

유연 무중단 특성을 가진 위성항법 지상부분 설계에 대한 고찰

2017. 12. 27

한국항공대학교 항공전자정보공학부

이형근

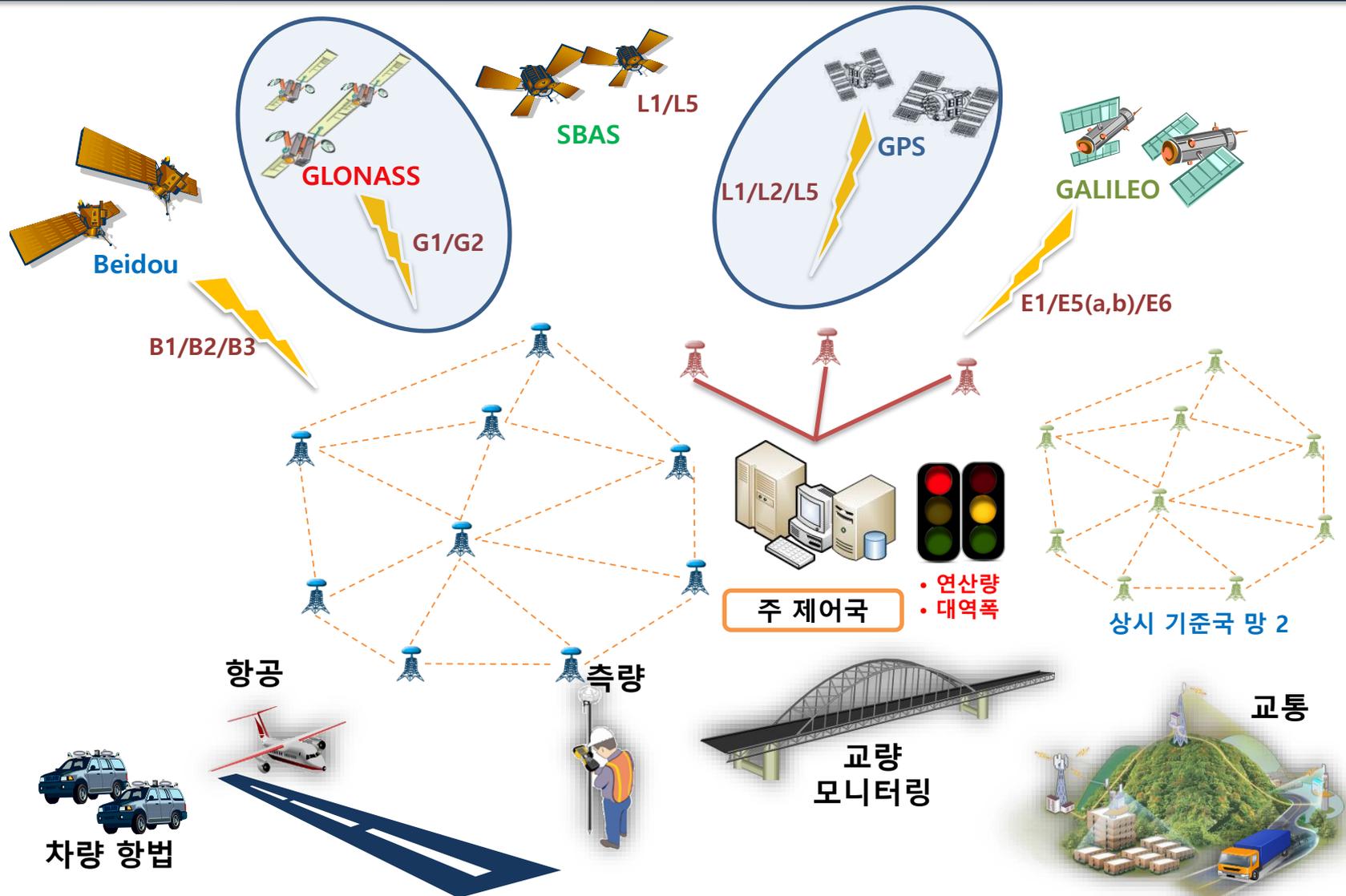


발표 순서

- 현황
- 고찰
- 요소 기술
- 구조 연구
- 기능별 점검 사항
 - 절대 전리층
 - 상대 전리층
 - 수신기/네트워크 인터페이스
 - 기준국 유입 및 소실에 대한 재형상 기능
- 결론

환 환

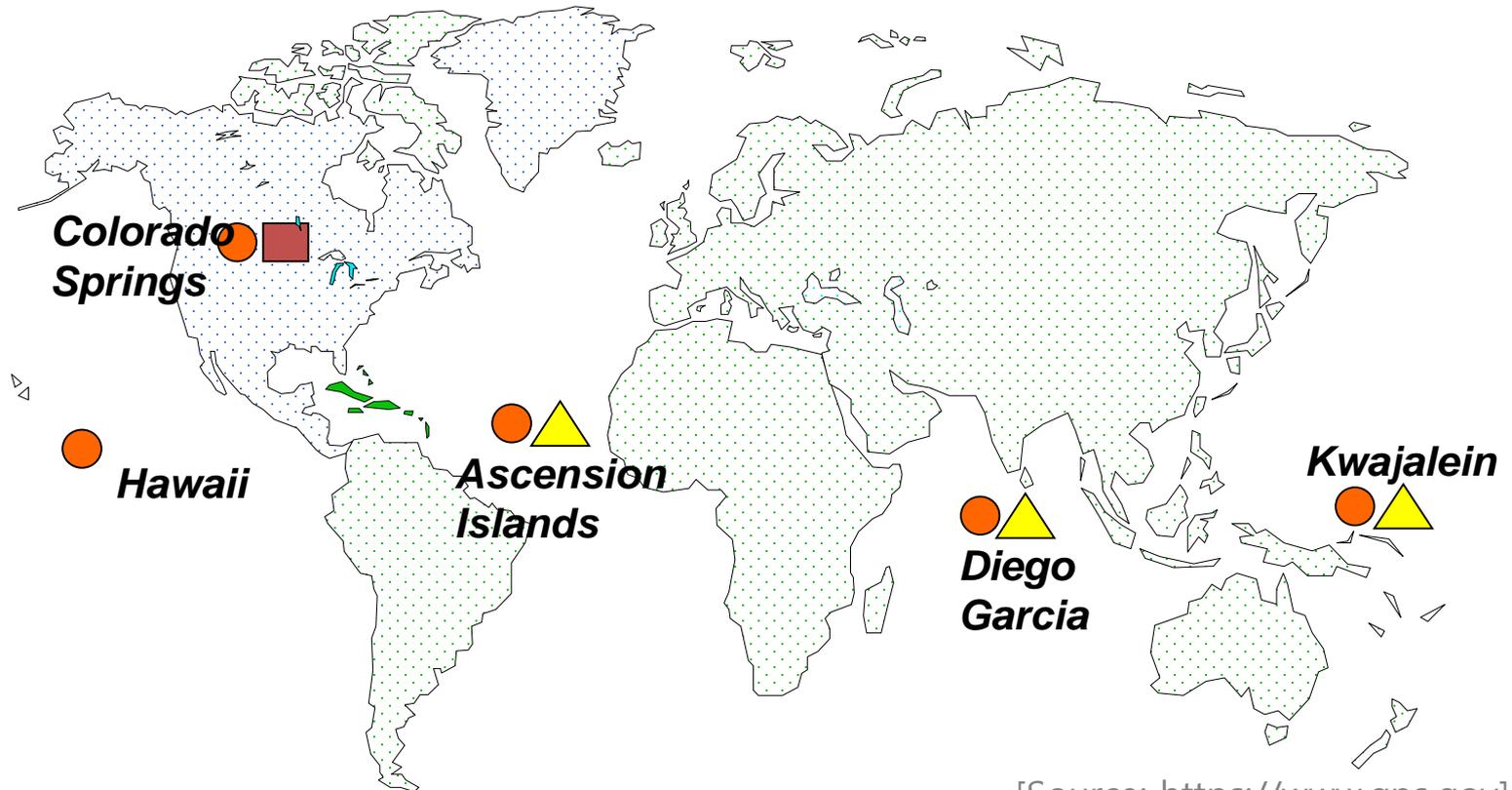
GNSS의 환경 변화



GNSS에서 지상부분 주제어국의 중요성

- An important benefit of GNSS is that it can provide absolute time and position information anytime anywhere
- To help users on wide area to generate accurate estimates on **absolute time, position, and atmospheric delays**, an efficient master station is required

GPS 지상부분의 초기 개형



[Source: <https://www.gps.gov>]

- Master Control Station (1)
- Monitor Station (5)
- ▲ Ground Antenna (3)

GPS 지상부분의 최근 개형



Legend:

● NGA Monitoring Stations

◆ Master Control Station

(Schriever A.F.B. Colorado Springs, CO)

