

Performance Analysis of Short Baseline Integer PPP (IPPP) for Time Comparison

Young Kyu Lee[†], Sung-hoon Yang, Ho Seong Lee, Jong Koo Lee, Sang-wook Hwang, Joon Hyo Rhee

Time and Frequency Group, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon 34113, Korea

ABSTRACT

In order to synchronize a remote system time to the reference time like Coordinated Universal Time (UTC), it is required to compare the time difference between the two clocks. GNSS Precise Point Positioning (PPP) is one of the most general geodetic positioning methods and can be used for time and frequency transfer applications which require more precise time comparison performance than GNSS code. However, the PPP technique has a main drawback of day-boundary discontinuity which comes from the PPP model that the code measurements are applied to resolve the floating carrier-phase ambiguities. The Integer PPP (IPPP) technique is one of the methods which has been studied to compensate the day-boundary discontinuities existed in the conventional PPP. In this paper, we investigate the time and frequency capabilities of PPP and IPPP by using the measurement data obtained from two time transfer receivers which are closely located and using common reference 1 Pulse Per Second (PPS) and RF signals. From the experiment, it is investigated that the IPPP method can effectively compensate the day-boundary discontinuities without producing frequency offset. However, the PPP method can generating frequency offset which can severely degrade the time comparison performance with long-term period data.

Keywords: GNSS, PPP, IPPP, time transfer, system time

1. INTRODUCTION

GNSS 위성 항법시스템을 이용한 정밀단독측위 (PPP: Precise Point Positioning)는 기하학적인 (geodetic) 위치 추정 방법으로, International GNSS Service (IGS)에서 제공하는 정밀 궤도력 및 위성 클락 정보 등을 사용하여 코드 보다 정밀한 반송파를 사용하여 수신기의 위치를 추정한다. PPP 방식은 정밀 위치 추정뿐만 아니라 시각 및 주파수 전송에서도 널리 사용하고 있다 (Defraigne & Bruyninx 2007, Petit & Jiang 2008). 하지만 PPP를 시각 및 주파수 전송에 사용하는데 있어서의 단점 중 하나

는 일간점프 (day-boundary discontinuity)가 발생한다는 것이다. 일간점프는 PPP 처리가 하루 데이터 단위로 이루어지는 데에서 기인하는 것으로, floating 반송파 미지정수와 수신기 코드 에러를 분별하는데 코드 측정치를 사용하는 데에서 발생한다 (Defraigne & Bruyninx 2007, Senior et al. 2008). PPP에 존재하는 일간점프의 크기는 Root Mean Square (RMS) 관점에서 수신기가 위치한 스테이션에 따라서 수백 ps에서 ns 이상의 값을 가질 수 있다 (Ray & Senior 2005). 이러한 크기는 수 us에서 수 백 ns 정도의 시각비교를 요구하는 일반적인 응용분야 (예를 들면, 통신망, 전력망 등과 같은 비 항법시스템)에서는 큰 문제가 되지 않지만 ns 이하를 요구하는 항법시스템에 있어서는 시각동기 성능에 커다란 영향을 미칠 수 있다. 따라서, 항법시스템과 같은 고정밀의 시각비교 및 동기를 요구하는 분야에서는 PPP 방식에 존재하는 일간점프를 보상하기 위한 방법이 필요하다. 기존의 PPP 방식에 존재하는 일간점프를 보상하기 위한 방법 중 하나로 정수 미지정수를 사용하는 Integer PPP (IPPP) 방식이 있다. IPPP는 반송파 미지정수를 구할 때 기존의 PPP 방식과는 다르게 반송파와 코드 하드웨어 바이어스들을 분리하고 반송파 미지정수의 정수 성질을 보존하는 모델을 사용한다 (Ge et al. 2007, Bertiger et al. 2010, Geng et al. 2012, Lannes & Prieur 2013, Shi & Gao 2014).

