

# Phase Jitter Analysis of Overlapped Signals for All-to-All TWSTFT Operation

Juhyun Lee, Ju-Ik Oh, Joon Hyo Rhee, Gyeong Won Choi, Young Kyu Lee, Jong Koo Lee, Sung-hoon Yang<sup>†</sup>



Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

# Phase Jitter Analysis of Overlapped Signals for All-to-All TWSTFT Operation

Juhyun Lee, Ju-Ik Oh, Joon Hyo Rhee, Gyeong Won Choi, Young Kyu Lee, Jong Koo Lee, Sung-hoon Yang<sup>†</sup>

Time and Frequency Group, Division of Physical Metrology, Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS), Daejeon 34113, Korea

## ABSTRACT

Time comparison techniques are necessary for generating and keeping Coordinated Universal Time (UTC) and distributing standard time clocks. Global Navigation Satellite System (GNSS) Common View, GNSS All-in-View, Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer (TWSTFT), Very Long Baseline Interferometry (VLBI), optical fiber, and Network Time Protocol (NTP) based methods have been used for time comparison. In these methods, GNSS based time comparison techniques are widely used for time synchronization in critical national infrastructures and in common areas of application such as finance, military, and wireless communication. However, GNSS-based time comparison techniques are vulnerable to jamming or interference environments and it is difficult to respond to GNSS signal disconnection according to the international situation. In response, in this paper, Code-Division Multiple Access (CDMA) based All-to-All TWSTFT operation method is proposed. A software-based simulation platform also was designed for performance analysis in multi-TWSTFT signal environments. Furthermore, code and carrier measurement jitters were calculated in multi-signal environments using the designed simulation platform. By using the technique proposed in this paper, it is anticipated that the TWSTFT-based time comparison method will be used in various fields and satisfy high-performance requirements such as those of a GNSS master station and power plant network reference station.

**Keywords:** TWSTFT, CDMA, overlapped signals, DLL phase jitter, PLL phase jitter

## 1. 서론

시각 동기 기술은 현대사회의 다양한 분야에 활용되고 있으며, 과학, 금융, 군사, 통신, 전력, 항법 등 국가기반시설을 운영하는데 필수요소이다. 이러한 국가기반시설은 분야에 따라 수십 ms 수준에서부터 수 ns 수준까지의 시각동기 수준을 요구하고 있다 (Hartl et al. 1983, Hanson 1989, Kirchner 1991, Lee et al.

2014). 기본적으로 기준국과 원격지 간의 시각 동기를 구현하기 위해서는 요구 동기 성능을 만족시킬 수 있는 시각 비교 기술을 활용하여 기준국과 원격지 간의 시각 비교를 우선적으로 수행하여야 하며, 이를 기반으로 시각 오차를 산출하고 보정하는 과정이 필요하다. 특히, 원격지에 원자시계 등을 활용한 정밀시각원이 존재하지 않는 경우 시각 동기 성능은 시각 비교 성능에 의존하게 되며, 시스템의 시각 동기 성능 요구조건에 따라 적절한 시각 비교 기술의 활용이 필요하다.

대표적인 시각 비교 기술로는 항법위성을 활용한 Global Navigation Satellite System (GNSS) Common View (CV), All-in-View (AV) 기반 시각 비교 기법, 정지궤도 위성을 활용한 위성이용 양방향 시각 주파수 전송 (Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer, TWSTFT) 기법, 우주측지 기술에 기초한 초장기선 간섭 관측법 (Very Long Baseline Interferometry, VLBI) 기반의 시각 비교 기법 및 광 전송 기반 시각 비교 기법이 존재한다. 각 기술이 갖는 주파수 비교 안정도는 Fig. 1과 같다 (Takiguchi et al. 2008, Sekido et al. 2012).

Received Aug 15, 2023 Revised Aug 25, 2023 Accepted Aug 30, 2023

<sup>†</sup>Corresponding Author

E-mail: shyang@kriss.re.kr

Tel: +82-42-868-5147 Fax: +82-504-407-5500

Juhyun Lee <https://orcid.org/0000-0001-9921-6300>

Ju-Ik Oh <https://orcid.org/0000-0003-3732-3025>

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

Gyeong Won Choi <https://orcid.org/0000-0002-1340-0084>

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

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

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

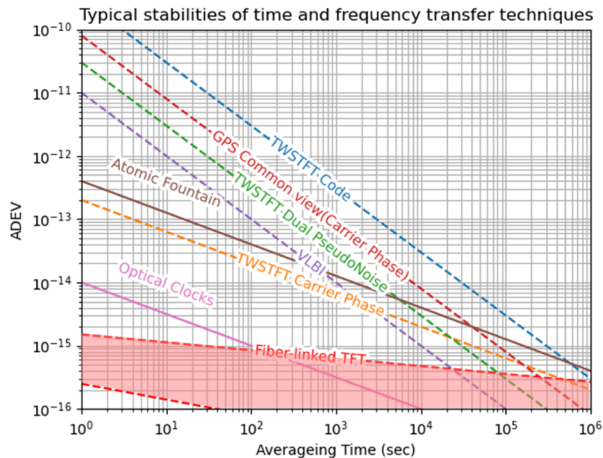


Fig. 1. Typical stabilities of time and frequency transfer techniques (TWSTFT code, TWSTFT dual PseudoNoise, TWSTFT carrier phase, GNSS common view (Carrier phase) (Sekido et al. 2012), VLBI, Atomic fountain, optical clocks (Takiguchi et al. 2008)).

이 중 GNSS를 이용한 시각비교 기법은 1초에 약  $8 \cdot 10^{-11}$ , 1일에 약  $1 \cdot 10^{-15}$  수준의 주파수 비교 안정도를 나타내는데, 비용 측면에서 유리하다는 장점으로 인해 이동통신을 위한 중계기 및 금융 네트워크 기준시 등 다양한 분야에서 널리 활용되고 있다. 그러나 이 기법은 타기관에서 운영되는 GNSS에 대해 전적으로 의존하게 된다는 단점이 있으며, 국가기반시설의 경우 이러한 단점으로 인해 활용에 제한이 발생할 수 있다. 이 때문에 국가의 핵심 기반시설 중 하나인 전력기준시의 경우 광 전송 및 네트워크 기반의 시각 동기 기법을 활용하고 있다. 광 전송 기반 기술 경우 평균시간 1초에 약  $1.5 \cdot 10^{-15}$  1일에 약  $4 \cdot 10^{-16}$  수준의 우수한 주파수 비교 안정도를 가지나, 구축을 위해 전용 광케이블이 포설되어야 하며, 대상 기준국과 원격지 간의 거리가 멀어질수록 기하급수적인 설치 및 유지보수 비용이 요구되는 문제를 갖는다. 또한 대한민국의 경우 지리적 특수성에 의해 국제 비교 및 광범위한 서비스 영역에 활용하기 어려운 문제를 갖고 있다.

한편, 일반적인 네트워크 환경을 활용하는 Network Time Protocol (NTP) 기반 시각 동기 기술이 존재하며, 해당 기술의 경우 GNSS를 이용한 시각비교 기법과 같이 기존 인프라를 활용함에 따라 우수한 시각 보급 용이성을 확보할 수 있으나, 수 ms 수준의 시각비교만이 가능하기 때문에 제한된 분야에서만 활용될 수 있으며,  $\mu$ s 이하의 동기 정확도를 요구하는 고 정밀 시각비교를 위해서는 이용하기 어렵다. 또한 평균시간 1일  $1.5 \cdot 10^{-16}$  수준의 가장 우수한 장기안정도 성능을 기대할 수 있는 VLBI 기반 시각 비교 기술이 존재하나, 신호 수집을 위한 고가의 RF 신호 수집 장치 및 수십 m 수준의 대형 지향성 안테나 (전파망원경)와 이를 위한 대규모 운영 공간이 요구되며, 장시간 수신한 데이터의 신호 상관을 위한, 대량 연산을 수행할 수 있는 고가의 연산 장치가 필요하다. 따라서 VLBI 기반의 시각 비교 기술은 국가 및 대륙 간 시각비교 혹은 기초 연구로서는 적합하나, 다수의 사용자에게 시각 보급을 위해서는 운용하기 매우 어려운 특성을 갖는다 (Takiguchi et al. 2008).

TWSTFT의 경우 정지궤도 위성을 활용한 양방향 통신을 기

반으로 시각 비교를 수행하는 기술이며, TWSTFT 코드 측정치 기반 시각 비교의 경우 주파수 비교 안정도가 평균시간 1초에  $3 \cdot 10^{-10}$ , 1일에  $4 \cdot 10^{-15}$  수준이나, 반송파 측정치 기반 주파수 비교의 경우 평균시간 1초에  $2 \cdot 10^{-13}$ , 1일에  $7 \cdot 10^{-16}$  수준으로 GNSS를 이용한 시각비교 기법에 비해 뛰어난 시각 비교 성능을 갖는다. 이에 따라 다수의 국가측정표준기관 (National Metrology Institute, NMI)이 국제 시각 비교를 위해 활용하고 있으며, 한국 표준과학연구원에서도 국제 비교를 위해 TWSTFT를 운용 중에 있다 (Yang et al. 2009).

