

LAMBDA 方法在计算 GPS 信号斜路径水汽含量中的应用

黄善琪^{1†} 王解先^{1,4} 王小亚² 陈俊平³

(1 同济大学测量与国土信息系 上海 200092)

(2 中国科学院上海天文台 上海 200030)

(3 Geo Forschungs Zentrum Postdam Postdam Germany 14473)

(4 现代工程测量国家测绘局重点实验室 上海 200092)

摘要 随着 GPS 数据处理技术的提高以及计算精度的提高, GPS 在大气科学中的应用日益广泛. 在 GPS 气象学研究中, 斜路径水汽含量 (SWV) 是一个有重要意义的参数. 针对宋淑丽等在 2004 年提出的一种应用精密星历、IGS 钟差、和经过周跳处理的 LC 组合观测值直接计算 SWV 的方法存在实时性较差的问题, 在处理模糊度搜索的问题上应用了目前城市虚拟参考站 (VRS) 上应用较为成熟的 LAMBDA 方法. 经过数据试算, 验证方法可行, 计算结果投影到天顶方向有较好的一致性, 此方法得到的垂直方向大气延迟 (ZTD) 与 GAMIT, BERNESE 的结果比较, 与 BERNESE 结果的符合精度一般小于 1.5cm, 与 GAMIT 结果的符合精度一般小于 10cm.

关键词 地球, 大气效应

中图分类号: P 135; **文献标识码:** A

1 引言

地基 GPS 气象学有着建设成本低, 数据量大, 可全天候工作等优点, 目前已成为 GPS 气象学研究的最主要手段^[1-4]. 在地基 GPS 气象学中, 目前计算 SWV 的方法主要是从 GPS 数据处理的后拟合残差中得到的双差中分离出非差数据的方法, 该方法的主要缺点是双差分离出单差然后再分离出非差需要的两个前提假设的合理性有待验证, 还有这两次分离会把 GPS 数据处理的其他误差传递到 SWV 值中. 另一种方法是采用非差处理直接估计站钟差和卫星钟差, 利用 L1 波段相位观测值来计算 SWV, 该方法不能去除电离层误差的影响^[3]. 目前, IGS 组织每天公布高精度的星历、卫星钟差、IGS 长期跟踪站的精确坐标和站钟差, 使得 GPS 观测中很多参数可以精确的模型化. 在这样的背景下, 在 2004, 宋淑丽等^[5]提出了利用经过周跳探测和修复后的 L1, L2 波段的 LC 组合来计算 SWV 值的新方法, 该方法不受电离层影响, 且可以应用于单站. 这个方法的主要的技术难点在于整周模糊度的确定. 该方法采用的经过周跳探测和修复的相位观测值一般

2008-01-28 收到原稿, 2008-05-04 收到修改稿

† koumeat286@163.com

由 GAMIT 等软件计算得到, 经处理后的数据一般整周数很小, 所以可以采用模型固定其他参数, 然后计算模糊度的方法确定 LC 组合模糊度. 如果对实时性要求较高将很难得到经过周跳探测和修复的相位观测值, 确定模糊度也不能用上述方法. 本文对文 [3,5] 提出的方法进行改进, 采用可实时得到的 RINEX 文件直接处理, 为了得到精确的整周模糊度我们采用了在城市虚拟参考站系统 (VRS/COORS) 基准站数据处理中比较成熟的 LAMBDA 方法.

2 计算模型

LC 组合可以很好的去除电离层延迟, 但是会使得整周模糊度失去整周特性, 简单的处理方法是采用伪距精码 (P 码) 平滑相位计算模糊度, 取一段时间计算得到的模糊度的平均值做为这段时间内观测值的模糊度. 本文首先介绍 LAMBDA 方法. 使用 LAMBDA 方法分别求出 L1, L2 波段的整周模糊度, 然后再经线性变换为 LC 组合的模糊度. 为了简单起见只对 IGS 跟踪站进行计算, 计算数据主要采用了 IGS 公布的各种精密星历、精密卫星钟差和测站钟差, IGS 公布的测站当天坐标以及 MIT 服务器公布的各种地球物理参数, 包括跳秒、海潮、固体潮、海潮等数据文件.

