

IERS 1996 规范中 地球引力势模型和测量模型的改进

萧 耐 园 夏 一 飞

(南京大学天文系 南京 210093)

摘 要

简要而系统地介绍 IERS 1996 规范采用的地球引力势模型和各种测量模型,着重叙述了其于 IERS 1992 标准相比所作的改进。规范用 JGM—3 地球引力势模型取代 GEM—T3 模型,在计算地球潮汐形变产生的附加势时展开到 3 阶,并考虑了地幔的滞弹效应。在测站位移的计算中,规范引入了 3 阶洛夫数,计及地幔的滞弹性,引入了计算冰后期回弹的 ICE-4G 模型,列出了改正 VLBI 观测中天线形变改正的公式。关于地球自转和极移中的潮汐变化,规范列出了周日和半日潮的带形部分。关于对流层折射和延迟,规范引入了 3 个新的映射函数模型。关于太阳的反射辐射压,规范增加了 T3 模型。这些模型能适合于精度为 1mm 的计算要求。但其中某些模型还有待进一步优化。

关键词 国际地球自转服务 — 地球引力势 — 测量模型

分类号: P183

我们已在另一篇文章^[1]中介绍了 IERS 1996 规范的内涵及其在参考系方面的改进。为确定国际天球参考架 (ICRF)、国际地球参考架 (ITRF),为测定地球定向参数 (EOP) 或从事其他相关的测量,都必须对河外射电源或人造卫星、恒星或太阳系天体进行观测,并对观测结果进行归算。在为上述目的所作的归算中必须应用相应的物理模型,包括:地球引力势,由于日月引潮力、地球自转变化、地表负荷等因素引起的测站位移,由于日月引潮力引起的地球自转变化,光线和无线电波在大气中传播产生折射和延迟以及太阳光对人造卫星产生的辐射压等。

本文拟对上述各种模型作简明而系统的介绍,并着重叙述 IERS 1996 规范 (以下简称 96 规范) 相对于 IERS 1992 标准 (以下简称 92 标准) 在各种模型方面所引入的主要改进。引入这些改进后,观测结果按照 96 规范归算的精度可达 1mm 量级,而 92 标准只能保证到 5mm 量级。

1 地球引力势模型

1.1 主要模型参数

96 规范推荐使用 JGM—3 模型^[2] 描述地球引力场, 以取代 92 标准所使用的 GEM—T3 模型^[3]。这两个模型依据的两个基本常数: 地心引力常数 GM_{\oplus} 和地球赤道半径 R_e 是不同的, 所包含的展开式项数 (即按球谐函数展开达到的阶次和级次) 也不同。

此外, IERS 实现的地球参考架与 IERS 参考极 (IRP) 不符合, 这是由于 ITRF 的极点是平均形状极, 它与 IRP 有偏差。形状极的位置由地球引力势展开式中的二阶一级田谐系数 C_{21} 和 S_{21} 决定。IERS 根据上述偏差计算归一化系数 \bar{C}_{21} 和 \bar{S}_{21} 。96 规范对于 92 标准, 给出了改进的数值 (见表 1) 无论用 92 标准或 96 规范, 对于计算 Lageos 卫星的星历表都只需要展开到 $n = 20, m = 20$ 。

表 1 96 规范和 92 标准中的地球引力势参数

参 数	92 标 准	96 规 范
模型	GEM—T3	JGM—3
地心引力常数 $GM_{\oplus}/m^3 \cdot s^{-2}$	$3.98600436 \times 10^{14}$	$3.986004415 \times 10^{14}$
地球赤道半径 R_e/m	6378137	6378136.3
\bar{C}_{21} (IERS)	-0.17×10^{-9}	-0.187×10^{-9}
\bar{S}_{21} (IERS)	1.19×10^{-9}	1.195×10^{-9}
展开式的阶和级	$n = 50, m = 50$	$n = 70, m = 70$

1.2 固体潮效应

月球和太阳的引潮力作用在弹性地球上产生固体潮, 与之相应的地球形变导致地球引力势的变化, 这种变化可以用对地球引力势展开式的系数 C_{nm} 和 S_{nm} 的改正 ΔC_{nm} 和 ΔS_{nm} 来模拟^[4]。为求这些改正, 92 标准和 96 规范都分两步计算。

第一步, 用与频率无关的洛夫数 k 的标称值, 根据月球和太阳历表在时间域上计算潮汐势。92 标准计算至 $n = 2$, 而 96 规范计算至 $n = 3$ 。它们均采用了相同的计算公式:

$$\Delta \bar{C}_{nm} - i \Delta \bar{S}_{nm} = \frac{k_{nm}}{2n+1} \sum_{j=2}^3 \frac{GM_j}{GM_{\oplus}} \left(\frac{R_e}{r_j} \right)^{n+1} \bar{P}_{nm}(\sin \Phi_j) e^{-im\lambda_j} \quad (1)$$

