

위성항법장치의 재밍대응 성능향상 검증을 위한 관성항법장치 모의 장치 설계

Design of INS Simulated Equipment for Evaluation of Enhanced Jamming Resistance of INS-aided GPS Receivers

정준우^{1*} · 박성열¹ · 안병선¹ · 강행익¹ · 김갑진² · 박영범²

¹LIG넥스원 핵심기술연구소

²국방과학연구소 3-4

Junwoo Jung^{1*} · Sungyeol Park¹ · Byoung-Sun Ahn¹ · Haeng-Ik Kang¹ · Kap Jin Kim² · Youngbum Park²

¹Core Technology R&D Laboratory, LIG Nex1, Gyeonggi-do, 16911, Korea

²The Third R&D Institute - 4, Agency for Defense Development(ADD), Daejeon, 34186, Korea

[요 약]

본 논문에서는 위성항법장치와 관성항법장치가 장착된 항체의 고속 이동을 모의하는 환경에서 재밍신호가 인가되었을 때, INS-aided 알고리즘이 장착된 위성항법장치의 재밍대응 성능향상을 검증하기 위한 관성항법장치 모의 장치의 설계 방안을 제시한다. 위성항법 시뮬레이터와 연동하여 관성데이터를 제공할 수 있는 고가의 관성항법장치 시뮬레이터를 대체하기 위해 상대적으로 낮은 가격으로 제작할 수 있는 관성항법장치 모의 장치 설계 방안을 제시하였다. 제안한 설계를 기반으로 제작한 모의 장치를 이용하여 INS-aided 알고리즘이 장착된 위성항법장치의 재밍대응 성능을 검증하기 위해 항체의 고속 이동 환경을 모의한 시험 환경을 구축하였다. 모의 시험을 통해 GPS L1 C/A와 L2C 항법신호에 인가되는 협대역/광대역의 재밍신호에 대응하여 INS-aided 알고리즘 미 적용 시와 대비하여 기존 문헌에서 분석한 +5 dB의 재밍대응 성능 향상이 가능함을 확인하였다. 모의 시험 결과를 통해 본 논문에서 설계하여 제작한 관성항법장치 모의 장치가 재밍대응 성능향상 검증을 위한 관성데이터 주입이 가능함을 검증할 수 있었다.

[Abstract]

We propose the design of an INS simulated equipment to evaluate the enhanced jamming resistance of an INS-aided GPS receiver with INS, when a jamming signal is injected into a simulated high dynamic platform. We propose the design of a relative cheap INS simulated equipment, instead of an expensive INS simulator connected to GPS simulators. Based on the design, we implement the equipment and setup high dynamic test environment using the equipment to evaluate an INS-aided GPS receiver. In the GPS L1 C/A and L2C simulations that inject jamming signals of the narrow and wide bandwidth into the GPS receiver with and without INS-aided algorithm, we obtain increased jamming resistance performance as +5 dB compared with the GPS receiver without INS-aided algorithm in all kinds of jamming bandwidth. Based on the simulations, we verified that the INS simulated equipment can be used to evaluate the enhanced jamming resistance of INS-aided GPS receivers.

Key words : GPS/INS integration, INS simulated equipment, INS-aided algorithm, Jamming resistance, Anti-jamming.

<https://doi.org/10.12673/jant.2017.21.4.339>



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 14 July 2016; Revised 20 July 2017

Accepted (Publication) 22 August 2017 (30 August 2017)

*Corresponding Author; Junwoo Jung

Tel: +82-31-8026-4598

E-mail: junwoo.jung@lignex1.com

1. 서론

위성항법시스템(GPS; global positioning system)은 사용자에게 정확한 위치를 제공할 수 있어 세계적으로 널리 사용되고 있다 [1]. 지상, 항공, 해상 플랫폼 등의 항체에 장착하여 GPS로부터 항법 신호를 수신하는 위성항법장치(GPS receiver)는 L1, L2 등의 다중 대역의 위성 항법신호를 동시에 수신하여 항체의 정확한 위치정보를 제공한다. 현재 이러한 위성항법장치의 추적 성능향상 및 획득시간을 줄이기 위해 외부 정보로서 관성항법장치(INS; inertial navigation system)를 이용하는 방법이 다양하게 연구되고 있다 [1]-[3].

위성항법장치의 추적/획득시간 또는 재밍대응 성능향상을 위해 관성항법장치 정보를 이용한 INS-aided 알고리즘 연구는 사용하는 정보와 결합 구조의 차이로 분류하였을 때 크게 2가지로 나뉜다 [3]. 관성항법장치에서 제공하는 위치, 속도, 자세 정보를 이용하여 알고리즘이 동작하는 약결합(loosely coupled) 방식, 관성항법장치에서 제공하는 위치, 속도, 자세 정보와 위성항법장치에서 추정된 도플러(doppler), 의사거리(PSR; pseudorange), 정보를 결합하여 이용하는 강결합(tightly coupled) 방식으로 분류된다.

최근 관성항법장치 연동을 통한 위성항법장치의 재밍대응 성능 향상에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 성능 향상과 관련하여 다양한 조건에서의 분석이 이루어졌다. 논문 [4]의 연구에서는 협대역/광대역 재밍에 대한 INS-aided 알고리즘 적용으로 인한 재밍 대역폭 및 CNR(carrier-to-noise ratio) 변화에 따른 반송파 위상 잡음 특성을 분석하였다. 논문 [5]의 연구에서는 재밍신호가 존재하는 환경에서 INS-aided 알고리즘을 적용한 경우 CNR에 있어서 4~5dB 이득이 있음을 실험을 통해 획득하였다. 상기 연구들과 같이, 위성항법장치에 INS-aided 알고리즘을 적용하기 위해서거나 위치 및 자세와 같은 관성항법 데이터 사용을 위해 관성항법 데이터 주입을 모의하기 위한 다양한 접근 방법이 연구되고 있다. 논문 [6]의 연구에서는 소프트웨어로 구성된 관성항법장치 모의 프로그램을 통해 정지된 환경에서의 관성항법 데이터를 위성항법장치에 주입함으로써, INS-aided 알고리즘을 통한 재밍대응 성능 향상이 가능함을 검증하였다. 논문 [7]의 연구에서는 저가의 모의 관성항법 데이터 주입 장치를 설계 및 제작하여 위성항법장치와의 연동을 수행하였으나, 위성항법장치의 빔포밍 기능을 동작시키기 위한 단순 시간, 위치, 속도 및 자세 정보 주입을 하는 단계에 그쳤다.