현재 다양한 국가기반시설의 시각 보급은 대부분 GNSS 기술에 의존하고 있으며, 이에 따라, 공개된 신호 활용에 따른 Spoofing 위험 및 경제적 혹은 사회적 외부요인에 따른 GNSS 신호 단절이 발생할 경우, 시각 보급 중단에 따른 전력 및 통신망 마비 등의 잠재적 위험성을 내재하고 있다. 또한 주요정보통신기반시설 및 위성항법시스템 등 다양한 국가기반시설에서 기존보다 더 우수한 수준의 시각 비교 성능을 요구하고 있다. 이에 대응하기 위해 종래의 GNSS CV, AV 기반 시각 비교 성능 보다 우수하고 시각 보급이 용이한 시각 비교 기술이 필요하며, 이를 위해 본 논문에서는 TWSTFT 기법을 활용한 다대다 시각 비교 방안을 제시하고자 한다. TWSTFT 모델의 경우, GNSS 수신기보다는 고가이나 VLBI 및 광전송에 비해서는 상대적으로 저렴하여 GNSS를 제외하고는 광범위한 서비스 영역에 대한 시각 보급성이 가장 용이하다. 또한 TWSTFT 기술은 국제전기통신연합 (International Telecommunication Union, ITU)의 권고안에 의해 Ku band를 활용하고 있으며, Ku band 안테나의 경우 소형화 방안 및 배열안테나 기술에 대한 다양한 연구가 진행되어왔다. 따라서 이를 활용할 경우, 우수한 보급성을 기대할 수 있다 (ITU-R TF.1153 2015).

본 논문에서는 TWSTFT를 활용한 시각 비교 기법의 시각 보급 용이성을 개선하기 위한 코드분할 다중접속 (Code-Division Multiple Access, CDMA) 기반의 다대다 TWSTFT 운용 개념을 제시하고, RF 채널 내 다수의 신호가 존재하는 환경이 신호 추적 성능에 미치는 영향을 분석한다. 본 논문의 2장에서는 TWSTFT의 운용 개념 및 각국의 국가측정표준기관의 주도하에 운용되는 전 세계적인 링크 현황에 대해 설명하며, 3장에서는 시각 보급 용이성 개선을 위한 TWSTFT를 활용한 다대다 시각 비교 방안을 소개한다. 4장에서는 제안한 방안의 운용 타당성을 확인하기 위해 설계한 시뮬레이션 기반 TWSTFT 신호 생성 및 수신 플랫폼을 소개하고, 이를 활용한 다중 신호 환경의 신호 추적 성능 분석 결과를 도출한다. 마지막으로 5장에서는 본 연구의 결론과 제언, 활용 방안에 관해 서술한다.

## 2. TWSTFT 운용 개념 및 현황

### 2.1 TWSTFT 운용 개념

TWSTFT는 정지 궤도 위성을 활용하여 시각 비교를 수행하며 시각 비교 개념은 Fig. 2와 같다. 시각 비교는 기준국의 각 원자 시계에 동기 된 Binary Phase-Shift Keying (BPSK) 및 Pseudo-Random Noise (PRN) 코드 변조 RF 신호를 생성하고, 이를 송수

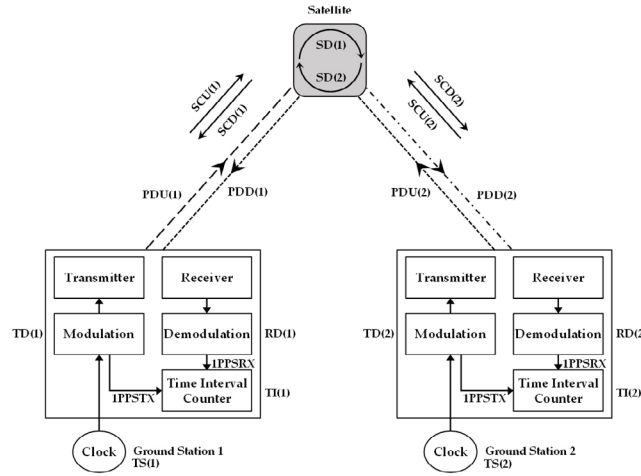


Fig. 2. Principle of TWSTFT.

Table 1. Link budget of TWSTFT (Cheng et al. 2022).

| Error sources                                     | Error magnitude [ps] |                                                                   |
|---------------------------------------------------|----------------------|-------------------------------------------------------------------|
|                                                   | Influences of errors | After calibration (Zero-baseline calibration or model correction) |
| TIC delay                                         | 10~100               | 5                                                                 |
| Modem delay                                       | 100                  | 10                                                                |
| Satellite transparent transponder delay           | 80                   | 10                                                                |
| Transmission and receiving system delay           | 200~500              | 30                                                                |
| Propagation path geometry delay                   | <10                  | <10                                                               |
| Tropospheric delay                                | 10                   | 10                                                                |
| Ionospheric delay                                 | 100                  | <10                                                               |
| Asymmetry of station and satellite position delay | 30                   | <1                                                                |
| Sagnac effect delay                               | 1~2·10 <sup>5</sup>  | 10~100                                                            |

신함으로써 이루어진다. 1 PPSTX는 각 기준국의 기준 1 PPS이며, 1 PPSRX는 상대 기준국으로부터 수신된 RF 신호를 통해 측정된 1 PPS이다. 정의한 두 1 PPS 신호 간의 차이는 시간간격계수기 (Time interval counter, TIC)에 의해 측정(TI(k))되며, TI(k) 데이터를 교환하여 차분하면, 두 기준국의 타임 스케일 간의 차이를 계산할 수 있다.

Fig. 2에 명시된 각 항목들은 다음과 같다. k는 기준국 1 혹은 2이며, TS(k)는 기준국 k의 타임 스케일을 의미하고, TI(k)는 송신되는 1PPS 신호와 수신되는 1 PPS 신호 간의 시간 차이(1 PPSTX - 1 PPSRX)를 나타낸다. TD(k) 및 RD(k)는 각각 모뎀 지연을 포함한 송신기 및 수신기 지연이며, PDU(k) 및 PDD(k)는 각각 업링크 및 다운링크 신호 경로 지연이다. 또한 SD(k)는 위성 중계기의 내부 지연을 의미하며, SCU(k) 및 SCD(k)는 각각 업링크 및 다운링크의 지구자전오차 (sagnac effect) 보정치를 의미한다.

두 기준국 간의 타임 스케일 차이는 TS(1) - TS(2)로 나타낼 수 있으며, 각 기준국의 시간간격계수기에 의해 측정되는 TI(k)는 Eqs. (1,2)와 같이 표현할 수 있다.

$$TI(1)=TS(1)-TS(2)+TD(2)+PDU(2)+SCU(2)+SD(2)+PDD(1)+SCD(1)+RD(1) \quad (1)$$

$$TI(2)=TS(2)-TS(1)+TD(1)+PDU(1)+SCU(1)+SD(1)+PDD(2)+SCD(2)+RD(2) \quad (2)$$

Eq. (1)과 Eq. (2)의 차이를 Eq. (3)과 같이 정리할 수 있으며, Eq. (3)을 통해 두 기준국 간의 타임 스케일 차이를 얻을 수 있다.

$$TI(1)-TI(2)=2 TS(1)-2 TS(2)+TD(2)-TD(1)+PDU(2)-PDU(1)+SD(2)-SD(1)+PDD(1)-PDD(2)+RD(1)-RD(2)+SCD(1)-SCU(1)-SCD(2)+SCU(2) \quad (3)$$

두 기준국간 신호 송수신 과정에 전리층, 대류층, 지구 자전 효과 등 다양한 오차 요인들이 존재한다. 기본적으로 TWSTFT 기법은 각 기준국에서 측정된 측정치 간 차분을 통해 대부분의 오차 요소들을 소개할 수 있으나, 각 신호 경로에 따른 전파 환경이 동일하지 않기 때문에 여러 효과들로 인한 지연 성분들이 완전히 소거되지 못하고 잔여오차로 존재하게 된다. 이러한 잔여 오차로 인해 TWSTFT의 결과의 정확도가 열화되며, 대표적인 잔여오차 요인으로는 위성 내부 지연, 지구자전오차, 위성 경로지연, 전리층 지연, 대류층 지연, 기준국 내부 지연이 존재하며, 교정 전후의 오차수준은 Table 1과 같다 (ITU-R TF.1153 2015, Cheng et al. 2022).