式中 k_{nm} 为 n 阶 m 级的洛夫数标称值; 对于 92 标准 $n = 0, 1, 2; m = 0$; 对于 96 规范 $n = 1, 2, 3; m = 0, 1, 2, 3$ 。 R_e 为地球赤道半径; GM_{\oplus} 为地心引力常数; GM_j 为月心引力常数 ($j = 2$) 和日心引力常数 ($j = 3$); r_j 为地心至月心或日心的距离。 \bar{P}_{nm} 为规格化的 n 阶 m 级缔合勒让德函数, Φ_j 和 λ_j 为月球和太阳的星下点纬度和经度。此外, 96 规范还进一步计算了二阶潮对 4 阶系数的影响^[5], 公式如下:

$$\Delta \bar{C}_{4m} - i \Delta \bar{S}_{4m} = \frac{k_{2m}^{(+)}}{5} \sum_{j=2}^3 \frac{GM_j}{GM_{\oplus}} \left(\frac{R_e}{r_j} \right)^3 \bar{P}_{2m}(\sin \Phi_j) e^{-im\lambda_j} \quad (m = 0, 1, 2) \quad (2)$$

可见此式与 (1) 式相同, 只是在右端取 $n = 2$ 并以 $k_{2m}^{(+)}$ 代替 k_{nm} 。

96 规范对于 92 标准在这一步中的重要改进是考虑了地幔的滞弹效应, 式 (1) 的 k_{nm} 的标称值可取复数值, 而式 (2) 的 $k_{2m}^{(+)}$ 对滞弹地球的取值与对弹性地球的取值不同 (见表 2)。

表 2 96 规范采用的洛夫数的标称值

n	m	弹性地球		滞弹地球		
		k_{nm}	$k_{nm}^{(+)}$	$R_e k_{nm}$	$I_m k_{nm}$	$k_{nm}^{(+)}$
2	0	0.29525	-0.00087	0.30190	-0.00000	-0.00089
2	1	0.29470	-0.00079	0.29830	-0.00144	-0.00080
2	2	0.29801	-0.00057	0.30102	-0.00130	-0.00057
3	0	0.093				
3	1	0.093				
3	2	0.093				
3	3	0.094				

92 标准则取洛夫数标称值 $k_2 = 0.30$ 。

第二步, 事实上洛夫数与频率相关, 因此要对第一步中把 k 取常数的结果加以改正。其中尤以田谐潮 (周日潮) 波段 $(nm) = (2\ 1)$ 与近周日自由摆动产生共振, 而有很强的频率相关性。设 k_f 为依赖于频率 f 的洛夫数, 它与标称值 k_{2m} 的差 $\delta k_f = k_f - k_{2m}$, 且 δk_f^R 和 δk_f^I 为其实部和虚部。对于田谐潮和扇谐潮 96 规范和 92 标准都用如下的公式求改正:

$$\Delta \bar{C}_{2m} - i \Delta \bar{S}_{2m} = \eta_m \sum_{f(2,m)} (A_m \delta k_f H_f) e^{i\theta_f} \quad (m = 1, 2) \quad (3)$$

其中, $A_m = \frac{(-1)^m}{R_e \sqrt{8\pi}} = (-1)^m (3.1274 \times 10^{-8})$ (单位: m^{-1} , $m \neq 0$); $\eta_1 = -i$, $\eta_2 = -1$, H_f 为频率为 f 的分潮波的杜德森展开式的振幅 (单位: m)。

96 规范要求对 26 个田谐分潮波作改正, 且对于弹性地幔和滞弹地幔分别给出了不同的 δk_f 值。而 92 标准仅要求对其中的 6 个作改正。至于扇谐潮 $(nm) = (2\ 2)$, 96 规范和 92 标准都只要求对两个分潮波作改正。

在 96 规范中对于带谐潮 $(nm) = (2\ 0)$ 给出如下的改正公式:

$$\Delta \bar{C}_{20} = R_e \sum_{f(2,0)} (A_0 \delta k_f H_f e^{i\theta_f}) = \sum_{f(2,0)} A_0 H_f (\delta k_f^R \cos \theta_f - \delta k_f^I \sin \theta_f) \quad (4)$$

以对 21 个带谐分潮波作改正。而 92 标准无此项改正 (零频潮除外, 见下一小节)。

1.3 永久潮的处理

二阶带谐引潮力势的 (时间) 平均值不等于零, 这一永久潮汐势 (也称零频潮) 产生不随时间变化的永久形变, 它包含在地球的静态形状中, 因此也反映在地球引力势展开式的 \bar{C}_{20} 中, 那么这一零频成分就应从 (1) 式中扣除。96 规范和 92 标准都按 $(\Delta \bar{C}_{20}) = A_0 H_0 k_{20}$ 计算了这项改正。其参数取值及计算结果的差异示于表 3。

表 3 92 标准和 96 规范对于永久潮处理的比较

参数和结果	92 标 准	96 规 范	
	弹性地球	弹性地球	滞弹地球
A_0	4.4228×10^{-8}	4.4228×10^{-8}	
H_0	-0.31455	-0.31460	
k_{20}	0.30	0.29525	0.30190
$(\Delta \bar{C}_{20})$	-4.1736×10^{-9}	-4.108×10^{-9}	-4.201×10^{-9}

1.4 固体极潮效应

固体极潮是由于瞬时自转轴的极移造成自转离心力的变化, 从而引起地球形变, 产生形变附加势。设瞬时极的坐标为 (x_p, y_p) , 自转离心力势的变化为:

$$\Delta V = -(\Omega^2 R_e^2 / 2) \sin 2\varphi (x_p \cos \lambda - y_p \sin \lambda) \tag{6}$$

