

A Study on Effective Satellite Selection Method for Multi-Constellation GNSS

Taek Geun Lee, Yu Dam Lee, Hyung Keun Lee[†]



Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

A Study on Effective Satellite Selection Method for Multi-Constellation GNSS

Taek Geun Lee, Yu Dam Lee, Hyung Keun Lee[†]

Department of Electronics and Information Engineering, Korea Aerospace University, Gyeonggi-do 10540, Korea

ABSTRACT

In this paper, we propose an efficient satellite selection method for multi-constellation GNSS. The number of visible satellites has increased dramatically recently due to multi-constellation GNSS. By the increased availability, the overall GNSS performance can be improved. Whereas, due to the increase of the number of visible satellites, the computational burden in implementing advanced processing such as integer ambiguity resolution and fault detection can be increased considerably. As widely known, the optimal satellite selection method requires very large computational burden and its real-time implementation is practically impossible. To reduce computational burden, several sub-optimal but efficient satellite selection methods have been proposed recently. However, these methods are prone to the local optimum problem and do not fully utilize the information redundancy between different constellation systems. To solve this problem, the proposed method utilizes the inter-system biases and geometric assignments. As a result, the proposed method can be implemented in real-time, avoids the local optimum problem, and does not exclude any single-satellite constellation. The performance of the proposed method is compared with the optimal method and two popular sub-optimal methods by a simulation and an experiment.

Keywords: multi-GNSS, satellite selection, dilution of precision, inter-system bias

1. 서론

자율주행 시스템, 무인 이동체, 스마트폰 등 다양한 산업 분야에서 정확한 위치정보의 활용이 필수적으로 요구된다. 전역 위성항법시스템 (GNSS, Global Navigation Satellite System)은 지구 전역 어디에서도 사용자의 위치를 편리하게 제공할 수 있는 방법이며, 현재 운용되고 있는 대표적인 전역 위성항법시스템으로는 미국의 Global Positioning System (GPS), 중국의 BeiDou Navigation Satellite System (BDS), 러시아의 GLObal NAVigation Satellite System (GLONASS), 유럽연합의 Galileo 등을 들 수 있다. 또한 지구 전역은 아니지만 특정한 지역 내에 위치한 사용자를 대상으로 한 지역 위성항법시스템 (RNSS,

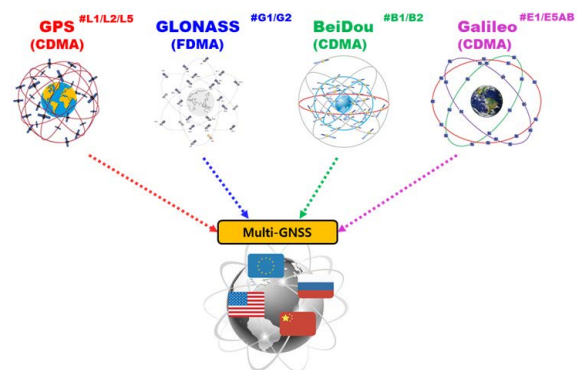


Fig. 1. Multi-constellation GNSS including GPS, GLONASS, BDS, Galileo.

Received Nov 22, 2022 Revised Dec 07, 2022 Accepted Dec 10, 2022

[†]Corresponding Author

E-mail: hyknlee@kau.ac.kr

Tel: +82-2-300-0131 Fax: +82-02-3158-5769

Taek Geun Lee <https://orcid.org/0000-0002-2330-2859>

Yu Dam Lee <https://orcid.org/0000-0003-2044-922X>

Hyung Keun Lee <https://orcid.org/0000-0001--5210-1557>

Regional Navigation Satellite System)으로는 일본의 Quasi-Zenith Satellite System (QZSS)와 인도의 IRNSS가 운용 중에 있다. 우리나라에서는 2035년 운용을 목표로 지역 위성항법시스템인 Korean Positioning System (KPS)를 개발할 계획이다 (Kim et al. 2020, Joo & Heo 2020, Jeong et al. 2021).

현재 많은 분야에서 높은 위치 정확도를 확보하기 위해 GPS만

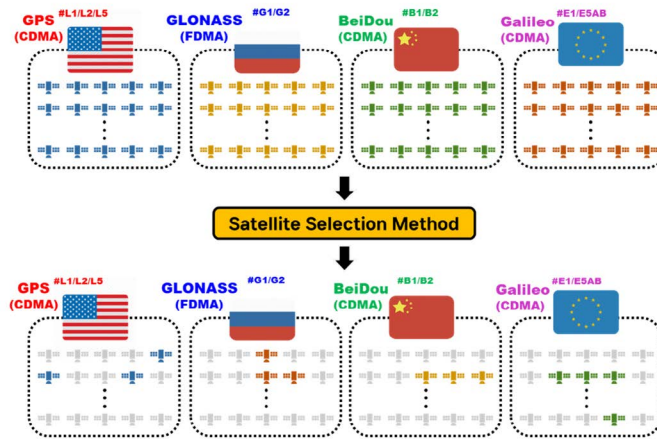


Fig. 2. Overview of satellite selection method in the multi-constellation GNSS.

을 단독으로 활용하는 단일 위성항법시스템 대신에 Fig. 1과 같이 다중 위성항법시스템 (Multi-GNSS, Multi-Constellation GNSS)을 활용하고 있다. 고가의 GNSS 수신기는 고성능 연산장치를 활용하므로 다중 위성군을 활용하여 높은 가용성 (availability)으로 단일 위성군을 활용했을 때 보다 더 높은 정확도의 위치 정보를 사용자에게 제공할 수 있다. 반면, 저가형 GNSS 수신기에서 다중 위성항법시스템을 활용하는 것은 저가 연산장치의 제약으로 인해 수신기의 연산량 부담을 고려해야 한다. 이와 같은 연산량의 부담은 특히 미지정수 결정이나 고장 검출 및 분리화 같은 전문적인 기능을 수행할 때 더 크게 제한요인이 될 수 있다. 일반적으로 위치 정확도는 가시위성 수 뿐만 아니라 위성의 기하학적 배치에 크게 영향을 받는다 (Chi et al. 2019). 이를 위하여 Fig. 2와 같이 가시위성 중 위성 개수를 제한하여 위치 정확도 성능 개선을 유지하며 연산량을 감소시킬 수 있도록 위성 조합을 선별하는 연구가 최근에 활발히 진행 중이다.

최적 위성 조합을 선별 하기 위해 위성 배치의 최소 경계에 대한 연구가 선행되었다 (Swaszek et al. 2016, 2017). 다중 위성법시스템을 활용하게 되면서 선별 위성 수에 따라 활용된 위성군, 위성의 양각에 대한 Dilution of Precision (DOP)의 최소 경계 (lower bound)를 정의하고 이를 바탕으로 최적 위성 배치에 대한 연구가 선행되었다. 최적 위성 배치 형태에 대한 기존 연구를 통해 천정영역에서 선별 위성 수의 30%가 배치되고 수평영역에서 70%가 배치되었을 때 최적 위성 배치의 형태임을 밝혀졌다. 최적 위성 조합을 선별 하기위해 무차별 검색 방법으로 불리는 'Brute-force'를 활용하여 모든 가시위성에 대해 선별 위성 수에 대한 모든 가능한 조합을 검색하여 최적 위성 조합을 선별한다. 그러나 선별 위성 개수와 가시위성 수에 따라 조합 수가 대폭 증가하여 검색 과정에서 소요되는 연산량이 매우 크다 (Gerbeth et al. 2016).

이후 최적 위성 선별 기법의 연산량 문제를 해결하기 위하여 다양한 방법으로 준 최적 위성 선별 기법에 대한 선행 연구가 진행되었다. 준 최적 위성 선별 기법은 일반적으로 준 최적 해답을 찾기 위해 활용되는 탐욕 알고리즘 (greedy algorithms)을 활용한다 (Liu et al. 2009). 탐욕 알고리즘을 활용함으로써 최적 위성 선별 기법의 연산량 문제를 해결할 수 있지만 매 단계에 해당하는

최적 위성 배치만 고려한 알고리즘이기 때문에 선별 종료 후 선별 위성 조합의 위성 배치가 가시위성에 대한 전역 최적 위성 배치를 보장할 수 없는 지역 최적 위성조합 선별에 빠질 위험을 내포하고 있다.

