

Improved Method and Message Structure Design for TWSTFT without Extra Network

Juhyun Lee, Ju-Ik Oh, Young Kyu Lee, Sung-hoon Yang, Jong Koo Lee, Joon Hyo Rhee[†]

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

ABSTRACT

Time comparison techniques are required for generating and keeping Coordinated Universal Time (UTC) and to distribute standard clocks. These techniques play an important role in various fields, including science, finance, military, and communication. Among these techniques, Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer (TWSTFT) ensures a relatively high accuracy, with a time comparison accuracy at a nanosecond level. However, TWSTFT systems have some limitations, such as the dependency on extra network links. In this paper, we propose an improved method for TWSTFT system operation and design a message structure for the suggestion. Additionally, we estimate the data rate and redundancy for the new TWSTFT signal with the designed message structure.

Keywords: TWSTFT, data structure, data rate, message redundancy, time comparison

1. 서론

정밀한 시각동기 기술은 과학, 금융, 군사, 통신 등 현대사회의 전반적인 분야에서 필수적으로 활용되고 있다. 경제 및 사회적 인프라를 원활히 운용하기 위해서는 각 구성요소들 간의 시각동기가 매우 중요하며, 구성요소들 간의 시각동기가 충분히 정확하게 이루어지지 않을 경우에는 각 요소의 오동작이 발생할 뿐만 아니라 전체 시스템의 운영 자체가 불가능해질 수 있다. 예를 들어, 전 세계를 대상으로 하는 주식거래를 중계하는 시스템이 정상적으로 동작하기 위해서는 해당 시스템 운영을 구성하는 서버, 거래를 요청하는 기관, 그리고 개인 고객들의 단말기 간의 시각이 수십 ms 이내로 동기 되어야 한다. 이러한 시각동기가 이루어지지 않는다면 수많은 거래요청들이 뒤섞여 정상적인 운영이 불

가능해질 것이다. 예시로 언급한 시스템의 경우 시각동기 성능의 요구 수준이 수십 ms 수준이었지만, 시스템에 요구되는 시각동기 성능은 활용되는 분야에 따라 상이할 수 있다. 특히, 제품 및 시스템이 고도로 정밀해지고 고속화 됨에 따라 정밀 시각동기 기술의 필요성과 그 성능 요구 수준은 계속해서 높아지고 있으며, 특히 위성 항법 분야 등에서는 수 ns 수준의 초정밀 시각동기 성능을 요구하고 있다. 이에 따라 시각동기 성능을 향상하기 위한 연구와, 그 기반이 되는 시각비교 기술의 성능 개선 또한 지속적으로 이루어지고 있다 (Hartl et al. 1983, Hanson 1989, Kirchner 1991, Lee et al. 2014).

원격지 간의 시각비교를 위한 방법 중 비교하고자 하는 두 시계 간의 거리에 따라 비용이 천문학적으로 소요될 수 있는 광케이블을 이용한 시각비교를 제외한다면, 현재 가장 정밀한 방법 중 하나로 위성이용 양방향 시각 주파수 전송 (Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer, TWSTFT) 방식이 있다. 장비 및 시스템에 따라 상이할 수 있으나 고비용, 고성능의 TWSTFT 장비를 활용한다면 수 ns 혹은 그 이내의 시각비교가 가능하다 (Yang et al. 2009).

TWSTFT 기술의 표준은 국제전기통신연합 (International Telecommunication Union, ITU)의 권고안을 기준으로 한다 (ITU-R TF.1153 2015). 이 권고안은 TWSTFT의 시스템 구성과 구조, 작동원리, 불확도, 오차요인, 교정, 데이터 산출 방법 및 형식에 관해 기술한다. 해당 권고안에 따라 산출된 데이터는 두 원격

Received May 09, 2023 Revised May 17, 2023 Accepted May 23, 2023

[†]Corresponding Author

E-mail: jh.rhee@kriiss.re.kr

Tel: +82-42-868-5637 Fax: +82-42-868-5569

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

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

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

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

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

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

지의 TWSTFT 장비 내에서 각각 생성되며, 이를 별도의 통신 채널을 통해 상대 측 장비로 전송/교환하여야 최종적인 시각비교가 완료된다. 이 때문에 해당 권고안을 따르는 상용 TWSTFT 장비를 활용하는 경우, 별도의 네트워크 연결을 통한 통신 채널 확보가 필수적이며, 이를 운용하기 어려운 환경에서는 시각비교가 불가능하다. 이러한 단점은 통신시설 및 인터넷 네트워크가 잘 갖춰져 있는 국가의 도시에서는 큰 문제가 되지 않으나, 산간, 오지 및 섬 등 통신시설이 확보되기 어려운 환경에서는 문제가 될 수 있다. TWSTFT를 이용한 시각비교를 위해서 통신시설을 신규로 구축하거나 추가적인 통신위성을 활용하기 위한 시스템을 설치하는 것은 비용적인 면에서 한계가 명확하다. 또한, 보안시설 내에서 운영될 경우, 일반적으로 네트워크를 통한 데이터 전송에 제한이 있을 수 있기 때문에 이러한 환경에서도 상용 TWSTFT 장비를 활용하는 것이 불가능하다.