◇ Alternate Master Control Station

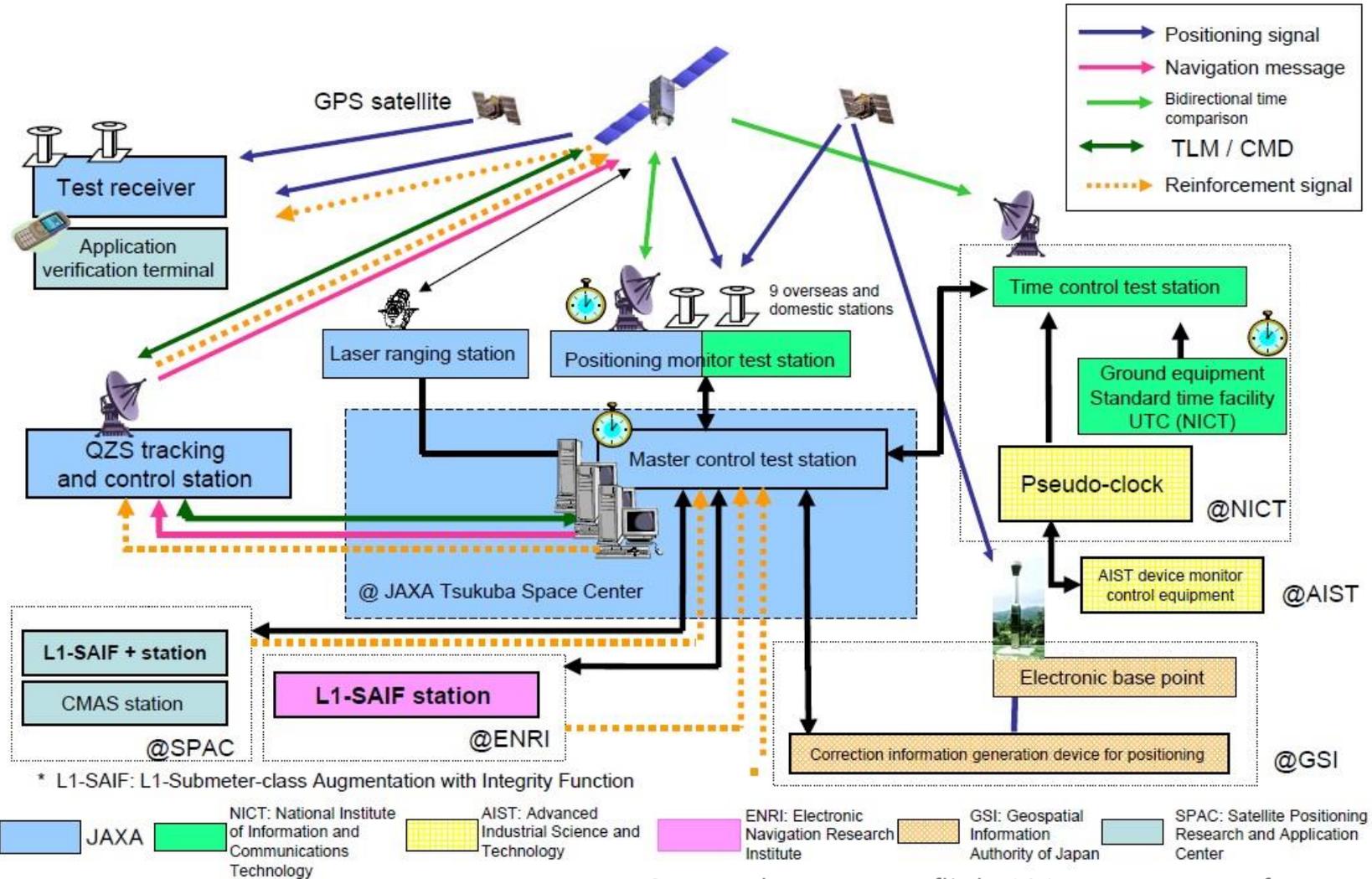
⬠ AFSCN Remote Tracking Station

⬠ Air Force Monitoring Stations

★ Ground Antenna

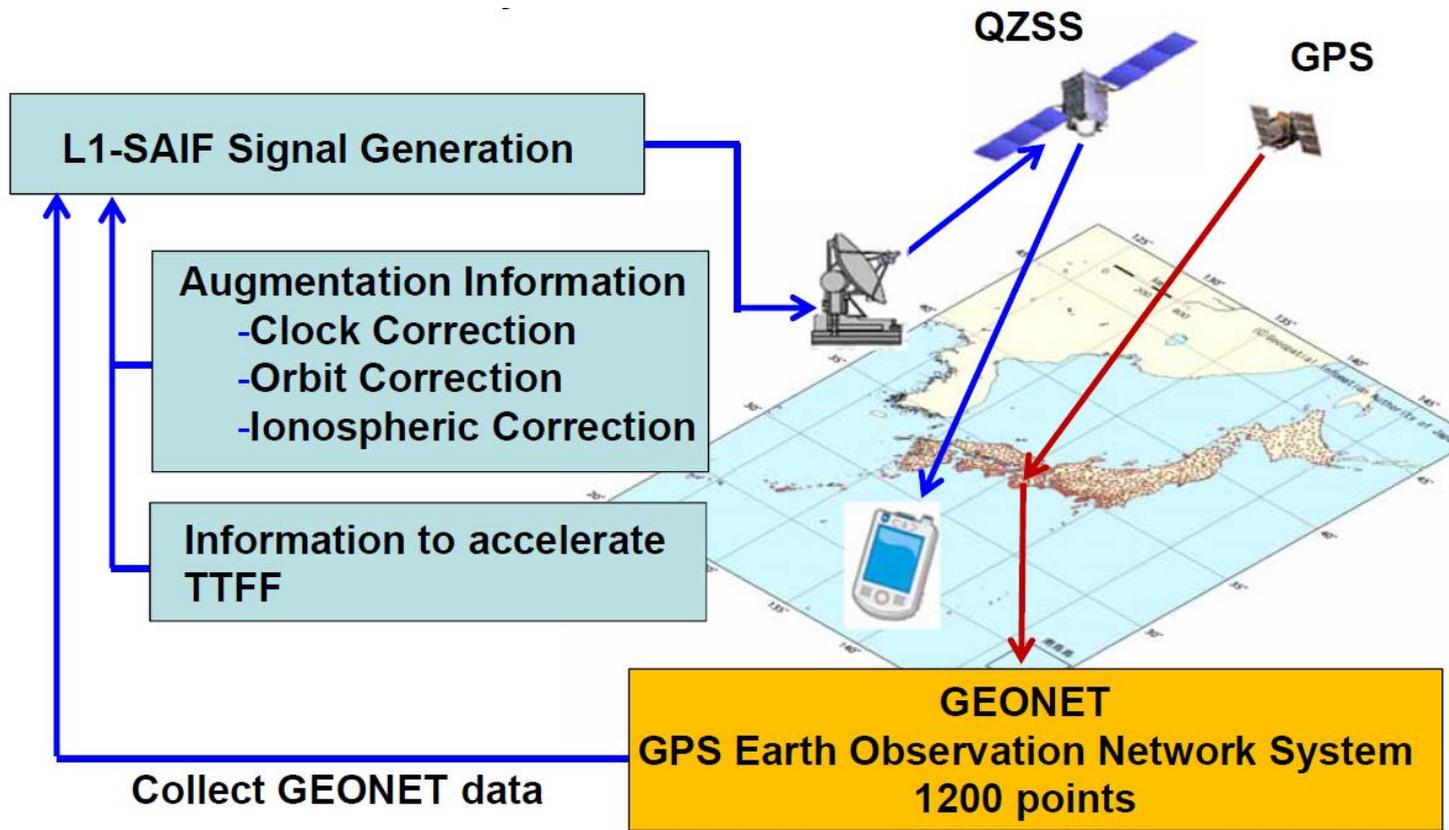
[Source: <https://www.gps.gov>]

QZSS 지상부분의 개형



[Source: <http://spaceflight101.com/spacecraft/qzss>]

