



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사학위논문

A Study on Improving Smartphone Precise Positioning
through GPS Antenna Calibration

안테나 캘리브레이션을 통한 스마트폰
초정밀 항법 성능 개선에 관한 연구

2023년 2월

서울대학교 대학원

항공우주공학과

김 종 현

안테나 캘리브레이션을 통한 스마트폰
초정밀 항법 성능 개선에 관한 연구

A Study on Improving Smartphone Precise Positioning
through GPS Antenna Calibration

지도교수 기창돈

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2023년 2월

서울대학교 대학원

항공우주공학과

김종헌

김종헌의 공학석사 학위논문을 인준함

2022년 12월

위원장 김유단

부위원장 기창돈

위원 박찬국

초 록

스마트폰에서 GPS 기능을 제공함에 따라 GPS 기기 중 절대 다수가 스마트폰이 되었으며 대부분의 사람들이 이용하는 서비스가 되었다. 기존에는 의사거리 측정치를 활용한 m급의 측위만 가능하여 사용자들은 대략적인 본인의 위치해만을 서비스로 제공받는 것에 그쳤었다. 그러나 스마트폰 이용자들의 정밀 항법에 대한 수요가 높아짐에 따라 스마트폰 제조사들은 반송파 위상 측정치를 사용 가능하도록 duty-cycle을 조절 가능하도록 하는 등의 기능들을 추가하고 있으며 이중 주파수를 활용하기 위하여 L1 주파수 이외에도 L5 주파수 안테나 등을 탑재하고 있다.

그러나 스마트폰에 탑재된 GPS 안테나는 기존의 GPS 안테나보다 작은 공간에 탑재가 필요하므로 소형의 저가 안테나를 이용하고 있다. 이에 따라 반송파 위상 측정치를 제대로 수신하는데 어려움이 있어 L1 주파수의 측정치 품질이 저조하며 L5 주파수의 이용은 아직은 제한적이다. 그러므로 L1 주파수만을 이용하는 단일 주파수 정밀 항법을 수행하되 tracking이 자주 끊겨 발생하는 사이클 슬립을 잘 보상하여 사용할 필요가 있다.

또한 GPS 안테나는 신호가 수신되는 방향에 따라 신호 수신 위치가 차이가 있는데 스마트폰 GPS 안테나가 초저가이기 때문에 기존의 고가 안테나보다 그 차이가 크며 추정하고 보상하여야 스마트폰을 이용한 정밀 항법을 수행할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 스마트폰의 안테나 캘리브레이션을 직접 수행하여 스마트폰의 body frame에서 수신되는 신호의 방향에 따른

신호 수신 위치를 모델링 하였다. 이때 안테나 캘리브레이션을 수행하지 않은 채 사이클 슬립 보상 알고리즘을 전처리로만 사용하던 것을 iteration 기법을 사용하여 사이클 슬립 보상 정확도를 높이고 이에 따른 안테나 캘리브레이션 정확도도 높였다.

이외에도 스마트폰의 IMU에서 제공하는 자세 정보를 활용하여 스마트폰 단독으로 전방위에 대한 안테나 캘리브레이션을 적용하였으며 이를 활용하여 동적인 사용자가 안테나 캘리브레이션을 하여 보상된 측정치를 사용한 항법을 수행할 수 있도록 하였다.

캘리브레이션 수행 결과를 활용하여 CDGPS를 수행하였을 때, 수평 위치 오차가 기존보다 45% 개선되어 1.7cm, 수직 위치오차가 기존보다 75% 개선되어 2.3cm로 스마트폰 사용자가 안테나 캘리브레이션을 통하여 초정밀 항법을 수행하였다.

주요어 : 스마트폰, 안테나 캘리브레이션, 사이클 슬립, 정밀 항법
학번 : 2021-24470

목차

초 록.....	i
목차.....	iii
I. 서론.....	1
1.1 연구 배경 및 동기.....	1
1.2 기존 연구	2
1.3 연구 내용	4
1.4 연구 기여	5
II. GPS 안테나 캘리브레이션.....	7
2.1 GPS 안테나.....	7
2.2 Phase Center Offset 추정	9
2.3 Phase Center Variation 모델링.....	12
III. 스마트폰 GPS 안테나 캘리브레이션	14
3.1 스마트폰 GPS 측정치	14
3.2 스마트폰 Phase Center Offset 추정.....	17
3.3 스마트폰 Phase Center Variation 모델링	20
3.4 실측 실험 환경 및 결과.....	22
IV. 스마트폰 동적 주행 실험.....	37
4.1 CDGPS.....	37
4.2 실측 실험 환경 및 결과.....	40
V. 결 론.....	45
참고 문헌.....	47
Abstract.....	50

FIGURE I-1 안테나 캘리브레이션을 통한 수평 정확도.....	3
FIGURE I-2 화웨이 P30 PCV 모델링 결과.....	3
FIGURE II-1 CONICAL SPIRAL 안테나.....	7
FIGURE II-2 안테나 캘리브레이션 모식도.....	8
FIGURE III-1 PIF 안테나.....	15
FIGURE III-2 재현성 실험 측정치 수집 모식도 및 사진.....	23
FIGURE III-3 스마트폰 ARP 위치.....	23
FIGURE III-4 스마트폰 BODY FRAME.....	24
FIGURE III-5 S22+1 캘리브레이션 유효성.....	26
FIGURE III-6 S22+2 캘리브레이션 유효성.....	27
FIGURE III-7 S22+1 PCO/PCV S22+ 적용 결과.....	27
FIGURE III-8 CONVENTIONAL 캘리브레이션 오차 CASE.....	29
FIGURE III-9 ITERATION 알고리즘 적용 캘리브레이션 결과.....	30
FIGURE III-10 구간 선정 CONVENTIONAL 캘리브레이션.....	31
FIGURE III-11 구간 선정 ITERATION 적용 캘리브레이션.....	31
FIGURE III-12 전방위 측정치 수집 실험.....	32
FIGURE III-13 하프 사이클 슬립 보상.....	33
FIGURE III-14 전방위 PCV 모델링 결과 (3D).....	34
FIGURE III-15 CONVENTIONAL 알고리즘 PCV 모델링.....	34
FIGURE III-16 ITERATION 알고리즘 PCV 모델링.....	35
FIGURE III-17 ITERATION 후 전방위 모델링 적용 PCV.....	36
FIGURE IV-1 위성 항법 측정치 오차 요소.....	37
FIGURE IV-2 동적 주행 실험 환경 및 시나리오.....	41

FIGURE IV-3 POSITIONING 결과.....	42
FIGURE IV-4 POSITIONING 확대.....	42
FIGURE IV-5 POSITIONING 오차 분석.....	43
표 III-1 스마트폰 PCO 결과.....	25
표 III-2 ITERATION 알고리즘 적용 스마트폰 PCO 결과.....	29
표 IV-1 POSITIONING 위치 오차 RMS.....	44

I. 서론

1.1 연구 배경 및 동기

과거 일부 사용자들만 GPS 서비스를 이용하던 것과 달리 현재는 대부분의 사람들이 스마트폰 기반 GPS 서비스를 이용하고 있다. 대표적인 예시로 택시를 호출하며 본인의 위치를 보내기도하고 차량용 내비게이션 대신 운전 중에 스마트폰 내비게이션을 사용하기도 한다. 그런데 기존 스마트폰 방법에서는 의사거리 측정치만 이용 가능했기 때문에 m급 항법만 가능하여 택시를 길 건너편에서 호출했는지, 현재 운전중인 차선이 좌회전이 가능한 차선인지 등을 구분할 수 있는 정밀 항법에는 한계가 있었다.

그런데 스마트폰에서도 2016년 안드로이드 N이 업데이트 되며 사용자가 위치해를 얻는 것이 아닌 GPS 원시 측정치를 사용할 수 있게 되었다. 그러나 당시 스마트폰 배터리를 절약하기 위한 duty-cycle 기능은 GPS 센서를 꺼졌다가 켜졌다가를 반복하게 하여 반송파 위상 측정치를 활용할 수 없었다. 이후 2018년 안드로이드 P가 업데이트되어 duty-cycle 기능을 사용하지 않을 수 있게 되며 스마트폰으로 반송파 위상 측정치를 이용할 수 있게 되었다. 이에 따라 스마트폰에서 반송파 위상 측정치를 이용하여 정밀 항법을 수행하는 연구들이 활발히 이루어지고 있다.

본 연구는 스마트폰으로 정밀 항법을 수행할 때, 신호가 수신되는 방향에 따라 안테나에서의 수신 위치가 달라 정밀 항법에 한계가 있는 것을 보완하는 스마트폰 GPS 안테나 캘리브레이션 기법을 제안한다.

나아가 안테나 캘리브레이션 결과를 활용하여 실제로 동적 사용자가 정밀 항법을 수행할 수 있도록 적용하였다.

1.2 기존 연구

정밀 항법을 위한 GPS 안테나 캘리브레이션 연구는 정밀 항법을 위해서 필요성이 자명하기 때문에 고가 수신기에 대하여서는 기존에 다양한 연구가 수행되었다. 캘리브레이션 기법에 따른 성능 비교나 캘리브레이션 결과를 이용하여 자세 정보에 활용하는 연구 등이 진행되었다 [1]–[3].

그러나 2018년 이전까지 스마트폰에서의 반송파 측정치 사용이 제한적이었기 때문에 반송파 위상 측정치를 사용하는 연구는 그 이후에 활발히 이루어지고 있다[4]–[5]. 이에 따라 스마트폰의 정밀 항법을 위한 안테나 캘리브레이션 연구들은 기존에 고가 GPS 안테나에서 사용하는 로봇팔이나 software를 활용하여 스마트폰에 적용시킨 연구가 선행적으로 이루어졌다. 화웨이의 Mate20X의 안테나 캘리브레이션을 수행하여 network RTK를 수행한 결과는 아래의 그림과 같이 나타난다. 39건의 실험 중 미지정수가 고정된 19건은 청록색 점선으로 도시하였고 이때의 평균은 파란색 선으로 도시 되어있다. 이때 미지정수 결정이 평균적으로 142초 내에 이루어졌고 수평 위치 오차의 RMS는 1.6cm로 나타났다[6].

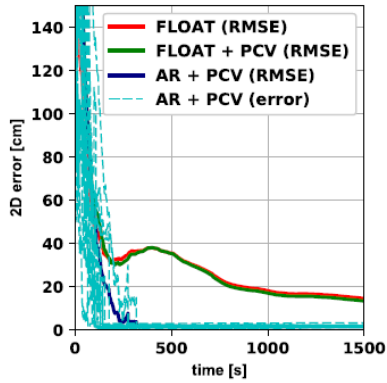


Figure I-1 안테나 캘리브레이션을 통한 수평 정확도

이외에 다른 연구에서는 화웨이 P30에 대하여 안테나 캘리브레이션을 수행하였는데 미지정수 결정에 성공한 경우에 대해 5분 경과하였을 때 위치 오차가 수 cm 수준으로 감소하고 60분 경과하였을 때 2cm 수준의 위치 오차를 나타내는 것을 확인하였다[7].

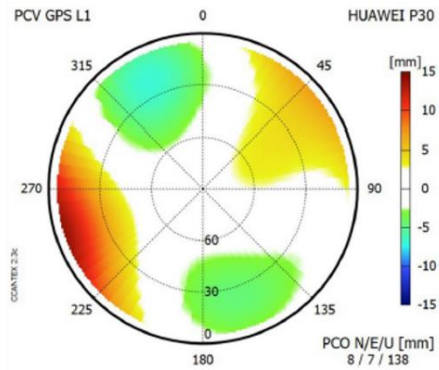


Figure I-2 화웨이 P30 PCV 모델링 결과

그러나 위와 같은 기존 연구들은 상용 캘리브레이션 software를 사용하여 캘리브레이션을 수행하였고 로봇 팔과 같은 고가의 별도의 장치를 활용하여 스마트폰의 자세를 구하거나 한 방향에 대하여서만 캘리브레이션을 수행하였다는 한계가 있다.