본 연구에서는 상기된 문제점을 개선하기 위해, 별도의 통신 채널을 활용하지 않고 TWSTFT 전송에 사용되는 RF 신호 내에 데이터를 실어서 전송하는 방식을 제안하였다. 본 연구의 2장에서는 TWSTFT의 운용 개념에 관한 배경지식을 설명하고, 3장에서는 현재 TWSTFT 신호를 생성하기 위해 활용되고 있는 상용 TWSTFT 모델과 이를 통해 생성되는 데이터의 구조에 대해 설명하였다. 4장에서는 TWSTFT RF 신호에 데이터를 실어서 전송하는 방식을 소개하고, 이를 활용하기 위해 필요한 메시지 구조를 제안하고 다양한 요구조건에 따른 성능을 분석하였다. 마지막으로 5장에서는 결론과 제언, 활용 방안에 관해 서술하였다.

2. TWSTFT 운용 개념

TWSTFT는 정지 궤도 위성을 통해 타이밍 신호를 교환하는 방식으로 수행되며, Fig. 1에 TWSTFT의 운용 개념을 도시하였다. 타이밍 신호의 교환은 이진 위상 변조 및 의사 잡음 (Pseudo-Random Noise) 코드를 포함한 RF 신호를 송수신함으로써 이루어진다. 타이밍 신호는 1초당 한 번의 펄스 출력 신호를 의미하며, 이 신호를 통해 TS(k)라는 타임 스케일이 구현된다. 각 지상국은 상대 지상국으로부터 송신된 신호를 수신한 뒤, 1PPS 신호를 재구성하여 1PPSRX라는 이름의 출력 신호를 생성한다. 두 개의 1PPS 신호 간의 차이는 시간 간격 계수기 (Time Interval Counter, TIC)에 의해 측정(TI(k))되며, TI(k) 데이터를 교환한 후 두 타임 스케일 간의 차이를 계산할 수 있다.

Fig. 1에 명시된 각 항목들은 다음과 같으며, k는 지상국 1 혹은 2를 나타낸다. TS(k)는 1PPSTX로 표현되는 타임 스케일을 의미하고, TI(k)는 송신되는 1PPS 신호와 수신되는 1PPS 신호 간의 시간 차이(1PPSTX - 1PPSRX)를 나타낸다. TD(k) 및 RD(k)는 각각 모델 지연을 포함한 송신기 및 수신기 지연을 의미하며, PDU(k) 및 PDD(k)는 각각 업링크 및 다운링크 신호 경로 지연을 의미한다. SD(k)는 위성 트랜스폰더 내부 지연을 의미하며, SCU(k) 및 SCD(k)는 각각 업링크 및 다운링크 sagnac 보정치를 의미한다.

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

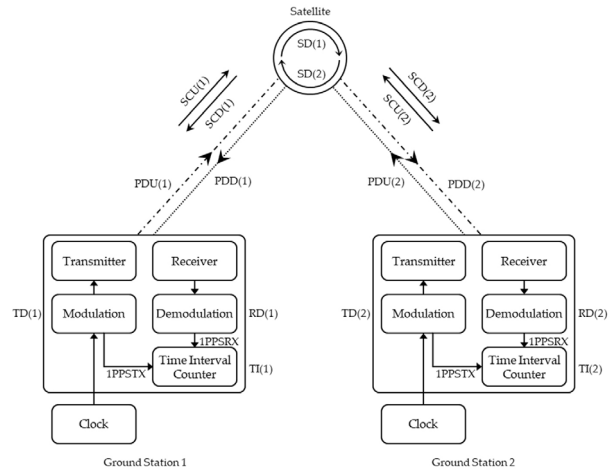


Fig. 1. Principle of TWSTFT.

