第 46 卷 第 1 期 天 文 学 报 Vol.46 No.1
2005 年 1 月 ACTA ASTRONOMICA SINICA Jan., 2005

并置 VLBI 站的相对形变及其与全球解结果的比较*

杨志根 [1,2] M. Berube[3] A. Searle[3]

(1 中国科学院上海天文台 上海 200030)
(2 中国科学院国家天文台 北京 100012)
(3 Geodetic Survey Division, Natural Resources Canada Ottawa Canada)

摘要 基于 ITRF2000 地球参考架的三维 VLBI 站速度矢量和 NNR-NUVEL-1A 地球板块运动模型, 采用观测的 VLBI 基线长变化率作为约束, 估计和讨论了全球 6 个并置 VLBI 站的局部或区域性地壳的相对形变, 并与国际地球参考架 ITRFs 解和 VLBI 全球解 glb2003 以及 VTRF2003 的结果进行了比较. 结果表明日本 Kashima 与 Kashim34VLBI 站之间, 美国 GREENBANK 的 NRAO20 与 NRAO85_3 站之间可能存在每年约近 4 毫米的相对垂直形变; WESTFORD 与 HAYSTACK 二站间每年近 2 毫米的垂直形变率差基本可得到肯定, KOKEE 和 KAUAI 二站的垂直形变率约有每年 1 至 3 毫米的差. 利用如下方法能较可靠地检测出并置 VLBI 站间的局部或区域性的地壳垂直形变, 改进 ITRF 解的可能不足.

关键词 **天体测量学: VLBI 基线长变化率, ITRF2000 地球参考架, 并置 VLBI 站的局部或区域性的相对地壳形变**
中图分类号: P 124; **文献标识码:** A

1 引言

ITRF 国际地球参考架, 例如 ITRF2000, 作为参考架标准已广泛用于天体测量学, 大地测量学和地球物理学. 由于 ITRFs 是利用多种空间测地技术观测的综合解, 会引起单个站的站速度解的不一致, 这取决于不同 ITRF 解在局部或区域解中的可靠性.

然而, 至今我们对局部或区域性的地壳形变, 特别是对地壳垂直形变还没有完全的了解. 作为一个例子, 文 [1] 给出了日本 Kashima 和 Kashim34 两个并置 VLBI 站不同的区域性地壳形变率解. 可是在文 [2-4] 中先后给出了这两个站相同的区域性地壳形变率解. 类似的例子还有在美国 GREENBANK 的 NRAO85_3 、 NRAO20 和 NRAO140 3 个 VLBI 站, 美国 Westford 的 Westford 和 Haystack 两个站, 和在 Fort Davis 的 HRAS 085 和 FD-VLBA 两个站, 以及在太平洋 Hawaii 岛的 KOKEE 和 KAUAI 两个站, 在不同的 ITRF 解中均给出了它们各自相同的三维地壳形变率结果 [5].

2004-02-05 收到原稿, 2004-04-22 收到修改稿
* 中国科学院国家天文台二期创新研究资助项目

美国宇航局 NASA 的 VLBI 组在测地 VLBI 的全球解 glb2001 中 [6], VLBI 基线率解的平均精度为 $\pm 1.6\,\mathrm{mm/yr}$, 在最近一次 VLBI 全球解 glb2003 中 [7], 其基线率解的平均精度约为 $\pm 1.45\,\mathrm{mm/yr}$. 因此，利用观测的 VLBI 基线率作为输入约束，估计相距数百至数千米距离的并置 VLBI 站间的局部或区域性的相对形变，精化部分国际 VLBI 站的局部或区域性垂直形变解已是可能的，以实现改进 ITRFs 解的可能不足. 文 [8] 利用 glb2003 定义站的 Helmert 参数转换，将 glb2003 中的 VLBI 站速度解转换到了 ITRF2000 的定向和地心位置系统，得到了一个 VLBI 全球站速度解的习用 VLBI 地球参考架 VTRF2003. 本文分别列出了 VLBI 全球解的有关站结果以作比较.

