

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

김재성^{1,2}, 무하마드 후세인¹, 고영채², 송민협^{1,*}한국전자통신연구원 광무선연구본부 광융합부품연구실¹, 고려대학교 전기전자공학과²

*sminhyup@etri.re.kr

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

Jaeseong Kim^{1,2}, Muhammad Hussain¹, Young-Chai Ko², Minhyup Song¹ETRI¹, Korea Univ.²

요 약

본 논문은 저궤도 위성 간 광 링크(O-ISL)의 고정밀 시간 동기화를 위해 고반복률의 전광 변조 광 주파수 빔(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 빔(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 빔(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.

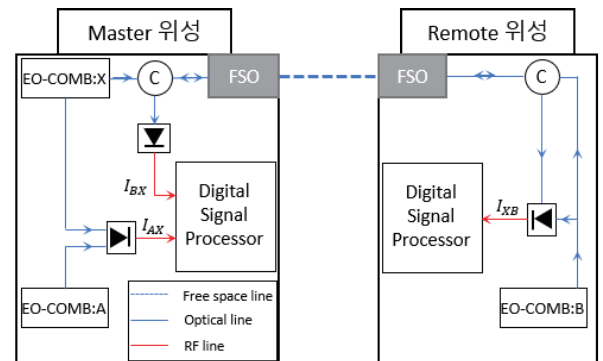


그림. 1 시스템 구조도. C: Optical Circulator;

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. Δf_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 상대방 위성에 수신한다. 각 위성 간 시간 차이를 Δt_{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 Δt_{AB} 는 각 콤들의 헤테로다인 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.

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

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

$C_{V_0, T_{BA}}$ 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 ΔT_{cal} 과 상대 속도 V 로 인해 발생한 지연을 ΔT_{cal}^V 로 통해 보정한다.

(2) 시뮬레이션

본 시뮬레이션은 고도 550km 을 사용하는 Starlink 환경을 모사하여 동일 궤도면(Inter plane)을 공전하는 두 저궤도 위성 간 650km ISL 환경을 가정하였다[4]. 위성 간 상대 속도는 $V_0 = 0.1 \text{ m/s}$ 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 Δf_r 은 타이밍 확대율 M 이 다음과 같은 집합 $M = \{400k, 200k, 100k, 50k\}$ 을 이루도록 설정하였다.

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

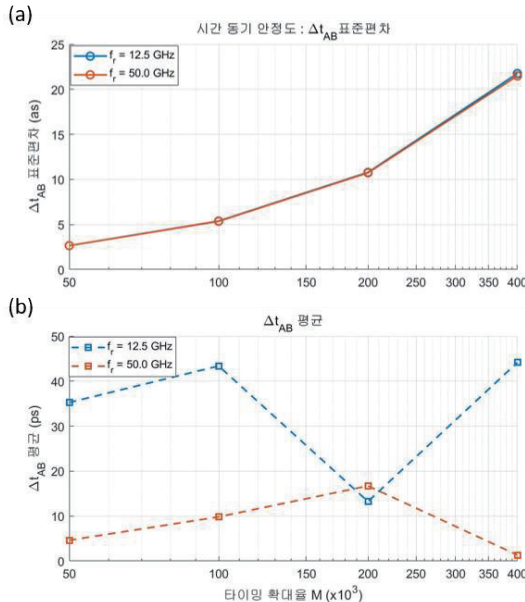


그림. 2 시뮬레이션 결과 그래프: Δt_{AB} 의 (a) 표준편차, (b) 평균

그림 2. (a)의 Δt_{AB} 의 표준편차는 두 가지 반복률 모두 M 이 감소함에 따라(= Δf_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. Δf_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	Δf_r (kHz)		(a) Δt_{AB} 표준편차 (as)		(b) Δt_{AB} 평균 (ps)	
400k	31.25	125	21.752	21.488	44.136	1.338
200k	62.5	250	10.785	10.735	13.237	16.71
100k	125	500	5.381	5.351	43.373	9.823
50k	250	1000	2.649	2.652	35.258	4.624

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

그림 2. (b)의 Δt_{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 Δf_r 변화에 따른 결과를 비교했을 때 Δf_r 증가 시 Δt_{AB} 의 표준 편차가 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 헌

- [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.