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

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

Eq. (1)과 Eq. (2)의 차이를 Eq. (3)과 같이 정리할 수 있으며, 양방향 방정식 (two-way equation)으로 명명되는 Eq. (3)을 통해 두 지상국 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 지상국을 오고 가는 신호들은 모두 신호 지연값을 갖게 되며, 지연을 발생시키는 원인들은 전리층, 대류층, 지구 자전 효과 등으로 다양하다. TWSTFT는 이러한 지연 영향들을 최대한 소거하기 위해 도입되었으나, 각 신호 경로에 따른 전파 환경이 동일하지 않기 때문에 여러 효과들로 인한 지연 성분들이 완전히 소거되지 못하고 잔류하게 된다. 이러한 잔류하는 성분들로 인해 TWSTFT의 결과의 정확도가 열화되며, 그 주요 성분들로 위성 내부 지연, 지구자전오차, 위성 경로지연, 전리층 지연, 대류층 지연, 지상국 내부 지연이 존재한다 (ITU-R TF.1153 2015).

3. TWSTFT 모델과 RAW 데이터

3.1 상용 TWSTFT 모델 현황

현재 상용 TWSTFT 모델으로는 유럽 TimeTech의 Satellite Time and Ranging Equipment (SATRE) 모델이 있으며, 실험 목적으로 개발한 일본 National Institute of Information and Communications Technology (NICT)의 Software Ranging System (SRS) 모델이 있다. SATRE 모델은 코드 측정치를 기반으

Table 1. Specification of commercial TWSTFT modems.

Types	SATRE modem		SRS modem	
	Specifications	Note	Specifications	Note
IF frequency	70±15 MHz		70±1 MHz	
No. of Tx channel	1		2	
No. of Rx channel	1 ~ Max 3 channels (Completely independent) (1 channel has only 1 correlators)		1 with 4 correlators	
Reference	External 5 / 10 MHz 1 PPS NTP (RJ45, 10 Mbit/s)		External 10 MHz 1 PPS	
Code chip rate	0.1 1.0 2.5 5.0 10.0 20.0	Mcps	1	Mcps
Code sequence	-	non-public information	GPS L1C(M)	
Code number of types	16 (in 20, 10 Mcps) 32 (in 5 Mcps and under)		32	
Code length	4 ms (in 2.5 Mcps)	unofficial information	20,000 bits (=20 ms)	
Overlay data speed	250 bps	unofficial information	50 bps	
Overlay data length	500 bits (500 bits = 2 s)	unofficial information	500 bits (1 cycle: 20 ms) (500 bits = 10 s)	
Data structure	-	non-public information	Preamble only opened	non-public information
Output data interface	RS232 (19200 bps) Network (TCP, UDP)		USB 2.0	
Built-in	-		BPF Rx amplifier Rx attenuator	
Drive voltage	110 V AC±10%, 50 to 60 Hz 230 V AC±10%, 50 to 60 Hz		DC 12 V, max 1.5 A	
Manufacturer	TimeTech		NICT & Spectra Co.	

로 한 시각차 측정만이 가능하며, SRS 모뎀은 코드 및 반송파 기반의 시각차 측정치를 모두 제공한다. SRS 모뎀의 개발 시점이 상대적으로 최근에 개발되었기 때문에, 현재 대부분의 국가표준 기관은 SATRE 모뎀을 활용한 TWSTFT 시스템을 구축하여 운용 중에 있다. 일부 국가의 경우에는 SRS 모뎀을 도입 또는 임차하여 SATRE 모뎀과 함께 운용하고 있는 경우가 있다. Table 1은 두 TWSTFT 모뎀의 공개된 제원을 비교하여 정리하였다 (Imae et al. 2003, TimeTech 2012, Fujieda et al. 2019, 2020).

Table 1과 같이 SRS 모뎀의 경우 GPS L1C(M) 코드 시퀀스 기반으로 20 ms 주기를 갖도록 설계되었으며, 이에 따라 최대 사용가능한 50 bps의 데이터 전송률을 사용하도록 설계되었으나, SATRE 모뎀의 경우 코드 시퀀스 및 코드 길이가 공개되어 있지 않았다. 또한 두 모뎀 모두 측정치를 별도의 인터페이스로 모뎀 사용자에게 제공하고 있다.

