

利用 IVS 加强观测确定 UT1 的分析研究*

王广利^{1†} 徐明辉^{1,2}

(1 中国科学院上海天文台 上海 200030)

(2 中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 首先对 IVS (International VLBI Service for Astrometry and Geodesy) UT1 加强观测的历史发展和总体情况进行了比较详细的介绍, 对目前加强观测中存在的问题进行了比较全面的分析; 在此基础上对 IVS 从 1984 年 2 月到 2011 年 8 月全部的加强观测数据进行了综合处理, 进一步分析了加强观测解算 UT1 的历史改进和目前的解算能力, 对比分析不同类型加强观测的 UT1 结果, 发现不同观测网之间存在数十微秒水平的差异; 并着重分析了上海佘山站参与的加强观测的解算结果, 分析表明上海佘山站在 IVS 加强观测中与其他参与台站具有相同的测量能力. 总体而言, 目前 IVS 加强观测确定的 UT1 与 IERS (International Earth Rotaion Service) C04 之间存在约 $10 \mu\text{s}$ 水平的不确定性.

关键词 天体测量, 地球, 时间, 方法: 数据分析

中图分类号: P 128; 文献标识码: A

1 引言

精确的地球定向参数 (EOP) 信息对各种地球和空间导航非常重要. 在这些地球定向参数中, 地球自转角 (UT1) 是变化最快的量, 同时也是最难以准确预报的量, 因此高精度的地球自转参数都是通过空间技术观测得到的. VLBI 技术是测量 UT1 的基本技术, 该工作从上世纪 80 年代开始逐步成为常规化的测量工作.

IVS^[1] 自上世纪末成立后每周进行 3 次 24 h 的 EOP 测量, 这些观测一般由全球分布的 5~8 个 VLBI 台站参加, 利用这些观测估计得到的 UT1-UTC (ΔUT1) 的精度能达到 $7 \mu\text{s}$ 左右^[2], 但是结果大约要在观测结束 2 周后才能获得. Luzum 等^[3] 研究表明, 如果能提供近实时的 UT1 观测值, IERS 的快速 / 预报服务中心 (RS/PC) 提供的 ΔUT1 的解算精度能提高 50%, 其预报值的精度能提高 21%. 可见, 近实时的 UT1 测量值对 EOP 的预报来说至关重要.

为了实现更加连续地监测 UT1 和更短的时间滞后的目的, 称之为加强观测的 VLBI 实验从 1984 年开始实施^[4], 采用一条长的东西向基线观测 1 h. 这条基线在历史上经过了 3 次更换, 从 1984 年到 1994 年 2 月采用的是 Wettzell (Bavaria, Germany)-Westford (Massachusetts, USA) 这条基线, 从 1994 年 3 月到 2000 年 6 月由 Wettzell-Green Bank (West

2011-11-22 收到原稿, 2012-01-11 收到修改稿

* 国家自然科学基金项目 (10973032) 资助

† wgl@shao.ac.cn

Virginia, USA) 代替^[5], 从 2000 年起改为 Wettzell 和 Kokee Park (Hawaii, USA) 两个测站。这些常规观测后来被称之为 INT1, 一般从周一到周五每周观测 5 次, 每天 18:30UT 开始观测, 持续 1 h. 由于 Kokee Park 记录的数据是通过硬盘运输到美国海军天文台进行相关处理, 因此 INT1 的平均时间延迟较长, 需要 2~3 d.

在意识到加密监测 UT1 的重要性后, IVS 从 2002 年开始将另外一条基线加入到加强观测中, 称之为 INT2^[6], 由 Wettzell-Tsukuba (Japan) 组成单基线在周六和周目的 7:30UT 开始观测, 持续 1 h, 在观测时间上这对 INT1 是一个很好的补充。INT2 数据采用的是网络传输到 Tsukuba 相关处理中心, 但是相关处理要等到次周的周一上午 (日本时间) 进行, 因此导致的延迟将至少 1 d.