위성 선별에 있어서 연산량을 대폭 감소시키기 위하여 위치 오차 공분산 행렬을 활용하여 반복적인 선별 과정을 반복하는 Downdate 방법과 Direct Satellite Selection Method (DSSM)이 추가로 연구되었다 (Walter et al. 2016).

앞서 설명된 선행 연구들을 기반으로 본 논문에서는 다중 위성 항법군에서 적용할 수 있는 기하학적 배치를 고려한 위성 선별 기법을 소개한다. 제안된 기법은 직접적으로 양각과 방위각을 동시에 고려하면서 균등하게 분포된 위성들을 선별하여 기존 기법에서 발생하는 지역 최적 위성조합 선별 문제를 회피하고 연산량을 감소시킬 수 있는 장점을 가진다. 또한 다중 위성항법시스템 환경에서 기존의 위성 선별 기법에 발생할 위험성이 있는 다중성 부족 문제를 해결하기 위해서 위성군간 시스템 바이어스 (ISB, Inter-System Bias)를 고려하는 위성 선별 전략을 제안하였다. 위성군간 시스템 바이어스를 고려함으로써 기존 위성 선별 기법에 있어서 선별 위성조합 내 위성군별 한 개의 가시위성만 선별 되어 발생하는 Geometric Dilution of Precision (GDOP) 성능 저하 문제를 해결할 수 있게 된다.

본 논문은 다음과 같이 구성되었다. 2장에서는 기존의 준 최적 위성 선별 기법에 대하여 소개한다. 3장에서는 제안된 위성 선별 기법을 설명하고, 4장에서는 위성 선별 전략에 대해 설명한다. 5장에서는 시뮬레이션과 실제 획득된 데이터를 활용한 실험을 통하여 하여 기존 기법과 제안된 기법을 비교 분석하고, 6장에서 결론을 맺는다.

2. 기존의 위성 선별 기법

2.1 탐욕 알고리즘 기반의 준 최적 위성 선별 기법

탐욕 알고리즘은 다양한 분야에서 연산량을 감소시키고 최적 해와 유사한 준 최적 해를 획득하기 위해 널리 활용되고 있다. 반

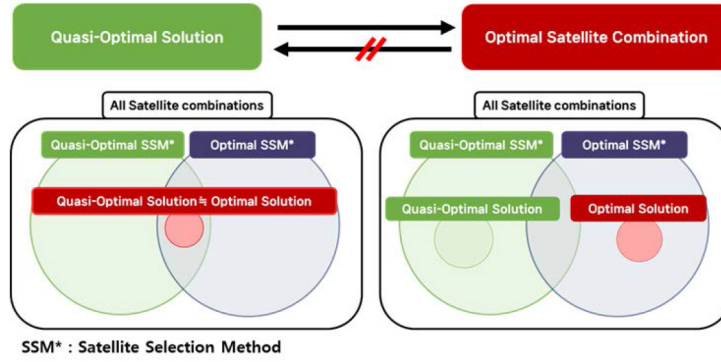


Fig. 3. Quasi-optimal solution problem occurring in the greedy algorithm.

면, 탐욕 알고리즘을 통해 획득한 해는 Fig. 3에 도시된 바와 같이 지역 최적 해 (local optimal solution)이기 때문에 모든 경우에 대한 최적 해를 보장할 수 없는 단점을 내포하고 있다.

탐욕 알고리즘은 위성 배치를 고려하기 위해 GDOP를 항법 성능 지표로 위성을 선별 하게 된다 (Liu et al. 2009). 이는 가시위성에서 임의의 위성 한 개를 제거하였을 경우에 대한 모든 조합을 검색하고 GDOP를 산출한다. 단계적으로 가장 낮은 GDOP를 가지는 조합을 선별하여 가시위성 중 한 개의 위성을 제거하는 방법으로 설정한 선별 위성 수로 감소할 때까지 위 과정을 반복한다.

탐욕 알고리즘은 검색하는 조합 수를 감소시키므로 최적 위성 선별 기법에서 발생하는 연산량 문제를 해결한다. 최적 위성 선별 기법의 검색 조합 수와 탐욕 알고리즘 기반 준 최적 위성 선별 기법의 검색 조합 수는 식 (1)과 (2)로 나타난다.

$$N_{Opt} = {}_n C_k = \frac{n!}{(n-k)!k!} \quad (1)$$

$$N_{Quasi-Opt} = \frac{1}{2}[n(n+1) - k(k+1)] \quad (2)$$

여기서, n 는 가시위성 수, k 는 선별 위성 수, N_{Opt} 는 최적 위성 선별 기법의 검색 조합 수, $N_{Quasi-Opt}$ 는 탐욕 알고리즘 기반 준 최적 위성 선별 기법의 검색 조합 수이다.

예시로서 가시위성 수가 33개이고 선별 위성 수가 10개인 경우를 고려하면, 최적 위성 선별 기법의 검색 조합 수는 92,561,040개이며 탐욕 알고리즘 기반의 준 최적 위성 선별 기법의 경우 506개가 되어 연산량이 매우 크게 감소한 것을 확인할 수 있다.

2.2 위치 오차 공분산 기반 위성 선별 기법

SBAS의 경우에는 Minimum Operational Performance Standards를 통해 사용자 수신기에 필요한 최소 위성 채널 수를 지정하는 방법을 소개하고 있다. SBAS는 높은 가용성을 확보하기 위해 탐욕 알고리즘 기반의 위성 선별 기법으로서 Dnupdate 방법을 제안하였다 (Walter et al. 2016). Dnupdate 방법은 선별 지표를 보호수준 (protection level)으로 활용하였다. 이를 토대로 GDOP를 고려하기 위해 선별 지표를 GDOP로 고려한 DSSM이 제안되었다 (Chi et al. 2019). 식 (3-5)는 Dnupdate 방법에서 활

용되는 식이다.

$$C = (G^T \cdot W \cdot G)^{-1} \quad (3)$$

$$S = (G^T \cdot W \cdot G)^{-1} \cdot G^T \cdot W \quad (4)$$

$$P = W - W \cdot G \cdot (G^T \cdot W \cdot G)^{-1} \cdot G^T \cdot W \quad (5)$$

여기서, C 는 위치 공분산 행렬, G 는 ENU 좌표계로 나타낸 관측 행렬, W 는 가중치 행렬이다.

탐욕 알고리즘 기반으로 설계된 Dnupdate 방법은 다수의 다른 탐욕 알고리즘에 활용되는 중 임의의 위성을 제거한 조합을 검색하는 반복과정을 간소화 하기 위해 위치 공분산 행렬을 활용하여 식 (6)으로 나타낸다.

$$C_{(i)} = C + \frac{S_i \cdot S_i^T}{P_{i,i}} \quad (6)$$

여기서, $C_{(i)}$ 는 i 번째 위성이 제거된 위치 공분산 행렬을 나타낸다. 우측 항의 두번째 값은 위치 오차 공분산 값을 변화시키는 요소이다. 따라서 Dnupdate 방법의 경우 보호수준에 대하여 S 와 P 를 활용하여 식 (7)과 같이 표현하였다.

$$\frac{1}{4} HPL + VPL \cong \frac{\frac{1}{4}(s_{1,i}^2 + s_{2,i}^2) + s_{3,i}^2}{P_{i,i}} \quad (7)$$

여기서, Horizontal Protection Level (HPL)은 수평 보호수준을 의미하고 Vertical Protection Level (VPL)은 수직 보호수준을 의미한다. Dnupdate 방법의 경우 Protection Level에 대해 내림차순으로 정렬하여 위성 조합 검색 과정 없이 위성을 선별한다.

Dnupdate 방법을 기반으로 추가 연구된 DSSM은 위치 공분산 행렬을 활용하여 선별 지표를 식 (8)과 같이 정의하였다 (Chi et al. 2019).

$$GDOP \cong \frac{C_{GDOP}^{(i)}}{\left(\sum_{j=1}^{L+3} s_{j,i}^2 \right)} / P_{i,i} \quad (8)$$

DSSM의 경우, 식 (8)과 같이 S 와 P 에 대한 행렬을 통해 i 번째 위성이 제거되었을 경우의 남은 위성에 대한 GDOP 성능을 구할 수 있다. 탐욕 알고리즘 기반 준 최적 위성 선별 기법과 같이 단계 별로 위치 공분산 행렬에 대한 조건 판별을 통해 준 최적 위성 선별 기법보다 빠르게 선별한다.