본 논문에서는 항체의 음속 이상 급의 동적 특성을 모의하여 이동하는 환경에서 재밍신호가 인가되었을 때, 약결합 방식 결합 구조에서 INS-aided 알고리즘이 장착된 위성항법장치의 재밍대응 성능향상을 검증하기 위한 관성항법장치 모의 장치의 설계 및 구현 방안을 제시한다. 현재 위성항법 시뮬레이터와 연동하여 위치, 속도, 자세의 관성데이터를 제공할 수 있는 관성항법장치 시뮬레이터 또는 모의 장치는 고가로 판매되는 실정이다. 본 논문에서는 상대적으로 낮은 가격으로 제작할 수 있는 관성항법장치 모의 장치 설계 방안을 제시하고, 이를 이용하여

위성항법장치의 INS-aided 알고리즘을 검증할 수 있는 방법을 제안하고 있다. 또한 본 논문의 설계를 통해 제작한 관성항법장치 모의 장치를 이용한 재밍신호 인가 및 항체의 동적 이동 환경의 구축 방안을 제시함으로써, 저가의 관성항법장치 모의 장치를 통해 INS-aided 알고리즘이 적용된 위성항법장치의 재밍대응 성능 향상을 검증하는 방법을 제시한다. 현재 GPS 위성신호 중 항법이 가능한 GPS L1 C/A(coarse/acquisition)와 GPS L2C(civil) 항법 신호에 인가되는 재밍신호에 대해 향상된 재밍대응 성능을 검증 시험한 결과를 제시한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장 본문에서는 본 논문에서 제안하는 INS-aided 알고리즘의 재밍대응 성능 향상을 검증할 수 있는 관성항법장치 모의 장치에 대한 상세 설계 및 구조를 설명한다. III 장 모의 시험 환경 및 결과 분석에서는 관성항법장치 모의 장치와 연동하여 재밍성능 향상 검증을 할 수 있는 모의 시험 환경 구성과 시험 결과를 제시 및 분석한다. IV장에서는 결론을 맺고 본 논문을 정리한다.

II. 제안하는 관성항법장치 모의 장치 설계

본 장에서는 위성항법장치에서 재밍대응 성능 향상을 위한 INS-aided 알고리즘 결합 구조들 중 가장 대표적인 약결합 방식 기반 INS-aided 알고리즘을 검증하기 위해 제안하는 관성항법장치 모의 장치 상세 설계 및 구조를 기술한다.

2-1 재밍대응 성능 향상을 위한 INS-aided 알고리즘 동작구조

위성항법장치에서 관성항법장치 정보를 이용한 INS-aided 알고리즘 연구는 사용하는 정보와 결합 구조의 차이로 분류하였을 때 크게 2가지로 나뉜다. 그 중 약결합 방식 기반의 INS-aided 알고리즘 동작 구조는 관성항법장치의 위치, 속도, 자세 정보를 이용하여 위성항법 알고리즘의 성능을 향상시키는 방식이다. 관성항법장치에서 제공받는 위치, 속도, 자세 정보는 위성항법장치의 수신감도 성능향상과 수신 알고리즘의 반송파 추적 루프 동작 시 항체의 동적 특성으로 인해 발생하는 도플러 주파수 정보를 추정할 수 있어 위성항법장치의 신호획득 성능을 향상시킬 수 있는 장점이 있다. 그림 1은 약결합 방식

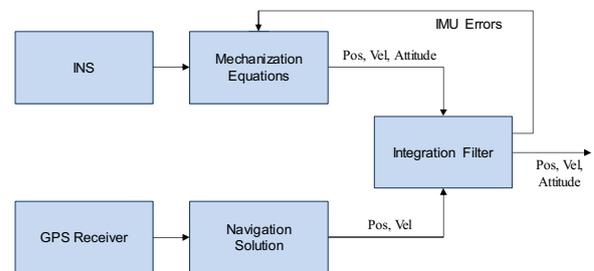


그림 1. 약결합 방식 기반 INS-aided 알고리즘 동작 구조.
Fig. 1. Loosely coupled INS-aided algorithm structure.

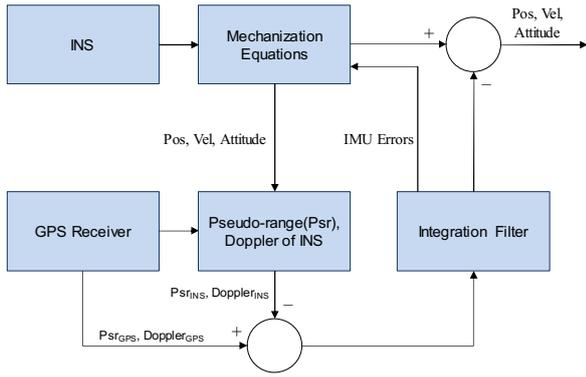


그림 2. 강결합 방식 기반 INS-aided 알고리즘 동작 구조.
Fig. 2. Tightly coupled INS-aided algorithm structure.

기반 INS-aided 알고리즘이 동작하는 구조를 보여주고 있다.