Received Oct 19, 2021 Revised Oct 27, 2021 Accepted Nov 09, 2021

[†]Corresponding Author

E-mail: ykleeks@kriss.re.kr

Tel: +82-42-868-5569 Fax: +82-42-868-5569

Young Kyu Lee <https://orcid.org/0000-0003-2753-5227>

Sung-hoon Yang <https://orcid.org/0000-0002-0207-0470>

Ho Seong Lee <https://orcid.org/0000-0001-6416-2162>

Jong Koo Lee <https://orcid.org/0000-0001-6880-9189>

Sang-wook Hwang <https://orcid.org/0000-0002-7409-2409>

Joon Hyo Rhee <https://orcid.org/0000-0001-7304-3624>

본 논문에서는 IPPP 프로세싱을 위해 Integer Recovery Clock 모델을 사용하는 GINS-PC 소프트웨어 (Marty 2013)를 이용하여 구한 결과와 기존의 PPP 결과와의 성능을 타임 안정도 측면에서 비교하였다. 공통 클락 근거리 시각비교를 위해서 두 대의 수신기는 동일한 실험실에서 운용하고, 안테나는 수 미터 이내에 위치하며 UTC(KRIS)의 기준 초펄스 (1 PPS: Pulse Per Second) 및 10 MHz의 RF 신호를 분배 증폭기를 통해 인가해 주었다. 실험 결과, IPPP의 경우에는 외삽을 통해 일간점프 값을 보상하면 효과적으로 보상이 이루어져 시각비교 성능이 향상되는 것을 관찰하였다. 하지만, PPP의 경우에는 일간점프를 보상한 여러 날의 데이터를 사용했을 때 주파수 오프셋이 발생하여 오히려 일간점프를 보상하지 않았을 때 보다도 시각비교 성능이 저하되는 것을 관찰하였다.

본 논문의 제 2장에서는 IPPP 방식에 대한 기본적인 이론 및 IPPP를 처리하기 위해 사용된 소프트웨어에 대해서 기술한다. 제 3장에서는 실험실에서 운영 중인 두 대의 GNSS 시각비교 데이터에 대한 기존의 PPP 방식 및 IPPP 방식에 대한 시간 안정도 비교 결과를 나타내고, 마지막으로 제 4장에서 결론을 맺는다.

2. DESCRIPTION OF IPPP METHOD

2.1 Basic Theory

IPPP에서는 반송파 모호정수를 구하기 위해서 2 단계 방식을 사용한다 (Laurichesse et al. 2009). 먼저, 첫번째 단계에서는 Melbourne-Wubben (MW) 선형 조합을 이용하여 Wide-Lane (WL) 미지정수를 산출하는 것으로, 수신기 측정 데이터와 WL 위성 바이어스 (WSB: Wide-lane Satellite Biases)를 사용하여 전처리 레벨에서 이루어지며, MW 선형 조합 L_{MW} 은 식 (1)과 같이 표현된다 (Shi & Gao 2014).

$$L_{MW} - b_r^{MW} + b_s^{MW} = -\lambda_{WL}N_{WL} + \xi_{MW} \quad (1)$$

여기서, $\lambda_{WL} = c / (f_1 - f_2) (\approx 86 \text{ cm})$, 광속도 $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$, $f_1 = 154f_0$, $f_2 = 120f_0 (f_0 = 10.23 \text{ MHz})$, $N_{WL} = N_1 - N_2$, ξ_{MW} 는 반송파 측정잡음이고, wide-lane 수신기 바이어스(WRB), b_r^{MW} 는 식 (2)와 같다.

$$b_r^{MW} = (\alpha_1^{WL} b_r^{L1} + \alpha_2^{WL} b_r^{L2}) - (\beta_1^{NL} b_r^{P1} + \beta_2^{NL} b_r^{P2}) \quad (2)$$

여기서 $\alpha_i^{WL} = f_i / (f_1 - f_2)$, $b_r^{Li}, i = 1, 2$ 는 수신기 반송파 하드웨어 바이어스이며, $\beta_i^{NL} = f_i / (f_1 + f_2)$, $b_r^{Pi}, i = 1, 2$ 는 수신기 코드 하드웨어 바이어스이고, 이는 수신기 NL 코드와 WL 반송파 하드웨어 바이어스의 조합이다. WSB, b_s^{MW} 는 식 (3)과 같고,

$$b_s^{MW} = (\alpha_1^{WL} b_s^{L1} + \alpha_2^{WL} b_s^{L2}) - (\beta_1^{NL} b_s^{P1} + \beta_2^{NL} b_s^{P2}) \quad (3)$$

여기서 $b_s^{Li}, i=1,2$ 는 위성 반송파 하드웨어 바이어스이며, $b_s^{Pi}, i=1,2$ 는 위성 코드 하드웨어 바이어스이고, 이는 위성 Narrow Lane (NL) 코드와 WL 반송파 하드웨어 바이어스의 조합이다.

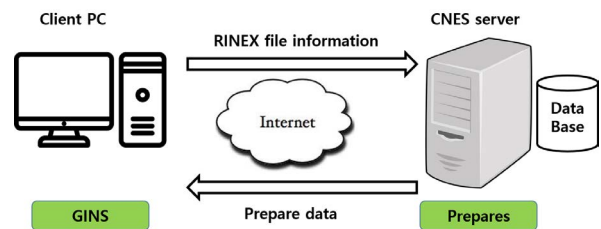


Fig. 1. Network architecture for IPPP using GINS-PC software.

