



공학석사학위논문

도심 환경 속 수직 착륙 UAM의 단일 주파수 기반 RRAIM을 이용한 무결성 감시

Integrity Monitoring of Vertical Landing UAM in Urban Environment using Single Frequency Based RRAIM

2021년 2월

서울대학교 대학원 항공우주공학과 정 호 준

도심 환경 속 수직 착륙 UAM의 단일 주파수 기반 RRAIM을 이용한 무결성 감시

Integrity Monitoring of Vertical Landing UAM in Urban Environment using Single Frequency Based RRAIM

지도교수 기 창 돈

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2021년 2월

서울대학교 대학원 항공우주공학과 정 호 준

정호준의 공학석사 학위논문을 인준함



초 록

도심지에서 드론을 활용하기 위한 시도들은 우리 주변에서 꾸준히 늘어나고 있다. 알파벳의 윙(Wing)과 UPS에 이어 아마존이 미국 연방항공국 (FAA)으로부터 배송 용 드론의 운항을 허가 받았으며 무인 드론 뿐만 아니라 승객을 실어 나르는 드론인 PAV개발도 활발하게 이루어지고 있다. 국내에서는 현대자동차와 우버(Uber)가 함께 공동 개발을 진행하고 있으며 한화시스템이 오버에어사와 공동개발을 진행중이다. 이처럼 도심 항공 모빌리티(Urban Air Mobility, UAM)에 대한 관심은 꾸준히 증가하고 있으며 이를 위한 연구들도 지속적으로 진행중이다. 이들 중 정밀 항법에 관한 연구는 UAM을 운용하기 위해 필수적으로 선행되어야 하는 연구 중 하나이다. 이에 연구 본 연구에서는 저가의 단일 주파수 GPS수신기만으로 도심지에 수직으로 착륙하는 UAM의 무결성을 감시하는 방안에 대해 제안하였다.

UAM을 운용하기위한 기술들 중 가장 중요하다고 볼 수 있는 것이 바로 정밀항법이다. 이는 사용자뿐만 아니라 보행자의 안전과도 직결되는 중요한 문제이다. 이를 위해 기존에 항공기 사용자를 위해 만들어진 무결성의 개념을 끌어다 사용하는 연구가 활발하게 진행중이다. 기존의 항공 사용자의 무결성 감시를 위한 대표적인 시스템으로 SBAS가 존재한다. 그러나 고층 빌딩에 의해 위성의 가시성이 현저히 떨어지는 도심지에선 SBAS의 활용이 제한된다. SBAS가 비 가용 상태인 경우에도 사용자는 자신의 무결성을 감시할 수 있어야하고 이를 위한 기술을 수신기 자체 무결성 감시 기법(RAIM)이라 한다. 의사거리를 활용하는 일반적인 classic RAIM은 다중 경로 오차가 극심한 도심지에서는 성능이 제한된다는 단점이 존재한다. 본 연구에서는 다중 경로 오차에 강인한 반송파 위상을 활용하는 RRAIM 기법을 통해 GPS 수신기 만을 이용하여 도심 사용자의 무결성을 감시하고자한다. 이중 주파수를 기반으로 설계된

ii

기존의 RRAIM과는 달리 본 연구에서는 전리층오차까지 고려함으로써 저가 GPS 수신기에서도 활용 가능한 단일 주파수 기반의 RRAIM을 제안하였다.

제안하는 알고리즘의 성능을 검증하기위해 도심 환경 시뮬레이션을 구성하고 기존의 알고리즘들과 수직 보호수준을 비교하였다. 초기의 보호수준은 SBAS 보정정보를 통해 계산된다고 가정하였으며 이후 도심지에 수직 착륙하는 동안 제안하는 알고리즘을 적용하였다. 먼저 3m/s로 수직하강하는 드론을 시뮬레이션 하였을 때 classic RAIM 대비 90%의 성능이 향상되는 것을 확인하였으며 기존의 이중 주파수 RRAIM의 보호수준 대비 100.27%로 계산되어 유사한 성능을 갖는 것을 확인하였다. 이후 같은 위치에서 하강 속도를 1m/s로 하강하는 시뮬레이션 결과 기존 이중 주파수 RRAIM 대비 제안하는 알고리즘의 보호수준이 27% 더 크게 계산되었다. 이는 시간이 길어짐에 따라 전리층 오차가 누적되어 나타난 영향으로 판단되었다. 하지만 제안하는 알고리즘의 무결성 감시 성능은 일반 의사거리 기반의 classic RAIM으로는 달성할 수 없는

SBAS급의 LPV-200 성능을 유지하는 것을 확인하였고 이러한 결과를 상황에 맞게 적용한다면 단일 주파수 신호만 수신 가능한 저가형 GPS 수신기만으로도 도심지에서 사용자의 무결성을 감시할 수 있음을 확인하였다.

주요어 : GPS, RRAIM, 무결성 감시, 도심 환경

학 번:2019-21097

iii

목 차

I. 서 론		1
1.	연구 동기 및 목적	1
2.	연구 동향	2
3.	연구 내용 및 방법	3
4.	연구 결과의 기여도	5
II. 위성항법	시스템 무결성 감시	6
1.	항법 요구 성능 (RNP)	6
2.	무결성 감시	9
3.	보호수준	9
4.	위성기반보강시스템 (SBAS)	12
5.	수신기 독자 무결성 감시 (RAIM)	19
III. 단일 주과	파수 기반 RRAIM	26
1.	시간 차분 반송파 위상 측정치	26
2.	측정치 오차 공분산	28
3.	위치 오차 공분산	32
IV. 사용자 부	무결성 감시 시뮬레이션	33
1.	시뮬레이션 시나리오	33
2.	의사거리 RAIM과 비교	37
3.	이중 주파수 RRAIM과 비교	41
V. 결론 및	향후 과제	45
참고 문헌		47

List of Figures

FIGURE II – 1	항법 피라미드	6
FIGURE II – 2	보호수준1	0
Figure II – 3	RAIM을 이용한 수직 유도를 위한 Pr {HMI} 1	0
FIGURE II – 4	STANFORD PLOT	1
Figure II – 5	SBAS 전리층 격자점1	5
Figure II – 6	SBAS IONOSPHERIC PIERCE POINT 1	6
Figure II – 7	WSSE의 χ ² 분포와 고장 검출 기준 값	22
Figure II – 8	√WSSE 와 수직 오차의 상관 관계	24
Figure III – 1	전리층 변화 예측 오차 히스토그램	30
FIGURE IV-1	WAAS 기준국 최대 수직 오차 발생 시 수직 보호 수준 3	35
FIGURE IV-2	도심 환경 모델링	35
FIGURE IV-3	빌딩에 의한 가시 위성 차단	36
FIGURE IV-4	가시 위성과 PDOP 변화 (시간 : 20초)	36
FIGURE IV – 5	시뮬레이션상 3차원 하강 궤적	38
FIGURE IV-6	CLASSIC RAIM과 수직 보호수준 비교 (시간 : 20초) 3	39
FIGURE IV-7	기존 이중 주파수 RRAIM과 수직 보호수준 비교	
(시간 : 20)초)4	1
FIGURE IV – 8	기존 이중 주파수 RRAIM과 수직 보호수준 비교	
(시간 : 60)초)4	13
FIGURE IV-9	가시 위성과 PDOP 변화 (시간 : 60초)	14

List of Tables

TABLE II-1 ICAO RNP 기준	8
TABLE II-2 보호수준 계산을 위한 상수 K	25
TABLE III-1 기존 RRAIM 측정치 오차 모델	28
TABLE III-2 제안하는 RRAIM 측정치 오차 모델	29
TABLE III-3 시간에 따른 전리층 변화 예측 오차	31
TABLE IV-1 시뮬레이션 측정치 생성 모델	34
TABLE IV-2 시뮬레이션 시나리오	37
TABLE IV-3 CLASSIC RAIM과 제안하는 RRAIM의 수직 보호 수준	
(시간 : 20초)	40
TABLE IV-4 기존 RRAIM과 제안하는 RRAIM의 수직 보호수준	
(시간 : 20초)	42
TABLE IV-5 기존 RRAIM과 제안하는 RRAIM의 수직 보호수준	
(시간 : 60초)	44

I. 서 론

1. 연구 동기 및 목적

도심지에서 드론을 활용하기 위한 시도들은 우리 주변에서 꾸준히 늘어나고 있다. 윙(Wing)과 UPS에 이어 아마존도 미국 연방항공청(FAA)로부터 배송 용 드론의 운항을 허가 받았다. 무인 드론 뿐만 아니라 승객을 실어 나르는 드론인 PAV(Personal Air Vehicle)개발도 활발하게 이루어지고 있다. 국내에서는 현대자동차와 우버(Uber)가 전략적 파트너십을 맺고 PAV개발을 하고 있으며 한화시스템이 오버에어사와 공동개발을 통해 PAV 개발을 진행중이다. 이처럼 도심 항공 모빌리티(Urban Air Mobility, UAM)의 원활한 임무 수행을 위해선 정확하고 신뢰성 높은 위치 결정 기술이 필수적으로 뒷받침 되어야한다. 특히 도심지에서 정밀 항법 수행은 사용자뿐만 아니라 보행자의 안전과도 직결되는 문제이기 때문에 사용자는 정확성과 무결성이 보장된 위치를 얻는 것이 필수적이다. 무결성이란 사용자 위치에 대한 신뢰 수준을 의미하는

도심지에서 GNSS(Global Navigation Satellite System)만으로 정밀 항법을 수행하기에는 여러가지 한계점들이 존재한다. 고층 빌딩들에 의하여 위성 신호가 차단되거나 반사되어 들어오는 다중 경로 오차가 극심하게 발생하게 된다. 이를 해결하기 위해 GNSS와 Vision 센서를 결합하여 항법을 수행하거나 3D map 등의 정밀 지도 정보를 결합하는 항법 연구가 주를 이루는 추세이다[1]-[3]. 그러나 이러한

방법들은 사용자가 GNSS 수신기 외에 별도의 센서를 필요로 하거나 정밀 지도를 구비해야 한다는 한계점이 존재한다.