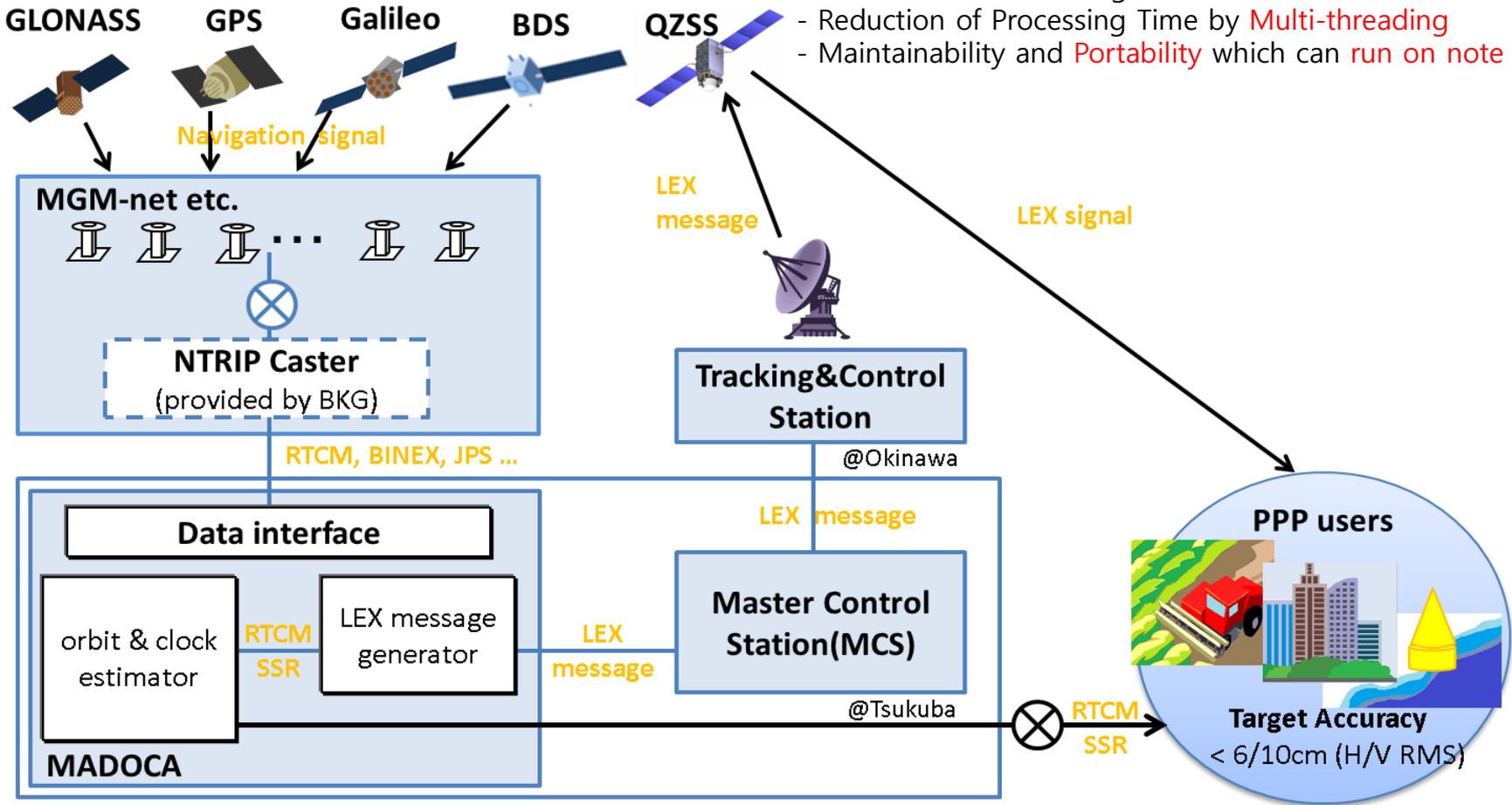
QZSS L1 SAIF 서비스의 개형



[Source: High Precision Navigation Capabilities(L1-SAIF) and Applications Using Japanese Quasi-Zenith Satellite System (QZSS), Satellite Positioning Research and Application Center, ICG WG-B Application SG Meeting, Munich, Germany, March 12, 2012]

MADOCA PPP 서비스의 개형

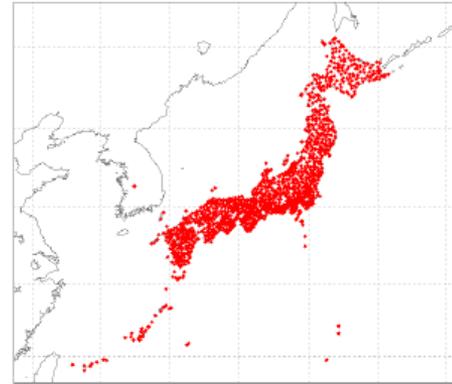
- Multi-GNSS Support (GPS, GLONASS, Galileo and QZSS)
- Offline/Real-Time Estimator
- Precise Estimation using latest models
- Reduction of Processing Time by Multi-threading
- Maintainability and Portability which can run on note PC



[Source: <https://ssl.tksc.jaxa.jp/madoca>]

MADOCA 후처리 연산량

- **Single NEQ + Network AR**
 - GEONET (1244) + IGS (7)
 - Position (24h static), Clock, ZTD/Grad and Ambiguity

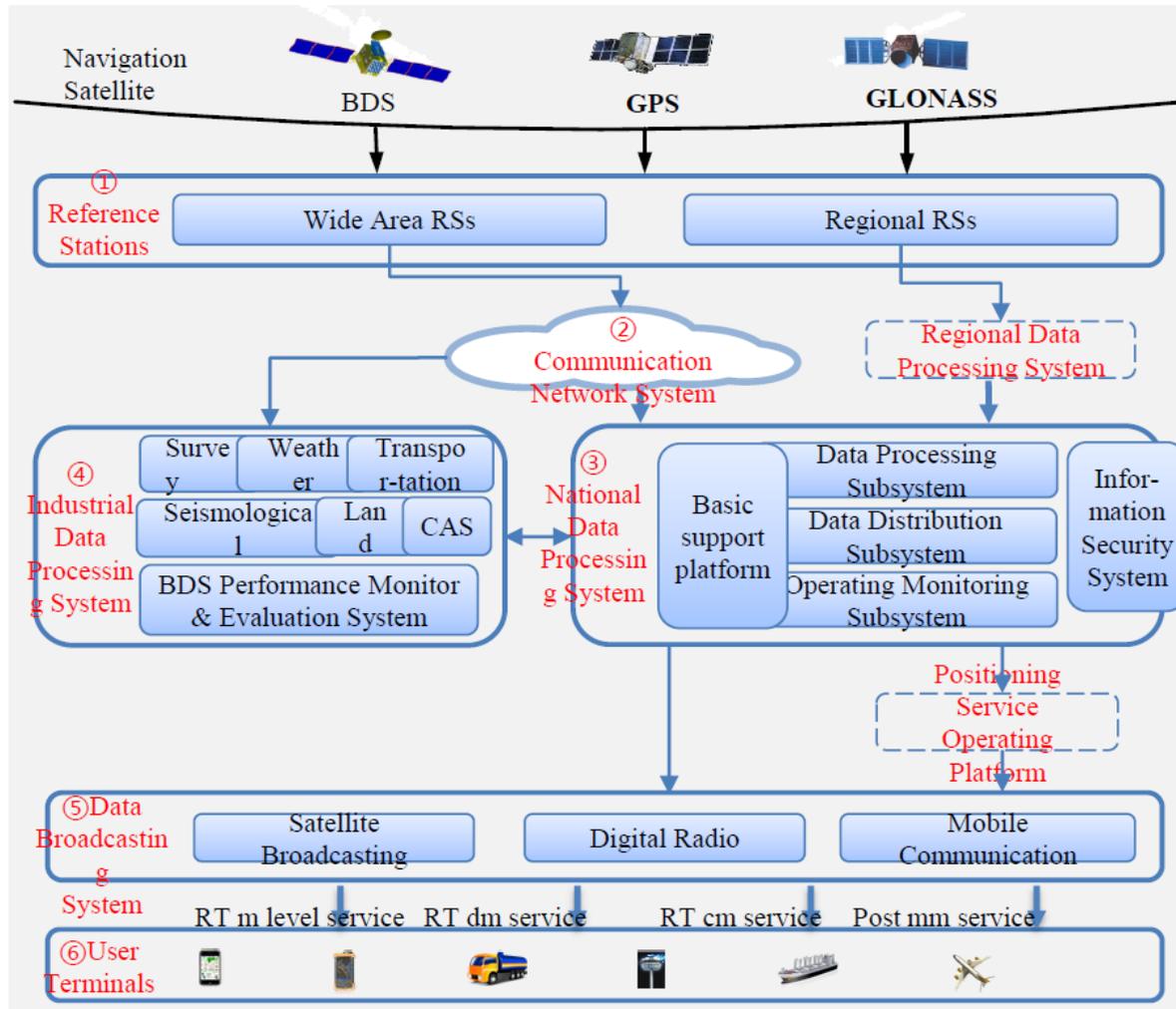


# Estimations			# Parameters		CPU Resource		
Sat	Sta	EP	CMN	EP	RAM	File	Time
31	307	288	28,770	97,632	9.1 GB	21.2 GB	15m
31	604	288	57,099	183,168	29.2 GB	78.8 GB	1h 40m
31	904	288	86,659	269,568	62.8 GB	173.9 GB	5h 27m
31	1,251	288	119,090	369,216	113.3 GB	380.4 GB	14h 05m

Xeon E5-2687W x 2 (16 core), RAM 128 GB, HDD 8TB, SSD 480GB

[Source: 複数 GNSS 高精度軌道時刻推定ツール MADOCA の開発, JPGU, 2013]

BDS 지상부분의 개형



- 150 national wide-area RSs
- 1,200 regional RSs



[Source: China Satellite Navigation Office, 2016]

