

저궤도 항법 신호 설계를 위한 개발 프로세스 분석

최철희*, 원대희, 이은성

한국항공우주연구원

*choich@kari.re.kr, dhw@kari.re.kr, koreagnss@kari.re.kr

Analysis of Development Process for Signal-in-Space Design in LEO PNT

Chulhee Choi*, Daehee Won, Eunsung Lee

Korea Aerospace Research Institute

요약

저궤도 항법(LEO PNT)과 관련하여 최근 국내외에서 많은 연구 및 개발이 이루어지고 있으며, 기존 GNSS(Global Navigation Satellite System)와 여러가지 주요 차이점이 있다. 그 중 저궤도 위성의 고도는 200~2,000km 사이에 있으며, 궤도는 지평선상의 경로 길이가 6~8시간에 해당하며 수평선상의 통과시간은 10~15분 정도 지속된다. 저궤도 위성을 통하여 GPS(Global Positioning System)와 동일한 수의 위성을 관측하기 위해서 약 200~300개의 더 많은 위성이 필요하다. 저궤도 위성은 중궤도 위성 대비 높은 위성 밀도, 더 빠른 도플러 동역학, 개선된 위성 가시성의 장점이 있으며, 이는 반송파의 정수 모호성 계산에 용이하다는 연구 결과가 있다. 또한, 저궤도 위성은 낮은 고도로 인하여 지구에 더 가까이 위치하기 때문에 강한 신호로 인하여 신호 방해에 대한 저항력이 향상되는 이점이 있으며, 신호를 암호화하고 인증할 수 있는 기회가 있어 스푸핑 공격에 대한 보호가 가능할 것이다. 본 논문에서는 저궤도 항법 신호를 설계할 때 고려되어야 하는 개발 프로세스로 주파수 대역, 신호 구조, 타이밍 및 동기화, 대역폭, 데이터 인코딩, 신호 간섭 그리고 정확하고 신뢰할 수 있는 항법 서비스를 제공하기 위한 시스템 요구사항 등을 포함하는 여러 요소를 분석하여 제시한다.

I. 서론

현재 개발 및 시험중에 있는 대표적인 저궤도 항법(LEO PNT) 위성은 미국의 SpaceX Starlink, Xona Space, 영국의 OneWeb, 중국의 Kuiper, GeeSpace, 유럽의 EUSPA LEO-PNT Study, Kepler 등이 있다. 향후 사용자는 다양한 고도에서 기존 GNSS 위성과 더불어 수천 개의 위성으로 부터 송신되는 신호를 활용할 수 있을 것이다. 개발 비용 측면에서 중궤도(MEO) 위성은 고가의 방사선 차폐 부품이 필요하며, 저궤도 위성과 같이 소형 위성에 사용되는 부품보다 가격이 높다. 위성의 규모 및 소비 전력 등을 고려하였을 때 저궤도 위성은 경제적인 측면의 장점이 있다[1][2].

저궤도 항법 위성은 기존 GNSS 위성과 궤도, 중량, 주파수 다양성, 신호 강도, 위성 밀도, 도플러 효과의 차이가 있다. 이러한 특성을 분석하고 저궤도 항법용 위성으로 항법 서비스를 제공하기 위해서 요소 기술에 대한 개발 프로세스 연구가 필요할 것으로 판단한다[2]. 본 논문에서는 저궤도 항법의 주요 특징과 기존의 GNSS와 차이점을 기술하였다. 또한 저궤도 위성 항법 시스템의 위성 세그먼트, 지상 세그먼트, 사용자 세그먼트 관점의 개발 요소를 살펴보고, 분석 및 정의되어야 하는 기준 항목을 소개하고 있다. 국내외 연구 결과를 기반으로 저궤도 항법 신호 설계시 고려되어야 하는 프로세스와 각 요소 정보에 대하여 분석하여 제시하였다.

and Timing) 뿐 아니라 통신, 원격탐사, 지구관측 등 다양한 임무 수행이 가능하다. 표 1은 기존의 GNSS 위성과 저궤도 항법 위성의 규모에 따른 분류 및 중량을 정리하였다.