식 (1)에서 잡음 항 ξ_{MW} 는 WL 파장보다 상대적으로 상당히 작은 값을 갖기 때문에 정수 WL 모호성을 구하기 위해 무시하면 식 (1)을 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$L_{MW} - b_r^{MW} + b_s^{MW} = -\lambda_{WL}N_{WL} \quad (4)$$

여기서 WSB b_s^{MW} 는 IGS에서 제공하는 정밀 위성 산출물에 의해서 구할 수 있다.

다음으로, 두번째 단계에서는 무전리층(ionosphere-free) 조합을 이용하여 NL 미지정수를 구하는 것으로, 무전리층 반송파 선형 조합 L_{IF} 는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다 (Shi & Gao 2014).

$$L_{IF} + c\delta t_s^{IF} - 60\lambda_{IF}N_{WL} = \rho + c\delta t_r^{IF} + T_d - 17\lambda_{IF}N_1 + \xi_{IF} \quad (5)$$

여기서 ρ 는 위성과 수신기 사이의 기하학적 거리이고, δt_s^{IF} , δt_r^{IF} 및 ξ_{IF} 는 각각 무전리층 위성 클락 에러, 수신기 클락 에러 및 반송파 관측 잡음이며, T_d 는 대류층 지연이다. 무전리층 파장 $\lambda_{IF} = \lambda_{NL} / 17$ 이고 $\lambda_{NL} \approx 10.7 \text{ cm}$ 이다. 첫번째 단계에서 WL 모호정수 N_{WL} 을 구한 후에 식 (5)를 사용하여 미지 정수 N_1 을 구하게 된다. 정수배의 NL 값은 보상되어지지만 NL 파장의 0.5 사이클 근처에 있는 값은 반송파 수신기 클락 에러를 발생 시킬 수 있다. 하지만, 이러한 수신기 클락의 위상에 존재하는 사이클 슬립은 사후 처리 (post-processing) 단계에서 보상되어질 수 있다 (Petit & Defraigne 2016).

2.2 Processing Method

본 논문에서는 Centre National d'Etudes Spatiales (CNES)에서 제공하는 Geodesie par Integrations Numeriques Simultanees (GINS) 소프트웨어를 사용하여 IPPP 클락해를 구하였고, 이러한 과정을 Fig. 1에 나타내었다 (CNES 2019). GINS 프로그램을 사용하면 PPP와 IPPP의 해가 동시에 구해지며, PPP 및 IPPP 해를 구하는 절차는 다음과 같다.

- ① RINEX 파일 준비: Client PC의 GINS-PC 소프트웨어가 설치된 디렉토리에 IPPP를 처리할 RINEX 파일 저장
- ② GINS-PC 소프트웨어 구동: Client PC에 설치된 GINS-PC 소프트웨어를 구동하여 처리할 RINEX 파일을 선택하면 전처리에 필요한 정보(안테나 타입, 안테나 좌표, 데이터 날짜 등) 파일이 CNES 서버로 이동
- ③ 전처리 (PREPARS): CNES 서버 PC에서 client PC로부터 전송된 RINEX 파일 정보를 사용하여 Groupe de Recherche

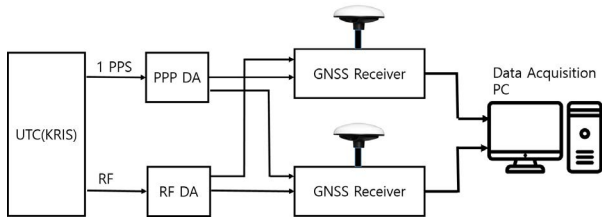


Fig. 2. Block diagram of the experiment by using GNSS timing receivers with a common clock.

en Geodesie Spatiale에서 제공하는 정밀 위성 궤도 및 클락 바이어스 값을 산출하여 ionosphere-free 조합 데이터를 생성하고 client PC로 전송

- ④ IPPP 클락해 생성: Client PC에서 CNES 서버에서 제공한 전처리 데이터를 이용하여 최종적으로 GINS-PC 소프트웨어를 이용하여 PPP 및 IPPP 클락해 생성

3. PERFORMANCE COMPARISON BETWEEN PPP AND IPPP

본 장에서는 근거리 공통 클락을 사용하였을 때의 PPP와 IPPP의 성능 비교 실험을 통해 고찰된 사항에 대해서 기술한다. 이를 위해 먼저 측정 실험 방법에 대해서 나타내고, 다음으로 측정된 결과에 대해 통신 분야에서 널리 사용되는 시간간격에러 (TIE: Time Interval Error)의 RMS 값을 사용하여 두 방법에 대한 시각 비교 성능을 비교한다.