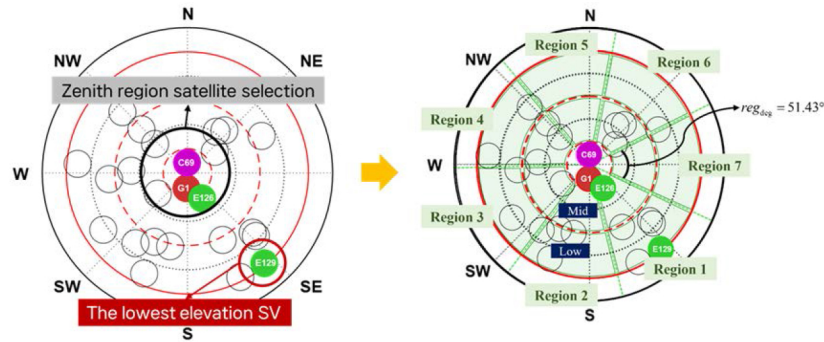


Fig. 4. An illustrative example of the transition from the second step (left plot) to the third step (right plot) of the proposed satellite selection method.

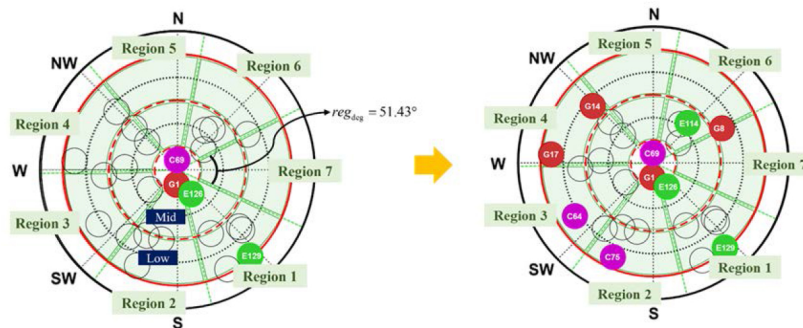


Fig. 5. An illustrative example of the transition from the third step (left plot) to the fourth step (right plot) of the proposed satellite selection method.

3. 기하학적 배치를 고려한 위성 선별 기법

제안된 위성 선별 기법은 크게는 기하학적 배치를 고려한 위성 선별 기법에 해당된다. 직접적으로 기하학적 배치를 고려하는 위성 선별 기법은 최적 위성 배치의 최소 형태를 고려하기 위해 사용자의 수평 방위를 여러 영역으로 분할하여 직접적으로 위성 배치를 고려하는 기법이다.

양각 만을 활용한 기존의 기하학적 배치 기법에 비하여 제안된 기법은 가시위성의 양각과 방위각을 동시에 활용하는 특징을 가진다. 양각은 저위도 영역을 $15^{\circ} \sim 45^{\circ}$, 중위도 영역을 $45^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 로 설정한다. 이에 덧붙여 방위각을 여러 영역으로 균등 분할한 후에 최적 위성 배치를 위한 최소 경계 형태에 맞게 위성 조합을 선별 하는 기법이다. 이와 같은 과정을 통하여 최적 위성 선별 기법의 연산량 문제를 해결 할 수 있으며 최적 위성 배치 최소 형태에 대하여 직접적으로 고려할 수 있다. 제안된 위성 선별 기법에서 영역 분할 시 영역 분할 개수와 영역 분할 각도를 식 (9)와 (10)으로 정의한다.

$$m \approx 0.3k, \quad p \approx 0.7k \quad (9)$$

$$reg_{num} = k - m, \quad reg_{deg} = \frac{360^{\circ}}{reg_{num}} \quad (10)$$

여기서, m 은 천정 영역 선별 위성 수, p 는 수평영역 선별 위성 수, reg_{num} 는 영역 분할 수, reg_{deg} 는 영역 분할 각도이다.

식 (9)와 (10)을 활용하여 제안된 기법의 위성 선별 과정은 다음과 같이 정리된다.

- 1) 모든 가시위성의 양각과 방위각을 산출하여 양각 기준으로 오름차순으로 정렬한다.
 - 2) 개만큼 양각이 높은 위성들을 선별 후, 양각이 가장 낮은 위성을 최저양각위성으로 선별한다.
 - 3) 최저양각위성의 방위각을 활용하여 reg_{deg} 따라 reg_{num} 만큼 사용자의 방위를 분할한다.
 - 4) 최저양각위성이 속한 영역을 제외하고 각 영역에서 가장 낮은 양각 위성을 선별한다.
- 예시를 위하여 $n=24$, $k=10$ 인 경우에 제안된 위성 선별 과정은 Figs. 4, 5와 같다.

Fig. 4의 왼쪽 그림과 같이 빈 원으로 표현된 모든 가시위성에 대하여 사용자의 천정 영역에서 높은 양각으로 배치된 위성들을 선별한다. 그리고 가장 낮은 양각으로 배치된 위성을 선별하며 최저양각위성 (lowest elevation satellite)으로 정의한다. 다음 선별 과정으로 오른쪽 그림과 같이 사용자의 수평 영역에서 남은 선별 위성 수 만큼 선별 하기 위해 최저양각위성의 방위각을 활용하여 영역을 분할한다. 분할된 영역의 양각에 대하여 저위도 영역, 중위도 영역으로 분할한 것을 도시하였다.

Fig. 5의 오른쪽 그림과 같이 최저양각위성이 선별된 영역을 제외하고 각 영역의 저위도 영역에서 가장 낮은 양각 위성을 선택하고 저위도 영역에 배치된 위성이 없을 경우 중위도 영역에서 가장 낮은 양각을 가지는 위성을 선택한다. 이와 같이 선별 과정을 통해 선별 위성 수가 10개인 경우, 천정영역에서 3개, 수평영역에서 7개를 선별한 결과를 확인 가능하다.

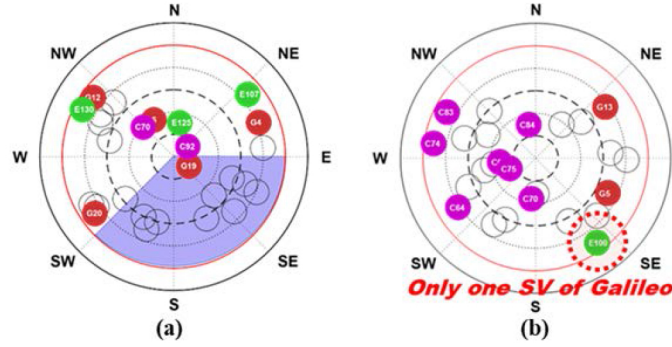


Fig. 6. Skyplot examples of (a) the local optimal satellite deployment and (b) the lack of redundancy.

4. 다중 위성항법시스템 환경에서 효율적인 위성 선별 전략

4.1 다중 위성항법시스템 환경에서 지역 최적 해 문제

다중 위성항법시스템 환경 하에서 기존의 기법을 활용하여 지정된 개수의 위성을 선별하는 경우에는 다음의 두가지 문제가 발생하게 된다.

- 1) 지역 최적 위성 배치 문제
- 2) 다중성 부족 문제

지역 최적 위성 배치 문제는 준 최적 위성 선별 기법의 결과로 선별된 위성 조합의 배치가 최적 위성 배치의 최소 경계를 만족하지 못하는 경우를 뜻한다. 다중 위성항법시스템 환경에서 지역 최적 해 문제를 무시하고 탐욕 알고리즘에 기반하여 위성 선별을 진행할 경우에는 전역 최적이지 아닌 지역적으로만 최적인 위성 조합을 선택할 위험이 발생한다. 이와 같은 결과는 탐욕 알고리즘이 반복적으로 시행되는 위성 선별 과정에서 매 순간에 한정하여 최적 위성 조합을 선별하는 특징에 기인한다. 따라서, 탐욕 알고리즘이 최종으로 선별한 위성 조합은 모든 가시위성의 가능한 조합 중에서 최적 조합임을 보장할 수 없다.