为了将观测台站数据运输到相关处理中心的时间缩到最短, 和填补周日 8:30UT 到周一 18:30UT 这段时间内的观测空白, 第 3 个台站网的观测被提出, 称之为 INT3^[3]. 从 2008 年 2 月 INT3 开始实施观测, 每周一 7:00UT 开始观测, 依然是观测 1 h, 参与观测的测站主要为 Ny-Ålesund (Spitsbergen, Norway), Tsukuba 和 Wettzell 3 个测站。INT3 观测数据通过网络传输到德国波恩相关处理中心, 在每周一 15:00UT 左右就能完成数据传输和相关处理, ΔUT1 的分析结果在随后的 1 h 便可以获得。随着 INT3 的加入, VLBI 加强观测的最长时间间隔不超过 24 h. 在 2011 年 3 月日本发生大地震后, Tsukuba 站的运动表现出明显的非线性变化, 此后上海佘山站也参加了 INT3 观测。

IVS 对 UT1 监测的观测设计日趋完善, 为 UT1 的预报提供了更好的基础。在此基础上, UT1 的预报精度取决于两个方面, 一方面是 ΔUT1 估计值本身的精度, 另一方面是 ΔUT1 观测值获得的时间滞后。目前国际上在这两方面都有深入的研究。为提高 ΔUT1 的观测精度, Bauer 等^[7] 比较 INT1 和 INT2 的解算结果, 分析了射电源的分布对解算结果的影响, Bauer 等^[8] 进一步深入分析了射电源的空间分布对 ΔUT1 估计结果的影响, 认为观测纲要设计时应该尽量增加射电源的空间分布; Nothnagel 等^[6] 认为加强观测的解析依赖于极移、章动的先验值, 因此极移和章动的误差将是 UT1 加强观测的误差源之一, 并利用数学分析的方法给出了改正的模型; Hobiger 等^[9] 分析得出参考站的钟差会造成 INT2 估计的 ΔUT1 整体偏差 $0.2 \mu\text{s}$, 建议在下一代 VLBI 系统中考虑该因素的影响; 加强观测得到的 ΔUT1 的外符误差明显大于其形式误差, Böhm 等^[10~11] 认为这其中的主要误差源是对流层大气的方位角不对称性导致的, Nilsson 等^[12] 利用 CONT08 数据对该误差源进行了更加深入的分析研究。在减少 ΔUT1 观测结果的时间滞后方面, 日本学者利用 e-VLBI 实现了超快速 UT1 测量, 做了一些不错的工作^[13~14]。Matsuzaka 等^[13] 利用 Tsukuba 32 m、Kashima 34 m、Onsala 和 Metsähovi 4 个台站, 能够在观测结束后的 30 min 就给出 ΔUT1 的估计结果。同时, Hobiger 等^[15] 利用 VLBI 分析软件 c5++ 实现了快速 UT1 确定的全自动化, 在观测结束几分钟后就能得到 ΔUT1 结果。遗憾的就是, 日本开展的这些超快速 UT1 服务的结果并没有向 IERS 提交, 因此对常规的 UT1 预报没有任何贡献^[3].

本文将利用目前已有的全部 IVS 加强观测资料, 分析不同站网分布的加强观测的解算结果以及它们之间的差异, 同时我们也对上海佘山站参加的几次观测结果进行对比分析。在本文的第 2 部分将描述所采用的数据和 VLBI 数据分析的策略, 所有 INT1 观测的

历史资料的解算结果及分析将在第 3 部分给出, 目前的不同加强观测类型的解算分析和余山站参与的加强观测的分析结果将在第 4 部分描述, 第 5 部分是对分析结果的总结.

2 数据和处理方法

本文采用的数据是从 1984 年 2 月到 2011 年 8 月 IVS 的加强观测, 总共 6 552 个 INT1、INT2 和 INT3 观测, 已经剔除了 353 个时延观测量少于 8 个的加强观测. 目前加强观测数据的具体描述见表 1, 在表 1 中 INT1 的统计信息指的是 2000 年以后的 INT1 观测. 历史上参与加强观测的台站的位置见图 1, 其中红色线显示的是 2000 年后 INT1 观测的单基线, 蓝色线显示的是 INT2 观测的单基线, 绿色线显示的是 INT3 观测网; 图中灰色的图标显示的是早期参与 INT1 观测的台站.