2.1 LAMBDA 方法原理

准确求取整周模糊度是 GPS 相位解算的关键技术. 在 1994, Teunissen^[6] 提出了 LAMBDA 方法, 后来经过许多学者的不断完善^[7], 现在已经被广泛应用.

LAMBDA 方法中使用双差观测值求解整周模糊度. GPS 相位双差观测值可以消除大多数 GPS 观测误差, 包括电离层延迟、对流层延迟、GPS 钟差和接收机钟差等, 只留下测站位置信息和双差整周模糊度信息. 设 GPS 双差观测方程为:

$$y = Bb + Aa + e, \quad (1)$$

其中 b 为包含测站位置信息的参数向量, B 为其系数矩阵; a 为包含整周模糊度的参数向量, A 为其系数矩阵, e 为其他误差项.

用最小二乘求解得到:

$$\begin{pmatrix} b \\ a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B^T Q_y^{-1} B & B^T Q_y^{-1} A \\ A^T Q_y^{-1} B & A^T Q_y^{-1} A \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B^T Q_y^{-1} y \\ A^T Q_y^{-1} y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q_b & Q_{ab} \\ Q_{ba} & Q_a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B^T Q_y^{-1} y \\ A^T Q_y^{-1} y \end{pmatrix}, \quad (2)$$

经过迭代即得到 a 的浮点解 \hat{a} 和其协方差矩阵 $Q_{\hat{a}}$, 即为 LAMBDA 方法的输入参数.

LAMBDA 算法的核心是整周模糊度最小二乘估计, 由两个重要的部分组成: 整数变换和整周搜索. 整数变换也称为 Z 变换, 它的作用是降低各个整周模糊度之间的相关性, 以提高整周搜索的效率. 设 Z 变换的变换矩阵为 Z, 则:

$$\hat{a} = Z \times \hat{a}, \quad Q_{\hat{a}} = Z^T Q_{\hat{a}} Z, \quad (3)$$

这里关键问题是如何确定转换矩阵 Z, 文 [8] 对 Z 矩阵的求法进行了详细的说明.

整周变换并不是 LAMBDA 方法的不可或缺的部分, 不经过 Z 变换我们仍然可以进行整周搜索. 搜索模糊度 a 是以最小二乘为基准, 即求满足 $\min \|\hat{a} - a\|_{Q_{\hat{a}}}^2$ 的 \hat{a} , 其中 a 为真值. 上式等价于为:

$$(\hat{a} - a)^T Q_{\hat{a}}^{-1} (\hat{a} - a) \leq \chi^2, \quad (4)$$

式中, χ 为一小量, 定义为 \hat{a} 的搜索空间, χ 的选择将决定计算速度的快慢, 但一般不会影响到求解的结果. 对 $Q_{\hat{a}}$ 进行乔列斯基 (Cholesky) 分解, $Q_{\hat{a}} = L^T D L$, 其中 L 为下三角阵, D 为对角阵, 则 (4) 式变为:

$$\sum_{i=1}^n d_i \left[(a_i - \hat{a}_i) + \sum_{j=i+1}^n l_{ji} (a_j - \hat{a}_j) \right]^2 \leq \chi^2, \quad (5)$$

LAMBDA 方法采用依次确定 \hat{a}_i 的方法, 首先确定 \hat{a}_{i+1} 的值, 然后再搜索 \hat{a}_i , 最终确定所有的模糊度值, 经一系列数学计算得到下式:

$$\hat{a}_i - \sqrt{\text{right}_i} - \sum_{j=i+1}^n l_{ji} (a_j - \hat{a}_j) \leq a_i \leq \hat{a}_i + \sqrt{\text{right}_i} - \sum_{j=i+1}^n l_{ji} (a_j - \hat{a}_j), \quad (6)$$

