

# EO-COMB 기반 O-TWTFT 방식을 활용한 저궤도 위성 간 고정밀 시간 동기화 기술 연구

김재성<sup>1,2</sup>, 무하마드 후세인<sup>1</sup>, 고영채<sup>2</sup>, 송민협<sup>1,\*</sup>

한국전자통신연구원 광무선연구본부 광융합부품연구실<sup>1</sup>, 고려대학교 전기전자공학과<sup>2</sup>

\*sminhyup@etri.re.kr

## A Study on High-Precision Time Synchronization between LEO Satellites Using O-TWTFT Based on EO-COMB

Jaeseong Kim<sup>1,2</sup>, Muhammad Hussain<sup>1</sup>, Young-Chai Ko<sup>2</sup>, Minhyup Song<sup>1</sup>  
ETRI<sup>1</sup>, Korea Univ.<sup>2</sup>

### 요약

본 논문은 저궤도 위성 간 광 링크(O-ISL)의 고정밀 시간 동기화를 위해 고반복률의 전광 변조 광 주파수 빗(EO-COMB) 기반의 양방향 시간-주파수 전송(O-TWTFT) 시스템을 설계하고 성능을 분석한다. 위성 간 상대 운동을 고려한 시간 차이 방정식을 사용하여 EO-COMB의 기준 반복률 및 오프셋 변화가 시간 동기 정확도에 미치는 영향을 시뮬레이션을 통해 분석한다.

### I. 서 론

저궤도 위성 통신은 전 지구적 커버리지를 통해 차세대 통신 시스템으로 주목받고 있으며 서비스 수요 증가에 따라 위성에 요구되는 기술 사양이 고도화되면서 정밀 시간 동기화의 중요성이 대두되고 있다 [1]. 현재 위성 시간 동기 기술에 사용되는 위성 항법 시스템 (Global Navigation Satellite System, GNSS)이나 마이크로웨이브 기반 기술들은 미래 위성 네트워크가 요구하는 수 피코초(ps) 이하의 정밀도를 제공하는데 한계가 있어 펨토초(fs) 수준의 시간 동기화가 가능한 광학적 양방향 시간-주파수 전송((Optical Two-Way Time-Frequency Transfer, O-TWTFT) 방식이 대안으로 부상하고 있다. 광 주파수 빗(Optical Frequency Comb, OFC)을 활용한 O-TWTFT 기술은 도플러 효과로 인해 발생하는 양방향 전파 시간의 비대칭성(non-reciprocity) 문제를 해결하고 초정밀 시간 동기화의 가능성을 보여준다 [2, 3].

본 논문은 자체 제작한 고반복률(12.5GHz, 50GHz)의 전광 방식 광 주파수 빗(Electro-Optic Frequency Comb, EO-COMB)이 저궤도 위성 간 광 링크(O-ISL) 환경에서 어느 정도 시간 동기를 맞출 수 있는지 시뮬레이션을 통해 분석한다. 위성의 상대 운동을 고려한 수정된 시간 차이 방정식을 기반으로 OFC의 반복률 및 반복률 오프셋의 변화가 시간 동기 오차에 미치는 영향을 정량적으로 평가하고 고반복률 EO-COMB이 초정밀 시간 동기 시스템의 적합성을 제시하고자 한다.

### II. 본론

#### (1) O-TWTFT를 활용한 위성 시스템 모델

본 연구에서 제안하는 위성 간 초정밀 시간 동기 시스템은 O-TWTFT 방식을 기반으로 한다. 그림 1을 참고하면 기준 시간 정보를 제공하는 Master 위성과 이 시간을 수신하여 동기화되는 Remote 위성으로 구성된다.

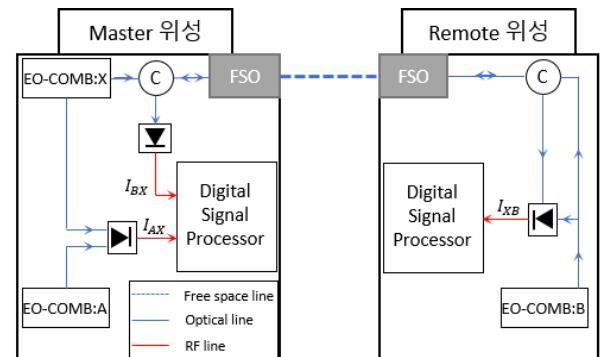


그림. 1 시스템 구조도. C:Optical Circulator;

