

TWSTFT 모뎀의 성능평가방안 및 성능분석

이주현, 오주익, 이준호, 최경원, 이종구, 양성훈, 허윤정, 유대혁, 허명선, 이영규[†]

Study on a Method for Performance Evaluation and Analysis of TWSTFT Modems

Juhyun Lee^{id}, Ju-Ik Oh^{id}, Joon Hyo Rhee^{id}, Gyeong Won Choi^{id}, Jong Koo Lee^{id}, Sung-hoon Yang^{id},
Youn-Jeong Heo^{id}, Dai-Hyuk Yu^{id}, Myoung-Sun Heo^{id}, Young Kyu Lee^{† id}

Time and Frequency Group, Strategic Technology Research, Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS),
Daejeon 34113, Korea

ABSTRACT

Time synchronization is crucial for ensuring the reliable operation of modern economic and social infrastructures. Techniques such as Global Navigation Satellite System (GNSS)-based methods and Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer (TWSTFT) play key roles in precise time comparison and synchronization. TWSTFT, in particular, is recognized for its ability to achieve sub-nanosecond accuracy in time transfer, making it indispensable in fields such as satellite navigation. This paper proposes a comprehensive performance evaluation method for TWSTFT modems, emphasizing pre-validation in controlled environments to mitigate operational challenges. Using the proposed evaluation method, the study presents the standard deviation of RTT according to C/N_0 and compares it with the datasheet of a commercial TWSTFT modem. Through this approach, the aim of this study is to enhance the reliability and accuracy of TWSTFT-based time synchronization across diverse applications.

Keywords: TWSTFT, CDMA, performance evaluation, RTT, one-way tracking jitter

주요어: 위성이용양방향시각주파수전송기, 코드분할다중접속, 성능평가, 왕복시험, 단방향추적오차

1. 서론

현대 사회의 경제 및 사회적 인프라가 원활히 작동하기 위해서는 각 구성 요소들 간의 시각 동기가 필수적이며, 이러한 동기가 제대로 이루어지지 않을 경우 시스템 전반의 운영에 막대한 장애가 발생할 수 있다. 가령, 주식 거래를 중계하는 시스템에서는 각 서버와 거래를 요청하는 기관 및 개인 고객들의 단말기가 수십 ms 이내로 동기화되어야 하며, 시각 동기가 적정 수준으로 이루어지지 않는다면 수많은 거래 요청이 혼재되어 정상적인 운영이 불가능해질 수 있다. 또한 항법 시스템의 경우 시각 동기 성능이 의사거리 측정치 오차 수준에 직접적인 영향을 미치며, 수 ns 수준의 초정밀 시각 동기 성능을 요구한다.

위성 기반의 양방향 시각 및 주파수 전송(Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer, TWSTFT) 기술은 수 ns 또는 그 이내의 시각 비교를 가능하게 하는 기술로서 원격지 간의 시각 비교를 위한 가장 정밀한 방법 중의 하나로 자리매김하고 있다 (CCF TWSTFT1 2021). TWSTFT를 구현하기 위한 기준이 되는 국제전기통신연합(International Telecommunication Union, ITU)의 권고안 (ITU-R TF.1153 2015)은 TWSTFT의 시스템 구성, 구조, 작동 원리, 불확도, 오차 요인, 교정, 데이터 산출 방법 및 형식을 정의하고 있으며, TWSTFT를 통한 시각 비교는 권고안에 따라 원격지의 TWSTFT 장비에서 생성된 데이터를 상대 측 장비로 전송 및 교환하여 수행된다.

한국표준과학연구원(Korea Research Institute of Standards

Received Aug 16, 2024 Revised Aug 26, 2024 Accepted Aug 30, 2024

[†]Corresponding Author E-mail: ykleeks@kriss.re.kr



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.

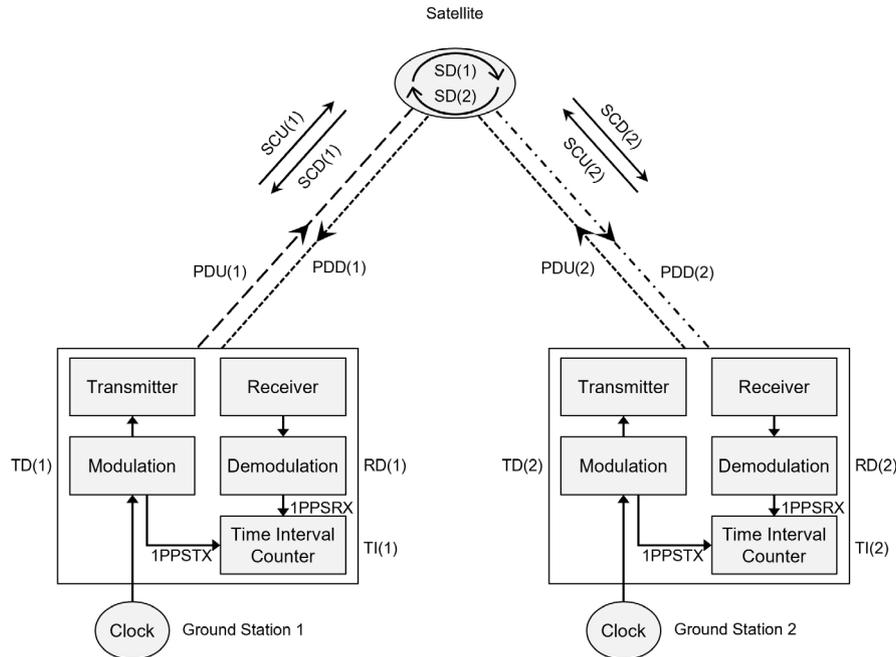


Fig. 1. Basic principle of TWSTFT.