3.1 Measurement Set-up

근거리 공통 클락을 사용하였을 때의 PPP와 IPPP의 성능 비교 실험을 위해 사용된 개념도는 Fig. 2와 같다. Fig. 2에 나타난 두 대의 GNSS 수신기 안테나는 수 미터 이내의 근거리에서 위치하고 있어 위성에 대한 가시성 및 다중경로 잡음과 같은 외부 환경적인 영향을 동일하게 받게 된다. 또한 두 대의 수신기도 동일한 실험실에 설치되어 있고, 수신기에 입력되는 1 PPS와 10 MHz의 RF 신호는 각각 초펄스 분배기 (PPS DA) 및 RF 분배기 (RF DA)를 통해 UTC(KRIS) 기준 신호를 공통으로 제공 받는다. 두 대의 수신기에서 측정된 데이터는 데이터 수집 PC에 30초 간격의 RINEX 파일 형태로 저장된다.

PPP와 IPPP의 여러 날에 걸친 데이터를 이용하였을 때의 시각 비교 성능을 비교하기 위한 절차에 대해 Fig. 3에 나타내었고, 이에 대한 설명은 다음과 같다.

- ① 일별 차분 데이터 생성: GINS-PC 소프트웨어를 이용하여 구해진 두 수신기에 대한 일별 PPP 및 IPPP 데이터에 대한 차분 값 생성
- ② 2일 연속 데이터 이용 일별 점프량 산출: 첫째 날 데이터의 끝에서부터 90분의 데이터와 둘째 날의 처음 90분의 데이터에 대한 선형 피팅을 수행하여 일별 점프량 산출, IPPP의 경우에는 인접한 NL 값으로 반올림 한 값을 점프량으로 산출

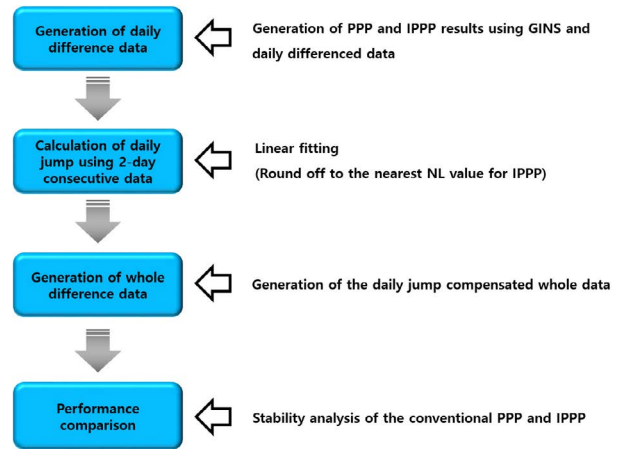


Fig. 3. IPPP phase data of the GNSS receivers named as KRP1 and KRG2.

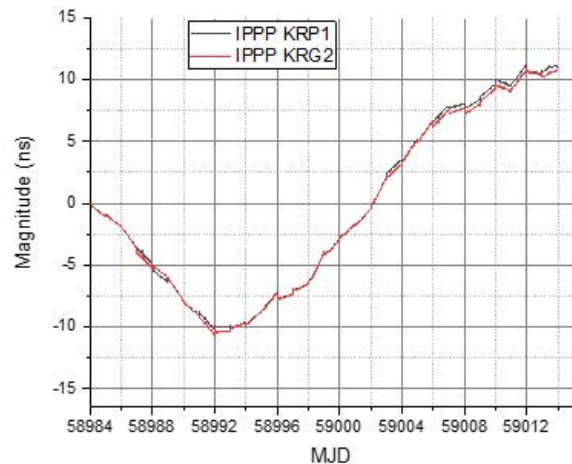


Fig. 4. IPPP phase data of the GNSS receivers named as KRP1 and KRG2.

- ③ 일간점프 보상된 전체 데이터 생성: 위 2번째 절차에서 구해진 일간점프 값을 순차적으로 보상하여 일간점프가 보상된 연속적인 전체 데이터를 생성

- ④ 시각비교 성능 비교: TIE RMS 값을 사용하여 PPP와 IPPP 사이의 시각비교 성능을 비교

위 2번째 절차에서 90분 데이터를 사용한 이유는 선형 피팅을 위해 전형적으로 90 ~ 120분의 데이터를 사용한다는 것에서 기인한다 (Petit 2021).