본 논문은 도심 환경에서 다중 경로 오차에 강인한 반송파 위상 측정치를 활용하는 상대 수신기 자체 무결성 감시 (RRAIM, Relative Receiver Autonomous Integrity Monitoring)기법을 통해 GNSS 단독으로 항법 수행 시 무결성 감시 기법을 제안한다. 더 나아가 이중 주파수 기반으로 설계되어 있는 기존의 RRAIM과 달리 단일 주파수기반의 RRAIM을 제안하고자 한다. 이로써 고가의 다중 주파수 수신기가 아닌 상용화된 저가형 단일 주파수 수신기를 기반으로 도심에서 정밀 항법을 수행할 수 있는 알고리즘을 설계하였다.

2. 연구 동향

무결성은 항공 사용자의 SoL (Safety of Life)서비스를 위해 최초로 등장한 개념이다. 항공 분야에서는 크게 GBAS (Ground Based Augmentation System), SBAS (Satellite Based Augmentation System), ABAS (Airborne Based Augmentation System) 3가지 시스템을 통해 무결성의 정보를 획득할 수 있다. 일반 사용자가 활용할 수 있는 무결성 감시 서비스로는 SBAS와 ABAS가 있다[4].

SBAS는 광역 기준국을 통해 수집된 데이터를 중앙 기준국에서 처리하여 보정메시지를 생성하고 이를 정지궤도 위성을 통해 사용자에게 전달하는 시스템이다. 정지궤도 위성을 활용하기 때문에 대륙 전체에 서비스를 제공할 수 있다. SBAS는 전리층 오차 보정 정보, 궤도 오차 보정정보, 그리고 무결성 정보를 사용자에게 전달해준다[5].

ABAS는 여분의 GNSS 측정치를 사용하여 측정치들의 이상을 판단하는 시스템으로 수신기 자체 무결성 감시(RAIM, Receiver Autonomous Integrity Monitoring)로 더

많이 일컬어진다[6]. 본 연구에서는 여러 종류의 RAIM들 중 시간 차분 된 반송파 위상 측정치를 통해 상대 위치의 무결성을 감시하는 RRAIM기법과 의사거리 측정치의 최소자승법을 활용하는 Classic RAIM을 비교 분석하였다.

이때 SBAS는 최초에 항공 사용자를 위해 개발된 시스템이기 때문에 고층 빌딩에 의해 위성의 가시성이 떨어지는 도심지역에서는 활용에 한계가 존재한다. 이에 따라 도심지에서 무결성을 감시하는 연구들은 대부분 RAIM을 이용한다. 그러나 의사거리 측정치에 기반한 RAIM 역시 다중 경로 오차가 극심한 도심지에서는 성능저하가 발생한다. 이를 해결하기 위해 어안카메라와 GNSS를 결합하거나 정밀 지도를 이용하여 위치를 보정하는 연구가 진행되었다[7]-[10]. 그러나 이러한 연구들은 GNSS 수신기 외에 별도의 센서나 정보가 필요하다는 한계가 있다.

3. 연구 내용 및 방법

본 연구에서는 단일 주파수 기반의 수신기 자체 무결성 감시 기법을 이용한 도심 환경 사용자의 무결성 감시 활용방안에 대해 제안하였다. 도심지에서 정밀 위성항법 수행 시 발생하는 문제로는 고층 빌딩에 의한 위성 신호 차폐와 반사 신호에 의한 다중 경로 오차 등이 존재한다. 이때 반송파 위상 측정치는 다중 경로 오차에 강인한 특징이 존재한다[11]. 따라서 본 연구에서는 시간 차분 된 반송파 위상측정치를 활용하는 RRAIM 기법에 대해 연구를 진행하였다.

반송파 위상 측정치를 활용하기 위해선 미지정수를 계산해야 하고 이로 인해 외부의 보정 정보 및 고가의 다중 주파수 GNSS수신기를 필요로 하게 된다. RRAIM의 경우 반송파 측정치의 미지정수가 시간에 대해 일정하다는 특성을 이용하여 시간 차분 된 반송파 위상 측정치(TDCP, Time Differenced Carrier Phase)를 활용한다. 이경우 미지정수를 결정하지않고도 반송파 위상 측정치를 활용할 수 있다. 기존의 TDCP

측정치를 활용한 무결성 감시 기법에는 RRAIM이 존재한다. 이중 주파수기반의 반송파 위상측정치를 사용하는 Conventional RRAIM은 고가의 수신기와 안테나가 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 단일 주파수의 반송파 위상 측정치 만을 제공하는 저가 GNSS 수신기에서도 활용할 수 있는 단일 주파수 기반 RRAIM 알고리즘을 제안하고 시뮬레이션을 통해 구현하였다.

본 연구에서는 개활지를 비행하다 도심지에 착륙하는 무인 이동체의 시나리오를 가정하였으며 개활지를 비행하는 동안에는 원활하게 SBAS 보정정보를 받는다고 가정하였다. 초기 위치의 보호수준은 외부로부터 받은 보정정보를 사용하기 때문에 무결성이 확보되었다고 가정하였다. 이후 도심지 착륙 지점에 수직으로 착륙하는 동안 SBAS 신호가 차폐되는 상황을 가정하고 제안하는 RRAIM기법을 통해 사용자의 보호수준을 산출하였다. 보호수준 산출 시 TDCP 측정치의 오차 공분산 값을 선행적으로 계산해야한다. 이때 Conventional RRAIM의 경우 이중 주파수 기반으로 설계된 알고리즘이기 때문에 주파수 조합을 통해 전리층 지연 오차를 제거하게 된다. 제안하는 단일 주파수 기반 RRAIM은 조합을 통한 전리층 지연 오차 제거가 불가능하기 때문에 시간 차분 된 전리층 지연 오차의 공분산 값을 시간의 함수로 모델링하여 사용하였다. 이후 제안하는 RRAIM의 보호수준 결과를 단일 주파수 기반 의사거리 RAIM과 비교하여 기존의 단일 주파수 기반의 무결성 감시 기법으로 획득할 수 없었던 보호수준 획득을 확인하였다. 또한 Conventional RRAIM과 비교하여 제안하는 단일 주파수 기반 RRAIM의 성능저하가 크지 않음을 확인하였다. 반송파 위상 측정치 사용시 필수적으로 고려해 줘야하는 사이클 슬립 같은 경우 TDCP 측정치와 INS 결합 시 검출 가능하다는 기 연구 자료를 레퍼런스로 삼아 고려사항에서 제외하였다[12].

4. 연구 결과의 기여도

본 논문에서는 단일 주파수 기반의 수신기 자체 무결성 기법을 제안하여 저가 수신기 사용자도 정밀 항법을 수행하고 보호수준을 산출할 수 있는 방안을 제안한 것을 가장 큰 기여라고 할 수 있다.

기존의 도심지 무결성 감시 연구들은 별도의 센서를 이용하거나 정밀 지도를 이용하였다. 그러나 본 연구에서는 GPS 수신기 만을 이용하여 SBAS급의 무결성 감시 성능을 확보할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 별도의 센서나 외부 정보없이 수신기 만으로 무결성을 감시하기위한 기법으로는 classic RAIM이 유일 했지만 의사거리 측정치를 활용하는 classic RAIM의 경우 SBAS신호가 차단된 순간부터 보호수준이 급격하게 증가하는 것을 확인하였다. 제안하는 알고리즘을 사용하면 별도의 센서나 정밀 지도 없이도 SBAS급의 무결성 감시 성능을 얻을 수 있다.

둘째는 기존의 이중 주파수 기반의 RRAIM을 단일 주파수 사용자에 적용할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 이중 주파수 수신기의 경우 조합을 통해 전리층 오차를 제거할 수 있다. 그러나 제안하는 알고리즘은 전리층 오차까지 고려하여 단일 주파수 기반의 알고리즘을 제안하였고 이를 통해 상용화된 저가형 단일 주파수 기반 수신기에서도 알고리즘을 적용할 수 있도록 하였다.

결과적으로 제안하는 알고리즘을 이용한다면 별도의 센서없이 단일 주파수 기반의 저가형 수신기 만을 이용하여 도심지에서 SBAS급의 성능을 일정시간 유지할 수 있다.

II. 위성항법 시스템 무결성 감시

1. 항법 요구 성능 (RNP)

위성 항법 시스템의 항법 요구 성능(RNP, Required Navigation Performance)은 아래의 4가지 요소 (정확성, 무결성, 연속성, 가용성)를 지표로 나타낼 수 있으며 이들의 관계는 아래의 Figure II-1과 같다.



Figure II-1 항법 피라미드

- 정확성

정확성이란 추정 위치와 실제 위치 사이 적합성의 정도를 판단하는 지표로써 항법 시스템을 이용하여 추정한 사용자의 위치와 실제 값 사이의 오차를 의미한다.

- 무결성

무결성이란 항법 시스템에서 제공하는 보정정보 및 추정 위치의 신뢰 수준을 판단하는 지표이다. 무결성은 항법 시스템에 오류가 발생한 경우 정해진 시간(Timeto-alert, TTA) 내에 사용자에게 경고를 줄 수 있는지에 대한 능력을 포함한다.

- 연속성

연속성이란 항법 시스템이 작업 도중 방해 없이 위치 임무 수행이 가능한지에 대한 지표이다. 시스템의 오작동을 감지하였거나 고장이 발생하지 않았음에도 불구하고 경고가 발생하여 작업이 중단되는 경우 연속성이 상실된다.

- 가용성

마지막으로 가용성이란 앞서 설명한 정확성, 무결성, 연속성이 모두 만족한 상태로 항법 시스템을 이용할 수 있는지를 판단하는 지표이다. 관습적으로 보호수준 결과가 경보 한계를 넘어가는 경우 가용성을 상실했다 판단한다.

- GNSS 항공 사용자 요구 성능

항법 성능 지표를 나타내는 4가지 요소는 파라미터화 되어 아래의 표와 같이 요구조건으로 정의 되어있다. 사용자의 특성에 따라 요구 조건이 달리 정의 되어있으며 아래의 예시는 국제민간항공기구(ICAO, International Civil Aviation Organization)에서 규정하는 항공사용자를 위한 요구조건이다[13].

