

# 위성항법시스템을 위한 양방향 시각동기 성능 분석

신미리, 임덕원\*

\*한국항공우주연구원

maryshin@kari.re.kr, \*dwlim@kari.re.kr

## A Study on the time synchronization for satellite navigation systems

Miri Shin, Deok Won Lim\*

\*Korea Aerospace Research Institute

### 요약

본 논문은 위성항법시스템에서 적용하고 있는 양방향 시각동기 기술의 특징을 소개한다. 또한, 양방향 시각동기 기술을 기반으로 하는 지상시스템간 및 위성-지상시스템간의 시각동기 오차 모델, 보정 방식, 그에 따른 예측 성능을 분석하였다.

### I. 서론

위성항법시스템은 전파를 이용하여 무선 측위를 제공하는 시스템으로서 기본적으로 위성과 사용자 사이의 전파 도달 시간을 측정하여 위치를 추정한다. 이때 사용자의 3차원 위치와 시각을 추정하려면 4개 이상의 위성 신호가 필요하며 각 위성 간의 시각은 동기되어 있어야 한다. 따라서 위성항법시스템은 사용자를 제외한 다수의 위성과 지상국은 상호 간에 시각이 동기되어야 하며, 이를 위하여 양방향 시각동기 기술을 적용할 수 있다. 본 논문에서는 위성항법시스템에서 적용되는 양방향 시각동기 기술에 대한 오차 모델을 소개하고 오차 요소에 대하여 정리하였으며, 특히 상향 및 하향 주파수에 따라 달라지는 전리층 지연 오차를 정밀하게 고찰하였다.

### II. 본론

양방향 시각중계를 이용한 지상시스템간의 시각동기 원리 및 오차 모델은 다음과 같다.

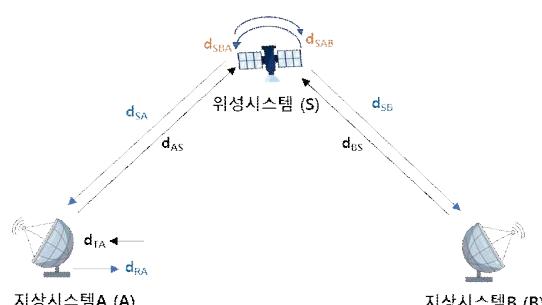


그림 1. 지상시스템간의 시각동기 원리

그림 1에서 양방향 시각중계를 할 수 있는 지상시스템은 각각의 시계와 Time Interval Counter(TIC), 송신기, 수신기, 안테나 기능을 가지며, 위성시스템은 두 지상시스템에서 온 신호를 단순 중계하는 transparent 기능을 가져야 한다. 지상시스템A가 측정한 PPS-A와 PPS-B의 시각 차이는 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$M(A) = t_A - t_B + d_{TB} + d_{BS} + d_{SBA} + d_{SA} + d_{RA} + S_{uplB} + S_{dwlA} \quad (1)$$

여기서  $t_A$ ,  $t_B$ 는 각각 지상시스템A와 지상시스템B의 시계가 갖는 시각을 의미하고,  $d_{TB}$ 는 지상시스템B의 송신기 지연,  $d_{BS}$ 는 지상시스템B에서 위성으로 가는 전파 지연,  $d_{SBA}$ 는 위성시스템이 지상시스템B 신호를 지상시스템A에 중계시 발생하는 지연,  $d_{SA}$ 는 위성에서 지상시스템A로 신호가 전파될 때 지연,  $d_{RA}$ 는 지상시스템A의 수신기 지연,  $S_{uplB}$ 는 지상시스템B에서 위성시스템으로 신호를 보낼 때 지구 자전에 의해 발생하는 Sagnac 효과에 의한 오차값이다.