and Science, KRISS)은 TWSTFT의 정확성과 신뢰성을 높이고 성능을 개선하기 위한 다양한 연구들을 수행하고 있다 (Yang et al. 2009, Lee et al. 2023a, 2023b, 2024). TWSTFT 시스템을 구축하여 정확한 시각비교를 수행하기 위해서는 사전에 TWSTFT 모뎀을 평가하고 검증하는 것이 매우 중요하다. 실제 운용 환경에서는 안테나를 비롯한 다양한 RF 장비들이 혼재되어 있어 이러한 장비들이 시각 동기 성능에 영향을 미치는 요인이 되며, 위성과 대기 조건 등 다양한 환경요인 또한 시각 동기 성능에 영향을 미치는 요소로 작용하기 때문이다. 구축된 시스템에 대해 시각 동기 성능을 평가하거나 성능 개선을 위한 분석을 수행할 경우, 이러한 통합된 운용 환경에서는 각 요소별 검증이 제한적이며 실제 운용 환경에서 장비를 분리하는 것이 용이하지 않으므로, 사전에 다른 조건들이 통제된 상황에서 각 요소별 검증을 수행하는 것이 필수적이다. TWSTFT 모뎀의 성능을 분석하는 방법은 정확도 평가, 지연 분석, 지터 분석, 신뢰성 및 안정성 평가, 환경 및 조건 별 성능 분석 등 다양한 방법으로 수행 가능하다. 이러한 방안을 통해 TWSTFT 모뎀의 성능을 종합적으로 분석할 수 있으며, 이를 바탕으로 모뎀의 동기화 정확도를 최적화하고, 다양한 환경에서 안정적인 시간 및 주파수 전송이 가능하도록 개선할 수 있다.

TWSTFT 모뎀과 관련된 평가를 수행한 연구사례들이 있으나, 주로 2개 모뎀을 활용한 지연을 측정하여 단순히 고정 값을 도출하기 위한 목적으로 수행되었다 (Hackman et al. 1995, Zhang et al. 2009). 또한 1 MHz와 2.5 MHz의 서로 다른 코드율(code rate)을 갖는 신호 환경에 대해 시각비교 성능평가를 수행한 사례가 있으나 (Jiang et al. 2016), 다양한 오차 요인이 포함된 시스템 수준의 평가로 TWSTFT 모뎀 자체의 성능을 객관적으로 확인하기 어렵다는 한계를 갖는다.

이에 따라, 본 논문에서는 상기 각 요소별 검증과 관련하여

TWSTFT 모뎀의 성능평가방안을 제안한다. 본 논문의 2장에서는 TWSTFT의 운용 개념에 대한 배경 지식을 설명하고, 3장에서는 TWSTFT 모뎀 및 신호 특성을 설명한다. 4장에서는 TWSTFT 모뎀의 성능 평가 방안과 시험 환경 구축 사례 및 그에 따른 성능 평가 결과를 제시하며, 마지막으로 5장에서는 결론과 제언 및 활용 방안을 서술한다. 본 연구 결과를 통해 고도의 시각 동기 성능을 요구하는 현대 시스템에서 TWSTFT 모뎀의 성능을 보장하고, 나아가 다양한 분야에서 신뢰성 있는 시각 동기를 가능하게 할 수 있을 것으로 기대된다.

2. TWSTFT 운용 개념

TWSTFT를 활용한 시각 비교를 수행할 경우 일반적으로 정지 궤도 위성을 활용하며 이에 대한 개념은 Fig. 1과 같이 표현할 수 있다. 각 기준국에서는 원자시계로부터 발생한 신호에 Binary Phase-Shift Keying (BPSK) 및 Pseudo-Random Noise (PRN) 코드 변조를 수행하며, 위성을 통해 이 RF 신호를 각 기준국 간에 송수신하여 시각 비교를 수행한다. 1 PPSTX는 각 기준국의 기준 1 PPS이며, 1 PPSRX는 상대 기준국으로부터 수신된 RF 신호를 통해 측정된 1 PPS이다. 1 PPSTX 및 1 PPSRX 간의 차이는 시간 간격계수기(Time interval counter, TIC)에 의해 측정(TI(k))되며, TI(k) 데이터를 각 기준국 간에 교환 및 차분하여 두 기준국 사이의 시각차를 계산할 수 있다.

Fig. 1에 명시된 각 항목들은 다음과 같다. k는 기준국 1 혹은 2이며, TI(k)는 송신되는 1 PPS 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)

Table 1. The signal structure comparison of TWSTFT modems.

TWSTFT Modem Name	SATRE	SRS
Intermediate frequency	70±15 MHz	70±1 MHz
Modulation type	DS-BPSK	DS-BPSK
Code chip rate	0.5, 1, 2.5, 5, 10, 20 MHz	1 MHz
Code sequence	-	GPS L2C(M)
Code length	-	20,000 bits (=20 ms)
Data rate	-	50 bps
Data length	-	500 bits (1 cycle: 20 ms × 500 bits = 10 s)

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.

각 기준국의 타임 스케일을 TS(k)로 표현할 경우 그 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.

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

위성을 통한 신호 송수신 시 전리층, 대류층, 지구 자전 효과 등 다양한 오차 요인들이 존재하며, 이러한 오차 요인들은 Eq. (3)에 표현된 바와 같이 각 기준국에서 측정된 측정치 간 차분을 통해 상당 부분 제거된다. 그러나 각 신호 경로에 따른 전파 환경이 완벽하게 동일하지는 않기 때문에 여러 효과들로 인한 지연 성분들이 완전히 소거되지 못하고 잔여오차로 존재하게 된다. 이러한 잔여 오차로 인해 TWSTFT로 도출한 시각 비교 결과의 정확도가 열화되며, 대표적인 잔여오차 요인으로는 위성 내부 지연, 지구 자전오차, 위성 경로지연, 전리층 지연, 대류층 지연, 기준국 내부 지연이 존재한다 (ITU-R TF.1153 2015, Cheng et al. 2022).