式中 Ω 为地球自转平均角速度, (φ, λ) 为地面点的纬度和经度。由此计算对 C_{21} 和 S_{21} 的改正列于表 4。

表 4 由于固体极潮引起的对 C_{21} 和 S_{21} 的改正

改正	92 标 准	96 规 范	
	弹性地球	弹性地球	滞弹地球
$\Delta \bar{C}_{21}$	$-1.3 \times 10^{-9}(x_p)$	$-1.290 \times 10^{-9}(x_p)$	$-1.348 \times 10^{-9}(x_p + 0.0112y_p)$
$\Delta \bar{S}_{21}$	$1.3 \times 10^{-9}(y_p)$	$1.290 \times 10^{-9}(y_p)$	$1.348 \times 10^{-9}(y_p - 0.0112x_p)$

1.5 海潮效应

海潮引起的周期性负荷变化也产生地球的形变附加势, 所用公式为

$$\Delta \bar{C}_{nm} - i\Delta \bar{S}_{nm} = F_{nm} \sum_{s(n,m)} \sum_{+} (C_{snm}^{\pm} \mp iS_{snm}^{\pm}) e^{\pm i\theta_f} \tag{7}$$

其中 $F_{nm} = \frac{4\pi G \rho_w}{g} \sqrt{\frac{(n+m)!}{(n-m)!(2n+1)(2-\delta_{om})}} \left(\frac{1+k'_n}{2n+1}\right)$, k'_n 为负荷洛夫数, 96 规范和 92 标准都取相同的阶数和数值: $k'_2 = -0.3075$, $k'_3 = -0.195$, $k'_4 = -0.132$, $k'_5 = -0.1032$, $k'_6 = 0.0892$; C_{snm}^{\pm} , S_{snm}^{\pm} 为第 s 个分潮波的 m 级海潮系数; θ_f 为第 s 个分潮波的辐角。 ρ_w 为海水密度, 取 $\rho_w = 1025 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。关于 (7) 式中有关系数值及所采用的海潮模型列于表 5。

表 5 海潮负荷参数及所采用的海潮模型

参数和模型	92 标 准	96 规 范
赤道平均重力 $g/\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	9.798261	9.780327
引力常数 $G/\text{m} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$	6.673×10^{-11}	6.67259×10^{-11}
海潮模型	Schwiderski [6]	CSR3.0 [7]

注: CSR3.0 海洋潮高模型是用 TOPEX/POSEIDON 卫星测高仪的资料求得的。

2 测站位移

地球的负荷形变、潮汐形变和自转形变都会造成地面测站的位移。至于负荷形变,规定零形变的参考点是固体地球和负荷质量的联合质心,而测站附着于固体地球上。这一规定意味着固体地球的刚性平移与负荷质量的质心运动相抵销,因而不包含在测站位移模型中^[8]。

2.1 海潮负荷效应

由海潮负荷引起的测站位移按以下方式计算:令 Δc 为在某一地点(纬度为 φ , 经度为 λ) 和时间 t 的位移(径向、西向和南向)的分量,引潮力势为^[9]:

$$W = g \sum_j K_j P_2^{m_j}(\cos \varphi) \cos(\omega_j t + \chi_j + m_j \lambda) \quad (8)$$

这里只取二阶调和展开式。 ω_j 为第 j 个分潮波的角速度, K_j 为其振幅, χ_j 为 $t = 0^h$ 的天文辐角, $(m_j) = (0 \ 1 \ 2)$ 分别表示带谐、田谐和扇谐潮波。又有^[10]

$$\Delta c = \sum_j a_{cj} \cos(\omega_j t + \chi_j - \varphi_{cj}), \quad (9)$$

其中

$$\begin{aligned} a_{cj} \cos \varphi_{cj} &= K_j \left[\frac{A_{ck} \cos \Phi_{ck}}{K_k} (1-p) + \frac{A_{c,k+1} \cos \Phi_{c,k+1}}{K_{k+1}} p \right], \\ a_{cj} \sin \varphi_{cj} &= K_j \left[\frac{A_{ck} \sin \Phi_{ck}}{K_k} (1-p) + \frac{A_{c,k+1} \sin \Phi_{c,k+1}}{K_{k+1}} p \right], \end{aligned}$$

IERS 为全球的观测台站给出了用于计算每一分量的 Δc 的振幅 A_{ck} 和位相 Φ_{ck} , 其中 $k = 1, \dots, 11$, 依次对应于扇谐(半日)波 M_2, S_2, N_2, K_2 , 田谐(周日)波 K_1, O_1, P_1, Q_1 和带谐(长周期)波 M_f, M_m, S_{sa} 。96 规范与 92 标准相比,仅在个别值上有少许改变。但 IERS 正准备用 TOPEX/POSEIDON 卫星测高的资料来改进上列结果。

2.2 固体潮效应

(nm) 阶和级球谐潮产生地面点位移,其径向分量用相应阶和级的洛夫数 h_{nm} 计算,其水平分量用志田数 l_{nm} 计算。这些数的有效值与测站纬度和潮汐频率有关。这种相关性来源于地球扁率、自转和地幔的滞弹性。92 标准和 96 规范都考虑了这些相关性,但后者的考虑要深入细致得多。两者都分两步计算。