## 2.2 TWSTFT의 Link 현황

TWSTFT를 활용한 시각 국제 시각 비교는 다수의 국가측정표준기관이 참여하여 운영되고 있다. Europe-Europe 및 Europe-USA link의 경우, 경도 37.5°W에 위치하고 있는 정지궤도 위성

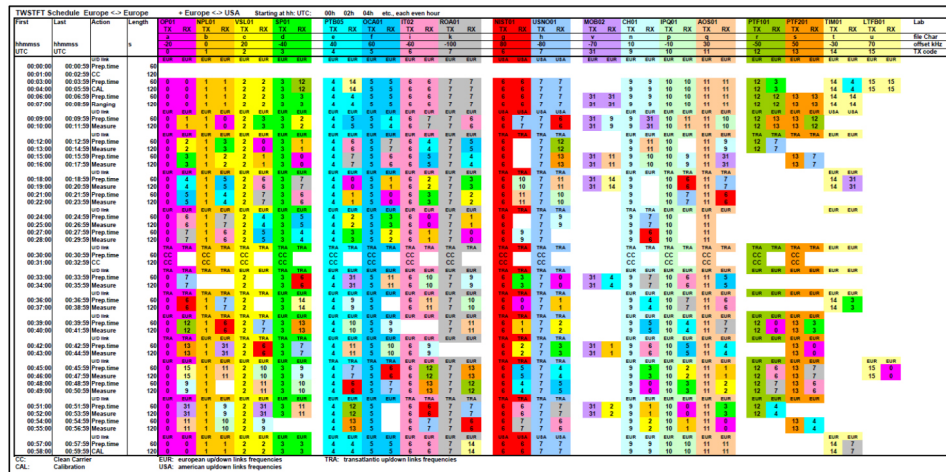


Fig. 3. TWSTFT calibration scheduler for even hour measurement sessions in Europe-Europe link and Europe-USA link.

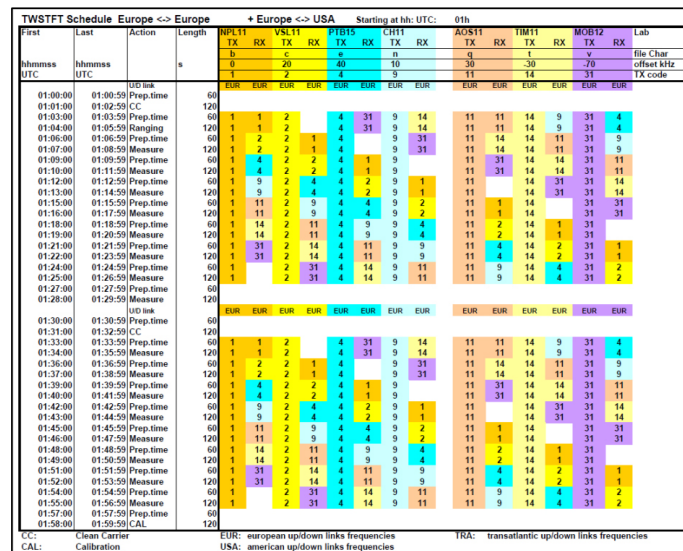


Fig. 4. TWSTFT calibration scheduler for odd hour measurement sessions in Europe-Europe link and Europe-USA link.

T-11N을 활용하여 양방향 시간 비교를 수행하고 있다. Europe-Europe 간 link는 uplink 주파수 14.560150 GHz와 downlink 주파수 10.960150 GHz를 사용하고 있으나, Europe-USA의 대륙간 link의 경우, 유럽측은 uplink 14.04659 GHz, downlink 11.48906 GHz를 사용하고, 미국측은 uplink 14.28906 GHz, downlink 11.74659 GHz로 서로 다른 up/downlink 주파수를 사용하고 있으며, Ku band 내 서로 다른 주파수를 사용하고 있는 특징을 갖는다. 또한 TWSTFT 운영을 위해 각각의 up/downlink 주파수는 고유의 반송파 ID가 할당되어 관리되고 있다. 참여하고 있는 기관은 독일의 TimeTech GmbH (TIM), Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), 영국의 National Physical Laboratory (NPL), 네덜란드의 Van Swinden Laboratory (VSL), 폴란드의 Astrogeodynamical Observatory (AOS), 스위스의 Federal Institute of Metrology METAS (CH) 및 유럽 내 교정 및 실험을 위한 이동형 기준국 (Mobile station, MOB)이 있다. 또한 미국의 국가측정표준기관 National Institute of Standards and

Technology (NIST)와 미해군이 운용하고 있으며, GPS의 소급성을 제공하는 United States Naval Observatory (USNO)가 Europe-USA link에 참여하고 있다 (Meynadier et al. 2019).

TWSTFT 운용을 위해 사용하는 양방향 시간비교용 모델로 TimeTech사의 Satellite Time and Ranging Equipment (SATRE) 모델이 주로 활용되고 있다 (Imae et al. 2003, TimeTech 2012). 그리고, ITU 권고안에 따라 각 기준국에 고유의 PRN이 할당되어 운영되고 있다. 그러나, 해당 모델은 단일 TX와 RX 채널로 구성되어 있으며 옵션을 통해 확장하더라도 최대 3개의 RX 채널까지만 할당할 수 있다는 제한요소가 존재한다. 이에 따라 각 기준국은 시분할 다중접속 (Time Division Multiple Access, TDMA) 방식으로 운영되고 있으며, RX time slot scheduler를 구성하여 NMI 간 시간 비교 및 교정을 수행하고 있다 (Meynadier et al. 2019). Europe-Europe 및 Europe-USA link의 TWSTFT scheduler는 Figs. 3 및 4와 같다.

