

# LQG 기반 벡터 추적 루프를 적용한 GPS 수신기의 위치 및 측정치 성능 분석

## Position and Measurement Performance Analysis of GPS Receiver applied LQG based Vector Tracking Loop

박민혁<sup>1</sup> · 전상훈<sup>1</sup> · 김종원<sup>2</sup> · 기창돈<sup>1\*</sup> · 서승우<sup>3</sup> · 장재규<sup>3</sup> · 소형민<sup>3</sup> · 박준표<sup>3</sup>

<sup>1</sup>서울대학교 기계항공공학부

<sup>2</sup>SK텔레콤 종합기술원

<sup>3</sup>국방과학연구소

Min-Huck Park<sup>1</sup> · Sang-Hoon Jeon<sup>1</sup> · Chong-Won Kim<sup>2</sup> · Chang-Don Kee<sup>1\*</sup> · Seung-Woo Seo<sup>3</sup> · Jae-Gyu Jang<sup>3</sup> · Hyoung-Min So<sup>3</sup> · Jun-Pyo Park<sup>3</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

<sup>2</sup>SK Telecom R&D Center, Seoul 04539, Korea

<sup>3</sup>Agency for Defense Development, Daejeon 34186, Korea

### [요 약]

일반적인 위성 항법 장치 수신기는 루프 필터 기반의 스칼라 추적 루프를 통해 신호 추적이 이루어진다. 본 논문에서는 루프 필터를 LQG 제어기로, 스칼라 추적 루프를 벡터 추적 루프로 대체한 LQG 기반 벡터 추적 루프의 성능을 정확성과 강건성 측면에서 살펴보았다. 정확성을 판단하기 위해서, 일반적인 루프 필터 기반 스칼라 추적 루프 대비 LQG 기반 스칼라 추적 루프의 측정치 추정 오차가 60% 이상 향상됨을 확인하였다. 다음으로 LQG 기반 스칼라 추적 루프 대비 LQG 기반 벡터 추적 루프의 측정치 추정 오차의 성능 향상과 위성 개수 증가에 따른 위치/속도 추정 오차 성능 향상을 확인함으로써 정확성을 확인하였다. 마지막으로 4초 동안의 30 dB-Hz의 일시적 신호 감쇄 상황에서 루프 필터 기반의 스칼라 추적 루프는 신호 추적에 실패하는 반면, LQG 기반 벡터 추적 루프는 연속적으로 위치/속도, 측정치 추정이 가능함을 확인함으로써 강건성을 확인하였다.

### [Abstract]

Generally, loop filter based scalar tracking loops (LF-STL) have been used for global positioning system (GPS) signal tracking algorithm. This paper introduces the accuracy and robustness of linear-quadratic-Gaussian based vector tracking loop (LQG-VTL) algorithm instead of LF-STL. To verify the accuracy of LQG-VTL, we confirm that the measurements estimation errors of the LQG based scalar tracking loops (LQG-STL) are improved by more than 60% compared to LF-STL. Also, when LQG-VTL is used, measurements estimation errors decrease compared to LQG-STL, and position/velocity estimation errors also decrease as the number of satellites increases. To verify the robustness of LQG-VTL, we confirm that LQG-VTL can estimate position/velocity and measurements successively compared to LF-STL in temporal signal attenuation of 30 dB-Hz during 4 seconds.

**Key word** : Vector tracking loop, LQG controller, GPS signal tracking loop, Accuracy, Robustness.

<https://doi.org/10.12673/jant.2017.21.1.43>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 23 January 2017; Revised 6 February 2017

Accepted (Publication) 15 February 2017 (28 February 2017)

\*Corresponding Author; Chang-Don Kee

Tel: +82-2-880-1912

E-mail: kee@snu.ac.kr

## I. 서론

기존의 위성 항법 장치 (GPS; global positioning system) 수신기의 신호 추적 원리는 각 위성별로 측정치를 구하고, 이를 통해 사용자 위치 해를 구하는 스칼라 추적 루프 (STL; scalar tracking loops)가 주로 사용되었다. 그리고 STL의 내부 필터로는 구현이 간단하고 계산량이 적은 루프 필터가 보편적으로 사용되었다 [1],[2]. 하지만 루프 필터는 NCO (numerically controlled oscillator) 입력의 최적성을 보장하지 못한다는 점에서 성능 향상의 여지가 있다고 할 수 있다. 위 문제를 해결하기 위해 루프 필터 대신 최적 제어 이론을 바탕으로 하는 linear-quadratic-Gaussian (LQG) 신호 추적 루프 연구가 진행되었다[3]-[5].