3.2 TWSTFT Raw 데이터

서론에서 언급하였듯이 TWSTFT 기술의 표준은 국제전기통신연합의 권고안을 기준으로 하며, 이에 따라 TWSTFT 모뎀의 측정치의 기록 형식 역시 해당 권고안에 정의된 “1초 개별 측정치 (individual 1-s measurements)”와 “2차 가공 파일 형식 (quadratic fit file format)”을 따른다. 본 연구에서 제안하고자 하는 RF 신호 데이터 전송 방식은 1초 개별 측정치를 대상으로 하기 때문에, 이번 절에서도 1초 개별 측정치에 관해 자세히 기술하고

자 한다. 1초 개별 측정치 파일의 파일명에는 기준국 구분 기호와 측정 일시 정보가 포함된다. 파일 내의 헤더에는 UTC-CLOCK, IPPSREF-IPSTX 등의 교정 값과 그 단위, 기준 일시 등의 정보가 기록된다. 헤더 이후에는 각 행마다 측정 일시에 따른 측정치가 기록된다. 1초 개별 측정치 파일의 세부적인 형식은 Table 2와 같다 (ITU-R TF.1153 2015).

4. TWSTFT 신호를 활용한 데이터 전송기법 제안

4.1 기존의 측정치 데이터 전송 방식

현재 일반적인 TWSTFT를 활용한 시각비교 시스템의 전체적인 운영 방식은 Fig. 2와 같다. 기준국1과 기준국2 간의 시각을 비교하기 위해서 기준국1의 TWSTFT 모뎀은 기준국1의 시각(기준 시각1)을 기준으로 동기된 IF 신호를 생성하고, 이 신호의 주파수를 Ku 대역으로 상향변환하여 동기된 RF 신호를 위성으로 송신한다. 송신된 신호는 위성의 중계기를 거쳐 기준국2에 수신되며, 주파수 하향변환을 거쳐 기준국2의 TWSTFT 모뎀에 입력되고, 이 신호를 복조하여 기준시각1과 기준시각2 간의 시각차를 측정한다. 이 측정치가 바로 3.2절에서 기술된 1초 개별 측정치이다. 이 과정은 동일하게 역방향으로도 수행되며 따라서 기준국1과 기준국2에서는 각각 독립적으로 측정치가 생성된다. 최종적으로 시각차에서 공통오차를 소거하기 위해서는 두 측정치를 차분하

Table 2. Report format of the individual 1-s measurements for TWSTFT.

Data type	Description		
	Format	Contents	
Format example	Ljjjjhh.mmR		
Data file name	L	Local station	
	R	Remote station	
	jjjjj	Session MJD [d]	
	hh	Session hour [h]	
Time tag minute	Mm	Session minutes [m]	
Format example	Parameter = Value [units] [jjjj hhmsss]		
Header	Parameter	Parameter	
	Type information "UTC(LAB)-CLOCK" "CLOCK-1PPSREF" ...		
	Value	Value	
	Fixed point value Case 1: 12 decimals, corresponding to 1 ps resolution Case 2: 3 decimals		
	Units	Units "[s]" ...	
Time tag MJD	jjjjj	Reference time MJD [d]	
Time tag hour	hh	Reference time hour [h]	
Time tag minute	mm	Reference time minutes [m]	
Time tag second	ss	Reference time second [s]	
Format example	Data = [1PPSTX - 1PPSRX] [1PPSREF - 1PPSRX] [..],		
Data type	-	Fixed character	
Data type	Data type	Type Information for 1-s data "1PPXTX-1PPSRX" ...	
Format example	jjjj hhmsss n.nnnnnnnnnnnn		
Data	Time tag MJD	jjjjj	Data time tag MJD [d]
	Time tag hour	hh	Data time tag hour [h]
	Time tag minute	mm	Data time tag minute [m]
	Time tag second	ss	Data time tag second [s]
Value of a time interval (s)	+n.nnnnnnnnnnnn	Fixed point value (12 decimals, corresponding to 1 ps resolution)	

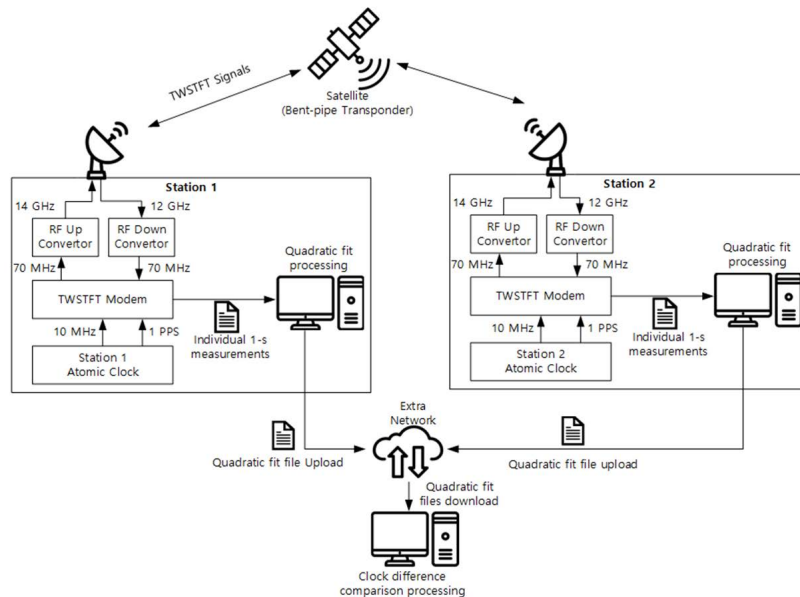


Fig. 2. Conventional TWSTFT operation concept.