其中

$$\begin{aligned} \text{right}_i = \frac{d_{i+1}}{d_i} \left\{ \left(\frac{\chi^2}{d_{i+1}} - \frac{1}{d_{i+1}} \sum_{l=i+2}^n d_l \left[(a_l - \hat{a}_l) + \sum_{j=l+1}^n l_{jl} (a_j - \hat{a}_j) \right]^2 \right) \right. \\ \left. - \left[(a_{i+1} - \hat{a}_{i+1}) + \sum_{j=i+2}^n l_{j,i+1} (a_j - \hat{a}_j) \right]^2 \right\}. \end{aligned}$$

如果 χ 取得合适, (6) 式可以确定一个只有 1 到 3 个整数的搜索空间, LAMBDA 方法确定一个整数 a_{i+1} , 然后在这个整数的基础上搜索下一个模糊度 a_i 的值. 当不能确定 a_i 时再回去修改 a_{i+1} , 依此类推, 最后确定一个整周模糊度向量.

2.2 LAMBDA 方法使用技巧

在 (1) 式中, 对于一段基线, b 包含了两个测站的三维坐标共六个参数, a 中包含 $2 \times n$ 个整周模糊度参数, 其中 n 为两个测站在同一历元共同观测到的卫星个数, 因此求解参数个数为 $6 + 2 \times n$ 个, 而我们在该历元可以构成的互相独立的双差观测值是 $n-1$ 个. 显然, 如果只有一个历元的数据构成的误差方程的法方程秩亏. 我们假设在连续几个历元之内没有周跳、没有新的卫星升起、没有卫星落下, 设连续计算的历元数为 m , 为了误差方程不秩亏, 我们要求:

$$m \times (n - 1) > 6 + 2n \quad (7)$$

下表给出了 m 值不同时, 要求的 n 的最小值:

表 1 计算的历元数对应的最小需要卫星数

Table 1 Minimum number n of satellites for the calculated epoch

No.	m	n
1	1	NEF
2	2	NEF
3	3	9
4	4	5
5	5	4

显然, 在 (7) 中, 至少需要三个历元的数据才可以保证法方程不秩亏, 但考虑到一般情况下, 只能保证每个历元观测卫星个数不少于 4 颗, 因此我们选择连续计算五个历元的数据求解整周模糊度浮点解及其协方差矩阵. 在实际使用中, 当累计历元数达五个时开始求解, 以后随着下一个历元数据进入, 将其与上四个历元的数据联合进行模糊度求解, 即相当于以五个历元组成的框体在观测数据里推进解算模糊度值, 我们把五个历元定义为一次求解过程. 最初的几分钟之内, 求解得到的整周模糊度值一般跳跃很大, 即卫星为失锁状态, 此时, 一个求解过程得到的结果不能作为下一个求解过程结果的初值来进行下一个求解过程的计算, 即每个求解过程是独立的.

对一个测站而言, 当某一颗卫星的在连续五个求解过程得到的整周模糊度的值都一样时, 可以确认该卫星的模糊度固定, 则这个固定的整周模糊度的值可以作为下一个求解过程的该卫星的初值来进行下一个求解过程. 当测站和某一颗卫星对应的整周模糊度固定后就可以使用得到的结果进行对应的大气延迟的计算. 在计算的过程中, 若某颗卫星升起, 也一并计算其模糊度, 但是其结果与前面求到的固定解向量分离, 即不作为初值参加下一个历元进入后的结算, 只有当升起的卫星模糊度解固定后才加入固定解向量中作为下一个历元进入后的初值参加解算. 考虑到观测过程中有出现周跳的可能, 我们采用文 [9] 中提到的双差再差的方法对周跳进行探测, 如果发现第 i 颗卫星出现周跳, 则出现周跳的历元之后的几个历元采用新的模糊度值, 相当于 a 向量多出一个参数, 系数阵也要做相应的调整. 如果一颗卫星在很少的几个历元之内连续出现周跳则其模糊度离开固定解向量, 做前面提到的卫星升起时相同的处理. 需要指出的是, 由于高度角低于 10 度的卫星观测噪声和大气的影晌比较大, 模糊度固定的结果不好, 而且三维层析等应用中大多也不处理低高度角的大气, 所以本文对高度角低于 10 度的卫星不做处理.

