

对流层大气折射延迟改正 (I) : 经典理论

严 豪 健

(中国科学院上海天文台 上海 200030)

摘 要

在本文中, 我们综述了对流层大气折射延迟改正研究的基本概念和研究方法。文中最后部分简单介绍了对不同精度要求、不同高度截止角和不同观测技术可以采用的大气折射延迟计算方法。

关键词 大气折射 天体测量

1 引 言

大气折射改正的研究, 在天文学和大地测量学中是一个经典的研究课题, 它已经有相当长的研究历史。

从本世纪 60 年代开始, 随着甚长基线干涉测量 (VLBI)、卫星激光测距 (SLR)、月球激光测距 (LLR) 和全球定位系统 (GPS) 等新一代空间测量技术的相继问世, 以及它们的测量精度的不断提高和观测波段的扩展, 迫使我们重新考虑以前应用的大气折射理论公式, 力图把大气折射改正的归算精度提高到适应当前新观测技术的观测精度。十分遗憾的是, 当前新技术的观测结果证明: 目前新观测技术的精度在一定程度上受到大气折射公式不精确的限制^[1,2,3]。这个问题主要出现在低高度角 (小于 10°) 的观测资料处理中。这个现实使大气折射改正的研究仍然成为当代新空间技术观测研究中重要问题之一。大气折射理论研究上的进步, 不仅可以改善新技术的归算精度, 而且可以有希望降低仪器的观测截止角, 从而扩大仪器对目标的观测弧段, 提高仪器的使用效益。

无论在技术设计上还是从观测结果中, 我们已经确信: 当前新空间技术的距离测量已经达到厘米级的精度, 并开始向亚厘米和毫米级精度方向发展^[4]。但是大气折射的归算精度却几乎也是限制在同一精度数量级。这个问题主要来自两个原因: 第一, 地球周围大气层的密度和成分分布受到气象、地理、地球物理等物理因素的影响, 我们几乎

1994 年 9 月 28 日收到

中国科学院天文委员会、射电天文联合实验室和上海天文台台长基金资助项目

是没有可能用简单的大气模型去描述测站附近的大气层结构及其时间变化; 第二, 大气折射积分函数的不可积性所带来的数学处理上的困难, 使大气折射研究变得更加复杂化。因此, 大气折射的研究也主要集中在大气规范模型的建立和对所建立的大气模型的数学处理两个方面。

地球周围的大气层, 从它的物理成分上来划分, 大体上可以分成近地球部分的中性大气和外层的电离化大气。这两层大气成分上的不同带来了它们物理性质上的区别, 因此在研究方法上也有所区别。在本文中我们重点介绍中性大气层的大气折射延迟改正。

迄今为止, 以往研究中所建立的大气规范模型大致上可以分成三大类: 指数模型、Hopfield 模型^[5,6,7]和 Saastamoinen^[8]及以此发展的标准模型^[9]。从理想气体状态方程出发, 在等温条件下推出的指数大气折射率差模型是最简单的数学模型。其他两种类型的大气模型被认为比指数模型更加接近于实际大气分布; 但是它们在数学形式上的相对复杂性会在应用过程中带来更加多的计算上和大气折射公式模型化上的困难。

大气折射数学理论方法的研究, 也基本上随着大气模型研究的深入而同步发展。从较早时期主要基于指数大气模型的研究, 到 Hopfield 模型和标准大气模型中呈现的种种研究方法, 在数学技巧上基本上也分成两大类: 第一类是以 Saastamoinen 改正公式为代表的, 首先把大气折射积分中的被积函数按高度角 (或天顶距) 三角函数进行级数展开, 然后逐项积分; 第二类是以 Marini^[10] 连分式映射函数 (mapping function) 和在此基础上发展起来的 CfA2.2 模型为代表^[9], 他们用数值积分方法求出球对称大气模型下不同高度角大气折射延迟改正, 再对积分值按高度角 (或天顶距) 三角函数用一定的数学模式进行拟合, 求出拟合系数。

第一种被积函数的级数展开方法, 也在目前蒙气差改正公式中被采用。但是无论在蒙气差公式中还是在计算大气折射延迟时, 级数在低高度角时收敛速度变得很慢, 甚至到一定高度角时变成发散。这就限制了最后公式的高度角不可能很小 (一般到 10°)。此外, 一些高阶改正 (如光程弯曲改正) 在应用和考虑过程中变得十分复杂而只能采用表列值方法^[8]。这种方法明显不可能满足包含有低高度角的观测纲要。因为此方法具有简单性和直观性, 在较大高度截止角的观测纲要中 (大于 15°), 我们还是可以运用此方法的结果 (如常规 GPS 观测)。