기존의 STL을 활용한 GPS 수신기는 각 위성별 신호와 사용자 위치와의 상관성을 활용하지 않기 때문에 순간적인 신호 단절, 감쇄 상황에서 신호 추적이 불가능하다는 단점이 있다. 그에 비해 벡터 추적 루프 (VTL; vector tracking loop)를 활용한 GPS 수신기의 경우 각 위성별 신호와 사용자 위치 간 상관성을 활용하기 때문에 순간적인 신호 단절, 감쇄 상황에서도 연속적으로 위치/속도, 측정치를 추정할 수 있다는 장점이 있다. 또한 신호 추적이 가능한  $C/N_0$  값이 STL에 비해 낮기 때문에 재밍과 같은 외부 교란 신호에 강건하다는 장점도 있다[6],[7].

본 논문에서는 VTL에 LQG 제어를 결합한 LQG-VTL를 수신기 신호 추적 루프로 채택하고, 위 성능을 정확성과 강건성 측면에서 분석하였다. 먼저 LQG 제어기의 성능을 알아보기 위하여 기존의 LF-STL와 LQG-STL의 측정치 추정 오차를 비교하여 루프 필터 대비 LQG 제어기의 성능 향상을 보였다. 또한 LQG-VTL과 LQG-STL의 측정치 추정 오차를 비교하여 LQG-VTL의 정확성 향상을 보였다. 마지막으로 한 위성의 신호 세기를 4초간 45 dB-Hz에서 30 dB-Hz로 낮춘 일시적 신호 감쇄 상황에서, LF-STL과 LQG-VTL의 결과를 비교하여 LQG-VTL이 연속적으로 위치/속도 및 측정치 추정이 가능함을 보임으로써 강건성을 확인하였다.

## II. LQG 기반 신호 추적 루프

### 2-1 스칼라 신호 추적

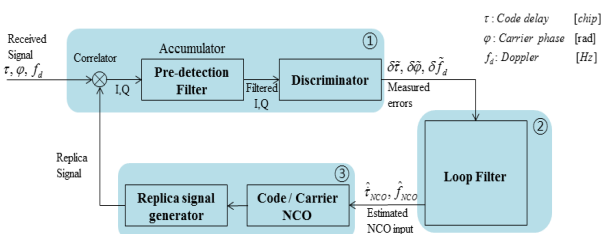


그림 1. 기존 신호 추적 루프의 블록 다이어그램  
Fig. 1. Block diagram of conventional signal tracking loop.

루프 필터를 사용하는 기존의 GPS 수신기의 신호 추적 루프는 그림 1과 같다. 기존의 GPS 수신기에서는 수신된 신호와 복제된 신호의 오차를 측정하고(①), 루프 필터에서 NCO 입력을 생성하며(②), NCO 입력을 통해 복제 신호를 생성하는 과정을 반복하게 된다(③). 이 과정을 통해 코드 지연, 반송파 위상, 도플러 값을 정확히 추정하게 되고, 각 채널별 측정치를 모아 최소자승법을 통해 사용자 위치/속도 해를 구하게 된다.

루프 필터 대신 LQG 제어를 활용한 GPS 수신기의 경우, NCO 입력의 최적성이 특정 성능지수 조건에서 보장받게 된다 [8]-[10]. 그림 1을 LQG 기반으로 다시 표현하면 그림 2와 같다.

그림 1에서 ①에 해당하는 입력 신호와의 오차 측정 부분은 그림 2의 입력 신호  $y_{Ref,k}$ 와 복제 신호  $\tilde{y}_k^j$ 의 차이를 계산하는 부분, 그림 1의 ②에 해당하는 LF는 그림 2의 칼만 필터(KF; Kalman filter) 및 제어 입력 생성 부분, 그림 1의 ③에 해당하는 복제 신호 생성 부분은 그림 2의 plant에 대응된다. 또한 각 채널별로 신호 추적 루프가 시행되는 것을 확인할 수 있다. 그림 2에서는 수신된 신호 및 KF의 측정치와 상태변수가 그림 1과는 다르게 의사거리, 반송파 위상, 도플러로 표현되어 있는데 이는 아래의 단위 변환 과정을 거치면 동일하다.

$$\begin{aligned} \rho_{k+1} &= \rho_k + \Delta t \lambda_r \hat{\tau}_{NCO,k} \\ \dot{\phi}_{k+1} &= \dot{\phi}_k + \lambda_\phi \hat{\phi}_{NCO,k} \end{aligned} \quad (1)$$

$\rho$ 는 의사거리 측정치 (m),  $\dot{\phi}$ 는 도플러 측정치 (m/s),  $\hat{\tau}$ 는 code NCO (chip/sec),  $\hat{\phi}$ 는 carrier NCO (Hz),  $\lambda_r$ 는 chip 단위를 m 단위로 변환하는 단위 변환 상수,  $\lambda_\phi$ 는 Hz 단위를 m/s 단위로 변환하는 단위 변환 상수를 의미한다.

STL에서 plant 식은 다음과 같이 표현할 수 있다 [3].