1.3 연구 내용

본 연구는 스마트폰을 이용한 초정밀 항법을 수행하기 위하여 이루어졌다. 기존의 고가 수신기에서는 안테나 캘리브레이션 정보를 제공하며 GPS 신호 수신에 적합한 안테나를 사용하므로 그 값이 작았다. 그러나 스마트폰에서는 안테나 캘리브레이션 정보를 제공하지 않으며 다른 통신용 안테나들과 함께 좁은 공간에 신기 위하여 초저가의 GPS 안테나를 이용한다. 따라서 신호 수신 방향에 따른 수신 위치의 차이가 기존 GPS 안테나보다 크게 나타난다.

스마트폰 GPS 안테나를 정밀하게 캘리브레이션 하기 위하여 반송파 위상 측정치를 활용하는데 스마트폰에서 L1 주파수만 수신 가능한 경우가 많고 L5 주파수가 수신되더라도 그 품질이 사용하기에 적합하지 않은 기기가 대다수이다[8]. 따라서 L1 단일 주파수를 활용하여 캘리브레이션을 수행해야한다. 그런데 스마트폰에서는 tracking이 끊기며 미지정수가 바뀌는 사이클 슬립이 빈번히 발생한다. 따라서 이를 L1 주파수만으로 검출하고 보상하여 사용하였다[9].

특정 저양각 위성에서 수신되는 신호의 경우 안테나 성분 에 의한 오차요소가 크게 나타나고 이는 미지정수 오결정을 야기할 정도로

커지는 일부 경우가 존재한다. 이를 고려한 사이클 슬립 보상 알고리즘을 제안하여 실제 측정치를 수집하여 안테나 캘리브레이션을 수행하였다.

또한 스마트폰 사용자의 특성을 고려하면 스마트폰은 매우 다양한 자세로 이용된다. 어떤 자세에서도 안테나 캘리브레이션 정보를 활용할 수 있기 위해서는 전방위에 대하여 안테나 캘리브레이션 정보를 활용할 수 있어야 한다. 따라서 스마트폰 내장 IMU의 자세 정보를 활용하여 스마트폰 단독으로 전방위 PCV 모델링을 수행하였다.

안테나 캘리브레이션을 적용하여 동적 사용자를 가정한 바퀴형 모바일 로봇에서 실측치를 수집하였고 CDGPS를 수행하여 사용자의 이동 궤적을 cm 수준으로 결정하는 방법이 가능함을 보였다.

1.4 연구 기여

본 연구가 최종적으로 달성하고자 한 것은 동적 스마트폰 사용자의 초정밀 항법이다. 이 과정에서 본 연구가 기여한 바는 다음과 같다. 첫째, 단일 주파수 기반 사이클 슬립 보상 과정에서 안테나 오차 성분이 큰 경우 일부 잘못 보상되는 문제를 해소하여 보다 더 정밀하게 안테나 캘리브레이션을 수행할 수 있는 강건한 iteration 알고리즘을 제안하였다. 이를 통하여 안테나 성분 오차가 크고 사이클 슬립이 빈번히 발생하는 저양각 위성에 대해 안테나 캘리브레이션 정밀도를 높였다. 둘째, 스마트폰의 사용자 특성을 고려하여 전방위 안테나 캘리브레이션을 수행하되 별도의 장비 없이 스마트폰 IMU

자세정보를 활용하여 스마트폰 단독으로 전방위에 대하여 안테나 캘리브레이션을 수행하였다.

실측 데이터를 수집하여 안테나 캘리브레이션 결과가 유효한지 확인하여 동일 기종 내에서 한번 도출한 안테나 캘리브레이션 정보를 이용하면 다른 기기에서도 사용 가능함을 확인하였으며 개별 캘리브레이션 결과의 유효성도 확인하였다.

또한 스마트폰의 동적 사용자에 대하여서도 스마트폰 내장 IMU 자세정보만을 활용하여 이미 수행된 캘리브레이션 정보를 활용할 수 있도록 하여 실제 동적 사용자에 대하여 초정밀 항법이 가능함을 보였다.

II. GPS 안테나 캘리브레이션

2.1 GPS 안테나

2.1.1 GPS 안테나 특징

GPS 수신기는 위성에서 방송된 신호를 수신하여 얻은 측정치를 활용하여 항법을 수행한다. 따라서 항법의 성능을 위해서는 수신기 자체의 성능과 신호를 수신하는 안테나의 성능 모두에 큰 영향을 미친다. 위성에서 방송하는 신호는 나선 형태의 RHCP (Right-Handed Circular Polarization) 편광 특성을 가진다. 위성 신호의 편광 특성을 고려하여 신호 수신에 적합하도록 GPS 안테나는 Conical Spiral 안테나를 사용한다[10].



Figure II-1 Conical spiral 안테나

2.1.2 GPS 안테나 캘리브레이션

정밀 항법에서는 위성에서 방송된 측정치를 활용하여 위성과 사용자 사이 거리를 구하여 사용자의 위치를 결정한다. 사용자의 위치를 한 점으로 결정하기 안테나의 한 특정 지점을 기준으로 삼을 필요가 있다. 이를 ARP (Antenna Reference Point)로 명명하며 위성 항법에서 사용자의 최종적인 위치가 된다. 그런데 신호가 실제로 수신되는 점 APC (Antenna Phase Center)는 ARP와 동일하지 않다. 또한 APC는 위성 신호가 수신되는 방향에 따라 차이가 있다. ARP와 APC의 평균점인 MPC (Mean Phase Center) 사이의 거리를 PCO (Phase Center Offset)이라 하며 MPC와 APC 사이의 거리를 PCV (Phase Center Variation)이라 한다. 그러므로 사용자의 기준 위치와 실제로 신호가 수신되는 위치의 차이는 PCO와 PCV의 합으로 나타난다. 이를 그림으로 도시하면 다음과 같다[11].

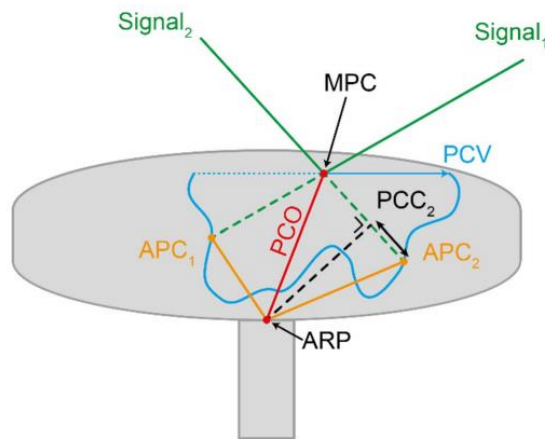


Figure II-2 안테나 캘리브레이션 모식도

PCO와 PCV를 구하고 보상하면 신호가 ARP와 다른 위치에서 수신되어 발생한 오차를 보상할 수 있으며 이를 위해 생성하는 보정 정보를 PCC (Phase Center Correction)이라고 한다.

PCC를 생성하고 보정하는 것을 GPS 안테나 캘리브레이션이라고 한다. 안테나 캘리브레이션은 실측치를 수집하여 신호가 수신되는 실제 위치 APC를 분석하여 수행된다.

2.2 Phase Center Offset 추정

안테나 캘리브레이션을 정밀하게 수행하기 위하여 반송파 위상 측정치를 사용하여 캘리브레이션을 수행한다. 반송파 위상 측정치에는 위성과 사용자 간의 거리 이외의 오차요소들이 있는데 이를 제거하여야 한다. 반송파 위상 측정치는 다음과 같은 식을 갖는다.

$$\phi = d + B - b - I + T + \lambda N + mp_{\phi} + \varepsilon_{\phi} \quad (2.2.1)$$

위 식에서 ϕ 는 반송파 위상 측정치를 의미하며, d 는 위성과 APC 사이 거리를, b , B 는 각각 위성과 수신기의 시계 오차를 의미하고, T 는 대류층 지연 오차를, I 는 전리층 지연 오차를 의미한다. 또한, mp_{ϕ} 는 멀티패스 오차를 의미하고, N 은 미지정수, λ 는 파장의 길이이며, ε 는 수신기 잡음을 의미한다.

상대 안테나 캘리브레이션 방법에서는 일반적으로 기준국 측정치와의 이중 차분을 활용하여 오차 요소들을 제거한다. 이는 아래의 식과

같다.

$${}^j\nabla_u^k\Delta_r\phi = {}^j\nabla_u^k\Delta_r d + \lambda {}^j\nabla_u^k\Delta_r N \quad (2.2.2)$$

식에서 위 첨자는 위성을, 아래 첨자는 사용자(u)와 기준국(r)을 의미한다. 이중 차분을 수행하면 시계 오차는 완전히 제거되며, 기선 거리가 짧으면 대기 지연 오차 요소인 전리층 지연 오차와 대류층 지연 오차도 제거가 가능하다. 다중 경로 오차와 잡음은 반송파 위상 측정치를 사용하므로 그 크기가 작아 무시하여 알고리즘을 진행한다. 위 식에서 d 는 위성과 APC 사이의 거리이므로 사용자에게 필요한 위성과 ARP 사이의 거리와 다르다. 따라서 이를 위성과 ARP 사이의 거리와 안테나 특성 보정정보로 나누어 나타내면 다음과 같다.

$${}^j\nabla_u^k\Delta_r\phi = {}^j\nabla_u^k\Delta_r d_{ARP} + \lambda {}^j\nabla_u^k\Delta_r N + {}^j\nabla_u^k\Delta_r PCC(\alpha, z) \quad (2.2.3)$$

$${}^j\nabla_u^k\Delta_r\phi = {}^j\nabla_u^k\Delta_r d_{ARP} + \lambda {}^j\nabla_u^k\Delta_r N + {}^j\nabla_u^k\Delta_r PCO + {}^j\nabla_u^k\Delta_r PCV(\alpha, z) \quad (2.2.4)$$

여기서 d_{ARP} 는 위성과 ARP 사이의 거리 PCC는 안테나 특성 보정정보이다. PCC는 PCO와 PCV에 의한 오차로 나눌 수 있는데 PCV 신호의 수신 방향에 따라 다르므로 위성 방향을 나타내는 α, z 를 포함하는 식으로 나타낼 수 있으며, 각각 위성의 양각과 천정까지의 각도(zenith)이다.

PCO는 ARP와 APC의 평균 위치 MPC와의 거리이므로 모든

방향에서 수신된 측정치를 활용하여 한번에 least square를 수행하면 APC들의 평균적인 MPC 위치를 도출할 수 있다. 따라서 PCV를 고려하지 않고 모든 측정치들을 적층하여 PCO를 추정한다[12]. 이때 기준국의 안테나 정보는 알고 있으므로 제거가 가능하므로 무시한다. 또한 ARP와 위성의 위치는 측량과 방송 궤도력을 이용하여 구할 수 있다[13]. 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$${}^j\nabla_u^k\Delta_r\phi = {}^j\nabla_u^k\Delta_r d_{ARP} + \lambda {}^j\nabla_u^k\Delta_r N + {}^j\nabla^k PCO \quad (2.2.5)$$

$${}^j\nabla_u^k\Delta_r z \triangleq {}^j\nabla_u^k\Delta_r\phi - {}^j\nabla_u^k\Delta_r d_{ARP} - \lambda {}^j\nabla_u^k\Delta_r N = {}^j\nabla^k PCO \quad (2.2.6)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} {}^1\nabla_u\Delta_r^{ref} \mathbf{z} \\ \vdots \\ {}^\mu\nabla_u\Delta_r^{ref} \mathbf{z} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -{}^1\nabla_u\Delta_r^{ref} \hat{e} \\ \vdots \\ -{}^\mu\nabla_u\Delta_r^{ref} \hat{e} \end{bmatrix} \bar{\mathbf{R}}_{PCO} \\ &\triangleq \bar{\mathbf{z}} \quad \quad \quad \triangleq \bar{\mathbf{H}} \end{aligned} \quad (2.2.7)$$

$$\bar{\mathbf{R}}_{PCO} = (\bar{\mathbf{H}}^T \bar{\mathbf{H}})^{-1} \bar{\mathbf{H}}^T \bar{\mathbf{z}} \quad (2.2.8)$$

위 식에서 최종적으로 얻은 $\bar{\mathbf{R}}_{PCO}$ 는 ARP와 MPC사이의 벡터이다.