Operation	Horizontal Accuracy	Vertical Accuracy	HAL (Horizontal	VAL (Vertical	TTA (Time-to-	Integrity	Continuity	Availability
	(95%)	(95%)	Alert Limit)	Alert Limit)	Alert)			
En-route (Oceanic/ Continental)	3.7 km (2.0 NM)	N/A	7.4 km (4.0 NM)	N/A	5 min			
En-route (Continental)	3.7 km (2.0 NM)	N/A	3.7 km (2.0 NM)	N/A	5 min	1-1x10 ⁻⁷ /h	1-1x10 ⁻⁴ /h to	
En-route (Terminal)	0.74 km (0.4 NM)	N/A	1.85 km (1 NM)	N/A	15 s		1-1x10 ⁻⁸ /h	0.99
NPA	220 m	N/A	556 m (0.3 NM)	N/A	10 s			to 0.99999
APV-I	16 m	20 m	40 m	50 m	10 s			
APV-II	16 m	8 m	40 m	20 m	6 s	1-2x10 ⁻⁷ per approach	1-8x10 ⁻⁶ per any 15 s	
CAT-I	16 m	4-6 m	40 m	10-15 m	6 s			

Table II-1 ICAO RNP 기준

2. 무결성 감시

정밀한 항법을 수행하기 위해선 정확성뿐만 아니라 무결성까지 고려하여 높은 신뢰도를 갖는 위치를 추정하는 것이 필수적이다. 이때 사용자의 위치를 구하기 위해 사용하는 항법 시스템의 모든 요소를 지속적으로 검사함으로써 항법시스템의 오작동을 감지하고 이상이 생겼을 경우 이를 검출하여 제거하거나 사용하지 않게 하는 기능을 무결성 감시라한다. 무결성 파라미터 중 하나인 보호수준에 대한 설명은 다음과 같다.

3. 보호수준

항법 시스템을 사용하는 항공 사용자의 경우 각 운항단계마다 요구되는 최대 오차 허용 값이 요구조건으로 정해져 있으며 이를 경보 한계(alert limit)이라고 한다. 이때 사용자는 자신의 실제 위치를 알 수 없으므로 실제 위치 오차를 알 수 없기 때문에 자신의 오차 수준을 확률적으로 내포할 수 있는 경계가 필요하다. 추정된 위치로부터 사용자의 실제 위치가 존재할 확률이 요구조건 이하가 되게끔 구분 짓는 경계를 보호수준(protection level)이라고 한다. 보호수준은 Figure II-2와 같이 추정된 위치를 기준으로 계산되며 실제 위치가 보호수준 이내에 있을 확률이 무결성 요구조건으로 정해진 확률보다 같거나 커야 한다. 무결성 요구조건은 Figure II-3처럼 고장 상황에 따라 분배될 수 있으며 본 연구에서는 단일 위성 고장에 대해서만 고려하였다[14]. 보호수준은 수직과 수평으로 나누어 계산되며 때 시간 사용자의 위치와 함께 계산되어야 한다.



Figure II-2 보호수준



Figure II-3 RAIM을 이용한 수직 유도를 위한 Pr{HMI}

보호수준(PL, protection level)이 경보 한계(AL, alert limit)를 넘는 경우에는 앞서 설명한 항법시스템의 가용성이 만족되지 않는 상태로 간주한다. 또한 실제 위치 오차(PE, position error)가 보호수준을 초과 할 경우를 무결성 상실이라 한다. 그러나 앞서 말한 것처럼 실제 위치 오차를 알 수 없고 시스템은 오직 PL과 AL의 비교를 통해 가용성판단만이 가능하다. 이로 인해 크게 4가지 상황이 발생할 수 있으며 Figure II-4와 같이 PL, AL, PE를 한 평면에 나타내면 다음과 같다.



Figure II-4 Stanford plot

Nominal Operation (①)

정상 운용 상태를 의미한다. 보호수준이 실제 오차를 포함하며 경보한계보다 작기 때문에 가용한 시스템이다.

System Unavailable (②, ③)

보호수준이 경보한계보다 큰 경우를 의미한다. 이 경우에는 보호수준이 실제 오차를 내포하지 못하는 무결성 상실 조건이 발생하더라도 시스템은 비가용상태이기 때문에 큰 문제는 발생하지 않는다.

Misleading Information (3, 4, 5)

보호수준이 실제 오차를 내포하지 못한 상황을 의미한다. Misleading Information은 3가지 상황으로 구분 지을 수 있다(③~⑤). 먼저 보호수준이 경보 한계를 넘어가는 경우 시스템이 가용성을 상실했다 판단하기 때문에 이 경우에는 문제가 발생하지 않는다(③). 또한 시스템이 가용하다 판단할지라도 실제 오차가 경보 한계를 넘지 않는 경우에는 문제가 발생하지 않는다(④).

Hazardously Misleading Information (5)

실제 오차가 경보한계보다 크지만 보호수준이 경보 한계보다 작게 계산될 경우(⑤) 시스템은 가용하다 판단할 수 밖에 없기 때문에 큰 사고에 노출될 수 있다. 따라서 보호수준을 계산할 땐 최우선적으로 HMI 영역을 피하는 것이 중요하다.

4. 위성기반보강시스템 (SBAS)

위성항법보강시스템 (SBAS, Satellite Based Augmentation System)은 의사거리 측정치를 이용하여 사용자의 위치와 보호수준을 계산한다. 의사거리 측정치 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho^{j} = \left[\mathbf{R}^{j} - \mathbf{R}_{u} \right] \cdot \mathbf{e}_{u}^{j} + B - b^{j} + i^{j} + t^{j} + \delta d^{j} + M^{j} + v_{\rho}^{j}$$
(II-1)

여기서 ρ 는 반송파 위상 측정치를 나타내고 **R**^{*i*} 와 **R**_{*u*} 는 각각 위성과 사용자의 위치 벡터를 나타내며 **e**는 사용자를 기준으로 하는 위성의 방향 벡터를 의미한다. *B*, *b*, *i*, *t*, *δd*, *M*, *v*는 순서대로 수신기 시계 오차, 위성 시계 오차, 대류층 지연, 전리층 지연, 위성궤도 오차, 다중 경로 오차, 기타 오차 및 잡음을 의미한다. 위 첨자 j는 위성을 아래 첨자 u 는 사용자를 의미한다. 이때 측정치를 좌변으로 옮기고미지수들을 우변을 옮기면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{e}_{u}^{j} \cdot \mathbf{R}^{j} - \rho^{j} - b^{j} = \mathbf{R}_{u} \cdot \mathbf{e}_{u}^{j} - B - I^{j} - T^{j} - \delta d^{j} - v_{\rho}^{j}$$

$$= \mathbf{R}_{u} \cdot \mathbf{e}_{u}^{j} - B + \varepsilon_{\rho}^{j}$$
(II-2)

$$\varepsilon_{\rho}^{j} = -I^{j} - T^{j} - \delta d^{j} - v_{\rho}^{j} \tag{II-3}$$

이때 보정정보를 이용하여 오차를 제거 후 측정치 식을 관측 행렬(H)과 잔여 오차 (v)로 표현하면 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{\mathbf{z}} = \mathbf{H}\vec{\mathbf{x}} + \vec{\mathbf{v}} \tag{II}-4)$$

측정치의 개수를 $N_{\scriptscriptstyle M}$ 개로 정의하면 각 행렬 식은 다음과 같다.

$$\vec{\mathbf{z}} = \begin{pmatrix} \mathbf{e}_{u}^{1} \cdot \mathbf{R}^{1} - \rho_{u}^{1} - b^{1} \\ \mathbf{e}_{u}^{2} \cdot \mathbf{R}^{2} - \rho_{u}^{2} - b^{2} \\ \vdots \\ \mathbf{e}_{u}^{N_{M}} \cdot \mathbf{R}^{N_{M}} - \rho_{u}^{N_{M}} - b^{N_{M}} \end{pmatrix}, \mathbf{H} = \begin{pmatrix} \mathbf{e}_{u}^{1T} & -1 \\ \mathbf{e}_{u}^{2T} & -1 \\ \vdots & \vdots \\ \mathbf{e}_{u}^{N_{M}T} & -1 \end{pmatrix}, \vec{\mathbf{x}} = \begin{pmatrix} x_{u} \\ y_{u} \\ z_{u} \\ B \end{pmatrix}, \vec{\mathbf{v}} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{\rho}^{1} \\ \varepsilon_{\rho}^{2} \\ \vdots \\ \varepsilon_{\rho}^{N_{M}} \end{pmatrix}$$
(II-5)

측정치 잔여 오차의 공분산 행렬을 V라 정의할 때 이를 이용하여 가중된 최소 자승법으로 위치를 추정하는 식은 다음과 같다.

$$\operatorname{cov}\left[\vec{\mathbf{z}}\right] = E\left[\vec{\mathbf{v}}\vec{\mathbf{v}}^{T}\right] \triangleq \mathbf{V}$$
(II-6)

$$\hat{\mathbf{x}} = \left(\mathbf{H}^T \mathbf{V}^{-1} \mathbf{H}\right)^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{V}^{-1} \vec{\mathbf{z}}$$
(II-7)

위 식으로부터 위치 오차의 공분산 행렬은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\operatorname{cov}\left[\hat{\mathbf{x}}\right] = \left(\mathbf{H}^{T}\mathbf{V}^{-1}\mathbf{H}\right)^{-1}\mathbf{H}^{T}\mathbf{V}^{-1}\operatorname{cov}\left[\bar{\mathbf{z}}\right]\mathbf{V}^{-1}\mathbf{H}\left(\mathbf{H}^{T}\mathbf{V}^{-1}\mathbf{H}\right)^{-1}$$
$$= \left(\mathbf{H}^{T}\mathbf{V}^{-1}\mathbf{H}\right)^{-1}\mathbf{H}^{T}\mathbf{V}^{-1}\mathbf{H}\left(\mathbf{H}^{T}\mathbf{V}^{-1}\mathbf{H}\right)^{-1}$$
$$= \left(\mathbf{H}^{T}\mathbf{V}^{-1}\mathbf{H}\right)^{-1}$$
(II-8)

위 식을 통해 추정 위치의 공분산은 관측 행렬과 측정치 잔여 오차의 공분산으로 이루어진 것을 알 수 있다. 결과적으로 사용자가 추정 위치의 오차 수준을 계산하기 위해선 측정치 잔여 오차의 공분산 행렬을 알아야 한다. WAAS 표준 문서에서 정의하고 있는 잔여 오차 공분산의 성분 (σ_i) 은 위성 시계-궤도 오차 ($\sigma_{i,ft}$), 전리층 오차 ($\sigma_{i,UIRE}$), 수신기 잡음 및 다중 경로 오차($\sigma_{i,air}$), 그리고 대류층 오차($\sigma_{i,tropo}$)의 제곱의 합의 제곱근으로 이루어져 있다[15].

$$\sigma_i^2 = \sigma_{i,flt}^2 + \sigma_{i,uir}^2 + \sigma_{i,air}^2 + \sigma_{i,tropo}^2 \tag{II-9}$$

1. Clock-ephemeris covariance matrix message

각각의 GPS 위성의 측정치에 포함된 위성 시계 및 궤도 오차의 표준 편차는 다음과 같은 식으로 계산할 수 있다.

$$\sigma_{i,fit}^{2} = \left[\left(\sigma_{i,UDRE} \right) \cdot \left(\delta UDRE \right) + \text{degradation parameter} \right]^{2}$$
(II-10)

 $\sigma_{i,UDRE}$ 와 $\delta UDRE$ 는 각각 Message Types 2-6, 24 와 10 & 28 에 담겨 사용자에게 전송된다. Degradation parameter 는 과거에 받은 정보를 일정 시간 동안 유지할 때 발생하는 정확도 하락을 보정하기 위한 값으로 message types 10 에 담겨있으며 degradation parameter 가 존재하지 않는 경우는 8m 로 고정하여 사용한다.