3.2 Measurement Results

Fig. 4에 실험에 사용된 두 수신기 (KRP1 및 KRG2)에 대한 IPPP 위상 데이터를 나타내었다. Fig. 4에서 볼 수 있는 것과 같이 근거리에서 동일한 기준 클락을 사용했을 때에도 수신기에 따라서 일간점프의 값이 달라지는 것을 알 수 있다. 별도의 그림에는 나타내지 않았지만, PPP의 경우에도 동일한 경향이 관찰되었다. 이는 이전에 언급한 것과 같이 GNSS 반송파 처리에 영향을 미치는 서로 다른 수신기 하드웨어 지연 차이에 따른 현상으로 볼 수 있다. Fig. 5에는 동일한 수신기 (KRP1)에 대한 IPPP 및 PPP 위상

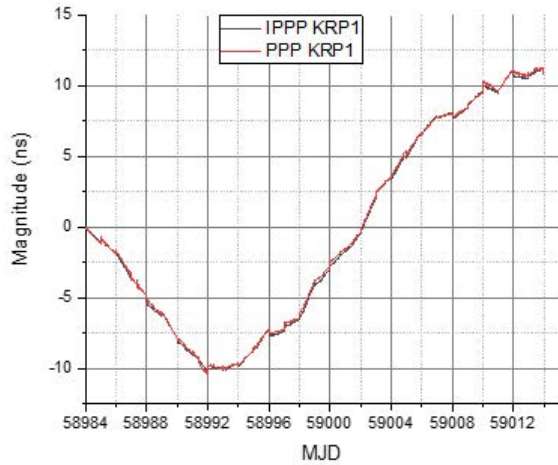


Fig. 5. PPP and IPPP phase data of the GNSS receiver named as KRP1.

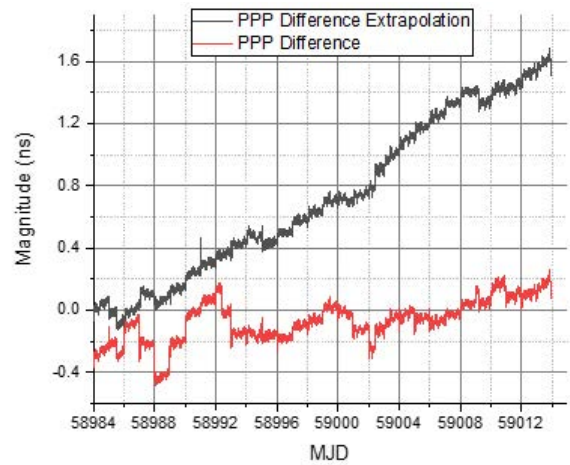


Fig. 7. PPP difference between KRP1 and KRG2 with extrapolation and without extrapolation.

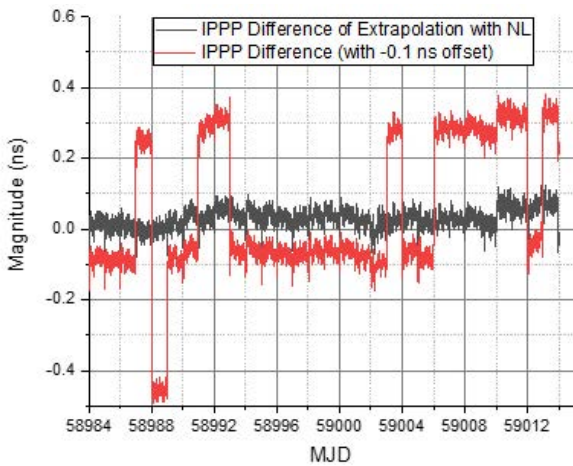


Fig. 6. IPPP difference between KRP1 and KRG2 with extrapolation using NL and without extrapolation.

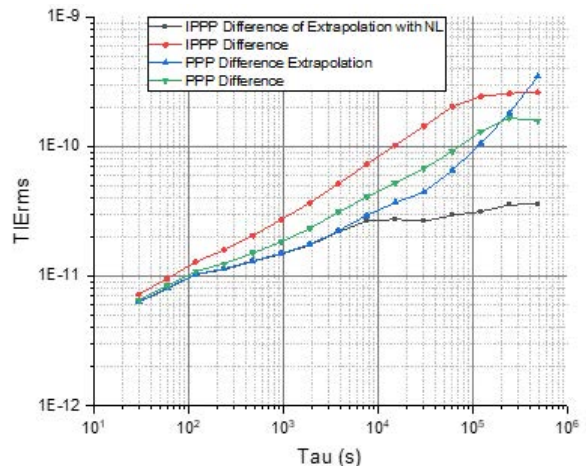


Fig. 8. TIErms values of PPP and IPPP differences between KRP1 and KRG2 with and without extrapolation.