Master 위성에는 두 개의 EO-COMB이 배치된다. 이 위성에서 기준 클럭 역할을 하는 Comb A(반복률  $\hat{f}_r$ )와 시간 정보를 전송하는 Comb X(반복률  $\hat{f}_r + \Delta f_r$ )로 구성된다.  $\Delta f_r$ 은 반복률의 차이를 주는 오프셋 주파수로 두 comb의 펄스열 간 간섭 신호(interferogram)를 생성하기 위한 핵심 역할을 한다. Remote 위성에는 동기화 대상인 Comb B(반복률  $\hat{f}_r$ )가 위치한다. 마스터 위성은 Comb X를, 원격 위성은 Comb B를 각각 상대편 위성에 수신한다. 각 위성 간 시간 차이를  $\Delta t_{AB}$ 라고 하면 수식은 다음과 같이 정의된다 [3].

$$\Delta t_{AB} = \frac{1}{2-V_0/c} (T_{pk} + C_{V_0,T_{BA}} + 2\Delta T_{cal,eff}) \quad (1)$$

기본적으로  $\Delta t_{AB}$ 는 각 콤들의 해테로다인 측정을 통해 얻어진 Interferogram  $I_{AX}$ ,  $I_{XB}$ ,  $I_{BX}$ 의 정밀 시간 정보로부터 계산된다.

$$T_{pk} = \frac{\Delta f_r}{\hat{f}_r^2} [k_{pAX} - k_{pBX} + \frac{1}{1 + \Delta f_r / \hat{f}_r} (k_{pAX} - k_{pXB} - p_{XB} + p_{AX})] + \frac{1}{\hat{f}_r} [p_{XB} + p_{BX} - 2p_{AX}] \quad (2)$$

기본 시간차 항인  $T_{pk}$ 는 측정된 인터페로그램의 정수 주기 번호  $p$  와  $p$  와 관련된 샘플 타이밍  $k$  값들의 조합으로 구성되며 양방향 시간차 정보를 나타낸다.

$$C_{V_0,T_{BA}} = \frac{1}{\hat{f}_r c} (k_{pXB} - k_{pBX} + \hat{f}_r T_{B \rightarrow A}(t_{pBX})) \quad (3)$$

$$\Delta T_{cal,eff} = \Delta T_{cal} + \hat{f}_r \Delta T_{cal}^V \quad (4)$$

$C_{V_0,T_{BA}}$ 는 위성 간 상대 접근 속도  $V_0$ 와 단방향 전파 시간  $T_{B \rightarrow A}(t_{pBX})$ 을 고려한 보정항으로 위성의 이동으로 인해 발생하는 효과를 보상해준다. 교정 상수항  $\Delta T_{cal,eff}$ 는 위성 내부 경로에서 발생하는 시간 오프셋  $\Delta T_{cal}$ 과 상대 속도  $V$ 로 인해 발생한 지연을  $\Delta T_{cal}^V$ 로 통해 보정한다.

## (2) 시뮬레이션

본 시뮬레이션은 고도 550km 을 사용하는 Starlink 환경을 모사하여 동일 궤도면(Inter plane)을 공유하는 두 저궤도 위성 간 650km ISL 환경을 가정하였다[4]. 위성 간 상대 속도는  $V_0 = 0.1 m/s$ 로 설정하고 교정 상수항  $\Delta T_{cal,eff} = 0$  으로 설정하였다. 본 연구실에서 제작한 EO-COMB 의 반복률  $\hat{f}_r$ 은 비교를 위해 상대적으로 낮은 12.5GHz 와 높은 50GHz 로 설정했다. 측정 업데이트율  $\frac{1}{\Delta f_r}$  과 타이밍 확대율  $M = \frac{\hat{f}_r}{\Delta f_r}$  을 결정하는 반복률 오프셋  $\Delta f_r$  은 타이밍 확대율  $M$  이 다음과 같은 집합  $M=\{400k, 200k, 100k, 50k\}$ 을 이루도록 설정하였다.

시뮬레이션은 크게 두 단계로 진행했다.  $\Delta t_{AB}$  를 계산하기 위해서 측정된 인터페로그램으로부터 정수 인덱스  $p$  와 샘플 타이밍  $k$  를 얻는 첫번째 단계와 이로부터 얻은 변수 값들로  $\Delta t_{AB}$  를 계산하고 분석하는 두번째 단계로 나누어 진행했다.