2. Ionospheric delay estimation error

전리층 오차의 공분산 값은 SBAS 전리층 보정정보를 이용하여 전리층 지연 값을 제거 후 남은 잔여 오차를 bound 해주는 표준편차이다. SBAS 는 전리층 분포가 350km 고도에 분포하는 thin-shell 모델을 가정하고 있으며 아래의 그림과 같이 전세계를 grid point 로 나누어 sigma 값을 전송해준다.



Figure II-5 SBAS 전리충 격자점

사용자는 아래의 식을 이용하여 GPS 측정치가 thin-shell 을 통과하는 지점의 표준편차를 가중치를 주어 계산하게 된다.



Figure II-6 SBAS Ionospheric pierce point

$$\begin{aligned} x_{pp} &= \frac{\lambda_{pp} - \lambda_{1}}{\lambda_{2} - \lambda_{1}} \\ y_{pp} &= \frac{\phi_{pp} - \phi_{1}}{\phi_{2} - \phi_{1}} \\ W_{1} &= x_{pp} y_{pp} \\ W_{2} &= (1 - x_{pp}) y_{pp} \\ W_{2} &= (1 - x_{pp}) (1 - y_{pp}) \\ W_{3} &= (1 - x_{pp}) (1 - y_{pp}) \\ W_{4} &= x_{pp} (1 - y_{pp}) \\ \sigma_{UVE}^{2} &= \sum_{n=1}^{4} W_{n} (x_{pp}, y_{pp}) \cdot \sigma_{n,ionogrid}^{2} \end{aligned}$$
(II-11)

SBAS 는 수직 전리층 지연 값을 제공하기 때문에 다음과 같이 obliquity factor 를 곱하여 경사 전리층 지연 값을 계산하게 된다.

$$F_{pp} = \left[1 - \left(\frac{R_e \cos \theta_i}{R_e + h_I}\right)^2\right]^{-\frac{1}{2}}$$
(II-12)
$$\sigma_{UIRE} = F_{PP} \cdot \sigma_{UIVE}$$
$$R_e = 6378136.0m , \quad h_I = 350000.0m$$

3. 수신기 잡음 및 다중 경로 오차

WAAS 표준 문서에는 아래와 같이 수신기 잡음 및 다중 경로 오차에 관한 식이 지수함수 형태로 모델링 되어있다.

$$\sigma_{i,air} = \left(\sigma_{noise,GPS}^{2}\left[i\right] + \sigma_{multipath}^{2}\left[i\right] + \sigma_{divg}^{2}\left[i\right]\right)^{1/2}$$
(II-13)

위 식에서 첫번째와 세번째 항의 합은 최대 0.36m 보다 작게끔 GPS 위성이 설계 되어있기 때문에 다음과 같이 worst case로 가정한다.

$$\left(\sigma_{noise,GPS}^{2}\left[i\right] + \sigma_{divg}^{2}\left[i\right]\right)^{1/2} = 0.36 meters \tag{II-14}$$

다중 경로 오차에 관한 식은 다음과 같이 위성의 앙각의 함수로 모델링 되어있다.

$$\sigma_{\text{multipath}}[i] = 0.13 + 0.53e^{(-\theta_i/10 \text{deg})} \text{meters} \tag{II-15}$$

3. Tropospheric delay estimation error

대류층 오차 공분산 역시 마찬가지로 위성 앙각의 함수로 모델링 되어있다.

$$m(\theta_i) = \frac{1.001}{\sqrt{0.002001 + \sin^2(\theta_i)}}$$
(II-16)

$$\sigma_{i,tropo} = (\sigma_{TVE} \cdot m(\theta_i)) meters \quad \text{with} \quad \sigma_{TVE} = 0.12 meters \tag{II-17}$$

최종적으로 추정 위치의 오차 공분산을 통해 보호수준을 계산하게 된다. 이때 보호수준은 수직과 수평으로 나누어 계산되며 수평은 다시 운항 단계에 따라 다르게 계산된다.

$$HPL_{SBS} = \begin{cases} K_{H,NPA} \cdot d_{major} & \text{for en route through LNAV} \\ K_{H,PA} \cdot d_{major} & \text{for LNAV/VNAV,LP,LPV approach} \end{cases}$$
(II-18)
$$VPL_{SBAS} = K_{V} \cdot d_{U}$$

보호수준을 계산하기위해 필요한 상수 값들은 각 운항 단계에 요구되는 무결성 요구조건에 따라 정의되며 다음과 같다.

$$K_{H,NPA} = 6.18$$

 $K_{H,PA} = 6.0$ (II-19)
 $K_V = 5.33$

표준 정규분포에서 $\pm 5.33\sigma$ 영역 밖의 확률은 10^{-7} 이다. 식 II-19에서 수직 보호수준계산에 이용되는 상수 K_v (= 5.33)가 의미하는 바는 SBAS를 통한 무결성 보장 확률이 99.99999%라는 것을 의미한다.

5. 수신기 독자 무결성 감시 (RAIM)

앞서 언급되었던 SBAS 보정정보를 사용한 보호수준 계산과 달리 RAIM은 수신기가 독자적으로 보호수준을 계산할 수 있다. RAIM 역시 마찬가지로 측정치 오차 공분산 값을 모델을 통해 계산하여 가중 최소 자승법을 이용하여 위치 해를 추정하고 보호수준을 계산하게 된다. SBAS는 측정치의 고장을 중앙 기준국에서 감지하여 사용자에게 제한 시간(TTA) 이내에 전달하는 시스템이지만 RAIM은 수신기가 독자적으로 고장을 검출할 수 있어야한다. 일반 의사거리를 활용하는 Residual Based RAIM 같은 경우 측정치 잔차들의 제곱 합(WSSE, Weighted Sum of Squared Error)의 제곱근을 판단 인자(test statistics)로 활용하여 고장 여부를 판단하게 된다. 실제 측정치와 앞서 계산한 가중 최소 자승법으로 추정한 위치로부터 역산한 측정치의 차이를 측정치의 잔차로 가정하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta \hat{\mathbf{z}} = \vec{\mathbf{z}} - \mathbf{H} \hat{\mathbf{x}}$$

= $\vec{\mathbf{z}} - \mathbf{H} \left(\left(\mathbf{H}^T \mathbf{V}^{-1} \mathbf{H} \right)^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{V}^{-1} \vec{\mathbf{z}} \right)$
= $\left[\mathbf{I} - \mathbf{H} \left(\mathbf{H}^T \mathbf{V}^{-1} \mathbf{H} \right)^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{V}^{-1} \right] \vec{\mathbf{z}}$
= $[\mathbf{I} - \mathbf{P}] \vec{\mathbf{z}}$ (II-20)

 $\mathbf{P} \triangleq \mathbf{H} \left(\mathbf{H}^{T} \mathbf{V}^{-1} \mathbf{H} \right)^{-1} \mathbf{H}^{T} \mathbf{V}^{-1}$ (II-21)

이 잔차들의 제곱 합은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$WSSE \triangleq \delta \hat{\mathbf{z}}^{T} \mathbf{V}^{-1} \delta \hat{\mathbf{z}}$$

= $\vec{\mathbf{z}}^{T} [\mathbf{I} - \mathbf{P}]^{T} \mathbf{V}^{-1} [\mathbf{I} - \mathbf{P}] \vec{\mathbf{z}}$ (II-22)
= $\vec{\mathbf{z}}^{T} [\mathbf{V}^{-1} - \mathbf{P}^{T} \mathbf{V}^{-1} - \mathbf{V}^{-1} \mathbf{P} + \mathbf{P}^{T} \mathbf{V}^{-1} \mathbf{P}]$

위 식에서 WSSE의 두번째 항과 네번째 항은 수식적으로 동일하다. 이는 아래의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{P}^{T}\mathbf{V}^{-1}\mathbf{P} = \left[\mathbf{H}\left(\mathbf{H}^{T}\mathbf{V}^{-1}\mathbf{H}\right)^{-1}\mathbf{H}^{T}\mathbf{V}^{-1}\right]^{T}\mathbf{V}^{-1}\left[\mathbf{H}\left(\mathbf{H}^{T}\mathbf{V}^{-1}\mathbf{H}\right)^{-1}\mathbf{H}^{T}\mathbf{V}^{-1}\right]$$
$$= \mathbf{V}^{-1}\mathbf{H}\left(\mathbf{H}^{T}\mathbf{V}^{-1}\mathbf{H}\right)^{-1}\mathbf{H}^{T}\mathbf{V}^{-1}\mathbf{H}\left(\mathbf{H}^{T}\mathbf{V}^{-1}\mathbf{H}\right)^{-1}\mathbf{H}^{T}\mathbf{V}^{-1}$$
$$= \mathbf{V}^{-1}\mathbf{H}\left(\mathbf{H}^{T}\mathbf{V}^{-1}\mathbf{H}\right)^{-1}\mathbf{H}^{T}\mathbf{V}^{-1}$$
$$= \mathbf{P}^{T}\mathbf{V}^{-1}$$
(II-23)

결과적으로 WSSE 는 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$WSSE = \vec{z}^T \mathbf{V}^{-1} [\mathbf{I} - \mathbf{P}] \vec{z}$$
(II-24)

Residual Based RAIM에서는 WSSE의 제곱근을 판단 인자로 사용하게 된다. 이때 WSSE는 제곱의 형태이기 때문에 χ² 분포를 따르게 된다. χ² 분포의 자유도는 아래의 식과 같이 측정치 개수 m개에서 추정하는 state의 개수인 4를 뺀 m-4의 자유도를 갖는 분포를 따르게 된다. 이 방법의 수식 유도와 관련된 문헌은 다음과 같다[16].