데이터를 나타내었다. 그림에서 볼 수 있는 것과 같이 동일한 수신기에 대해서도 IPPP와 PPP 결과 데이터에 대한 일간점프 보상 값에서 차이가 발생함을 확인할 수 있다. 이는 일간 배치 경계치에 대한 모호 정수를 구할 때 IPPP는 정수 모호성을 사용하고 PPP는 floating 값을 사용하는 것으로부터 예견할 수 있었던 현상이다.

IPPP 일간점프 보상 성능을 관찰하기 위한 두 수신기의 시각차 (KRP1-KRG2) 데이터에 대한 단순한 차분 값과 선형 피팅을 통해 일간점프를 보정한 값에 대해서 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서는 식별을 용이하게 하기 위해서 선형 피팅에 의해 보상이 이루어진 IPPP 결과에 -0.1 ns의 오프셋을 주어 나타내었다. 그림에서 볼 수 있는 것과 같이 선형 피팅을 통해 보정한 IPPP의 경우에는 모든 일일 배치 데이터에 대해 일간점프가 적절하게 보상되어 점프가 발생하지 않는 반면에, 일간점프를 보상하지 않고 단순히 차분한 IPPP의 경우에는 보상되지 않은 큰 점프가 다수 발생함을 알 수 있다. 이는 Fig. 4에서 관찰했던 것처럼 단순한 차분만으로는 일간점프를 보상할 수 없으며, 선형 피팅을 통해 NL의 정수배의 값으로 보상에 주어어야만 하는 것을 확인해 주는 결과이다.

Fig. 7에는 PPP에 대한 선형 피팅 성능을 관찰하기 위해 두 수신기의 시각차 데이터를 단순하게 차분한 값과 선형 피팅을 통해 일간점프를 보정한 값에 대해서 나타내었다. Fig. 7에서 다음과 같은 현상을 관찰할 수 있다. 첫번째는, 단순 차분을 하였을 경우에 일간점프가 보상이 안되는 것뿐만 아니라 주파수 오프셋이 발생하여 차분된 데이터에 기울기가 발생한다는 것이다. 따라서 원격지 클락에 대한 주파수 비교를 수행할 때 성능 저하를 가져올 수 있다는 것을 알 수 있다. 두번째는, 외삽을 수행하여 일간점프를 보상이 되었을 때에는 점프 없이 보상이 되지만 이 경우에는 단순한 차분을 하였을 때보다도 더 큰 주파수 오프셋이 발생하게 된다. 따라서, 장기적인 비교를 수행하게 되면 시각 및 주파수 비교의 성능을 더욱 크게 저하시키게 된다.

Fig. 8에는 각각의 방식에 대한 시각비교 성능을 관찰하기 위해서, IPPP와 PPP의 단순 차분 및 선형 피팅을 통해 일간점프를 보정한 결과에 대한 시간간격에러의 RMS 값을 나타내었고, N 개의 데이터 샘플에 대한 TIErms는 식 (6)과 같이 구할 수 있다 (Bregni 1997).

$$TIErms = \sqrt{\frac{1}{N-n} \sum_{i=1}^{N-n} (x_{i+n} - x_i)^2}, n = 1, 2, \dots, N-1 \quad (6)$$

여기서 x_i 는 시각차 데이터이다. Fig. 8을 통해서 다음과 같은 사항을 관찰할 수 있다. 첫째, 일간점프를 보상하지 않고 두 클락 데이터를 차분한 경우의 IPPP가 단기 및 장기 안정도 측면에서 PPP보다도 못한 가장 저하된 성능을 나타낸다. 이는 일간점프를 적절하게 보상하지 않고 단순한 차분에 의한 시각차 데이터를 사용할 경우에는 IPPP보다는 PPP를 사용하는 것이 더 좋은 성능을 얻을 수 있음을 의미한다. 둘째, 선형 피팅을 이용한 외삽을 수행하여 일간점프를 보상한 PPP의 경우에는 대략 10^5 s 이내의 단기 안정도에서는 일간점프를 보상하지 않은 PPP의 경우보다 시각비교 성능이 좋지만 이후부터는 급격히 성능이 저하되는 것을 관찰할 수 있다. 이는 일간점프를 보상한 PPP의 경우 주파수 오프셋이 발생하고 이 값이 시간이 지날수록 커지는 것에서부터 기인하며, 이러한 주파수 오프셋으로 인해 장기적으로는 수 ns (1 ns = 0.3 m) 정도의 오프셋이 발생할 수도 있음을 의미한다. 마지막으로, NL 정수배로 일간점프를 보상한 IPPP의 경우가 단기 및 장기 안정도 측면에서 가장 우수한 성능을 보이고, 또한 수십 ps 이내의 시각비교 성능을 가질 수 있음을 관찰하였다. 따라서, 장기간의 데이터를 사용하여 시각비교를 수행하는 경우 NL 정수배를 사용하여 일간점프를 사용하는 방법이 추천된다.