Europe-Asia link 및 Asia-Asia link의 경우, 경도 80°E에 위

| TWSTFT Schedule Europe <-> Asia via Express-80 |         |           |                                                            |      |     |      |     |      |     | Ver.4.0 2022-01-17 |     | Transceiver |      | U/C 14255.500 MHz; D/C 11455.500 MHz |     |      |      |  |  |  |  |  |
|------------------------------------------------|---------|-----------|------------------------------------------------------------|------|-----|------|-----|------|-----|--------------------|-----|-------------|------|--------------------------------------|-----|------|------|--|--|--|--|--|
| SATRE modem link                               |         |           | Eu                                                         |      |     |      |     |      |     |                    |     |             | Asia |                                      |     |      |      |  |  |  |  |  |
| First                                          | Last    | Action    | chiprate [Mcp/s]<br>CC offset kHz<br>TX code<br>Length [s] | PTB  | 03  | NIM  | 01  | NTSC | 04  | PL                 | 01  | RHES        | 03   | NICT                                 | 01  | SU   | 01   |  |  |  |  |  |
|                                                |         |           |                                                            | 1x   | 1x  | 1x   | 1x  | 1x   | 1x  | 1x                 | 1x  | 1x          | 1x   | 1x                                   | 1x  | 1x   | 1x   |  |  |  |  |  |
| hhmmss                                         | hhmmss  |           |                                                            | 2.5  | 2.5 | 2.5  | 2.5 | 2.5  | 2.5 | 2.5                | 2.5 | 2.5         | 2.5  | 2.5                                  | 2.5 | 2.5  | 2.5  |  |  |  |  |  |
| UTC                                            | UTC     |           |                                                            | 0    | 0   | 0    | 0   | 0    | 0   | 0                  | 0   | 0           | 0    | 0                                    | 0   | 0    | 0    |  |  |  |  |  |
|                                                |         | USB link  |                                                            | 0    | 1   | 1    | 2   | 3    | 3   | 2                  | 2   | 2           | 2    | 2                                    | 2   | 2    | 2    |  |  |  |  |  |
| Data acquisition time                          |         |           | Up                                                         | Down | Up  | Down | Up  | Down | Up  | Down               | Up  | Down        | Up   | Down                                 | Up  | Down | Down |  |  |  |  |  |
| X:00:00                                        | X:00:59 | Prep.time | 60                                                         | 0    | 1   | 1    | 0   | 2    | 3   | 3                  | 2   | 4           | 5    | 5                                    | 4   | 4    | 4    |  |  |  |  |  |
| X:01:00                                        | X:05:59 | Measure   | 300                                                        | 0    | 1   | 1    | 0   | 2    | 3   | 3                  | 2   | 4           | 5    | 5                                    | 4   | 4    | 4    |  |  |  |  |  |
| USB link                                       |         |           | Up                                                         | Down | Up  | Down | Up  | Down | Up  | Down               | Up  | Down        | Up   | Down                                 | Up  | Down | Down |  |  |  |  |  |
| X:06:00                                        | X:06:59 | Prep.time | 60                                                         | 0    | 2   | 1    | 3   | 2    | 0   | 3                  | 1   | 4           | 6    | 5                                    | 5   | 4    | 4    |  |  |  |  |  |
| X:07:00                                        | X:11:59 | Measure   | 300                                                        | 0    | 2   | 1    | 3   | 2    | 0   | 3                  | 1   | 4           | 6    | 5                                    | 5   | 4    | 4    |  |  |  |  |  |
| USB link                                       |         |           | Up                                                         | Down | Up  | Down | Up  | Down | Up  | Down               | Up  | Down        | Up   | Down                                 | Up  | Down | Down |  |  |  |  |  |
| X:12:00                                        | X:12:59 | Prep.time | 60                                                         | 0    | 3   | 1    | 4   | 2    | 5   | 3                  | 0   | 4           | 1    | 5                                    | 2   | 2    | 2    |  |  |  |  |  |
| X:13:00                                        | X:17:59 | Measure   | 300                                                        | 0    | 3   | 1    | 4   | 2    | 5   | 3                  | 0   | 4           | 1    | 5                                    | 2   | 2    | 2    |  |  |  |  |  |
| USB link                                       |         |           | Up                                                         | Down | Up  | Down | Up  | Down | Up  | Down               | Up  | Down        | Up   | Down                                 | Up  | Down | Down |  |  |  |  |  |
| X:18:00                                        | X:18:59 | Prep.time | 60                                                         | 0    | 4   | 1    | 5   | 2    | 1   | 3                  | 3   | 4           | 0    | 5                                    | 1   | 1    | 2    |  |  |  |  |  |
| X:19:00                                        | X:23:59 | Measure   | 300                                                        | 0    | 4   | 1    | 5   | 2    | 1   | 3                  | 3   | 4           | 0    | 5                                    | 1   | 1    | 2    |  |  |  |  |  |
| USB link                                       |         |           | Up                                                         | Down | Up  | Down | Up  | Down | Up  | Down               | Up  | Down        | Up   | Down                                 | Up  | Down | Down |  |  |  |  |  |
| X:24:00                                        | X:24:59 | Prep.time | 60                                                         | 0    | 5   | 1    | 4   | 2    | 2   | 3                  | 4   | 3           | 5    | 0                                    | 4   | 1    | 1    |  |  |  |  |  |
| X:25:00                                        | X:29:59 | CC        | 300                                                        | 0    | 5   | 1    | 4   | 2    | 2   | 3                  | 4   | 3           | 5    | 0                                    | 4   | 1    | 1    |  |  |  |  |  |
| USB link                                       |         |           | Up                                                         | Down | Up  | Down | Up  | Down | Up  | Down               | Up  | Down        | Up   | Down                                 | Up  | Down | Down |  |  |  |  |  |
| X:30:00                                        | X:30:59 | Prep.time | 60                                                         | 0    | 1   | 1    | 2   | 2    | 1   | 3                  | 5   | 4           | 4    | 5                                    | 3   | 4    | 6    |  |  |  |  |  |
| X:31:00                                        | X:35:59 | Measure   | 300                                                        | 0    | 1   | 1    | 2   | 2    | 1   | 3                  | 5   | 4           | 4    | 5                                    | 3   | 4    | 6    |  |  |  |  |  |
| USB link                                       |         |           | Up                                                         | Down | Up  | Down | Up  | Down | Up  | Down               | Up  | Down        | Up   | Down                                 | Up  | Down | Down |  |  |  |  |  |
| X:36:00                                        | X:36:59 | Prep.time | 60                                                         | 0    | 1   | 1    | 2   | 2    | 1   | 3                  | 5   | 4           | 4    | 5                                    | 3   | 4    | 6    |  |  |  |  |  |
| X:37:00                                        | X:41:59 | Measure   | 300                                                        | 0    | 0   | 1    | 1   | 2    | 1   | 3                  | 5   | 4           | 4    | 5                                    | 3   | 4    | 6    |  |  |  |  |  |
| USB link                                       |         |           | Up                                                         | Down | Up  | Down | Up  | Down | Up  | Down               | Up  | Down        | Up   | Down                                 | Up  | Down | Down |  |  |  |  |  |
| X:42:00                                        | X:42:59 | Prep.time | 60                                                         | 0    | 2   | 1    | 3   | 2    | 0   | 3                  | 1   | 4           | 4    | 5                                    | 5   | 4    | 5    |  |  |  |  |  |
| X:43:00                                        | X:47:59 | Measure   | 300                                                        | 0    | 2   | 1    | 3   | 2    | 0   | 3                  | 1   | 4           | 4    | 5                                    | 5   | 4    | 5    |  |  |  |  |  |
| USB link                                       |         |           | Up                                                         | Down | Up  | Down | Up  | Down | Up  | Down               | Up  | Down        | Up   | Down                                 | Up  | Down | Down |  |  |  |  |  |
| X:48:00                                        | X:48:59 | Prep.time | 60                                                         | 0    | 4   | 1    | 5   | 2    | 1   | 3                  | 3   | 4           | 0    | 5                                    | 1   | 1    | 2    |  |  |  |  |  |
| X:49:00                                        | X:53:59 | Measure   | 300                                                        | 0    | 4   | 1    | 5   | 2    | 1   | 3                  | 3   | 4           | 0    | 5                                    | 1   | 1    | 2    |  |  |  |  |  |
| USB link                                       |         |           | Up                                                         | Down | Up  | Down | Up  | Down | Up  | Down               | Up  | Down        | Up   | Down                                 | Up  | Down | Down |  |  |  |  |  |
| X:54:00                                        | X:54:59 | Prep.time | 60                                                         | 0    | 5   | 1    | 3   | 2    | 2   | 3                  | 1   | 4           | 4    | 5                                    | 0   | 4    | 4    |  |  |  |  |  |
| X:55:00                                        | X:59:59 | Measure   | 300                                                        | 0    | 5   | 1    | 3   | 2    | 2   | 3                  | 1   | 4           | 4    | 5                                    | 0   | 4    | 4    |  |  |  |  |  |
| Transmission off                               |         |           | 23:59:59                                                   |      |     |      |     |      |     |                    |     |             |      |                                      |     |      |      |  |  |  |  |  |
| X = 0, ..., 23                                 |         |           |                                                            |      |     |      |     |      |     |                    |     |             |      |                                      |     |      |      |  |  |  |  |  |

Fig. 5. TWSTFT operation scheduler for every hour measurement sessions in Europe-Asia link and Asia-Asia link.

치하고 있는 정지궤도 러시아 위성 express-80을 활용하고 있으며, 해당 위성을 통해 독일의 PTB, 중국의 National Institute of Metrology (NIM) 및 중국의 위성항법시스템 BeiDou Navigation Satellite System (BDS)에 소급성을 제공하고 있는 National Time Service Center (NTSC), 대한민국의 Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS), 일본의 National Institute of Information and Communications Technology (NICT), 러시아의 위성항법시스템 GLONASS에 소급성을 제공하고 있는 All-Russian Scientific Research Institute for Physical-Engineering and Radiotechnical Metrology (VNIIFRI)와 폴란드의 Central Office of Measures (GUM)이 국제 시각 비교에 참여하고 있다. Europe-Asia link 및 Asia-Asia link는 uplink 주파수 14.2555 GHz와 downlink 주파수 11.4555 GHz를 사용하고 있으며, 신호 식별 및 신호 전력 조정의 용이성을 위해 20 KHz 간격, 최대  $\pm 60$  KHz의 반송파 주파수 offset으로 할당되어 있다. 또한 Europe-Europe link와 동일하게 RX time slot scheduler를 구성하여 운영하고 있으며, Europe-Asia 및 Asia-Asia link의 TWSTFT scheduler는 Fig. 5와 같다.

또한 일본 NICT에서 개발한 Software Ranging System (SRS) 모델을 활용한 Asia-Asia link가 실험적으로 운영되고 있다. SRS 모델의 경우 4개의 Rx 채널의 운용이 가능하여, 일본의 NICT, 대한민국의 KRISS, 대만의 Telecommunication Laboratories (TL)이 시분할 없이 연속 측정을 수행하고 있다 (Fujieda et al. 2019, 2020). 또한 해당 링크를 위해 경도 172°E에 위치하고 있는 정지궤도 위성 Eutelsat 172B를 중계기로 사용하고 있다 (Yang et al. 2009).

### 3. CDMA 기반 TWSTFT 기법을 활용한 다대다 시각 비교 방안

본 논문에서는 TWSTFT를 활용한 시각 비교 기법의 시각 보급 용이성을 개선하기 위한 CDMA 기반 TWSTFT 기법을 활용한

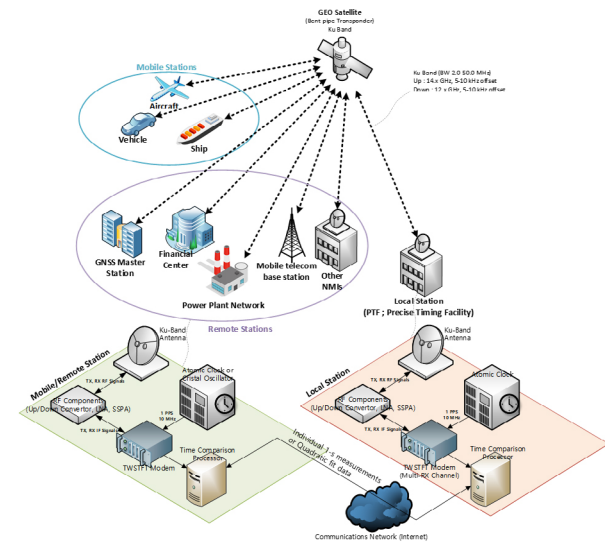


Fig. 6. CDMA based All-to-All TWSTFT operation concept.