여야 하며, 따라서 각 기준국은 서로 측정치를 상대기준국과 교환하여야 한다. 이 때 측정치 파일을 전송하기 위해 별도의 통신 채널이 필요하며, 일반적으로 공용 FTP 서버 등을 구축하여 파일

을 교환한다. 교환하는 과정에서의 파일 용량 등을 고려하여, 일 단위로 축적한 1초 개별 측정치를 2차 가공 파일 형식으로 후처리 한 후 전송된다.

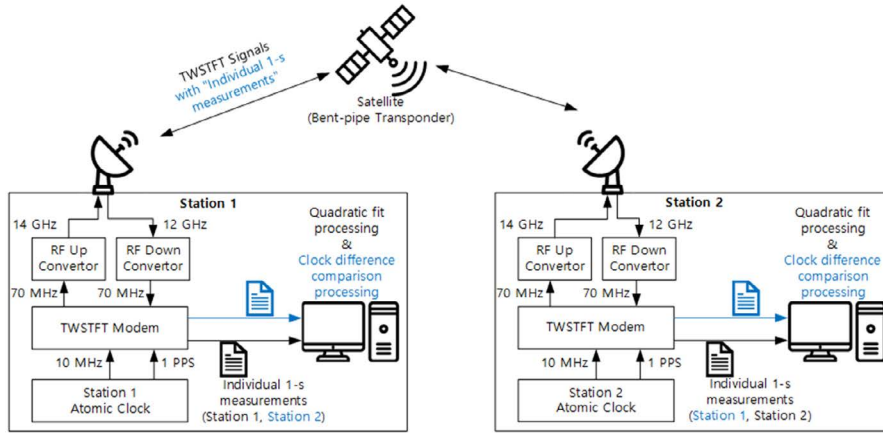


Fig. 3. New operation concept of TWSTFT without extra network.

Index	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	IdxS	IdxE
Message Common Format	Preamble (8 bit)							Message ID (8 bit)				Link ID (16 bit)											0	29								
	Session Index(32 bit)																													30	59	
	Data Field (254 bit)																													60	89	
																														90	119	
																														120	149	
																														150	179	
																													180	209		
																													210	239		
																													240	269		
Error Correction Information(Parity, CRC, or LDPC) (30 bit)																													270	299		

Fig. 4. Common message format for individual 1-s measurements raw data.

4.2 TWSTFT 신호를 활용한 측정치 데이터 전송기법

4.1절에 소개된 기존의 방식이 가지는 추가적인 통신 채널이 필수적이라는 단점을 해결하기 위해, 본 연구에서는 추가적인 통신 채널이 요구되지 않는 TWSTFT 데이터 전송 기법을 제안하고자 한다. 제안하는 시각비교 시스템의 전체적인 운영 방식은 Fig. 3과 같다.

Fig. 3에 도시된 것과 같이, 제안된 방식은 별도의 통신 채널을 사용하여 데이터를 전송하지 않고 1초 개별측정치를 TWSTFT 신호를 통해 공유하는 개념이다. 먼저 전통적인 기법과 동일하게, 기준 시각원의 시각부터 원격지 시각원을 활용하여 방송된 수신 신호까지의 시각차를 측정하고, 원격지에서도 동일한 방식으로 측정하여 각 기준국에서 1초 개별측정치를 생성한다. 이 때 시각차를 측정하기 위한 TWSTFT 신호에 포함되어 있는 메시지를 디코딩 하여 상대 기준국이 측정한 이전 혹은 현재 session의 1초 개별측정치를 확보할 수 있다. session은 시분할 방식으로 운영되는 TWSTFT의 개별 time slot을 의미하며, 일반적으로 각 기준국당 1 시간에 1개의 session을 할당 받고, session 별로 2차 가공 데이터를 생성하고 있다. 본 연구에서 제시하는 새로운 개념의 TWSTFT 운영을 위한 모뎀은 모뎀에서 측정한 시각 차 측정치와 상대 기준국에서 제공한 1초 개별측정치를 모뎀에서 직접 제공할 수 있으며, 수신 받은 1초 개별측정치를 활용하여 모든 기준국이 자체적으로 2차 가공 데이터 생성 및 최종 시각 비교를 수행할 수 있다. 제안한 TWSTFT 운용 개념을 적용할 경우 데이터 공유

를 위한 추가적인 채널이 불필요할 뿐만 아니라, 모든 기준국에서 독립적으로 시각 비교를 할 수 있고, TWSTFT 신호를 통해 시각 차 측정치를 상대적으로 짧은 지연시간을 갖도록 제공하므로 전통적인 구성보다 더 최근 데이터까지 준 실시간 비교가 가능한 장점을 가진다.