다중성 부족 문제의 경우 선별 위성 조합 내 각 위성군 활용 위성 수가 1개만 선별 되는 문제이다. 이는 GDOP가 크게 증가하는 문제를 발생시킨다. 또한 활용 위성군의 위성이 한 개만 활용될 위치 추정과 고장 검출 수행에 있어 어려움을 겪을 수 있다. Fig. 6은 지역 최적 위성 배치 문제와 다중성 부족 문제의 결과로 발생하는 위성배치도를 예시한 것이다.

4.2 다중 위성군 간 시스템 바이어스 (ISB)를 활용한 효율적인 위성 선별 전략

다중 위성항법시스템 환경 하에서 다중성 부족 문제를 해결하기 위하여 제안된 위성 선별 전략은 GPS를 기준으로 각 위성군에서 발생하는 ISB를 활용한다. ISB는 각 GNSS마다 다른 시간계를 활용함으로써 생기는 오차와 수신기 및 위성 하드웨어 오차로 인해 발생하며 다중 위성항법시스템을 활용 시 위치 정확도를 저하시킬 수 있는 오차 요인 중 하나이다 (Karaim et al. 2018). 위

성항법시스템 별 위성 신호 구조 차이로 인해 발생하는 수신기 하드웨어 지연은 ISB 발생의 주요 원인이다 (Hegarty et al. 2004, Zeng et al. 2017, Jing et al. 2019). 수신기 하드웨어 지연을 포함한 의사거리 측정치는 식 (11)과 같다.

$$\begin{aligned}
 \tilde{\rho}_{u,k}^{j,G} &= (e_{u,k}^j)^T [x_k^{j,G} - x_{u,k}] + b_{u,k}^{j,G} - (b_{u,k}^G + D^G) + I^{j,G} + T^{j,G} + M_{\rho,u}^{j,G} + v_{u,k}^{j,G} \\
 \tilde{\rho}_{u,k}^{j,C} &= (e_{u,k}^j)^T [x_k^{j,C} - x_{u,k}] + b_{u,k}^{j,C} - (b_{u,k}^C + D^C) + I^{j,C} + T^{j,C} + M_{\rho,u}^{j,C} + v_{u,k}^{j,C} \\
 \tilde{\rho}_{u,k}^{j,E} &= (e_{u,k}^j)^T [x_k^{j,E} - x_{u,k}] + b_{u,k}^{j,E} - (b_{u,k}^E + D^E) + I^{j,E} + T^{j,E} + M_{\rho,u}^{j,E} + v_{u,k}^{j,E} \\
 &\downarrow \\
 \tilde{\rho}_{u,k}^{j,S} &= (e_{u,k}^j)^T [x_k^{j,S} - x_{u,k}] + b_{u,k}^{j,S} - (b_{u,k}^S + D^S) + I^{j,S} + T^{j,S} + M_{\rho,u}^{j,S} + v_{u,k}^{j,S} \quad (11)
 \end{aligned}$$

여기서, s 는 각 위성항법시스템 G(GPS), C(BDS), E(Galileo), $\tilde{\rho}_{u,k}^{j,S}$ 는 k 시점, j 번째 위성의 의사거리 측정치, $e_{u,k}^j$ 는 시선각 벡터, $x_k^{j,S}$ 는 k -th 시점, j 번째 위성의 위치 (ECEF좌표계), $b_{u,k}^{j,S}$ 는 j 번째 위성 시계오차, $b_{u,k}^S$ 는 k -th 시점, 수신기 시계 오차, $x_{u,k}$ 는 k -th 시점, 수신기의 위치(ECEF좌표계), $I^{j,S}$ 는 전리층 지연 오차, $T^{j,S}$ 는 대류권 지연 오차, $M_{\rho,u}^{j,S}$ 는 다중경로오차, $v_{u,k}^{j,S}$ 는 의사거리 측정치에 포함된 수신기 열잡음, D^S 는 시스템 별 하드웨어 지연을 표현한다. 이때 ISB는 식 (12)과 같다 (Zeng et al. 2017).

$$\begin{aligned}
 ISB_{BDS} &= (b_{u,k}^C + D^C) - (b_{u,k}^G + D^G) = b_{u,k}^{sys} + (D^C - D^G) \\
 ISB_{Gal} &= (b_{u,k}^E + D^E) - (b_{u,k}^G + D^G) = b_{u,k}^{sys} + (D^E - D^G) \quad (12)
 \end{aligned}$$

여기서, $b_{u,k}^{sys}$ 는 두 시스템 간 시간 시스템 바이어스를 의미한다. ISB를 활용하여 각 위성군의 의사거리 측정치는 식 (13)과 같이 모델링 될 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \tilde{\rho}_{u,k}^{j,G} &= (e_{u,k}^j)^T [x_k^{j,G} - x_{u,k}] + b_{u,k}^{j,G} - (b_{u,k}^G + D^G) + I^{j,G} + T^{j,G} + M_{\rho,u}^{j,G} + v_{u,k}^{j,G} \\
 \tilde{\rho}_{u,k}^{j,C} &= (e_{u,k}^j)^T [x_k^{j,C} - x_{u,k}] + b_{u,k}^{j,C} - (b_{u,k}^G + D^G + ISB_{BDS}) + I^{j,C} + T^{j,C} + M_{\rho,u}^{j,C} + v_{u,k}^{j,C} \\
 \tilde{\rho}_{u,k}^{j,E} &= (e_{u,k}^j)^T [x_k^{j,E} - x_{u,k}] + b_{u,k}^{j,E} - (b_{u,k}^G + D^G + ISB_{Gal}) + I^{j,E} + T^{j,E} + M_{\rho,u}^{j,E} + v_{u,k}^{j,E} \\
 &\downarrow \\
 \tilde{\rho}_{u,k}^{j,S} &= (e_{u,k}^j)^T [x_k^{j,S} - x_{u,k}] + b_{u,k}^{j,S} - (b_{u,k}^G + D^G + ISB_S) + I^{j,S} + T^{j,S} + M_{\rho,u}^{j,S} + v_{u,k}^{j,S} \quad (13)
 \end{aligned}$$

ISB를 활용하면 각 위성군의 수신기 시계 오차를 GPS 수신기 시계 오차를 기준으로 정의 할 수 있다. 이에 의하여 각 위성군 별 활용 위성 수가 1개인 경우에 발생하는 다중성 부족 문제를 해결

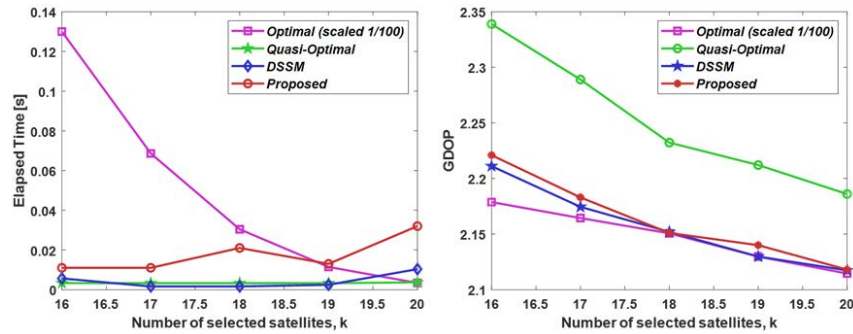


Fig. 7. GDOP and elapsed time of proposed method and conventional methods for different numbers of selected satellites, $16 \leq k \leq 20$.

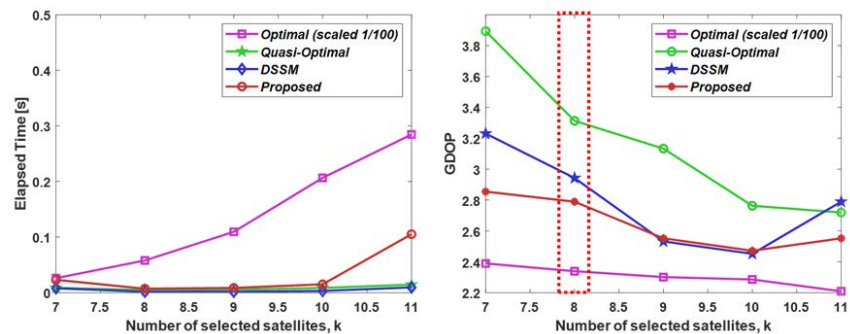


Fig. 8. GDOP and elapsed time of the proposed method and conventional methods for different numbers of selected satellites, $7 \leq k \leq 11$.