표 1. Satellite Classification for Mass and Orbital Altitude [1]

Orbits	Class	Mass[kg]	Satellite Systems
MEO	Large	$\geq 1,000$	GPS, BeiDou, GLONASS
	Medium	500-1,000	Galileo
LEO	Mini	100-500	Starlink, OneWeb, Kuiper, Xona Space, GeeSpace, etc.
	Micro	10-100	Iceye, BlackSky, Kepler, etc.
	Cube/Nano	1-10	PlanetLabs, UWE-4, Xiaoxiang-1, etc.

저궤도 항법 위성은 기존 GNSS 위성과 차이가 있으며, 중량은 CubeSat~MiniSat 크기로 소형화 가능하다. 그림 1과 같이 주파수 대역은 L-band 뿐 아니라, UHF-band, S-band, C-band 등 다양한 주파수 후보 군이 고려되고 있다. 강한 신호강도로 인하여 신호 간섭과 방해에 대한 저항력이 높으며, 높은 위성 밀도로 가시위성의 수가 늘어나고 빠른 동역학으로 인하여 도플러 효과가 크게 나타나는 장점이 있다.

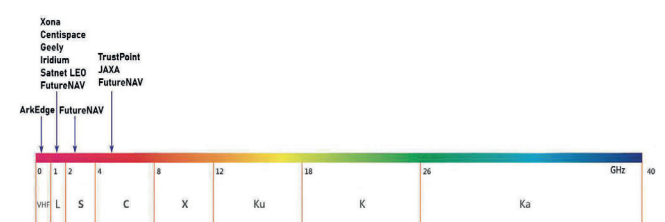


그림 1. LEO PNT Frequencies and Service Providers [2]

II. 본론

II-1. 저궤도 항법 개요

저궤도 항법 위성은 낮은 궤도에서 운영하므로 지상으로의 신호 도달 시간이 짧고, 소모되는 전력 소비가 적다. 이러한 부분은 신호 감쇠가 적고 강한 신호 제공이 가능하다. 또한 위성의 이동 속도가 빠르고 다수의 위성 분포를 통한 항법 신호의 활용이 가능하며, PNT(Positioning, Navigation

II-2. 저궤도 항법 시스템 개발 요소 분석

저궤도 위성 항법 시스템의 개발 요소는 위성 세그먼트, 지상 세그먼트, 사용자 세그먼트로 구분할 수 있다. 위성 세그먼트는 전력, 추진, 자세제어 등을 포함하는 플랫폼(Bus)과 Chip-scale 원자시계, 신호생성기, 송신안테나, GNSS 수신기 등을 포함하는 항법 탑재체(Payload)로 구성한다. 위성 관점에서 분석되어야 하는 주요 항목은 표2와 같이 제시한다.

표 2. LEO PNT Assessment Criteria [2][3]

General Information	Constellation Details	Signal Security	RF Characteristics
Country of Origin	Orbital Altitude	Signal Structure	Frequency Band
System Ownership	Satellite Class	Signal Encryption	Signal Names
Services Provided	PNT Payload Type	Signal Authentication	Signal Frequencies
Target Sectors	Number of satellites	-	ITU Approval Status
Performance Targets	I-Operating Capability	-	Modulation Type
GNSS Independence	F-Operating Capability	-	Data Rate
Timescale Reference	-	-	Chip Rate
Service Area	-	-	User Received Power

지상 세그먼트는 위성의 상태 모니터링, 궤도 유지 및 조정, 원격 명령 송신이 가능한 LEO 운영국과 위성 추적, 위성과의 양방향 통신이 가능 추적 및 제어 안테나국으로 구성한다. 사용자 세그먼트는 LEO 및 GNSS 수신기와 안테나, 신호를 처리하고 성능 분석이 가능한 알고리즘 모듈로 구성한다.

II-3. 저궤도 항법 신호 설계 프로세스

아래 제시하는 그림 2는 실제 저궤도 항법 시스템의 물리적인 구성과는 차이가 있지만, 개발 요소의 순차적인 과정을 설명하기 위하여 시뮬레이터에서 구현한 흐름을 소개하고 있다.