다대다 시각 비교 방안을 제시하고자 한다. 전통적인 TWSTFT 운용은 단일 RX 채널을 활용하여 시분할 접속방식으로 별도의 RX time slot scheduler를 설정하여, 상대국의 시각 비교 신호를 수신하는 방식으로 구성되어 있다. 이에 따라 새로운 기준국이 추가되거나 시각 비교 시스템의 교정 및 실험용 신호가 필요할 경우마다, scheduler를 조정하여 재배포하는 등의 과정이 요구되며, 이는 운용 용이성 및 확장성 저하와 시스템 유연성 및 운영자가 지속적으로 개입해야 하므로, 신뢰성의 악화로 이어진다. 또한 모델의 RX 채널이 time slot schedule에 따라 신호 단절 및 재획득을 지속적으로 수행하므로, 빈번한 신호 재 획득에 따른 신호 획득 오 결정 (False Lock)에 대한 높은 위험성을 내재하고 있다.

본 논문에서 시각 보급의 용이성을 개선하기 위한 운용 방안의 핵심은 Precise Timing Facility (PTF) 기준국에서 다수의 RX 채널을 운용하여, 다수의 사용자에게 시각 보급을 수행하는 방식이며, 개념도는 Fig. 6과 같다.

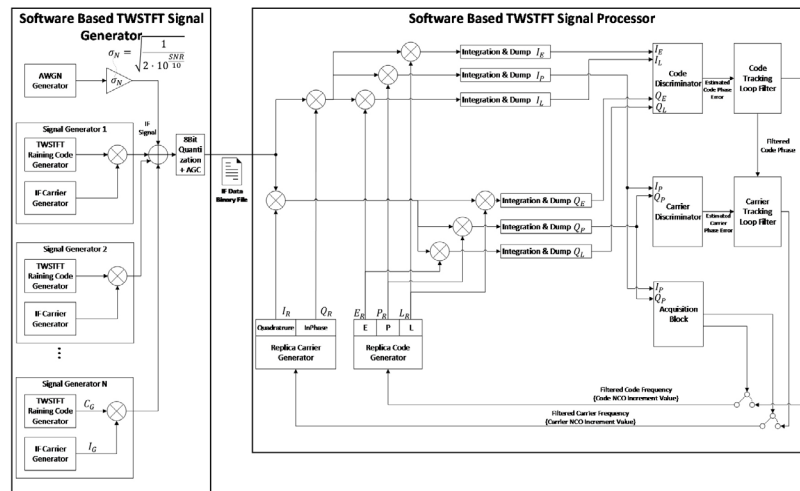


Fig. 7. Software based simulation platform design for CDMA based TWSTFT signal environments.

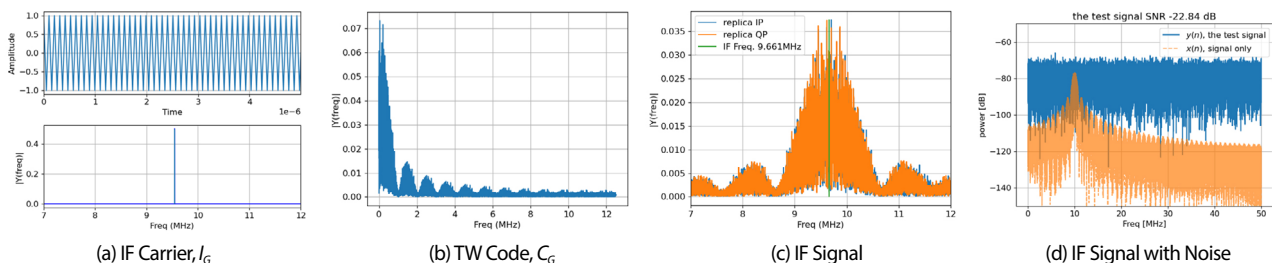


Fig. 8. Software based TWSTFT signal generator output.

Fig. 6에서 PTF는 원자시계 등 정밀시각원을 보유하고 Universal Time Coordinated (UTC)에 소급성을 유지하고 있는 시설을 의미하며, 대한민국의 경우 한국표준과학연구원이 그 역할을 수행할 수 있다. 또한 각 기준국은 Ku 대역 안테나, 저잡음 증폭기 (Low Noise Amplifier, LNA), 고출력증폭기 (High Power Amplifier, HPA), 상향/하향 주파수 변환기 등으로 구성된 RF 파트 및 다수의 RX 채널에 대해 수신 가능한 TWSTFT 모뎀으로 구성되며, 이동형 기준국의 경우 상용 소형 지향성 안테나 혹은 다수의 소자로 구성된 배열안테나를 활용하여 구축할 수 있을 것으로 예상된다.

본 논문에서 제안하는 시각 비교 방안을 적용하기 위해서는 다수의 RX 채널에 대해 신호 획득 및 추적이 동시에 수행가능한 TWSTFT 모뎀이 필수적으로 요구된다. 해당 기술은 위성 항법 수신기 설계 분야에서 이미 고도화되었으며, 상용 위성 항법 수신기의 경우, 다중 주파수 (Multi-frequency) 및 다중 위성군 (Multi-constellation)에 대응하기 위해 수백 채널을 동시 운용하는 기술이 보편화 되었을 뿐만 아니라, Fast Fourier Transform (FFT) 및 Inverse Fast Fourier Transform (IFFT) 기반의 다수의 빠른 신호 획득을 위한 다양한 기술이 연구 및 상용화 되었다 (NovAtel et al. 2023). 따라서 다수의 RX 채널을 운용가능한 TWSTFT 모뎀 개발이 충분히 가능할 것으로 전망된다.

다중접속 및 신호구조 관점에서 제안한 CDMA 기반 TWSTFT 기법을 활용한 다대다 시각 비교 방안은 시각 동기가 필요한 각 시설을 대상으로 시각 비교를 수행하기 위해 별도의 RX time slot

scheduler를 구성하지 않고, CDMA 기반으로 운용함으로써, 대 상 기준국 확장에 따른 시각 비교용 신호의 추가가 용이한 장점을 갖는다. 또한 지속적인 time slot scheduler 관리 및 배포가 요구되지 않아, 시스템 운용성 및 신뢰성 개선이 가능하다.

## 4. CDMA 기반의 다대다 TWSTFT 운용을 위한 시뮬레이션 기반 분석

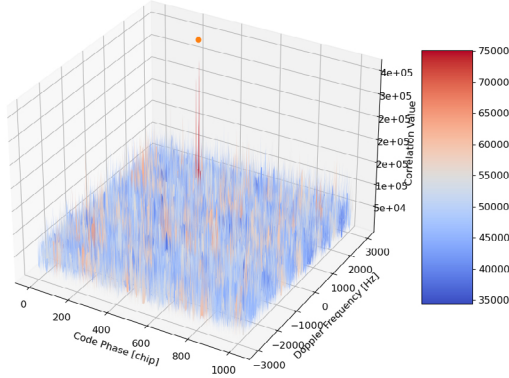
### 4.1 CDMA 기반의 다중 TWSTFT 신호 분석을 위한 시뮬레이션 플랫폼 설계

제안한 CDMA 기반 TWSTFT 기법을 활용한 다대다 시각 비교 방안을 적용하기 위해 다수의 신호가 동일 대역에 운영되어야 하며, 이에 따라 다수의 신호 환경에 대한 측정치 성능 분석이 필요하다. 본 논문에서는 다수의 양방향 시각비교용 신호가 중첩된 환경을 대상으로 측정치 성능을 평가하기 위한 소프트웨어 기반 시뮬레이션 플랫폼을 Fig. 7과 같이 설계하였으며, 신호 생성부 검증 결과는 Fig. 8과 같다.