2.3 Phase Center Variation 모델링

평균적인 신호 수신 위치를 구하였으므로 각 방향에 따른 신호 수신 위치를 구하는 것이 필요하다. 그런데 위성의 신호를 수신하면 하나의 측정치를 얻을 수 있는 반면 추정해야 하는 state는 MPC에서 APC 사이의 벡터이므로 두 위치 사이 3차원 벡터의 성분으로 3개이다. 측정치보다 추정해야 하는 state가 더 많기 때문에 모델링을 통하여 PCV를 구한다. PCV를 모델링할 때는 연속적이면서 전방위에 대하여 모델링이 가능하여야 하므로 일반적으로 구면 조화 함수 모델링을 수행한다[14].

PCO에 의한 오차 성분을 앞서 구한 보정정보로 보상한 후의 잔여 오차를 적층하여 모델링하면 MPC에서부터 실제 신호 수신 위치인 APC 사이의 위치 관계를 모델링할 수 있다.

$${}^j\nabla_u^k \Delta_r \delta z \triangleq {}^j\nabla_u^k \Delta_r z - {}^j\nabla^k PCO \quad (2.3.1)$$

$$\begin{bmatrix} {}^j\nabla_u^k \Delta_r \delta z \\ \vdots \\ {}^\mu\nabla_u^k \Delta_r \delta z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{R}_{PCV}^1 - \bar{R}_{PCV}^k \\ \vdots \\ \bar{R}_{PCV}^\mu - \bar{R}_{PCV}^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{n=1}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^{m_{\max}} [A_{nm} \{ {}^1\nabla_u^k (\cos(m \bullet \alpha) P_{nm}(\cos(z))) \}] + \sum_{n=1}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^{m_{\max}} [B_{nm} \{ {}^1\nabla_u^k (\sin(m \bullet \alpha) P_{nm}(\cos(z))) \}] \\ \vdots \\ \sum_{n=1}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^{m_{\max}} [A_{nm} \{ {}^\mu\nabla_u^k (\cos(m \bullet \alpha) P_{nm}(\cos(z))) \}] + \sum_{n=1}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^{m_{\max}} [B_{nm} \{ {}^\mu\nabla_u^k (\sin(m \bullet \alpha) P_{nm}(\cos(z))) \}] \end{bmatrix} \quad (2.3.2)$$

여기서 P_{nm} 은 정규화된 르장드르 함수이며 A_{nm}, B_{nm} 은 추정하고자 하는 모델링 계수이다. 또한 n, m, n_{\max} 은 각각 구면 조화 함수의 degree,

order와 차수이다. 이때 absolute term인 A_{00} 는 구할 수 없으므로 제외하고 추정한다. 따라서 천정에서 수집되는 신호는 잔여 오차가 없다고 제약 조건을 설정하여 모델링한다[15].

$$PCV(z = 0^\circ) = 0$$

$$0 = A_{00} \cos(0)P_{00}(\cos(0)) + \sum_{n=1}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^{m_{\max}} [A_{nm} \cos(0)P_{nm}(\cos(0)) + B_{nm} \sin(0)P_{nm}(\cos(0))]$$

$$A_{00} = - \sum_{n=1}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^{m_{\max}} [A_{nm} P_{nm}(\cos(0))] \quad (2.3.3)$$

PCV 모델링 수행을 통하여 PCO, PCV 모두 구하였으므로 신호 수신 방향에 따라 PCC를 생성하여 보상할 수 있다. 따라서 모든 신호가 ARP에서 수신된 것처럼 측정치를 보정하여 사용할 수 있다. 이는 정밀 항법 수행 시 위치가 한 점으로 결정될 수 있도록 한다.

III. 스마트폰 GPS 안테나 캘리브레이션

3.1 스마트폰 GPS 측정치

3.1.1 스마트폰 GPS 수신 특성

스마트폰은 위성 항법만을 위한 기기가 아니고 휴대성을 위하여 그 크기가 작기 때문에 GPS 안테나에 제약이 발생한다. 먼저 Bluetooth 안테나, LTE (Long Term Evolution) 안테나, Wi-Fi (Wireless Fidelity) 안테나 등의 다양한 통신을 위한 안테나들과 함께 탑재되기 때문에 가시성이 가장 좋은 위치에 GPS 안테나를 위치시킬 수 없다. 크기도 작아야 하므로 일반적인 GPS 안테나에 사용되는 conical spiral 안테나를 사용할 수 없고 PIFA (Planar Inverted F-Antenna)를 이용하게 된다[16]. 이는 위성 방송 신호의 편광 특성과 달리 직선 편광으로 신호를 수신한다. 따라서 위성 신호의 품질이 GPS 수신기에 비하여 저조하다. 수신되는 신호의 세기가 낮으며 잡음 수준이 크게 나타난다[17]. 이는 반송파 위상 측정치에서 tracking이 자주 끊기는 현상으로 이어진다.



Figure III-1 PIF 안테나

3.1.2 사이클 슬립 검출 알고리즘

반송파 위상 측정치는 미지정수를 포함하고 있다. 그런데 정수성을 띄는 상수로 유지되어야 하는 미지정수가 수신기의 tracking이 끊기게 되면 다시 tracking이 시작되었을 때, 그 값이 바뀌게 된다[18]. 이 같은 현상은 사이클 슬립이라고 하며 해당 측정치를 사용할 수 없게 된다. 따라서 사이클 슬립 발생 측정치는 사이클 슬립을 검출하고 보상하여 사용해야한다. 일반적으로 사이클 슬립을 검출하고 보상하는 방법은 이중 주파수 측정치를 활용하여 선형 결합을 통해 검출한다. 대표적인 측정치 조합 방법으로는 Geometry-free 조합, Ionosphere-free 조합, Melbourne-wübbena 조합이 있다[19]-[20]. 세 조합은 각각의 장단점이 있으므로 모든 조합을 활용하여 사이클 슬립을 검출한다.

스마트폰에서는 이중 주파수 측정치를 활용하기가 제한된다. 제조사들이 기존의 L1 주파수 이외에 L5 주파수가 수신되는 스마트폰을 제공하기 시작하였으나 신호의 품질이 좋지 못하여 실질적으로 사용하기에는 어려운 상황이다. 따라서 사이클 슬립 검출을 L1 단일 주파수만을 활용하여 할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 L1 주파수의 이중 차분 반송파 위상 측정치를 시간차분하여 monitoring value로 활용하였다[21]. 이때 앞선 장에서 살펴본 바와 같이 시계 오차는 완전히 제거되고 대기 지연 오차 성분은 무시 가능한 정도로 작기 때문에 이를 제외한 식은 다음과 같다.

$$\delta_i({}^j\nabla_{\mu}^k\Delta_r\phi) = \delta_i({}^j\nabla_{\mu}^k\Delta_r d) + \lambda\delta_i({}^j\nabla_{\mu}^k\Delta_r N) + \delta_i({}^j\nabla_{\mu}^k\Delta_r mp_{\phi}) + \delta_i({}^j\nabla_{\mu}^k\Delta_r \varepsilon_{\phi}) \quad (3.1.1)$$

이때, 다중 경로 오차나 잡음은 반송파 위상 측정치에서 그 값이 매우 작으므로 특정 임계값 이상으로 나타나지 않는다. 거리 항은 측량을 통하여 제거하면 사이클 슬립이 없는 일반적인 상황에서는 monitoring value의 값이 0에 가까운 값으로 나타난다. 사이클 슬립 발생 시 파장의 정수배만큼의 monitoring value의 값이 크게 튀어 해당 epoch에서 사이클 슬립이 발생한 것을 검출할 수 있다. 이때의 threshold는 반파장으로 설정하여 미지정수가 1 변한 사이클 슬립도 검출할 수 있도록 한다.

단일 주파수 측정치를 이용하여 미지정수를 결정할 때 미지정수는 그 값이 변하지 않으며 정수성을 띄기 때문에 측정치들을 모아 평균적인

미지정수를 결정할 수 있다.

$$\nabla\Delta\hat{N} = \text{round}\left(\frac{\nabla\Delta\phi - \nabla\Delta d}{\lambda}\right) \quad (3.1.2)$$

사이클 슬립을 검출하지 못한다면 모든 측정치들을 모아 평균적인 미지정수를 결정할 때 잘못된 미지정수로 결정된다. 따라서 검출된 사이클 슬립 발생 이전까지의 epoch들을 모아 평균적인 미지정수를 결정하고 사이클 슬립 이후의 epoch들을 모아 미지정수를 별도로 결정하게 된다. 이는 사이클 슬립 이후의 측정치들이 사이클 슬립이 보상된 측정치로 사용할 수 있도록 한다.

3.2 스마트폰 Phase Center Offset 추정

스마트폰에서는 사이클 슬립이 빈번하게 발생하면서 단일 주파수만을 이용할 수 있으므로 앞선 장에서 제시한 방식대로 사이클 슬립이 보상된 반송파 위상 측정치를 이용하여 PCO를 추정한다. 측정치가 제대로 보상되었다면 스마트폰에서도 고가의 GPS 안테나와 동일한 알고리즘으로 PCO를 추정할 수 있다. 그런데 일부 저양각 위성에서 수신된 신호들은 PCO나 PCV 같은 안테나 오차 성분이 크게 나타난다. 안테나 오차 성분이 커서 미지정수의 반과장을 넘는 측정치들이 연속적으로 수신되다가 사이클 슬립이 발생할 경우 해당 측정치들의 평균을 통해 결정하는 미지정수는 반올림 과정에서 실제 미지정수와 1만큼 차이 나는 미지정수로 잘못 결정될 수 있다. 이를

식으로 나타내면 아래와 같다.

$$\begin{aligned}
& {}^j \nabla_u \Delta_r^{ref} \phi = \nabla \Delta d_{ARP} + \lambda \nabla \Delta N + \nabla \Delta PCC(\alpha, z) \\
\nabla \Delta \hat{N} &= round\left(\frac{\nabla \Delta \phi - \nabla \Delta d_{ARP}}{\lambda}\right) \neq round\left(\frac{\nabla \Delta \phi - \nabla \Delta d_{ARP} - \nabla \Delta PCC(\alpha, z)}{\lambda}\right) = \nabla \Delta N \\
& \{if |\nabla \Delta PCC(\alpha, z)| \geq \frac{\lambda}{2}\} \tag{3.2.1}
\end{aligned}$$

따라서 위와 같이 잘못 결정된 일부 미지정수를 이용하여 PCO 추정을 위한 측정치 z 를 결정하면 PCO에 오차가 발생한다.

$${}^j \nabla_u^k \Delta_r z \triangleq {}^j \nabla_u^k \Delta_r \phi - {}^j \nabla_u^k \Delta_r d_{ARP} - \lambda {}^j \nabla_u^k \Delta_r \hat{N} \neq {}^j \nabla^k PCO \tag{3.2.2}$$