大气折射积分是一个不可积函数, 第二类方法中所采用的数学拟合模型基本上属于一种猜测和经验的凑合, 因此也不可能在很低高度角时得到较符合真实情况的结果。因为在数学形式上它允许引入更多的参数去拟合各种复杂物理因素的影响, 这就在应用过程中比上一类方法显得明确而方便。更重要的一点是它的应用高度角范围比上一类方法低, 因而特别适合于 VLBI 的较低高度角特殊纲要观测处理。

由此可见, 现有的两种处理大气折射改正方法的数学基础还显得较薄弱。寻求一种数学方法和物理模型更为吻合的计算过程, 可以认为是改善目前大气折射不准确的出路之一。Moritz^[11] 提出的大气折射保形理论 (conformal theory of refraction) 是此研究方向的新探索。

2 大气折射延迟研究的基本概念

在介质中观测信号的传播过程产生了延迟效应；在非均匀介质中，同时产生了信号传播过程中的弯曲效应。由于地球大气结构的非均匀性，大气折射中包括了两种效应：天文大气折射（蒙气差）和大气折射延迟。它们是同一物理机制的两个不同的观测效应，因此它们不是分立的，而是存在一些联系。例如蒙气差改正和大气折射延迟中的光线弯曲效应之间存在着内在的联系。本文中主要叙述大气折射延迟的基本概念和研究方法。

2.1 Fermat 定律

在介质空间中，信号传播遵循着 Fermat 定律^[12]：光信号在空间任意两点 A 和 B 传播时取最短距离；而传播时间 T 取最小值。定义介质大气折射率^[13] $n(x)$ 为真空中光速常数 c 与点 x 上瞬时光速 $v(x)$ 之比，传播时间 T 可以写成：

$$T = \frac{1}{c} \int_A^B n dL \quad (1)$$

其中 dL 是信号传播的几何路径 L 上的线元。定义乘积： $\sigma = cT$ 为点 A 和 B 之间的光学距离，它是考虑为这两点之间用电磁方法距离测量的直接结果。信号传播的光学路径又称为短程线。信号的大气折射延迟能写成接收机与源之间的光学距离和几何距离之差（图 1），它一般可以写成：

$$\Delta\sigma = \int_L (n - 1) dL + \left(\int_L dL - \int_S dS \right) \equiv \Delta\sigma_1 + \delta\sigma \quad (2)$$

其中 σ 是它们之间的光学距离； L 是描述光程的几何曲线； S 是在真空中的光程曲线，也就是源和接收机之间的直线几何距离。上式右边第二项就是大气折射延迟中的光线弯曲改正。定义大气折射率差： $N = 10^6(n - 1)$ ，(2) 式中右边第一项可以写成：

$$\Delta\sigma_1 = 10^{-6} \int_L N dL \quad (3)$$

它是我们大气折射延迟研究的主项。

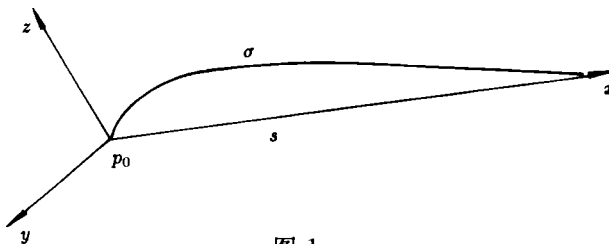


图 1

2.2 Smith-Weintraub 方程

大气折射率差方程的研究可以追溯到本世纪早期 Debye^[14] 的工作。而更详细的描述可以从文献 [15,16,17] 中得到。

气体分子的大气折射率差 N 包括了随 P/T 变化的感生偶极项和随 P/T^2 而变化的永久偶极矩两种; 其中 P 是大气压, T 是绝对温度。地球大气的主要组成成份 O_2 和 N_2 没有永久偶极矩。但是如 H_2O , CO_2 和其他少量组成成份具有永久偶极矩, 这样大气折射率差方程可以一般地写成:

$$N = \frac{k_1 P_D}{T z_D} + \frac{k_2 P_V}{T z_V} + \frac{k_3 P_V}{T^2 z_V} \quad (4)$$