3. TWSTFT 모뎀과 신호 특성

3.1 상용 TWSTFT 모뎀

현재 상용으로 활용 가능한 TWSTFT 모뎀은 독일 TimeTech사에서 개발한 Satellite Time and Ranging Equipment (SATRE) 모뎀이 있으며, 실험 및 연구 목적으로 일본 National Institute of Information and Communications Technology (NICT)에서 개발한 Software Ranging System (SRS) 모뎀이 있다. 다수의 주요 국가측정표준기관 (National Metrology Institute, NMI)은 SATRE 모뎀을 활용하여 TWSTFT 시각비교 기준국이 구축되어, 표준

시 생성 및 유지에 기여하고 있으며, SRS 모뎀은 동아시아 국가 위주로 구축되어 시각 비교에 활용되고 있다 (Imae et al. 2003, TimeTech 2012, Fujieda et al. 2019, 2020). 한국표준과학연구원의 경우, TWSTFT EU-Asia link 참여를 위한 SATRE 모뎀 기반 기준국과 Asia-Asia link 참여를 위한 SRS 모뎀 기반 기준국을 동시에 운용 중에 있다 (Yang et al. 2009, Lee et al. 2023b).

SATRE 모뎀은 1개의 Tx channel과 최대 2개의 Rx channel의 RF 전단부 구성을 지원하며, 국가측정표준기관간 시각비교 시, 1개의 Rx channel을 활용하여 상대국의 신호를 시분할 하여 운용하고 있다. SRS 모뎀의 경우, 2개의 Tx channel과 1개의 Rx channel의 RF 전단부 구성을 물리적으로 지원하고 있으나, 신호 처리를 위한 4 channel의 상관기를 보유하고 있어, SATRE 모뎀에 비해 다수의 상대국 신호를 동시에 처리하는 것이 가능하다.

3.2 TWSTFT 신호 특성

상용 TWSTFT 모뎀은 직접확산변조 (Direct Sequence Spread Spectrum) 방식과 BPSK 변조 기법을 활용한 신호 구조를 사용하고 있다. 독일의 SATRE 모뎀의 경우, 1 MHz에서 20 MHz 까지의 코드율을 지원하며, 반송파 주파수 70±15 MHz 범위의 송수신이 가능하고, 0 dBm에서 -40 dBm 범위의 송신 출력을 지원한다. 그리고 코드 시퀀스, 코드 길이 및 데이터 구조 등은 공개되어 있지 않다. 일본의 SRS 모뎀의 경우, GPS L2C(M) 코드 시퀀스를 활용하여 1 MHz 코드율의 신호를 20 ms 길이로 생성하도록 설계되어 있으며, 반송파 주파수 70±1 MHz에 대한 송수신을 지원한다. SATRE 모뎀과 SRS 모뎀의 신호 특성은 Table 1과 같다 (Imae et al. 2003, TimeTech 2012, Fujieda et al. 2019, 2020).

4. TWSTFT 모뎀 성능평가방안 및 성능평가

4.1 TWSTFT 모뎀 성능평가방안 설계 및 시험환경구축

본 논문에서는 상기 소개한 TWSTFT 모뎀의 성능평가를 위한 방안을 설계하였으며, 제안한 성능평가 방안의 구성도는 Fig. 2와 같다. TWSTFT 모뎀은 일반적으로 신호 송신 모듈, 수신 모듈 및 인터페이스 모듈 등으로 구성되어 있으며, 통제된 환경에 대한 성능평가를 위해 Round-trip 기반의 테스트 방안을 구성하였다. 제안한 성능평가방안은 TWSTFT 모뎀 이외에, 모뎀에 인가하기 위한 기준 clock 및 이를 분배하기 위한 1 PPS, 10 MHz 분배기, 모뎀 신호 생성 지연 등의 분석을 위한 오실로스코프, 실 신호 환경 모사를 목적으로 균일한 잡음 생성을 위한 Vector Signal