앞선 장에서 살펴본 바와 같이 해당 측정치를 적층하여 least square를 이용하여 한번에 PCO를 추정하므로 일부 미지정수가 오결정된 측정치를 제외하면 적합한 측정치이므로 PCO 참값에 가깝게 PCO를 추정할 수 있다. 해당 벡터를 $\bar{R}_{PCO,0}$ 라고 하면 이는 MPC 참값이 아니지만 ARP보다는 MPC와 가까운 MPC_0 를 구할 수 있다. 따라서 해당 지점을 ARP같이 이미 알고 있는 위치로 활용할 수 있다. 이때 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$${}^j \nabla_u \Delta_r^{ref} \phi = \nabla \Delta d_{MPC,0} + \lambda \nabla \Delta N + \nabla \Delta PCC_{MPC,0}(\alpha, z) \tag{3.2.3}$$

따라서 위 식에서 안테나 오차 성분 $PCC_{MPC,0}$ 는 기존의 ARP에서 포함된 PCC 보다 그 값이 작아진다. 이와 같이 안테나 오차 성분이 감소한 상황에서 미지정수를 새로 결정하면 다음과 같다.

$$\nabla\Delta\hat{N} = \text{round}\left(\frac{\nabla\Delta\phi - \nabla\Delta d_{MPC,0}}{\lambda}\right) \neq \text{round}\left(\frac{\nabla\Delta\phi - \nabla\Delta d_{MPC,0} - \nabla\Delta PCC_{MPC,0}(\alpha, z)}{\lambda}\right) = \nabla\Delta N$$

$$\left\{ \text{if } \left| \nabla\Delta PCC_{MPC,0}(\alpha, z) \right| \geq \frac{\lambda}{2} \right\} \quad (3.2.4)$$

$PCC_{MPC,0}$ 가 $\frac{\lambda}{2}$ 보다 큰 절대값을 갖는 경우가 줄어들기 때문에 $\nabla\Delta\hat{N}$ 이 제대로 결정되는 비율이 높아진다. 제대로 결정된 미지정수의 비율이 더 증가한 측정치들을 이용하여 MPC_0 와 MPC 사이의 벡터인 새로운 PCO를 추정할 수 있으며 이를 $\delta\bar{R}_{PCO,1}$ 이라고 하면 ARP와 새로 추정한 MPC 사이의 벡터는 $\bar{R}_{PCO,0} + \delta\bar{R}_{PCO,1}$ 로 구할 수 있다. 위의 과정을 반복하여 iteration을 수행하면 ARP와 MPC 사이의 벡터인 \bar{R}_{PCO} 를 보다 더 정밀하게 구할 수 있으며 해당 벡터를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\bar{R}_{PCO} = \bar{R}_{PCO,0} + \delta\bar{R}_{PCO,1} + \delta\bar{R}_{PCO,2} + \dots \quad (3.2.5)$$

이때 iteration은 n번째 $\delta\bar{R}_{PCO}$ 인 $\delta\bar{R}_{PCO,n}$ 가 측정치 잡음 수준 이내로 들어오면 loop를 벗어나도록 한다.

3.3 스마트폰 Phase Center Variation 모델링

3.3.1 스마트폰 IMU 이용 전방위 PCV 모델링

스마트폰에서 PCV를 모델링 할 때, 측정치 잔여 오차에 대하여 PCV를 모델링하는 것은 기존의 방식과 동일하게 구면 조화 함수로 수행한다. 본 연구에서는 선행 연구들에서 일반적으로 수행하듯이 구면 조화 함수의 차수는 8차로 설정하였다[22].

스마트폰 이용자는 스마트폰을 들고 움직이며 기기의 자세를 매우 자유롭게 바꿔가며 사용한다는 특징이 있다. 따라서 본 연구에서는 안테나 캘리브레이션을 한 자세에 대하여 수행하지 않고 스마트폰의 여러 자세에서 수집된 측정치를 모두 이용하여 스마트폰의 전방위에 대한 PCV 모델링을 수행하였다. 이때 별도의 장비 없이 스마트폰 내장 IMU에서 제공하는 자세 정보를 활용하여서 스마트폰 body frame에서의 위성의 방향을 구할 수 있다.

그런데 스마트폰 안테나가 linear polarization되어 있으므로 스마트폰이 똑바로 선 형태가 아닌 경우 측정치 품질이 급격히 떨어지는 문제가 발생한다. 따라서 스마트폰을 눕힌 채 측정치를 수집할 때, 하프 사이클 슬립 같이 반송파의 반파장 정도 측정치가 튀는 현상이 자주 발생한다. 이를 보상하여 사용하지 않으면 사용 가능한 측정치가 매우 부족한 현상이 발생한다. 따라서 반파장의 측정치가 튀는 현상을 보상하는 알고리즘을 적용하여야 스마트폰 전방위에 대한 PCV 모델링을 수행할 수 있다.

3.3.2 하프 사이클 슬립 보상 알고리즘

기존의 사이클 슬립 보상 알고리즘에서는 시간 차분을 수행하여 monitoring value가 미지정수가 변할 때 급격히 변하며 threshold인 반과장을 넘는 것을 검출하였다. 거의 동일한 방법으로 하프 사이클 슬립을 검출하고자 하면 시간 차분을 수행한 측정치가 $\frac{1}{4}$ 과장을 넘는지 확인하는 방법을 제안할 수 있다.

$$\delta_t(j\nabla_r \Delta_u^{ref} \tilde{\phi}) = \nabla \Delta \tilde{\phi}_t - \nabla \Delta \tilde{\phi}_{t-1} = \nabla \Delta \tilde{N} \lambda_\phi + \delta_t(\nabla \Delta \epsilon_\phi) \quad (3.3.1)$$

해당 그러나 threshold를 $\frac{1}{4}$ 과장으로 설정한다면 스마트폰 같이 측정치 자체의 잡음이 큰 경우 잡음과 하프 사이클 슬립이 섞여 이를 검출하기 어렵다. 따라서 안테나 캘리브레이션과 같이 장시간 측정치를 수집하여 후처리로 그 측정치를 활용하는 경우에는 outlier를 검출하는 방식으로 하프 사이클을 검출 및 보상할 수 있다. 해당 알고리즘으로는 주변 n개 epoch의 이중 차분 잔여 오차의 평균과 해당 epoch에서의 이중 차분 잔여 오차를 비교하여 검출할 수 있다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{(j\nabla_r \Delta_u^{ref} \tilde{\phi}_{t-n} + \dots + j\nabla_r \Delta_u^{ref} \tilde{\phi}_{t-1} + j\nabla_r \Delta_u^{ref} \tilde{\phi}_{t+1} + \dots + j\nabla_r \Delta_u^{ref} \tilde{\phi}_{t+n})}{\# \text{ of epochs}} = \nabla \Delta \tilde{N} \lambda_\phi + \nabla \Delta \epsilon_\phi \quad (3.3.2)$$

확인하고자 하는 epoch의 이중 차분 잔여 오차가 주변 epoch들의 평균보다 $\frac{1}{2} \times \frac{7}{10}$ 파장 이상 크면 outlier라 판단하여 이를 $\frac{1}{2}$ 파장만큼 보상하였다. 이때, $\frac{7}{10}$ 은 경험적인 값으로 threshold를 설정하였다.

3.4 실측 실험 환경 및 결과

3.4.1 재현성 확인 실측 실험 환경 및 결과

본 실험에서는 동일 스마트폰 기종에서의 안테나 캘리브레이션 재현성을 확인하기 위하여 갤럭시 S22+ 2대를 이용하여 실험하였다. 다중경로 오차를 최소화하기 위하여 장애물이 적은 건물 옥상에서 실험을 수행하였다. 스마트폰으로 반송파 위상 측정치를 수집하며 두 스마트폰으로부터 1m이내로 떨어진 기선 거리를 갖는 기준국 데이터로 Trimble NetR9 수신기와 Tallysman VP6000 안테나를 이용하였다. 이때 위성의 inclination angle로 인하여 북쪽 구역에서는 측정치가 수집되지 않으므로 아래의 그림과 같이 스마트폰을 회전시켜가며 전 구역에 대한 측정치를 수집하였다. 회전은 6시간마다 90도씩 회전시키며 24시간동안 측정치를 수집하였다.

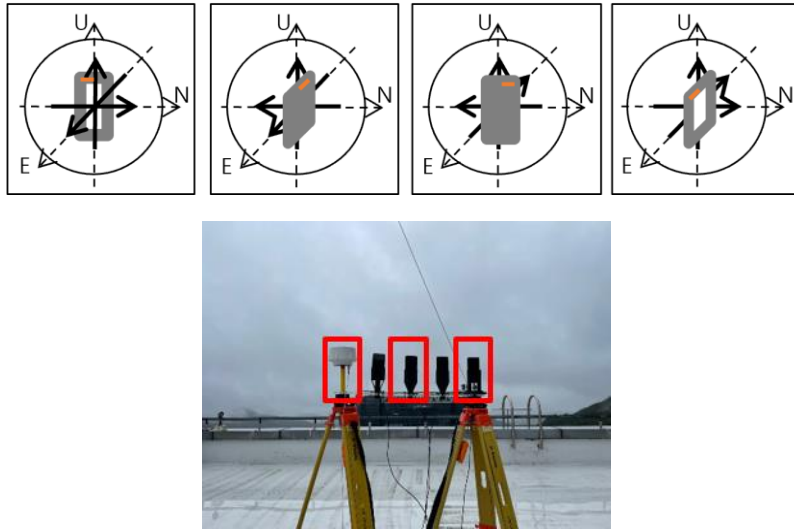


Figure III-2 재현성 실험 측정치 수집 모식도 및 사진

스마트폰 사용자가 명확히 위치를 알 수 있는 스마트폰 하단 중심 위치를 ARP로 설정하여 안테나 캘리브레이션을 수행하였다[5].



Figure III-3 스마트폰 ARP 위치

두 대의 S22+를 각각 S22+1, S22+2라고 명명하고 ARP 원점으로 하여 액정방향을 x축, 상단 방향을 z축이라 하고 오른손 법칙에 따라 y축을 설정하면 다음의 그림과 같이 스마트폰의 body frame을 설정할 수 있다.

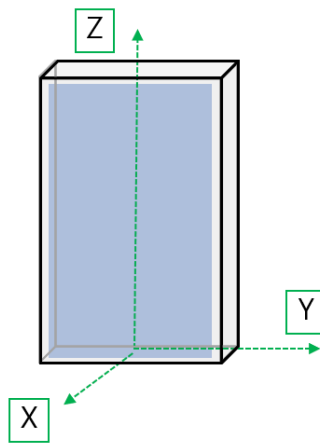


Figure III-4 스마트폰 body frame

이때 S22+1의 PCO는 x축 방향으로 -0.28cm , y축 방향으로 0.10cm , z축 방향으로 12.71cm 로 추정할 수 있으며, S22+2의 PCO는 x축 방향으로 -0.17cm , y축 방향으로 -0.11cm , z축 방향으로 11.65cm 로 구해진다. 이를 표로 도시하면 다음과 같다.

표 III-1 스마트폰 PCO 결과

방향	S22+1	S22+2	차이
X축	-0.11cm	-0.14cm	-0.03cm
Y축	-0.06cm	0.02cm	0.08cm
Z축	10.1cm	8.4cm	-1.7cm

남은 잔여 오차에 대하여 구면 조화 함수로 모델링하여 PCV를 모델링하였다. 해당 결과의 유효성과 재현성을 확인하기 위하여 이중 차분 잔여 오차 분석을 수행하였다.

이중 차분을 통하여 안테나 오차요소만 남기고 다른 오차 요소들을 제거한다. 이후에 추정된 PCO, 모델링한 PCV를 차례대로 보상하였을 때 최종적인 잔여 오차는 잡음 수준만 남는 것을 확인하여 안테나 캘리브레이션이 유효한지 확인할 수 있다. 이를 식으로 확인하면 다음과 같다.

$${}^j_u \nabla \Delta_r^{ref} \phi - \nabla \Delta d_{ARP} + \lambda \nabla \Delta N = \nabla \Delta PCC(\alpha, z) + \nabla \Delta \varepsilon_\phi \quad (3.4.1)$$

$$\begin{aligned} & {}^j_u \nabla \Delta_r^{ref} \phi - \nabla \Delta d_{ARP} - \lambda \nabla \Delta N - \nabla \Delta P\hat{C}C(\alpha, z) \\ & = \nabla \Delta PCC(\alpha, z) - \nabla \Delta P\hat{C}C(\alpha, z) + \nabla \Delta \varepsilon_\phi \end{aligned} \quad (3.4.2)$$

먼저 S22+1의 유효성 확인 결과를 제시하면 다음과 같다.