其中: P_D 、 P_V 分别是大气中干大气压和水汽分压; k_1 、 k_2 、 k_3 是常数; z_D 和 z_V 分别是干大气和水汽的可压缩性系数, 它们是因为地球大气不是标准理想气体而引入的。在一般大气条件下, 它们与常数 1 的偏离小于 10^{-3} 。 z_D 和 z_V 的数值可从方程^[18]:

$$z_D^{-1} = 1 + P_D \left[57.90 \times 10^{-8} \left(1 + \frac{0.52}{T} \right) - 9.4611 \times 10^{-4} \frac{T - 273}{T^2} \right] \quad (5)$$

$$\text{和} \quad z_V^{-1} = 1 + 1650 \frac{P_V}{T^3} [1 - 0.001317(T - 273) + 1.75 \times 10^{-4}(T - 273)^2 + 1.44 \times 10^{-6}(T - 273)^3] \quad (6)$$

给出, 其中 P_V 、 P_D 的单位用 mbar; T 用绝对温度 K。忽略 (5) 和 (6) 中的一阶小量, 即是把地球大气看成理想气体, (4) 式可以写成:

$$N = 77.6 \frac{P_D}{T} + 64.8 \frac{P_V}{T} + 3.776 \times 10^{-5} \frac{P_V}{T^2} \quad (7)$$

当温度取为约 280K, 上式的后面两项可以合并为一项, 那么我们就得到著名的 Smith-Weintraub 方程^[19]:

$$N = \frac{77.6}{T} \left(P + 4810 \frac{P_V}{T} \right) \quad (8)$$

习惯上, 我们把上式右边第一项称为干项, 第二项为湿项。在频率低于 100GHz 时, 上式的误差小于 1%。而更加精确的大气折射率差频率修正将在以后专门章节中讨论。由于频率修正效应, 在光学波段的大气折射公式中, 我们只需要考虑 (7) 式右边前面两感生偶极项。利用理想气体方程, (8) 式容易化成大气总密度 ρ 和水汽密度 ρ_v 的函数:

$$N = 2.70 \times 10^4 \rho + 1720 \frac{\rho_v}{T} \quad (9)$$

其中 ρ 、 ρ_v 的单位是 $g \cdot m^{-3}$ 。

3 大气模型

由于真实地球大气分布的复杂性, 大气折射延迟的研究变得更为困难。用一些简化的规范大气模型去研究大气折射, 是大气折射改正研究的第一步。

3.1 指数大气模型

首先假设地球大气的压力随高度的变化满足流体静力学方程:

$$\frac{dP}{dh} = -\rho g \quad (10)$$

其中 P 是大气压力; h 是高度坐标; ρ 是大气密度; g 是在 h 高度的重力加速度, 这里我们取为常数。假设大气层是等温静态, 那么由理想气体方程, 我们有方程 (10) 的解:

$$\frac{P}{P_0} = e^{-\frac{g}{R_A T}(h-h_0)} \quad (11)$$

其中 R_A 是大气气体常数 $R_A = \frac{R}{M_0}$, M_0 是大气摩尔质量, R 是气体普适常数。利用 Smith-Weintraub 方程, 我们可以把指数大气模型写成^[20,4]:

$$N(h) = N_0 e^{-\frac{h-h_0}{H}} \quad (12)$$

其中 h_0 是测站高度; N_0 是 $h = h_0$ 时大气折射率差值; 常数 $H = \frac{R_A T}{g}$ 称为大气层有效高度, 并且有:

$$H = \frac{1}{N_0} \int_{h_0}^{\infty} N(h) dh \quad (13)$$

关于指数大气模型下推出的大气折射公式可以参考文献 [21,22,23]。而 N_0 、 H 的典型值可以取为:

$$N_0 = 0.0003; \quad H = 7972.5\text{m} \quad (14)$$

尽管指数大气模型和真实大气有较大的偏离, 但是它的数学上的简洁和完整为大气折射的深入研究带来形式上的基础。我们认为它是大气折射改正理论研究的必经之路。

3.2 Hopfield 大气规范模型

在 Hopfield 大气模型中^[5-7], 大气层仅分成对流层和电离层两层。在对流层中, 大气温度下降率假设成一个常数 β ; 根据观测资料 $\beta \approx +6.5^\circ\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$ (这里我们保留 β 为正值), 那么温度的垂直分布可以写成:

$$T(h) = T_0 - \beta h \quad (15)$$

其中 T_0 是 $h = 0$ 处地面温度。从方程 (10)、(15) 和理想气体方程, 我们求得积分:

$$P = P_0 \left(\frac{T_0 - \beta h}{T_0} \right)^{\frac{g}{\beta R_A}} \quad (16)$$