表 1 目前加强观测数据的描述

Table 1 Overview of current Intensive observing routines

Stations	INT1	INT2	INT3
	Wettzell Kokee Park	Wettzell Tsukuba	Wettzell Ny-Ålesund Tsukuba Seshan
Longest baseline of the network(km)	10357	8445	8445
East-West-dimension(km)	10072	8378	8378
North-South-dimension(km)	2414	1064	2962
Observing days	Mon. to Fri.	Sat. and Sun.	Mon.
Starting epoch	18:30	7:30	7:00
Correlator	NASA (USA)	GSI (Japan)	Bonn (Germany)
Delay(d)	2 ~ 3	1 ~ 2	≈ 0.4

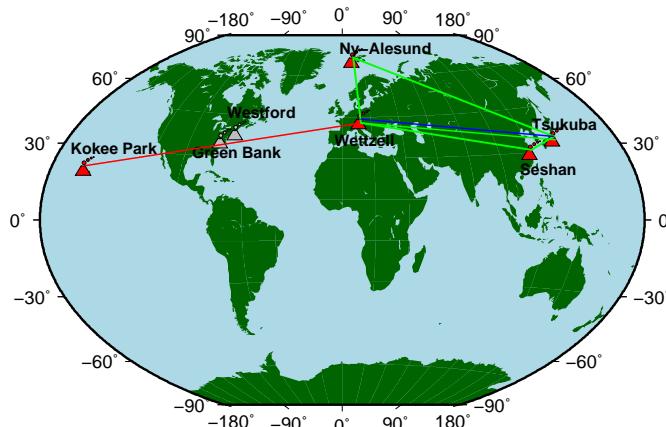


图 1 参与加强观测的 7 个台站和几何网

Fig. 1 The baseline networks of the Intensive sessions

使用的数据分析软件是 Calc10.0/SOLVE, 采用单次解的模式, 台站和射电源的坐标分别采用 ITRF2008^[16] 和 ICRF2^[17] 中的数据, 岁差章动采用的是 IERS C04 (简写为 C04)

给出的序列值。这样每次观测只需要估计以下参数: 每个测站一个湿大气天顶距时延改正参数、钟差和钟速参数以及一个 ΔUT1 的改正值。每个观测时刻估计得到一个 ΔUT1 观测值, 整个观测资料就得到 ΔUT1 的时间序列。为了便于与 C04 比较, 解算的 ΔUT1 中已经进行了高频变化改正, 因此本文中的 ΔUT1 序列均不再包含高频变化项。同时, 在与 C04 比较前, 我们对 C04 进行了 15 个点的 3 次样条内插, 内插到 ΔUT1 的观测时刻。