BDS의 다양한 보강모드 비교

Satellite System	BDS	BDS	BDS	BDS/GP/GLONASS	BDS/GPS
Augmentation Mode	Wide-area real-time single-frequency pseudo range mode	Wide-area real-time single-frequency carrier phase mode	Wide-area real-time dual-frequency carrier phase mode	Local-area real-time RTK	Post-processing millimeter mode
Horizontal Position Accuracy	Meter level (95%)	Meter level (95%)	Decimeter level (95%)	Centimeter level (RMS)	Millimeter level (RMS)
Vertical Position Accuracy	Meter level (95%)	Meter level (95%)	Decimeter level (95%)	Centimeter level (RMS)	Millimeter level (RMS)
Broadcasting Data	Data of Precise orbit, Clock bias, Ionosphere			Synthetic correction data	Post processing
Broadcasting Mode	Satellite , Digital Radio, Mobile Communication			Mobile Communication	Internet

[Source: China Satellite Navigation Office, 2016]

고찰

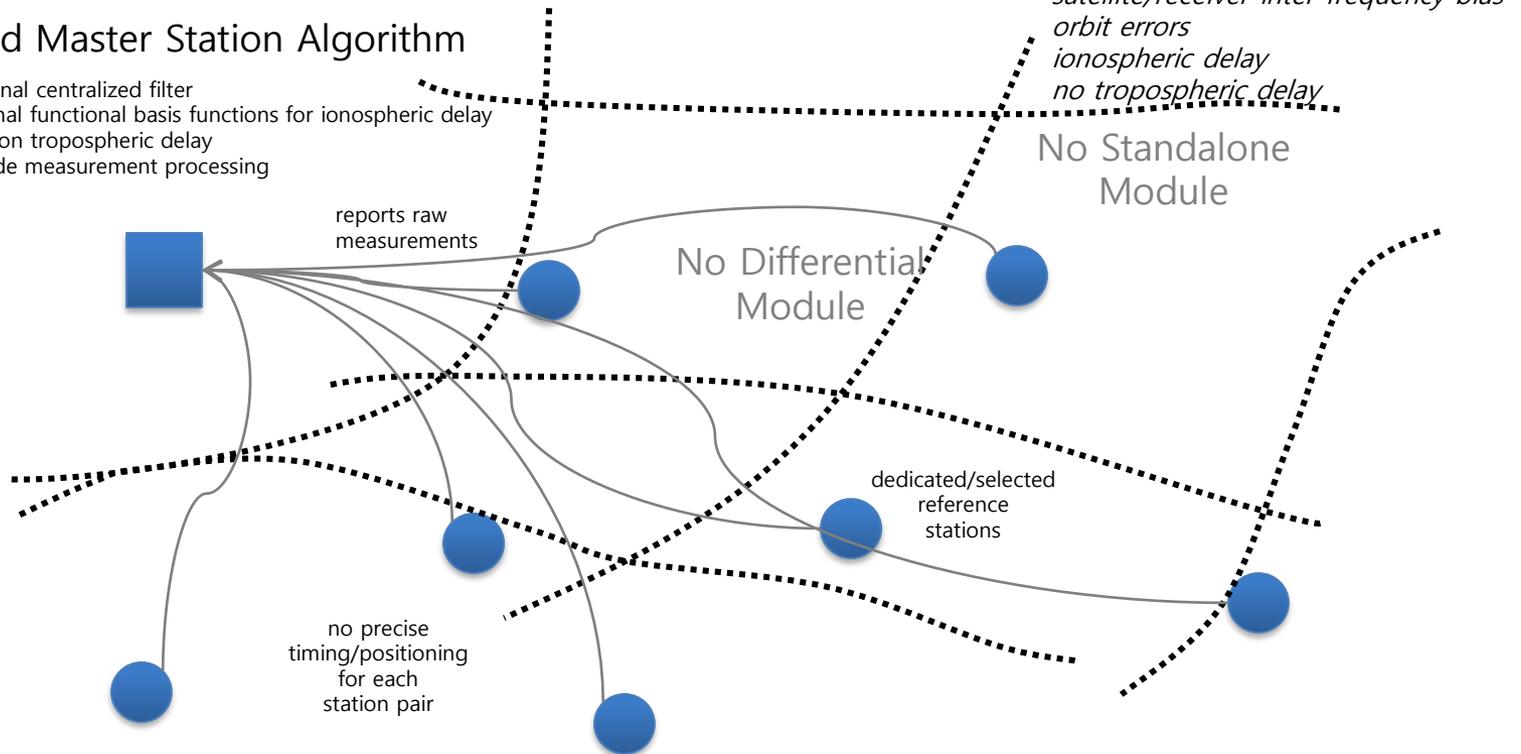
기존의 중앙집중형 구조

Examples

- GPS master station : satellite/receiver IFB
- IGS : global ionospheric delay model, satellite receiver IFB
- Space-based augmentation system

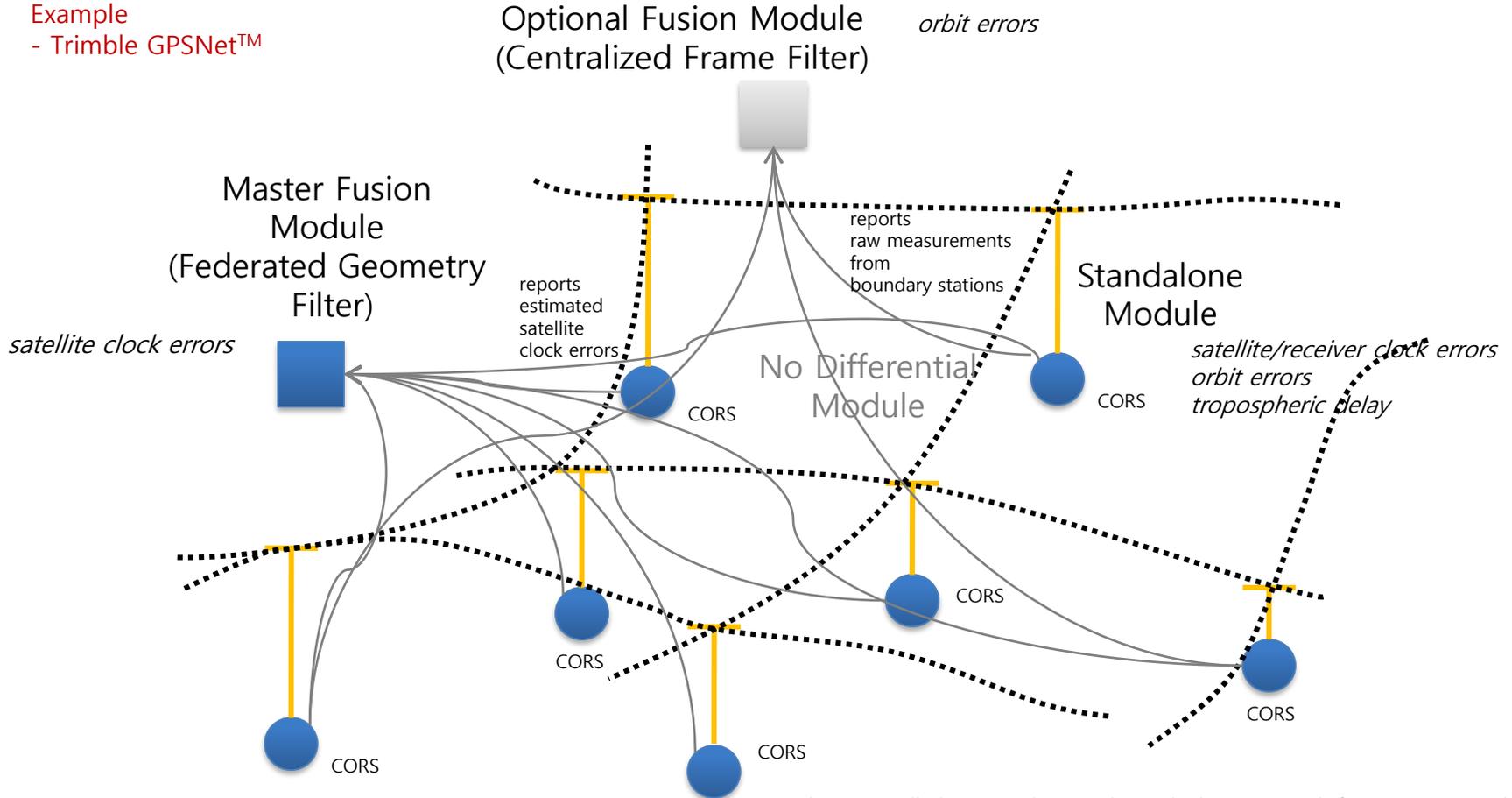
Centralized Master Station Algorithm

- huge-dimensional centralized filter
- high-dimensional functional basis functions for ionospheric delay
- no processing on tropospheric delay
- Focuses on code measurement processing