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \delta \rho^j \\ \delta \dot{\phi}^j \\ \delta \phi^j \end{pmatrix}_{k+1} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta t \\ 0 & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \delta \rho^j \\ \delta \dot{\phi}^j \\ \delta \phi^j \end{pmatrix}_k + \begin{bmatrix} \Delta t & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \delta u_\rho^j \\ \delta u_\phi^j \end{pmatrix}_k \\ \Leftrightarrow \delta x_{STL,k+1}^j &= F_{STL}^j \delta x_{STL,k}^j + G_{STL}^j \delta u_k^j \end{aligned} \quad (2)$$

위 식에서  $\delta x_{STL,k}^j$ 는 j번째 채널, k번째 epoch의 KF의 상태 변수로, 의사거리, 반송파 위상, 도플러 변화량 값으로 이루어져 있다.  $\Delta t$ 는 epoch 사이 간격으로 본 논문에서는 1ms로 설정하였다.

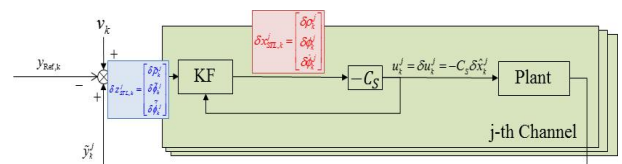


그림 2. LQG-STL의 블록 다이어그램  
Fig. 2. Block diagram of LQG-STL.

$\delta u_k^j$ 는 j번째 채널, k번째 epoch의 제어 입력으로  $\delta u_{\rho,k}^j$ 와  $\delta u_{\phi,k}^j$ 는 각각 code NCO의 입력 제어 값, carrier NCO의 입력 제어 값을 의미한다.

2-2 벡터 신호 추적

각 채널별로 신호 추적 루프가 수행되는 STL과는 달리 VTL에서는 하나의 큰 신호 추적 루프가 수행된다. VTL에서는 각 위성으로부터 받은 측정치를 통해 위치/속도 해를 추정하고, 추정된 위치/속도 해를 통해 측정치를 추정하게 된다. 블록 다이어그램으로 표현하면 그림 3과 같다.

VTL에서 plant 식은 STL의 plant 식과 측정치와 상태변수와의 관계를 나타내는 H 행렬을 통해 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} \delta z_k (\approx \delta x_{STL,k}) &= H_k \delta x_{VTL,k} + v_k \\ \delta x_{STL,k+1} &= F_{STL} \delta x_{STL,k} + G_{STL} \delta u_k \\ H_{w,k} \delta x_{VTL,k+1} &= F_{STL} H_{w,k} \delta x_{VTL,k} + G_{STL} \delta u_k \\ \delta x_{VTL,k+1} &= (H_{w,k}^\dagger F_{STL} H_{w,k}) \delta x_{VTL,k} + (H_{w,k}^\dagger G_{STL}) \delta u_k \\ &= \delta x_{VTL,k+1} = F_{VTL} \delta x_{VTL,k} + G_{VTL} \delta u_k \end{aligned} \quad (3)$$

$\delta x_{VTL,k}^j$ 은 j번째 채널, k번째 epoch의 칼만 필터의 상태변수로 위치, 속도, 수신기 시계오차로 이루어져 있다.  $H_k$ 는 각 위성별 시선벡터로 이루어진 행렬이며,  $H_{w,k}$ 는 가중 최소자승법 (weighted least square)로 계산된 값이다.

III. 시뮬레이션 결과

3-1 시뮬레이션 환경

시뮬레이션의 편의를 위해 사용자와 위성의 위치는 2차원 상에 존재하며 위성은 약 2만 km 떨어진 상황에서 정지하고 있다고 가정하였다. 그림 4에 2차원에서 x, y 좌표축을 표시하였다. 전리층, 대류층, 위성 궤도, 멀티패스 오차는 제외하였고, 수신기 시계오차는 300 Hz 변화량의 1차식으로 모델링하였다. 또한 반송파 위상의 미지정수는 알고 있다고 가정하였다. 측정치, 상태 변수, 사용자 동적 환경, 위성 위치 및 개수, 신호 세기를 변수로 지정해 다양한 환경에서 시뮬레이션을 진행하였다.

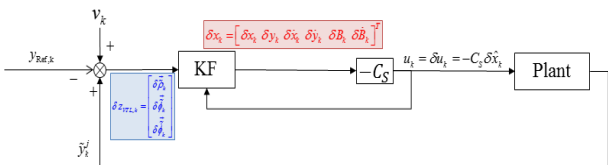


그림 3. LQG-VTL의 블록 다이어그램  
Fig. 3. Block diagram of LQG-VTL.