定义参数:

$$\mu = \frac{g}{\beta R_A} - 1 \quad (17)$$

Hopfield 把 (16) 式代入 Smith Weintraub 方程, 再假设对干、湿两项都取 $\mu = 4$ 的大气规范形式, 得到大气折射率差的分布:

$$N(h) = 77.6 \frac{P_0}{T_0} \left(\frac{H_T - h}{H_T - h_0} \right)^4 + 3.73 \times 10^5 \frac{e_0}{T_0^2} \left(\frac{H_W - h}{H_W - h_0} \right)^4 \quad (18)$$

其中 h_0 是测站高度; e_0 是地面湿分压; P_0 、 T_0 是测站地面气压和绝对温度; 而对流层顶高度取为:

$$H_T = 10136\text{m} + 148.72\text{m}/^\circ\text{C} \cdot T'_0 \quad (19)$$

$$H_W = 11000\text{m} \quad (20)$$

其中地面温度 T'_0 取摄氏单位。在 Hopfield 大气模型下, 天顶大气折射延迟 (zenith delay) $\Delta\sigma_z$ 可以从 (18) 式沿高度 h 的积分中求得。在 Hopfield 模型下, 非零天顶距大气折射积分的近似公式可以从文献 [24] 中给出。

3.3 Saastamoinen 模型和标准大气模型

实践证明, Hopfield 大气模型和实际大气的观测结果相差还是比较大。而 Saastamoinen 大气模型 [8] 可以认为对目前使用的标准大气模型 [25] 的一种简化。

Saastamoinen 模型中, 把地球大气分成三层: 对流层是从地面到 10km 左右高度处的对流层顶, 其气体温度假设为 $6.5^\circ\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$ 下降率; 第二层是从对流层顶到 70km 左右的平流层, 其中大气温度假设成常数; 70km 以外是电离层。

Saastamoinen 的另一主要贡献是: 他把大气折射积分的被积函数按天顶距三角函数进行展开, 然后用他的大气规范进行逐项积分而求得大气折射延迟的公式:

$$\Delta\sigma = 0.002277 \sec z_0 \left[P_0 + \left(\frac{1255}{T_0} + 0.05 \right) e_0 - B \tan^2 z_0 \right] w(\varphi, H) + \delta_g \quad (21)$$

其中 B 、 δ_g 为两个表列值; 地球自转所引起重力加速度变化的修正项为:

$$w(\varphi, H) = 1 + 0.0026 \cos 2\varphi + 0.00028H \quad (22)$$

而 φ 是测站地理纬度、 $H(\text{km})$ 为测站高度、 z_0 是视天顶距、 $P_0(\text{mbar})$ 为地面压力、 $T_0(\text{K})$ 是地面温度、 $e_0(\text{mbar})$ 为地面水汽分压。

CIA2.2 模型采用的标准大气模型是在 Saastamoinen 模型上加上水汽的贡献 [9]。它比 Allen [25] 的标准大气简单得多。

4 映射函数和天顶大气折射

4.1 Snell 定律

从观测目标到接收站之间的光学距离 σ 可以写成 (图 2):

$$\sigma = \int_{r_0}^{r_1} \frac{n}{\sin \theta} dr \tag{23}$$

其中 r_0 是测站地心距、 r_1 是中性大气层顶的地心距、 θ 为信号路径上任意一点处的视高度角。在球对称分层分布的介质中, Snell 定律写成 [13]:

$$nr \cos \theta = n_0 r_0 \cos \theta_0 = \text{const.} \tag{24}$$

其中 n_0 、 r_0 、 θ_0 是在测站上的相应值。那么大气折射延迟改正 (2) 式可以写成:

$$\Delta\sigma = 10^{-6} \int_{r_0}^{r_1} \frac{nrNdr}{\sqrt{n^2r^2 - (n_0r_0 \cos \theta_0)^2}} \tag{25}$$