Table 1. Comparison of the GDOP and the elapsed time for computation by different satellite selection methods for different numbers of selected satellites.

Number of 'k'		7	8	9	10	11		16	17	18	19	20
Optimal	GDOP	2.389	2.339	2.300	2.285	2.208		2.178	2.164	2.150	2.129	2.114
	Elapsed time (s)	2.605	5.709	10.94	20.65	28.56		12.99	10.86	5.042	1.142	0.336
Quasi-Optimal	GDOP	3.389	3.312	3.132	2.762	2.719		2.338	2.289	2.232	2.212	2.186
	Elapsed time (s)	0.008	0.004	0.005	0.008	0.014	...	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
DSSM	GDOP	3.230	2.942	2.531	2.451	2.789		2.221	2.174	2.151	2.129	2.121
	Elapsed time (s)	0.007	0.001	0.001	0.003	0.009		0.001	0.001	0.001	0.001	0.002
Proposed	GDOP	2.860	2.762	2.543	2.476	2.549		2.221	2.183	2.151	2.140	2.118
	Elapsed time (s)	0.007	0.003	0.005	0.013	0.021		0.011	0.011	0.021	0.013	0.032

할 수 있다. 다른 항법위성군과는 달리 GLONASS는 FDMA 기법을 활용함으로써 인해 각 측정치 사이의 Inter-Channel Bias (ICB)가 존재한다 (Liu et al. 2017). ICB의 경우에도 제안된 방법을 확장하면 다중성 문제를 해결할 수 있으나 상세 알고리즘이 다소 복잡하게 변형되리라 예상된다. 본 논문에서는 제안된 연구의 특징적인 성능 분석을 위해 GPS, BDS, Galileo를 활용하였다.

5. 실험

제안된 위성 선별 기법의 성능 분석을 위해 시뮬레이션과 실제 취득한 항법데이터로 두 종류의 실험을 진행하였다. 첫번째 실험의 경우 제안된 위성 선별 기법과 기존 기법의 성능 분석을 위해 GPS, BDS, Galileo를 활용하여 다중 위성항법시스템 환경에 대한 위성 선별 기법의 성능 분석을 진행 하였다. 두번째 실험의 경우 개활지 환경에서 정적 상태로 실험을 진행하였으며 제안

된 효율적인 위성 선별 전략에 대한 성능 분석을 위해 제안된 기법과 기존 기법에 대한 성능 분석을 진행 하였다. 위성군은 시뮬레이션 실험과 동일하게 활용하였다.

5.1 시뮬레이션을 통한 성능 분석

시뮬레이션을 통해 제안된 기법과 기존 기법인 최적 위성 선별 기법, 탐욕알고리즘 기반 준 최적 위성 선별 기법 그리고 DSSM에 대하여 성능 분석을 진행하였다. 사용자가 설정하는 선별 위성 수 변화에 따른 각 기법의 연산 소요 시간과 GDOP를 통해 성능 분석하였다. Fig. 7은 선별 위성 수의 20개부터 16개까지의 변화에 대해서 각 기법의 연산 소요 시간과 GDOP 결과 그래프이다. Fig. 8은 선별 위성 수의 7개부터 11개 까지의 변화에 대한 각 기법의 연산 소요 시간과 GDOP 결과 그래프이다. 그리고 각 선별 위성 수 변화에 따른 GDOP와 연산 소요 시간을 Table 1을 통해 알 수 있다. Table 1의 결과를 보면 제안된 방법은 기존의 준

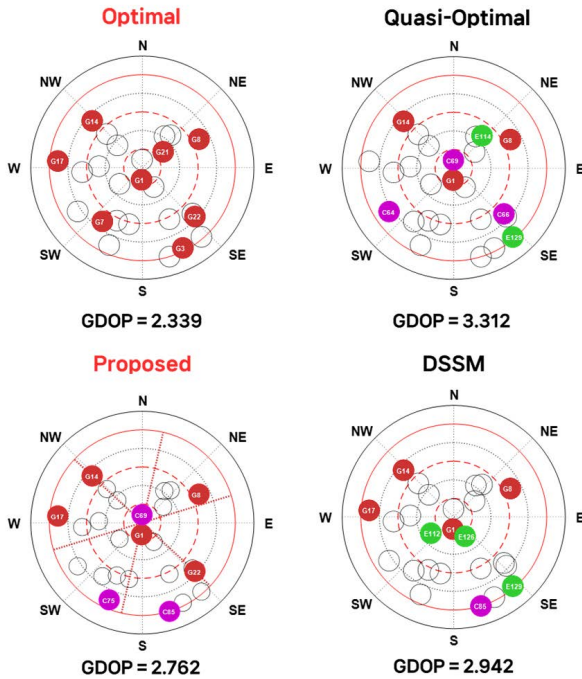


Fig. 9. Example of different results in selecting 8 satellites by different methods.



Fig. 10. Experiment configuration and experimental equipment.

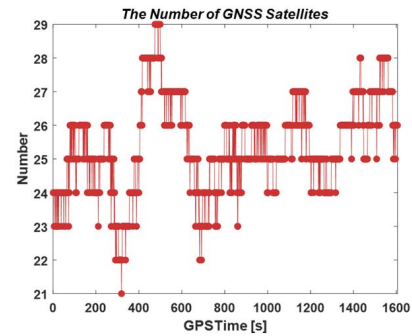


Fig. 11. Number of visibility satellites during the experiment.

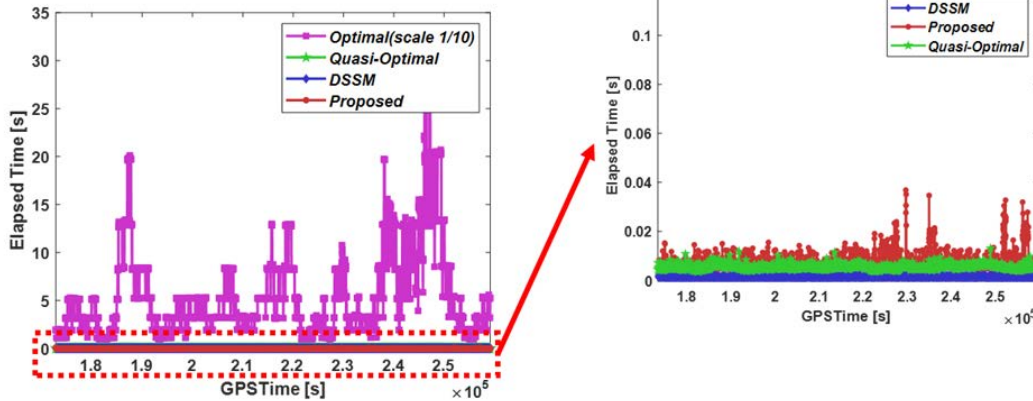


Fig. 12. Comparison of elapsed time by different satellite selection methods in the open sky condition.

최적 방법들과 비슷한 연산 시간을 소요하며, 선택 위성 수가 11부터 7까지 작아질수록 제안된 방법이 기존의 준 최적 방법들보다 더 작은 GDOP 값을 산출하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 연산량과 정확도를 동시에 고려할 때 제안된 방법은 기존의 준 최적 방법보다 유리한 방법이 될 수 있음을 알 수 있다.

시뮬레이션 결과를 통해 최적 위성 선별 기법의 경우 다중 위성항법시스템 환경에서 조합 검색 과정에 의하여 다른 기법에 비해 매우 큰 연산 시간을 소모하는 것을 확인할 수 있다. 선별 위성 수가 8개인 경우에 대한 각 기법의 위성 배치를 Fig. 9에 나타냈다.