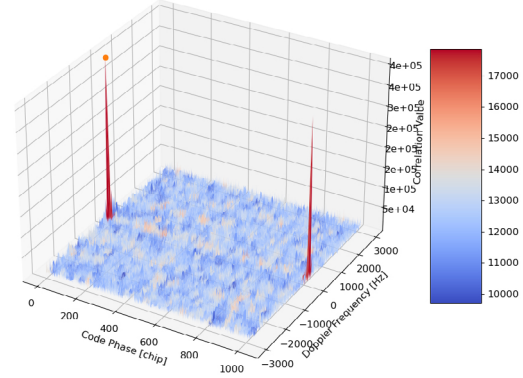
Fig. 7과 같이 시뮬레이션 플랫폼은 소프트웨어 기반 TWSTFT 신호 생성기와 소프트웨어 기반 TWSTFT 신호 처리기로 구성하였으며, Windows 기반 Visual Studio Code 1.80.1 개발환경에서 개발언어 python 3.10.6을 활용하여 구현하였다. TWSTFT 신호 생성기는 다수 채널의 신호를 생성할 수 있도록 설계하였으며,

**Table 2.** Software based DLL, PLL discriminator and tracking loop filter for TWSTFT signals.

| Types                | Phase lock loop     |                         | Delay lock loop          |                            |
|----------------------|---------------------|-------------------------|--------------------------|----------------------------|
|                      | Method              | Note                    | Method                   | Note                       |
| Discriminator        | Method: $(Q_P/I_P)$ | Two-quadrant arctangent | Method: Early-Minus-Late | $E = \sqrt{I_E^2 + Q_E^2}$ |
|                      | Phase error: $\phi$ |                         | Power (EMLP)             | $L = \sqrt{I_L^2 + Q_L^2}$ |
| Tracking loop filter | 2nd order filter    | 2nd order filter        | 2nd order filter         | Loop gain: 1.0             |
|                      | Filter BW: 25.0 Hz  |                         | Filter BW: 2.0 Hz        |                            |
|                      | Damping ratio: 0.7  |                         | Damping ratio: 0.7       |                            |
|                      | Loop gain: 0.25     |                         | Loop gain: 1.0           |                            |



(a) GPS L1CA live signal full search



(b) TWSTFT generated signal full search

**Fig. 9.** TWSTFT signal acquisition function verification of software-based TWSTFT signal process platform.

임의의 코드 및 반송파 주파수와 도플러 주파수를 적용할 수 있도록 구성하였다. 또한 TWSTFT 신호는 일반적으로 BPSK 변조 기법을 사용하고 있기 때문에, 이에 따라 시뮬레이션 플랫폼 설계 시 BPSK 변복조 기법을 적용하였다.

각 신호 생성기에서 생성된 반송파 주파수  $I_G$ 와 PRN 코드  $C_G$ 는 Eq. (4)와 같다.

$$\begin{aligned} I_G &= \cos(2\pi(f_{if} + f_d^{carr})t + \phi_G) \\ C_G &= \text{PRN}_{TW} \left[ \text{mod}((f_{TW} + f_d^{code})t + \tau_G, L_{TW}) \right] \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $t$ 는 모의 신호 생성을 위한 기준시간,  $f_{if}$ 는 TWSTFT 모델의 중간주파수,  $f_d^{carr}$ 는 채널에 존재하는 도플러 주파수,  $\phi_G$ 는 채널의 반송파 위상 지연 값이며,  $\text{PRN}_{TW}$ 는 TWSTFT 신호의 코드 시퀀스,  $f_{TW}$ 는 코드 주파수,  $f_d^{code}$ 는 코드 도플러,  $\tau_G$ 는 채널의 코드 위상 지연 값,  $L_{TW}$ 는 코드 길이를 의미한다. Eq. (4)로 정의된 신호는 생성된 잡음과 더해져 8 bit 양자화 과정을 거치며, 해당 신호를 이진데이터로 저장한다. 생성된 데이터를 처리하기 위해 일반적인 수신기가 수행하는 TWSTFT 복제 신호를 정의하였으며, Eqs. (5, 6)과 같다.

$$\begin{aligned} I_R &= \cos(2\pi(f_{if} + f_{d,R}^{carr})t + \phi_R) \\ Q_R &= \sin(2\pi(f_{if} + f_{d,R}^{carr})t + \phi_R) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} E_R &= \text{PRN}_{TW} \left[ \text{mod}((f_{TW} + f_{d,R}^{code})t + \tau_E, L_{TW}) \right] \\ P_R &= \text{PRN}_{TW} \left[ \text{mod}((f_{TW} + f_{d,R}^{code})t + \tau_P, L_{TW}) \right] \\ L_R &= \text{PRN}_{TW} \left[ \text{mod}((f_{TW} + f_{d,R}^{code})t + \tau_L, L_{TW}) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

여기서  $f_{d,R}^{carr}$ 은 신호 추적 결과로 추정된 반송파 도플러 주파수이

며,  $\phi_R$ 는 수신기 복제 신호의 위상이다.  $f_{d,R}^{code}$  또한 신호 추적 결과로 추정된 코드 도플러 주파수이며,  $\tau_E$ ,  $\tau_P$ ,  $\tau_L$ 은 코드 추적에 주로 활용되는 early, prompt, late arm의 코드 지연 위상이다. 본 논문에서는 early, late arm에 대해 prompt 대비  $\pm 0.5$  chip으로 설정하였다.

TWSTFT 모델의 신호 획득 및 추적 방식은 표준화되어 있지 않으며, 이와 관련된 기술문서도 공개되어 있지 않다. 따라서 본 논문에서는 소프트웨어 기반 TWSTFT 수신기를 위해 FFT/IFFT 기반의 신호 획득 모듈과 일반적인 코드 및 반송파 판별기와 추적기를 구현하였다. 논문에서 설계한 코드 및 반송파 판별기와 추적기는 Table 2와 같다.

본 논문에서 설계한 TWSTFT 신호 획득 및 추적기를 활용하여 생성한 모의 신호에 대해 신호 획득 및 추적을 수행하여 기능 검증을 수행하였으며, 신호 획득 검증 결과는 Fig. 9와 같고, 신호 추적 검증 결과는 Fig. 10과 같다. TWSTFT 상용 모델의 경우 신호 구조가 공개되어 있지 않으며, 이에 따라 신호처리를 위한 코드 시퀀스 정보를 확인하기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 신호 획득 기능 검증을 위해 Ettus사의 USRP X310를 활용하여 GPS L1CA 신호에 대한 IF 데이터를 수집하였으며, 수집한 실 신호 및 본 논문에서 설계한 신호를 활용하여 신호 획득을 수행하였다. Fig. 9의 코드위상 및 반송파 주파수에 따른 상관 결과에서 잡음과 신호간 상관 값 차이가 9 dB 이상 관측되는 것을 확인하였으며, 이를 통해 구현한 신호 획득 모듈을 검증하였다.

또한 신호 추적 기능의 검증을 위해, GPS L1CA 실 수집 신호 및 본 논문에서 설계한 신호 생성 결과를 둘 다 활용하였다. Fig. 10에 도시된 것과 같이 기능 검증을 위해 IQ Plot, 메시지 시퀀

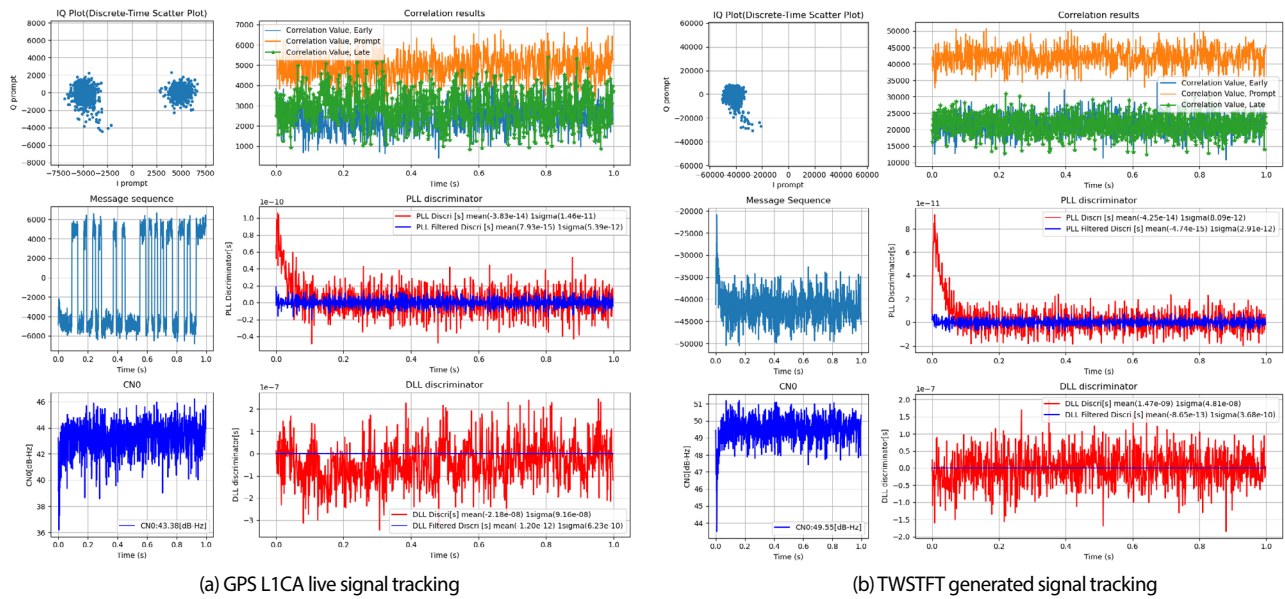


Fig. 10. TWSTFT signal tracking function verification of software-based TWSTFT signal process platform.