기존의 분산형 구조

Example
- Trimble GPSNet™

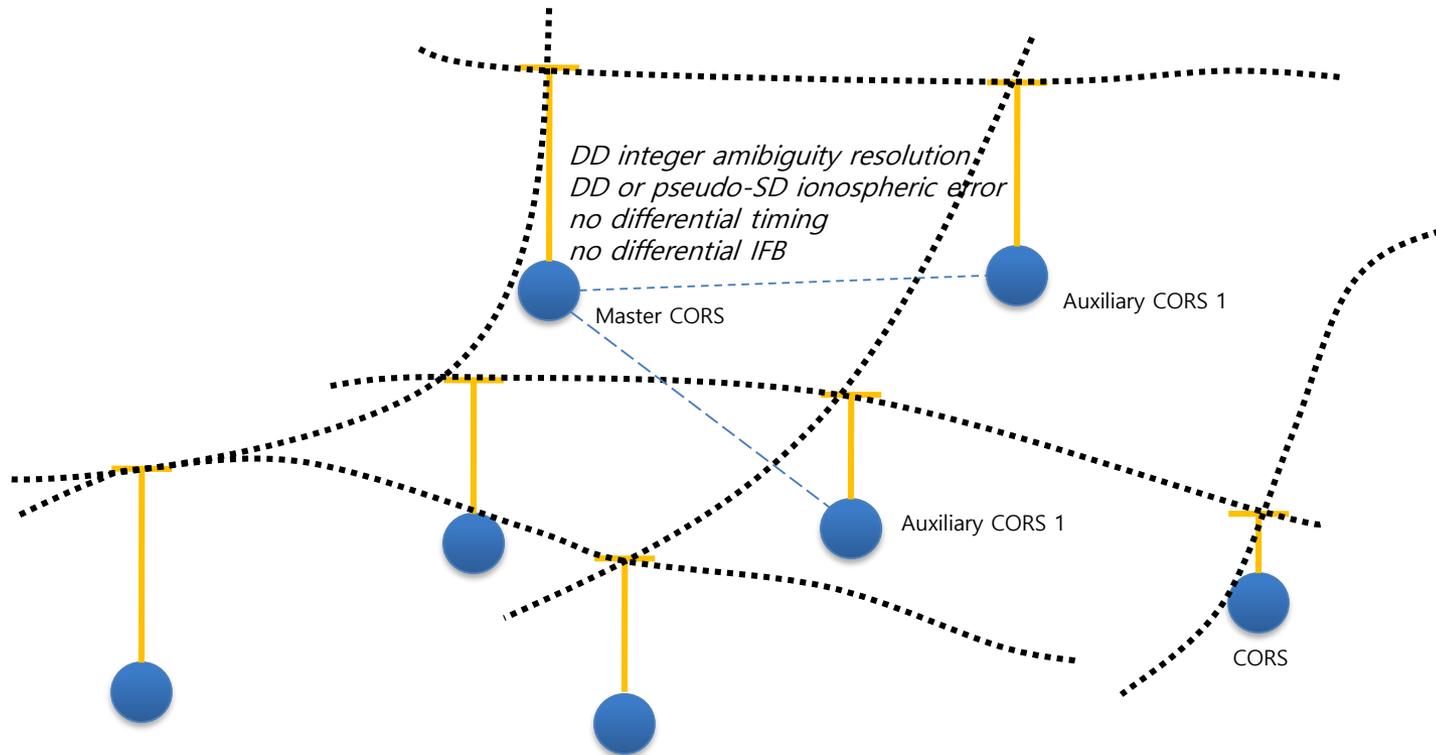


X. Chen, U. Vollath, H. Landau, "Federated Filter Approach for GNSS Network Processing," Proceedings of IAIN World Congress 2006, Jeju

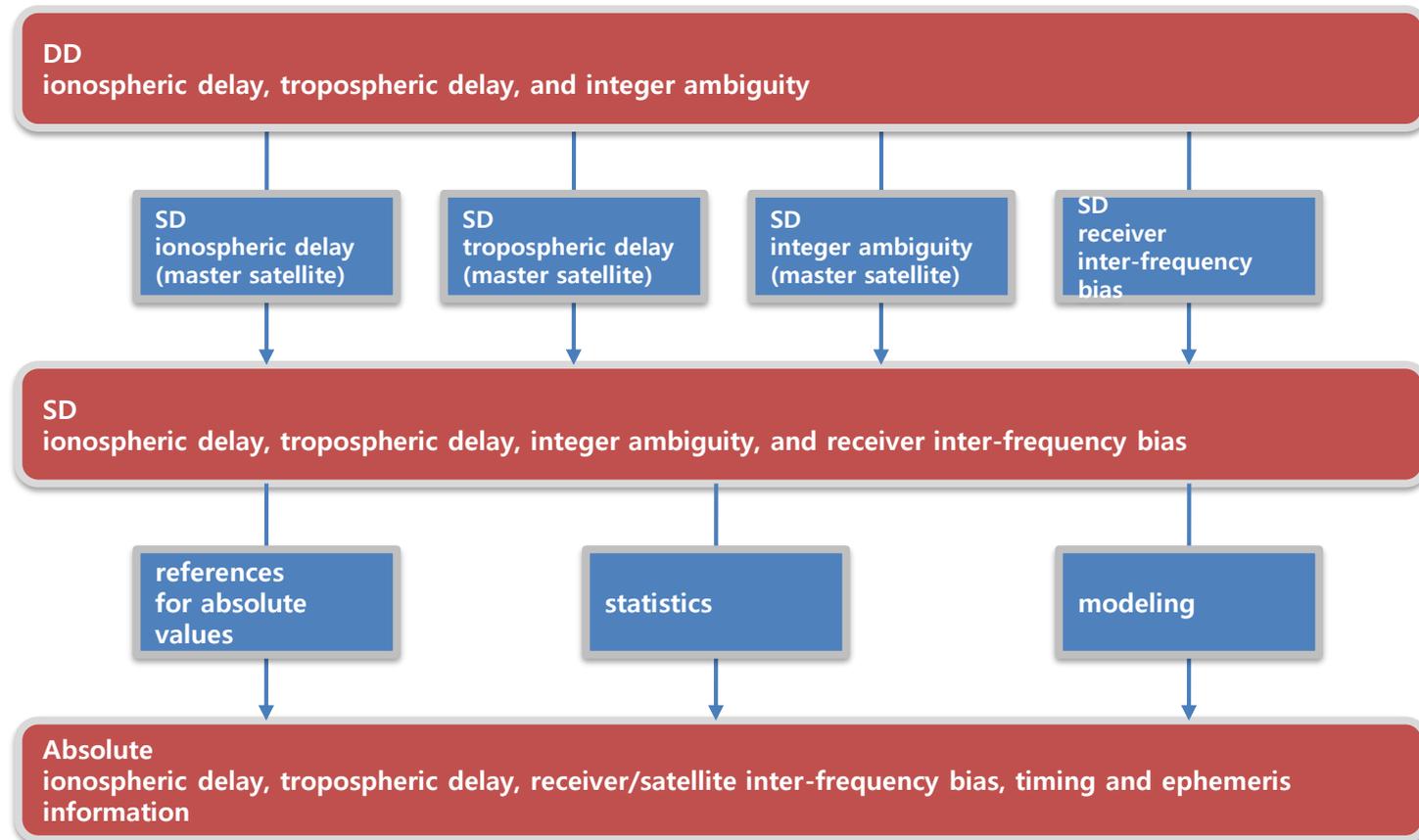
기존의 Inter-Station 처리 개형

Example

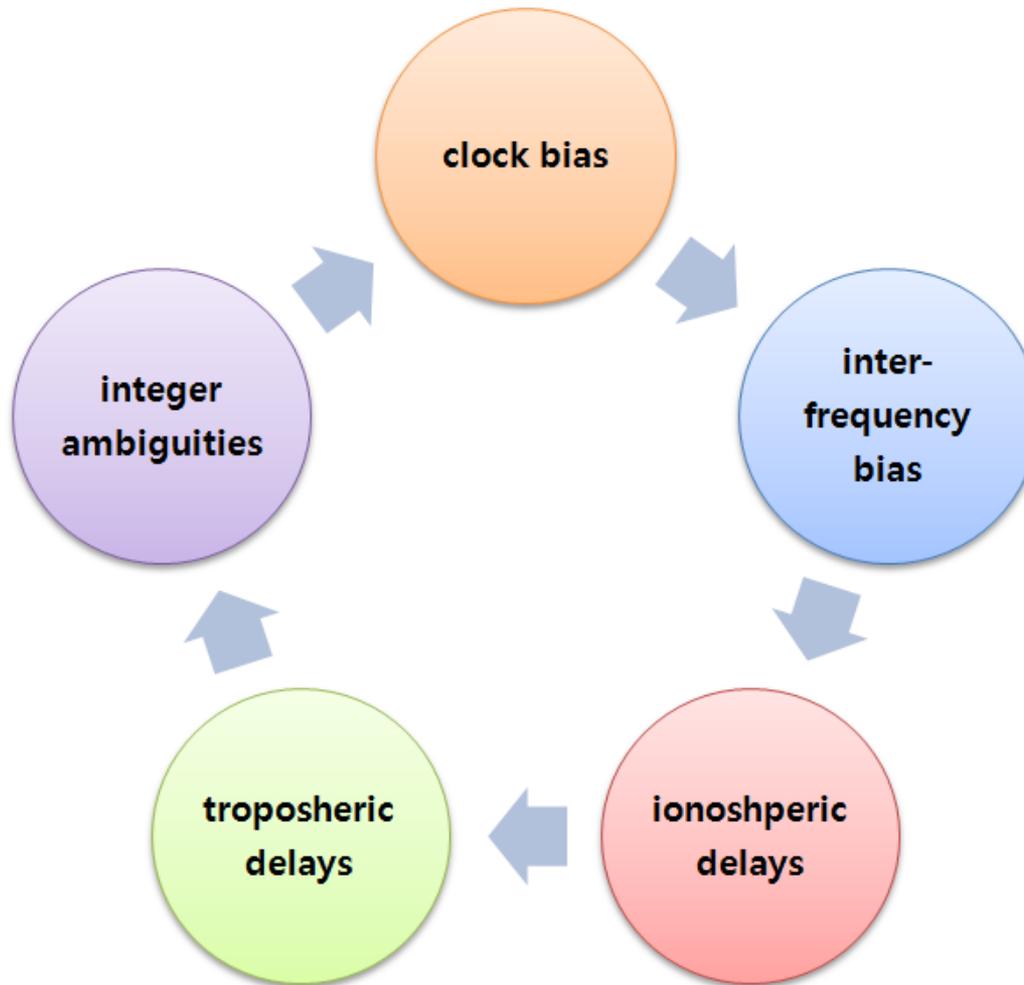
- VRS, FKP, MAC
- Derives pseudo-differential ionospheric error as dispersive error (DD method)
- Other error terms are merged into non-dispersive error