其忽略部分 $\delta\sigma$ 是光线弯曲改正。上式就是大气折射延迟改正积分, 其中大气折射率差函数 N 或大气折射率函数 n 可以来自于大气规范模型或者是实测值。

4.2 Marini 公式

在一般条件下, 对于任意视高度角 θ_0 , (25) 式是一个不可积函数; 必须寻找一些近似方法去拟合 (25) 式的结果。

Saastamiinen 在导出 (21) 式时利用了被积函数的级数展开方法。结果证明: 他的展开式不仅在较低观测角时包含若干个表列参数, 这对使用者带来不便; 而且更为重要的是它的公式仅适用于大于 10° 的观测截止角, 这一点使它的公式不能满足目前新技术的低高度角观测纲要。

当 $\theta_0 = 90^\circ$ 时, 信号从天顶方向到达接收机, 这时我们有:

$$\Delta\sigma(z = 0^\circ) = 10^{-6} \int_{h_0}^{h_1} N dh \equiv \Delta\sigma_z \tag{26}$$

我们已定义 $\Delta\sigma_z$ 为天顶大气折射延迟 [10], 在一定大气模型下, 上式可以是可积函数。

考虑到 (26) 式中天顶大气折射延迟 $\Delta\sigma_z$ 可能和地面气象观测资料相联系, Marini 把大气折射延迟改正 (25) 式在形式上写成 [10]:

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_z(P_0, T_0, c_0) \cdot m(z_0, \mathbf{P}) \tag{27}$$

其中 $m(z_0, \mathbf{P})$ 称为映射函数 [9], 而 \mathbf{P} 是可能引入的气象资料等物理参数。Marini 首先给出一种常参数连分式形式的映射函数:

$$m(z_0) = \frac{1}{\cos z_0 + \frac{a_1}{\cos z_0 + \frac{a_2}{\cos z_0 + \frac{a_3}{\cos z_0 + a_4}}}} \tag{28}$$

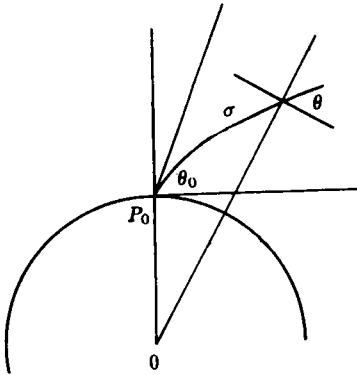


图 2

其中 a_1, a_2, a_3, a_4 为待定常数。为了保证映射函数在 $z_0 = 0$ 时 $m(0) = 1$, Chao^[26] 引入只有两项的连分式形式, 而其中第二项用 $\cot z_0$ 代替 $\cos z_0$ 。Chao^[27] 又进一步讨论了干湿两项分开的连分式映射函数。

4.3 CfA2.2 模型

CfA2.2 模型^[9] 在本质上是在 Marini, Chao 等人工作上的改进。它的特点是在映射函数的待定参数中考虑了气象等物理因素的影响, 它采用的标准大气模型参考 Allen^[25] 的模型值。他们声称, CfA2.2 模型精度在 5° 高度角时好于 5cm。CfA2.2 模型把连分式 (28) 式只取前三项, 并把第二项 $\cos z_0$ 改写成 $\cot z_0$, 参数化的待定常数取成:

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= 0.001185 [1 + 0.6071 \times 10^{-4}(P_0 - 1000) - 0.1471 \times 10^{-3}e_0 \\ &\quad + 0.3072 \times 10^{-2}(T'_0 - 20) + 0.01965(-\beta + 6.5) \\ &\quad - 0.5645 \times 10^{-2}(H_T - 11.231)] \\ a_2 &= 0.001144 [1 + 0.1164 \times 10^{-4}(P_0 - 1000) + 0.2795 \times 10^{-3}e_0 \\ &\quad + 0.3109 \times 10^{-2}(T'_0 - 20) + 0.03038(-\beta + 6.5) \\ &\quad - 0.01217(H_T - 11.231)] \\ a_3 &= -0.0090 \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

而 P_0 , e_0 用 mbar; T'_0 用 $^\circ\text{C}$; β 用 $\text{K} \cdot \text{km}^{-1}$; H_T 用 km 为单位。