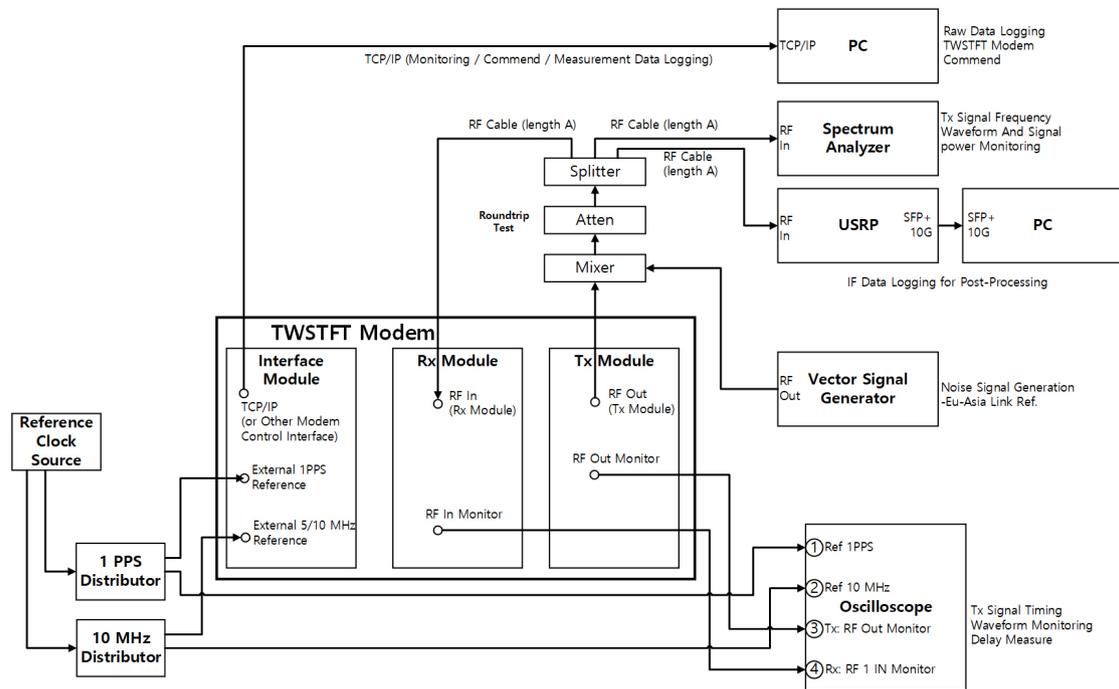


Fig. 2. Proposed performance evaluation method for TWSTFT modem.

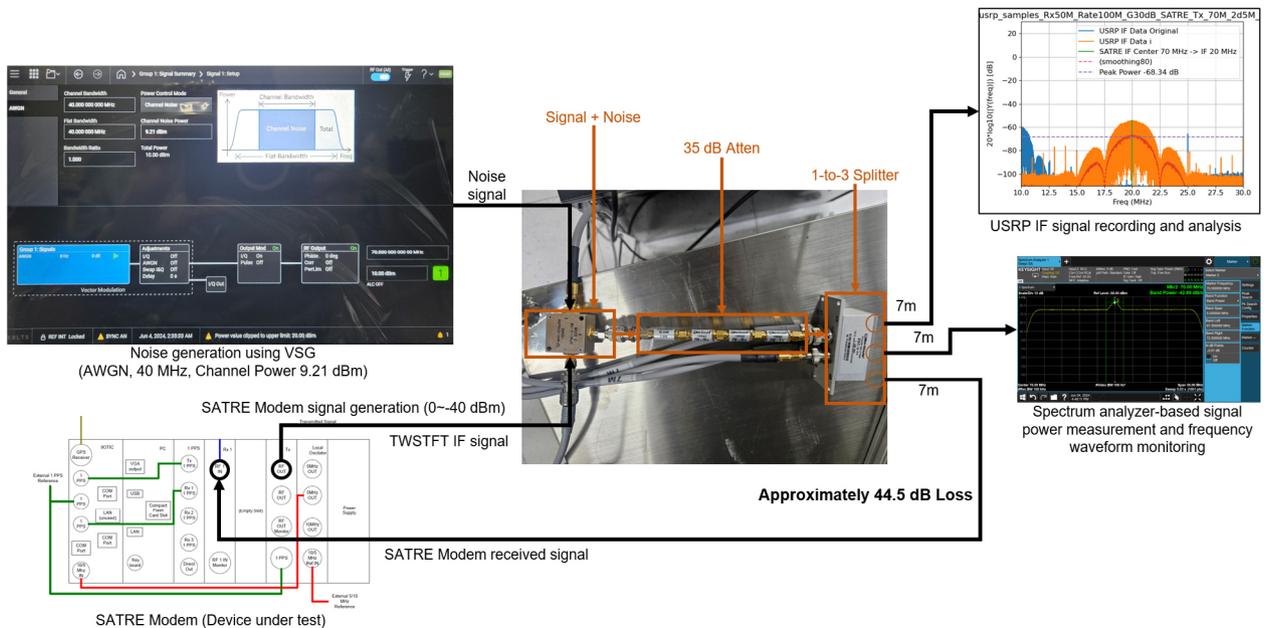


Fig. 3. The performance evaluation environment for TWSTFT modem. It consists of a TWSTFT modem, a VSG, a spectrum analyzer, a USRP, and a modem control and logging workstation.

Generator (VSG), TWSTFT 모뎀 신호 및 잡음 신호 전력 측정 및 신호 전력 조정을 위한 스펙트럼 분석기, IF 데이터 수집 및 후처리를 위한 IF 데이터 수집기, TWSTFT 모뎀 제어를 위한 PC, 모뎀 제어 및 측정치 데이터 수집 소프트웨어로 구성하였다. 또한 신호전력에 따른 성능평가 수행을 위해 TWSTFT 생성 신호와 잡음 신호와의 합성 및 분석을 위한 합성된 신호의 균일한 분배가 필요하며, 이를 위해 신호 합성기, 감쇠기, 분배기를 조합하였다. 제안한 TWSTFT 모뎀의 성능평가 방안 적용한 시험 환경

을 구현하기 위해, 한국표준과학연구원에서 기 보유하고 있는 SATRE 모뎀, Tektronix사의 DPO 4034 오실로스코프, Keysight 사의 VXG M9484C VSG와 PXA N9030B 스펙트럼 분석기를 활용하였다. 그리고, 추후 후처리를 통한 분석을 위해 IF 데이터 수집 환경을 구축하였으며, 이를 위해 NI사의 USRP-X310과 C언어 기반의 IF 데이터 수집 소프트웨어를 설계하고, TWSTFT 신호의 주파수 특성을 확인하였다. 또한 TWSTFT 모뎀을 활용한 다수의 설정환경에 대한 모뎀 제어 및 수집 자동화를 위해 TCP/IP 인터

Table 2. Performance evaluation setup for the TWSTFT modem using the proposed test environment.