5.2 개활지 정적 실험을 통한 성능 분석

개활지 정적 실험은 총 12시간의 데이터로 30초 간격으로 획득한 항법 데이터를 활용하였다. 실험 환경으로 개활지인 한국항공대학교 연구실험동 옥상에서 실험하였으며 Trimble Choke Ring 안테나를 통해 기준국 수신기인 Novatel-Propak6를 활용하여 데이터를 획득하였다. 또한 제안된 기법의 성능 분석을 위해 CPU i9-10900가 탑재된 데스크탑을 활용하였다. 실험 환경 구성은 Fig. 10으로 나타났다. 또한 각 시점마다 개활지에서 관측된 다중 위성군의 가시위성 수는 Fig. 11과 같다.

실제 획득한 항법 데이터를 통해 제안된 기법과 기존 위성 선

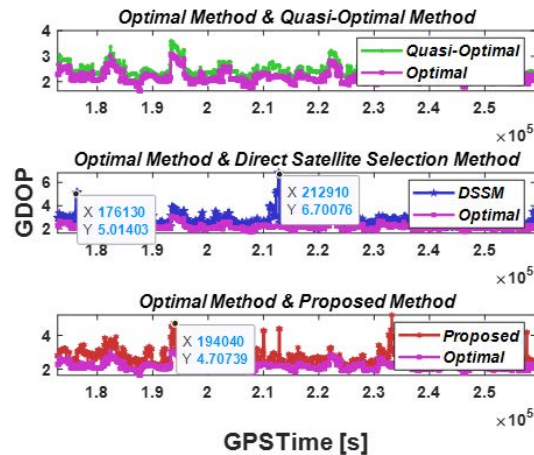


Fig. 13. Comparison of GDOP by different satellite selection methods in the open sky condition.

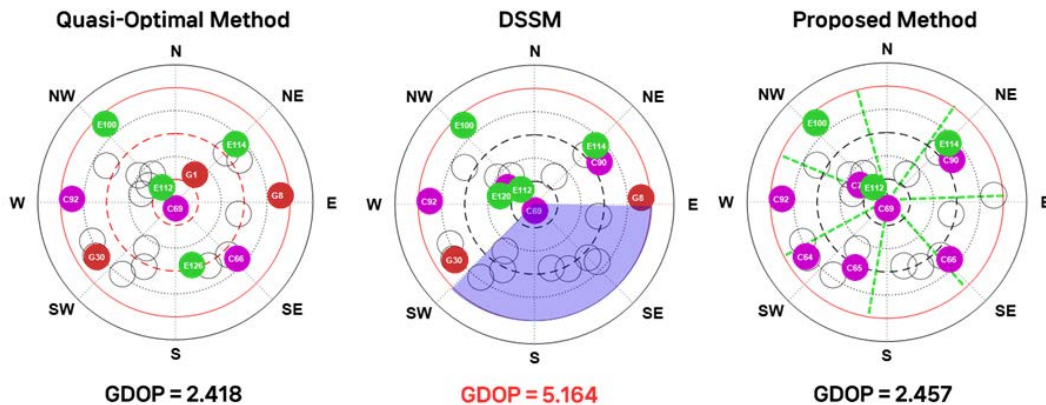


Fig. 14. Comparison of the satellite selection results at GPST=176130 by different satellite selection methods.

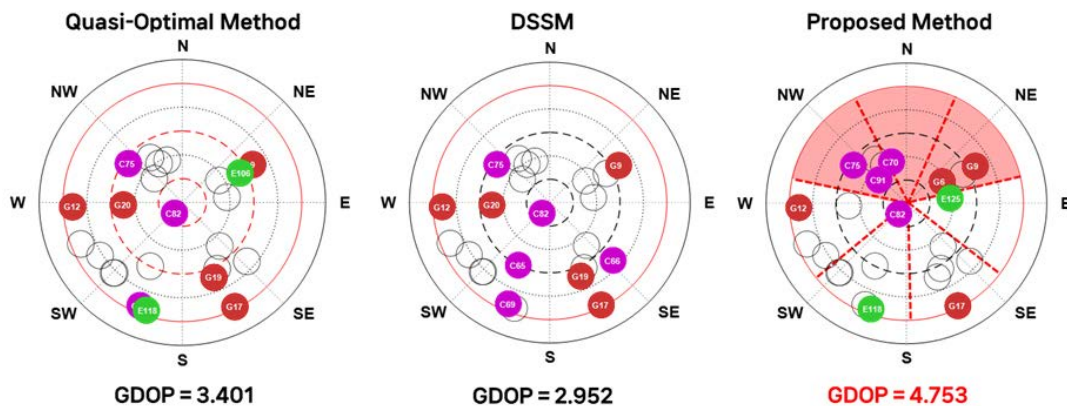


Fig. 15. Comparison of the satellite selection results at GPST=194040 by different satellite selection methods.

별 기법에 대한 성능 분석을 위해 GDOP와 연산 소요 시간에 대하여 분석을 진행하였다. Figs. 12, 13은 제안된 기법과 각 위성 선별 기법의 연산 소요 시간과 GDOP를 나타낸다. Fig. 13에서 표시된 세 경우는 최적 위성 선별 결과 대비 GDOP가 크게 발생한 경우이다. Figs. 14-16은 세 경우에 대한 위성 배치도이다.

Fig. 14에 도시된 바와 같이 DSSM을 활용할 경우에는 지역 최

적 위성 조합 문제가 발생하게 된다. 지역 최적 위성 배치 문제로 인하여 파란색으로 표시된 영역에 위성이 배치되지 않았다. 이로 인하여 GDOP는 최적 위성 선별 기법에 비해 크게 증가함을 알 수 있다. Fig. 15의 경우 제안된 기법에서 GDOP가 크게 증가함을 알 수 있다. 이는 최적 위성 배치가 여러 형태로 존재할 수 있지만 제안된 기법에서는 여러 방위에서 위성이 하나씩 선별 될 수 있

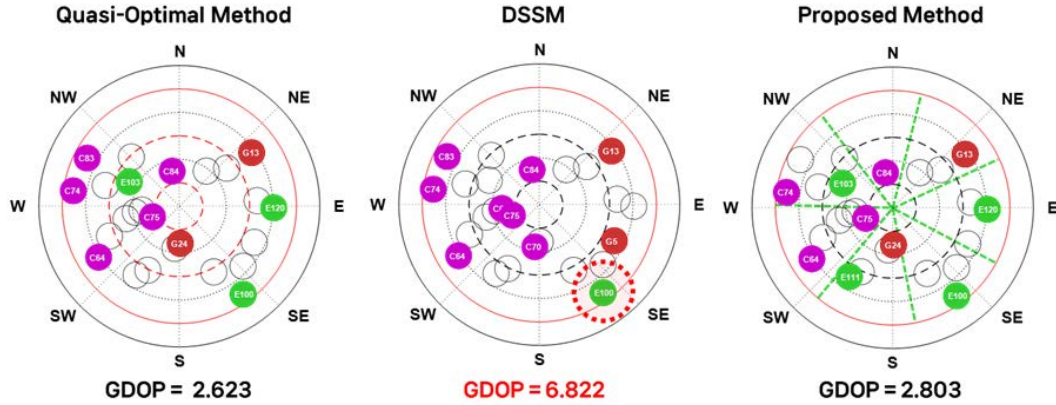


Fig. 16. Comparison of the satellite selection results at GPST=212910 by different satellite selection methods.

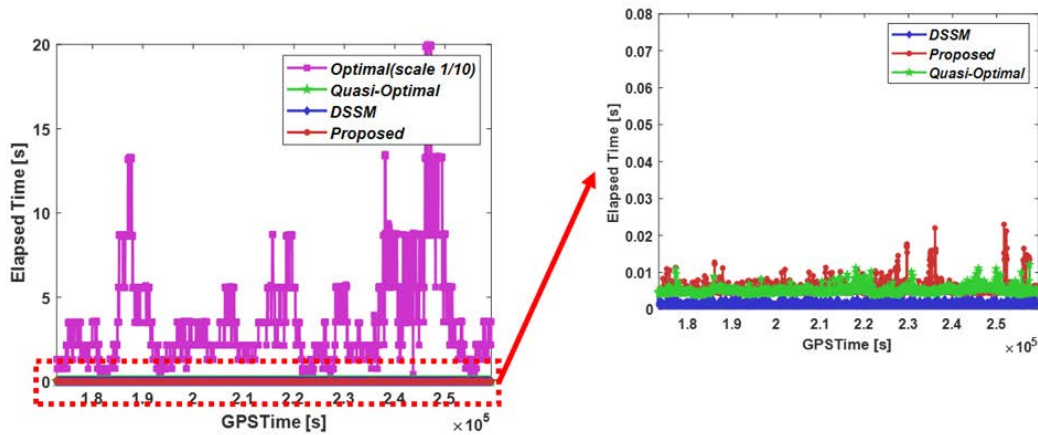


Fig. 17. Comparison of elapsed time by different satellite selection methods in the open sky condition after applying the proposed satellite selection strategy.

