

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 지상시스템 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.

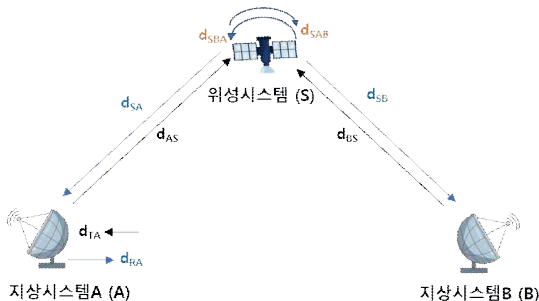


그림 1. 지상시스템간의 시각동기 원리

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.

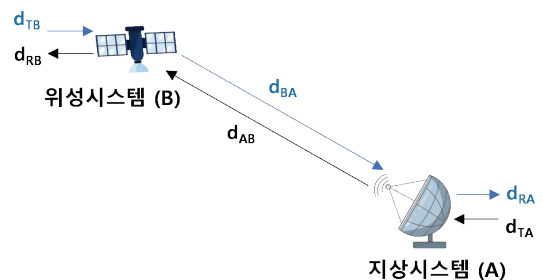


그림 2. 위성시스템과 지상시스템간의 시각동기 원리

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

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. 시각 동기 오차 요소별 추정 오차

오차 요소	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 잔차	$d_{SAB} - d_{SBA}$	$\leq 0.1\text{ns}^*$	$d_{RB} - d_{TB}$	$\leq 0.1\text{ns}$
상대성 효과	N/A	negligible	R_B	$\leq 0.1\text{ns}$
새그넥 효과	$-\frac{2\omega A}{c^2}$	negligible	$S_{dwlA} - S_{uplA}$	negligible
Total(RSS)		$\leq 1.43\text{ns}$		$\leq 1.06\text{ns}$

표 1로부터 지상시스템간 시각 동기 오차는 약 1.43ns, 위성시스템과 지상시스템간 시각 동기 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(1σ)임을 확인할 수 있으며, 전파 지연은 전리층 지연, 대류층 지연, 위성 움직임에 의한 지연으로 나눌 수 있고 전리층 지연이 주된 요차 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.

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

여기서 c 는 광속, TEC 는 Total Electron Content, t_{dwl} 는 하향링크 주파수, t_{upl} 는 상향링크 주파수이다.

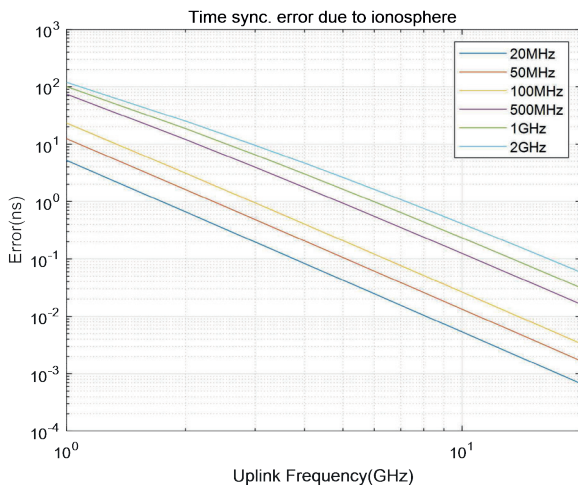


그림 3. 상향/하향링크 주파수에 따른 전리층 지연 오차

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

III. 결론

본 논문에서는 위성항법시스템에서 적용하고 있는 양방향 시각 동기 기술의 특징을 소개하고, 양방향 시각 동기 오차 모델, 보정 방식, 그에 따른 예측 성능을 분석하였다. 이로부터 시각 동기 오차는 약 1.5ns 이하로 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 또한 상향/하향링크 주파수에 따른 전리층 지연 오차를 분석하였으며, 이러한 부분을 고려하여 시각 동기 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.