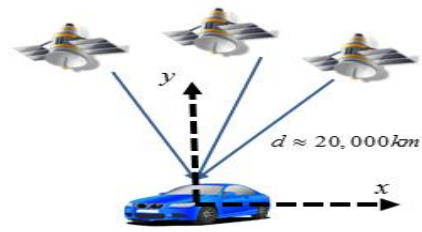


그림 4. 2D 시뮬레이션의 x, y 좌표축  
Fig. 4. x,y Coordinates of 2D simulation.

3-2 LQG-STL 시뮬레이션

STL 환경에서 기존의 방법인 루프 필터를 사용했을 때와 LQG 제어기를 사용했을 때를 비교해보았다. 측정치로는 의사 거리, 도플러, 반송파 위상을 사용하였다. 그림 5~그림 7에 사용자의 동적 환경을 정지, 등속도, 원운동으로 바꾸어보며 시뮬레이션을 한 결과를 나타내었다. 등속도 사용자의 경우 30 m/s 이며 원운동 사용자의 경우 반지름이 10 m, 각속도는 0.3 rad/s의 크기를 가진다.

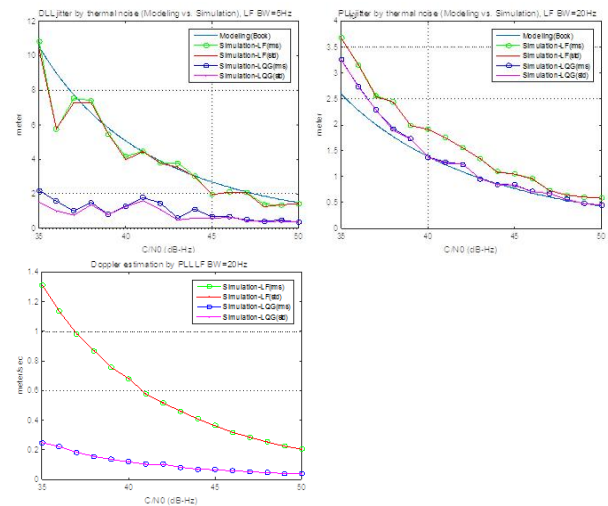


그림 5. LQG-STL, LF-STL의 측정치 추정 오차 (정지 사용자)  
Fig. 5. Measurements estimation errors of LF-STL and LQG-STL (static user).

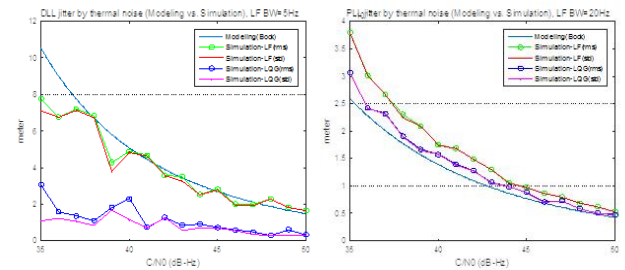


그림 6. LQG-STL, LF-STL의 측정치 추정 오차 (등속도 사용자)  
Fig. 6. Measurements estimation errors of LQG-STL and LF-STL (constant velocity user).

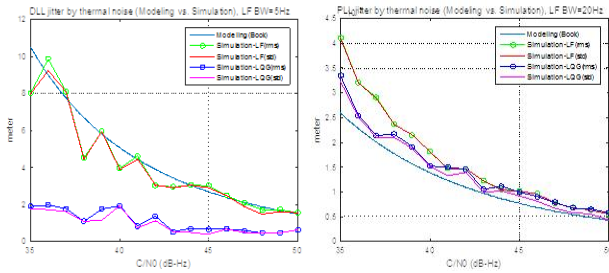


그림 7. LQG-STL, LF-STL의 측정치 추정 오차 (원운동 사용자)  
**Fig. 7.** Measurements estimation errors of LQG-STL and LF-STL (circular user).

그림 5의 세 개의 그래프는 각각 의사거리, 반송파 위상, 도플러의 추정 오차 그래프를 나타낸 것이며  $C/N_0$  값을 35~50 dB-Hz로 바꾸어가며 그래프를 그린 것이다. 의사거리와 반송파 위상 그래프에 나타나 있는 하늘색 실선은 루프 필터의 이론적인 측정치 추정 오차를 나타낸 것이며[11], 루프 필터의 대역폭은 의사거리의 경우 5 Hz, 반송파 위상의 경우 20 Hz이다. 빨간색 선과 초록색 선은 LF-STL의 측정치 추정 오차의 표준편차와 제곱평균제곱근 (RMS; root mean square) 값을 나타낸 것이다. 마찬가지로 보라색 선과 파란색 선은 LQG-STL의 측정치 추정 오차의 표준편차와 RMS 값을 나타낸 것이다.

그림 6과 7에서는 각각 의사거리, 반송파 위상의 추정 오차 그래프만 나타냈으며 도플러 추정 오차 그래프는 정지 사용자에서의 그래프와 거의 일치했기 때문에 생략하였다.