第一步,用洛夫数和志田数的标称值计算,即不考虑它们的频率相关性。

(1) 计算二阶潮引起的位移。

92 标准和 96 规范都用下式计算测站的位移矢量 $\Delta \mathbf{r}$:

$$\Delta \mathbf{r} = \sum_{j=2}^3 \frac{GM_j R_c^4}{GM_\oplus R_j^3} \left\{ h_2 \mathbf{r} \left(\frac{3}{2} (\mathbf{R}_j \cdot \mathbf{r})^2 - \frac{1}{2} \right) + 3l_2 (\mathbf{R}_j \cdot \mathbf{r}) [\mathbf{R}_j - (\mathbf{R}_j \cdot \mathbf{r}) \mathbf{r}] \right\} \quad (10)$$

式中 \mathbf{R}_j 和 R_j 为地心至月球或太阳的单位矢量和此矢量的大小; \mathbf{r} 和 r 为地心至测站的单位矢量和此矢量的大小。

96 规范提出(10)式中的洛夫数和志田数可以代以与纬度有关的相应值,如 $h_2 = h^{(0)} + h^{(2)}[(3/2) \sin \varphi - 1/2]$, 对 l_2 也有类似的式子,有 $h^{(0)} = 0.6026$, $l^{(0)} = 0.0831$, (对于滞弹地球

为 $h^{(0)} = 0.6078$, $l^{(0)} = 0.0847$, $h^{(2)} = -0.0006$, $l^{(2)} = 0.0002$ 。这一效应很小, 在径向和水平向的影响分别不超过 0.4mm 和 0.2mm。

96 规范还要求作以下 (2) ~ (4) 项计算, 为 92 标准所无。

(2) 计算三阶潮引起的位移。

用三阶洛夫数和志田数的标称值 h_3 和 l_3 , 按下式计算测站位移矢量 $\Delta \mathbf{r}$:

$$\Delta \mathbf{r} = \sum_{j=2}^3 \frac{GM_j R_e^5}{GM_\oplus R_j^4} \left\{ h_3 \mathbf{r} \left(\frac{5}{2} (\mathbf{R}_j \cdot \mathbf{r})^3 - \frac{3}{2} (\mathbf{R}_j \cdot \mathbf{r}) \right) + l_3 \left(\frac{15}{2} (\mathbf{R}_j \cdot \mathbf{r})^2 - \frac{3}{2} \right) [\mathbf{R}_j - (\mathbf{R}_j \cdot \mathbf{r}) \mathbf{r}] \right\} \quad (11)$$

此式只需应用于月球 ($j = 2$), 由此算得的径向位移可达 1.7mm, 但水平位移不超过 0.2mm。式中取 $h_3 = 0.292$, $l_3 = 0.015$ 。

(3) 计算由于 $l^{(1)}$ 项引起的横向位移。

这一项也起因于志田数与纬度的相关性, 只产生对水平位移的改正, 其滞弹效应可忽略, 且在带谐潮波段不起作用。周日潮和半日潮通过这一效应产生的水平位移分别可达 0.8mm 和 1.0mm。令 (Φ_j, λ_j) 为月球或太阳的星下点地心纬度和经度, 相应的笛卡尔坐标为 (X_j, Y_j, Z_j) , 则有:

$$P_2^0(\sin \Phi_j) = \frac{1}{R_j^2} \left(\frac{3}{2} Z_j^2 - \frac{1}{2} R_j^2 \right)$$

$$P_2^1(\sin \Phi_j) \cos \lambda_j = \frac{3X_j Z_j}{R_j^2}, \quad P_2^1(\sin \Phi_j) \sin \lambda_j = \frac{3Y_j Z_j}{R_j^2}$$

$$P_2^2(\sin \Phi_j) \cos 2\lambda_j = \frac{3}{R_j^2} (X_j^2 - Y_j^2), \quad P_2^2(\sin \Phi_j) \sin 2\lambda_j = \frac{6}{R_j^2} (X_j Y_j)$$

周日潮产生横向位移 δt 的贡献为 ($l^{(1)} = 0.0012$):

$$\delta t_1 = -l^{(1)} \sin \varphi \sum_{j=2}^3 \frac{GM_j R_e^4}{GM_\oplus R_j^3} P_2^2(\sin \Phi_j) [\sin \varphi \cos(\lambda - \lambda_j) \mathbf{n} - \cos 2\varphi \sin(\lambda - \lambda_j) \mathbf{e}] \quad (12)$$

由半日潮产生横向位移 δt 的贡献为 ($l^{(1)} = 0.0024$):

$$\delta t_2 = -\frac{l^{(1)}}{2} \sin \varphi \cos \varphi \sum_{j=2}^3 \frac{GM_j R_e^4}{GM_\oplus R_j^3} P_2^2(\sin \Phi_j) [\cos 2(\lambda - \lambda_j) \mathbf{n} + \sin \varphi \sin 2(\lambda - \lambda_j) \mathbf{e}] \quad (13)$$