4.3 제안한 TWSTFT 운용을 위한 Raw 데이터 메시지 구조 제안

제안한 TWSTFT 운용 개념을 적용하기 위해서는 기존 측정을 위한 RF 채널에 1초 개별측정치를 추가하기 위한 메시지 구조가 요구되며, 본 연구에서는 300 bit 공통 포맷 기반의 메시지 구조를 제안하였다. 본 연구에서 제시하는 메시지 구조는 Fig. 4와 같다.

제시한 1초 개별측정치 추가를 위한 메시지는 메시지 검출을 위한 preamble 8 bit, 메시지 구분을 위한 message ID 8 bit, ITU에서 정의한 1초 개별측정치의 기준국 정보(L, R)를 제공하기 위한 link ID 16 bit, 시분할로 구성되어 있는 각 session에 대한 정보를 제공하기 위한 session Index 32 bit 및 데이터의 오류 검출을 위한 error correction information 30 bit를 메시지의 공통 포맷으로 정의하였다. 제시한 raw 데이터 메시지 구조는 254 bit의 데이터를 가용할 수 있으며, 해당 공통/데이터 영역에 할당할 1초 개별측정치 정보를 Tables 3-5와 같이 정의하였다.

Table 4의 경우 매 session 마다 전송이 필요한 데이터로, 교정값 및 상대 기준국에서 신호 처리 시의 수신 전력, 주파수, 해당 session 측정치의 jitter, 전송될 측정치의 종류 등을 정의하였으

Table 3. Common field message format for individual 1-s measurements raw data.

Item	Details	Data type	Data size [Bit]		Note
			Min.	Typ.	
Link ID	-	Int (3 digits)	10	16	Numbers up to 2 ¹⁶
Session index	Session MJD	Int (5 digits)	14	16	
	Session index in day	Int	10	16	

Table 4. Data field message format for individual 1-s measurements raw data (Every session).

Item	Details	Data type	Data size [Bit]		Note
			Min.	Typ.	
UTC(VSL) - CLOCK	Parameter	Symbol	3	8	256 cases
	Header data type 1	Fixed point 49 bit or IEEE double 64 bit	49	64	12 decimals required
	Time tag MJD	Int (5 digits)	14	16	
	Time tag hh	Int (2 digits)	7	8	
	Time tag mm	Int (2 digits)	7	8	
	Time tag ss	Int (2 digits)	7	8	
CLOCK - 1PPSREF	Parameter	Symbol	3	8	256 cases
	Header data type 1	Fixed point 49 bit or IEEE double 64 bit	49	64	12 decimals required
	Time tag MJD	Int (5 digits)	14	16	
	Time tag hh	Int (2 digits)	7	8	
	Time tag mm	Int (2 digits)	7	8	
	Time tag ss	Int (2 digits)	7	8	
1PPSREF - 1PPSTX	Parameter	Symbol	3	8	256 cases
	Header data type 1	Fixed point 49 bit or IEEE double 64 bit	49	64	12 decimals required
	Time tag MJD	Int (5 digits)	14	16	
	Time tag hh	Int (2 digits)	7	8	
	Time tag mm	Int (2 digits)	7	8	
	Time tag ss	Int (2 digits)	7	8	
SIGNAL POWER	Parameter	Symbol	3	8	256 cases
	Header data type 2	Fixed point 12 bit or IEEE float 32 bit	12	32	2 decimals required
SIGNAL C/N0	Parameter	Symbol	3	8	256 cases
	Header data type 2	Fixed point 12 bit or IEEE float 32 bit	12	32	2 decimals required
RF FREQUENCY	Parameter	Symbol	3	8	256 cases
	Header data type 3	Fixed point 32 bit or IEEE double 64 bit	32	64	8 decimals required
JITTERDATA	Parameter	Symbol	3	8	256 cases
	Header data type 1	Fixed point 49 bit or IEEE double 64 bit	49	64	12 decimals required
DATA	Parameter	Symbol	3	8	256 cases
	Header data type 4	Symbol	3	8	
Spare 1-5 (Symbol type)	Parameter	Symbol	3	8	256 cases
	Header data type 4	Symbol	3	8	
Spare 1-5 (Double type 1)	Parameter	Symbol	3	8	256 cases
	Header data type 1	Fixed point 49 bit or IEEE double 64 bit	49	64	12 decimals required
	Time tag MJD	Int (5 digits)	14	16	
	Time tag hh	Int (2 digits)	7	8	
	Time tag mm	Int (2 digits)	7	8	
	Time tag ss	Int (2 digits)	7	8	