Test case	TWSTFT modem setup			VSG setup		Other	
	Tx chip rate [MHz]	Tx power [dBm]	IF [MHz]	Signal type	Tx power [dBm]	Cable, Mixer, Splitter loss [dB]	Logging time [s]
1-(1-41)	0.5	0~-40 Actual: -44.5~-48.5 (Interval 1 dB)	70	AWGN	Actual: -48 (In BW 5 MHz)	-44.5	900
2-(1-41)	1.0						
3-(1-41)	2.5						
4-(1-41)	5.0						
5-(1-41)	10.0						
6-(1-41)	20.0						

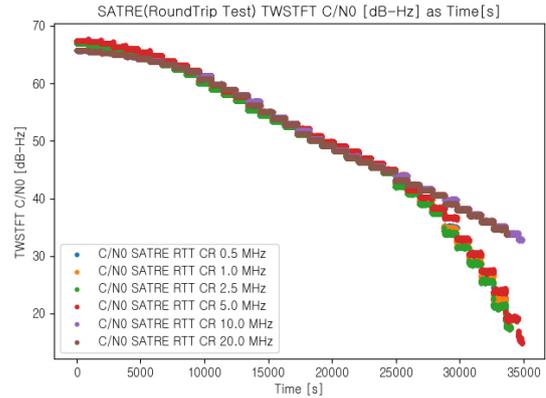
페이스 기반의 시험 자동화 소프트웨어를 Python을 활용하여 설계하였다. 마지막으로 각 측정 장비가 동일한 TWSTFT 신호 지연 및 수신 신호전력을 갖도록 구성하였으며, 각 수신부까지 44.5 dB의 동일한 신호 감쇠가 발생하도록 구성하였다. 실 장비를 활용한 구성도는 Fig. 3과 같다.

Fig. 3과 같이 구성한 시험 환경을 활용하여, TWSTFT 모뎀 신호의 코드율 및 신호 전력에 따른 총 246개의 시험을 설정하였으며, 각 시험 종류별 시험 시간은 TWSTFT link의 한 session에 일반적으로 할당하는 15분이 되도록 설정하여, 전체 시험 수행에 약 2.5일이 소요되도록 구성하였다. 시험 수행을 위해 설정한 각 장비의 신호 전력 및 설정 주파수는 Table 2와 같다. 시험 설정 시, TWSTFT 모뎀의 신호 전력 및 VSG의 잡음 신호 전력은 EU-Asia link의 실제 환경에서 발생하는 수신전력수준을 참고하여 유사한 수준으로 정의하였다.

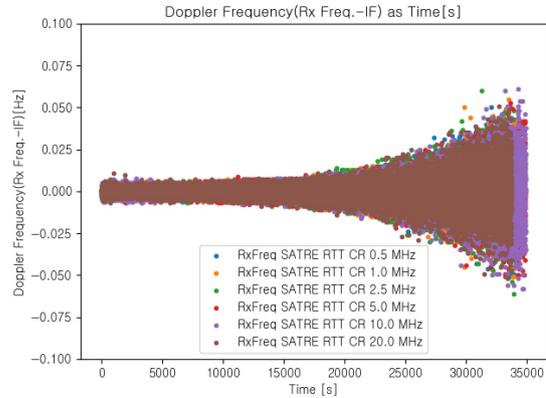
4.2 상용 TWSTFT 모뎀 성능평가

본 논문에서 제안한 TWSTFT 성능평가 방안 및 시험 설정을 활용하여, 보유한 SATRE 모뎀을 대상으로 시험을 진행하였으며, 대상 모뎀에서 측정된 수신 C/N₀, Rx 주파수, Round-Trip Time (RTT) 측정치를 코드율 및 시험 수행 시간에 따라 도시한 결과는 Fig. 4와 같다. Table 2에서 설정한 내용에 따라, 수신 신호전력을 -44.5 dBm에서 -48.5 dBm까지 1 dB 간격으로 900초 마다 감소시켰을 경우, Fig. 4a와 같이 시험 수행 시간이 경과함에 따라 모뎀 측정 C/N₀가 감소됨을 확인할 수 있었다. 또한 Figs. 4b,c를 통해 수신신호 전력의 감소에 따라, 추정된 Rx 주파수 및 RTT 측정치의 정밀도가 열화됨을 확인할 수 있었다. Fig. 4와 같이 수행한 시험 결과의 분석을 위해, 수집한 원시(raw) 데이터를 모뎀 명령인기 시점을 기준으로 각 세부 시험 종류로 분할하고, 각 세부 시험에 대해 모뎀 추정 C/N₀, 코드율에 따른 RTT 표준편차를 도출하였으며, 분석 결과에 대한 평가를 위해 SATRE 모뎀 데이터시트의 성능 수준과 Fig. 5와 같이 비교하였다.