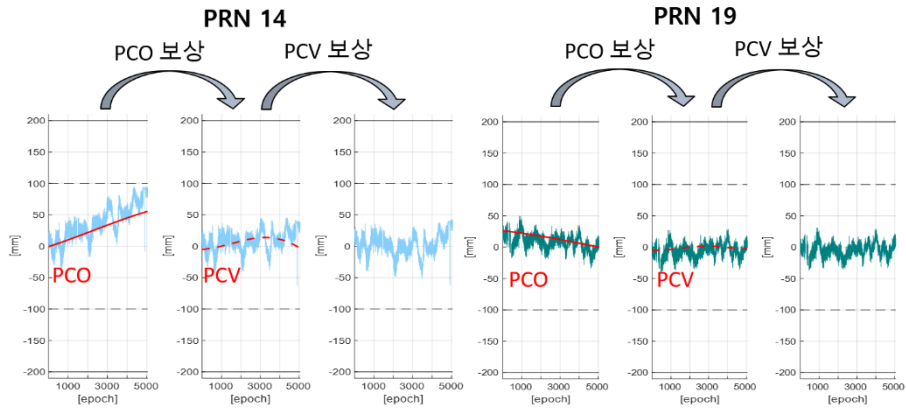


Figure III-5 S22+1 캘리브레이션 유효성 (좌)저양각 (우)고양각

저양각의 14번 위성과 고양각의 19번 위성 모두에서 PCO 추정이 잘 이루어지고 전체 측정치에 대하여 수행한 모델링 결과를 보상하였을 때 잔여 오차의 RMSE가 감소하며 반송파 위상 측정치의 반파장 내에 bound되는 것을 확인할 수 있다.

동일한 위성에 대하여 S22+2의 유효성 확인 결과를 제시하면 다음과 같다.

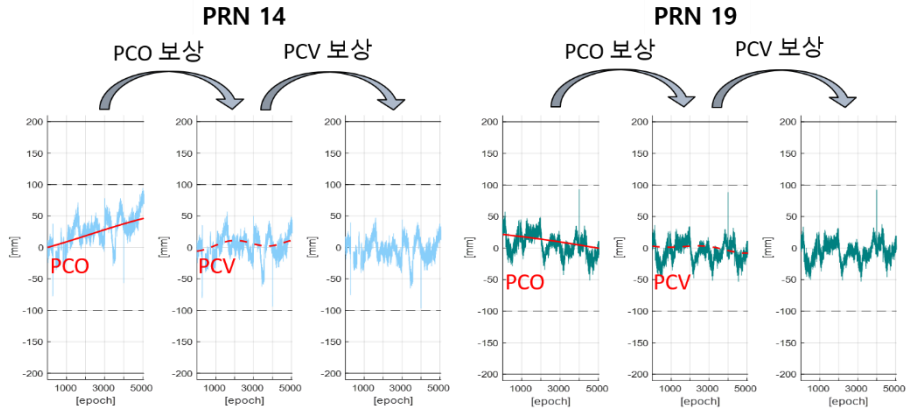


Figure III-6 S22+2 캘리브레이션 유효성 (좌)저양각 (우)고양각

해당 기기의 유효성 확인 결과도 PCO 추정과 PCV 모델링이 잘 이루어져 잔여 오차의 RMSE가 감소하며 반송파의 반파장 이내로 bound되는 것을 확인할 수 있다.

두 기기 간의 재현성 확인을 위하여 앞서 도출한 S22+1의 PCO와 PCV로 S22+2를 보정한 결과를 제시하면 다음과 같다.

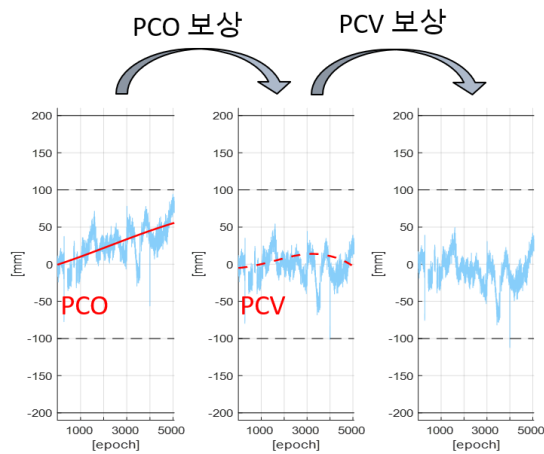


Figure III-7 S22+1 PCO/PCV S22+ 적용 결과

해당 결과 또한 잔여 오차의 RMSE가 감소하고 반송파의 반파장 이내로 bound되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 하나의 기기에 대한 PCO와 PCV를 추정된 결과로 다른 기기에 대한 안테나 캘리브레이션이 가능한 것을 확인하였다. PCO 보상 이전에 46.5mm의 잔여 오차 RMSE를 갖던 S22+2가 PCO 보상 이후 31.5mm로 PCV 보상 이후 26.4mm로 잔여 오차가 감소하며 안테나 오차성분이 제거된 것을 확인할 수 있다.

3.4.2 Iteration algorithm 검증 실험 환경 및 결과

앞서 측정치 이중 차분 잔여 오차를 확인하면 PCO에 의해서 bias와 drift가 결합된 형태의 오차가 발생하는 것을 알 수 있다. 특히 저양각 위성에 대하여 drift의 크기가 크게 나타나며 장시간 측정치를 수집할 경우 PCO에 의한 오차가 점점 증가하여 반송파의 반 파장을 벗어날 수 있다. 그런데 저양각 위성의 신호는 사이클 슬립 발생 빈도가 높은 것으로 알려져있다[20].

PCO에 의해서 반파장을 벗어난 측정치에서 사이클 슬립이 발생할 경우 앞선 장에서 수식으로 확인한 바와 같이 미지정수가 잘못 결정되는 문제가 발생할 수 있다. 따라서 iteration을 통하여 PCO에 의한 영향이 작게 하여 미지정수를 추정할 수 있도록 한다. 그 결과 PCO에 의한 영향이 작아질수록 미지정수가 제대로 결정되고, 미지정수가 제대로 결정될수록 MPC에 가까운 위치를 구할 수 있다. 따라서 iteration을 수행하여 추정된 S22+1, S22+2의 PCO를 표로 나타내면 다음과 같다.

표 III-2 Iteration 알고리즘 적용 스마트폰 PCO 결과

방향	S22+1	S22+2	차이
X축	-0.28cm	-0.17cm	0.11cm
Y축	0.10cm	-0.11cm	-0.21cm
Z축	12.71cm	11.65cm	-1.06cm

기존 방식과 동일하게 도출한 PCO를 보상하고 남은 잔여 오차에 대하여 PCV로 모델링을 수행하였다.

안테나 캘리브레이션의 유효성을 확인하기 위하여 동일하게 이중 차분 잔여 오차 분석을 수행하였다.

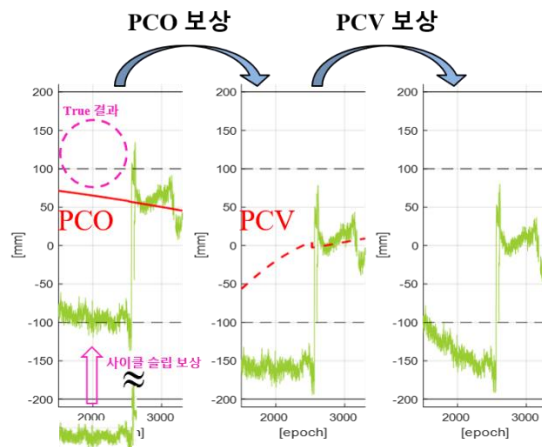


Figure III-8 Conventional 알고리즘 캘리브레이션 오차 case

기존의 방식에서 미지정수가 잘못 보상된 측정치를 도시하면 위와 같다. 동일한 측정치에 대하여 PCV 모델링 이전에 iteration을 통하여 사이클 슬립 보상과 δPCO 보상을 수행하면 다음의 결과를 얻을 수 있다.

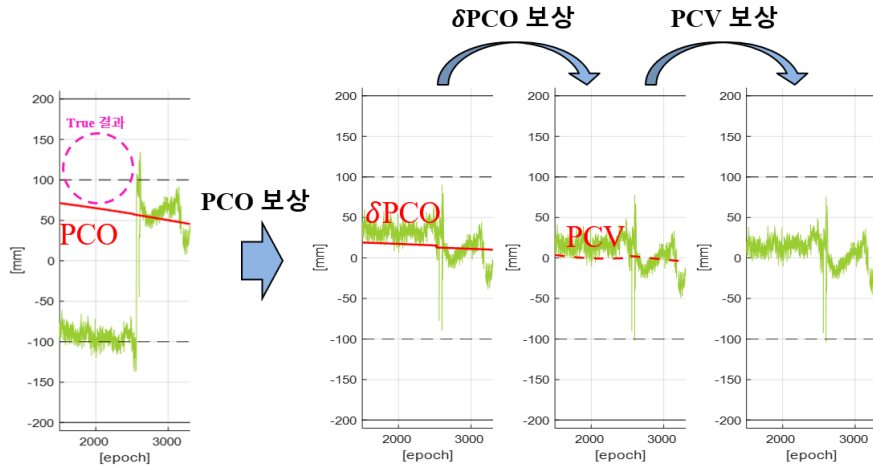


Figure III-9 Iteration 알고리즘 적용 캘리브레이션 결과

위 결과를 통하여 일부 측정치에서 PCO에 의한 오차 요소가 크며 사이클 슬립이 동시에 일어나는 문제 상황에 대해서 이중 차분 잔여 오차의 RMSE가 보상 후에 더 증가하며 반과장을 넘는 것을 해결한다. 따라서 해당 알고리즘을 통하여 PCO를 보다 더 잘 추정하며 이에 따라 PCV 모델링도 제대로 수행할 수 있는 것을 확인할 수 있다.

S22+1의 30분의 구간을 선정하여 두 알고리즘 결과를 비교 도시하면 다음과 같다. 먼저 기존 알고리즘을 수행하였을 때 저양각 위성에 대하여 PCV 모델링이 잘못 수행되어 PCV 보상 이후에 RMSE가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

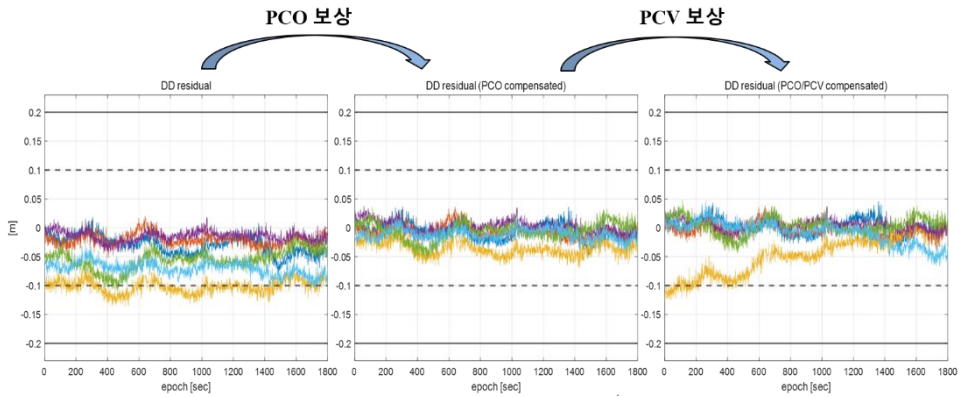


Figure III-10 구간 선정 conventional 알고리즘 캘리브레이션

이후에 동일 측정치에 대하여 제안하는 알고리즘을 통해 PCO와 PCV 보상을 수행한 결과이다. 일부 저양각 영역에 대하여 PCV 모델링이 잘못 이루어지던 부분이 해소되며 RMSE가 PCO보상 이전에 5.9cm, PCO보상 후에 1.5cm, PCV 보상 후에 1.4cm로 개선되는 결과를 통해 그 유효성을 확인하였다.