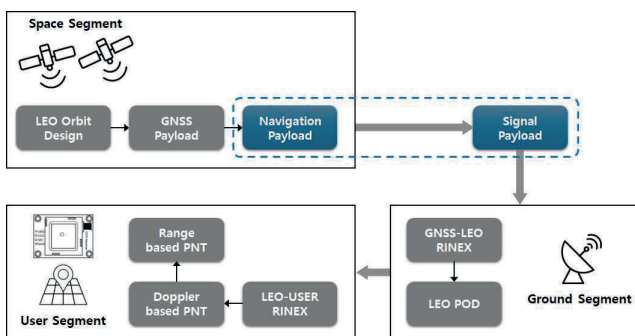


그림 2. Signal Design Process with LEO PNT Module [3]

요소 항목중 항법 페이로드와 신호 페이로드 설계를 위하여 다음에서 정의하는 단계별 주요사항에 대한 고려가 필요하다.

(1) 시스템 요구사항 정의

서비스 대상 및 사용자를 식별하고 시스템의 커버리지, 정확성, 가용성, 지연시간을 도출한다.

(2) 주파수 대역 선정

가용한 주파수 스펙트럼을 선정하고, 상호 호환성을 보장하는 전파의 Propagation 특성을 분석한다.

(3) 신호 구조

신호의 Waveform 설계와 변조 및 펄스 형태를 선정한다.

(4) 신호 타이밍 및 동기화

정밀 기준 시간을 채택하고, 동기화를 위해 신호에 시간 정보를 삽입한다.

(5) 데이터 인코딩

수신기 균형을 고려한 데이터 전송속도를 분석하고, 데이터 정보를 반영한 항법 메시지를 설계한다.

(6) 파워 버짓

전송 전력을 계산하고, 송신 안테나 패턴을 설계한다.

(7) 신호 설계 구현

수신기의 동적 주파수 변화에 대한 처리와 코드 상관 피크를 결정한다.

(8) 간섭 관리

위성 간의 신호 간섭과, 적용한 재밍 및 스푸핑 인증 메커니즘을 통합한다.

(9) 검증

시뮬레이션과 실험실 환경 시험 및 실제 시나리오 검증을 수행한다.

제시한 항법 신호 설계 단계는 ITU 국제표준 및 권고사항을 준수하여야 하며, GNSS 제공자와의 상호 호환성 및 상호 운용성을 보장하는 것이 중요하다.

III. 결론

본 논문에서는 저궤도 항법과 관련하여 국내외 연구동향 분석 결과를 기반으로 저궤도 항법의 주요 특징과 기존 GNSS와의 차이점을 소개하였다. 기존 GNSS 연구와 유사한 부분도 있지만 LEO PNT 시스템의 개발 요소와 신호 설계를 위한 고려사항이 요구되기에 프로세스를 분석하여 제시하였다. 현재 우주항공청에서는 “다중궤도 PNT 시스템 개발 모델” 및 “로드맵 수립”을 위한 탐색연구를 계획하고 있으며, 국내 연구기관 및 기업에서 진행중인 저궤도 항법 연구는 개념연구 단계에 있다. 우리나라 환경을 고려하였을 때 Mega-constellation보다 MEO 위성의 신호를 중계 및 보강하는 방식이 될 것으로 전망한다. 본 연구를 통하여 분석한 결과는 향후 저궤도 항법을 위한 “IOD 위성” 및 “군집 위성항법시스템” 개발에 있어 신호 설계를 위한 가이드라인으로 활용이 가능하다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 한국항공우주연구원의 자체연구사업인 “한국형 다중계층 항법을 위한 저궤도 위성항법 기반 기술 연구”의 지원을 받아 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] Ruben Morales Ferre et al., “A Feasibility Study for Signal-in-Space Design for LEO-PNT Solutions with Miniaturized Satellites”, IEEE JOURNAL ON MINIATURIZATION FOR AIR AND SPACE SYSTEMS, VOL. 3, NO. 4, DECEMBER 2022
- [2] FrontierSI, “State of the Market Report Low Earth Orbit Positioning Navigation and Timing”, 2024 Edition
- [3] FABRICIO S. PROL et al., “Simulations of Dedicated LEO-PNT Systems for Precise Point Positioning: Methodology, Parameter Analysis, and Accuracy Evaluation”, IEEE TRANSACTIONS ON AEROSPACE AND ELECTRONIC SYSTEMS VOL. 60, NO. 5 OCTOBER 2024