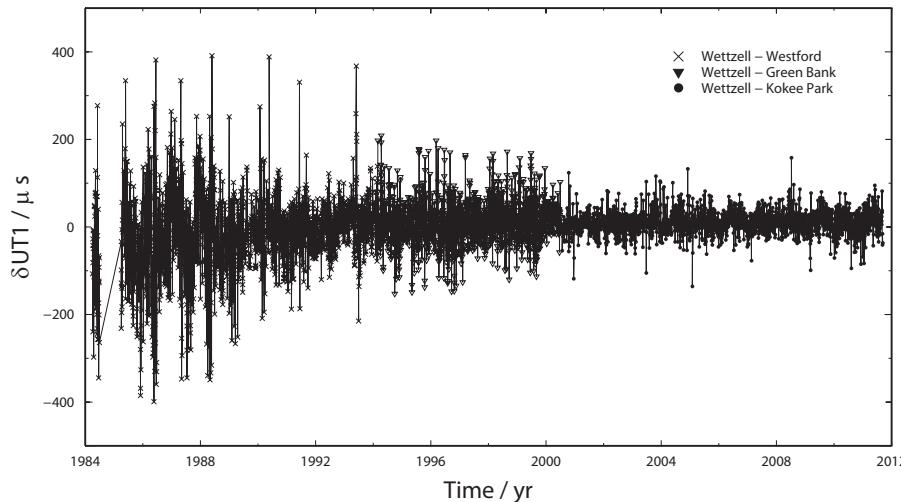
3 1984 ~ 2011 年 IVS INT1 观测序列的解算结果

根据观测台站的变更, 我们将 INT1 观测分为 3 个阶段: 1984 ~ 1994 年基线 Wettzell-Westford 的观测, 1994 ~ 2000 年基线 Wettzell-Green Bank (NRAO 80 m 和 NRAO 20 m) 的观测, 2000 ~ 2011 年基线 Wettzell-Kokee Park 的观测。解算结果和统计信息见表 2 (表中 w.r.t. 为相对于 with respect to 的首字符缩写, avg. 为平均 average 的缩写, 下同), 该表中的第 4 行是 3 个阶段各自的观测次数, 第 5 行和第 6 行分别指基线的长度及其在东西向上的投影, 第 7 行是每次观测的平均观测量个数, 第 8 行是解算得到的 ΔUT1 的平均形式误差, 将解算得到的 ΔUT1 时间序列与 C04 的结果进行了比较 (比较前删除了拟后残差比较大的 8 次观测, 主要是 80 年代早期的观测), 得到了估计结果相对于 C04 的偏差以及其均方差, 分别列在最后两行。从表 2 中可以明显看到, 不同阶段 INT1 观测改进是非常明显的, 平均观测量增加了一倍, 由于观测量、观测精度以及基线长度的增加, 不同阶段观测得到的 ΔUT1 的精度有了显著的改进。 ΔUT1 时间序列与 C04 的差异见图 2, 图中以 δUT1 表示。图 2 和表 2 也显示出从 2000 年后的加强观测的 ΔUT1 解与 C04 有更好的一致性, 但是, 不同阶段 (基线) 测定的 ΔUT1 之间存在系统性差异, 其中第 1 阶段和第 2 阶段之间的差异接近 $30 \mu\text{s}$, 第 2 阶段和第 3 阶段之间近 $4 \mu\text{s}$ 。总体而言, INT1 的 ΔUT1 序列与 C04 存在 $10 \mu\text{s}$ 水平的偏差。

表 2 不同时期 INT1 观测的 ΔUT1 解算结果统计信息

Table 2 Statistical information of the results from different INT1 types

Year	1984 ~ 1994	1994 ~ 2000	2000 ~ 2011
Stations	Wettzell Westford	Wettzell Green Bank	Wettzell Kokee Park
Number of session	1854	1359	2374
Length of baseline(km)	5998	6724	10357
East-West-dimension(km)	5977	6669	10072
Avg. number of scans per session	9.6	17.2	20.9
Avg. normal error of $\Delta\text{UT1}(\mu\text{s})$	124.6	26.2	11.7
Avg. offset w.r.t. C04/precision(μs)	-14.1/2.4	14.0/1.7	10.4/0.5
Standard derivation w.r.t. C04(μs)	101.8	61.8	25.6

图 2 不同时期 INT1 的 ΔUT1 观测值相对于 C04 的时间序列Fig. 2 Time series of ΔUT1 obtained from INT1 observations w.r.t. C04

4 目前不同加强类型以及余山站观测之间的比较

我们采用 2000 年以后的 INT1、INT2 和 INT3 观测数据分析比较了不同观测网解算 ΔUT1 的情况。观测数据包括 2374 个 INT1 观测，632 个 INT2 观测和 112 个 INT3 观测。INT3 的观测主要由 3 站参加，为了便于比较，非 3 站的观测被剔除；由于 2011 年日本大地震后 Tsukuba 台站的剧烈运动变化，因此该台站地震后的 INT2 和 INT3 观测也未被包含在分析中。这里再说明一下，INT1 在周一到周五观测，每周 5 次；INT2 在周末两天观测，每周两次；INT3 在每周一观测。在每天的观测时间段上相互间没有重叠。解算得到的 ΔUT1 相对于 C04 的时间序列见图 3，采用前述相同的内插方式将 C04 内插到 ΔUT1 解算时刻，结果的统计信息见表 3。从图 3 可以发现 INT2、INT3 与 C04 之间存在显著的趋势性差异，加权拟合得到该趋势项大约是每年 $5 \mu\text{s}$ ，而 INT1 相对 C04 基本是平稳变化的。从解算的精度上来看，虽然 INT1 和 INT2 都是单基线观测，但是 INT2 的平均观测数明显多于 INT1，因此形式误差和均方差都好于 INT1。INT3 3 站观测的观测数明显增加，但是估计的 ΔUT1 相对于 C04 的平均偏差达到了 $31 \mu\text{s}$ ，这可能与 INT3 中存在一条南北向的基线 Wettzell-Ny-Ålesund，极移的误差对 UT1 测量的影响变大有关。