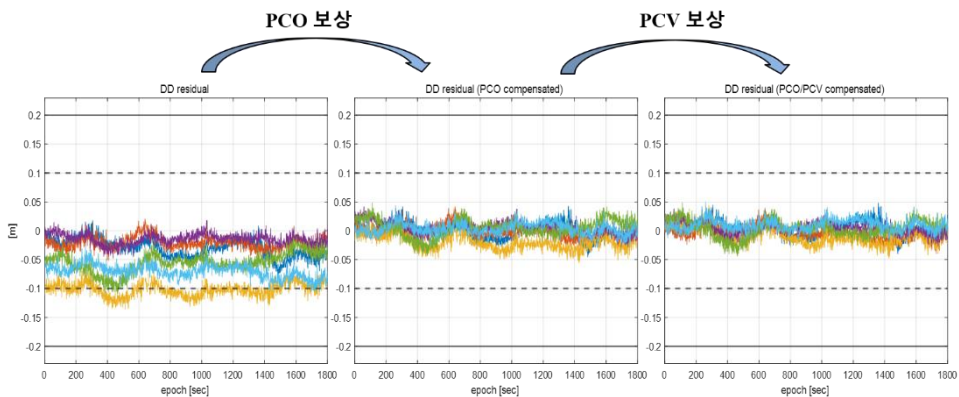


Figure III-11 구간 선정 iteration 알고리즘 적용 캘리브레이션

3.4.3 스마트폰 전방위 PCV 모델링 실험 환경 및 결과

전방위 PCV 모델링을 수행하기 위해 스마트폰의 자세를 다양하게 하여 한 자세당 6시간씩 측정치를 수집하였다.

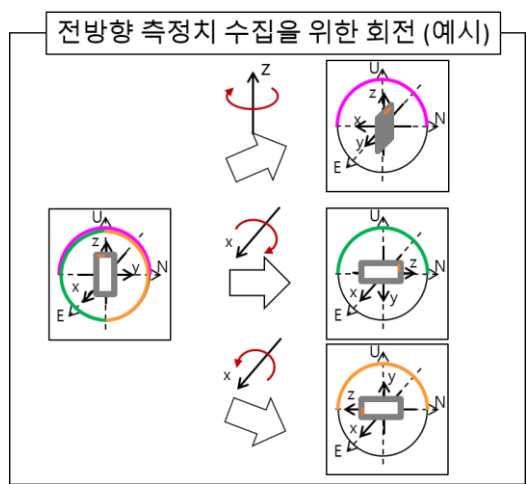


Figure III-12 전방위 측정치 수집 실험 사진(위) 모식도(아래)

스마트폰이 누운 자세로 측정치를 수집하였을 때 특정 구간에서는 하프 사이클 슬립이 매우 빈번하게 발생하여 해당 구간에 대한 PCV

모델링이 불가하였다. 이를 앞선 장에서 설명한 하프 사이클 슬립 보상 알고리즘을 적용하여 다음과 같이 측정치 수를 확보할 수 있다. 이를 도시하면 다음과 같다.

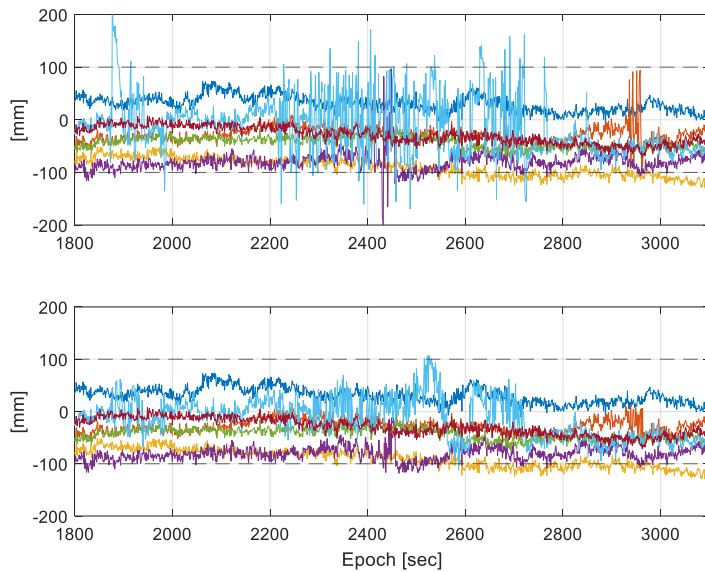


Figure III-13 하프 사이클 슬립 보상 적용 전(위) 적용 후(아래)

위와 같이 특정 방향에 대한 측정치 개수가 부족한 현상을 해소하여 전방위에 대한 PCV 모델링을 수행한다.

PCV 전방위 모델링을 수행할 때 ENU 좌표계에서의 스마트폰의 자세를 스마트폰의 IMU를 이용하여 구하고, 위성의 ENU 좌표계에서의 위치를 알고 있으므로 스마트폰에 대한 위성의 방향을 구할 수 있다. 이를 활용하여 실제로 PCV를 구면 조화 함수로 모델링한 결과는 다음과 같다.

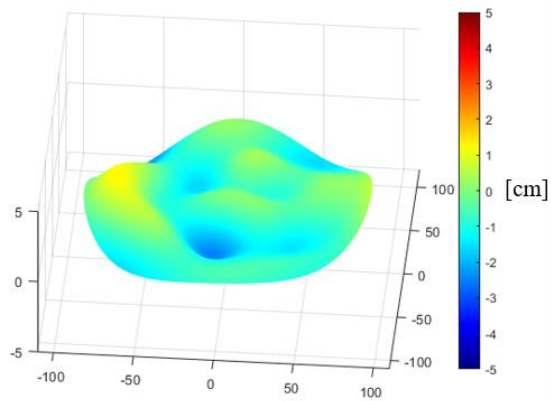


Figure III-14 전방위 PCV 모델링 결과 (3D)

이를 기존의 PCV 모델링 결과들의 위에서 바라본 결과를 비교하면 다음과 같다. 먼저, iteration 알고리즘을 적용하지 않은 PCV 모델링 결과는 아래의 그림과 같다.

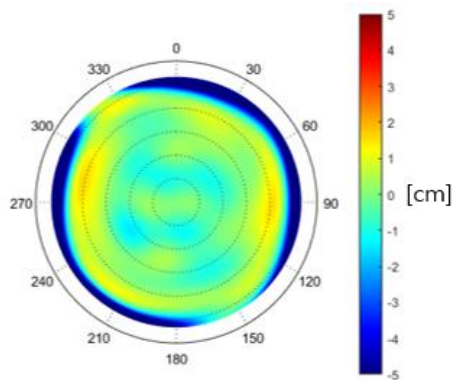


Figure III-15 Conventional 알고리즘 PCV 모델링 (top view)

이는 저양각 위성들에 대하여 모델링이 수행되지 않았고 일부 저양각 위성에 대한 모델링은 그 값이 매우 크게 나타나며 최대 20cm로 스마트폰의 물리적 크기보다 훨씬 크게 나타난다.

다음으로 iteration 알고리즘을 수행한 결과를 제시하면 다음과 같이 도시할 수 있다.

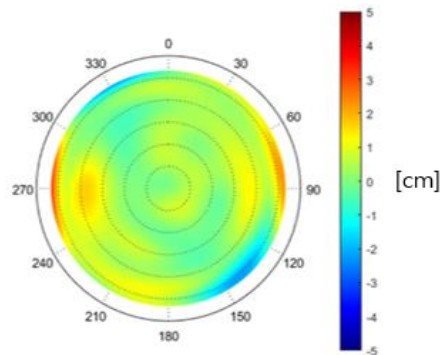


Figure III-16 Iteration 알고리즘 PCV 모델링 (top view)

이는 스마트폰이 똑바로 선 자세에 대한 측정치만 수집하였으므로 저양각 위성에 대하여 모델링을 하지 못한다. 다만 사이클 슬립과 안테나 성분 오차가 결합되어 저양각 위성 측정치에 대하여 PCV 모델링이 잘못 이루어지던 것을 해결하였다.

최종적으로 앞서 도시한 전방위 PCV 모델링 결과를 위에서 바라본 형태로 다시 도시하면 다음과 같이 나타난다.

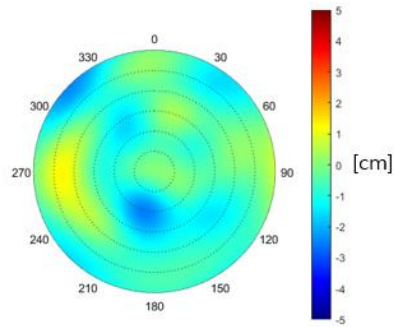


Figure III-17 Iteration 후 전방위 모델링 적용 PCV (top view)

저양각 방향에 대하여서도 모델링이 수행되어 흰색으로 나타나는 모델링 음영 지역이 존재하지 않으며 전 방위에 대하여 모델링 결과를 얻을 수 있다.

IV. 스마트폰 동적 주행 실험

4.1 CDGPS

4.1.1 보강 항법 알고리즘 개요

위성 항법을 수행하기 위하여 위성에서 방송된 신호를 사용자가 수신하여 사용한다. 사용자가 수신한 측정치에는 우주 부분과 사용자 부분에서 오차 요소가 포함되어 있다. 우주 부분 오차 요소로는 궤도 오차와 시계 오차 등이 있다. 또한 신호가 대기를 통과하며 지연이 발생하게 되는데 전리층과 대류층에서 지연이 발생하여 전리층 지연 오차와 대류층 지연 오차가 발생한다. 사용자 부분의 오차 요소로는 신호가 사용자에게 직접 수신되지 않고 다른 지형 지물 등에 반사되는 등의 요인으로 발생하는 다중 경로 오차와 수신기 잡음 등이 있다.

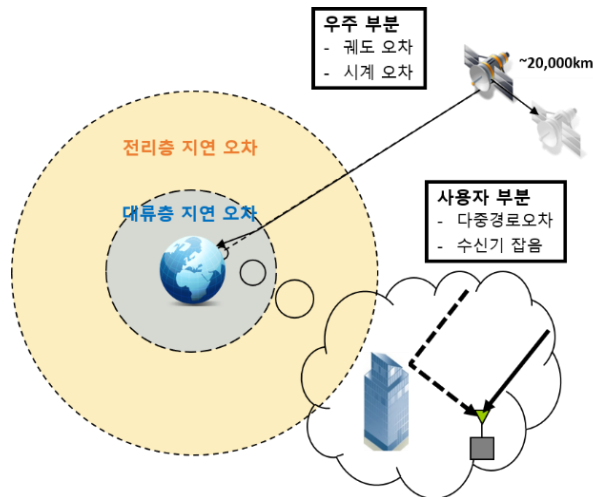


Figure IV-1 위성 항법 측정치 오차 요소

사용자의 위치 정확도를 높이기 위하여 측정치의 오차 요소를 제거하는 보강 항법 알고리즘이 다양하게 존재하는데 사용하는 측정치가 의사거리 측정치인지 반송파 위상 측정치인지에 따라 나뉜다. 의사거리 측정치 기반 보강 항법 알고리즘으로는 DGPS (Differential Global Positioning System)가 대표적이며 서비스 범위에 따라 LADGPS (Local Area DGPS), WADGPS (Wide Area DGPS) 등으로 구분할 수 있다. 그러나 의사거리 측정치는 측정치 자체의 한계가 존재한다. 다중 경로 오차에 취약하고 측정치 잡음 수준이 크기 때문에 cm급 정밀 항법을 수행하기에 부적합하다. 따라서 정밀 항법을 수행하기 위해서는 반송파 위상 측정치를 활용하는 보강 항법을 수행하여야 한다.