며 fixed point 기준 최소 데이터 크기 및 IEEE float 또는 double 을 활용한 적정 수준의 데이터 크기를 정의하였다. Table 5는 매 초 생성되는 데이터로 전체 데이터 크기는 전체 시스템 구축 시 정의하는 session 크기에 따라 변경되며, Table 4와 같이 최소 및 적정 수준의 데이터 크기를 정의하였다.

4.4 전송 소요시간 및 Session 시간에 따른 요구 데이터 전송률 및 메시지 중복성 산출

본 연구에서 정의한 1초 개별측정치를 추가하기 위한 메시지를 RF 채널에 포함하기 위한 요구되는 데이터 전송률을 산출하였다. 요구 데이터 전송률을 도출하기 위해서는 전송해야 하는 총 데이터 크기와 해당 데이터를 전송하는데 소요되는 시간이 정의되어야 하며, 총 데이터의 크기는 TWSTFT 시스템 구축 시 결

정하는 session 시간에 의존한다. 이에 따라 요구 데이터 전송률을 도출하기 위해 기존 유럽-아시아 링크와 유럽 내 링크에 대한 session 간격, 준비 시간, 측정 시간을 참고하였으며, Table 6과 같다 (ITU-R TF.1153 2015, Meynadier et al, 2019).

4.3절에서 정의한 메시지 포맷을 기준으로 session 시간 및 전송 시간에 따른 요구 데이터 전송률 및 메시지 중복성 (redundancy)은 Table 7과 같으며, 해당 데이터에 대한 요구 데이터 전송률 및 메시지 중복성을 Figs. 5와 6에 도시하였다.

도출한 그림 및 표에서 확인할 수 있듯이 session 시간을 길게 잡을수록 고려할 수 있는 전송 시간이 늘어나나, 하나의 session 이 포함하고 있는 데이터 크기가 session 시간에 비례하여 증가하므로, 매우 많은 양의 데이터를 송신해야 하는 문제가 발생한다. 또한 상대적으로 긴 session 시간에서 짧은 데이터 송신 시간이 요구된다면, 상대적으로 높은 메시지 중복성을 확보할 수 있

Table 5. Data field message format for individual 1-s measurements raw data (Every 1-s data).

Item	Details	Data type	Data size [Bit]		Note
			Min.	Typ.	
Measurement data	Time tag MJD	Int (5 digits)	14	16	
	Time tag hh	Int (2 digits)	7	8	
	Time tag mm	Int (2 digits)	7	8	
	Time tag ss	Int (2 digits)	7	8	
1-s measurements (sec)		Fixed point 49 bit or IEEE double 64 bit	49	64	12 decimals required

Table 6. some cases of TWSTFT session interval.

TWSTFT session	Reference documents		
	ITU-R-1153-4 examples	TWSTFT schedule Eu-Asia E80	Summary for the GSOP 2019 TWSTFT calibration report
Session interval [min]	3	6	3
Preparation time [min]	1	1	1
Measured time [min]	2	5	2

Table 7. Required data rate [bps] and redundancy [#] as transmission time and session time.

Session time [s]	180 (3 min.)			360 (6 min.)			900 (15 min.)			7,200 (2 hour)		
	Min. [bps]	Typ. [bps]	Red. [#]	Min. [bps]	Typ. [bps]	Red. [#]	Min. [bps]	Typ. [bps]	Red. [#]	Min. [bps]	Typ. [bps]	Red. [#]
30	722	902	6	1,406	1,748	12	3,452	4,283	30	27,344	33,860	240
60	361	451	3	703	874	6	1,726	2,142	15	13,672	16,930	120
180	121	151	1	235	292	2	576	714	5	4,558	5,644	40
300				141	175	1	346	429	3	2,735	3,386	24
360				118	146	1	288	357	3	2,279	2,822	20
600							173	215	2	1,368	1,693	12
900							116	143	1	912	1,129	8
1,800										456	565	4
3,600										228	283	2
7,200										114	142	1