지상시스템B에서 측정한 PPS-B와 PPS-A의 차이도 식 (2)와 같으며, 식 (2)에서 사용한 각 항의 의미는 위와 동일한 방식으로 설명된다.

$$M(B) = t_B - t_A + d_{TA} + d_{AS} + d_{SAB} + d_{SB} + d_{RB} + S_{uplA} + S_{dwlB} \quad (2)$$

식 (1)과 식 (2)의 차분을 이용하여 지상시스템A와 지상시스템B의 시각 차이를 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$t_A - t_B = 0.5[M(A) - M(B)] - 0.5[(d_{TB} - d_{RB}) + (d_{RA} - d_{TA})] - 0.5[(d_{BS} - d_{SB}) + (d_{SA} - d_{AS}) + (d_{SBA} - d_{SAB})] - \frac{2\omega A}{c^2} \quad (3)$$

여기서 지상시스템A, 지상시스템B의 업링크 및 다운링크 신호의 Sagnac 효과는  $-\frac{2\omega A}{c^2}$  으로 치환할 수 있다.

양방향 시각중계를 이용한 위성시스템과 지상시스템간의 시각동기 원리 및 오차 모델은 다음과 같다.

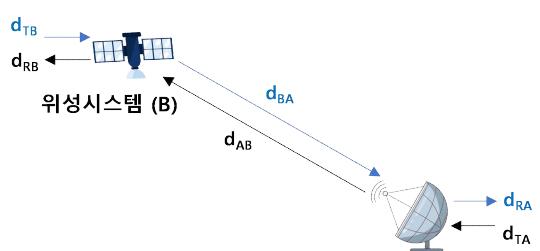


그림 2. 위성시스템과 지상시스템간의 시각동기 원리

$$t_A - t_B = 0.5[M(A) - M(B)] - 0.5[(d_{TB} - d_{RB}) + (d_{RA} - d_{TA})] - 0.5(d_{BA} - d_{AB}) - 0.5(S_{dwIA} - S_{upIA}) + R_b \quad (4)$$

여기서  $R_b$ 는 상대성효과에 대한 보정값을 나타낸다. 식 (3)과 (4)에서 나타난 각각의 오차 항에 대한 추정값을 표 1과 같이 정리하였다.

표 1. 시각동기 오차 요소별 추정 오차

오차 요소	지상시스템간 시각동기		위성-지상시스템간 시각동기	
	식 (3)	추정 오차	식 (4)	추정 오차
코드 지터	-	$\leq 0.1\text{ns}$	-	$\leq 0.1\text{ns}$
보정 지연	$(d_{TA} - d_{RA}) + (d_{RB} - d_{TB})$	$\leq 1.4\text{ns}$	$d_{TA} - d_{RA}$	$\leq 1.0\text{ns}$
전파 지연	$(d_{AS} - d_{SA}) + (d_{SB} - d_{BS})$	$\leq 0.25\text{ns}$	$d_{AB} - d_{BA}$	$\leq 0.3\text{ns}$
위성 지연 차	$d_{SAB} - d_{SBA}$	$\leq 0.1\text{ns}^{(*)}$	$d_{RB} - d_{TB}$	$\leq 0.1\text{ns}$
상대성 효과	N/A	negligible	$R_B$	$\leq 0.1\text{ns}$
새그넥 효과	$-\frac{2\omega A}{c^2}$	negligible	$S_{dwIA} - S_{upIA}$	negligible
Total(RSS)		$\leq 1.43\text{ns}$		$\leq 1.06\text{ns}$

표 1로부터 지상시스템간 시각동기 오차는 약 1.43ns, 위성시스템과 지상시스템간 시각동기 오차는 약 1.06ns인 것을 확인할 수 있으며, 보정 지연과 전파 지연이 상대적으로 큰 오차를 유발하는 것을 알 수 있다.