다양한 사용자 동적 환경에서 특히 낮은  $C/N_0$  값에서 의사거리와 도플러의 추정 오차가 크게 낮아진 것을 확인할 수 있으며 의사거리 추정 오차의 경우 정적 사용자는 35 dB-Hz 기준 81%, 등속도, 원운동 사용자의 경우 63% 감소하였다. 도플러 추정 오차의 경우 모든 동적 환경에서 35 dB-Hz 기준 84% 감소함을 확인하였다. 반송파 위상의 경우 루프 필터에 비해 LQG의 성능이 약간 좋아지거나 비슷한 수준임을 확인할 수 있는데 이는 반송파 위상 추정 오차 수준이 루프 필터의 결과와 비슷하도록 LQG 튜닝을 맞추었기 때문이다.

### 3-3 LQG-VTL 시뮬레이션

#### 1) 정확도 분석

LQG-VTL 시뮬레이션은 가장 간단한 경우인 의사거리만을 측정치, 위치를 상태변수로 하는 시뮬레이션에서 출발하여 측정치와 상태변수를 하나씩 추가해보면서 최종적으로 측정치로 의사거리, 반송파 위상, 도플러를 사용하고 상태변수로 위치, 속도, 시계오차를 가질 때의 시뮬레이션까지 진행해보았다. 단계별로 시뮬레이션을 진행하여 각 측정치 또는 상태변수가 추가되었을 때 어떤 효과가 있는지 살펴보았다.

그림 8~그림 11에 단계별 시뮬레이션 결과로 위치/속도 추정 오차와 측정치 추정 오차 그래프를 나타내었다. 이 때 사용자는 정지 사용자이다.

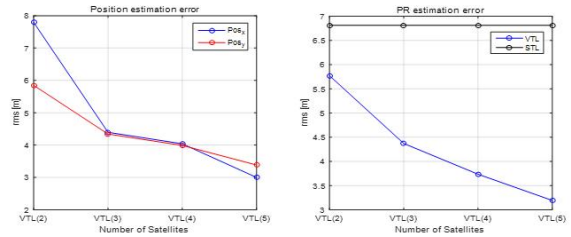


그림 8. LQG-VTL의 상태변수, 측정치 추정 오차 (상태변수 : 위치 / 측정치 :  $\rho$ )  
**Fig. 8.** State and measurement estimation error of LQG-VTL (State : position / measurement :  $\rho$ ).

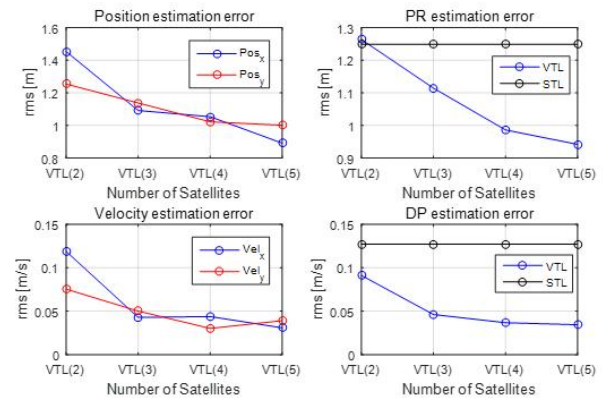


그림 9. LQG-VTL의 상태변수, 측정치 추정 오차 (상태변수 : 위치, 속도 / 측정치 :  $\rho, \phi$ )  
**Fig. 9.** State and measurements estimation errors of LQG-VTL (State : position, velocity / measurement :  $\rho, \phi$ ).

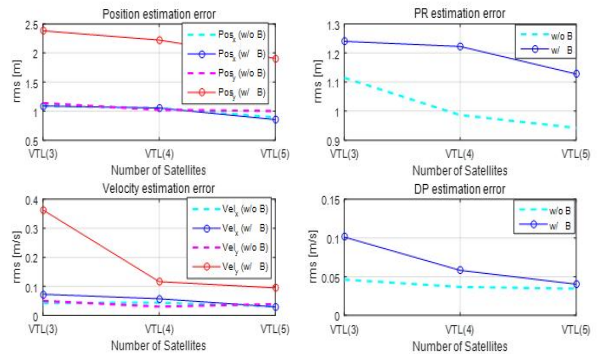


그림 10. LQG-VTL의 상태변수, 측정치 추정 오차 (상태변수 : 위치, 속도, 시계오차 / 측정치 :  $\rho, \phi$ )  
**Fig. 10.** State and measurements estimation errors of LQG-VTL (State : position, velocity, clock bias / measurement :  $\rho, \phi$ ).

