

IGS RTS 产品数据中断修复方法研究

臧建飞¹ 范士杰¹ 秦学彬² 陈冠旭¹ 华 亮¹

1 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院,青岛市长江西路 66 号,266580
2 东方地球物理公司大港物探处测量设备服务中心,涿州市范阳西路 189 号,072751

摘 要:针对 IGS RTS(real time service)实时数据流产品难以避免的数据中断现象,开展了 RTS 数据中断修复方法研究,提出“插值修复”方法。在对 RTS 数据中断的区间分布进行统计分析的基础上,选取 15 min 为可修复的最大数据中断区间;采用常用的拉格朗日插值方法进行 RTS 轨道数据中断修复,对不同阶数的插值修复效果进行比较;提出新的基于 RTS 改正的精密卫星钟差计算方法,采用拉格朗日插值、三次样条插值、线性插值和线性拟合等方法进行 RTS 钟差数据中断修复和结果对比;最后利用 IGS 跟踪站观测数据和修复后的 RTS 产品,进行静态模拟动态的准实时 PPP 实验,对“插值修复”方法的效果和 PPP 定位精度进行验证。

关键词:IGS RTS 产品;实时数据流;数据中断;插值修复;精密单点定位
中图分类号:P228 **文献标识码:**A

针对 IGS 及其各分析中心发布的实时数据流改正,国内外学者分别进行了 RTS 产品的精度分析^[1-2]和基于 RTS 产品的实时 PPP^[3-6]、实时 GNSS 水汽提取^[7-10]等研究。然而,由于网络传输等各种不确定性因素,致使 IGS 等实时数据流产品难以避免地存在数据不连续或者中断现象^[1],严重影响了 PPP 数据处理和定位精度。本文对 IGS RTS 产品的数据中断和可用性进行统计分析,并寻求数据中断后的应对措施。利用 BNC 软件接收 4 种 RTS 综合产品(IGC01、IGS01、IGS02 和 IGS03),对基于广播星历计算的卫星轨道和钟差进行改正,然后对基于 RTS 改正的实时精密卫星轨道和钟差数据的稳定性和中断现象进行统计分析。在此基础上,选取 15 min 为中断修复的最大时间窗口,提出“插值修复”的方法,分别采用拉格朗日插值、三次样条插值、线性插值和线性拟合等多种方法进行“插值修复”实验和结果对比。最后,利用 IGS 跟踪站观测数据和修复的 RTS 精密轨道和钟差数据,进行静态模拟动态的快速准实时精密单点定位实验,对“插值修复”方法的效果和 PPP 定位精度进行验证。

1 RTS 产品数据中断分析

对 IGS RTS 4 种综合产品的稳定性进行统计分析。利用 BNC 软件接收了 2014-12-28 ~

2015-01-10 共 14 d 的 RTS 数据,其中 IGC01 和 IGS01 的轨道、钟差采样间隔均为 5 s,IGS02 和 IGS03 的轨道采样间隔为 60 s,钟差采样间隔为 10 s。本文以 4 种产品的钟差为例,对各产品可用数据率(即实际接收数据量与应接收数据量的比值)分卫星进行统计。在统计过程中,没有考虑卫星整日无数据记录的情况,结果如图 1 所示。

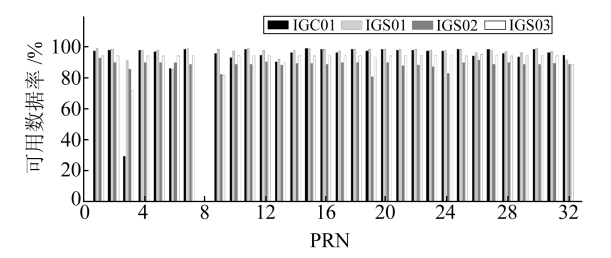


图 1 IGC01、IGS01、IGS02 和 IGS03 产品的可用数据率
Fig. 1 The available data rate of IGC01, IGS01, IGS02, and IGS03 products

从图 1 可以看出,除 PRN3、PRN6 卫星外,IGC01 和 IGS01 的数据完整性均优于 IGS02 和 IGS03,IGS02 的数据完整性整体上不如其他 3 种产品。对 4 种 RTS 产品连续 14 d 的数据进行统计分析后发现,IGS01 的可用数据率最高,达到 97.12%;IGC01 和 IGS03 次之,分别为 94.46% 和 94.00%;IGS02 产品最差,可用数据率仅为 88.47%。