위성항법 상대 및 절대 변수 사이의 관계

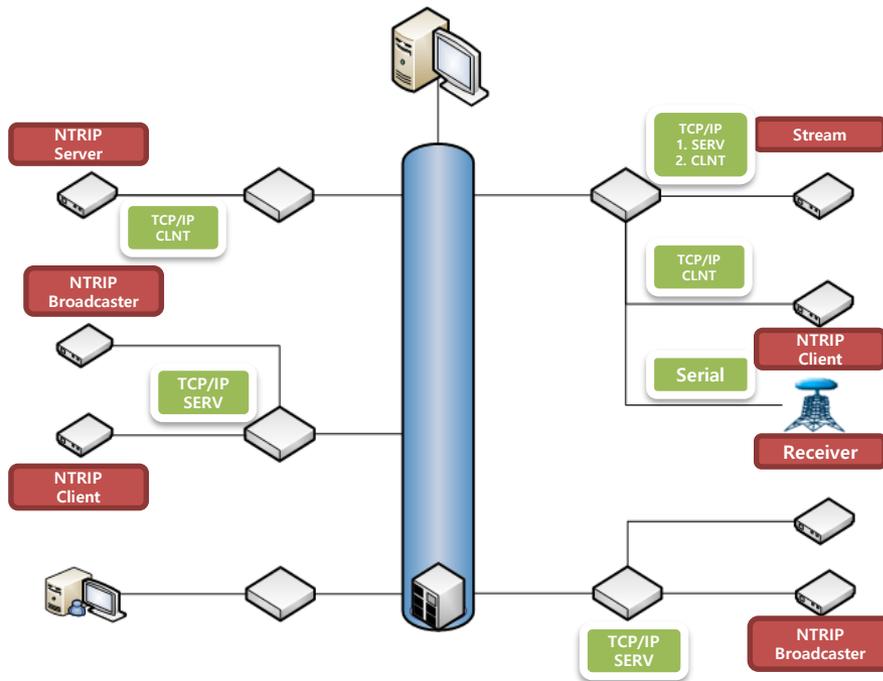


변수 사이의 내부 관계

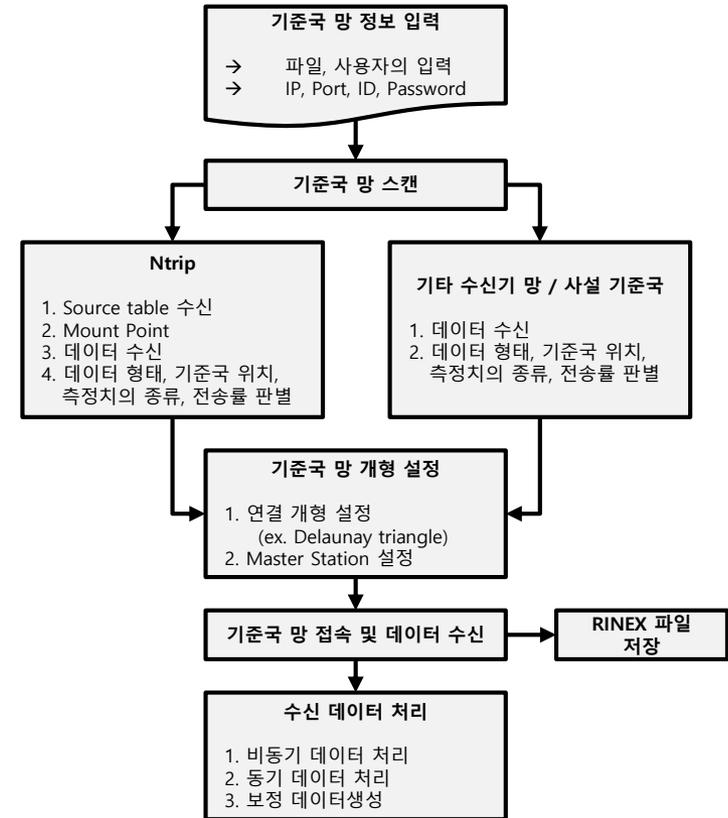


요소기술

이기종 수신기 인터페이스 및 GNSS 네트워크 형성 기술



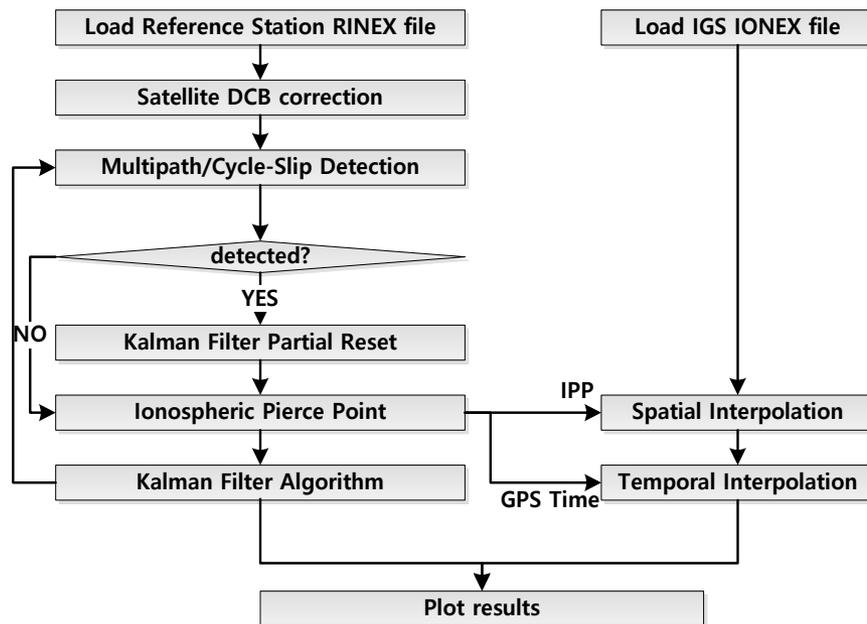
네트워크 형성을 위한 단위 구조



네트워크 형성을 위한 접속/데이터 처리 순서도

전리층/대류권 지연의 절대값 추정

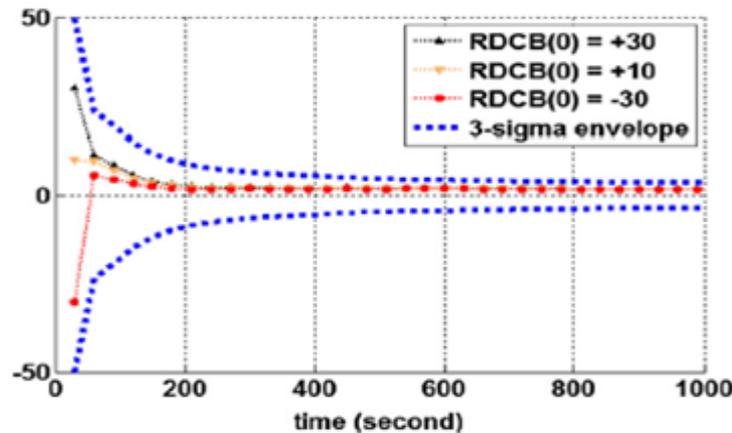
- 다수의 상시관측소로부터 **단일 필터**를 활용하여 절대값을 실시간 추정하기에는 난점이 있음
- 넓은 영역의 비정상적 전리층 지연 분포를 **제한된 차수의 기저함수로 모델링**하기에는 난점이 있음