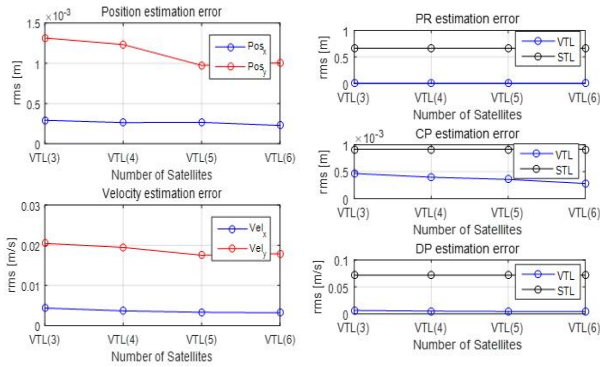


그림 11. LQG-VTL의 상태변수, 측정치 추정 오차 (상태변수 : 위치, 속도, 시계오차 / 측정치 :  $\rho, \phi, \dot{\phi}$ )  
 Fig. 11. State and measurements estimation errors of LQG-VTL (State : position, velocity, clock bias / measurement :  $\rho, \phi, \dot{\phi}$ ).

그림 8은 측정치로 의사거리, 상태변수로 사용자 위치만 사용한 가장 간단한 시뮬레이션의 결과이다. x축은 위성 개수를 나타내며 왼쪽은 위치 추정 오차 결과, 오른쪽은 의사거리 추정 오차 결과이다. 의사거리 추정 오차 그래프에서 검은색 선으로 표현된 것은 LQG-STL에서의 측정치 추정 오차 결과이다. STL에서는 위성의 개수가 늘어나도 측정치 추정 오차 성능의 개선이 없기 때문에 직선으로 표현되며, VTL에서는 위성 개수가 증가할수록 위치, 측정치 성능이 향상되는 모습을 확인할 수 있다.

그림 9는 측정치로 의사거리, 도플러를 사용하고 상태변수로 사용자 위치, 속도를 사용한 경우로 측정치와 상태변수에 속도 항이 추가된 경우이다. 역시 위성 개수가 증가할수록 성능이 대체적으로 향상되는 모습을 확인할 수 있다. 위성이 2개인 경우는 STL과 VTL의 측정치 오차 수준이 비슷하데 이는 LQG-VTL 튜닝이 LQG-STL 튜닝을 바탕으로 이루어졌기 때문이다.

그림 10은 측정치로 의사거리, 도플러를 사용하고 상태변수로 사용자 위치, 속도, 시계 오차를 사용한 경우로 그림 9와 비교했을 때 시계 오차 항이 추가된 경우이다. 그림 9에서 살펴보았던 시계 오차가 없는 경우는 점선으로 표기하였고, 시계 오차가 추가된 결과를 실선과 점으로 표기하였다. 시계 오차가 추가되면서 측정치 추정 오차가 약간 상승한 것을 확인할 수 있는데, 이는 그림 4에서 확인할 수 있는 것처럼 위성 배치가 +y 방향으로 몰려있는 위성의 기하학적 배치에 의한 결과이다.

그림 11은 그림 10에서 측정치로 반송파 위상까지 사용한 결과이다. 이 때, 각 위성별 미지정수는 알고 있다고 가정하고 반송파 위상 측정치를 사용하였다. 왼쪽의 두 개의 그래프는 위치, 속도의 추정 오차 그래프이며 오른쪽의 세 개의 그래프는 순서대로 의사거리, 반송파 위상, 도플러의 추정 오차 그래프이다. 오른쪽의 측정치 추정 오차 그래프에서 STL에 비해 VTL

성능이 크게 향상된 것을 확인할 수 있다. VTL에서는 측정치를 통해 먼저 사용자 위치/속도 해를 추정하고 이를 바탕으로 다시 측정치를 추정하게 되는데, 그 때 위치에서 측정치로 변환해주는 H행렬의 의사거리와 반송파 위상의 성분이 같아 잡음 수준이 훨씬 작은 반송파 위상 수준으로 의사거리도 같이 추정되기 때문이다. 그리고 VTL에서 위성 개수가 증가할수록 위치/속도, 측정치 추정 오차가 줄어드는 경향도 확인할 수 있다.

2) 강건성 분석

LQG-VTL의 강건성 분석을 위해 시뮬레이션 시간 10초 중, 3~7초에만 한 위성의  $C/N_0$  값을 30 dB-Hz로 낮추어보았다. GPS 수신기 내부의 1 ms 적분 시간에서 30 dB-Hz는 노이즈와 신호 세기 비율이 1:1로, 신호가 없는 환경과 마찬가지로의 신호 세기이다. 위성 개수는 총 4개이며, 측정치로는 의사거리와 도플러, 상태변수로는 위치, 속도, 시계오차를 사용하였다. 시뮬레이션 결과는 일반적인 LF-STL과 비교하였다.