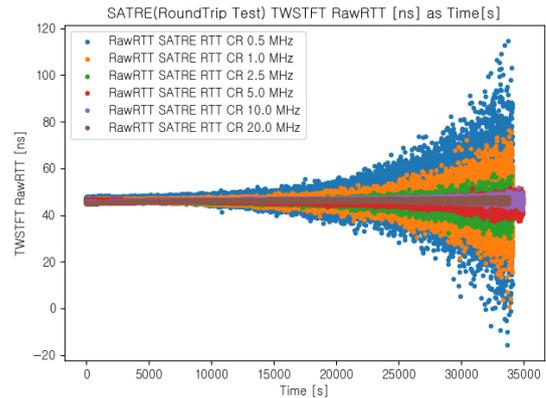
Fig. 5의 경우, SATRE 모뎀에서 측정된 수신 신호전력 C/N₀를 기준으로 구간별로 측정된 RTT의 표준편차를 산출한 것으로, 제 조사에서 제시한 SATRE 모뎀 데이터시트의 데이터와 형태가 상이함을 확인할 수 있다. 이러한 특성은 신호의 코드율에 따른 확산 이득 차이, 모뎀의 RF 전단부 특성 및 수신부의 적분시간 설정 등에 따른 모뎀 측정 C/N₀의 왜곡에 의해 발생하며, 해당 왜곡을 보정하여 신호전력에 따른 측정치 성능을 평가하기 위해 스펙트럼 분석기 기반의 C/N₀ 산출이 필요하다. 이를 위해 스펙트럼 분석기로 측정된 TWSTFT 모뎀의 신호전력 (P_r)를 활용하였으며 -44.5에서 -84.5 dBm를 대상 범위로 갖는다. 또한 코드율(f_{Code}) 및



(a) Measured Rx C/N₀ (actual power: -44.5 ~ -48.5 dBm)



(b) Rx frequency



(c) Round-trip time

Fig. 4. Logged raw data of the TWSTFT modem under the proposed test environment for performance evaluation. (a) Measured Rx C/N₀, (b) Rx frequency, (c) Round-trip time.

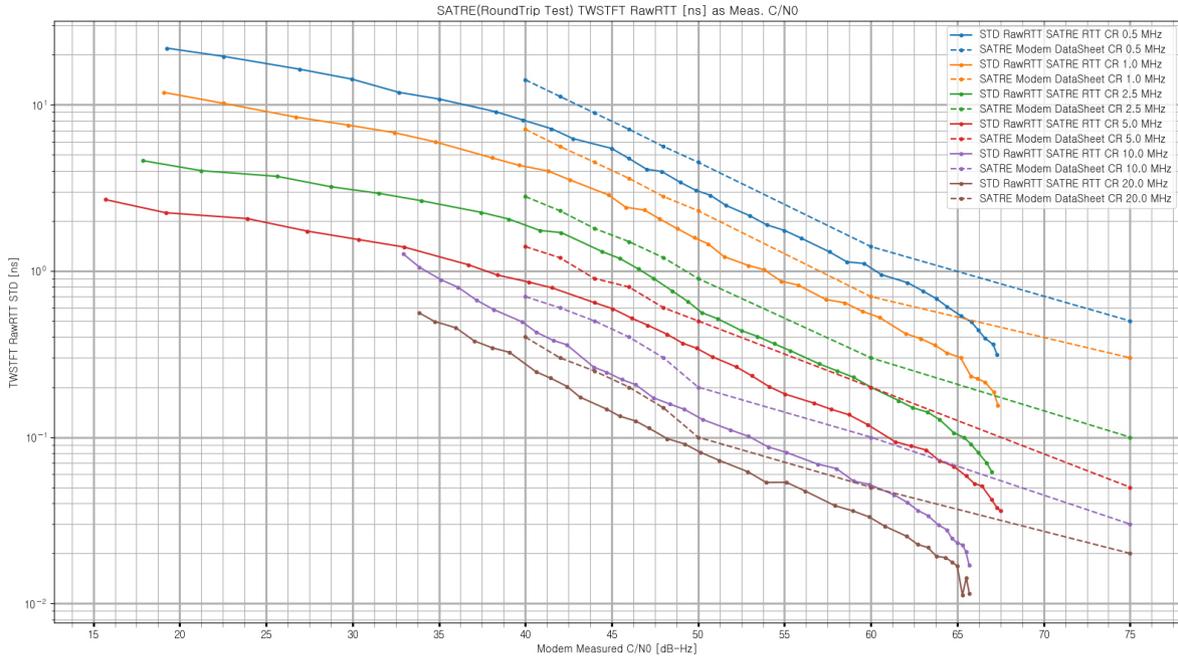


Fig. 5. Standard deviations of the round-trip times according to the measured C/N_0 of the TWSTFT modem under the proposed test environment for performance evaluation.

대상대역폭(B)에 따른 잡음전력($P_{N,B}$)의 산출이 필요하며, $P_{N,B}$ 의 산출을 위해 VSG로 생성하고 스펙트럼 분석기로 측정된 5 MHz 대역폭에 대한 잡음 전력($P_{N,5}$)을 활용하였다. 측정된 $P_{N,5}$ 는 -48 dBm이며, 코드를 및 측정된 잡음 전력을 활용한 대상대역폭에 따른 잡음전력은 Eq. (4)와 같다.

$$B = f_{Code} \times 2$$

$$P_{N,B} = P_{N,5} + 10 \times \log_{10} \left(\frac{B}{5 \text{ MHz}} \right) \quad (4)$$

또한 신호전력 P_s 와 잡음전력 $P_{N,B}$ 를 활용하여, Eq. (5)와 같이 SNR을 산출할 수 있다.

$$SNR(dB) = P_s - P_{N,B} \quad (5)$$

그리고, 산출한 SNR로부터 Eq. (6)과 같이 C/N_0 를 계산할 수 있다.

$$C/N_0(dB - Hz) = SNR(dB) + 10 \times \log_{10}(B) \quad (6)$$

Eqs. (4-6)을 활용하여, 스펙트럼 분석기 측정값 기반의 C/N_0 를 도출할 수 있으며, 이를 모뎀 측정 C/N_0 와 비교하여 신호의 코드율 및 RF 전단부 특성에 따른 C/N_0 왜곡 수준을 Fig. 6과 같이 확인할 수 있다. Fig. 6을 통해 확인할 수 있듯이, 상대적으로 낮은 코드율 및 낮은 신호전력에서 왜곡이 크게 발생함을 알 수 있으며, 이는 코드율이 낮을수록 낮은 확산이득을 갖는 신호 특성 및 모뎀 수신부의 적분시간 설정차이 등으로 인해 발생한 것으로 예상된다.