반송파 위상 측정치 기반 보강 항법 중 대표적인 알고리즘으로 기준국의 측정치를 이용하여 오차 요소를 제거하고 사용자의 위치를 계산하는 CDGPS가 존재한다. 반송파 위상 측정치에는 미지정수 항이 포함되어 있기 때문에 이를 결정하여 정밀 항법을 수행하여야 한다. 미지정수 결정 기법으로는 LSAST (Least Squares Ambiguity Search technique), LAMBDA (Least-squares AMBiguity Decorrelation Adjustment) 등이 존재한다[23].

4.1.2 CDGPS 알고리즘 적용 방식

실제 CDGPS 알고리즘을 수행할 때는 사용자의 위치와 미지정수를 모두 모르는 값이므로 동시에 추정하는 방식을 이용한다. 그러나 본 연구에서는 미지정수 결정이 아닌 안테나 캘리브레이션의 효과를

확인하기 위하여 미지정수를 미리 결정하고 사용자 위치를 추정한다. 대기 지연 오차를 무시할 수 있도록 매우 짧은 기선 거리를 갖는 기준국과의 이중 차분을 수행한다. 짧은 기선 거리에서 반송파 측정치를 이중 차분하면 거리항과 미지 정수 항을 제외한 요소는 모두 제거되며 이는 아래의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$${}^j\nabla_u^k\Delta_r\phi = {}^j\nabla_u^k\Delta_r d + \lambda {}^j\nabla_u^k\Delta_r N \quad (4.1.1)$$

미지 정수를 먼저 추정하기 위하여 거리항을 제거해야 한다. 위성의 위치와 사용자의 위치를 방송 궤도력과 정밀 측량을 이용하여 구하여 거리항을 구한다. 측정치에서 거리항을 제거하고 미지 정수를 아래의 식과 같이 추정할 수 있다.

$${}^j\nabla_u^{ref}\hat{N} = \text{round}\left(\text{mean}\left(\left[\frac{{}^j\nabla_u^{ref}\phi - {}^j\nabla_u^{ref}d}{\lambda}\right]\right)\right) \quad (4.1.2)$$

구한 미지 정수항을 측정치에서 미리 제거하고 거리항에서 사용자의 위치에 대하여 식을 정리한다. 식을 적층하여 아래 식에서 least square를 적용하면 최종적인 사용자의 위치해를 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \hat{e}^{ref} - \hat{e}^1 \\ \vdots \end{bmatrix} \bar{R}_u = \begin{bmatrix} \nabla\Delta\phi - \bar{R}_r \cdot (\hat{e}^1 - \hat{e}^{ref}) - \lambda\hat{N} \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (4.1.3)$$

4.1.3 안테나 캘리브레이션 보상 측정치

CDGPS를 수행하기에 앞서 안테나 캘리브레이션을 적용하여 보상된 측정치를 생성한다. 기존 측정치는 사용자의 위치로 결정하려는 ARP에서 수신된 것이 아니므로 모든 측정치를 ARP에서 수신된 신호처럼 보상하여 CDGPS를 수행한다면 안테나 성분에 의한 오차가 없는 사용자 위치해를 얻을 수 있을 것이다. 따라서 다음의 식과 같이 측정치를 보상하고 미지정수를 결정한다.

$${}^j_r \nabla \Delta_r^{ref} \hat{\phi} = \nabla \Delta d_{ARP} + \lambda \nabla \Delta N + \nabla \Delta PCC(\alpha, z) - \nabla \Delta P\hat{C}C(\alpha, z) + \nabla \Delta \varepsilon_{\phi} \quad (4.1.4)$$

$${}^j_r \nabla \Delta_u^{ref} \hat{N} = round \left(mean \left(\left[\frac{{}^j_r \nabla \Delta_u^{ref} \hat{\phi} - {}^j_r \nabla \Delta_u^{ref} d_{ARP}}{\lambda} \right] \right) \right) \quad (4.1.5)$$

이때 미지정수 결정에 있어서 안테나 오차 요소가 제거되었으므로 해당 방식으로 결정된 미지정수를 활용하여 수행한 항법을 이후 장에서 calibrated의 결과로 제시하고 기존의 측정치를 바로 사용하여 미지정수를 결정하고 항법을 수행한 결과를 uncalibrated로 제시한다.

4.2 실측 실험 환경 및 결과

4.2.1 실측 실험 환경

실험은 11/16 멀티패스에 의한 영향을 최소화할 수 있도록 건물 옥상에서 수행하였으며 캘리브레이션을 수행한 기존의 삼성 S22+ 스마트폰을 이용하였다. 동적 사용자를 가정하였으므로 바퀴형 이동

로봇 위에 스마트폰과 고가 GPS 수신기를 올려놓고 이동하였다. 고가 수신기는 trimble R10 두 대를 스마트폰 양 옆에 위치시켜 스마트폰의 true 궤적을 구하였다. 궤적에 대한 시나리오는 7m*4m 크기의 사각형 궤적을 따라 돌다가 내부에 1.5m*2m 크기의 글자를 그리며 움직이는 궤적을 설정하였다.

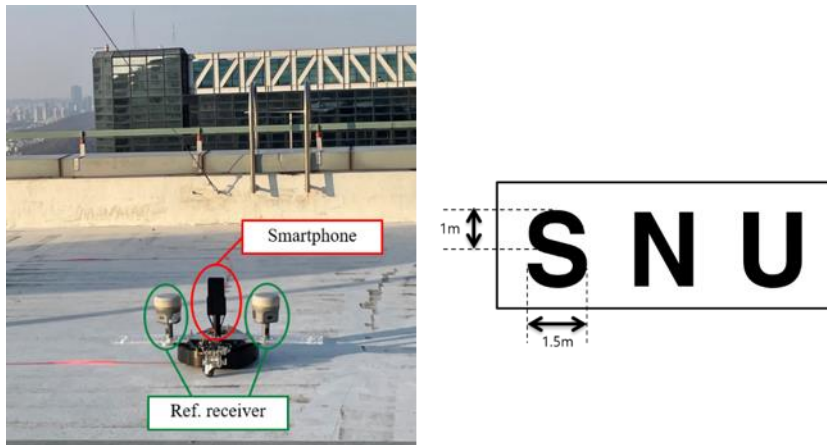


Figure IV-2 동적 주행 실험 환경 및 시나리오

4.2.2 CDGPS 결과 및 분석

항법 결과 cm급 성능을 확인할 수 있었다. 스마트폰의 ARP를 사용자의 true 위치로 보고 전체 동적 시나리오에 대한 위치해를 구한 결과는 다음과 같다. 좌측의 그림은 캘리브레이션 수행이 이루어지지 않은 uncalibrated 사용자 위치 결정 결과이며 우측의 그림은 캘리브레이션을 통하여 안테나 성분 오차를 제거하여 항법 수행한 calibrated 위치 결정 결과이다.

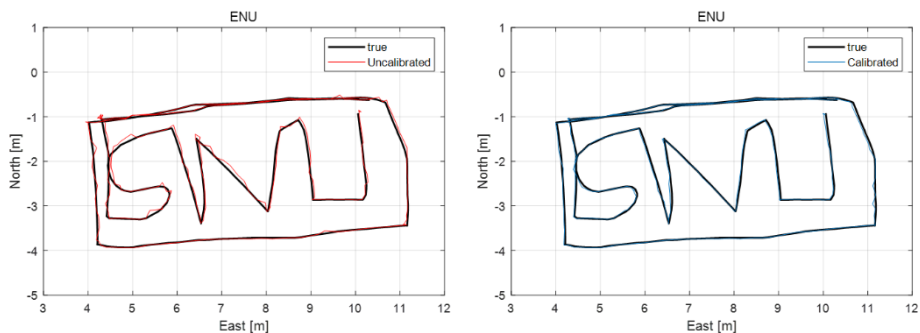


Figure IV-3 Positioning 결과 uncalibrated(좌) calibrated(우)

시나리오에서 가장 높은 정밀도를 요구하며 자세의 변화가 심한 S자를 그리며 사용자가 움직이는 상황에 대하여 결과를 확대하여 도시하면 아래와 같다.

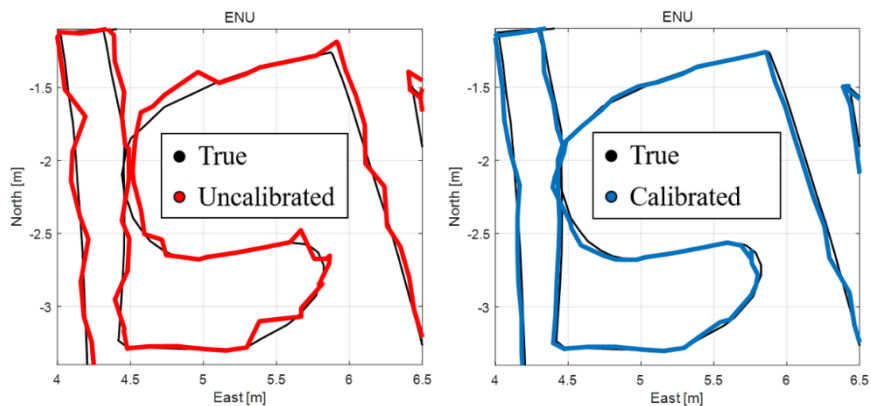


Figure IV-4 Positioning 확대 uncalibrated(좌) calibrated(우)

캘리브레이션을 수행하였을 때, 전체적인 궤적을 더 잘 따라가는 것을 확인할 수 있다.

해당 결과에 대하여 오차분석을 수행하면 다음의 그림과 같은 결과를 얻을 수 있다.

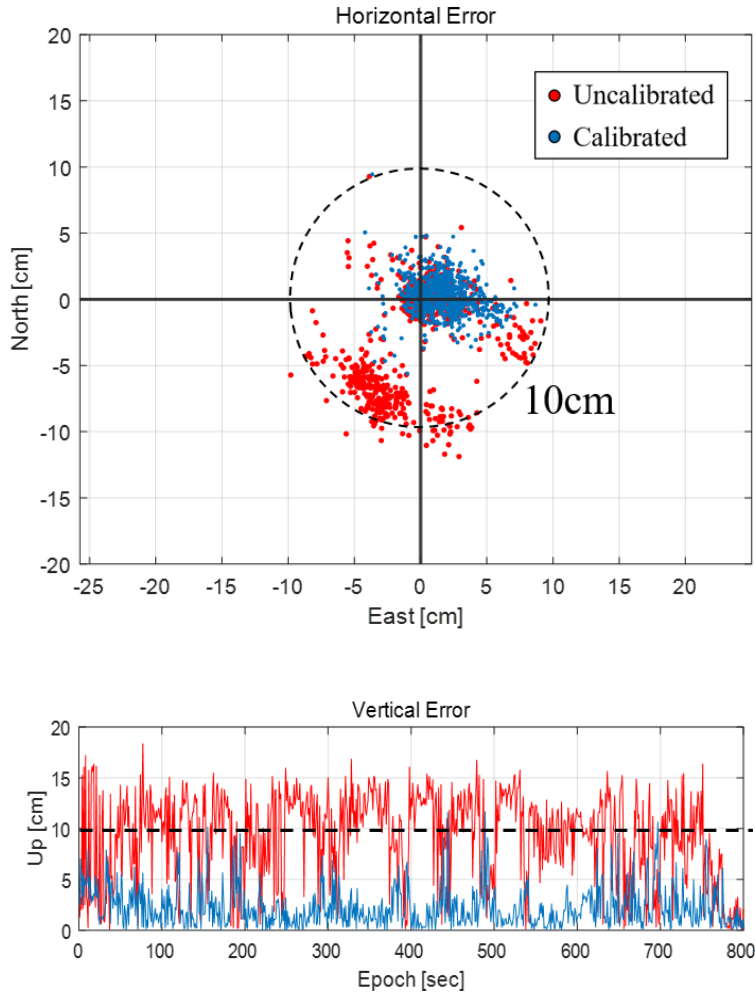


Figure IV-5 Positioning 오차 분석 수평(위) 수직(아래)

수평 위치 오차의 경우 uncalibrated 결과에서 10cm를 벗어나는 위치해가 다수 존재한다. 그러나 calibrated 결과는 10cm이내로 bound되며 cm 수준 항법이 가능한 것을 확인할 수 있다.