시뮬레이션 결과를 그림 12에 표현하였으며 왼쪽 위의 그림은 신호 감쇄가 일어난 1번 위성의 시간에 따른  $C/N_0$  값을 나타낸 것이다. 오른쪽 위의 그림은 의사거리, 도플러의 추정 오차 결과이며 파란색 선으로 표현된 LF-STL은 신호 감쇄 상황에서 발산하고 신호가 7초 이후 45 dB-Hz로 회복되어도 지속적으로 발산하는 반면, 빨간색 선으로 표현된 LQG-VTL은 신호 감쇄 상황에서도 측정치를 잘 추정함을 확인할 수 있다. 아래의 두 그래프는 각각 위치, 속도 추정 오차를 나타낸 그래프이며 역시 빨간색으로 표현된 LQG-VTL의 결과가 LF-STL과 달리 발산하지 않고 수렴함을 확인할 수 있다.

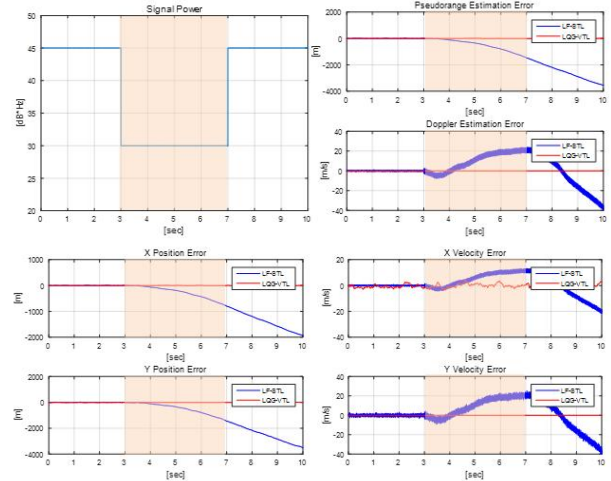


그림 12. 순간적 신호 단절 상황에서의 LQG-VTL과 LF-STL의 비교

Fig. 12. LQG-VTL and LF-STL simulation results in case of temporal signal power reduction.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 LQG-VTL을 적용한 GPS 수신기의 신호 추적 루프의 성능을 정확성, 강건성 관점에서 살펴보았다. 성능 분석을 위해 2차원 시뮬레이션 틀을 개발하여 다양한 조건에서 시뮬레이션을 진행하였다. LQG-VTL의 정확성 향상을 살펴보기 위해, 먼저 일반적인 LF-STL와 LQG-STL의 측정치 추정 정확도를 비교하여 LQG 제어기의 성능이 35dB-Hz 기준 의사거리 는 약 60%, 도플러는 약 80% 추정 오차가 감소함을 확인하였 다. 다음으로 LQG-VTL과 LQG-STL의 위치/속도, 측정치 정확 도를 비교하였다. 의사거리 측정치, 위치 상태변수 시뮬레이션 과 측정치와 상태변수에 속도 항을 추가한 시뮬레이션에서는 LQG-VTL이 LQG-STL에 비해 측정치 추정 오차가 감소하고, 위성 개수가 증가할수록 위치/속도, 측정치 추정 오차가 감소함 을 확인하였다. 시계 오차를 상태 변수로 추가한 경우 위성 배 치 영향을 받는 것을 확인하였으며, 측정치로 반송파 위상을 추 가한 경우 반송파 위상 잡음 수준으로 의사거리 또한 추정되는 것을 확인하였다. 마지막으로 일시적 신호 감쇄 상황에서 LF-STL 대비 LQG-VTL에서 위치/속도, 측정치 추정이 발산하 지 않고 수렴함을 보였다.

#### 감사의 글

연구는 서울대학교 정밀기계설계공동연구소를 통해 계약된 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 국방위성항법특화 연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다.

#### 참고 문헌

[1] B. W. Parkinson and J. J. Spilker Jr., *Global Positioning System : Theory and Applications Volume I*, 1<sup>st</sup> ed. Cambridge, MA: AIAA, 1996.

[2] P. Misra and P. Enge, *Global Positioning Systems – Signals, Measurements and Performance*, 2<sup>nd</sup> ed. Lincoln, MA: Ganga-Jamuna Press, 2006.

[3] C. W. Kim, A study on Modeling GNSS Receiver Tracking Loop and its Application to LQG Based Vector Tracking Algorithm, Ph D. dissertation, Seoul National University, Seoul, Korea, 2016.

[4] G. I. Jee, S. H. Im and B. H. Lee, “Optimal code and carrier tracking loop design for galileo BOC(1,1),” in *ION GNSS 20<sup>th</sup> International Technical Meeting of the Satellite Division*, Fort Worth: TX, pp. 759-768, 2007.