图 2 给出了 2015-01-08 IGC01 和 IGS01 产

品的数据中断分布情况。从图 2 可以看出,数据中断分布并无一定的规律,且会出现连续若干个历元整体数据丢失的现象。对比两种产品发现,不同产品的数据中断分布也不一致。造成 RTS 产品数据中断的原因可能与数据发布站点有关,也可能与网络传输有关。

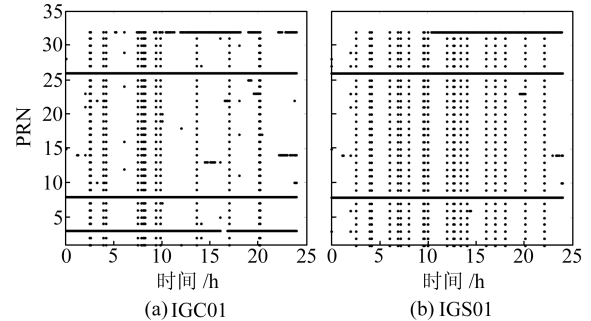


图 2 IGC01 和 IGS01 产品的数据中断分布 (2015-01-08)

Fig. 2 The distribution of data interruptions in IGC01 and IGS01 products(2015-01-08)

为分析 IGC01 和 IGS01 产品的数据中断分布特性,按照 5 min 的间隔将中断长度划分为 0~5 min、5~10 min、10~15 min 等 13 个区间,并分别统计各区间的数据中断个数占总中断个数的百分比。结果表明,5 min 以内的数据中断所占比例(IGC01 为 95.2%,IGS01 为 95.8%)最高,而超过 5 min 的中断相对较少,因此对 5 min 以内的数据中断进行修复应该就可以达到连续 PPP 的目的。但是,对 RTS 产品的数据中断分析发现,有可能出现所有卫星全部数据丢失超过 5 min 的现象(如图 2(a) 08:03:25~08:12:25 区间),因此本文尝试对 15 min 以内的数据中断(占比约为 97%)进行修复。

2 RTS 产品数据中断修复

由于卫星钟差包含随时间累积的随机变化以及白噪声特性,即使是短期预报,基于多项式拟合的外推钟差的精度也不甚理想^[1]。因此,本文提出了“插值修复”方法,适当增加产品延时,以确保 RTS 数据中断修复的精度。

仍以 IGC01 和 IGS01 产品为例进行 RTS 数据中断修复方法的实验和分析。在“插值修复”过程中,插值样本数据间隔的选取至关重要。当数据中断区间较长时,若选取的插值样本数据间隔太小,则无法准确反映卫星轨道和钟差的变化趋势,容易产生较大的插值误差;若插值样本数据间隔太大,则会降低 RTS 数据的时效性,增加产品延时,影响 PPP 技术的实时或准实时应用。经过

多次实验,本文所采取的处理策略为:以 RTS 数据中断间隔的 1/3 作为插值样本数据的间隔,分别从数据中断的两端按照该间隔大小选取插值样本数据。当插值样本数据间隔所对应的节点上没有数据时,则选取节点前后的数据。若仍然无法满足插值计算的需求,则增大插值样本数据间隔,重新选取样本数据。当插值样本数据的间隔超过中断修复范围(如 15 min)时,则放弃当前历元的数据修复。

2.1 RTS 轨道产品的数据中断修复

本文采用目前常用的拉格朗日插值方法对 RTS 轨道数据中断进行修复。首先利用 IGC01、IGS01 实时轨道产品,将其恢复成精密的卫星坐标^[4];然后按照上述处理策略,对 15 min 内的坐标数据中断进行修复;最后以 IGS 最终产品为参考值,对“插值修复”后的 RTS 轨道产品进行精度评价,以间接验证插值修复的效果。

拉格朗日插值的阶数不仅关系到插值修复的精度,而且会影响到 RTS 产品的时延长短。以 IGC01 为例,分别采用不同阶数的拉格朗日插值对轨道数据中断进行修复,并对所有卫星插值修复后的 RTS 轨道数据相对于 IGS 最终轨道产品的坐标(X,Y,Z)偏差进行误差统计,其均方根差(RMS)的平均值见表 1。从表 1 可以看出,采用 6 阶以上的拉格朗日插值均能取得比较理想的结果。当插值的阶数为 7 阶时,插值修复后的 RTS 轨道产品在 X、Y、Z 方向的精度(RMS)均优于 3 cm,这与 RTS 产品的标称精度相当;继续增加插值的阶数,卫星轨道坐标的精度并没有显著变化,且插值阶数越高,时延越长。因此,考虑到 RTS 产品的时效性,本文建议选用 7 阶拉格朗日插值对 RTS 轨道产品的数据中断进行修复。