Eqs. (4-6) 및 Fig. 6의 스펙트럼 분석기로 측정된 신호전력 기반의 C/N_0 산출결과를 활용하여, Fig. 5의 성능평가 결과의 C/N_0 왜곡을 Fig. 7과 같이 보정할 수 있다. 보정된 Fig. 7결과는 SATRE 모뎀의 데이터시트 결과와 유사한 추이를 보임을 확인할 수 있으

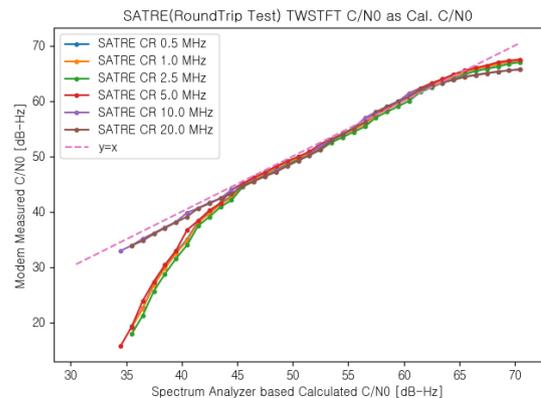


Fig. 6. Measured C/N_0 of the TWSTFT modem according to the calculated C/N_0 with spectrum analyzer basis.

며, 시험을 통해 도출한 평가결과가 데이터시트에서 제시된 성능규격 이내임을 확인하였다. 이에 따라, TWSTFT 모뎀의 성능평가 시, 신호 특성 및 모뎀 수신부의 RF 전단부 특성 등에 따라 모뎀에서 추정하는 C/N_0 의 왜곡이 발생할 수 있으며, 객관적인 성능평가를 위해서는 교정된 스펙트럼 분석기를 활용한 신호전력 산출 값을 적용 해야함을 확인하였다.

5. 결론

본 논문에서는 TWSTFT 시각 비교 기술의 필요성 및 현황에 대해 소개하고, TWSTFT 기반의 시각 비교 시스템의 성능 결정에 핵심 요인인 상용 TWSTFT 모뎀 및 신호 구조에 대해 언급하

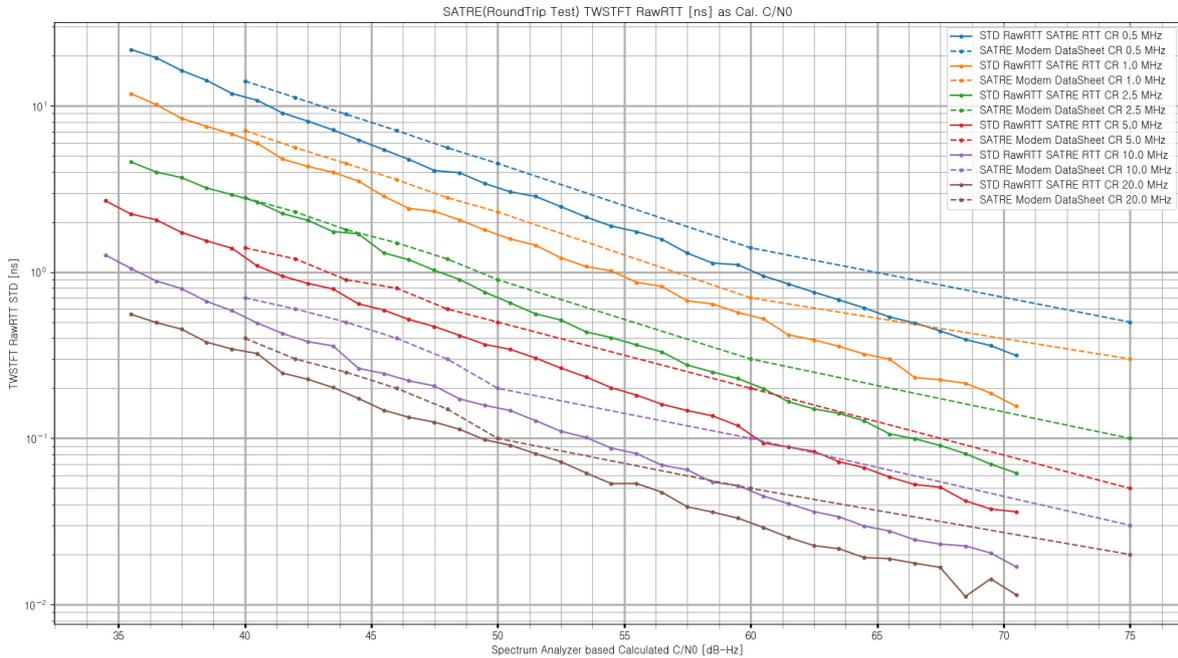


Fig. 7. Standard deviations of the round-trip times according to the measured C/N_0 of the TWSTFT modem under the proposed test environment for performance evaluation.

였다. TWSTFT 시각 비교 시스템 구축 시, 자체적인 TWSTFT 모뎀의 성능평가가 이루어지지 않을 경우, 개별 모뎀에 따라 발생할 수 있는 성능 수준을 확인하기 어려우며, RF link budget 산출을 통한 수신 및 송신 신호 전력 수준을 설계하였더라도, 전체 시각 비교 시스템의 성능을 보장할 수 없다. 이에 따라 자체적인 TWSTFT 모뎀의 성능 검증이 요구되며, 이를 통해 TWSTFT 모뎀의 RF 전단 부 특성, 신호처리 기법 및 기타 제조사에서 공개되지 않은 설정 등에 따른 성능 열화의 불확실성을 사전에 배제할 수 있다.