2011 年上海余山站首次参加了 6 次 INT3 观测，均是由 Wettzell、Ny-Ålesund 和 Seshan 组成的 3 站观测 (Tsukuba 站的观测被剔除)，该 6 次观测处理得到的结果见表 4。其中 11JUL04XK 这次观测估计得到的 ΔUT1 值与 C04 的偏差异常，达到 $186 \mu\text{s}$ ，其它 5 次的观测结果在图 3 中用空心的圆圈表示。11JUN20XK 这次的观测量只有 14 个，因为这次 Ny-Ålesund 站没有观测，实际上是单基线的观测。这 6 次观测的观测量明显比常规

INT3 的 3 站观测的平均数 70 个少, 形式误差也稍差。但是, ΔUT1 的估计值与 C04 序列的一致性还是很好的, 除了 11JUL04XK 这次异常值以外, ΔUT1 的平均偏差为 $11 \mu\text{s}$, 离散度为 $16 \mu\text{s}$, 该精度与常规的加强观测的精度相当。

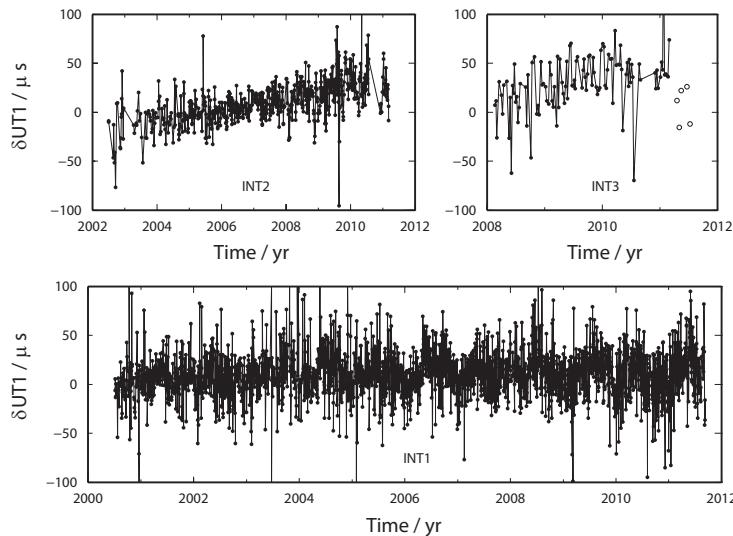


图 3 3 种加强观测确定的 ΔUT1 相对于 C04 的时间序列

Fig. 3 Time series of ΔUT1 obtained from three types of Intensive observations w.r.t. C04

表 3 INT1、INT2、INT3 测量 ΔUT1 的比较

Table 3 Comparison of the results from different Intensive types

	Avg. number of scans per session	Avg. normal error (μs)	Avg. offset/precision w.r.t. C04(μs)	Standard deviation w.r.t. C04(μs)
INT1	20.9	11.7	10.4/0.5	25.6
INT2	29.7	10.3	10.3/0.9	21.4
INT3	70.2	8.6	31.0/2.8	28.3

表 4 余山站 6 次 INT3 观测的 ΔUT1 及其精度

Table 4 The results from 6 INT3 observations relating to the Seshan station

Session name	Number of scans	Normal error(μs)	Offset w. r. t. C04(μs)
11APR18XK	37	11.5	12.0
11MAY02XK	43	24.1	-15.0
11MAY16XK	39	22.7	22.2
11JUN20XK	14	18.4	26.2
11JUL04XK	33	38.3	186.0
11JUL11XK	41	7.8	-11.7

5 结论

目前 IVS 加强观测已经实现了每天的快速监测，在监测 UT1 的变化上起到了很好的作用。在 IERS 给出的 EOP 预报和综合序列 (Bulletin A、Bulletin B 和 C04) 中，IVS 加强观测确定的 ΔUT1 都是重要的输入数据源¹，充分体现了加强观测的重要意义。从加强观测的历史来看，在 2000 年后加强观测的基线长度和精度有了很大的提高，形式精度在 $10 \mu\text{s}$ 的水平上，与 C04 比较后可以发现，目前加强观测得到的 ΔUT1 精度在 $20 \mu\text{s}$ 的水平。经过比较不同基线和不同类型加强观测的分析结果，发现 ΔUT1 观测值依赖于观测的基线，同一基线的观测（如 INT2 和 INT3）结果较一致；而不同基线的测量结果的差异明显，如 INT1 的不同时期的观测，2000 年后 INT1 和 INT2 的差异。从 ΔUT1 估计值的序列来看，INT1 观测资料最多时间最长，与 C04 的一致性很好，INT2 和 INT3 都有一些漂移；精度上 INT2 好于其它两者。