2　方法

假定 $\boldsymbol{B}_{ki}$ 为目标 VLBI 站 k 至国际 VLBI 站 i 之间的基线长， $\boldsymbol{V}_{ki}$ 为 $\boldsymbol{B}_{ki}$ 的变化率，可得观测方程为 [9]:

$$\boldsymbol{B}_{ki} \cdot \boldsymbol{V}_{ki} = (\boldsymbol{R}_i - \boldsymbol{R}_k)\boldsymbol{\Omega}_{ki}\,, \tag{1}$$

式中 $\boldsymbol{R}_k$ 和 $\boldsymbol{R}_i$ 分别为站 k 和 i 的地心位置矢量， $\boldsymbol{\Omega}_{ki}$ 是 $\boldsymbol{V}_k$ 和 $\boldsymbol{V}_i$ 的相对变化率，其中 $\boldsymbol{V}_i$ 为 $\boldsymbol{R}_i$ 的三维地心速度矢量，可取自 ITRFs 地球参考架，而 $\boldsymbol{V}_k$ 为目标站 k 的速度矢量，它作为未知量，在观测的 $\boldsymbol{V}_{ki}$ 的约束下可由加权最小二乘法得到求解. 在上述估计中， $\boldsymbol{V}_i$ 在 ITRFs 地球参考架中的误差对估计 $\boldsymbol{V}_k$ 的影响在一定程度上可考虑作为随机误差处理. 由此，目标站 k 的局部或区域性的地壳形变率 $\boldsymbol{V}_{\mathrm{def}}$ 可由下式得到精确的估计：

$$\boldsymbol{V}_{\mathrm{def}} = V_k - \boldsymbol{\omega}_{\mathrm{mod}} \times \boldsymbol{R}_k\,, \tag{2}$$

式中 $\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{mod}}$ 是板块运动模型中目标站所在板块的欧拉旋转矢量. 在上述估计中，由于地面上两 VLBI 站之间沿基线方向距离的测定在理论上与所采用的地球参考架 (TRF) 无关 [10], 并且 $\boldsymbol{V}_i$ 在地球参考架中的误差可作为随机误差处理，由此，目标站 k 的 $\boldsymbol{V}_k$ 和 $\boldsymbol{V}_{\mathrm{def}}$ 可相对精确地得到估计. 在我们的估计中，权 $\boldsymbol{W}_p$ 可表示为：

$$\boldsymbol{W}_p = (\sigma_i)^{-2} + (\sigma_{ki})^{-2}\,, \tag{3}$$

式中 σ_i 和 σ_{ki} 分别为 $\boldsymbol{V}_i$ 和 $\boldsymbol{V}_{ki}$ 的误差.

3　采用的资料

根据美国宇航局 NASA 的测地 VLBI 全球解 glb2001[6], 分别采用太平洋板块夏威夷岛 KOKEE 站至 31 个国际 VLBI 站的基线长变化率和 KAUAI 站至 16 个国际 VLBI 站的基线长变化率结果，用 ITRF2000 地球参考架的地心速度矢量作为国际 VLBI 站的三维地心速度矢量采用值， NNR-NUVEL-1A 板块运动模型用于计算 KOKEE 和 KAUAI 站的水平运动理论值 [11], 由 (1) 至 (3) 式，估计得到这两个站的局部或区域性地壳垂直和水平方向的形变率. 为证实上述估计得到的结果，近一步采用了 KOKEE 和 KAUAI 站分别至 13 个共同的国际 VLBI 站基线的长度变化率结果作为观测约束，估计了这两站的局部或区域性地壳垂直和水平方向的形变率，结果列于表 1.

表 1 全球并置 VLBI 站中共 11 个观测站的局部或区域性的地壳形变率. 表中第二列数字 BR 为: 1 表示采用全部的目标站与国际 VLBI 站之间的观测的基线率作为约束所估计的结果, 2 为采用并置站中目标站与国际 VLBI 站之间共同基线的基线变化率所估计的结果.

Table 1 The local/regional crustal deformation rates of 11 VLBI stations in global collocated sites. In second column of the table, the number 1 indicates that the results were estimated by using all of the baseline rates between target stations and international stations as input constraints, 2 shows that the estimates were completed using the baseline rates of common baselines between target stations and international VLBI stations.