$$E[WSSE] = m - 4 \tag{II} - 25$$

측정치에 고장이 존재하는 경우 H_1 (faulty case)으로 나타내고 고장이 없는 경우 H_0 (fault free case)라고 나타낸다. WSSE 는 H_1 case 의 경우 non-central χ^2

분포를 갖게 되고 H_0 case 의 경우 central χ^2 분포를 갖게 된다. 측정치에 고장(f) 가 발생하면 고장에 의한 non centrality parameter 는 식 II-26 과 같이 수식적으로 계산할 수 있다.

$$\lambda_{RB}^2 = \mathbf{f}^T \mathbf{V}^{-1} (\mathbf{I} - \mathbf{HS}) \mathbf{f}$$
(II-26)

Figure II-7 과 같이 WSSE 의 확률분포를 통해 Threshold 를 설정하여 고장 발생 유무를 판단하게 된다. WSSE 확률분포에서 좌측의 central χ^2 분포는 H_0 case, 우측의 non-central χ^2 분포는 H_1 case 를 나타낸다. 그러나 고장(f) 의 크기를 알 기 위해선 user 의 true 위치를 알아야하기 때문에 실제 H_1 case 의 분포는 알 수 없다. 따라서 fault free 상태인 H_0 case 의 central χ^2 분포를 기준으로 Threshold 값을 결정하게 된다. Central χ^2 분포에서 Threshold 를 넘어서는 영역은 고장이 발생하지 않았지만 시스템이 고장이라고 인식하게 되는 False Alarm 영역에 해당한다. 반대로 non-central χ^2 분포에서 Threshold 를 넘지 않은 부분은 고장이 발생하였으나 시스템이 고장을 인지하지 못하는 Missed Detection 영역에 해당한다. 시스템에 악영향을 미치는 Missed Detection 영역을 줄이도록 Threshold 를 설정해야하지만 앞서 말했듯이 H_1 case 의 분포는 알 수 없기 때문에 False Alarm 확률을 이용하여 Threshold 를 설정하게 된다.



Figure II-7 WSSE의 χ^2 분포와 고장 검출 기준 값

False alarm rate은 시스템의 연속성에 지장을 주는 파라미터이다. 연속성이란 시스템이 임무를 끝마치기 이전에 원하는 성능을 발휘할 수 없어 사용이 중단된 경우를 의미한다. 일반적으로 고장이 발생하지 않았으나 판단 인자 (√WSSE) 가 Threshold (T) 를 넘게 되어 시스템이 중단되는 False alarm 상황이 발생한 경우를 연속성이 깨진다고 본다. 따라서 False alarm은 앞서 설명한 RNP 항목 중 Continuity의 요구사항으로 주어지게 된다.

$$\int_{T_{RB}}^{\infty} \chi_q^2 (m-4,0) dq = P_{CONT}$$
(II-27)

m-4의 자유도를 갖는 central χ^2 분포에서 RNP의 continuity 요구사항 P_{CONT} 를 만족하는 threshold T_{RB} 는 식 II-28과 같이 구할 수 있다. 이때 Q^{-1} 는 역 카이 제곱 분포를 의미한다.

$$T_{RB}^{2} = Q^{-1} \left(1 - P_{FA} \mid m - 4 \right) \tag{II-28}$$

판단 인자 도메인 상에서 최소 검출 가능한 고장의 크기 (T_{RB})를 위치 오차 도메인으로 1 대 1 대응 시키는 V-slope 는 식 II-29 를 통해 계산할 수 있다.

$$V_{slope,j} = \frac{E[\delta \hat{\mathbf{x}}_{v}]}{\sqrt{E[WSSE_{H_{1}}] - E[WSSE_{H_{0}}]}}$$
$$= \sigma_{j} \frac{\left[\left(\mathbf{H}^{T} \mathbf{V}^{-1} \mathbf{H} \right)^{-1} \mathbf{H}^{T} \mathbf{V}^{-1} \right]_{3j}}{\sqrt{1 - \mathbf{P}_{jj}}}$$
(II-29)

아래의 Figure II-8 과 같이 V-slope 는 위성에 따라 크기가 다르다. 따라서 계산된 V-slope 결과 중 가장 큰 값을 worst case 로 선택한다. 설정된 V-slope 에 threshold 를 곱하면 검정 가능한 최소 고장에 대응하는 보호수준값을 계산할 수 있고 이로부터 고장 발생시의 보호수준을 식 II-30 과 같이 계산하게 된다.



Figure II-8 √WSSE 와 수직 오차의 상관 관계

$$VPL_{H1} = \left| T \cdot \max\left(Vslope \right) \right| + k_{md} \cdot \sigma_{U} \tag{II-30}$$

식 II-30 의 우변의 첫번째 항은 고장 상황 가정 시 판단 인자 도메인에서 최소 검출 가능한 고장이 위치 오차 도메인에 대응하는 크기를 보호수준으로 나타낸 것을 의미하고 두번째 항은 고장이 발생한 상황에서도 확률적으로 오차를 보호하기 위한 보호수준을 의미한다.

고장이 없는 경우의 보호수준계산방식은 앞서 설명한 SBAS 와 동일하게 구해진다.

$$VPL_{H0} = k_{find} \cdot \sigma_U \tag{II-31}$$

최종적으로 고장이 발생한 경우와 그렇지 않은 경우 모두 가정하고 보호수준을 계산한 뒤 worst case 를 최종 보호수준으로 계산한다.

$$VPL = \max \begin{pmatrix} VPL_{H0} & VPL_{H1} \end{pmatrix}$$
(II-32)

식 II-29,30 에서 k_{md} 와 k_{find} 는 RNP 무결성 파라미터와 관련된 상수이다. H_0 case 에서 계산된 보호수준은 고장의 Missed detection 확률을 10^{-7} 수준으로 보장할 수 있다. H_1 case 에서는 보호수준의 Missed detection 확률은 H_0 case 에 비하여 10^4 배 크게 된다. 이는 위성의 고장 확률까지 고려된 결과로 일반적으로 GPS 위성의 고장 확률은 10^{-5} 수준으로 보고있다.

Table II-2 보호수준 계산을 위한 상수 k

	k	$P^*(k\sigma) \triangleq P(\mu + k\sigma) - P(\mu - k\sigma)$	$1 - P^*(k\sigma)$
Fault Free case	3.29	0.999	10 ⁻³
Faulty case	5.33	0.9999999	10^{-7}

III.단일 주파수 기반 RRAIM

1. 시간 차분 반송파 위상 측정치

RRAIM 은 무결성이 보장된 초기 위치로부터 상대 위치를 더하여 현재 위치를 계산한다. RRAIM 알고리즘을 수행하는 동안 초기 위치는 고정된다. 상대 위치를 계산할 때는 시간 차분 된 반송파 위상 측정치를 사용한다. 이후 초기 위치의 무결성은 외부로부터 받은 보정정보를 통해 보장 되었다고 가정하기 때문에 상대 위치의 무결성만을 감시하여 전체 무결성 감시를 수행하게 된다.

이때 RRAIM 에서 사용하는 반송파 위상 측정치는 아래의 III-1 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi^{j} = \left[\mathbf{R}^{j} - \mathbf{R}_{u} \right] \cdot \mathbf{e}_{u}^{j} + B - b^{j} - I^{j} + T^{j} + \delta d^{j} + m^{i} + N^{i} \lambda + v_{\phi}^{i}$$
(III-1)

여기서 ǿ 는 반송파 위상 측정치를 나타내며 m은 다중 경로 오차, N은 미지정수, λ 는 파장의 길이를 의미한다. 그 외의 나머지는 식 Ⅱ-1에서 나타난 의사거리의 표현방식과 동일하다. 앞서 의사거리를 설명할 때 정의한 것과 동일하게 반송파 위상 측정치 식을 나타내면 다음과 같다.

$$\vec{\mathbf{z}} = \mathbf{H}\vec{\mathbf{x}} + \vec{\mathbf{v}} - \vec{N}\boldsymbol{\lambda} \tag{III}-2)$$

두 시점의 측정치를 시간 차분하면 결과는 식 III-3과 같다. 이때 아래 첨자 c =사용하여 현재 시점(current)의 측정치 식을 나타내고 아래 첨자 p = 사용하여 초기 시점(past)의 측정치 식을 나타냈다.

$$\Delta_t \vec{\mathbf{z}} = \vec{\mathbf{z}}_c - \vec{\mathbf{z}}_p$$

$$= \mathbf{H}_c \vec{\mathbf{x}}_c - \mathbf{H}_p \vec{\mathbf{x}}_p + \vec{\mathbf{v}}_c - \vec{\mathbf{v}}_p$$
(III-3)

반송파 위상 측정치의 미지정수는 시간에 따라 변하지 않는 특성을 가지고있다. 따라서 시간 차분하는 동안 사이클슬립 발생은 없다고 가정했을 때 시간 차분을 통해 미지정수를 소거할 수 있다. 이때 식 III-3의 좌변에 동일한 항 $(\mathbf{H}_c \dot{\mathbf{x}}_p)$ 을 더하고 빼주면 식 III-4와 같이 표현된다.

$$\Delta_{t} \vec{\mathbf{z}} = \Delta_{t} \vec{\mathbf{z}} - \mathbf{H}_{c} \vec{\mathbf{x}}_{p} + \mathbf{H}_{c} \vec{\mathbf{x}}_{p}$$

$$= \mathbf{H}_{c} \left(\vec{\mathbf{x}}_{c} - \vec{\mathbf{x}}_{p} \right) + \left(\mathbf{H}_{c} - \mathbf{H}_{p} \right) \vec{\mathbf{x}}_{p} + \vec{\mathbf{v}}_{c} - \vec{\mathbf{v}}_{p} \qquad (\text{III}-4)$$

$$= \mathbf{H}_{c} \Delta_{t} \vec{\mathbf{x}} + \Delta_{t} \mathbf{H} \vec{\mathbf{x}}_{p} + \Delta_{t} \vec{\mathbf{v}}$$

시간 차분 된 반송파 위상 측정치 식의 양변에 시간의 변화에 따른 사용자의 위치 변화량 $(\Delta_i \mathbf{H} \cdot \hat{\mathbf{x}}_p)$ 을 빼주면 최종적으로 RRAIM에서 사용되는 측정치 $(\Delta_i \mathbf{r})$ 를 다음과 같이 계산할 수 있다[17].