表 1 插值修复后的 IGC01 轨道产品
所有卫星坐标的平均精度(RMS)

Tab. 1 The RMS of all satellite coordinates from repaired IGC01 orbit product			
阶数	RMS/m		
	X	Y	Z
5	0.269	0.248	0.163
6	0.052	0.070	0.034
7	0.027	0.026	0.025
8	0.029	0.026	0.025
9	0.027	0.026	0.025
10	0.030	0.028	0.027
11	0.027	0.026	0.027
12	0.028	0.029	0.026

利用 7 阶拉格朗日插值,对 IGS01 轨道产品的数据中断进行修复处理,同样以 IGS 最终产品为参考值,对“插值修复”后的轨道坐标进行精度

评价。由于 IGS01 轨道产品是相对于卫星天线相位中心的,而 IGS 最终产品参考的是卫星质心,需将 IGS 最终产品转换到相位中心,然后再进行 IGS01 轨道坐标的精度验证^[11]。图 3 给出了插值修复后的 IGS01 轨道产品分卫星的坐标精度(RMS)统计。从图 3 可以看出,除 PRN 32 卫星 3 个坐标方向 RMS 均大于 5 cm 以外,其余卫星各方向上的 RMS 均在 4 cm 以内;所有卫星 X、Y、Z 3 个方向 RMS 的平均值分别为 2.7 cm、2.6 cm 和 2.4 cm,与表 1 中 IGC01 轨道产品的处理结果基本一致。

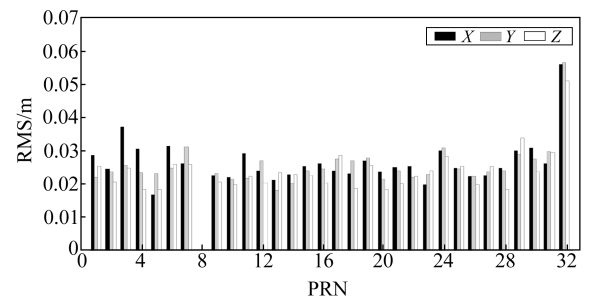


图 3 插值修复后 IGS01 轨道产品
所有卫星的坐标精度(RMS)

Fig. 3 The RMS of X,Y and Z coordinate component
for every satellite with repaired IGS01 orbit product

2.2 RTS 钟差产品的数据中断修复

利用 RTS 钟差产品,直接将其恢复成精密的卫星钟差^[4],由于受 RTS 钟差产品系统误差的影响,变化比较剧烈,直接进行插值处理容易产生较大的插值误差。因此,本文提出新的基于 RTS 改正的精密卫星钟差计算方法,即首先扣除 RTS 钟差产品中系统误差的影响,然后再利用扣除系统误差后的卫星钟差改正计算精密卫星钟差。具体的计算公式如下:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sum_{i=1}^n dt_i^j}{n} \quad (1)$$

$$\bar{dt}_i^j = dt_i^j - \bar{\varepsilon} \quad (2)$$

$$\Delta t_i^j = t_{\text{broadcast } i}^j + \frac{\bar{dt}_i^j}{c} \quad (3)$$

式中, dt_i^j 为 i 历元第 j 颗卫星的实时钟差改正值; n 为 i 历元的有效卫星个数; $\bar{\varepsilon}$ 为 i 历元所有卫星钟差改正值的平均值,基本反映了 RTS 产品的系统误差大小; \bar{dt}_i^j 为 i 历元第 j 颗卫星扣除系统误差后的钟差改正值; $t_{\text{broadcast } i}^j$ 为 i 历元由广播星历计算得到的第 j 颗卫星的钟差值; c 为光速; Δt_i^j 为 i 历元第 j 颗卫星新的精密钟差值。