4. CONCLUSIONS

GNSS PPP 방식은 기하학적인 정밀 위치 추정에서 널리 사용되어지며, 또한 고정밀의 시각 및 주파수 전송에도 사용되어진다. 기존의 PPP 방식을 시각비교 응용분야에서 사용하는데 있어서 큰 단점 중 하나는 일 단위의 배치 파일을 사용함으로써 발생하는 배치 경계치에서의 위상 불일치, 즉 일간점프가 발생한다는 것이다. 이러한 일간점프는 시각비교 성능을 저하시키기 때문에 나노 초 (ns) 이하의 초고정밀의 시각비교가 요구되어지는 위성 항법시스템에서 응용하기 위해서는 이를 보상하기 위한 방법이 필요하다. IPPP 방식은 PPP 방식에 존재하는 일간점프를 효과적으로 보상하기 위한 방법 중 하나로, 기존의 PPP 방식에서는 반송파 미지정수를 floating 값으로 구하지만, IPPP 방식에서는 NL 정수배의 값으로 정수 미지정수를 구한다. 본 논문에서는 기준시 클락과 원격지 클락의 시각비교를 위해 사용되어지고 있는 PPP 및 IPPP 방식에 대한 근거리 시각비교 성능에 대해서 고찰하였다.

근거리 공통 클락 실험을 통해 다음과 같은 사항을 관찰하였다. 첫째, PPP와 IPPP 모두의 경우에 있어서 근거리에서 공통적인 기준 클락 신호를 사용하더라도 수신기에 존재하는 하드웨어 지연이 동일하지 않기 때문에 서로 다른 일간점프 성향을 보이게 된다. 둘째, PPP의 경우에 있어서 선형 피팅을 통한 점프량을 산출하여 일간점프를 보상할 수 있지만, 이러한 경우에 주파수 오프셋이 발생하는 것을 관찰하였다. 따라서, 장기간의 데이터를 이용하여 시각비교 및 동기를 할 경우에는 상당한 동기 성능의 저하를 발생시키게 된다. 셋째, IPPP의 경우에 있어서 차분 데이터에 대해 NL 정수배로 반올림하여 일간점프를 보상하게 되면, 주파수 오프셋의 발생이 없이 효과적으로 일간점프를 보상할 수

있음을 관찰하였다. 또한 근거리 공통 클락의 경우 시각비교 성능이 30 피코초 (ps) 이하 이기 때문에 위성에 대한 좋은 가시성과 다중경로 영향이 적은 환경을 갖는 원격지의 클락에 대해서도 나노초 (ns) 이하의 시각비교가 가능할 것이라 여겨진다. 따라서, IPPP를 사용하면 장기간의 데이터를 사용하여 더욱 정밀한 시각비교를 수행할 수 있어서 이를 활용한 시각동기 성능도 향상시킬 수 있게 된다.

본 논문에서 고찰한 것과 같이 IPPP를 사용하면 기존의 PPP 방식보다 효과적으로 일간점프를 보상할 수 있기 때문에 항법시스템에서 요구되어지는 고정밀의 시각비교 및 동기가 가능할 것으로 예상된다. 또한 Korean Positioning System (KPS) 등과 같은 위성 항법시스템의 주요 시각비교 방법으로 고려되고 있는 통신 위성을 이용한 Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer에 대한 백업 또는 대체 방법으로 주요하게 활용 가능할 수 있을 것으로 예상된다.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the Division of Physical Metrology of KRISS (project code: KRISS-2021-GP2021-0001).