전리층 지연 절대값 추정 순서도

다중 위성군 채널간 편이/주파수간 편이 추정 기법

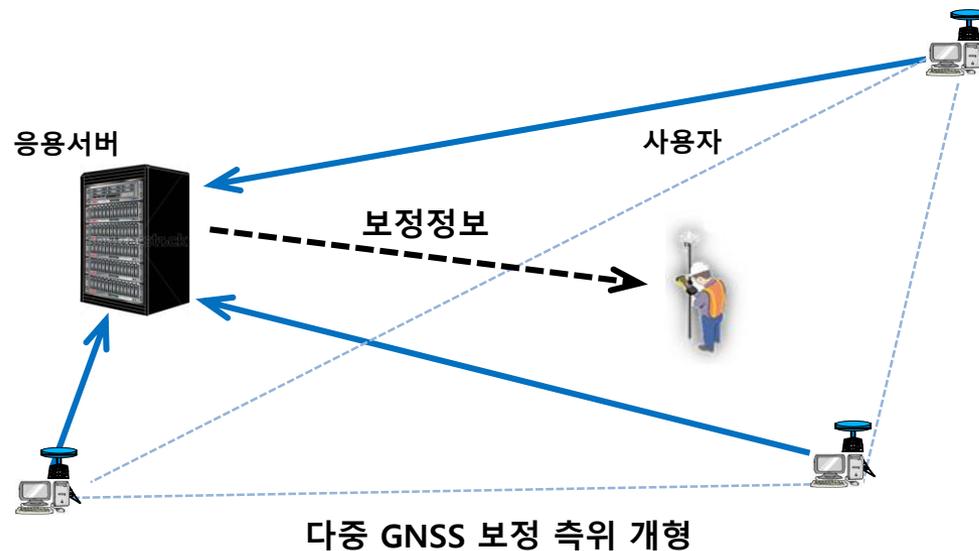
- 항법신호의 송/수신기 내 전달 속도는 RF 회로, 채널별 특성, 그리고 주파수 특성에 따라 변화하며 미지정수 결정에 크게 영향을 미치는 요인임
- 수신기/위성 혼합 주파수간 편이, 수신기/위성 혼합 채널간 편이, 그리고 수직 전리층 지연을 **동시에 분리 추정**하는 방안의 연구 필요



단일 수신기 GPS IFB 예시

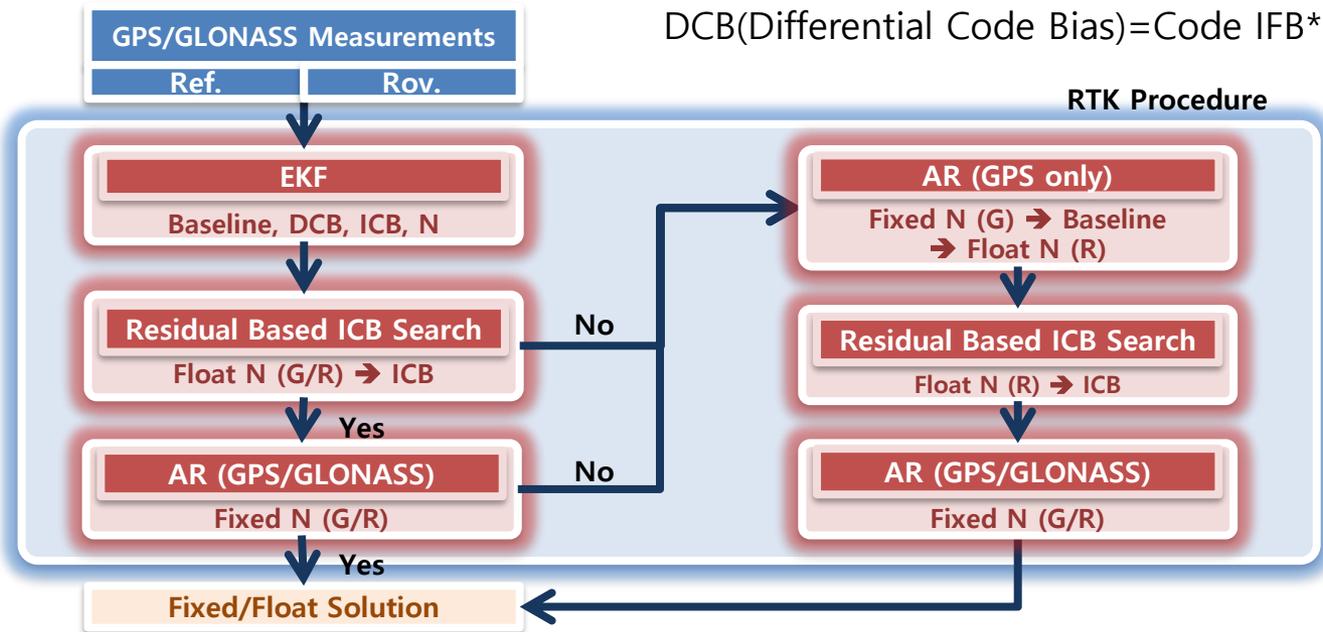
다중 GNSS 보정 정보 생성 및 감시 기술

- 타 위성항법군의 모니터링을 위하여 GPS, GLONASS, Beidou, Galileo 등 다수 GNSS에 대하여 각 위성항법군의 측정치에 대한 보정 정보 생성 및 감시 기능 수행 필요
- 각 위성항법군별 좌표계, 시간계, 항법메시지, 시간보정, 위성궤도, 각종 보정계수 등의 차이점을 분석 및 구현 필요



다중 GNSS 미지정수 결정

- 타 위성항법 군의 정밀한 모니터링을 위하여 선결되어야 하는 기능
- ICB(Inter-Channel Bias)/IFB(Inter-Frequency Bias)/ISB(Inter-System Bias) 등의 고려 필요



ICB를 고려한 미지정수 결정전략

네트워크 내 전체 미지정수 수준화

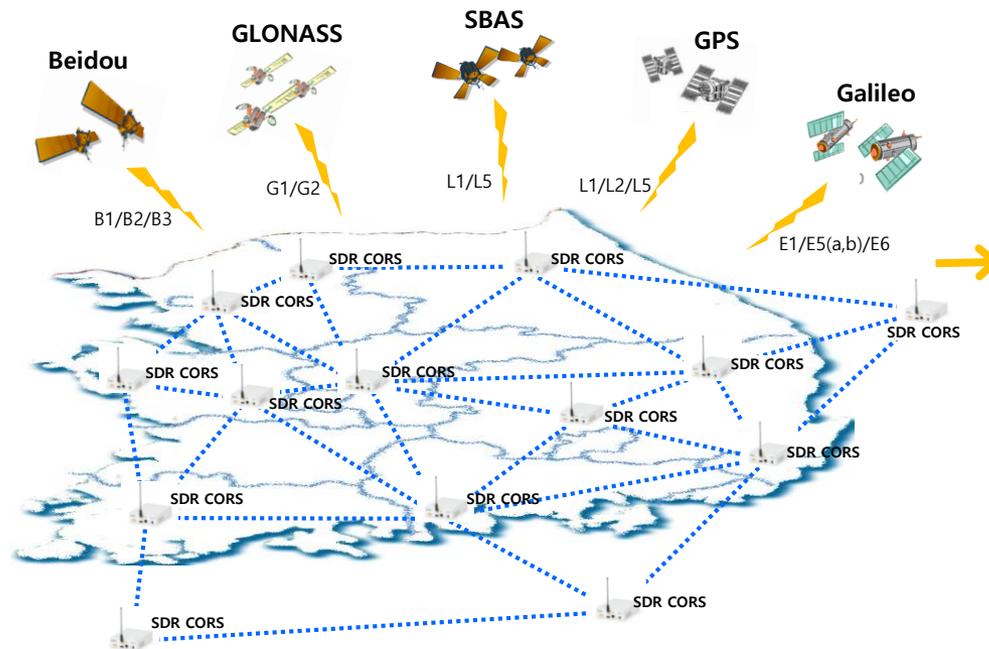
- 상시기준국간 기저선의 길이에 따라 미지정수 결정 성능 및 정확도에 영향을 미침
- 대량의 기저선으로 구성된 GNSS 네트워크에서 각 기저선별로 추정된 보정치는 각기 다른 기준에 대한 상대값에 해당함
- 따라서, 미지정수값들을 통일된 기준으로 맞추기 위한 미지정수 수준화가 필요함



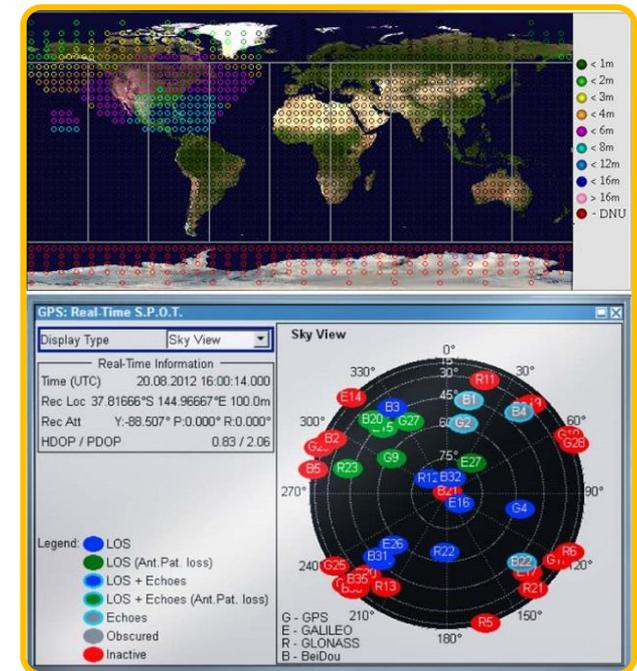
네트워크 내 미지정수 수준화 전략

SDR 인터페이스 기능 및 기준국으로의 활용

- 다양한 위성항법군에 대한 항법 신호 수신 가능
- 기저대역에서 jamming/interference 등에 다양하게 대처 가능
- 하드웨어 GNSS 수신기보다 경제성, 유연성 및 개방성 등의 이점이 있음