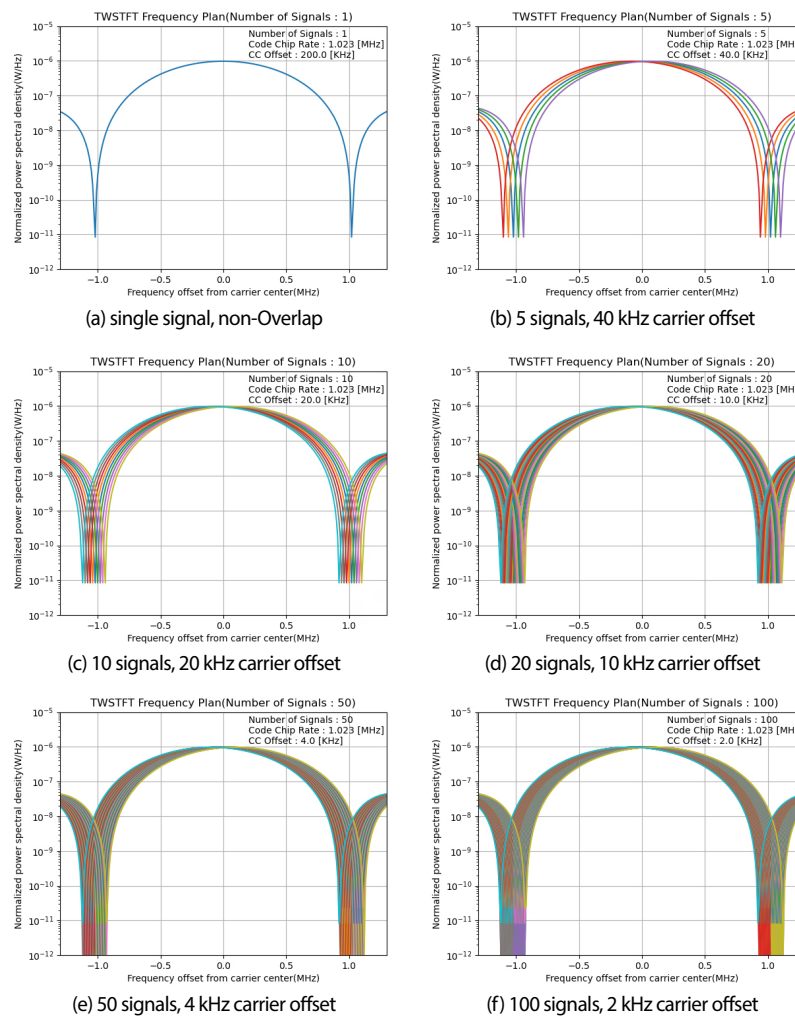


Fig. 11. Frequency plan setup for simulation-based phase jitter analysis in TWSTFT multi-signal environments.

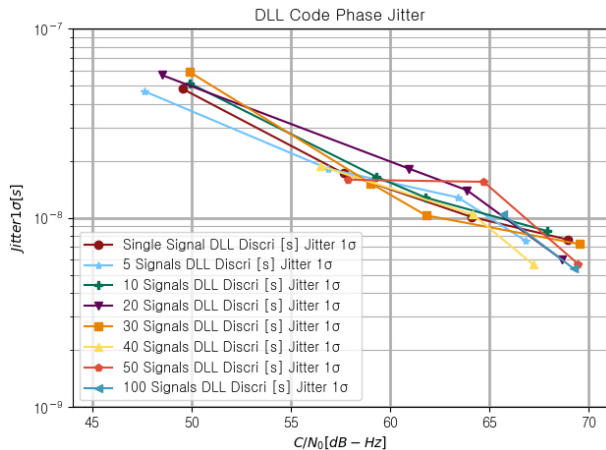


Fig. 12. DLL code phase jitter 1- $\sigma$  according to  $C/N_0$  and TWSTFT signal environments.

스, Early와 Prompt 및 Late 상관값, Delay Lock Loop (DLL)과 Phase Lock Loop (PLL)의 판별기 및 필터 출력 결과를 각각 도 시하였다. DLL과 PLL 필터 출력 결과가 생성기에서 정의한 잡 값에 수렴하는 것을 확인하였으며, 또한  $C/N_0$ 도 안정적으로 수렴하는 것을 확인하였다.

#### 4.2 신호 중첩에 따른 TWSTFT 신호의 코드 및 반송파 위상 지터 (Jitter) 분석

본 논문에서 설계한 CDMA 기반의 다중 TWSTFT 신호 분석을 위한 시뮬레이션 플랫폼을 활용하여, 다수의 TWSTFT 신호 환경에 대한 코드 기반 측정치의 오차 및 반송파 기반 측정치 오차 수준을 분석하였다. 코드 기반 측정치 오차 수준 평가를 위해 DLL 코드 위상 지터를 도출하였으며, 반송파 기반의 측정치 오차 수준 평가를 위해 PLL 반송파 위상 지터를 산출하였다. 또한 신호 환경에 따른 측정치 오차 수준간 차이를 확인하기 위해 단일 신호 환경 및 다수의 신호 환경 등을 구성하였으며, 일반적인 TWSTFT 모뎀 운용 환경인  $C/N_0$  45~70 dB-Hz를 시뮬레이션 환경으로 설정하였다. 또한 TWSTFT 신호 중첩환경에 대해 반송파 주파수 간격을 갖도록 설계하였으며, 신호 수와 무관하게  $\pm 200$  kHz내에 위치하도록 구성하였다. 일반적인 TWSTFT 운용의 주파수 간격은 10~20 kHz 수준이나, 본 논문에서는 중첩에 따른 영향을 확인하기 위해 100개 신호 중첩 시 최대 2 kHz 간격으로, 신호 수에 따라 더 짧은 주파수 간격을 갖도록 설정하였으며, 신호 수에 따른 신호 중첩 환경은 Fig. 11과 같다. 또한 TWSTFT 생성 신호의 경우 1.023 MHz의 코드율 (code rate)을 가정하였으며, TWSTFT 신호처리 시 상관 적분 시간을 1 ms로 설정하였다.

다중 TWSTFT 신호 중첩 환경에 따른 소프트웨어 기반 시뮬레이션 수행 결과는 Figs. 12 및 13과 같다. Fig. 12는 수신 신호 전력  $C/N_0$ 에 따른 DLL 판별기의 지터를 도출한 결과로, 수신 신호 전력의 크기에 따라 70 dB-Hz에서 약 5 ns 및 47 dB-Hz에서 약 60 ns 수준의 지터가 발생하는 것을 확인 할 수 있으며, 중첩 신호 수 및 반송파 주파수 간격에 따른 위상 지터 영향은 미비하였으나, 40개 이상의 신호 중첩 상황에서는 다수의 신호 중첩에 따

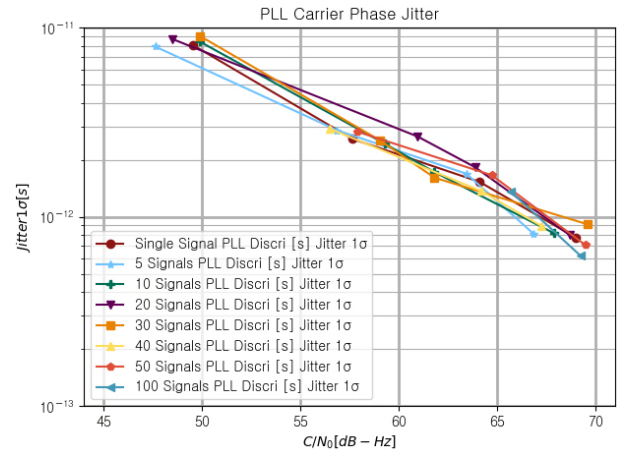


Fig. 13. PLL carrier phase jitter 1- $\sigma$  according to  $C/N_0$  and TWSTFT signal environments.

른 잡음 신호 전력의 증가로 일부 시행 회차에서 초기 신호 획득 불가가 확인되었다. 이에 따라 다수의 기준국을 대상으로 다대다 TWSTFT 서비스를 구축하기 위해서는 대상 기준국의 수의 증가에 따라 요구되는 운용 신호 전력을 증가시키거나, 충분한 확산이득을 가지는 코드 설계 및 긴 적분 시간을 갖는 수신기 구조 설계 등 별도의 방안이 필요한 것을 확인할 수 있었다. 단순 요구 신호 전력 증대를 통해 해당 문제를 극복하려 할 경우, 100개 기준국을 대상으로는 약 65 dB-Hz 이상의 높은 신호 전력이 요구됨을 확인하였다. 본 시뮬레이션에서는 1.023 MHz의 코드율을 갖는 신호 및 1 ms 적분 시간을 운용 환경으로 가정하였기 때문에, 더 넓은 대역폭 및 상대적으로 더 긴 적분 시간을 가정할 경우, 요구되는 수신 신호 전력을 낮출 수 있을 것으로 예상된다.