VLBI station	BR	vertical def. rate (mm/yr)	horizontal def. Rate(E) (mm/yr)	horizontal def. rate(N) (mm/yr)
KOKEE	1	−0.41±0.35	−3.75±0.36	0.45±0.54
KAUAI	1	0.60±0.83	−5.71±0.55	2.01±1.01
KOKEE	2	−0.26±0.61	−3.28±0.74	0.33±0.90
KAUAI	2	2.89± 0.76	−7.53±0.49	2.81±0.80
KASHIMA	1	−2.35±0.72	−11.40±0.53	5.60±0.84
KASHIM34	1	−6.09±1.12	−11.50±0.94	6.17±1.21
KASHIMA	2	−3.09±1.05	−11.27±0.82	5.05±1.16
KASHIM34	2	−7.03±1.26	−11.41±1.05	6.39±1.35
NRAO85_3	1	−1.65±0.82	1.05±0.56	−0.79±0.88
NRAO20	1	1.45±0.28	0.77±0.18	−0.55±0.30
NRAO140	1	1.89±0.97	−0.73±0.31	−0.23±1.04
NRAO85_3	2	−2.80±0.53	0.66±0.36	−1.18±0.58
NRAO20	2	1.12±0.32	0.32±0.28	−0.58±0.33
HRAS 085	1	2.15±1.42	0.57±0.43	2.74±1.63
FD-VLBA	1	−0.55±0.34	−0.11±0.17	−0.02±0.38
Westford	1	−1.31±0.28	0.42±0.15	−1.35±0.29
Haystack	1	0.33±1.45	0.28±0.83	−1.22±1.47

对日本鹿岛的 KASHIMA 和 KASHIM34 两 VLBI 站分别与 27 个国际 VLBI 站和 12 国际 VLBI 站的基线长变化率结果作为输入约束作了相同处理. 为证实上述估计的结果, 采用了 KASHIMA 和 KASHIM34 两站分别至 9 个共同的国际 VLBI 站的基线的长度变化率结果作为观测约束作了相同处理. 此外, 我们对位于美国 GREENBANK 的 NRAO85_3, NRAO20 和 NRAO140 3 个 VLBI 站分别与国际 VLBI 站的基线长变化率, 以及对其中 NRAO85_3 和 NRAO20 两站分别至 9 个共同的国际 VLBI 站的基线长度变化率结果作为观测约束作了相同处理. 得到的日本鹿岛的两个站和美国 GREENBANK 的 3 个 VLBI 站的局部或区域性地壳形变也列于表 1.

对位于美国 WESTFORD 的 Westford 和 Haystack 两个站, Fort Davis 的 HRAS 085 和 FD-VLBA 两个站也作了类似的数据处理, 结果见表 1.

表 2　各并置 VLBI 站中的 VLBI 观测站之间的局部或区域性的地壳相对垂直与水平形变率. 第二列 BR 数字 1, 2 意义同表 1. 数字 3 和 4 分别表示由 glb2003 和 VTRF2003 所估计的相对形变率结果.

Table 2　The relative deformation rates between VLBI stations in collocated site. Number 1 and 2 are the same meanings as those in table 1. Number 3 and 4 represent that the results are from glb2003 and VTRF2003, respectively.

Collocated VLBI station (Antenna aperture and relative distance between two antennas)	BR	Relative vertical def. rate (mm/yr)	Relative horizontal def. rate(E) (mm/yr)	Relative horizontal def. rate(N) (mm/yr)
KAUAI(9m)-KOKEE(20m)	1	1.01 ± 0.90	−1.96±0.66	1.56±1.15
(39.0 m)	2	3.15 ±0.97	−4.25±0.62	2.48±1.20
	3	−0.17±0.41	−1.75±0.20	1.20±0.22
	4	−0.18±0.49	−1.82±0.43	1.05±0.50
KASHIM34(34m)-KASHIMA(26m)	1	−3.74±1.33	−0.10±1.08	0.57±1.47
(311.2 m)	2	−3.94±1.64	−0.14±1.34	1.35±1.78
	3	−1.39±0.32	−0.22±0.17	1.36±0.18
	4	−2.17±0.52	0.10±0.50	2.44±0.54
NRAO20(20m)-NRAO85_3(85 foot)	1	3.10±0.87	−0.28±0.59	0.24±0.93
(1753.9 m)	2	3.92±0.62	−0.34±0.46	0.60±0.67
	3	4.40±0.36	0.50±0.13	0.70±0.13
	4	3.06±0.45	0.68±0.42	0.89±0.47
NRAO140(43m)-NRAO85_3(85 foot)	1	3.54±1.27	−1.78± 0.63	1.02±1.36
(1128.9 m)	3	0.82±0.53	0.51±0.14	−0.15±0.16
	4	−0.30±0.52	0.67±0.42	−0.24±0.54
FD-VLBA(VLBA)-HRAS085(85 foot)	1	−2.70±1.46	−0.68±0.46	−2.76±1.67
(300.6 m)	3	3.96±0.47	−0.26±0.13	0.54±0.16
	4	4.04±0.64	−0.24±0.44	0.63±0.60
HAYSTACK(37m)-WESTFORD(18m)	1	1.64±1.48	−0.14±0.84	0.13±1.50
(1239.4 m)	3	2.05±0.39	0.76±0.12	0.26±0.16
	4	2.14±0.57	0.79±0.45	0.21±0.57