그림 2에서는 위성항법장치에서 추정된 도플러, 의사거리 등의 정보와 관성항법장치에서 수신한 위치, 속도, 자세의 외부 정보를 결합한 Kalman 필터를 수행하여 성능을 향상시키는 강결합 방식 기반 INS-aided 알고리즘 동작 구조를 보여주고 있다. 그림 2에서 설명하고 있는 강결합 방식은 약결합 방식 보다 더 높은 위성항법장치의 성능향상을 가지고 올 수 있다. 하지만 구현방식이 복잡하고, 관성항법장치 혹은 위성항법장치에서 정확한 정보를 제공하지 못할 경우, 항법해를 구하지 못하고 발산할 확률이 급격하게 증가하게 되는 단점이 있다 [2].

본 논문은 약결합 방식 기반 INS-aided 알고리즘이 장착된 위성항법장치와의 연동이 가능한 저가의 관성항법장치 모의 장치를 설계함으로써 고속으로 기동 중인 환경에서 INS-aided 알고리즘에 의한 재밍대응 성능 향상을 검증할 수 있는 방법을 제공하는데 목적이 있다. 위성항법장치와 관성항법장치 간 연동에 관련된 구조는 일반적으로 관성항법장치로부터 수신한 상대적으로 정밀하게 추정된 항체의 도플러 천이 값을 위성항법장치의 반송파 추적 루프에 결합하는데서 기존 반송파 추적 루프와 차별점이 존재한다 [2]. 관성항법장치에서부터 수신된

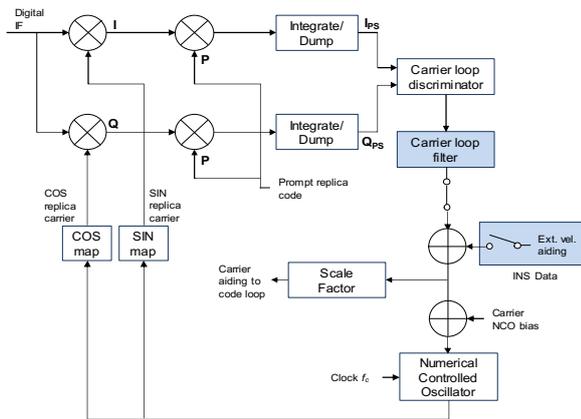


그림 3. INS-aided 알고리즘이 적용된 반송파 추적 루프.
Fig. 3. Carrier tracking loop including INS-aided algorithm.

도플러 정보는 관성항법장치와 위성항법장치를 탑재한 항체의 고속 기동으로 인한 도플러 주파수의 천이 성분을 제거할 수 있게 함으로써 위성항법장치의 반송파 추적 루프의 추적 대역폭을 줄이는데 기여한다. 이러한 항체의 동적 기동 환경에서는 시간에 따른 변화폭이 큰 주파수 천이로 인해 반송파 추적 범위를 늘릴 수밖에 없다. 하지만 관성항법장치와의 결합을 통해 항체의 동적 특성을 위성항법장치 단독 운용일 때 보다 상대적으로 정밀하게 추정함으로써 고속으로 기동하는 환경에서도 더 낮은 신호레벨까지 위성신호 추적이 가능하여 협대역/광대역 재밍에 대한 재밍대응 성능 향상이 가능하다.

그림 3은 본 논문에서 설계한 관성항법장치 모의 장치에서 수신한 관성데이터의 속도 정보를 이용하여 INS-aided 알고리즘이 동작하는 위성항법장치의 반송파 추적 루프 구조를 보여주고 있다 [1].

그림 3의 반송파 루프 필터(carrier loop filter)의 출력, $f_{carrier}$ 은 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$f_{carrier} = f_{Doppler} + f_{clk} + f_{noise} + f_{IF} \quad (1)$$

여기서 $f_{Doppler}$ 와 f_{clock} 은 각각 도플러 주파수와 수신기와 위성 클럭 오차의 주파수 성분을 의미한다. f_{noise} 와 f_{IF} 는 저크를 포함한 열잡음의 주파수 성분과 중간 주파수(IF; intermediate frequency)를 의미한다. $f_{carrier}$ 를 결정하는 요인들 중 f_{IF} 는 위성항법장치 설계에 따라 결정되는 값이다. 따라서 위성항법장치의 반송파 주파수는 $f_{Doppler}, f_{clock}, f_{noise}$ 로 이루어진 3개의 주요 요인들로 결정된다.

식 (1)의 Hz 단위의 도플러 주파수, $f_{Doppler}$ 는 시선속도와 파장의 길이로 다음과 같이 결정된다 [8].

$$f_{Doppler} = -\frac{v_r}{\lambda} \quad (2)$$

여기서 λ 는 m 단위로 표현되는 위성항법장치의 반송파 파장을 의미한다. v_r 은 LOS(line-of-sight) 벡터에 투영된 항법위성과 수신기 안테나 사이의 상대속도를 m/sec 단위로 표현한 시선속도를 의미하고, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$v_r = (v_{sat} - v_{rcv}) \times \cos\theta \quad (3)$$

$$= (v_{sat} - v_{rcv}) \times \frac{\begin{pmatrix} x_{sat} - x_{rcv} \\ y_{sat} - y_{rcv} \\ z_{sat} - z_{rcv} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_{sat} - x_{rcv} \\ y_{sat} - y_{rcv} \\ z_{sat} - z_{rcv} \end{pmatrix}}{\rho_{sat-rcv}}$$

여기서 v_{sat} 은 위성의 속도, v_{rcv} 는 수신기 안테나의 속도를 의미한다. $x_{sat}, y_{sat}, z_{sat}$ 은 위성위치를 ECEF(earth-centered-earth-fixed) 좌표계의 x, y, z축에서의 위치를 m 단위로 표시한 값이다. $x_{rcv}, y_{rcv}, z_{rcv}$ 는 수신기 안테나의 위치를 ECEF 좌표계의 x, y, z축에서의 위치를 m 단위로 표시한 값이며, $\rho_{sat-rcv}$ 는 항법위성과 수신기 안테나의 기하학적 거리를 m 단위로 표시한 값이다.