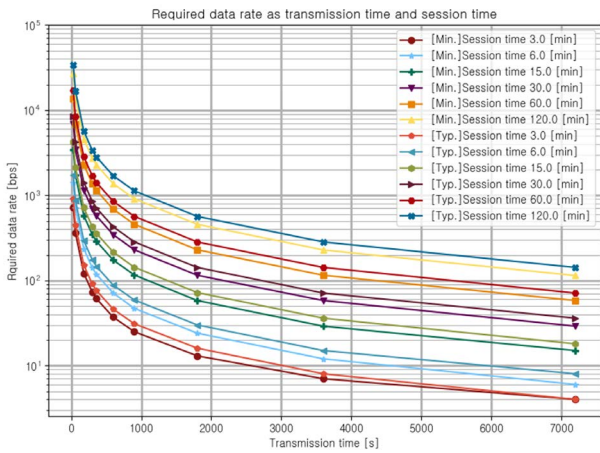


Fig. 5. Required data rate as transmission time and session time.

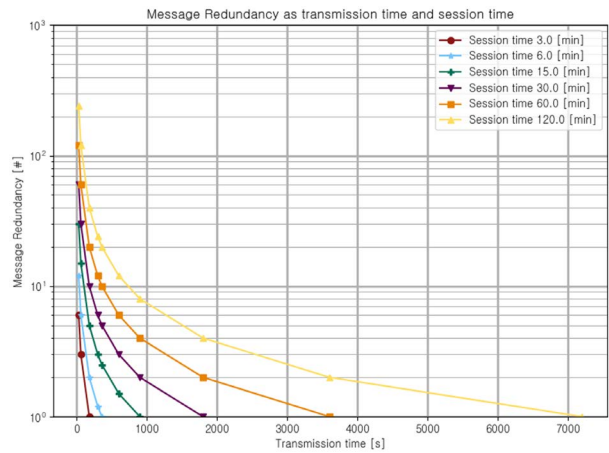


Fig. 6. Message redundancy as transmission time and session time.

으나, 이에 따라 매우 높은 데이터 전송률이 요구되는 것을 확인 하였다. 실질적인 데이터 전송률의 제안을 위해서는 유사한 위성 기반 데이터 전송을 수행하는 Satellite Based Augmentation System (SBAS)의 사례를 살펴볼 수 있다. 현재 SBAS의 데이터 전송률은 500 symbols/s 로 운용되고 있으며, TWSTFT 데이터 채널을 이와 동등한 수준인 500 bps로 고려할 경우, 적정 운용 환경은 session 시간 3분 및 전송 시간 1분 또는 session 시간 6분 및 전송 시간 2분으로 결정할 수 있을 것으로 예상된다. 해당 환경에서의 메시지 중복성은 2~3회를 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

5. 결론

본 연구에서는 기존의 TWSTFT 운용 과정에 존재하는 한계점과 이를 개선하기 위한 새로운 TWSTFT 운용 방식을 제안하였다. 제안한 새로운 TWSTFT 운용 방식을 적용할 경우, 산간 외지 및 보안시설 등 통신 환경에 제한이 있는 지역에서도 시각비교 시스템의 운영이 가능하게 된다는 장점이 있다. 또한, 기존 방식은 2차 가공 데이터를 일단위로 교환함에 따라 실시간 시각 비교가 어려운 반면, 제안된 방식은 위성을 통해 상대국의 1초 개별 측

정치를 직접 수신하여 준실시간 급의 시각 비교가 가능하다는 장점이 있다.

본 연구에서 제안한 TWSTFT 운용 방식을 적용하기 위해서는 개선된 TWSTFT 모뎀 설계 및 1초 개별측정치를 포함하기 위한 새로운 TWSTFT 신호 구조 설계, 그리고 1초 개별측정치를 TWSTFT 신호에 포함하기 위한 메시지 구조 설계가 필요하다. 본 연구에서는 이 중 1초 개별측정치를 TWSTFT 신호에 포함하기 위한 메시지 구조 및 요구 데이터 전송률에 대해 제시하였다. 제시한 메시지 구조 및 session 시간, 전송 시간에 따른 요구 데이터 전송률 도출 결과는 추후 개선된 TWSTFT 모뎀 설계 및 TWSTFT 신호 설계에 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. H. Lee; formal analysis & investigation, J. K. Lee; writing, J. H. Lee, J. I. Oh; review and editing, J. H. Rhee; supervision, Y. K. Lee; project administration, S. H. Yang.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- 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.
- 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
- 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., 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
- 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>



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.

Frequency Group, contributing to research on precise timing systems using GNSS and TWSTFT technologies.



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.



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.



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