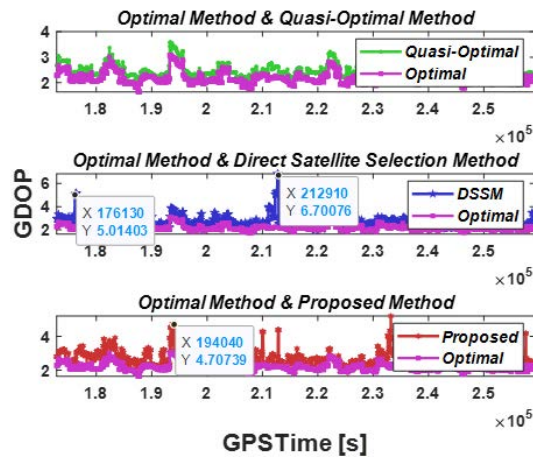


Fig. 18. Comparison of GDOP by different satellite selection methods in the open sky condition after applying the proposed satellite selection strategy.

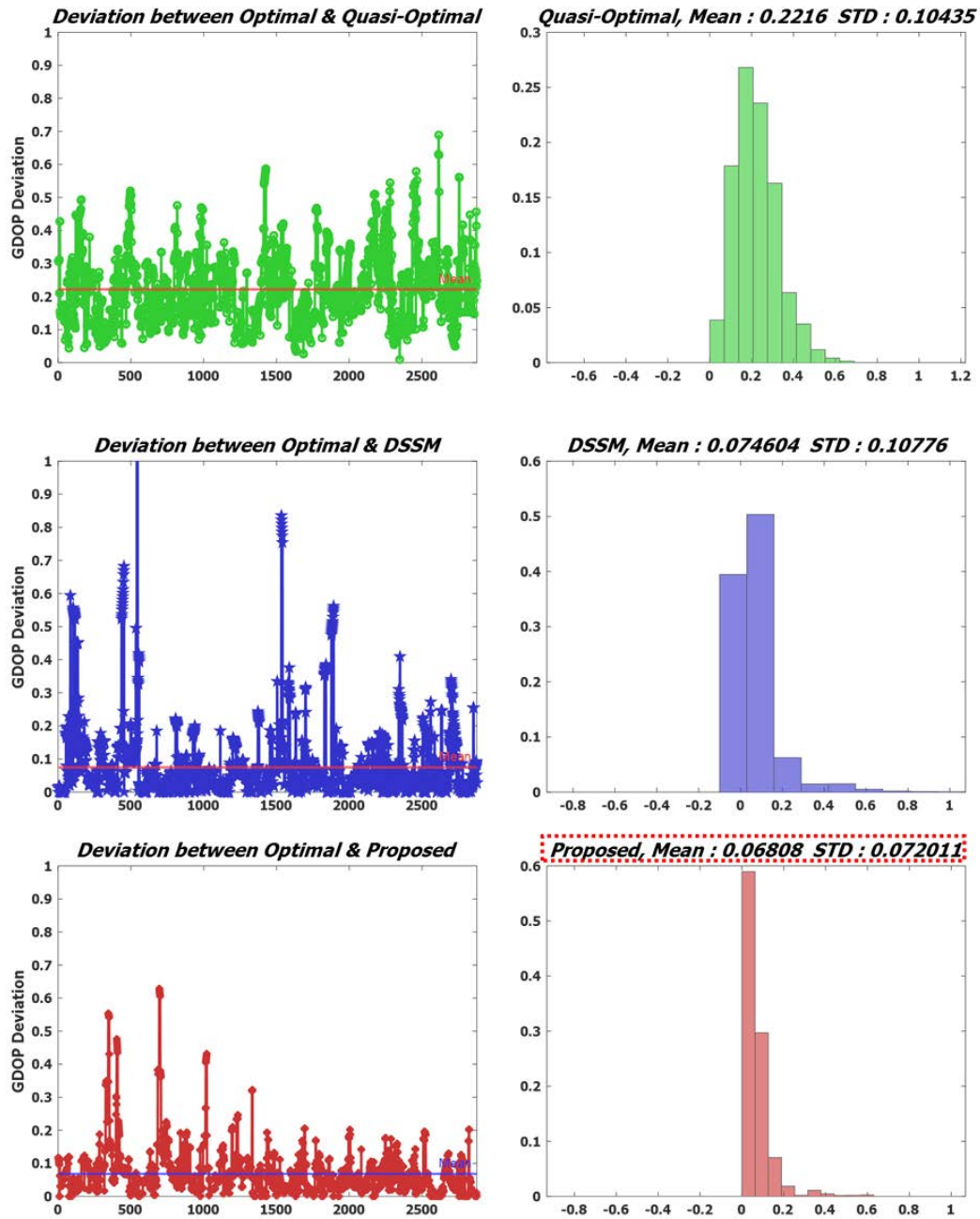
는 형태만을 고려하여 영역을 분할하고 선별하였기 때문에 발생하는 문제점이다.

Fig. 16은 DSSM에 의해 다중성 부족 문제로 인하여 GDOP가 크게 증가한 것을 도시한 것이다. 개활지 정적 실험을 통해 제안된 기법은 Fig. 14에서 발생하는 지역 최적 위성 조합 문제 중 지

역 최적 위성 배치를 회피할 수 있는 것을 확인 하였다. Fig. 16에 도시된 다중성 부족 문제를 해결하기 위하여 3장에서 제안된 효율적인 위성 선별 전략을 적용하여 개활지 정적 실험 데이터를 토대로 각 위성 선별 기법의 GDOP와 연산 소요 시간을 분석하였다. Figs. 17, 18은 다중 위성항법시스템 환경에서 효율적인 위성

Table 2. Comparison of the mean DOP and the elapsed time for computation by different satellite selection methods in multi-constellation GNSS environment.

	Unapplied effective satellite selection strategy				Applied effective satellite selection strategy			
	GDOP	PDOP	TDOP	Elapsed time [s]	GDOP	PDOP	TDOP	Elapsed time [s]
Optimal	2.166	1.651	1.381	57.52	1.749	1.532	0.843	38.167
Quasi-optimal	2.441	1.661	1.787	0.005	1.971	1.724	0.953	0.005
DSSM	2.671	1.829	1.941	0.001	1.824	1.607	0.861	0.001
Proposed	2.554	1.817	1.817	0.005	1.798	1.588	0.882	0.005

**Fig. 19.** Comparison of the deviation of the quasi-optimal method, DSSM and the proposed method: temporal changes (left-column plots) and histograms (right-column plots).

선별 전략을 적용하였을 때의 GDOP와 연산소요시간에 대해 나타낸다.

제안된 위성 선별 전략은 추가적으로 ISB를 고려하여 수신기에서 발생하는 각 위성군의 시계 오차를 GPS의 수신기 시계 오차를 기준으로 모델링하여 다중성 부족 문제를 해결한다. GDOP 산출 시 관측 행렬의 사이즈 감소로 인하여 역행렬 계산 소요 시간이 감소한다. 이를 통해 최적 위성 선별 기법의 연산 소요 시간이 감소함을 Table 2를 통해 알 수 있다. 그리고 전체적으로 GDOP 값이 감소하며 효율적인 위성 선별 전략 적용 시 지역 최적 위성 배치 문제를 고려한 제안된 기법의 GDOP 뿐만 아니라 Position Dilution of Precision (PDOP) 또한 최적 위성 선별 기법의 결과와 가장 근접한 것을 확인 할 수 있다. 제안된 위성 선별 전략에 대한 추가적인 분석을 위해 최적 위성 선별 기법의 GDOP 결과값과 각 기법의 GDOP를 차분한 값을 통해 각 기법의 성능 분석을 진행하였다. Fig. 19는 최적 위성 선별 기법과 각 기법의 GDOP 차분의 시간에 따른 변화와 GDOP 차분들의 확률 분포를 각각 도시한 것이다. Fig. 19에 의하면 제안된 방법은 기존 방법들에 비하여 최적 기법에 더 가까운 위성 선별 결과를 제공하는 것을 알 수 있다.