식 (1)에서의 항법위성과 수신기에서 발생하는 주파수 성분의 클럭 오차, f_{clk} 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$f_{clk} = \frac{V_{clk}}{\lambda} = \frac{(e_{sat} - e_{rcv}) \times c}{\lambda} \quad (4)$$

여기서 e_{sat} 과 e_{rcv} 는 항법위성과 수신기의 클럭 오차를 의미하며, c 는 빛의 속도를 의미하며, 2.99792458×10^8 m/sec의 값을 갖는다. 따라서 클럭 오차 성분, f_{clk} 은 e_{sat} 과 e_{rcv} 에 의해 결정된다. 각 성분 값은 항법위성에서 전송하는 궤도정보를 통해 e_{sat} 을 얻을 수 있으며 수신기의 항법해 연산을 통해 추정된 e_{rcv} 를 얻을 수 있다. 결과적으로 f_{clk} 은 수신한 항법위성들의 궤도정보와 항법해 연산 수행을 통해 측정과 추정 가능하다.

2-2 동적 재밍대응 성능 향상을 위해 제안하는 관성항법장치 모의 장치 구조

본 논문에서는 앞서 설명한 INS-aided 알고리즘이 동작하는 위성항법장치에 관성데이터 정보를 모의하여 주입할 수 있는 관성항법장치 모의 장치 구성 및 설계 방안을 제안한다. 관성항법장치 모의 장치를 통해 주입받는 관성데이터를 이용하여 위성항법장치는 재밍대응 성능을 향상시킬 수 있다. 관성데이터 중 속도 정보를 도플러 주파수로 변환하여 반송파 추적 루프에 적용하면, 추정 도플러의 오차의 특성이 항체의 동적 특성보다 좋다고 가정할 경우, 도플러 정보를 통해 반송파 추적 루프의 대역폭을 줄일 수 있다. 추정 도플러 정보는 항체의 속도와 위성의 ECEF 좌표계의 x, y, z축 좌표를 이용하여 구할 수 있으며, 이 도플러 정보는 DCO(digital controlled oscillator) 단위로 변환하여 추적 루프에 적용한다. 정확한 도플러 추정 값일 경우, 항체의 움직임으로 인해 발생하는 도플러 천이로 인한 추적 루프 필터의 시간 축 바이어스는 0에 근접한 값이 된다. 추적 루프 대역폭을 줄이면 추적할 수 있는 위성신호의 임계값은 더 낮아질 수 있으며 이로 인해 재밍대응 성능을 향상시킬 수 있다[4].

제안하는 관성항법장치 모의 장치 시스템 구조는 그림 4와 같다. 앞서 설명한 바와 같이 재밍대응 성능을 향상시키기 위해

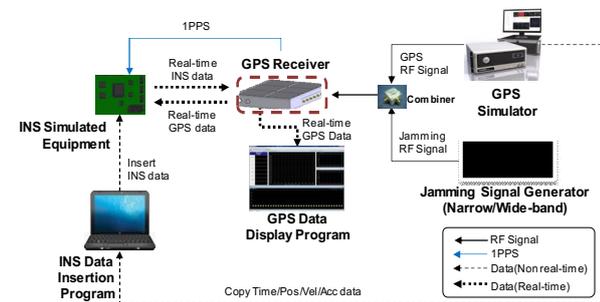


그림 4. INS-aided 위성항법장치의 재밍대응 성능 향상을 위한 관성항법장치 모의 장치 연동 시스템 구조.

Fig. 4. INS simulated equipment system for enhancement jamming resistance of INS-aided GPS receiver.

서는 약결합 방식 기반 INS-aided 알고리즘이 동작하는 위성항법장치에 시간, 위치, 속도 등의 관성데이터를 관성항법장치 모의 장치에서 제공하여야 한다. 관성항법장치 모의 장치에서 관성데이터를 실시간으로 제공하기 위해서 위성항법 시뮬레이터에서 파일로 제공하는 GPS 시간 기준의 위치, 속도, 가속도 데이터를 관성데이터 주입 프로그램을 통해 관성항법장치 모의 장치에 주입한다. 플래시 메모리에 사전 주입된 관성데이터는 위성항법장치가 수신하는 위성항법 시뮬레이터의 RF신호에 동기화를 맞춰 송신하는 항법데이터와 1PPS(pulse-per-second) 시각동기 정보를 사용하여 GPS 시간 동기를 맞춘 관성데이터로써 실시간 위성항법장치에 제공한다. 이와 동시에 재밍대응 성능을 분석하기 위해 재밍신호 발생기를 설치하여 신호결합기를 통해 재밍신호와 위성항법 시뮬레이터에서 송신하는 항법신호를 동시에 인가할 수 있도록 시스템을 구성하였다. 위성항법장치를 RF신호로 인가되는 항법신호와 재밍신호를 동시에 수신하고 관성항법장치 모의 장치에서 수신한 관성데이터를 이용하여 INS-aided 알고리즘으로 얻어진 재밍대응 성능 향상을 항법데이터 출력 프로그램을 통해 확인할 수 있다.

관성항법장치 모의 장치의 GPS 시간 동기 구조는 그림 5와 같다. 위성항법장치는 위성항법 시뮬레이터에서 RF신호로 수신한 항법신호를 이용하여 획득한 GPS 시간동기로 1PPS 신호를 관성항법장치 모의 장치로 송신한다. 1PPS 신호의 정확도는 GPS 신호 수신환경이 좋은 기준에서 60nsec 이내의 정확도를 가진다 [9]. 또한 위성항법장치는 1PPS 신호와 함께 GPS 시간 정보를 포함한 항법데이터를 관성항법장치 모의 장치로 1 Hz 주기로 송신한다. 일반적으로 항법데이터는 데이터 전송이기 때문에 msec 단위의 수신 시간을 필요로 하며, 이로 인해 관성항법장치 모의 장치는 첫 번째 1PPS 신호를 수신하는 시점에 해당 1PPS 신호의 GPS 시간 정보를 획득할 수 없다. 따라서 첫 번째 1PPS 신호를 관성데이터 송신 트리거로 삼고 이어 수신되는 항법데이터의 GPS 시간 정보를 활용하여 사전에 플래시 메모리에 주입된 시간, 위치, 속도, 가속도 데이터에서 동일 시간 데이터를 검색하여 다음 GPS 시간의 데이터를 다음에 수신한 1PPS 신호 시점에 INS-aided 알고리즘이 동작하는 위성항법장치로 송신한다.