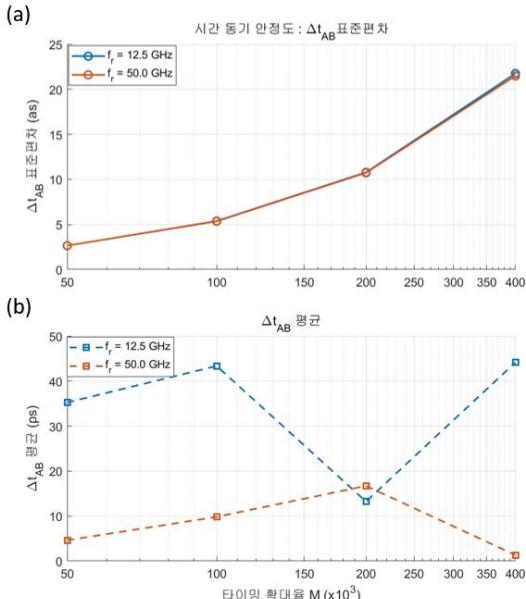


그림. 2 시뮬레이션 결과 그래프:  $\Delta t_{AB}$ 의 (a) 표준편차, (b) 평균

그림 2. (a)의  $\Delta t_{AB}$ 의 표준편자는 두 가지 반복률 모두  $M$  이 감소함에 따라( $= \Delta f_r$  이 증가) 일관되게 감소하는 경향을 보였다. 두 반복률 모두  $M=400k$  일 때 약 21.5 as 였고  $M=50k$  일 때는 약 2.65 as 으로 크게 향상되었다.  $\Delta f_r$  이 증가할수록 측정 업데이트율( $\frac{1}{\Delta f_r}$ )이 높아지고 단기적인

안정도 측면에서 개선점을 보임을 확인했다. 이로 인해 반복률의 크기보다는  $M$  자체가 단기 안정도에 큰 영향을 미칠 수 있는 것을 나타낸다.

M	$\Delta f_r$ (kHz)	(a) $\Delta t_{AB}$ 표준편자 (as)	(b) $\Delta t_{AB}$ 평균 (ps)
400k	31.25	125	21.488
200k	62.5	250	10.735
100k	125	500	5.351
50k	250	1000	2.652

표 1. 시뮬레이션 결과값: 12.5GHz(회색), 50GHz(파란색)

그림 2. (b)의  $\Delta t_{AB}$ 의 평균은 상대적으로 고 반복률일 때 더 작은 값으로 나타났다. 반복률이 50 GHz 일 때  $M=400k$  환경에서 1.338 ps 결과를 보였으며 평균적으로 수 피코초 수준의 결과를 보여줬다. 12.5 GHz 일 때는  $M=200k$  환경에서 13.237 ps 결과를 보였으며 평균적으로 약 40 ps 미만의 결과를 확인했다.

## III. 결론

본 논문은 LEO 위성 간 ISL 환경에서 반복률 12.5 GHz, 50GHz 인 EO-COMB 을 활용하여 O-TWTFT 시스템의 시간 동기 정확도를 시뮬레이션을 통해 분석했다. 기준 반복률  $\hat{f}_r$  과 반복률 오프셋  $\Delta f_r$  변화에 따른 결과를 비교했을 때  $\Delta f_r$  증가 시  $\Delta t_{AB}$ 의 표준 편자가 수 아토초(as) 수준까지 향상되고, 반복률 50GHz 일 때 반복률 오프셋이 1 MHz 인 상황에서 시간 차이를 4.6 ps 수준으로 가장 우수한 결과를 보여 고반복률의 EO-COMB 이 초정밀 시간 동기 기술의 가능성을 보여줬다. 하지만 고반복률을 사용하면 시간 정보를 전송하는 보조 통신 채널 및 신호처리부의 성능 요구사항을 높이므로 시스템 복잡도를 고려한 반복률 및 반복률 오프셋의 최적의 설정이 중요하며 향후 후속 연구에서는 다른 궤도면 환경과 각종 잡음을 고려하여 시스템 설계를 진행하려고 한다.

## ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the Institute for Information and Communication Technology Promotion (IITP) grant funded by the Ministry of Science and ICT, South Korea (2019-0-00008).

## 참 고 문 현

- [1] Choi, G. E., and Y. K. Song. "Low Earth Orbit Satellite Communications, Applications and Major Operators' Service Deployments." Electronics and Telecommunications Trends 39.3 (2024): 36-47.
- [2] Bergeron, Hugo, et al. "Femtosecond time synchronization of optical clocks off of a flying quadcopter." Nature communications 10.1 (2019): 1819.
- [3] Sinclair, Laura C., et al. "Femtosecond optical two-way time-frequency transfer in the presence of motion." Physical Review A 99.2 (2019): 023844.
- [4] Chaudhry, Aizaz U., and Halim Yanikomeroglu. "Laser intersatellite links in a starlink constellation: A classification and analysis." IEEE vehicular technology magazine 16.2 (2021): 48-56.