采用上述方法计算得到的精密卫星钟差序列的变化较为平缓,适合 RTS 钟差产品数据中断的

插值修复处理。卫星钟差的变化比轨道变化复杂得多,因此本文采用多种插值方法进行 RTS 钟差产品数据的中断修复处理,以寻求最优方案。

以 IGC01 产品为例,分别采用拉格朗日插值、三次样条插值、线性插值和线性拟合等方法,对 RTS 钟差产品的数据中断进行修复处理,并采用二次差的方法^[2]与 IGS 最终产品进行比较和精度评价。表 2 给出了基于不同插值方法修复的 IGC01 产品所有卫星钟差相对于 IGS 最终产品的精度(RMS)统计。其中拉格朗日插值方法只选用了奇数阶,主要是因为当插值阶数为奇数时,插值点正好位于插值区间的中间,可以提高插值的精度。从表 2 可以看出,采用 3 阶或 5 阶拉格朗日插值均可取得比较理想的中断修复效果,所有卫星钟差的 RMS 均在 0.3 ns 以内,RMS 均值为 0.17 ns;而 7 阶拉格朗日插值修复的精度有所下降,这可能与卫星钟差的短期复杂变化有关。直接利用中断区间两端数据进行线性插值的效果最差,RMS 的最大值达到 3.52 ns。线性拟合、三次样条函数插值方法与 3 阶或 5 阶拉格朗日插值的精度相当,其中,线性拟合是利用 3 阶拉格朗日插值的数据,采用最小二乘法确定的最佳拟合直线,其拟合效果比曲线插值方法更加平滑,这可能与卫星钟差序列呈近似线性变化有关。因此,建议采用线性拟合方法,对 RTS 钟差产品的数据中断进行修复处理。

表 2 不同插值方法修复的 IGC01 产品
卫星钟差的精度(RMS)统计

Tab. 2 The RMS of all satellite clock offsets from the
repaired IGC01 product using different interpolation methods

插值方法		RMS/ns		
		平均值	最大值	最小值
拉格朗日插值	3 阶	0.17	0.29	0.11
	5 阶	0.17	0.28	0.12
	7 阶	0.23	0.39	0.12
线性插值		0.32	3.52	0.13
三次样条插直		0.16	0.28	0.11
线性拟合		0.16	0.27	0.11

采用线性拟合方法,对 IGS01 钟差产品的数据中断进行处理,同样以 IGS 最终产品为参考值进行精度评价。图 4 为插值修复前、后 IGS01 产品各卫星钟差的精度(RMS)对比。可以看出,除 PRN 3 卫星外,其余各卫星修复前、后卫星钟差的 RMS 均在 0.3 ns 以内,RMS 均值为 0.20 ns,与 IGC01 产品处理结果基本一致。PRN 3 卫星修复前、后的 RMS 均超过 1 ns,说明是由于 IGS01 钟差数据本身造成,并非是插值修复产生,这可能与 PRN 3 的卫星钟不稳定有关。

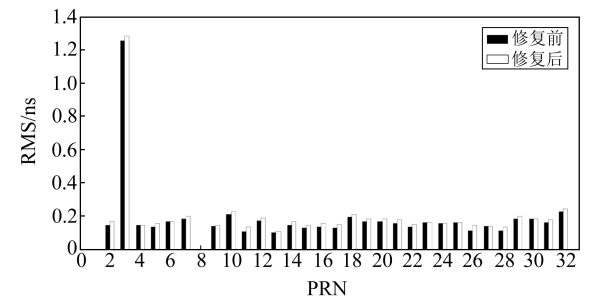


图 4 插值修复前、后 IGS01 产品各卫星钟差的精度(RMS)对比

Fig. 4 The comparison of RMS of every satellite clock offsets with the original and repaired IGS01 products

3 基于 RTS 改正的快速准实时精密单点定位

为进一步说明 RTS 产品数据中断修复的必要性以及验证“插值修复”方法得到的 RTS 产品的定位效果,对 IGS 跟踪站(BJFS)2015-01-07 的观测数据(采样间隔为 30 s)进行静态模拟动态的快速准实时 PPP 处理。以 IGS 公布的精确站点坐标为参考,求取单历元 PPP 解在 N 、 E 、 U 3 个方向的偏差,并对其进行误差统计和分析。

首先利用本文提出的“插值修复”方法,对 2015-01-07 RTS 实时轨道和钟差产品进行处理;然后,分别利用修复前、后的 IGS01 产品进行动态 PPP 处理,结果如图 5 所示。从图 5 可以看出,采用原始的 IGS01 实时轨道和钟差产品进行 PPP 处理时,由于原始数据中存在多处所有卫星数据的整体中断,导致 PPP 定位中断,且在重新获得改正数后,有个重新初始化的过程(图 5(a))。虽然在发生中断后可采用 SPP(standard point positioning)继续定位,但是其定位精度较低;而采用修复后的 IGS01 轨道和钟差产品,则可以很好地进行连续 PPP 处理,且定位结果较为稳定(图 5(b))。