$$\Delta_{t} \vec{\mathbf{r}} \triangleq \Delta_{t} \vec{\mathbf{z}} - \Delta_{t} \mathbf{H} \hat{\mathbf{x}}_{p}$$

$$= \mathbf{H}_{c} \Delta_{t} \vec{\mathbf{x}} + \Delta_{t} \mathbf{H} \left(\vec{\mathbf{x}}_{p} - \hat{\mathbf{x}}_{p} \right) + \Delta_{t} \vec{\mathbf{v}}$$

$$= \mathbf{H}_{c} \Delta_{t} \vec{\mathbf{x}} - \Delta_{t} \mathbf{H} \widetilde{\mathbf{x}}_{p} + \Delta_{t} \vec{\mathbf{v}}$$
(III-5)

2. 측정치 오차 공분산

측정치의 오차는 초기 위치 오차 $(\tilde{\mathbf{x}}_{p})$ 와 시간 차분 된 오차 $(\Delta, \vec{\nu})$ 항으로 이루어져있다. 이때 측정치 오차 공분산을 \mathbf{V}_{Δ} 로 정의하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_{\Delta} &\triangleq \operatorname{cov} \left[\Delta_{t} \vec{\mathbf{r}} \right] \\ &= \operatorname{cov} \left[\Delta_{t} \mathbf{H} \tilde{\mathbf{x}}_{p} + \Delta_{t} \vec{\mathbf{v}} \right] \\ &= \Delta_{t} \mathbf{H} \cdot \operatorname{cov} \left[\tilde{\mathbf{x}}_{p} \right] \Delta_{t} \mathbf{H}^{T} + \operatorname{cov} \left[\Delta_{t} \vec{\mathbf{v}} \right] \end{aligned}$$
(III-6)

RRAIM 측정치의 오차 공분산은 초기 위치의 오차 공분산 $(cov[\Delta, H\tilde{x}_{p}])$ 과 시간 차분 된 반송파 위상 측정치의 오차 공분산 $(cov[\Delta, v])$ 의 항으로 이루어져있다.

기존의 이중 주파수 RRAIM에서 정의하는 상대 위치 오차 공분산 모델은 다음과 같다[18].

	모델 식
대류층 오차	$\sigma_{\Delta tropo} = \left[1.22 \frac{cm}{km} + 0.41 \frac{cm}{km} \times \frac{90 \deg - El}{85 \deg}\right] \times 0.092 km / \sec T$
위성 시계 오차	$\sigma_{\Delta(n+mp)} = 0.085 \frac{cm}{s} \times T$
잡음 및 다중 경로 오차	$\sigma_{\Delta c l k}^2 = 6(cm)$

Table III-1 기존 RRAIM 측정치 오차 모델

기존 이중주파수기반의 RRAIM은 주파수 조합을 사용하여 전리층을 제거한다. 전리층 오차는 주파수의 제곱에 반비례한다는 특성을 가지고있다. 따라서 서로 다른 주파수 측정치의 조합을 통해 전리층 오차의 1st order 성분을 완벽히 제거할 수 있다. 그러나 조합을 통해 전리층을 제거하는 경우 잡음이 커진다는 단점이 존재한다.

본 연구에서는 전리층 오차를 직접 모델링하여 단일 주파수 기반의 오차 모델을 새로 정의하였다. 또한 단일 주파수를 이용하기 때문에 기존의 모델보다 작은 잡음 값을 획득할 수 있었으며 대류층 오차와 위성 시계 오차 모델은 기존의 것을 사용하였다. 본 논문에서 사용하는 오차 모델은 다음과 같다.

	모델 식
대류층 오차	$\sigma_{\Delta tropo} = \left[1.22\frac{cm}{km} + 0.41\frac{cm}{km} \times \frac{90 \deg - El}{85 \deg}\right] \times 0.092 km / \sec T$
위성 시계 오차	$\sigma_{\Delta(n+mp)} = 0.085 \frac{cm}{s} \times T$
잡음 및 다중 경로 오차	$\sigma^2_{\Delta clk} = 2(cm)$
전리층 오차	$\sigma_{\Delta iono} = 5.2mm / s \times T$

Table III-2 제안하는 RRAIM 측정치 오차 모델

전리층 오차 모델은 기존에 시간 차분 된 전리층 변화율에 관한 논문을 참조하여 설정하였다[19]. 해당 연구에서는 전리층 폭풍이 발생한 날의 WAAS(Wide Area Augmentation System)데이터를 수집하여 시간에 따라 변화하는 전리층을 바운드 해줄 수 있는 시그마에 대해 분석하였다. 해당 연구에선 간혹 발생하는 극심한 변화들은 매우 드물게 발생하는 outlier로 판단하여 제거한 뒤 나머지들을 바운드 해줄 수 있는 값을 23mm/sec로 산출 하였다. 최종적으로 이를 대략 5 σ 값이라 판단하여 1 σ 값을 5.2mm/sec 로 산출하였다. Figure III-1은 전리층 예측 오차를 시간에 따라 나타낸 히스토그램이며 Table III-3 는 이를 시간에 따라 나타낸 표이다.



Figure III-1 전리충 변화 예측 오차 히스토그램

Time (sec)	99.9% Error(m)	99.999% Error (m)	Maximum Error (m)
10	0.05	0.12	0.23
20	0.075	0.20	0.35
30	0.10	0.28	0.48
40	0.138	0.35	0.58
50	0.163	0.41	0.71
60	0.188	0.48	0.84
70	0.225	0.55	0.90
80	0.25	0.65	1.01
90	0.275	0.73	1.09
100	0.30	0.79	1.14
110	0.338	0.84	1.18
120	0.363	0.90	1.25
130	0.40	0.95	1.53
140	0.425	1.00	1.56
150	0.45	1.07	1.63
160	0.488	1.18	1.74
170	0.513	1.28	1.98
180	0.55	1.36	2.29
190	0.575	1.44	2.52
200	0.613	1.54	2.77

Table III-3 시간에 따른 전리층 변화 예측 오차

3. 위치 오차 공분산

식 III-5로부터 가중 최소 자승법을 통해 추정한 상대 위치는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta_t \hat{\mathbf{x}} = \left(\mathbf{H}_c^T \mathbf{V}_{\Delta}^{-1} \mathbf{H}_c\right)^{-1} \mathbf{H}_c^T \mathbf{V}_{\Delta}^{-1} \Delta_t \mathbf{r}$$
(III-7)

가중 최소 자승법을 추정한 상대 위치의 오차 공분산은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\operatorname{cov}\left[\Delta_{t}\widetilde{\mathbf{x}}\right] = \left(\mathbf{H}_{c}^{T}\mathbf{V}_{\Delta}^{-1}\mathbf{H}_{c}\right)^{-1}\mathbf{H}_{c}^{T}\mathbf{V}_{\Delta}^{-1}E\left[\Delta_{t}\vec{\mathbf{r}}\Delta_{t}\vec{\mathbf{r}}^{T}\right]\mathbf{V}_{\Delta}^{-1}\mathbf{H}_{c}\left(\mathbf{H}_{c}^{T}\mathbf{V}_{\Delta}^{-1}\mathbf{H}_{c}\right)^{-1}$$
$$= \left(\mathbf{H}_{c}^{T}\mathbf{V}_{\Delta}^{-1}\mathbf{H}_{c}\right)^{-1}\mathbf{H}_{c}^{T}\mathbf{V}_{\Delta}^{-1}\mathbf{V}_{\Delta}\mathbf{V}_{\Delta}^{-1}\mathbf{H}_{c}\left(\mathbf{H}_{c}^{T}\mathbf{V}_{\Delta}^{-1}\mathbf{H}_{c}\right)^{-1}$$
$$= \left(\mathbf{H}_{c}^{T}\mathbf{V}_{\Delta}^{-1}\mathbf{H}_{c}\right)^{-1}$$
(III-8)

현재 위치의 오차를 식 III-9와 같이 y로 정의하면 현재 위치의 공분산은 식 III-10과 같다.

$$y = \tilde{\mathbf{x}}_p + \Delta_t \tilde{\mathbf{x}}$$
(III-9)

$$\operatorname{cov}[\boldsymbol{y}] = \operatorname{cov}[\tilde{\boldsymbol{x}}_{p}] + \operatorname{cov}[\Delta_{t}\tilde{\boldsymbol{x}}] + E[\tilde{\boldsymbol{x}}_{p}\Delta_{t}\tilde{\boldsymbol{x}}^{T}] + E[\Delta_{t}\tilde{\boldsymbol{x}}\tilde{\boldsymbol{x}}_{p}^{T}]$$
(III-10)

식 III-10에서 첫째 항과 둘째 항은 각각 초기 위치와 상대 위치의 오차 공분산이다. 셋째 항과 넷째 항은 초기 위치 오차와 상대 위치 오차 사이의 상관관계로 인해 발생하는 항이다. 이를 식으로 표현하면 식 III-11과 같다.

$$E\left[\tilde{\mathbf{x}}_{p}\Delta_{t}\tilde{\mathbf{x}}^{T}\right] = E\left[\tilde{\mathbf{x}}_{p}\left\{\mathbf{S}_{\Delta}\left(-\Delta_{t}\mathbf{H}\tilde{\mathbf{x}}_{p}+\Delta_{t}\vec{v}\right)\right\}^{T}\right]$$
$$= -E\left[\tilde{\mathbf{x}}_{p}\tilde{\mathbf{x}}_{p}^{T}\right]\Delta_{t}\mathbf{H}^{T}\mathbf{S}_{\Delta}^{T} + E\left[\tilde{\mathbf{x}}_{p}\Delta_{t}\vec{v}^{T}\right]\mathbf{S}_{\Delta}^{T}$$
$$= -\operatorname{cov}\left[\tilde{\mathbf{x}}_{p}\right]\Delta_{t}\mathbf{H}^{T}\mathbf{S}_{\Delta}^{T}$$
(III-11)

본 연구에서는 초기 위치의 오차 공분산 $\left(\operatorname{cov} \left[\tilde{\mathbf{x}}_{p} \right] \right)$ 은 SBAS로부터 획득한다고 가정하였다.