4.4 光线弯曲改正

在第二节第 (2) 式中, 我们把大气折射延迟表示成沿光程的线积分与光线弯曲项之和。我们在前几节主要讨论主项 $\Delta\sigma_1$ 的计算, 而光线弯曲改正由于它的量级小在文献中较少讨论。文献 [28] 详细地讨论了有限距离目标的光线弯曲改正。他们的改正公式很容易推广到无限远距离的目标。在 Hopfield 模型近似下, 光线弯曲改正可以写成:

$$\delta\sigma = \delta S_1 + \delta S_2 \quad (30)$$

$$\text{其中:} \quad \delta S_1 \approx 1.24 \times 10^{-10} \left(\frac{\tan z_0 P_0}{T_0} \right)^2 R_1 \frac{R_2}{R_2 + R_1} \quad (31)$$

$$\delta S_2 \approx 2.21 \times 10^{-10} \left(\frac{\tan z_0 P_0}{T_0} \right)^2 R_1 \quad (32)$$

z_0 是信号视天顶距; P_0 (mbar)、 T_0 (K) 是测站气压和温度; 而

$$R_1 \approx [r_T^2 - (r_0 \sin z_0)^2]^{1/2} - r_0 \cos z_0 \quad (33)$$

$$R_2 \approx [r_S^2 - (r_0 \sin z_0)^2]^{1/2} - [r_T^2 - (r_0 \sin z_0)^2]^{1/2} \quad (34)$$

r_0 、 r_T 、 r_S 分别是测站、对流层顶、信号源的地心距。

5 大气折射保形理论

Moritz^[14] 发表了一种计算大气折射延迟的保形理论。Brunner 等人^[29] 把它应用到一些观测改正上。

按 Moritz-Brunner 公式, 大气折射延迟可以表示成沿着联结源和接收机的弦上积分加上一项改正项 (图 1):

$$\Delta\sigma = \int_{\text{chord}} \mu(x) dx - \frac{1}{2} \int_{\text{chord}} \frac{A_2^2 + A_3^2}{x^2} dx \equiv I_1 + I_{ac} \quad (35)$$

$$\text{其中} \quad \mu(x) = n(x) - 1 \quad (36)$$

$$A_2^2 + A_3^2 = \left(\int_{0, \text{chord}}^x \frac{\partial \mu}{\partial z} \xi d\xi \right)^2 + \left(\int_{0, \text{chord}}^x \frac{\partial \mu}{\partial y} \xi d\xi \right)^2 \quad (37)$$

(35) 式右边第二项被称为摄动项 (perturbation term), 在这一项中已经包含了 (2) 式中的光线弯曲改正 $\delta\sigma$ 。数值积分证明: (35) 式的精度在 5° 高度角时好于 1cm。

不同于其他方法中采用的沿着信号路径积分方法, 保形理论中采用沿着弦积分的办法, 这样做实质上是避开了解 Snell 定律的困难。这无疑是比较直观的, 而且在数学上隐含着简单性。在实践中, 真天顶距 (或真高度角) 可以比视天顶距 (或视高度角) 更方便地求得。(35) 式的精度可以满足我们现有观测技术的要求。

保形理论的进一步的发展可能打开对流层大气折射研究的新领域。

6 新观测技术中的大气折射延迟

从 60 年代开始, 陆续问世的新空间观测技术 VLBI、SLR、GPS 等, 有它们不同的观测特点, 因此在大气折射延迟的模型上也有不同之处。

6.1 VLBI

单基线 VLBI 观测中, 位于基线两端的台站都受到大气延迟效应的影响, 产生的附加时延值 τ_t 为^[30,31,32]:

$$\tau_t = \tau_{t, \text{station1}} - \tau_{t, \text{station2}} \quad (38)$$

在每个台站附近, 大气都假设为同心球对称分布; 在此基础上把大气分成干、湿两种结构成分, 分别考虑对观测带来的影响。

在 VLBI 中, 干、湿两部分大气折射延迟通常简单地表示成天顶大气折射延迟和映射函数的积, 后者与高度角 E 相关:

$$\tau_t(E) = \tau_{\text{dry}}^{\text{zenith}} m_{\text{dry}}(E) + \tau_{\text{wet}}^{\text{zenith}} m_{\text{wet}}(E) \quad (39)$$