4　结果

表 1 给出了位于全球 6 个并置 VLBI 站中共 11 个 VLBI 观测站基于 ITRF2000 地球参考架和 NNR-NUVEL-1A 板块运动模型的局部或区域性的地壳垂直和水平形变率结果. 表中 BR 对应的数字 1 和 2 见表题说明. 表 2 是根据表 1 得到的并置站中 VLBI 观测站之间的相对变化, 表中第 1 列给出了各 VLBI 站的天线口径和并置站间天线参考点之间的距离.

由表 1 中对应 BR 为 2 的结果可见, 采用并置站中 VLBI 观测站分别与共同的国际 VLBI 站间的基线的长度变化率作为观测约束所估计的结果, 基本上验证了对应 1 的结果. 由表 2, 表明 KAUAI 与 KOKEE 站之间可能存在每年 1 至 3 毫米的垂直形变率差异, 以及 KASHIM34 与 KASHIMA 站之间存在每年近 4 毫米的垂直形变率差异, 这与

VTRF2003 中的相应结果有所不同. 此外, NRAO20 与 NRAO85_3 站之间每年 3 至 4 毫米的垂直形变率差, 以及 HAYSTACK 与 WESTFORD 站之间每年近 2 毫米的垂直形变率差基本可以得到确认. 然而, NRAO140 与 NRAO85_3 站之间, FD-VLBA 与 HRAS085 站之间的相对垂直形变率还有待于近一步证实.

5 结论与讨论

根据上述的估计以及结果的比较, 可得到如下基本的结论和讨论:

1. 我们采用了 VLBI 基线长变化率作为观测约束的直接的估计方法, 估计了全球并置 VLBI 站中各观测站的垂直和水平形变率. 由于地面上二测站间沿基线方向距离的测定在理论上与所采用的地球参考架无关, 国际地球参考架 ITRF2000 中的三维站速度矢量的误差对于用加权最小二乘法估计目标站形变率的影响在一定程度上可考虑作为随机误差处理, 在本文所采用的方法中地球参考架定义明确, 由表 1 可见, 用本文方法可估计得到 VLBI 站的垂直形变率与水平形变率有较一致的估计精度. 因此, 用本文方法估计得到的结果可能是较为可靠的, 特别是利用本文方法检测 VLBI 站的垂直形变率可能是比较有利的.

2. 为了验证上述估计的结果, 对并置 VLBI 站 KOKEE 和 KAUAI, KASHIMA 和 KASHIM34, 以及 NRAO85 3 和 NRAO20 分别与国际 VLBI 站之间的共同基线的基线长变化率资料用相同方法作了处理. 由表 2, 可基本证实日本鹿岛 KASHIMA 和 KASHIM34 两 VLBI 站之间的相对垂直形变率约为每年近 4 毫米, 这与文 [12] 基于 ITRF97 地球参考架得到的每年 5.1±1.1 毫米的结果基本符合. 此外, 我们的估计也表明 KOKEE 和 KAUAI 二站的垂直形变率约有每年 1 至 3 毫米的差, 以及 NRAO85 3 和 NRAO20 二站间每年约 4 毫米和 WESTFORD 与 HAYSTACK 二站间每年近 2 毫米的垂直形变率差基本可得到肯定. NRAO140 站的垂直形变率以及 FD-VLBA 与 HRAS085 站之间的相对垂直形变率还有待于近一步研究;