IV.사용자 무결성 감시 시뮬레이션

1. 시뮬레이션 시나리오

본 연구에서는 단일 주파수 기반 RRAIM의 도심지에서 성능을 확인하기 위한 시뮬레이션을 진행하였다. RRAIM은 무결성이 보장된 초기 위치로부터 상대 위치를 더하여 현재 위치를 계산하는 알고리즘이기 때문에 무결성이 보장된 초기 위치를 획득할 수 있어야한다. 본 연구에서는 초기에 개활지를 비행하다 도심지에 수직 착륙하는 드론을 시뮬레이션 시나리오 상황으로 가정하였다. 개활지를 비행하는 동안에는 SBAS 신호를 원활하게 수신하여 무결성이 보장된다고 가정하고 이후 도심지에 착륙하는 동안 최초로 가시 위성 개수가 줄어드는 순간부터 SBAS 신호가 차단된 상황이라 가정하고 RRAIM을 통한 무결성 감시를 수행하였다. 본 연구에서는 미국의 SBAS인 WAAS 모델을 이용하여 시뮬레이션을 진행하였으며 WAAS와 관련된 파라미터들은 WAAS평가 분석표를 참고하여 설정하였다[20]. 시뮬레이션에 사용한 측정치는 2019년 9월 19일의 데이터를 이용하여 생성하였다. 측정치 생성에 사용한 모델은 Table IV-1과 같다.

	오차 성분	모델	
	궤도 오차	Sp3 & BRDC	
	전리층 오차	IONEX data	
GPS	대류층 오차	Saastamoinen model	
	수신기 잡음	1 st order Markov process	
	다중 경로 오차	1 st order Markov process	
SBAS	WAAS Performance Analysis R	eport	

Table IV-1 시뮬레이션 측정치 생성 모델

WAAS 평가 분석표는 분기별로 WAAS의 정확성, 가용성, 무결성 등을 분석한 자료로 미국연방항공청 홈페이지에서 다운 받을 수 있다. 평가 분석표에는 WAAS 네트워크와 FAA's NTSB (National Satellite Test Bed) 네트워크에서 획득한 WAAS data를 바탕으로 분석한 결과들이 담겨 있다. Figure IV-1은 각 기준국에서 발생한 최대 수직 오차와 그때의 수직 보호수준값을 나타낸 결과이다. 본연구에서는 해당 결과들의 평균 값인 25m를 3σ로 판단하고 대략 2σ에 해당하는 17m를 시뮬레이션의 초기 수직 보호수준으로 설정하였다.



Figure IV-1 WAAS 기준국 최대 수직 오차 발생 시 수직 보호 수준

고층 빌딩에 의한 신호 차단 상황을 모델링하기 위해 도심 상황을 모델링하였다. 본 연구에서는 다중 위성군이 아닌 GPS 만을 활용하기 때문에 착륙 지점에서도 가시 위성이 5개 이상 보이도록 건물 사이 거리를 정하였다. 착륙 지점을 기점으로 동쪽으로 70m 서쪽을 60m의 벽을 세워 빌딩을 묘사하였다. Figure IV-2,3,4는 각각 모델링 된 도심 상황과, 빌딩으로 인해 GPS 위성이 가려졌을 때의 skyplot과, 시뮬레이션 동안 감소한 가시 위성 수와 이로 인한 PDOP (Position Dilution of Precision) 증가를 나타낸다.



Figure IV-2 도심 환경 모델링



Figure IV-3 빌딩에 의한 가시 위성 차단



Figure IV-4 가시 위성과 PDOP 변화 (시간 : 20초)

시뮬레이션 결과 비교

제안하는 알고리즘은 전리층 오차를 시간의 함수로 모델링했기 때문에 시뮬레이션 시간이 길어짐에 따라 전리층 오차 누적으로 인한 성능 저하가 발생할 것으로 예상할 수 있다. 따라서 시뮬레이션은 두가지 상황으로 나누어 진행하였다. 동일한 위치에서 착륙지점까지 3m/s로 하강하는 경우와 1m/s로 하강하는 경우에 대해 시뮬레이션을 진행하였다. DJI 사 드론의 최대 하강속도가 3m/s 인 것에 착안하여 값을 설정하였다. 시뮬레이션의 구성을 정리하면 Table IV-2와 같다. 동일 위치에서 하강을 가정했기 때문에 하강 속도와 시뮬레이션시간은 반비례 관계에 있다.

Table IV-2 시뮬레이션 시나리오

	하강 속도	하강 시간
Simulation 1	3 m/s	20 sec
Simulation 2	1 m/s	60 sec

2. 의사거리 RAIM과 비교

제안하는 단일 주파수 기반 RRAIM과 일반 의사거리 RAIM을 비교하는 시뮬레이션을 진행하였다. Figure IV-5는 3m/s로 하강하는 드론의 3차원 궤적을 나타낸 것이다. 제안하는 RRAIM 방법을 이용하여 시간 차분 반송파 위상으로 위치를 계산했을 때와 일반 RAIM 사용시 의사거리를 사용하여 계산한 위치 결과를 비교하였다.



Figure IV-5 시뮬레이션상 3차원 하강 궤적

초기에는 두 방법 모두 SBAS를 이용하여 계산된 위치에서 출발한다. 이후 제안하는 RRAIM은 시간 차분 반송파위상 측정치를 이용하여 상대 위치를 계산하여 초기 위치로부터 누적해 나가고 일반 Classic RAIM은 의사거리를 가중 최소 자승법을 통해 계산하게 된다. 그 결과 잡음 수준이 작고 다중 경로 오차에 강인한 반송파 위상을 측정치로 사용하는 RRAIM의 위치 오차가 더 적게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이때 RRAIM은 초기 위치에 상대 위치를 누적하여 현재 위치를 계산하기 때문에 초기에 정해지는 위치가 RRAIM 위치해 성능에 영향을 끼치게 된다. 이때 시뮬레이션에선 1st order markov process를 이용하여 다중 경로 오차를 모델링 하였다. 따라서 실제 도심지의 다중경로 오차 영향이 반영되지 못하여 의사거리를 이용한 위치해가 좋게 나타났다고 보여진다. 그러므로 실제 데이터를 사용할 경우 더 큰 차이가 발생할 것으로 보여진다.



Figure IV-6 Classic RAIM과 수직 보호수준 비교 (시간 : 20초)

Figure IV-6은 classic RAIM과 단일 주파수 RRAIM의 보호수준을 비교한 결과이다. 초기 보호수준은 두 알고리즘 모두 SBAS 보정정보를 사용하여 계산한 값에서 출발한다. 이후 2번째 epoch 부터 SBAS 신호가 단절되는 상황이 발생됨에따라 classic RAIM의 경우 100m 이상으로 보호수준이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이후 11epoch과 16epoch 근방에서 다시 대폭 상승하게 되는데 앞서 나타난 Figure IV-4를 살펴보면 가시 위성 감소로 인해 PDOP가 증가하는 시점인 것을 확인할 수 있다. 하지만 제안하는 단일 주파수 RRAIM의 경우 시뮬레이션 진행동안 가시 위성이 감소함에도 불구하고 초기에 SBAS에서 얻어진 보호수준 결과를 착륙시까지 유지하는 것을 확인할 수 있다.

Table IV-3 Classic RAIM과 제안하는 RRAIM의 수직 보호 수준 (시간 : 20초)

VPL	Classic RAIM	Proposed RRAIM
Initial epoch	17.2 m	17.2 m
Final epoch	236.84 m	24.74 m

Table IV-4 는 초기 epoch 과 마지막 epoch 에서 수직 보호수준 결과를 나타낸 결과이다. 제안하는 단일 주파수 RRAIM 의 보호수준은 classic RAIM 에 비해 90% 향상된 결과를 가지는 것을 알 수 있다. 또한 제안하는 알고리즘은 SBAS 의 설계 요구조건인 LPV-200 의 수직 경보 한계(35 m)보다 작은 값을 갖는 것을 확인할 수 있다.

3. 이중 주파수 RRAIM과 비교

Simulation 1: 하강 시간 20초



Figure IV-7 기존 이중 주파수 RRAIM과 수직 보호수준 비교 (시간 : 20초)

Figure IV-7은 20초의 시뮬레이션 동안 기존의 RRAIM과 제안하는 RRAIM의 보호수준을 같이 표현한 그래프이다. 이중 주파수 기반의 conventional RRAIM과 달리 제안하는 단일 주파수 RRAIM은 전리층 오차를 직접 고려하게 된다. 전리층 오차는 시간에 비례하여 증가하기 때문에 시간이 길어질수록 전리층 오차가 누적되게 된다. 그러나 조합을 사용하는 conventional RRAIM에 비해 작은 수신기 잡음을 갖는다는 장점이 있기 때문에 20초동안의 시뮬레이션에서는 보호수준 결과에 큰 차이가 나타나지 않았다. Tabel IV-5는 초기 에폭과 최종 에폭에서 기존 RRAIM과 제안하는 RRAIM의 보호수준을 비교한 결과이다. 20 초의 시뮬레이션에서는 보호수준의 변화가 기존 대비 0.24% 밖에 증가하지 않았고 이를 통해 제안하는 RRAIM이 기존 이중 주파수 RRAIM과 유사한 성능을 나타내는 것을 확인할 수 있다.

VDI	Simulation tin	ne : 20 sec
VPL	Conventional RRAIM	Proposed RRAIM
Initial epoch	17.2 m	17.2 m

24.74 m

24.68 m

Final epoch

Table IV-4 기존 RRAIM과 제안하는 RRAIM의 수직 보호수준 (시간 : 20초)

Simulation 2: 하강 시간 60초



Figure IV-8 기존 이중 주파수 RRAIM과 수직 보호수준 비교 (시간: 60초)

앞서 설명한 것처럼 제안하는 RRAIM은 시간이 지날수록 전리층 오차가 누적되게 된다. Figure IV-8을 살펴보면 시뮬레이션 시간을 60초까지 늘렸을 때 보호수준의 차이가 크게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이때 Figure IV-9를 살펴보게 되면 31epoch을 기점으로 가시 위성이 감소함에 따라 PDOP가 증가하게 되는 것을 확인할 수 있고 이 시점을 기준으로 제안하는 RRAIM의 보호수준과 기존 RRAIM의 보호수준의 차이가 커지는 것을 확인할 수 있다.



Figure IV-9 가시 위성과 PDOP 변화 (시간:60초)

최종 수직 보호수준값을 비교하면 제안하는 알고리즘의 값이 기존 알고리즘의 값보다 27% 크게 계산된 것을 확인할 수 있다. 그럼에도 불구하고 제안하는 RRAIM은 단일 주파수 GPS 수신기 만으로 LPV-200 성능의 보호수준을 만족하는 것을 확인할 수 있다.