수직 위치 오차에서도 uncalibrated 결과가 10cm를 벗어나는 다수의 결과를 갖는 반면 calibrated 결과는 10cm내로 bound 되는 것을 확인할 수 있다.

수평 위치오차와 수직 위치 오차의 RMSE를 표로 나타내면 다음과 같다.

표 IV-1 Positioning 위치 오차 RMS

<i>RMSE</i>	<i>Horizontal</i>	<i>Vertical</i>
<i>Uncalibrated</i>	3.08cm	9.17cm
<i>Calibrated</i>	1.71cm	2.25cm

수평 위치오차는 캘리브레이션을 통하여 45% 개선되고 수직 위치 오차는 75% 개선되었다.

V. 결론

본 연구에서는 스마트폰의 cm수준 초정밀 항법을 수행하기 위하여 스마트폰 안테나 캘리브레이션을 수행하였다.

스마트폰 안테나 캘리브레이션에서 PCO 추정을 위하여 단일 주파수 기반 사이클 슬립 검출 및 보상 알고리즘을 이용하되 보상 수행 시 안테나 성분 오차가 매우 커서 미지정수 오결정을 야기하는 경우에 대하여 강건한 알고리즘을 제안하였다. 이를 통하여 안테나 성분의 오차가 크며 사이클 슬립이 빈번하게 일어나는 저양각 영역에 대하여 모델링 오차가 발생하던 것을 개선하였다.

스마트폰 사용자의 특성을 고려하여 전방위 PCV 모델링을 수행하였는데 스마트폰의 IMU에서 제공하는 자세정보만을 이용하여 스마트폰과 위성 사이의 위치 관계를 스마트폰 Body frame에 대하여 구하고 이를 통합하였다. 그 과정 중 스마트폰의 안테나 특성으로 인해 누운 자세에서의 측정치 품질이 저하되어 모델링이 불가능한 일부 구간에 대하여 하프사이클을 검출하고 보상하는 알고리즘을 제안하여 PCV 모델링을 전방위에 대하여 수행할 수 있었다.

실제 측정치를 수집하여 스마트폰에서 캘리브레이션 결과가 유효한지 확인하였다. 먼저, 동일 기종의 스마트폰 2대를 이용하여 PCO와 PCV의 재현성에 대하여 확인하였으며 다른 기기로 얻은 PCO와 PCV 결과를 이용하여 이를 보상하였을 때, 이중 차분 잔여 오차의 RMS가 46.5mm에서 26.4mm로 감소하여 안테나 성분 오차를 잘 제거하는

것을 확인하였다. 이어서 제안하는 알고리즘을 적용하여 저양각에 대하여 PCV 모델링이 제대로 수행되지 않던 부분을 개선하며 동적 사용자에게 적용할 수 있도록 캘리브레이션을 수행하였다.

제안한 안테나 캘리브레이션 방법을 적용하여 동적 사용자에게 대한 위치 오차를 확인하였을 때 수평 방향 오차 RMS가 3.1cm에서 1.7cm로 45% 개선되었으며 수직방향 오차 RMS가 9.2cm에서 2.3cm로 75%개선된 초정밀 항법 결과를 얻을 수 있었다.

참고 문헌

- [1] Kröger, J., Kersten, T., Breva, Y., & Schön, S. (2021). Multi-frequency multi-GNSS receiver antenna calibration at IfE: Concept - calibration results - validation. *Advances in Space Research*, 68(12), 4932–4947. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.01.029>
- [2] Bilich, A., & Mader, G.L. (2010). GNSS Absolute Antenna Calibration at the National Geodetic Survey. Proceedings of the 23rd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation, Portland, OR, September 2010, pp. 1369-1377.
- [3] Rothacheb, M. (2001). *Comparison of Absolute and Relative Antenna Phase Center Variations*. GPS Solutions 4, pp. 55-60. <https://doi.org/10.1007/PL00012867>
- [4] Geng, J., & Li, G. (2019). On the feasibility of resolving Android GNSS carrier-phase ambiguities. *Journal of Geodesy*, 93(12), 2621–2635. <https://doi.org/10.1007/s00190-019-01323-0>
- [5] Shinghal, G., & Bisnath, S. (2021). Conditioning and PPP processing of smartphone GNSS measurements in realistic environments. *Satellite Navigation*, 2(1). <https://doi.org/10.1186/s43020-021-00042-2>
- [6] Darugna, F., Wübbena, J. B., Wübbena, G., Schmitz, M., Schön, S., & Warneke, A. (2021). Impact of robot antenna calibration on dual-frequency smartphone-based high-accuracy positioning: a case study using the Huawei Mate20X. *GPS Solutions*, 25(1). <https://doi.org/10.1007/s10291-020-01048-0>
- [7] Wanninger, L., & Heßelbarth, A. (2020). GNSS code and carrier phase observations of a Huawei P30 smartphone: quality assessment and centimeter-accurate positioning. *GPS Solutions*, 24(2). <https://doi.org/10.1007/s10291-020-00978-z>
- [8] Elmezayen, A., & El-Rabbany, A. (2019). Precise point positioning using world's first dual-frequency GPS/galileo smartphone. *Sensors (Switzerland)*, 19(11). <https://doi.org/10.3390/s19112593>
- [9] 김종주 (2021). GPS 사이클 슬립 보상을 통한 스마트폰 기반 바퀴형 이동 로봇의 정밀 항법에 관한 연구. 서울대학교 대학원 석사학위논문

- [10] Padros, N., Ortigosa, J. I., Baker, J., Iskander, M. F., & Thornberg, B. (1997). Comparative Study of High-Performance GPS Receiving Antenna Designs. In *IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION* (Vol. 45, Issue 4).
- [11] Willi, D., Lutz, S., Brockmann, E., & Rothacher, M. (2020). Absolute field calibration for multi-GNSS receiver antennas at ETH Zurich. *GPS Solutions*, 24(1). <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0941-0>
- [12] EL-Hattab, A. I. (2013). Influence of GPS antenna phase center variation on precise positioning. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 2(2), 272–277. <https://doi.org/10.1016/j.nrjag.2013.11.002>
- [13] 조보근 (2022). 스마트폰 안테나의 방위 특성을 이용한 GPS 반송파 정밀 항법 향상에 관한 연구. 서울대학교 대학원 석사학위논문
- [14] Schön, S., & Kersten, T. (2014). *Comparing antenna phase center corrections: challenges, concepts and perspectives*. www.ife.uni-hannover.de
- [15] Kersten, T. & Schön, S. (2010). Towards modeling phase center variations for multi-frequency and multi-GNSS. 5th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing (NAVITEC), Dec. 2010, pp. 1–8. doi: 10.1109/NAVITEC.2010.5708040.
- [16] Lachapelle, G., Gratton, P., Horrelet, J., Lemieux, E., & Broumandan, A. (2018). Evaluation of a low cost hand held unit with GNSS raw data capability and comparison with an android smartphone. *Sensors (Switzerland)*, 18(12). <https://doi.org/10.3390/s18124185>
- [17] Paziewski, J. (2020). Recent advances and perspectives for positioning and applications with smartphone GNSS observations. In *Measurement Science and Technology* (Vol. 31, Issue 9). Institute of Physics Publishing. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ab8a7d>
- [18] Takasu, T. & Yasuda, A. (2008). Cycle Slip Detection and Fixing by MEMS-IMU/GPS Integration for Mobile Environment RTK-GPS. Proceedings of the 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2008), Savannah, GA, September 2008, pp. 64-71.
- [19] Ji, S., Chen, W., Weng, D., Wang, Z. & Ding, X. (2013) A study on cycle slip detection and correction in case of ionospheric scintillation. *Advances in Space Research*, 51(5), pp. 742-753 <https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.10.012>.
- [20] Miao, Y., Sun, Z. W., & Wu, S. N. (2011). *Error Analysis and Cycle-Slip Detection Research on Satellite-Borne GPS Observation*. <https://doi.org/10.1061/ASCEAS.1943-5525.0000056>
- [21] Kirkko-Jaakkola, M., Traugott, J., Odijk, D., Collin, J., Sachs, G. &

Holzzapfel, F. (2009) A rain approach to GNSS outlier and cycle slip detection using L1 carrier phase time-differences, 2009 IEEE Workshop on Signal Processing Systems, pp. 273-278

[22] Willi, D., Meindl, M., Xu, H., & Rothacher, M. (2018). GNSS antenna phase center variation calibration for attitude determination on short baselines. *Navigation, Journal of the Institute of Navigation*, 65(4), 643–654. <https://doi.org/10.1002/navi.273>

[23] Kim, D., & Langley, R. B. (2000). *GPS Ambiguity Resolution and Validation: Methodologies, Trends and Issues.*, International Symposium on GPS/GNSS.

Abstract

A Study on Improving Smartphone Precise Positioning through GPS Antenna Calibration

Jong-Heon Kim

School of Aerospace Engineering

The Graduate School

Seoul National University

As smartphones provide a GPS function, the vast majority of GPS devices have become smartphones and become a service used by most people. In the past, only m-level positioning using pseudorange measurements was possible, so users were limited to receiving only their approximate location as a service. However, as smartphone users' demand for precise navigation increases, smartphone manufacturers are adding functions such as enabling duty-cycle control to use carrier phase measurements. Additionally, in order to utilize the dual frequency, an L5 antenna is mounted not only L1 antenna.

However, since a GPS antenna mounted on a smartphone needs to be mounted in a smaller space than a conventional GPS antenna, a small and inexpensive antenna is used. Accordingly, it is difficult to properly receive the carrier phase measurement, so the measurement quality of the L1 frequency is low, and the use of the L5 frequency is still limited. Therefore, single-frequency precise navigation using only the L1 frequency is performed. It is necessary to use it after well compensating for the cycle slip that occurs due to frequent tracking failure.

In addition, the GPS antenna has a difference in the signal receiving position depending on the direction in which the signal is received. Since the smartphone GPS antenna is ultra-low-priced, the difference is larger than that of the existing expensive antenna, and it is necessary to estimate and compensate for precise

navigation using the smartphone.

Therefore, in this study, the antenna calibration of the smartphone was directly performed to model the signal receiving position according to the direction of the signal received in the body frame of the smartphone. At this time, the cycle slip compensation algorithm was used only as a preprocessing without antenna calibration, but the cycle slip compensation accuracy was increased by using an iteration technique, and thus the antenna calibration accuracy was also increased.

Antenna calibration for omni-direction was applied using the smartphone alone by using the attitude information provided by the IMU of the smartphone. Using this, a dynamic user can calibrate an antenna and perform navigation using compensated measurement values.

When CDGPS is performed using the calibration results, the horizontal position error is improved by 45% to 1.7cm, and the vertical position error is improved by 75% to 2.3cm. A smartphone user performed precise navigation through antenna calibration.

Keywords : smartphone, antenna calibration, cycle slip, precise positioning
Student Number : 2021-24470