其中 \mathbf{n} 和 \mathbf{e} 分别为在站心坐标系中向北和向东的单位矢量。

(4) 计算由于 $h_{2m}^{(0)}$ 和 $l_{2m}^{(0)}$ 的虚部产生的异相项。

当计及地幔滞弹性时, 在二阶洛夫数和志田数中要引入虚部 h^I 和 l^I 。由周日潮产生的径向和横向位移 δr 和 δt 为 ($h^I = -0.0025$, $l^I = -0.0007$):

$$\delta r = -\frac{3}{4} h^I \sum_{j=2}^3 \frac{GM_j R_e^4}{GM_\oplus R_j^3} \sin 2\Phi_j \sin 2\varphi \sin(\lambda - \lambda_j) \quad (14a)$$

$$\delta t = \frac{3}{2} l^I \sum_{j=2}^3 \frac{GM_j R_e^4}{GM_\oplus R_j^3} \sin 2\Phi_j [\cos 2\varphi \sin(\lambda - \lambda_j) \mathbf{n} + \sin \varphi \cos(\lambda - \lambda_j) \mathbf{e}] \quad (14b)$$

由半日潮产生的贡献为 ($h^I = -0.0022, l^I = -0.0007$):

$$\delta r = -\frac{3}{4}h^I \sum_{j=2}^3 \frac{GM_j R_e^4}{GM_\oplus R_j^3} \cos^2 \Phi_j \sin^2 \varphi \sin 2(\lambda - \lambda_j) \quad (15a)$$

$$\delta t = -\frac{3}{4}l^I \sum_{j=2}^3 \frac{GM_j R_e^4}{GM_\oplus R_j^3} \cos^2 \Phi_j [\sin 2\varphi \sin 2(\lambda - \lambda_j)\mathbf{n} - 2 \cos \varphi \cos 2(\lambda - \lambda_j)\mathbf{e}] \quad (15b)$$

第二步, 对洛夫数和志田数作标称值以外的改正。

(1) 洛夫数和志田数的频率相关改正。

92 标准和 96 规范都用下式计算周日潮引起的径向位移改正 δr 和横向位移改正 δt :

$$\delta r = \delta R_f \sin 2\varphi \sin(\theta_f + \lambda) \quad (16a)$$

$$\delta t = \delta T_f [\sin \varphi \cos(\theta_f + \lambda)\mathbf{e} + \cos 2\varphi \sin(\theta_f + \lambda)\mathbf{n}] \quad (16b)$$

其中 $\delta R_f = -\frac{3}{2}\sqrt{\frac{5}{24\pi}}\delta h_f H_f$, $\delta T_f = -3\sqrt{\frac{5}{24\pi}}\delta l_f H_f$, δh_f 为频率 f 上的 $h^{(0)}$ 与标称值 h_2 之差, δl_f 为频率 f 上的 $l^{(0)}$ 与标称值 l_2 之差。

92 标准只对田谐潮中的 K_1 分潮波求了此项改正。96 规范列出 11 个田谐分潮波, 给出弹性地幔和滞弹地幔的两套参数, 当单个分潮波的贡献达到 0.05mm 时即予考虑。

96 规范还考虑到带谐潮产生的贡献, 计及地幔的滞弹性, 包括正相项 (ip) 和异相项 (op), 计算公式如下:

$$\delta r = \left(\frac{3}{2} \sin^2 \varphi - \frac{1}{2}\right) (\delta R_f^{(ip)} \cos \theta_f + \delta R_f^{(op)} \sin \theta_f) \quad (17a)$$

$$\delta t = \sin 2\varphi (\delta T_f^{(ip)} \cos \theta_f + \delta T_f^{(op)} \sin \theta_f)\mathbf{n} \quad (17b)$$

其中:

$$\delta R_f^{(ip)} = \sqrt{\frac{5}{4\pi}}\delta h_f^R H_f, \quad \delta R_f^{(op)} = -\sqrt{\frac{5}{4\pi}}\delta h_f^I H_f,$$

$$\delta T_f^{(ip)} = \frac{3}{2}\sqrt{\frac{5}{4\pi}}\delta l_f^R H_f, \quad \delta T_f^{(op)} = -\frac{3}{2}\sqrt{\frac{5}{4\pi}}\delta l_f^I H_f,$$

96 规范列出 5 个带谐分潮波, 给出弹性地幔和滞弹地幔的两套参数。

(2) 永久形变。

由二阶带谐潮产生的永久形变必须在按 (10) 式计算的测站位移中扣除。

永久形变引起的径向位移 (单位: m) 按下式计算:

$$\sqrt{\frac{5}{4\pi}}(0.6026)(-0.31460) \left(\frac{3}{2} \sin^2 \varphi - \frac{1}{2}\right) = -0.1196 \left(\frac{3}{2} \sin^2 \varphi - \frac{1}{2}\right) \quad (18a)$$

永久形变引起的横向位移 (北向分量, 单位: m) 按下式计算:

$$\sqrt{\frac{5}{4\pi}}(0.0831)(-0.31460)3 \cos \varphi \sin \varphi = -0.0247 \sin 2\varphi \quad (18b)$$

2.3 由于极移引起的自转形变效应

由于极移导致地球自转离心力势的变化 ΔV (如 (6) 式所示), 由此引起地球形变而产生测站位移。设位移的径向分量为 S_r , 水平分量为 S_θ (向南) 和 S_λ (向东), 它们可通过洛夫数 h 和志田数 l 计算^[11]:

$$S_r = h_2 \frac{\Delta V}{g}, \quad S_\theta = \frac{l_2}{g} \frac{\partial}{\partial \theta} \Delta V, \quad S_\lambda = \frac{l_2}{g} \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \lambda} \Delta V. \quad (19)$$