2.3 利用 LC 组合计算 SWV 的模型

GPS 两个频率的相位观测方程为:

$$(N_1 + \Phi_1) \lambda_1 = \left| \vec{r} - \vec{R} \right| + d_{\text{trop}} + \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} d_{\text{ion}} + c(\Delta t - \Delta T) + \varepsilon_{\text{tide}} + \varepsilon_{\text{pressure}} + \varepsilon_{\text{phaseCenter}} + \dots, \quad (8)$$

$$(N_2 + \Phi_2) \lambda_2 = \left| \vec{r} - \vec{R} \right| + d_{\text{trop}} + \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} d_{\text{ion}} + c(\Delta t - \Delta T) + \varepsilon_{\text{tide}} + \varepsilon_{\text{pressure}} + \varepsilon_{\text{phaseCenter}} + \dots, \quad (9)$$

其中 d_{trop} 包含了我们关心的对流层水汽含量信息. 为了避免模型对观测值的影响, 我们首先进行 LC 组合, 以消除电离层延迟, 即:

$$L_{\text{LC}} = (N_{\text{LC}} + \Phi_{\text{LC}}) = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} (N_1 + \Phi_1) - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (N_2 + \Phi_2),$$

则 (8), (9) 式变为:

$$N_{\text{LC}} + \Phi_{\text{LC}} = \frac{f_1^2 N_1 \lambda_1 - f_2^2 N_2 \lambda_2}{f_1^2 - f_2^2} + \frac{f_1^2 \Phi_1 \lambda_1 - f_2^2 \Phi_2 \lambda_2}{f_1^2 - f_2^2} = \left| \vec{r} - \vec{R} \right| + d_{\text{trop}} + c(\Delta t - \Delta T) + \varepsilon. \quad (10)$$

其中 $\varepsilon = \varepsilon_{\text{tide}} + \varepsilon_{\text{pressure}} + \varepsilon_{\text{phaseCenter}} + \dots$ 为总的误差项.

经过 LC 组合得到的观测值对应的模糊度不为整数, 但经过 LAMBDA 方法处理后, 可以精确计算; \vec{r} 和 \vec{R} 分别为测站和卫星的坐标向量, 我们采用 IGS 官方网站发布的当天的测站 ITRF2000 坐标可以精确求取 \vec{r} , 使用 IGS 发布的精密星历可以计算准确的 \vec{R} ; 使用 IGS 发布的 GPS 卫星钟差和 IGS 测站钟差文件可以精确求取 $c(\Delta t - \Delta T)$; 我们采用 GAMIT 计算时需要的各类观测误差模型文件计算海潮、极潮、固体潮和太阳光压等误差的改正; 同样采用 GAMIT 中 GPS 天线和接收机天线相关数据计算相位中心改正. 经过以上改成, (10) 中只剩下 d_{trop} 一项为未知, 从而求出 GPS 斜路径对流层延迟 (STD), 即 $STD = d_{\text{trop}}$.

STD 由干分量和湿分量两部分组成, 垂直方向干分量可以通过模型准确计算, 目前模型的精度可以达到毫米. 本文采用 Saastamoinen, J^[10] 在 1972 年提出的 SAAS 模型计算干分量延迟:

$$d_{\text{zen}}^{\text{dry}} = 0.002277 \left(p + \frac{0.1255 \times 10^4}{t_k + 0.05} e \right) / (1 - 2.66 \times 10^{-3} \cos(2\text{phi}) - 2.8 \times 10^{-4} h), \quad (11)$$

其中, p 为气压, t_k 为开尔文温度, e 为相对湿度, phi 为以弧度为单位的测站纬度, h 为大地高. 则:

$$SWD = d_{\text{trop}}^{\text{wet}} = d_{\text{trop}} - d_{\text{zen}}^{\text{dry}} \times M_{\text{dry}}, \quad (12)$$

其中, M_{dry} 是干分量大气延迟映射函数, 本文采用 SAAS 模型计算, SWD 是斜路径水汽延迟, 则斜路径水汽含量 (SWV) 可以通过下式计算:

$$SWV = \Pi \times SWD. \quad (13)$$

其中, Π 是与地面温度有关的映射因子, 由经验公式计算, 详见文 [11].