上式中的湿分量在高精度 VLBI 观测中, 有时可用水汽辐射计 (WVR) 直接测定^[3,33]。

在天文 / 测地 VLBI 数据处理过程中, 台站的天顶大气延迟是作为一个待测量, 与其他待测参数一起从平差解得。天顶大气折射的初值可以从某个大气规范模型给出, 而

Saastamoinen 模型是常选模型之一。在 1984 年以前, Marini 的连分式和 Chao^[34] 的模型是映射函数的常选形式。1984 年以后采用了 Lanyi 的映射函数和 CfA2.2 映射函数。它们在 6° 高度角时符合在 1—2cm 数量级。

为了快速处理大批量 VLBI 观测数据, 减少运算量和数据存储, 目前运用卡尔曼滤波的方法对 VLBI 观测数据进行动态处理, 来拟合大气延迟改正项, 效果亦很好^[1]。

6.2 SLR

卫星激光测距技术使用的频率高于 VLBI 和 GPS, 它工作在可见光波段, 因此必须考虑色散效应。频率相关的相折射率差 N 可以写成^[35,36] :

$$N = \left(287.604 + \frac{1.6288}{\lambda^2} + \frac{0.0136}{\lambda^4} \right) \left(\frac{273.15}{1013.25} \right) \frac{P}{T} - (0.055)(760) \left(\frac{273.15}{1013.25} \right) \frac{e}{T} \quad (40)$$

其中 λ 的单位取 μm 。而群折射率差 N_g 可以写成:

$$N_g = N - \lambda \frac{dN}{d\lambda} = 80.343f(\lambda) \frac{P}{T} - 11.3 \frac{e}{T} \quad (41)$$

$$\text{其中} \quad f(\lambda) = 0.9650 + 0.0164/\lambda^2 + 0.000228/\lambda^4 \quad (42)$$

考虑重力加速度的地球纬度 φ 和测站高度的变化, 所采用的 SLR 大气时延公式为:

$$\Delta R = \frac{f(\lambda)}{F(\varphi, H)} \frac{A + B}{\sin E + \frac{B/(A+B)}{\sin E + 0.01}} \quad (43)$$

$$\text{其中:} \quad A = 0.002357P_0 + 0.000141e_0 \quad (44)$$

$$F(\varphi, H) = 1.0026 \cos 2\varphi - 0.00031H \quad (45)$$

$$B = (1.084 \times 10^{-8})P_0T_0k + (4.7343 \times 10^{-8}) \frac{P_0^2}{T_0^2} \frac{2}{(3 - \frac{1}{k})} \quad (46)$$

$$k = 1.163 - 0.00968 \cos 2\varphi - 0.00104T_0 + 0.00001435P_0 \quad (47)$$

而参数: $\Delta R(\text{m})$ 是时延的测距修正; E 为真高度角; $P_0(\text{mbar})$ 地面气压; T_0 地面绝对温度; $e_0(\text{mbar})$ 地面水分压, 利用 Magnus 公式, 它可以写成:

$$e_0 = \frac{R_h}{100} \times 6.11 \times 10^{\frac{7.5(T_0 - 273.15)}{237.3 + (T_0 - 273.15)}} \quad (48)$$

而 $R_h(\%)$ 为相对湿度。

6.3 GPS

全球定位系统是在 80 年代出现的空间测量技术。它的工作频率在 1575.42MHz 和 1227.6MHz。由于 GPS 可以用于大地测量、地球物理等不同的研究方向, 因此所使用的大气折射模型也可以随观测纲要变化而不同。

在 CA 码伪距测量和几十公里以内的短基线大地网平差中, 高度截止角一般取 15°; 我们可以用简单的 $1/\sin E$ 映射函数和常参数天顶延迟。在几百到几千公里的长基线网

或全球网平差中, 类似 VLBI 技术, 测站的天顶延迟作为一个未知量参加平差; 它的初值往往来自 Saastamoinen 大气模型或常参数形式。在通常 15° 截止角纲要中, 映射函数取 CFA2.2 或 Saastamoinen 或 Chao 模型; 它们对结果影响很小。其基本方法和 6.1 节相同。