3. 由于并置的 VLBI 站之间的距离约为数百米至数千米, 基于 ITRF2000 地球参考架和 NNR-NUVEL-1A 地球板块运动模型, 我们将并置的 VLBI 站作为一个站重新进行了数据处理, 发现所得到的结果与 ITRF2000 的结果基本相一致, 表明在进行 ITRF2000 的数据处理中, 并置的 VLBI 站是作为单个站来处理的;

4. 未来进一步利用最近的 VLBI 全球解的基线变化率资料作为观测约束, 对部分国际 VLBI 站进一步求解其局部或区域性地壳形变率将是需要的, 以确定其真正的局部或区域性的地壳形变率, 特别是地壳垂直形变率. ITRF 解可能有必要给出并置 VLBI 站中各观测站的三维地心速率结果, 以有利于 VLBI 站的局部或区域性的地壳形变率研究.

致谢 本研究得到中国科学院国家天文台知识创新研究团组的资助.

参 考 文 献

1 1996 IERS ANNUAL REPORT, Observatoire de Paris, 1997

2 Boucher C, Altamimi Z, Sillard P. Results and Analysis of the ITRF96, IERS Technical Note No. 24, Observatoire de Paris, 1998

3 Boucher C, Altamimi Z, Sillard P. The 1997 international Terrestrial Reference Frame (ITRF97), IERS

Technical Note No. 27, Observatoire de Paris, 1999
4 Altamimi Z, Angermann D, Argus D, et al. Eos Trans. AGU, June 19, 2001, 82(25): 273, 278
5 Boucher C, Altamimi Z, Sillard P, et al. The ITRF2000 reference frame, IERS technical Note No.31, Observatoire de Paris, 2001
6 Ma C. glb2001, VLBI Group at NASA Goddard Space Flight Center, 2001
7 Ma C, MacMillan D, Petrov L, et al. glb2003cn, NASA Goddard Space Flight Center, http://lupus.gsfc.nasa.gov/global/glb.html, August 2003
8 Nothnagel A. VTRF2003: A Conventional VLBI Terrestrial Reference Frame, http://miro.geod.uni-bonn.de/vlbi/IVS-AC/vtrf2003/vtrf2003,2003, 2003
9 杨志根，朱文耀，程宗颐. 测绘学报， 2001, 30: 10-15
10 Ma C, Sauber M, Bell L J, et al. J Geophys Res, 1990, 21991, L95(B13): 21991
11 DeMets C, Gordon R, Argus D, et al. Geophys Res Lett, 1994, 21: 2191
12 Yang Zhi-gen, Zhu Wen-yao, Shum C K, et al. AcASn, 2002, 43 (2): 205 (杨志根，朱文耀， Shum C K, 等. 天文学报 2002, 43 (2): 205)(=Yang Zhi-gen, Zhu Wen-yao, Shum C K, et al. ChA&A, 2002, 26: 497)

Relative Deformation Rates between Collocated VLBI Stations and Results Comparisons with Global Solutions

YANG Zhi-gen[1,2] M. Berube[3] A. Searle[3]
(1 *Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai* 200030)
(2 *National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100012)
(3 *Geodetic Survey Division, National Resources Canada Ottawa Canada*)

Abstract Accurate determination of station positions and velocity vectors for the realization and maintenance of the International Terrestrial Reference Frame (ITRF) are among the contributions of global VLBI stations. ITRF solutions, such as ITRF2000, are combination solutions using different space geodetic techniques and could have potential "inconsistencies" between different realizations. At present, the estimated average uncertainty on regularly observed baselines for VLBI determined baseline length change is better than ± 1.0 mm/yr. It is discussed results of the relative deformations between nearby stations in 6 global collocated VLBI sites based on the ITRF2000 and using the NNR-NUVEL-1A model to calculate the modeled horizontal motions. Comparisons of the results with those of the ITRFs solutions and VTRF2003 solution (Nothnagel, 2003) are addressed. The technique uses the observed baseline rates as constraints to quantify local/regional crustal deformations relative to the NUVEL-1A model solution and obtain the relative deformation rates between two closely spaced VLBI stations separated by a few hundred to few thousand meters, and determines improved deformations at a regional or local spatial scale, isolating the "inconsistencies" from the TRF solutions. The approach is introduced and preliminary comparisons are made.

Key words astrometry: rates of VLBI baseline length change, ITRF2000 terrestrial reference frame, local/regional crustal deformation rates between collocated VLBI stations