Fig. 13은 수신 신호 전력에 따른 PLL 판별기의 지터를 도출한 결과로, Fig. 12와 유사한 추이를 보이나, 70 dB-Hz에서 약 0.8 ps, 47 dB-Hz에서 약 9 ps 수준으로 DLL 지터에 비해 상대적으로 우수한 성능을 확인하였다.

## 5. 결론

본 논문에서는 시각 동기 기술의 현황과 시각 비교 기술의 종류 및 그 특성에 대해 소개하였으며, 기존 GNSS 기반의 시각 비교 기법에 대한 높은 의존도와 GNSS 신호 활용에 따른 시각 동기 단점의 위험성 및 GNSS 기반의 시각 비교 수준보다 우수한 비교 성능을 요구하는 인프라 등에 대해 언급하였다. 이러한 문제점 및 요구사항에 대응하기 위해 본 논문에서는 TWSTFT를 활용한 CDMA 기반 다대다 시각 보급 방안을 제시하였다. 본 논문에서 제시한 TWSTFT 활용 시각 보급 방안의 시각 비교 성능 영향을 분석하기 위해, RF 채널 내 다수의 신호가 존재하는 환경이 신호 추적 성능에 미치는 영향을 분석하였으며, 이를 위해 python을 활용한 소프트웨어 기반 TWSTFT 신호 분석 플랫폼을 설계하였다.

다중 TWSTFT 신호 중첩 환경에 대한 시뮬레이션 분석 결과, 코드 및 반송파 측정치가 수신 신호 전력에 의해 결정됨을 확인

할 수 있었으며, 신호 중첩에 따른 위상 오차 열화 영향은 미비한 것을 확인하였다. 그러나, 제한한 TWSTFT 운용 방식을 적용하기 위해서는 다수의 수신 채널을 처리할 수 있는 새로운 TWSTFT 모뎀과 구체적인 신호 구조 및 각 기준국간 측정치 공유를 자동화할 수 있는 솔루션이 요구될 뿐만 아니라, 소형화된 Ku 대역 안테나 및 신호 RF 파트 등이 필요하다. 해당 기술들 중 일부는 이미 상용화 된 사례가 있으며 따라서 추후 지속적인 연구 및 새로운 모뎀 개발을 통하여, 충분히 서비스 가능할 것으로 전망된다.

본 논문의 결과는 다대다 TWSTFT 시각 보급 서비스를 제공하기 위한 기초연구로 활용할 수 있을 것으로 기대되며, 추후 한국형 위성항법시스템 및 전력기준시 등과 같은 응용 분야에서 GNSS 기반 기술보다 우수한 시각 동기 성능을 요구하는 국가기반시설 운용에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

## ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the Division of Physical Metrology of KRISS (project code: KRISS-2023-GP2023-0001-12).

## AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization & methodology & software, J. Lee; formal analysis & investigation, J. K. Lee; writing, J. Lee, J. I. Oh; review and editing, J. H. Rhee, G. W. Choi; supervision, Y. K. Lee; project administration, S. H. Yang.

## CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

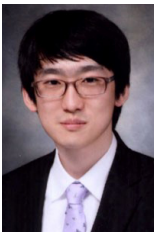
## REFERENCES

- Cheng, P., Shen, W., Sun, X., Cai, C., Wu, K., et al. 2022, Measuring Height Difference Using Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer, *Remote Sensing*, 14, 451. <https://doi.org/10.3390/rs14030451>
- Fujieda, M., Tabuchi, R., & Gotoh, T. 2019, A New TWSTFT Modem with Code and Carrier Phases, In 2019 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium and European Frequency and Time Forum (EFTF/IFC), Orlando, FL, USA, 14-18 April 2019, pp.1-2. <https://doi.org/10.1109/fcs.2019.8856010>
- Fujieda, M., Tabuchi, R., & Gotoh, T. 2020, Development of a new digital TWSTFT modem, *International Journal of Electrical Engineering*, 27, 141-145. [https://doi.org/10.6329/CIEE.202008\\_27\(4\).0004](https://doi.org/10.6329/CIEE.202008_27(4).0004)
- Hanson, D. W. 1989, Fundamentals of two-way time transfers by satellite, In *Proceedings of the 43rd Annual Symposium on Frequency Control*, Denver, CO, USA, 31 May - 02 June 1989, pp.174-178. <https://doi.org/10.1109/freq.1989.68861>
- Hartl, P., Veenstra, L., Gieschen, N., Mussencr, K. M., Schafer, W., et al. 1983, Spread spectrum time transfer experiment via INTELSAT, In *Proceedings of the 15th Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting*, Washington, DC, 6-8 Dec 1983, pp.331-356. <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=16199>
- Imae, M., Suzuyama, T., Gotoh, T., Shibuya, Y., Nakagawa, F., et al. 2003, Two Way Satellite Time and Frequency Transfer, *Journal of the National Institute of Information and Communications Technology*, 50, 125-133. <https://www.nict.go.jp/publication/shuppan/kihou-journal/journal-vol50no1.2/0403.pdf>
- ITU-R TF.1153 2015, Technical document of ITU-R (The operational use of two-way satellite time and frequency transfer employing pseudorandom noise codes), ITU-R TF.1153-4. [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/tf/R-REC-TF.1153-4-201508-!%PDF-A.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/tf/R-REC-TF.1153-4-201508-!%PDF-A.pdf)
- Kirchner, D. 1991, Two-way time transfer via communication satellites, *Proceedings of the IEEE*, 79, 983-990. <https://doi.org/10.1109/5.84975>
- Lee, Y. K., Yang, S. H., Lee, J. K., & Lee, C. B. 2014, Evaluation of daily jump compensation methods for GPS carrier phase data, In 29th Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2014), 24-29 August 2014, Rio de Janeiro, Brazil, pp.152-153. <https://doi.org/10.1109/cpem.2014.6898304>
- Meynadier, F., Esteban, H., & Sesia, I. 2019, Summary for the GSOP 2019 TWSTFT calibration report, Real Instituto y Observatorio de la Armada (ROA), ROA/GAL-TN-ROA-GSOP-2019001. [https://webtai.bipm.org/ftp/pub/tai/publication/time-calibration/Current/0503-2019\\_TW\\_OP\\_v1-0.pdf](https://webtai.bipm.org/ftp/pub/tai/publication/time-calibration/Current/0503-2019_TW_OP_v1-0.pdf)
- NovAtel, OEM719 Product Sheet, D21049 Version 9, 27 July 2023. <https://hexagondownloads.blob.core.windows.net/public/Novatel/assets/Documents/Papers/OEM719-Product-Sheet/OEM719-Product-Sheet.pdf>
- Sekido, M., Takiguchi, H., Hobiger, T., Ichikawa, R., Fujieda, M., et al. 2012, VLBI Application for time and frequency transfer and comparison with other techniques, August 2012, IAU Joint Discussion 7: Space-Time Reference Systems for Future Research at IAU General Assembly-Beijing, p.11. <http://referencesystems.info/iau-joint-discussion-7.html>

Takiguchi, H., Koyama, Y., Ichikawa, R., Gotoh, T., Ishii, A., et al. 2008, VLBI measurements for time and frequency transfer, Conference: Proc. of the European Frequency and Time Forum 2008, 1, January 2008.

TimeTech GmbH 2012, Satellite Time Transfer and Ranging Equipment (SATRE) Datasheet. [https://www.ion.org/ptti/upload/files/1039\\_10139\\_Datasheet.pdf](https://www.ion.org/ptti/upload/files/1039_10139_Datasheet.pdf)

Yang, S. H., Lee, C. B., Lee, J. K., Lee, Y. K., & Lee, S. J. 2009, Multi-channel Two-Way Time Transfer Using a Communication Satellite, Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, 15, 346-352. <https://doi.org/10.5302/j.icros.2009.15.3.346>



**Juhyun Lee** received the Ph.D. degree in Electronics Engineering at Chungnam National University, Daejeon, South Korea, in 2018. He was a senior research engineer of DSNavcours Co., Ltd., Daejeon, South Korea from 2017 to 2022. 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 KRISS.



**Ju-ik Oh** received the Ph.D. degree in electrical engineering from the Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Daejeon, South Korea, in 2023. He has been working at the Time and Frequency Group, Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS), Daejeon, since 2023. His current research interests include time transfer using satellites, millimeter-wave antennas, antenna array systems, and RF front-end design.



**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. Presently, he is a researcher at the Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS), Daejeon, South Korea. Within KRISS, he is actively engaged in the Time and Frequency Group, contributing to research on precise timing systems using GNSS and TWSTFT technologies.



**Gyeong Won Choi** received the M.S. degree in Physics from the Chonnam National University, Gwangju, Korea, in 2016. He has been working at the Time and Frequency Group, Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS), Daejeon, since 2023.



**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.



**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.



**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.