이에 따라, 본 논문에서는 Round-trip 기반의 단일 모뎀을 활용한 TWSTFT 모뎀의 성능평가방안을 제시하고, 제시한 성능평가방안의 구현을 위해 상용 VSG 및 스펙트럼 분석기 등을 활용한 시험 환경을 구축하였으며, 코드율 및 수신신호 전력에 따른 성능평가 시험을 설계하였다. 또한 제시한 다수의 시험을 수행하기 위해 TWSTFT 모뎀 제어 및 측정치 수집 자동화 소프트웨어를 설계하였다. 제시한 성능평가방안을 활용한 시험을 통해 수신신호전력 C/N_0 에 따른 TWSTFT 모뎀의 RTT 표준편차를 도출하였으며, 이 과정에서 모뎀 측정 C/N_0 의 왜곡을 확인하고, 객관적인 성능평가가 가능하도록 스펙트럼 분석기 측정값을 통해 산출한 C/N_0 기반의 모뎀 측정 RTT 표준편차를 제시하였다. 또한 도출한 최종 성능평가 결과와 상용 TWSTFT 모뎀의 데이터시트 결과와 비교하여, 수신 신호 전력에 따른 RTT 표준편차가 규격 이내임을 확인하였다.

본 논문에서 제시한 TWSTFT 모뎀의 성능평가방안은 국가표준시 유지뿐만 아니라 금융, 국방, 전력, 지상파항법시스템, 위성항법시스템 등의 GNSS 기반 기술보다 우수하고 강인한 시각 동기 성능을 요구하는 국가기반시설 구축 및 운용 시 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENTS

이 논문은 2024년도 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00407003, 지상파항법시스템 고도화 기술개발사업).

AUTHOR CONTRIBUTIONS

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

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

CCTF (Consultative Committee for Time and Frequency) TWSTFT1 2021, On Developing and Utilizing the Next-Generation Modems and Technologies for Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer (TWSTFT) Used in UTC Generation, 22nd meeting of the CCTF (Session

- II - online). <https://www.bipm.org/en/committees/cc/cctf/22-2-2021>
- 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)
- Hackman, C., Jefferts, S. R., & Parker, T. E. 1995, Common-clock two-way satellite time transfer experiments, *Proceedings of the 1995 IEEE International Frequency Control Symposium (49th Annual Symposium)*, San Francisco, CA, USA, 31 May - 02 June 1995, pp.275-281. <https://doi.org/10.1109/FREQ.1995.483911>
- Imae, M., Suzuyama, T., Gotoh, T., Shibuya, Y., Nakagawa, E., 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/kihoun-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-I!!PDF-E.pdf
- Jiang, Z., Matsakis, D., Zhang, V., Esteban, H., Piestre, D., et al. 2016, A TWSTFT Calibration Guideline and the use of a GPS Calibrator for UTC TWSTFT link Calibrations, *Proceedings of the 47th Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting (ION PTTI)*, Monterey, California, January 25-28 2016, pp.231-242. <https://doi.org/10.33012/2016.13169>
- Lee, J., Oh, J.-I., Choi, G. W., Lee, Y. K., Lee, J. K., et al. 2024, Truncated M-sequence and BOC Modulation based Ranging Signal Design for TWSTFT, In *Proceedings of the 2024 NSCL International & CPEM Conference*, Denver, 6-11 July 2024.
- Lee, J., Oh, J.-I., Lee, Y. K., Yang, S.-h., Lee, J. K., et al. 2023a, Improved Method and Message Structure Design for TWSTFT without Extra Network, *Journal of Positioning, Navigation, and Timing*, 12, 201-209. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2023.12.2.201>
- Lee, J., Oh, J.-I., Rhee, J. H., Choi, G. W., Lee, Y. K., et al. 2023b, Phase Jitter Analysis of Overlapped Signals for All-to-All TWSTFT Operation, *Journal of Positioning, Navigation, and Timing*, 12, 245-255. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2023.12.3.245>
- TimeTech GmbH 2012, Satellite Time Transfer and Ranging Equipment (SATRE) Datasheet. 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>
- Zhang, V., Parker, T. E., Achkar, J., Bauch, A., Lorini, L., et al. 2009, Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer Using 1 MChip/S Codes, *Proceedings of the 41st Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting (ION PTTI)*, Santa Ana Pueblo, New Mexico, November 16-19 2009, pp.371-382. <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=10696>



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.



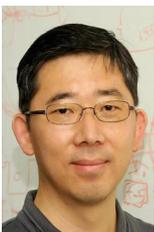
Jong Koo Lee graduated from the Department of Statistics and Data Science at Cheongju University, in 1989. He has been working at the Time and Frequency Group, Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS), Daejeon, since 1990. His interesting fields are calibration of timing systems and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



Youn-Jeong Heo received the Ph.D. degree in space science from Chungbuk National University, Cheongju, South Korea, in 2010. She was a senior researcher of Korea Aerospace Research Institute, Daejeon, South Korea from 2008 to 2019. She is currently working on time and frequency transfer using satellites at Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS).



Dai-Hyuk Yu received the Ph.D. degree in physics from Seoul National University, Seoul, South Korea, in 2000. He has been working on precision optical frequency metrology including optical frequency standards and optical frequency transfer at Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS) from 2002.



Myoung-Sun Heo received the Ph.D. degree in physics from Seoul National University, Seoul, South Korea, in 2007. He has been working on atomic frequency standards including microwave and optical frequency standards, optical fiber frequency transfer at Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS) since 2013.



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.