[5] S. H. Jeon, C. W. Kim, G. H. Kim, O. J. Kim and C. D. Kee, “Optimal signal tracking algorithm for GNSS signal using moving set-point LQG system,” *International Journal of Control, Automation, and Systems*, Vol. 11, No. 6, pp. 1214~1222, 2013.

[6] M. Petovello, M. Lashley, and D. M. Bevil, “What are vector tracking loops, and what are their benefits and drawbacks?,” *GNSS Solutions, Inside GNSS*, pp. 16~21, May/June 2009.

[7] M. Lashley, Modeling and Performance Analysis of GPS Vector Tracking Algorithms, Ph D. dissertation, Auburn University, Auburn, AL, 2009.

[8] G. F. Franklin, J. D. Powell and A. Emami-Naeini, *Feedback Control of Dynamic Systems*, 6<sup>th</sup> ed, Upper Saddle River, NJ: Pearson, 2010.

[9] J. P. Hespanha, “LQR/LQG controller design,” Lecture Notes, University of California, Santa Barbara, CA, 2007.

[10] A. E. Bryson, Jr., *Control of Spacecraft and Aircraft*, 1<sup>st</sup> ed. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1994

[11] E. D. Kaplan, C. J. Hegarty, *Understanding GPS Principles and Applications*, 2<sup>nd</sup> ed. Norwood, MA: Artech House, 2006.



**박민혁 (Min-Huck Park)**

2015년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부 (공학사)  
 2015년 3월 ~ 현재 : 서울대학교 대학원 기계항공공학부 석사과정  
 ※관심분야 : GNSS 수신기 알고리즘



**전 상 훈 (Sang-Hoon Jeon)**

2004년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부 (공학사)  
 2012년 8월 : 서울대학교 기계항공공학부 (공학박사)  
 2016년 3월 ~ 현재 : 서울대학교 BK 계약조교수  
 ※ 관심분야 : GNSS 수신기 알고리즘, Software defined radio, 실내항법



**김 종 원 (Chong-Won Kim)**

2008년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부 (공학사)  
 2010년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부 (공학석사)  
 2016년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부 (공학박사)  
 2016년 3월 ~ 현재 : SK텔레콤 종합기술원  
 ※ 관심분야 : GNSS 수신기 알고리즘, 실내항법, 의사위성



**기 창 돈 (Chang-Don Kee)**

1984년 2월 : 서울대학교 항공공학과 (공학사)  
 1986년 2월 : 서울대학교 항공공학과 (공학석사)  
 1994년 1월 : 미국 스탠포드대학교 항공우주공학과 (공학박사)  
 1996년 9월 ~ 현재 : 서울대학교 기계항공공학부 교수  
 ※ 관심분야 : 위성항법시스템, 보정위성항법시스템, 광역보정위성항법시스템, 초정밀위치결정시스템,  
 우주비행체 자세결정, 무인항공기 자동제어 시스템, 실내용 자동항법시스템, 항공교통관제시스템



**서 승 우 (Seung-Woo Seo)**

2008년 2월 : 고려대학교 전기전자전파공학과 (공학사)  
 2010년 2월 : 고려대학교 전자전기공학과 (공학석사)  
 2010년 3월 ~ 현재 : 국방과학연구소 3본부 4부 선임연구원  
 ※ 관심분야 : 위성항법시스템, 보정위성항법시스템, 광역보정위성항법시스템, 의사위성항법시스템



**장 재 규 (Jae-Gyu Jang)**

1999년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부 (공학사),  
 2006년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부 (공학박사),  
 2009년 12월 ~ 2013년 5월 : 엘지전자 MC연구소 책임연구원  
 2013년 6월 ~ 현재 : 국방과학연구소 선임연구원  
 ※ 관심분야 : 위성항법시스템, 광역보정위성항법시스템, 항재밍장치

2001년 2월 : 서울대학교 항공공학과 (공학석사)  
 2007년 10월 ~ 2009년 11월 : 독일 뮌헨 국방대학교 연구원



**소 형 민 (Hyung-Min So)**

2001년 2월 : 고려대학교 기계공학과 (공학사)  
 2003년 9월 : 서울대학교 기계항공공학부 (공학석사)  
 2009년 9월 : 서울대학교 기계항공공학부 (공학박사)  
 2011년 1월 ~ 현재 : 국방과학연구소 선임연구원  
 ※ 관심분야 : 위성항법시스템, 광역보강시스템, 위성항법수신기



**박 준 표 (Jun-Pyo Park)**

1990년 2월 : 부산대학교 기계설계공학과 (공학사)  
 1992년 2월 : 부산대학교 기계설계공학과 (공학석사)  
 2015년 2월 : 충남대학교 항공우주공학과 (공학박사)  
 1992년 3월 ~ 현재 : 국방과학연구소 3본부 4부 책임연구원  
 ※ 관심분야 : 위성항법시스템, 보정위성항법시스템, 광역보정위성항법시스템, 의사위성항법시스템