由于日本大地震之后 Tsukuba 站的不规律运动，目前 INT2 每周两次的观测已有一次改由 INT1 的单基线来完成，Tsukuba 站同时参与观测的 INT3 也将受到影响。上海佘山站因此加入了 INT3 观测，虽然刚参与加强观测，观测数要比常规 INT3 观测的少，但是从分析的结果来看，佘山站参与观测的 ΔUT1 估计结果的精度与常规加强观测的相当。

通过对加强观测的分析可以有如下结论：不同基线的 ΔUT1 测量结果会存在系统性偏差；INT1 的 ΔUT1 测量结果与 C04 符合得较好；佘山站参与 UT1 加强观测的结果与其它台站的结果处于相同水平；总体上目前 IVS 的 UT1 加强观测结果与 C04 之间存在 $10 \mu\text{s}$ 水平的不确定性。

参 考 文 献

- [1] Schlüter W, Behrend D. JGeod, 2007, 81: 379
- [2] Schuh H, Böhm J, Englisch S, et al. In proceedings of XXVIIth IAU General Assembly, 2009
- [3] Luzum B, Nothnagel A. JGeod, 2010, 84: 399
- [4] Robertson D S, Carter W E, Campbell J, et al. Natur, 1985, 316: 424
- [5] Eubanks T M, Archinal B A, Carter M S, et al. IERS Technical Note 17, 1994, R65
- [6] Nothnagel A, Schnell D. JGeod, 2008, 82: 863
- [7] Baver K, MacMillan D, Petrov L, et al. In proceedings of IVS 2004 General Meeting, 2004: 394
- [8] Baver K, Gipson J. In proceedings of IVS 2010 General Meeting, 2010: 256
- [9] Hobiger T, Koyama Y, Böhm J, et al. AdSpR, 2009, 43: 910
- [10] Böhm J, Nillson T, Schuh H. In proceedings of IVS 2010 General Meeting, 2010: 251
- [11] Böhm J, Hobiger T, Ichikawa R, et al. JGeod, 2010, 84: 319
- [12] Nilsson T, Böhm J, Schuh H. JGeod, 2011, 85: 415
- [13] Matsuzaka S, Shigematsu H, Kurihara S, et al. In proceedings of IVS 2008 General Meeting, 2008: 68
- [14] Sekido M, Takiguchi H, Koyama Y, et al. AdSpR, 2008, 60: 865
- [15] Hobiger T, Otsubo T, Sekido M, et al. AdSpR, 2010, 62: 933

¹IERS Bulletin A and B: <http://hpiers.obspm.fr/eoppc/bul/bulb/explanatory.html>;

IERS Bulletin B: <http://hpiers.obspm.fr/iers/bul/bulb/explanatory.html>;

IERS C04: <ftp://hpiers.obspm.fr/iers/eop/eopc04/C04.guide.pdf>

- [16] Altamimi Z, Collilieux X, Métivier L. JGeod, 2011, 85: 457
[17] Fey A, Gordan D, Jacobs C S. IERS Technical Note 35, 2009

The Analysis of UT1 Determined by IVS Intensive Observations

WANG Guang-li¹ XU Ming-hui^{1,2}

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

(2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*)

ABSTRACT We briefly reviewed the history and status of the IVS (International VLBI Service for Astrometry and Geodesy) Intensive observations, and investigated the deficiencies and the error sources in the current Intensive observations. We carried out an in-depth analysis of the IVS Intensive data from February 1984 to August 2011 with different observation networks, and discussed the progress of the UT1 accuracy determined during this period. By comparing with UT1 results from different networks, we have found the difference with some dozens of microseconds between different networks. The results from the IVS Intensive observations with Seshan station showed the similar performance as other stations. Finally, from the comparison and analysis of different UT1 series, we concluded that there is an uncertainty with a level of 10 microseconds between UT1 estimations obtained from the IVS Intensive observations and from the IERS (International Earth Rotation Service) C04.

Key words astrometry, earth, time, method: data analysis