Table IV-5 기존 RRAIM과 제안하는 RRAIM의 수직 보호수준 (시간 : 60초)

VPL	Simulation time : 60 sec	
	Conventional RRAIM	Proposed RRAIM
Initial epoch	17.2 m	17.2 m
Final epoch	26.0 m	33.1 m

V. 결론 및 향후 과제

본 연구에서는 단일 주파수 기반의 RRAIM을 이용하여 저가형 단일 주파수 GPS 수신기만으로 도심지에 수직착륙하는 UAM의 무결성 감시 방법을 제안하였다. 초기 개활지를 비행하는 UAM은 SBAS 무결성 보정정보를 원활히 수신하여 보호수준을 계산할 수 있다고 가정하고 도심지에 수직착륙하는 동안 제안하는 RRAIM을 이용하여 무결성 감시를 수행하였다. 기존의 단일 주파수 수신기에서 활용할 수 있는 의사거리 기반의 RAIM은 가시 위성이 현저히 줄고 다중 경로 오차가 극심한 도심지에서는 성능에 저하가 일어나기 때문에 GPS 수신기 단독으로는 활용할 수 없었다. 제안하는 알고리즘은 다중 경로 오차에 강인한 반송파 위상을 사용하기 때문에 별도의 센서나 보정 정보 없이도 GPS 수신기만으로 무결성 감시 알고리즘을 수행할 수 있다. 이때 반송파 위상 측정치를 직접 사용하지않고 시간 차분하여 사용하기 때문에 미지정수를 결정할 필요가 없다. 기존의 이중 주파수 RRAIM의 경우 주파수의 조합을 통해 전리층의 영향을 모두 제거하게 된다. 그러나 기존의 RRAIM을 이용하기 위해선 고가의 다중 주파수 수신기 및 안테나가 필수적이다. 본 연구에서는 시간에 따른 전리층 변화율에 대해 기 연구된 결과를 이용하여 시간 차분 반송파 측정치에 내재된 전리층 오차를 직접 모델링하였다. 이를 통해 기존의 RRAIM 알고리즘을 일반적으로 상용화된 저가의 단일 주파수 수신기 사용자도 사용할 수 있게끔 제안하였다.

제안하는 알고리즘의 성능을 검증을 위해 도심지에 수직착륙하는 시뮬레이션을 진행하였다. 이때 초기에 SBAS 보정정보를 통해 위치와

보호수준을 계산하고 이후 착륙하는 동안에는 외부 보정정보 없이 수신기 단독으로 무결성을 감시한다고 가정하였다. 제안하는 단일 주파수 기반 RRAIM과 일반 의사거리 기반 classic RAIM의 수직 보호수준을 비교하였을 때 classic RAIM 대비 90%의 성능 개선이 있는 것을 확인하였다. 또한 기존의 이중 주파수 기반의 RRAIM과 수직 보호수준을 비교했을 때 3m/s 로 하강하는 시뮬레이션에서는 제안하는 알고리즘의 보호수준이 기존 대비 100.27%값을 가짐으로써 기존의 성능을 유지하는 것을 확인할 수 있었다. 같은 위치에서 1m/s 로 하강하는 시뮬레이션에서는 하강 시간이 3배로 늘어남에 따라 전리층 오차가 누적되는 영향으로 기존대비 제안하는 알고리즘의 보호수준이 127%정도로 크게 계산된 것을 확인할 수 있었다. 그럼에도 불구하고 최종 수직 보호수준은 33.1m로 기존의 수신기 단독으로는 달성할 수 없는 SBAS급의 LPV-200 요구조건을 만족하는 것을 확인하였다. 추후 전리층 오차 모델을 단순히 시간에 비례하는 형태가 아닌 최적화된 모델링을 통해 현재보다 좀 더 작은 수직 보호수준을 계산할 수 있을 것이다. 또한 수평 보호수주까지 고려하여 연구를 진행한다면 도심 사용자에게 적합한 알고리즘을 얻을 수 있을 것이라 예상된다.

참고 문헌

- [1] N. Haala, M. Peter, J. Kremer, and G. Hunter, "Mobile lidar mapping for 3D point cloud collection in Urban Areas – A performance test," *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. – ISPRS Arch.*, vol. 37, pp. 1119–1124, 2008.
- J. H. Rhee and J. Seo, "Low-cost curb detection and localization system using multiple ultrasonic sensors," *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, no. 6, 2019, doi: 10.3390/s19061389.
- S. Zhang, S. Lo, Y. H. Chen, T. Walter, and P. Enge, "GNSS multipath detection in urban environment using 3D building model,"
 2018 IEEE/ION Position, Locat. Navig. Symp. PLANS 2018 Proc., pp. 1053-1058, 2018, doi: 10.1109/PLANS.2018.8373486.
- [4] N. Zhu, J. Marais, D. Betaille, and M. Berbineau, "GNSS Position Integrity in Urban Environments: A Review of Literature," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 19, no. 9, pp. 2762–2778, 2018, doi: 10.1109/TITS.2017.2766768.
- [5] J. Santa, B. Úbeda, R. Toledo, and A. F. G. Skarmeta, "Monitoring the position integrity in road transport localization based services," *IEEE Veh. Technol. Conf.*, no. March 2014, pp. 2801–2805, 2006, doi: 10.1109/VTCF.2006.575.

- [6] A. Angrisano, S. Gaglione, and C. Gioia, "RAIM algorithms for aided GNSS in Urban scenario," 2012 Ubiquitous Positioning, Indoor Navig. Locat. Based Serv. UPINLBS 2012, pp. 1-9, 2012, doi: 10.1109/UPINLBS.2012.6409786.
- [7] N. R. Velaga, M. A. Quddus, A. L. Bristow, and Y. Zheng, "Mapaided integrity monitoring of a land vehicle navigation system," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 13, no. 2, pp. 848-858, 2012, doi: 10.1109/TITS.2012.2187196.
- [8] R. Toledo-Moreo, D. Bétaille, and F. Peyret, "Lane-level integrity provision for navigation and map matching with GNSS, dead reckoning, and enhanced maps," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 11, no. 1, pp. 100–112, 2010, doi: 10.1109/TITS.2009.2031625.
- [9] E. Shytermeja, A. Garcia-Pena, and O. Julien, "Proposed architecture for integrity monitoring of a GNSS/MEMS system with a Fisheye camera in urban environment," *Proc. 2014 Int. Conf. Localization GNSS, ICL-GNSS 2014*, 2014, doi: 10.1109/ICL-GNSS.2014.6934179.
- [10] M. Kitamura, T. Suzuki, Y. Amano, and T. Hashizume, "Evaluation for vehicle positioning in urban environment using QZSS enhancement function," *J. Robot. Mechatronics*, vol. 24, no. 5, pp. 894–901, 2012, doi: 10.20965/jrm.2012.p0894.

- [11] L. T. Hsu, S. S. Jan, P. D. Groves, and N. Kubo, "Multipath mitigation and NLOS detection using vector tracking in urban environments," *GPS Solut.*, vol. 19, no. 2, pp. 249–262, 2015, doi: 10.1007/s10291-014-0384-6.
- [12] J. Kim *et al.*, "A low-cost, high-precision vehicle navigation system for deep urban multipath environment using TDCP measurements," *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 11, pp. 1–19, 2020, doi: 10.3390/s20113254.
- [13] International Civil Aviation Organization, Annex 10 Aeronautical Telecommunications - Volume 1 Radio Navigation Aids, vol. I, no. July 2006. 2006.
- [14] T. Report, U. S. Government, and G. P. Office, "Phase II of the GNSS Evolutionary Architecture Study," no. February, pp. 1–121, 2010.
- [15] RTCA, Inc. "Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System/Wide Area Augmentation System Airborne Equipment, DO-229D" 2016.
- [16] T. Walter and P. Enge, "Weighted RAIM for precision approach," *Proc. ION GPS*, vol. 2, pp. 1995–2004, 1995.
- [17] Y. C. Lee, "A position domain relative RAIM method," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 47, no. 1, pp. 85–97, 2011, doi: 10.1109/TAES.2011.5705661.

- T. Walter et al., "Worldwide Vertical Guidance of Aircraft Based on Modernized GPS and New Integrity Augmentations" Proc. IEEE, vol. 96, no. 12, pp. 1918–1935, 2009.
- [19] T. Walter, J. Blanch, L. de Groot, L. Norman, and M. Joerger,
 "Ionospheric rates of change," *Proc. 31st Int. Tech. Meet. Satell. Div. Inst. Navig. ION GNSS+ 2018*, pp. 4158–4170, 2018, doi: 10.33012/2018.16112.
- [20] NTSB/WAAS T&E Team ", Wide Area Augmentation System Performance Analysis Report #70" [Online]. Available: https://www.nstb.tc.faa.gov/reports/waaspan70.pdf.

Abstract

Integrity Monitoring of Vertical Landing UAM In Urban Environment using Single Frequency-Based RRAIM

Hojoon JEONG School of Aerospace Engineering The Graduate School Seoul National University

In this paper, we developed a single frequency-based RRAIM to monitor the integrity of the UAM landing vertically in urban areas with only lowcost single-frequency GPS receivers. Conventional dual-frequency RRAIM eliminates Ionospheric delay through a combination of frequencies. However, expensive multi-frequency receivers and antennas are essential to use the existing RRAIM techniques. In this study, Ionospheric delay error was directly modeled using the previously studied results on Ionospheric rates of change. To verify the performance of the proposed RRAIM algorithm, a simulation of vertical landing UAM in urban area was conducted. It was assumed that the protection level at the initial position was calculated through SBAS correction data. During subsequent vertical landing, integrity

was assumed to be monitored by the receiver alone during subsequent landings without external correction data. Comparing the vertical protection level of proposed single frequency-based RRAIM and pseudorange based classic RAIM in the 20 second simulation, we found that there was a 90% improvement in performance compared to classic RAIM. In addition, when comparing vertical protection level with the conventional dual-frequency based RRAIM, the proposed RRAIM protection level maintained similar performance, with a value of 100.27%. In the 60sec simulation, the protection level of the proposed RRAIM compared to the conventional RRAIM was calculated to be 127% due to the accumulation of Ionospheric delay error. Nevertheless, it was confirmed that the final vertical protection level was 33.1m, meeting the requirements of LPV-200, which cannot be achieved with GPS receiver alone.

Keywords : GPS, RRAIM, integrity monitoring, urban area Student Number : 2019–21097