92 标准和 96 规范使用相同的公式计算这一效应。

2.4 大气负荷

大气质量的全球分布随时间的变化对地球施加负荷并使其表面形变。92 标准和 96 规范用相同的方法^[12], 求这项位移改正。求径向位移 Δr (单位: mm) 的公式为

$$\Delta r = -0.35p - 0.55\bar{p} \quad (20)$$

其中 \bar{p} 是相对于标准大气压 (1013 毫巴) 的局部气压反常, \bar{p} 是以测站为中心 2000 km 半径的圆形区域内的平均气压反常。

求 \bar{p} 可用以下方法: 设测站周围的气压分布为

$$p(x, y) = A_0 + A_1x + A_2y + A_3x^2 + A_4xy + A_5y^2, \quad (21)$$

其中 x 和 y 是气压分布点在以测站为中心的两维平面坐标中的两个 (向东和向北) 坐标。则平均气压反常可由积分求得:

$$\bar{p} = \frac{\iint_C p(x, y) dx dy}{\iint_C dx dy} = A_0 + (A_3 + A_5)R^2/4,$$

其中 $R^2 = (x^2 + y^2)$, C 为圆形区域边界。

不过, 96 规范用扩展的回归方程改进 (21) 式, 还给出局部气压变化与理论的径向表面位移之间的关系。

2.5 冰后期回弹

地球在经历了最近一次冰河期以来, 冰复盖层消融。地壳由于地球的滞弹性质, 在大面积冰盖负荷卸除后, 缓慢反弹, 导致测站位置的长期变化。92 标准并未列出这一效应; 96 规范引入 ICE-4G 模型^[13], 并以文件形式给出全球许多地点的径向和水平位移。

2.6 天线形变改正

VLBI 观测中的天线因环境温度变化而形变, 96 规范列出了改正公式:

令 V 为天线高度, A 为轴补偿, 它们随温度 T 的变化为

$$dV = KV(T - T_0), \quad dA = K'A(T - T_0) \quad (22)$$

其中 K 和 K' 为常数, 它们的典型值为 10^{-6} 量级; T_0 为一参考温度。92 标准未介绍统一的改正公式。

3 地球自转中的潮汐变化

日月引潮力作用于地球, 导致地球转动惯量变化, 引起地球自转速率和日长的变化。IERS 给出了求这些改正的公式并以表格形式列出这些公式中的系数值。

92 标准和 96 规范都给出了相同的两个表。第一表包含不同周期 $p(5.6d < p < 35d)$ 的短周期带谐潮效应项, 共 41 项, 给出下列公式的系数值^[14], 只列出正相项。

$$UT1 - UT1R = \sum_{i=1}^{41} A_i \sin \xi_i \quad (23a)$$

$$\Delta - \Delta R = \sum_{i=1}^{41} A'_i \cos \xi_i \quad (23b)$$

$$\omega - \omega R = \sum_{i=1}^{41} A''_i \cos \xi_i \quad (23c)$$

$$\xi_i = \sum_{j=1}^5 \alpha_{ij} a_j$$

式中 UT1R、 ΔR 和 ωR 分别为不受固体潮影响的世界时、日长和自转速率; a_j 为描述潮汐变化的第 j 个德洛内变量 (l, l', F, D, Ω); α_{ij} 为整数因子, 它与相应的德洛内变量相乘决定了第 i 个分潮波的变化。

第二表包含 $5.6yr < p < 18.6yr$ 的 62 项, 包含了海潮的影响^[15], 同时计及正相项和异相项, 给出下列公式的系数值:

$$UT1 - UT1S = \sum_{i=1}^{62} (B_i \sin \xi_i + C_i \cos \xi_i) \quad (24a)$$

$$\Delta - \Delta S = \sum_{i=1}^{62} (B'_i \cos \xi_i + C'_i \sin \xi_i) \quad (24b)$$

$$\omega - \omega S = \sum_{i=1}^{62} (B''_i \cos \xi_i + C''_i \sin \xi_i) \quad (24c)$$

式中 UT1S、 ΔS 和 ωS 分别为不受固体潮和海潮影响的世界时, 日长和自转速率。

96 规范又给出计算因周日潮 (Q_1, Q_1, P_1, K_1) 半日潮 (N_2, M_2, S_2, K_2) 的带形部分产生的自转速率和极移的周日变化和半日变化的改正公式, 分两表列出下列公式的系数值。对于自转:

$$UT1 - UT1D = \sum_{i=1}^8 (D_i \sin \xi_i + E_i \cos \xi_i) \quad (25a)$$

$$\Delta - \Delta D = \sum_{i=1}^8 (D'_i \cos \xi_i + E'_i \sin \xi_i) \quad (25b)$$

$$\omega - \omega D = \sum_{i=1}^8 (D_i'' \cos \xi_i + E_i'' \sin \xi_i) \quad (25c)$$

$$\xi_i = \sum_{j=1}^6 c_{ij} \gamma_j + \varphi_i$$

式中 UT1D, ΔD 和 ωD 分别为不受所述潮汐影响的世界时、日长和自转速率; γ_j 为 5 个德洛内变量和 θ , θ 为以 d 为单位的小时数; c_{ij} 是整数因子。