我们需要指出的是: 大气折射的湿分量虽然只占整个延迟量的 10% 左右, 但它的误差却大于干分量, 这成为大气折射讨论的重要方向之一。

参 考 文 献

- [1] Herring T A, Davis J L, Shapiro I I. JGR, 1990, B8: 12561
- [2] Davis J L, Herring T A, Shapiro I I. JGR, 1991, 96: 643
- [3] Elgered G, Davis J L, Herring T A *et al.* JGR, 1991, 96: 6541
- [4] IERS Annual Report For 1993. Observatoire de Paris, 1994
- [5] Hopfield H S. JGR, 1969, 71: 4487
- [6] Hopfield H S. Radio Sci., 1971, 6: 357
- [7] Hopfield H S. Applied Phys. Lab. Report CP015. Baltimore, Maryland: Johns Hopkins University, 1972
- [8] Saastamoinen J. Bull. Geod., 1972-1973, 105-107: 279, 383, 13
- [9] Davis J L, Herring T A, Shapiro I I *et al.* Radio Sci., 1985, 20: 1593
- [10] Marini J W. Radio Sci., 1972, 7: 223
- [11] Moritz H. Proc. of inter. symp. figure of the Earth and refraction, Vienna, 1967. [s. 1]: [s. n.], 323
- [12] Hotine M. Mathematical geodesy. Environmental Science Services Administration Monograph 2. Washington, D.C.: [s.n.], 1969. 209
- [13] Green R M. Spherical astronomy. Cambridge: Cambridge University Press, 1985. 87
- [14] Debye P. Polar molecules. New York: Dover, 1929
- [15] Bean B R, Dutton E J. Radio meteorology. National Bureau of Standards Monograph 92. Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office, 1966
- [16] Thayer G D. Radio Sci., 1974, 9: 803
- [17] Hill R J, Lawrence R S, Priestley J T. Radio Sci., 1982, 17: 1251
- [18] Owens J C. Appl. Opt., 1967, 6: 51
- [19] Smith E K Jr, Weintraub S. Proc. IRE, 1953, 41: 1035
- [20] Davis J L. Tech. Rep. 1986. AFGL-TR-86-0243. AFGL, Hanscom AFB, Mass.
- [21] Thayer G D. J. Res. NBS, Radio Propagat., 1961, 65D(2)
- [22] Freeman J J. J. Res. NBS, Radio Propagat., 1962, 66D(6)
- [23] Rowlandson L G, Moldt R G. Radio Sci., 1969, 4: 927
- [24] Black H D. JGR, 1978, 83: 1825
- [25] Allen C W. Astrophysical Quantities, 3d ed. [s. 1]: The Athlone Press, 1973
- [26] Chao C C. Tech. Memo, Calif. Inst. Technol. JPL, 1972, 391-350, 17
- [27] Chao C C. JPL Tech. Report, 1972, 32-1526, Vol. XIV, Pasadena, California: JPL, 33
- [28] Yan Haojian, Sauermann K, Groten E. In: 6th International geodetic symposium on satellite positioning, March, 1992, Columbus: The Ohio State University, Vol. I, 291
- [29] Brunner F K, Gu M. Manuscripta Geodactica, 1991, 16: 205
- [30] Moran J M. In: Felli M, Spencer R E eds. Very long baseline interferometry: techniques and applications. Dordrecht: [s. n.], 1989. 27
- [31] Moran J M. In: Felli M, Spencer R E eds. Very long baseline interferometry: techniques and applications. Dordrecht: [s. n.], 1989. 47

- [32] Sovers O J. Observation model and parameter partials for the JPL VLBI parameter estimation software "MODEST" 1991, NASA. JPL, 49-53, 1991
- [33] Resch G M, Miller R B. In: Brunner F K ed. Geodetic aspects of electromagnetic wave propagation through the atmosphere. Berlin: Springer Verlag, 1983
- [34] Chao C Ç. JPL Tech. Report, 1974. 32-1587. Pasadena, California: JPL. 61
- [35] Marini J W, Murray C W. NASA Tech. Rep. 1973, X-591-73-351
- [36] Gardner C S, Rowlett J R. RRL Pub., 1976, No.477, Urbana, Illinois: University Illinois

(责任编辑 刘金铭)

On the Corrections of Tropospheric Refractive Delay (I): The Classical Theories

Yan Haojian

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

Abstract

The basic concepts and research methods of the corrections of tropospheric refractive delay are summarized in this paper. For different accuracy requirements and different cut-off angles of various space techniques, the calculation processes of tropospheric refraction delays are also briefly reviewed.

Key words: atmospheric refraction—astrometry