보정 지연의 경우 TU-R TF.1153-4 문서를 바탕으로 보정 불확도가 1.4ns(10)임을 확인할 수 있으며, 전파 지연은 전리층 지연, 대류층 지연, 위성 움직임에 의한 지연으로 나눌 수 있고 전리층 지연이 주된 오차 요소이다. 따라서 본 논문에서는 상향링크와 하향링크 신호의 주파수에 따른 전리층 지연을 상세히 분석하였다. 1차 전리층 효과로 인한 근사 굴절률을 적용하면 전리층 오차는 식 (5)와 같이 계산할 수 있다.

$$\Delta_{up}^{iono} - \Delta_{dn}^{iono} = \frac{40.3}{c} TEC \left( \frac{1}{f_{dwI}^2} - \frac{1}{f_{upI}^2} \right) \quad (5)$$

여기서  $c$ 는 광속,  $TEC$ 는 Total Electron Content,  $t_{dwI}$ 는 하향링크 주파수,  $t_{upI}$ 는 상향링크 주파수이다.

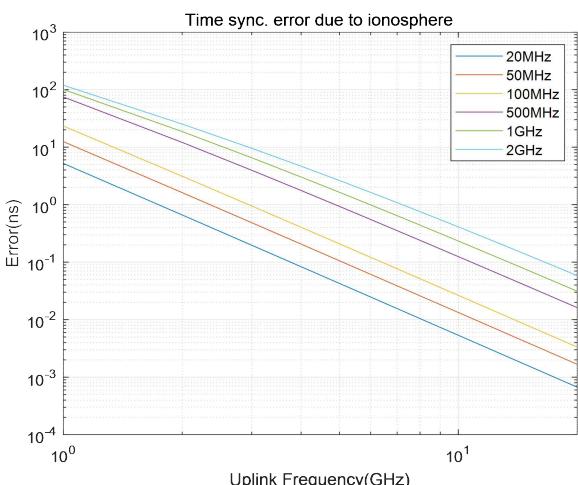


그림 3. 상향/하향링크 주파수에 따른 전리층 지연 오차

식 (5)로부터 상향링크 주파수가 1GHz~20GHz이고, 상향링크와 하향링크

주파수 차이를 20MHz~200MHz로 바꿔가면서 오차를 분석하면 그림 3과 같다. 또한, 실제로 적용 가능한 상향 및 하향 링크 주파수에 따른 결과를 표 2와 같이 도출하였다.

표 2. 상향/하향링크 주파수에 따른 전리층 지연 오차

대역	주파수		오차
	상향	5.005 GHz	
C 대역	하향	5.025 GHz	0.04 ns
	상향	14.25 GHz	0.21 ns
Ku 대역	하향	12.45 GHz	

### III. 결론

본 논문에서는 위성항법시스템에서 적용하고 있는 양방향 시각동기 기술의 특징을 소개하고, 양방향 시각동기 오차 모델, 보정 방식, 그에 따른 예측 성능을 분석하였다. 이로부터 시각동기 오차는 약 1.5ns 이하로 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 또한 상향/하향링크 주파수에 따른 전리층 지연 오차를 분석하였으며, 이러한 부분을 고려하여 시각동기 시스템 구성 및 위성망 설계를 수행해야 함을 확인하였다.

### ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 우주항공청의 재원으로 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호: RS-2021-NR055925).

### 참 고 문 헌

- [1] Hanson, D. Wayne. "Fundamentals of two-way time transfers by satellite." Proceedings of the 43rd Annual Symposium on Frequency Control. IEEE, 1989.
- [2] Blue Book: Pseudo-Noise (PN) Ranging Systems. CCSDS 414.0-G-2.
- [3] The operational use of two-way satellite time and frequency transfer employing pseudorandom noise codes.
- [4] Piester, D., et al. "Studies on instabilities in long-baseline two-way satellite time and frequency transfer (TWSTFT) including a troposphere delay model." Proceedings of the 39th Annual Precise Time and Time Interval Meeting. 2007.
- [5] Pawlitzki, A. SATRE Principles of Operation, TimeTech GmbH (2002).
- [6] Maho Nakamura, Yasuhiro Takahashi, Jun Amagai, Tadahiro Goth, Miho Fugieda, Ryo Tabuchi and Shin'Ichi Hama, Yukihiro Yahagi, Tamaki Takahashi and Satoshi Horiuchi, "Time Comparison Experiments Between the Qzs-1 and its Time Management Station", NAVIGATION: Journal of The Institute of Navigation Vol. 60, No. 4, Winter 2013.