极移的改正公式为:

$$xD - x = \sum_{i=1}^8 (F_i \sin \xi_i + G_i \cos \xi_i), \quad (26a)$$

$$yD - y = \sum_{i=1}^8 (H_i \sin \xi_i + K_i \cos \xi_i), \quad (26b)$$

式中 xD 和 yD 为不受所述潮汐影响的地板坐标。

4 对流层折射和延迟模型

在 SLR 技术中的光线以及 VLBI、GPS 和 DORIS 技术中无线电波在经过大气的对流层时会产生折射和延迟。这两类效应以不同的模型求得改正。

4.1 光线折射改正

92 标准和 96 规范都用相同的改正公式^[16], 单次测距的改正值为 ΔR (单位: m):

$$\Delta R = \frac{f(\lambda)}{f(\varphi, H)} \cdot \frac{A + B}{\sin E + \frac{B/(A+B)}{\sin E + 0.01}} \quad (27)$$

其中 $A = 0.002357P_0 + 0.000141e_0$; $B = (1.084 \times 10^{-8})P_0 T_0 K + (4.734 \times 10^{-8}) \frac{P_0^2}{T_0} \frac{2}{(3-1/K)}$; $K = 1.163 - 0.00968 \cos 2\varphi - 0.00104T_0 + 0.00001435P_0$; E 为卫星的真高度; P_0 为测站处的大气压(单位: mbar); T_0 为测站处的气温(单位: K); e_0 为测站处的水汽压(单位: mbar); $f(\lambda)$ 为激光频率函数; $f(\varphi, H)$ 为测站位置函数。 e_0 可由相对湿度 $R_h(\%)$ 算得; $f(\lambda)$ 可由激光波长 λ 算得, $f(\varphi, H)$ 可由测站纬度 φ 和大地高度 H (单位: km) 算得; 公式如下:

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

$$f(\lambda) \equiv 0.9650 + \frac{0.0164}{\lambda^2} + \frac{0.000228}{\lambda^4}$$

$$f(\varphi, H) = 1 - 0.0026 \cos 2\varphi - 0.00031H,$$

4.2 无线电波延迟改正

92 标准引入了 11 个对流层模型, 其中最新的一个是 1988 年发表的^[17]。96 规范介绍了三个新的映射函数模型: Ifadis(1986)^[18], 适用于高度角 $h = 2^\circ$; Herring(1992, MTT)^[19] 和

Niell(1996,NMF)^[20], 适用于 $h = 3^\circ$ 。各对流层数学模型之间的差异, 常常小于因为气温分量等的不确定而产生的误差。因此习惯上只分析测地资料以估计天顶大气延迟, 并只模拟映射函数, 它们是不同的给定高度角上的延迟与天顶延迟的比值。

5 太阳的反射辐射压模型

92 标准和 96 规范用同样的公式计算太阳光线照射在一颗近地卫星上所产生的辐射压, 其加速度表示如下式:

$$\ddot{\mathbf{r}} = \kappa \left[\frac{A}{R} \right]^2 C_R \frac{a}{m} \frac{\mathbf{R}}{R}, \quad (28)$$

式中 $\kappa = 4.560 \times 10^{-6} \text{N} \cdot \text{m}^{-2}$; A 为以 m 为单位表示的天文单位距离; \mathbf{R} 为至卫星的日心半径矢量; a 为垂直于 R 的卫星截面积; m 为卫星质量; C_R 为反射系数。

至于应用于全球定位系统 (GPS) 的模型, 92 标准和 96 规范对 Block I 和 II A 卫星用 T10 模型, 对 Block II 卫星用 T20 模型^[21]。于 1997 年 1 月起用 Block II R 卫星代替 Block II 和 II A 卫星, 96 规范将对之用 T30 模型^[22]。这些模型以太阳方向和卫星 +Z 轴的夹 B 为函数给出太阳光压力的整个标称值的 X 和 Z 分量。对于 Block I、II 和 II A, $0^\circ < B < 180^\circ$, 但对于 Block II R, $0^\circ < B < 360^\circ$ (在下列公式中 B 用弧度表示, X 和 Z 的单位是 10^{-5}N)。

对于 T10 的模型公式为 (92 标准和 96 规范):

$$\begin{aligned} X &= -4.55 \sin B + 0.08 \sin(2B + 0.9) - 0.06 \cos(4B + 0.08) + 0.08, \\ Z &= -4.54 \cos B + 0.20 \sin(2B - 0.3) - 0.03 \sin 4B. \end{aligned} \quad (29a)$$

对于 T20 的模型公式为 (96 规范):

$$\begin{aligned} X &= -8.96 \sin B + 0.16 \sin 3B + 0.10 \sin 5B - 0.07 \sin 7B, \\ Z &= -8.43 \cos B. \end{aligned} \quad (29b)$$

对于 T30 的模型公式为 (96 规范):

$$\begin{aligned} X &= -11.0 \sin B - 0.2 \sin 3B + 0.2 \sin 5B, \\ Z &= -11.3 \cos B + 0.1 \cos 3B + 0.2 \cos 5B. \end{aligned}$$