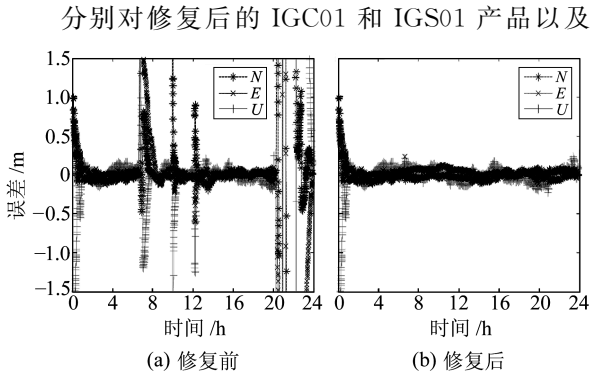


图 5 采用修复前、后的 IGS01 产品的动态 PPP 结果

Fig. 5 The results of kinematic PPP based on the original and repaired IGS01 products

IGS 最终产品、IGU(实测部分)产品的动态 PPP 结果进行精度评价。以 IGS 发布的 BJFS 站点坐标为真值,对 PPP 相位模糊度收敛后 N 、 E 、 U 方向的坐标偏差进行误差统计,结果见表 3。从表 3 可以看出:1)采用 IGS 最终产品的 PPP 结果最优,但是其时延最长(12~18 d)。2)采用 IGC01 和 IGS01 产品的 PPP 结果基本一致,其平面位置精度(RMS)约为 5 cm,高程精度(RMS)约为 8 cm。当 RTS 实时数据流产品没有发生数据中断时,为实时 PPP 处理;而当 RTS 数据产生中断时,按照本文方法,其 PPP 处理的时延最长仅为 45 min。3)基于 IGU(实测部分)产品的 PPP 结果的平面位置精度与 IGC01 和 IGS01 产品基本相当,高程方向的精度稍差(RMS 为 9.5 cm),其时延为 3~9 h。

表 3 不同 IGS 产品的动态 PPP 结果的精度统计

Tab. 3 The accuracy statistics of kinematic PPP using different IGS products

		IGC01 /cm	IGS01 /cm	IGS-Final /cm	IGU /cm
N	最小值	-7.3	-11.0	-4.6	-18.5
	最大值	24.4	8.4	3.6	21.4
	平均值	1.2	-1.5	-0.4	-0.7
	RMS	5.1	4.4	1.3	5.0
E	最小值	-18.5	-11.8	-5.3	-14.5
	最大值	10.2	13.3	7.0	19.0
	平均值	-0.0	2.1	2.0	1.0
	RMS	4.7	5.0	2.8	4.8
U	最小值	-23.8	-21.9	-9.9	-37.6
	最大值	26.4	23.8	12.0	33.1
	平均值	-0.4	0.9	-0.4	-2.3
	RMS	7.7	8.1	3.6	9.5

4 结 语

以 IGC01 和 IGS01 为例,利用连续 14 d 的 RTS 数据,详细分析了 RTS 产品的数据中断现象和区间分布情况。在此基础上,分别采用拉格朗日插值、线性拟合等方法对 RTS 轨道和钟差产品的数据中断进行修复实验和结果比较。最后利用 IGS 跟踪站(BJFS)观测数据,采用修复后的 IGC01 和 IGS01 产品、IGS 最终产品以及 IGU(实测部分)产品进行静态模拟动态的 PPP 处理和精度评价。结果表明:1)目前 RTS 产品的数据中断大部分在 5 min 以内,15 min 以内的数据中断约占 97%;2)以 IGS 事后最终轨道(15 min 间隔)和钟差(30 s 间隔)产品为参考,采用 7 阶拉格朗日插值方法修复得到的 RTS 轨道产品在 X 、 Y 、 Z 方向的精度(RMS)均优于 3 cm;3)基于 3 阶拉格朗日插值数据的线性拟合方法的修复结果比曲线插

值方法更加平滑,修复后的 RTS 卫星钟差优于 0.3 ns;4)“插值修复”处理的 RTS 产品的精度与其标称精度相当,静态模拟动态的快速准实时 PPP 的平面位置精度约为 5 cm,高程精度约为 8 cm。