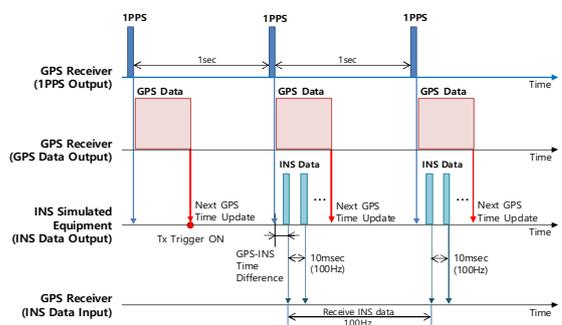


그림 5. 관성항법장치 모의 장치의 GPS 시간 동기 구조. Fig. 5. GPS time synchronization structure of INS simulated equipment.

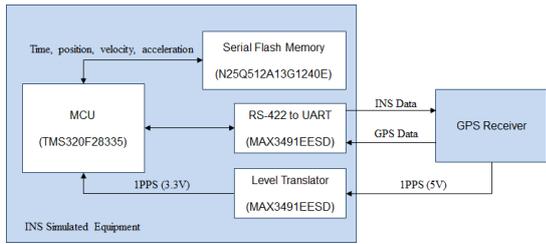


그림 6. 관성항법장치 모의 장치 설계 구조.
Fig. 6. INS simulated equipment design architecture.

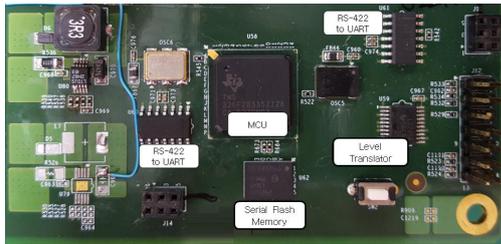


그림 7. 관성항법장치 모의 장치 제작 하드웨어.
Fig. 7. Implemented hardware of INS simulated equipment.

관성항법장치 모의 장치의 설계 구조는 그림 6과 같고, 설계 구조를 기반으로 제작한 관성항법장치 모의 장치 하드웨어 구성은 그림 7과 같다. 설계한 관성항법장치 모의 장치는 MCU(micro-controlled unit)와 직렬 플래시 메모리, RS-422 to UART(universal asynchronous receiver transmitter) 칩, 레벨 변환기 등으로 구성되어 있다 [7].

관성항법장치 모의 장치에 실장된 MCU는 150 MHz 클럭속도로 동작하며, 외부 인터럽트 및 UART 통신 인터페이스를 제공한다. 플래시 메모리는 64 Mbyte의 저장용량을 제공하며, 이는 관성데이터를 100 Hz 속도로 전송할 경우 최대 8시간 분량의 데이터를 저장할 수 있다. 위성항법장치로부터 입력받은 1PPS 신호는 레벨 변환기를 통해 MCU가 입력받을 수 있는 전압레벨로 변환되어, 외부 인터럽트를 통해 MCU로 입력되고 1PPS와 동기를 맞추어 관성데이터를 위성항법장치로 전송한다. RS-422 to UART칩은 RS-422 타입의 위성항법 정보를 UART 신호로 변환하여 MCU로 전송하는 기능과 MCU에서 출력된 UART 신호를 RS-422 타입으로 변환하여 위성항법장치로 송출하는 기능을 수행한다.

그림 8은 오실로스코프를 이용한 관성데이터 송신 주기 및

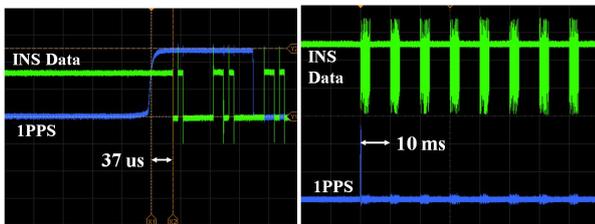


그림 8. 관성데이터 송신주기 및 GPS-INS 간 시각오차 측정결과.
Fig. 8. Test results of INS data transmission period and GPS-INS time difference.

GPS-INS간 시각오차 측정결과이다. 모의 장치에서 송신하는 관성데이터의 GPS-INS간 시각오차가 작을수록 INS-Aided 알고리즘 내 오차가 줄어들게 된다. 그림 8의 오른쪽에서 파란선은 1PPS 출력신호를 보여주고 있으며, 녹색선은 위성항법장치로 전송되는 100 Hz 관성데이터이다. 측정된 GPS-INS간 시각오차는 37 μ sec이며, 이는 일반 관성항법장치의 GPS 시간 기준 시각오차 보다 매우 작은 값이다. GPS-INS간 시각오차 만큼의 항체 이동속도에 비례하는 속도 오차를 포함하는 관성데이터가 위성항법장치로 주입되어 INS-aided 알고리즘이 동작한다.