3 算例

本文试算了 IGS 站比较集中的美国西南部地区的三个 IGS 跟踪站 (JPLM, AZU1, CHIL) 三天 (2006 年第 200 天, 2007 年第 001 天, 2007 年第 100 天) 的数据. 并且将计算得到的结果投影到天顶方向与 GAMIT 和 BERNESE 的天顶方向延迟 (ZTD) 结果进行比较. ZTD 由下式计算得到:

$$ZTD = SWD / M_{\text{wet}} + d_{\text{zen}}^{\text{dry}}, \quad (14)$$

BERNESE 和 GAMIT 求解 ZTD 的时间间隔均设为半小时, 在比较之前, 我们将半小时的 SWD 投影到天顶方向, 计算其一致性, 取它们的均值作为这半个小时的结果与 GAMIT 和 BERNESE 的结果进行比较. 在三个测站中, 只有 JPLM 站有每天的 RINEX 格式气象数据 (MET 文件), 因此我们主要比较 JPLM 站的结果. 为了与本文的模型一致, 计算时, GAMIT 和 BERNESE 的大气干分量延迟的计算均采用 SAAS 模型, 干分量映

射函数和湿分量映射函数也采用 SAAS 模型计算. 需要指出的是, GAMIT 和 BERNESE 数据处理时是在计算测站坐标和钟差的同时计算对流层延迟, 而本文处理方法时时从文件中直接读取这两个参数, 将其当成真值加入到计算模型中. 对于测站坐标, 以 GAMIT 为例, 如果固定两个或者两个以上的测站坐标, 将使得测站坐标的误差传递给计算结果, 所以我们选择不固定任何站的坐标, 而是以 IGS 公布的当天测站坐标做为近似值进行处理, 然后给测站坐标较小的先验中误差. BERNESE 也采用相同的处理. 对于钟差, 精密钟差文件 (CLK 文件) 的生成使用了 GAMIT 等软件相同的处理机制, 其结果相差很小, 由于 GAMIT 等软件并没有输出最后的钟差结果, 这里不做比较.

如图 1 所示, 将斜路径水汽延迟和模型计算得到的干分量延迟投影到天顶方向得到的 30 秒一个的 ZTD 值与 30 分钟内平均的 ZTD 值一致性很好.

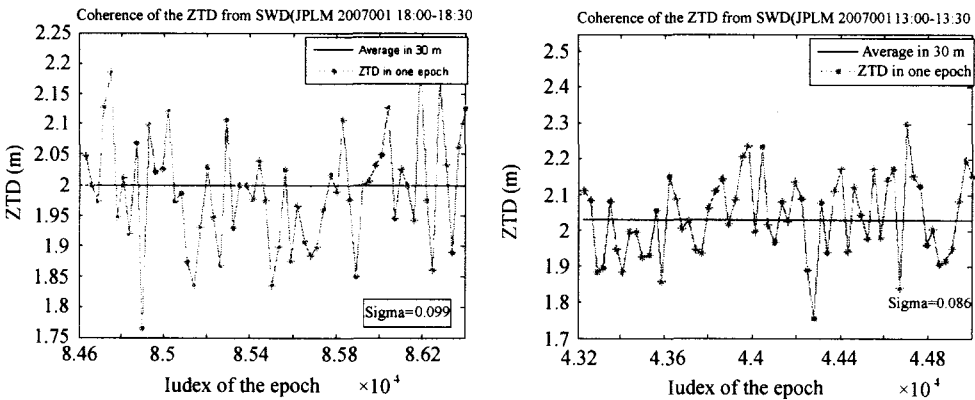


图 1 ZTD 值一致性 (单位 m)