“插值修复”方法极大地改善了 RTS 数据的可用性,兼顾了 PPP 连续定位的精度和时效性。但是,“插值修复”方法增加了 RTS 产品的延时,在一定程度上破坏了 PPP 的实时性。因此,RTS 产品数据中断的实时修复方法是本文下一步研究的重点。

参考文献

[1] Hadas T, Bosy J. IGS RTS Precise Orbits and Clocks Verification and Quality Degradation Over Time[J]. GPS Solutions, 2014, 19(1): 93-105

[2] 尹倩倩,楼益栋,易文婷. IGS 实时产品比较与分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2013, 32(6): 123-128(Yin Qianqian, Lou Yidong, Yi Wenting. Comparison and Analysis of IGS Real-Time Products[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2012, 32(6): 123-128)

[3] Chen J P, Li H J, Wu B, et al. Performance of Real-Time Precise Point Positioning [J]. Marine Geodesy, 2013, 36(1): 98-108

[4] 王胜利,王庆,高旺,等. IGS 实时产品质量分析及其在实时精密单点定位中的应用[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2013, 43(增 2): 365-369(Wang Shengli, Wang Qing, Gao Wang, et al. Quality Analysis of IGS Real-Time Products and Its Application in Real-Time Precise Point Positioning [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edi-

tion, 2013, 43(S2): 365-369)

[5] 刘志强,王解先. 广播星历 SSR 改正的实时精密单点定位及精度分析[J]. 测绘科学, 2014, 39(1): 15-19 (Liu Zhiqiang, Wang Jiexian. Realization and Analysis of Real-Time Precise Point Positioning Based on SSR Broadcast Ephemeris Corrections[J]. Science of Surveying and Mapping, 2014, 39(1): 15-19)

[6] Elsobeiey M, Al-Harbi S. Performance of Real-Time Precise Point Positioning Using IGS Real-Time Service[J]. GPS Solutions, 2016, 20(3): 565-571

[7] Shi J, Xu C, Li Y, et al. Impacts of Real-Time Satellite Clock Errors on GPS Precise Point Positioning-Based Troposphere Zenith Delay Estimation[J]. Journal of Geodesy, 2015, 89(8):747-756

[8] Yuan Y B, Zhang K F, Rohm W, et al. Real-Time Retrieval of Precipitable Water Vapor from GPS Precise Point Positioning[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2014, 119(16): 10 044-10 057

[9] Shi J B, Xu C Q, Guo J M, et al. Local Troposphere Augmentation for Real-Time Precise Point Positioning [J]. Earth, Planets and Space, 2014, 66(1): 1-13

[10] Shi J B, Xu C Q, Guo J M, et al. Real-Time GPS PPP Based Precipitable Water Vapor Estimation for Rainfall Monitoring and Forecasting[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(6): 3 452-3 459

[11] 时小飞,高成发,潘树国,等. 全球定位系统实时服务数据的精度分析[J]. 导航定位学报, 2013, 1(4): 84-88(Shi Xiaofei, Gao Chengfa, Pan Shuguo, et al. Accuracy Analysis of GPS Real-Time Service Data[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2013, 1(4): 84-88)

Research on Repairing Method for the Data Interruptions of IGS RTS Products

ZANG Jianfei¹ FAN Shijie¹ QIN Xuebin² CHEN Guanxu¹ HUA Liang¹

1 School of Geosciences, China University of Petroleum, 66 West-Changjiang Road, Qingdao 266580, China

2 Survey Center of BGP Offshore, CNPC, 189 West-Fanyang Road, Zhuozhou 072751, China

Abstract: This paper first analyzed the data interruptions of RTS (real time service) products, and second carries on research into methods of repairing of these disruptions. According to statistics on the interval distribution of these data interruptions, the maximal repairable interval of 15 min is selected. Then, the data interruptions less than 15 min are repaired with different interpolation methods. The satellite orbit data interruptions are repaired using the common Lagrange interpolation with different orders. In order to explore the optimal solution, the satellite clock data interruptions are repaired with the Lagrange interpolation, cubic spline interpolation, linear interpolation and linear fitting, respectively. Finally, an experiment of simulative near real-time PPP on the IGS station is conducted using the repaired RTS orbit and clock products to verify the proposed method.

Key words: IGS RTS product; real-time data stream; data interruption; interpolation repairing; precise point positioning