관성항법장치 모의 장치에서 송신하는 위치, 속도 등의 관성데이터는 위성항법장치와 상대적으로 정확한 시간동기가 맞춰졌기 때문에, 위성항법 시뮬레이터 송신하는 RF신호에서 포함한 항체의 도플러 정보를 추정할 수 있어, 고가의 관성항법장치 시뮬레이터 없이도 위성항법장치에 장착된 INS-aided 알고리즘을 검증할 수 있다. 따라서 본 논문에서 제안하는 관성항법장치 모의 장치를 이용하면 관성항법장치와 연동하여 획득할 수 있는 INS-aided 알고리즘의 재밍대응 성능 검증이 가능하다.

III. 모의 시험환경 및 시험결과

제안하는 관성항법장치 모의 장치를 검증하기 위한 시험 구성은 II장에서 설명한 시스템 구조와 동일한 환경을 구성하여 시험하였다. 모의 시험환경의 실 구성도는 그림 9와 같다. 위성항법 시뮬레이터는 Spirent사의 GSS7790를 사용하였다. 위성항법장치에 재밍인가 환경 하의 위성항법 상황을 모사하기 위해, 재밍신호 발생기의 재밍신호와 위성항법 시뮬레이터의 항법 위성신호를 결합하여 INS-aided 알고리즘이 장착된 위성항법장치로 주입하도록 구성하였다. 위성항법 시뮬레이터를 구동하여 항법 위성신호를 위성항법장치에 인가하면, 위성항법장치가 항법 수행을 시작하면서 실시간 항법데이터와 1PPS를 관성항법장치 모의 장치에 전달하고 관성항법장치 모의 장치가 실시간 항법데이터를 분석하여 해당 시간과 일치하는 실시간 관성데이터를 위성항법장치로 전송하게 된다.

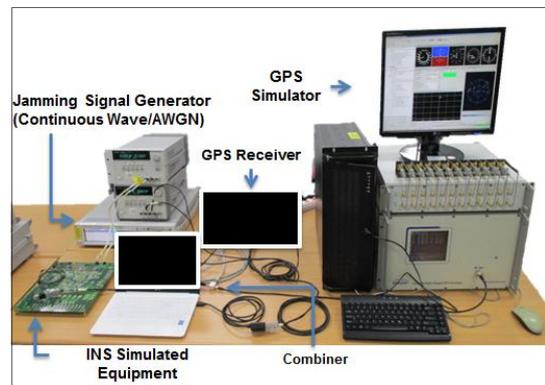


그림 9. 모의시험 환경 구성.
Fig. 9. Test environment setup.

표 1. 관성항법장치 모의 장치를 활용한 위성항법장치의 재밍대응 성능향상 검증 시험 조건.

Table 1. Test evaluation parameters of GPS receiver jamming resistance using INS simulated equipment.

Parameters		Values
Motion Scenario	Max. Speed	510 m/sec
	Max. Height	15,000 ft
	Max. Jerk	6.5 G/sec
Jamming Signal	Center Frequency	GPS L1 : 1575.42 MHz, GPS L2 : 1227.60 MHz
	Bandwidth	1 Hz(CW), 10 kHz, 2 MHz
	Modulation	Continuous Wave(CW), AWGN
	Type	AWGN
GPS Signal	Received Power, SP_{GPS}	GPS L1 C/A : -125 dBm GPS L2C : -125 dBm

상기 시험환경에서 설정한 시험 조건은 표 1과 같다. 위성항법 시뮬레이터에서 제공하는 항체의 동적 조건 및 재밍대응 성능을 검증하기 위한 재밍신호 조건과 GPS L1/L2 대역에 대한 위성신호 조건을 표 1을 통해 설명하였다. 항체의 동적 특성으로 인해 위성항법장치의 추적 루프 상 도플러 천이가 충분히 발생할 수 있는 조건에서 시험하기 위해 최대 발생 가능한 저크를 6.5 G/sec으로 설정하였으며 이동속도는 최대 510 m/sec까지 증가할 수 있도록 환경을 구성하였다. 재밍신호는 GPS L1/L2 대역에 대해 발생하도록 주파수를 설정하였으며 협대역/광대역 재밍신호에 대한 INS-aided 알고리즘으로 인한 재밍대응 성능향상을 검증하기 위해 CW(continuous wave), 10 kHz AWGN, 2 MHz AWGN 신호를 인가하였다. 재밍대응 성능을 측정하기 위한 GPS 위성신호의 신호세기는 GPS L1 C/A와 L2C 항법신호 모두 -125 dBm으로 모든 위성의 신호세기를 고정하였다. 표 1 조건의 이동궤적을 적용한 시나리오의 수평위치, 속도, 및 저크의 변화에 대한 그래프는 그림 10에서 제시하였다.

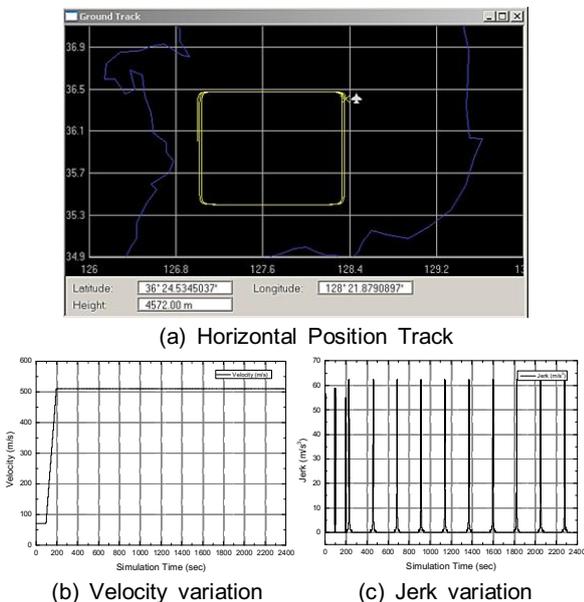


그림 10. 모의 시나리오 이동궤적 수평위치, 속도, 및 저크 변화.
Fig. 10. Horizontal Position, velocity, and jerk variations of motion in a simulation scenario.