6. 결론

본 논문은 다중 위성항법시스템 환경에서 효율적인 위성 선별에 대한 연구를 제안하였다. 최적 위성 배치 형태를 고려하기 위해 직접적으로 기하학적 위성 배치를 고려하는 위성 선별 기법을 제안하였으며 다중 위성항법시스템 환경에서 위성 선별 시 고려해야 하는 지역 최적 위성 조합 문제를 정의하여 문제를 해결하기 위한 효율적인 위성 선별 전략을 제안하였다.

다중 위성항법시스템에서 탐욕 알고리즘 기반의 준 최적 위성 선별 기법들은 지역 최적 위성 조합 문제를 고려하지 않으므로 지역 최적 위성 배치 문제와 다중성 부족 문제를 내포하고 있다. 이에 대하여 직접적으로 사용자의 천정 영역과 수평 영역에 대하여 영역을 분할하는 방법으로 기하학적 위성 배치를 고려하여 위성 조합을 선별하는 기법으로 지역 최적 위성 배치 문제를 극복하였다.

제안된 위성 선별 기법의 경우 위성의 정상 신호를 획득하기 유리한 천정 영역에서 우선적으로 위성을 선별하였다. 그리고 최적 위성 배치의 최소형태를 만족하기 위해 사용자의 방위 영역을 여러 영역으로 분할하여 각 영역마다 가장 낮은 양각 위성을 선별하였다. 이를 통해 지역 최적 위성 조합 문제 중 위성 배치가 고르게 분포 되지 않는 지역 최적 위성 배치 문제를 해결함을 확인하였다.

마지막으로, 제안된 위성 선별 방법은 GPS를 제외한 각 위성군의 ISB를 활용하여 수신기 시계 오차를 GPS에 대해서만 모델링함으로써 다중성 부족 문제를 해결하였다. 실제 개활지 정적 실험을 통해 기존 기법에 발생하는 다중성 부족 문제를 해결할 수 있음을 확인하였다. 또한, 제안된 방법은 기존의 준 최적 방법들에 비하여 위성 선별을 위한 연산 소요 시간을 감소시키고 동시에 GDOP 또한 감소시킴을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENTS

본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단, 무인이동체원천기술개발사업단의 지원을 받아 무인이동체원천기술개발사업을 통해 수행되었음 (No. 2020M3C1C1A0108640711).

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, T. G. Lee; methodology, T. G. Lee; software, T. G. Lee, Y. D. Lee; validation, T. G. Lee; formal analysis, T. G. Lee, H. K. Lee; investigation, Y. D. Lee; resources, H. K. Lee; data curation, T. G. Lee, Y. D. Lee; writing, T. G. Lee; review and editing, H. K. Lee; supervision, H. K. Lee.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Chi, C., Zhan, X., Wu, T., & Zhang, X. 2019, Ultra-rapid direct satellite selection algorithm for multi-GNSS, In International Conference on Aerospace System Science and Engineering (Singapore: Springer), pp.11-25. http://doi.org/10.1007/978-981-15-1773-0_2
- Gerbeth, D., Felux, M., Circiu, M.-S., & Caamano, M. 2016, Optimized selection of satellite subsets for a multi-constellation GBAS, In Proceedings of the 2016 International Technical Meeting of The Institute of Navigation, Monterey, California, 25-28 January 2016, pp.360-367. <https://doi.org/10.33012/2016.13412>
- Hegarty, C, Powers, E., & Fonville, B. 2004, Accounting for timing biases between GPS, modernized GPS, and Galileo signals, In: Proceedings of the 36th annual precise time and time interval (PTTI) meeting, Washington, DC, 7-9 December, pp.307-317
- Jeong, H., Jang, H., Kim, K., Lee, J., & Lee, B. 2021, SAT#1 (Preliminary Integration) Test Results of KASS System, Journal of Positioning, Navigation, and Timing, 10, 145-151. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2021.10.2.145>
- Jing, Y., Zeng, A., Zhao, A., Xu, Y., & Ma, Y. 2019, Analysis on Performance of BDS/GPS Fusion Pseudorange Positioning with ISB and Its Influence on DOP, In China Satellite Navigation Conference (Singapore: Springer), pp.380-388. https://doi.org/10.1007/978-981-13-7751-8_38

- Joo, J. & Heo, M. 2020, Feasibility Study on Korea Positioning System (KPS), Proceedings of Symposium of the Korean Institute of communications and Information Sciences, Yong Pyong, Korea, 5-7 February 2020, pp.937-938. <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE09346622>
- Karaim, M., Elsheikh, M., & Noureldin, A. 2018, GNSS error sources, Multifunctional Operation and Application of GPS, pp.69-85. <https://doi.org/10.5772/intechopen.75493>
- Kim, G., Park, C., & Lim, D. W. 2020, Space Service Volume Augmented with Korean Positioning System at Geosynchronous Orbit, Journal of Positioning, Navigation, and Timing, 9, 327-336. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2020.9.4.327>
- Liu, M., Fortin, M.-A., & Landry, Jr., R. 2009, A recursive quasi-optimal fast satellite selection method for GNSS receivers, Proceedings of the 22nd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation 2009 (ION GNSS 2009).
- Liu, T., Yuan, Y., Zhang, B., Wang, N., Tan, B., et al. 2017, Multi-GNSS precise point positioning (MGPPP) using raw observations, Journal of Geodesy, 91, 253-268. <https://doi.org/10.1007/s00190-016-0960-3>
- Swaszek, P. F., Hartnett, R. J., & Seals, K. C. 2016, Multi-constellation GNSS: new bounds on DOP and a related satellite selection process, In Proceedings of the 29th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2016), Portland, Oregon, 12-16 September 2016, pp.228-235. <https://doi.org/10.33012/2016.14748>
- Swaszek, P. F., Hartnett, R. J., & Seals, K. C. 2017, Lower bounds on DOP, The Journal of Navigation, 70, 1041-1061. <https://doi.org/10.1017/S0373463317000248>
- Walter, T., Blanch, J., & Kropp, V. 2016, Satellite selection for multi-constellation SBAS, In Proceedings of the 29th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2016), Portland, Oregon, 12-16 September 2016, pp.1350-1359. <https://doi.org/10.33012/2016.14608>
- Zeng, A., Yang, Y., Ming, F., & Jing, Y. 2017, BDS-GPS inter-system bias of code observation and its preliminary analysis, GPS Solutions, 21, 1573-1581. <https://doi.org/10.1007/s10291-017-0636-3>



Taek Geun Lee is a Ph.D. candidate from the School of Electronics and Information Engineering, Korea Aerospace University, Republic of Korea. He received the B.S. and M.S. degrees from Korea Aerospace University, in 2020 and 2022, respectively. His research interests include multi-GNSS positioning system and integrity and its applications.



Yu Dam Lee received the B.S., M.S., and Ph.D. degrees in Electronics and Information Engineering from Korea Aerospace University, Republic of Korea in 2016, 2018, 2022, respectively. His research interests include multi-sensor fusion, visual/inertial/GNSS navigation, vision-based localization, and 3D Vision.



Hyung Keun Lee is a professor in the Electronics and Information Engineering at Korea Aerospace University, South Korea. He obtained his Ph.D. degree in Electrical Engineering and Computer Science from Seoul National University, Republic of Korea, in 2002. He was a Post-doctoral Research Fellow in Satellite Navigation and Positioning (SNAP) group at the University of New South Wales (UNSW), Australia, from 2002 to 2003. He was at the Central Research Institute, Hyundai Space and Aircraft Corporation, Republic of Korea, from 1994 to 1998. His research interests include positioning and navigation systems, sensor networks, and avionics systems.