Fig. 1 The coherence of the ZTD (m)

下表列出了 3 天里, 每天 11 个 30 分钟间隔的 ZTD 值的中误差:

表 2 STD 值中误差举例 (单位为 cm)

Table 2 The examples for the accuracy of STD (cm)

Day	00:00	02:00	04:00	06:00	08:00	10:00	12:00	14:00	18:00	20:00
2006200	9.11	8.91	8.94	8.11	9.02	9.19	9.00	8.93	8.31	7.98
2007001	9.23	9.70	9.01	8.94	8.99	9.01	8.63	8.34	8.90	8.77
2007100	9.44	9.32	8.88	9.18	8.94	8.71	8.26	8.38	7.99	8.13

可以看到, 按最小二乘方法计算得到每 30 分钟的 ZTD 值中误差都在 10cm 以内.

下图 (图 2, 图 3) 给出 2007 年第 001 天和 2006 年 200 天两天的计算得到的半小时时间间隔的 ZTD 结果与 GAMIT 和 BERNESE 结果的比较.

可以看到, 计算得到的结果大多数情况下和 BERNESE 计算得到的结果符合得很好, 最大偏差一般在 2cm 以内, 平均偏差为 1cm. 与 GAMIT 的结果符合得相对差些, 最大偏差将近 30cm, 平均偏差为 10cm. 这是因为 GAMIT 软件计算 PWV 值采用精确线性模型 (piecewise linear)^[12], 计算得到的结果相对平滑, 离散性较差^[13].

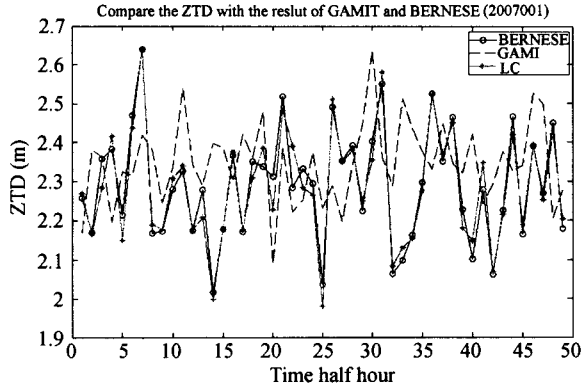


图 2 比较本文方法得到的结果与 GAMIT, BERNESE 的结果, JPLM, 2007001(单位 m)
Fig. 2 The ZTDs of this paper, the GAMIT and the BERNESE. JPLM, 2007001 (m)

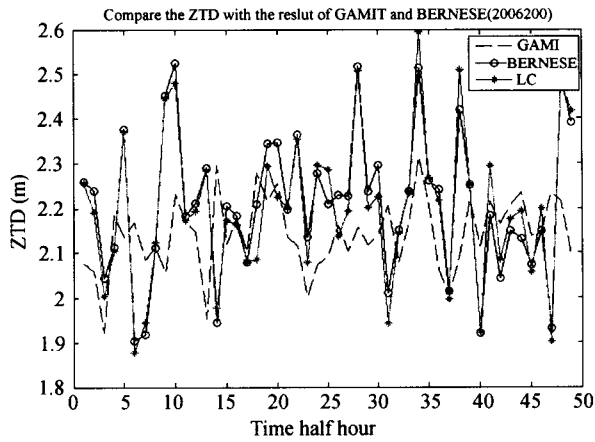


图 3 比较本文方法得到的结果与 GAMIT, BERNESE 的结果, JPLM, 2006200(单位 m)
Fig. 3 The ZTDs of this paper, the GAMIT and the BERNESE. JPLM, 2006200 (m)

4 总结

本文针对 LC 非差组合计算地基 GPS 斜路径水汽含量 (SWV) 方法中确定模糊度比较困难、实时性较差的问题, 引进在城市虚拟参考站系统等应用中比较成熟的 LAMBDA 算法, 使得可以应用 RINEX 文件计算接近实时的 SWV 值, 提高了用 GPS 监测 SWV 值的实时性. SWD 值投影到天顶方向有很好的一致性, 通过其计算得到的 ZTD 值与 GAMIT 和 BERNES 等软件事后处理的结果比较, 可以看出该方法得到的实时 ZTD 值精度优于 10cm. 根据本文文模型可以认为 ZTD 的精度完全由 SWD 决定, 从式 (14) 可以看到, SWD 值到 ZTD 值映射有映射函数的放大关系, 因此, SWD 值的精度为厘米级.

