetic Commission Publications on Geodesy, New Series No.36, Neitherlanda: Geodetic Commission, 1992: 157
- [19] Elgered G, Ronnang B, Winberg E et al. Satellite-Earth range measurements. I. Correction of the excess pass length due to atmospheric water vapour by ground based microwave radiometry, Research Report No. 147, 1985, ESA, ESTEC/Contract No 5910/84/NL/MD Report
- [20] Tralli D M, Dixon T H, Stephens S A. JGR, 1988, 93: 6545
- [21] Elgered G, Davis J L, Herring T A et al. JGR, 1991, 96: 6541
- [22] Moran J M, Rosen B R, Radio Sci., 1981, 16: 235
- [23] Gardner C S. Radio Sci., 1976, 11: 1037
- [24] Zanter D L, Gardner C S, Rao N N. RRL Pub. No.471, 1976, Urbana, Illinois: University of Illinois
- [25] Gardner C S, Hendrickson B E. RRL Pub. No.478, 1976, Urbana, Illinois: University of Illinois
- [26] Blanchetiere-Ciarletti V, Lavergnat J, Sylvain M et al. Radio Sci., 1989, 24: 705
- [27] Chao C C. JPL Tech. Report 32-1526, 1971, Vol.VI: 57
- [28] Gardner C S. Appl. Opt., 1977, 16: 2427
- [29] Davis J L, Elgerad G, Niell A E et al. Radio Sci., 1993, 28: 1003
- [30] Yan Haojian. An alternative derivation of the neutral atmospheric delay formula, accepted by Annals of Shanghai Observatory Academia Sinica, 1996
- [31] 严豪健, 平劲松, 陈 义等. 测绘学报, 1996, 25: 67
- [32] Yan Haojian, Ping Jingsong. A. J., 1995, 110: 934

[33] 严豪健. 映射函数在天文大气折射中的应用. 已投天文学报

(责任编辑 刘金铭)

On the Corrections of Tropospheric Refractive Delay (II): The Recent Main Research Topics and Progress

Yan Haojian

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

Abstract

In addition to reference [1] which has summarized the basic concepts and research methods of the corrections of tropospheric refractive delay, the main research topics and activities as well as the new achievements nowadays on the field of the atmospheric refraction delays have been reviewed in this paper. Meanwhile, the primary features of these studies and the possible developing directions in the future have also been discussed and analysed. Finally the generator function method of the neutral atmospheric refraction proposed by the author and his collaborators has been briefly reviewed in chapter 8.

Key words atmospheric effect—astrometry