그림 10과 같은 궤적으로 이동하는 모의 시험환경에서 관성항법장치 모의 장치는 고속으로 이동하는 항체의 관성데이터를 실시간으로 주입하여 위성항법장치 내 항체의 도플러 천이 성분을 제거하여 위성신호의 추적 성능을 높여줌으로써 재밍대응 성능을 향상시킬 수 있다. 재밍대응 성능을 검증하기 위해 본 논문에서는 두 가지 성능 지표를 사용하여 위성항법장치의 재밍대응 성능시험 결과를 분석하였다. 첫 번째는 INS-aided 알고리즘이 동작하는 위성항법장치의 수신한 위성신호 대비 재밍대응 성능을 표현하기 위해 J/S_{total} 을 정의하였고, 다음과 같이 표현할 수 있다 [1].

$$J/S_{total} = JP_{INS-aided} - SP_{GPS} \tag{5}$$

여기에서 $JP_{INS-aided}$ 는 재밍신호에 대응하여 4개 이상의 위성을 정상 추적하여 항법을 유지한 3D-fix 항법 기준 최대 재밍신호 세기이며, SP_{GPS} 는 위성항법장치의 수신 기준 위성신호 세기이고, 각 신호 세기의 단위는 dBm으로 표시한다.

위성항법장치의 재밍대응 성능을 검증하기 위한 두 번째 성능 지표로써 INS-aided 알고리즘이 동작하는 위성항법장치와 알고리즘이 배제된 위성항법장치 간 성능 차이를 표현하는 $+J/S$ 를 정의하였고, 다음과 같이 표현할 수 있다 [6].

$$+J/S = J/S_{total} - J/S_{rev} \tag{6}$$

여기에서 J/S_{rev} 는 INS-aided 알고리즘이 동작하지 않는 일반 위성항법장치의 수신한 위성신호 대비 재밍대응 성능을 dB로 표현한 값이다.

본 논문에서는 상기 두 가지 재밍대응 성능 지표를 이용하여 재밍대응 성능시험을 수행하였고, 표 2와 표 3과 같이 각각 J/S_{total} 과 $+J/S$ 성능을 얻을 수 있었다. 표 2의 결과에서와 같이 GPS L1 C/A 항법신호 대역에서 CW 재밍신호에 대해 위성항법장치가 최대로 항법을 유지한 재밍신호 세기는 -86 dBm이며 이를 J/S_{total} 로 계산하면 $-86 \text{ dBm} - (-125 \text{ dBm}) = 39 \text{ dB}$ 로 계산된다. 이와 동일한 방법을 사용하여 GPS L1 C/A와 L2C 항법신호에 대해 CW, 10 kHz AWGN, 2 MHz AWGN 재밍신호를 인가한 시험 조건에서의 J/S_{total} 을 제시하였다. 표 2에서 제시한 시험 결과를 분석하면 동일한 위성신호 세기를 인가하는 기준에서 GPS L1 C/A와 L2C 항법신호는 [1]의 기준에서 동일한 Quality Factor를 가짐에 따라 입력하는 재밍신호 종류에 따라 유사한 재밍대응 성능을 따라가고 있음을 확인할 수 있다. 표 3에서는 INS-aided 알고리즘을 적용하지 않은 위성항법장치의 재밍대응 성능인 J/S_{rev} 를 측정하여 표 2에서 제시한 J/S_{total} 값과의 차분값을 표시한 $+J/S$ 성능을 제시하였다. GPS L1 C/A와 L2C 항법신호에 대해 CW, 10 kHz AWGN, 2 MHz AWGN 재밍신호를 인가한 시험 조건에서 $+J/S$ 는 모든 조건에서 동일하게 +5 dB의 이득을 얻은 것을 확인할 수 있었다. 표 3에서 제시한 시험결과는 [2]에서 제시한 INS-aided 알고리즘을 이용하여 획득 가능한 최대 재밍대응 성능인 4~5 dB 성능과 유사한 결과

표 2. 관성항법장치 모의 장치를 활용한 INS-aided 위성항법장치 수신 위성신호 대비 재밍대응 성능, J/S_{total} 시험 결과.

Table 2. Test results in J/S_{total} of an INS-aided GPS receiver using the INS simulated equipment.

GPS Signal	CW		100kHz AWGN		2MHz AWGN	
	$J/P_{INS-aided}$	J/S_{total}	$J/P_{INS-aided}$	J/S_{total}	$J/P_{INS-aided}$	J/S_{total}
GPS L1 C/A	-86 dBm	39 dB	-90 dBm	35 dB	-89 dBm	36 dB
GPS L2C	-87 dBm	38 dB	-89 dBm	36 dB	-88 dBm	37 dB

표 3. 관성항법장치 모의 장치를 활용한 위성항법장치 INS-aided 알고리즘 동작 전/후 $+J/S$ 시험 결과.

Table 3. Test results in $+J/S$ with and without INS-aided algorithm of a GPS receiver using the INS simulated equipment.

GPS Signal	CW	100kHz AWGN	2MHz AWGN
	$+J/S$	$+J/S$	$+J/S$
GPS L1 C/A	+5 dB	+5 dB	+5 dB
GPS L2C	+5 dB	+5 dB	+5 dB