精确、实时的 SWV 值可以用于水汽三维分布的实时监测, 为数值天气预报提供更为精确的初始场, 提高天气预报的准确度.

本文提到的方法理论上可以用于单站, 但是由于 LAMBDA 方法解算模糊度至少需要一个中短距离基线, 所以实际应用中需要至少两个测站. 由于目前地基 GPS 监测大气多为局域布网监测, 所以该方法应该能较好应用.

参 考 文 献

- 1 Bevis M, Businger S, Herring T A, et al. *Journal of Geophysics Research*, 1992, 97: 15787
- 2 宋淑丽. 地基 GPS 网对水汽三维分布的监测及其在气象学中的应用. 2004, 上海: 中国科学院上海天文台
- 3 毕研盟, 毛节泰, 刘晓阳等. *地球物理学报*, 2006, 49: 335
- 4 何平, 徐宝祥等. *应用气象学*, 2002, 13, 179
- 5 宋淑丽, 朱文耀等. *天文学报*, 2004, 45: 3 338
- 6 Teunissen P J G, et al. *Proceedings of International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation KIS'94, Banff, Canada, 1994 August 30-September 2*, 221
- 7 Teunissen P J G, et al. *Proceedings of International Symposium 'GPS technology applications'*, Bucharest, Rumania, 1995 September 26, pp.203
- 8 The LAMBDA method for integer ambiguity estimation: implementation aspects. Delft University of Technology, 1996
- 9 李博峰. GPS 相位短基线解算及其软件实现. 上海: 同济大学, 2005
- 10 Saastamoinen J. *Geophys. Monogr. Ser.*, vol. 15, edited by S W Henriksen, A Mancini, and B.H. Chovitz, 247, AGU, Washington, D.C., 1972
- 11 王小亚, 朱文耀, 严豪健等. *大气科学*, 1999, 23: 605
- 12 GAMIT Reference Manual (GPS Analysis at MIT Reference 10.30). MIT, 2006
- 13 楚艳丽, 张朝林等. *新世纪气象科技创新与大气科学发展*, 2003, 239

The Application of the LAMBDA Method in the Estimation of the GPS Slant Wet Vapour

HUANG Shan-qi¹ WANG Jie-xian^{1,4} WANG Xiao-ya² CHEN Jun-ping³

(1 *Department of Surveying and Geo-informatics Tongji University, Shanghai 200092*)

(2 *Shanghai Astronomical Observatory Chinese Academy of Science, Shanghai 200033*)

(3 *GeoForschungsZentrum Postdam, Postdam 14473, Germany*)

(4 *Key Laboratory of Modern Engineering Geodesy of The State Bureau of Surveying and Mapping, Shanghai 200092*)

ABSTRACT By far, the technology of GPS data processing has been improved well and the accuracy of this processing has increased greatly. So, GPS has been applied in meteorology widely. The SWV (Slant Wet Vapour) is a very important parameter in the GPS meteorology. In 2004, Song Shuli had advanced a SWV estimation method which used the precision orbit of JPL, IGS clock and the LC observations without cycle-slip. But this method is bad in real-time character. LAMBDA method, which is working well in the VRS (Virtual Reference Station) /COORS, is used in the ambiguity estimation. The method was proved by some true data calculation. The ZTD(Zenith Time Delay), which is calculated by projecting SWD (Slant Wet Delay) to zenith direction, has good coherence. Comparing the ZTD with the results of GAMIT and BERNESE, the deviation between our result and the GAMIT one is commonly little than 3cm, and the BERNESE one is commonly little than 1.5cm.

Key words Earth, Atmospheric Effects