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Methodology and software, Y.K. Lee; data acquisition, S.-h. Yang, H.S. Lee; measurement system, J.K. Lee, S.-w. Hwang, J.H. Rhee.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Bertiger, W., Desai, S. D., Haines, B., Hrarvey, N., Moore, A. W., et al. 2010, Single receiver phase ambiguity resolution with GPS data, *Journal of Geodesy*, 84, 327-337. <https://doi.org/10.1007/s00190-010-0371-9>
- Bregni, S. 1997, Clock Stability Characterization and Measurement in Telecommunications, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 46, 1284-1294. <https://doi.org/10.1109/19.668274>
- CNES 2019, GINS PC, User Manual, v.1.2.
- Defraigne, P. & Bruyninx, C. 2007, On the link between GPS pseudorange noise and day-boundary discontinuities in geodetic time transfer solutions, *GPS Solutions*, 11, 239-249. <https://doi.org/10.1007/s10291-007-0054-z>
- Ge, M., Gendt, G., Rothacher, M., Shi, C. & Liu, J. 2007,

Resolution of GPS carrier phase ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with daily observations, *Journal of Geodesy* 82, 389-399. <https://doi.org/10.1007/s00190-007-0187-4>

Geng, J., Shi, C. Ge, M., Dodson, A. H., Lou, Y., et al. 2012, Improving the estimation of fractional-cycle biases for ambiguity resolution in precise point positioning, *Journal of Geodesy*, 86, 579-589. <https://doi.org/10.1007/s00190-011-0537-0>

Lannes, A. & Prieur, J.-L. 2013, Calibration of the clock-phase biases of GNSS networks: the closure-ambiguity approach, *Journal of Geodesy*, 87, 709-731. <https://doi.org/10.1007/s00190-013-0641-4>

Laurichesse, D., Mercier, F., Berthias, J. P. & Cerri L. 2009, Integer ambiguity resolution on undifferenced GPS phase measurements and its application to PPP and satellite precise orbit determination, *Journal of Navigation*, 56, 135-149. <https://doi.org/10.1002/j.2161-4296.2009.tb01750.x>

Marty, J.-C. 2013, Algorithmic Documentation of the GINS Software, CNES.

Petit, G. 2021, Sub-10-16 accuracy GNSS frequency transfer with IPPP, *GPS Solutions*, 25, 21-29. <https://doi.org/10.1007/s10291-020-01062-2>

Petit, G. & Defraigne, P. 2016, The performance of GPS time and frequency transfer: comment on 'A detailed comparison of two continuous GPS carrier phase time transfer techniques', *Metrologia*, 53, 1003-1008. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/53/3/1003>

Petit, G. & Jiang, Z. 2008, Precise Point Positioning for TAI Computation, *International Journal of Navigation and Observation*, 2008, Article ID 562878. <https://doi.org/10.1155/2008/562878>

Ray, J. & Senior, K. 2005, Geodetic techniques for time and frequency comparisons using GPS phase and code measurements, *Metrologia*, 42, 215-232. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/42/4/005>

Senior, K. L., Ray, J. R. & Beard, R. L. 2008, Characterization of periodic variations in the GPS satellite clocks, *GPS Solutions*, 12, 211-225. <https://doi.org/10.1007/s10291-008-0089-9>

Shi, J. & Gao, Y. 2014, A comparison of three PPP integer ambiguity resolution methods, *GPS Solutions*, 18, 519-528. <https://doi.org/10.1007/s10291-013-0348-2>



Young Kyu Lee received the Ph. D. degree in information and communications engineering from Gwangju Institute of Science and Technology, Gwangju, Korea, in 2002. In 2002, he joined the Time and Frequency group of the Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS), Korea. He has been engaged in the research and development work field in precise time

comparison via satellites and time distribution using ground-waves, since he participated in the satellite applications laboratory.



Sung-hoon Yang received the Ph. D. degree in electronic engineering from Chungnam National University, Daejeon, Korea, in 2012. He has been working at the Time and Frequency Group, Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS), Daejeon, since 1984. He has worked on the development of a primary atomic clock and standard time keeping. His current activity is research on time transfer using satellites.



Ho Seong Lee received his Ph.D. degree in Physics from the Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST) in 1986. He joined the Time & Frequency Group of the Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS) in 1986. He worked for the development of cesium atomic clocks for about 20 years. His current interest includes the generation of timescales for the Korea Standard Time and the Korean Positioning System Time.



Jong Koo Lee graduated from the Department of Statistics and Data Science at Cheongju University, in 1989. He has been working at the Time and Frequency Group, Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS), Daejeon, since 1990. His interesting fields are calibration of timing systems and statistical estimation.



Sang-wook Hwang received the Ph. D. degrees in Electronics Engineering from Chungnam National University, Daejeon, Korea, in 2019, He has been working at the Time and Frequency Group, Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS), Daejeon, since 2015. His current activity is research on time transfer using satellites.



Joon Hyo Rhee received the B.S degree in electrical and electronic engineering and Ph. D. degree in integrated technology at Yonsei University, Incheon, South Korea in 2019. He is currently a researcher with the Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS), Daejeon, South Korea. He

is now working at the Time and Frequency Group in KRIS, taking part in researches related to precise timing systems.