를 획득한 것을 확인할 수 있었다. 상기 결과를 기준으로 분석한 결과, 고속으로 기동하는 환경을 모의한 모의 시험환경에서 관성항법장치 모의 장치를 활용하여 INS-aided 알고리즘이 장착된 위성항법장치의 재밍대응 성능 향상을 검증할 수 있음을 검증하였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 항체의 고속 이동을 모의하는 환경에서 재밍 신호가 인가되었을 때, 약결합 방식 결합 구조에서 INS-aided 알고리즘이 장착된 위성항법장치의 재밍대응 성능향상을 검증하기 위한 관성항법장치 모의 장치의 설계 및 구현 방안을 제시하였다. 본 논문에서는 상대적으로 낮은 가격으로 제작할 수 있는 관성항법장치 모의 장치 설계 방안을 제시하였고, 설계를 기반하여 제작한 모의 장치를 이용하여 INS-aided 알고리즘이 장착된 위성항법장치의 재밍대응 성능을 검증하는 방안을 제시하고 모의 시험결과를 통해 검증하였다. 또한 재밍대응 성능을 검증하는 방안으로 재밍신호 인가 및 항체의 동적 이동 환경의 구축 방안을 제시하였다. 현재 GPS 위성 신호 중 항법이 가능한 GPS L1 C/A와 L2C 항법신호에 인가되는 협대역/광대역의 CW, 10 kHz AWGN, 2 MHz AWGN의 재밍신호에 대응하여 고속 기동하는 환경에서도 관성항법장치 모의 장치를 활용하여 INS-aided 알고리즘을 적용한 위성항법장치의 향상된 재밍대응 성능을 검증 시험한 결과를 제시하고 분석하였다.

위성항법장치에서 관성데이터를 수신하여 재밍대응 성능을 향상시키는 INS-aided 알고리즘은 GPS L1 C/A와 GPS L2C를 수신하는 위성항법장치에만 한정되지 않고 다른 종류의 항법 신호를 수신하는 위성항법장치에도 적용이 가능하다. 국내에서 GPS 다음으로 많이 사용하는 GLONASS(global navigation

satellite system) L1 C/A 신호를 수신하는 위성항법장치와 관성항법장치 모의 장치를 연동하여 GLONASS L1 C/A 재밍대응 성능을 향상시키는 모의시험을 통해 관성항법장치 모의 장치의 검증 대상 범위를 넓힐 수 있는 연구를 진행할 예정이다.

Acknowledgments

본 연구는 2014년 핵심기술과제 GPS 복합재밍 능동대응 장치에 관련된 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

References

- [1] Elliott D. Kaplan and Christopher J. Hegarty, Understanding GPS: Principles and Applications, 2nd ed. Artech House Publishers, 1996.
- [2] S. Alban, D. M. Akos, S. M. Rock, and D. Gebre-Egziabher, "Performance analysis and architectures for INS-aided GPS tracking loops," in Proc. ION National Technical Meeting(ION-NTM), Anaheim, CA, pp. 241-250, Jan. 2003.
- [3] G. Falco, M. Pini, and G. Marucco, "Loose and tight GNSS/INS integrations: comparison of performance assessed in real urban scenarios," Sensors, vol. 17. no. 2, pp. 1-25, Feb. 2017.
- [4] T. Y. Chiou, "GPS receiver performance using inertial-aided carrier tracking loop," in Proc. ION Intl. Technical Meeting of the Satellite Division, Long Beach, CA, pp. 2895-2910, Sep. 2005.
- [5] D. Gebre-Egziabher, A. Razavi, P. Enge, J. Gautier, D. Akos, S. Pullen, and B. Pervan, "Doppler aided tracking loops for SRPS integrity monitoring," in Proc. ION Intl. Technical Meeting of Satellite Division, Portland, OR, pp. 2562-2571, Sep. 2003.
- [6] J. Jung, S. W. Jo, G. Yang, S. Park, C. H. Lee, H. Kang, and K. J. Kim, "Testing and simulation of inertial navigation system(INS) simulation software for verification of INS-aided GNSS systems," in Proc. ISGNSS 2014, Jeju, Korea, pp. 885-895, Oct. 2014.
- [7] S. Park, J. Jung, H. H. Won, S. W. Cho, and B. Ahn, "Development of inertial navigation information transmitting system for high dynamic scenarios," in Proc. KGS 2016, Jeju, Korea, pp. 430-433, Nov. 2016.
- [8] M. D. Agostino, A. Manzano, and G. Marucco, "Doppler measurement integration for kinematic real-time GPS positioning," Applied Geomatics, Springer, pp. 144-162, 2010.
- [9] LEA-6 Data Sheet, GPS.G6-HW-09004, Nov. 2014.



정 준 우 (Junwoo Jung)

2005년 2월 : 아주대학교 정보 및 컴퓨터공학과 학사
2007년 2월 : 아주대학교 정보통신전문대학원 정보통신공학과 석사
2012년 2월 : 아주대학교 정보통신전문대학원 정보통신공학과 박사
2012년 1월 ~ 현재 : LIG넥스원 수석연구원
※관심분야 : 위성항법, 보정항법, 무선통신, 항재밍/항기만 알고리즘



박 성 열 (Sungyeol Park)

2013년 2월 : 한양대학교 전자및통신공학 학사
2012년 10월 ~ 현재 : LIG넥스원 선임연구원
※관심분야 : 위성항법, 통신시스템



안 병 선 (Byoung-Sun Ahn)

2002년 2월 : 중앙대학교 전자전기공학부 학사
2004년 2월 : 중앙대학교 전자전기공학부 대학원 석사
2008년 5월 ~ 현재 : LIG넥스원 수석연구원
※관심분야 : Digital Beam-forming, Adaptive Process



강 행 익 (Haeng-ik Kang)

1996년 2월 : 연세대학교 전기공학과 학사
1998년 8월 : 연세대학교 전기공학과 대학원 석사
2008년 3월 ~ 현재 : LIG넥스원 수석연구원
※관심분야 : 위성항법, 항재밍, 유무선 통신



김 갑 진 (Kap Jin Kim)

1995년 2월 : 한양대학교 제어계측공학과 학사
1997년 7월 : 한양대학교 제어계측공학과 석사
2001년 7월 ~ 현재 : 국방과학연구소 책임연구원
※관심분야 : 위성항법, Navigation Warfare



박 영 범 (Youngbum Park)

1999년 2월 : 경북대학교 전자전기공학부 학사
2001년 2월 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 석사
2017년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부 박사
2001년 3월 ~ 현재 : 국방과학연구소 선임연구원
※관심분야 : 위성항법, 복합항법