6 小 结

与 IERS 1992 标准相比, IERS 1996 规范在地球引力势和各种测量归算模型方面的主要改进有:

(1) 用 JGM-3 引力势模型取代 GEM-T3, 在计算各种地球形变效应对引力势的改正时, 考虑了更多的分潮波并计及地幔的滞弹性。各主要参数的精度大致提高一个量级。

(2) 在计算测站位移时, 考虑了地幔的滞弹性, 洛夫数采用复数, 在计算公式里既有正相项, 也有异相项, 计算了更多的分潮波和更高阶的潮汐效应, 并新考虑了诸如冰后期回弹等效应。计算位移的精度达到 1mm 。

(3) 关于潮汐与自转, 考虑了周日和半日潮的带形部分对速率和极移的影响。

(4) 关于无线电波的对流层延迟模型, 引入了三个适用于高度角 $2^\circ \sim 3^\circ$ 的新的映射函数模型。

(5) 关于太阳光压对人造卫星的作用, 就 GPS 卫星引入了一个新的模型 T30。

96 规范与 92 标准相比, 在许多方面作了改进, 使得 96 规范中的模型能适合于精度为 1mm 的计算要求。但是仍存在一定的不足。例如海潮负荷效应, 还有待于进一步积累观测资料加以优化。而且随着观测精度的提高和理论的发展, 必将一方面对模型提出更高的要求, 另一方面使各种模型得到不断改善。

参 考 文 献

- 1 夏一飞, 萧耐园. 天文学进展, 见本期: 104
- 2 Tapley B D et al. The JGM-3 Gravity Model, submitted to J. Geophys. Res.
- 3 Lerch F et al. NASA Technical Memorandum 104555, [s.l.]: NASA Goddard Space Flight Center, 1992
- 4 Eanes R J et al. Earth and Ocean Tide Effects on Lageos and Starlette, Proceedings of the Ninth International Symposium on Earth Tides, E.Sckweizerbazt'sche Verlagabuchhandlung, Strttgart, 1983
- 5 Wahr J M. Geophys. J. R. Astron. Soc., 1981, 64: 705
- 6 Schwiderski E. Atlas of Ocean Tidal charts and Maps, Part I: The Semidiurnal Principal Lunar Tide M2, Marine Geodesy, 1983, 6: 219
- 7 Eanes R J, Bettadpur S V, The CSR 3.0 global ocean tide model, [s.l.]: [s.n.], 1996
- 8 Farrell W E. Rev. Geophys Space phys., 1972, 10: 761
- 9 Tamura Y. Bull. d'Inform. Marees Terr., 1987, 99: 6813
- 10 Scherneck H G. Geophys. J. Int., 1991, 106: 677
- 11 Munk W H, Mac Donald G J F. The Rotation of the Earth, Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1960: 24~25
- 12 Rabbel W, Schuh H. J. Geophys., 1986, 59: 164
- 13 Peltier W R. Science, 1994, 265: 195
- 14 Yoder C F et al., J. Geophys. Res., 1981, 86: 881
- 15 Dickman S R. Geophys. J. Int., 1993, 112: 448
- 16 Marini J W, Murray C W. Correction of Laser Range Tracking Data for Atmospheric Refraction at Elevation Above 10 Degrees, NASA GSFC X-591-73-351, 1973
- 17 Baby H B et al. Radio Sci., 1988, 23, (6) 1023
- 18 Ifadis I I. The Atmospheric Delay of Radio Waves: Modeling the Elev ation Dependance on a Global Scale, Technical Report No. 38L, Goteburg: Chalmers U. of Technology Goteburg, Sweden, 1986
- 19 Herring T A. Proceedings of Refraction of Transatmospheric Signals in Geodesy, Netherlands Geodetic Commission Series 36, The Hague, Netherlands, [s.l.]: [s.n.], 1992: 157
- 20 Niell A E. J. Geophys. Res., 1996, 101: 3227
- 21 Gallini T E, Fliegel H F. Aerospace Report No. TOR-95(5743)-2, The Aerospace Corporation, El Segundo, CA, 1995
- 22 Fliegel H F, Gallini T E. J. of Space Craft and Rockets, 1996, in press

Improvements of the Geopotential and Measurement Models in the IERS 1996 Conventions

Xiao Naiyuan Xia Yifei

(Department of Astronomy, Nanjing University, Nanjing 210093)

Abstract

The Geopotential and Measurement Models adopted by IERS 1996 Conventions are briefly and systematically presented, and the major improvements relative to IERS 1992 Standards are described. In the Conventions the geopotential model JGM-3 is applied instead of GEM-T3. The geopotential is developed up to degree 3 and the visco-elastic effect of the earth mantle is taken account in calculating tidal deformation. In the calculation of site displacement, 3-degree Love numbers are introduced, the viscosity of the earth mantle is considered, the ICE-4G model of postglacial rebound is applied, and the formulae of removing antenna deformation in VLBI observations are given. For the tidal variations in the earth's rotation and polar motion, diurnal and subdiurnal zonal tide terms are considered in the Conventions. For the refraction and delay in the troposphere, three new mapping functions are given by the Conventions. For the solar radiation pressure reflectance, the T3 model is introduced. All these models are used to guarantee a precision of 1 mm. But some of them need to be improved further.

Key words International Earth Rotation Service(IERS)—geopotential—measurement model