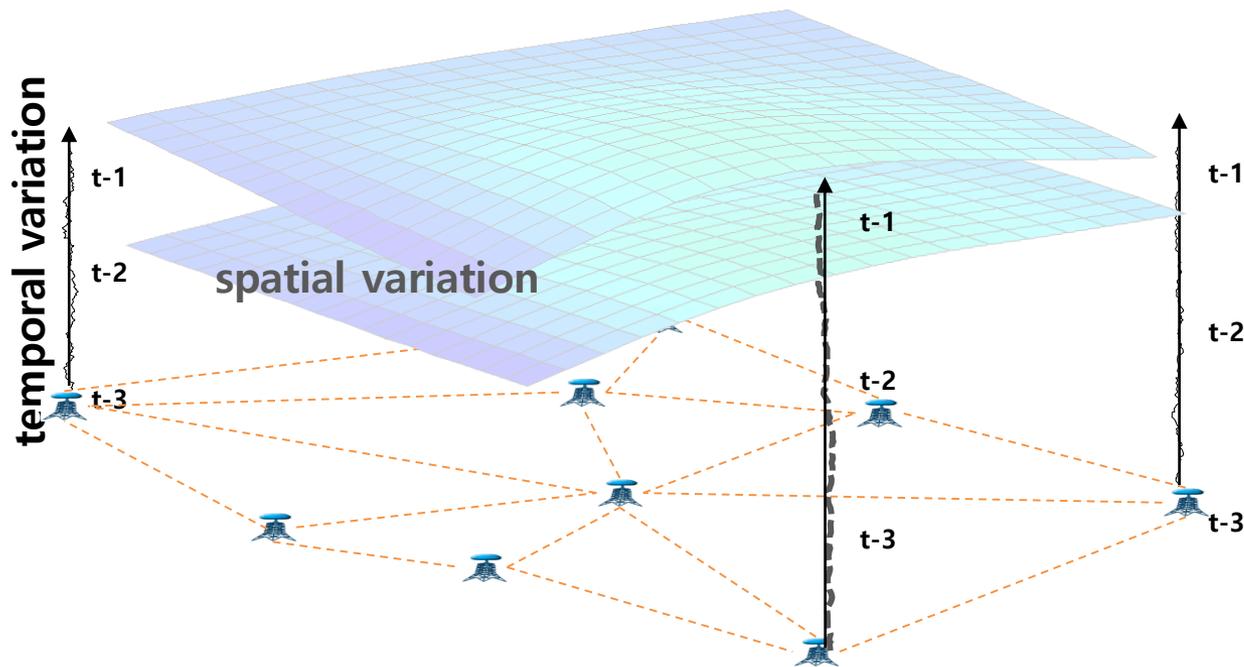


SDR 기준국 활용 개형



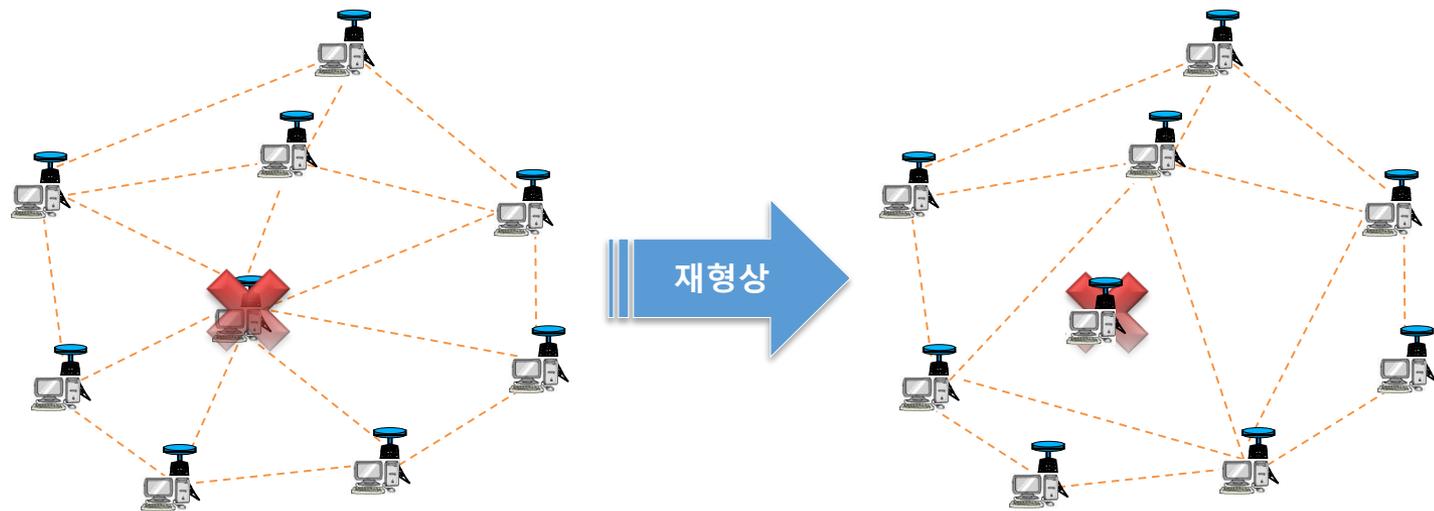
이기종 시공간 측정치 융합기법

- 시간영역에서 주로 활용되는 Kalman 필터링과 공간영역에서 주로 활용되는 Krigging을 결합하여 상태변수 영역에서의 시공간 융합 연구를 수행하
- 보다 일반화된 시공간 영역에서의 보정정보 생성을 위해 **시각동기화 되지 않은 측정치** 들에 대한 시공간 융합기법이 필요함



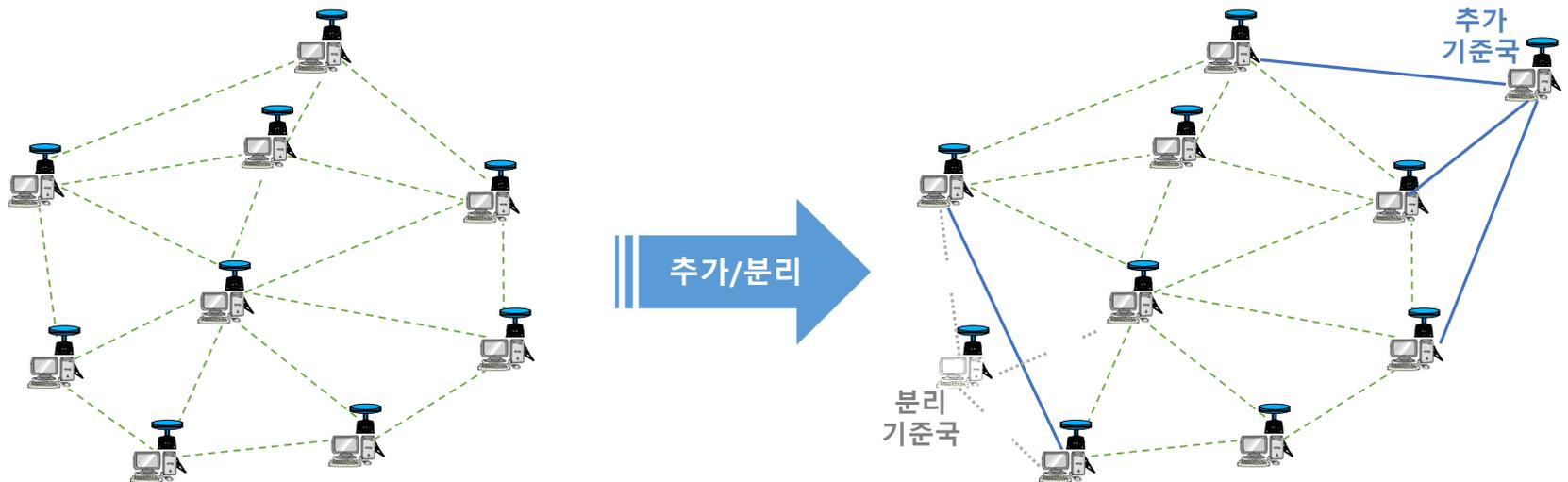
고장 검출/분리 및 네트워크 재형상 기법

- 측정치 영역과 상태변수 영역에서의 위성과 기준국의 **고장 검출/분리** 기법 연구 필요
- 고장 검출된 기준국을 제외하고 마스터스테이션 기능의 중단없이 자동적으로 **재형상(re-configuration)**하는 기능이 필요함



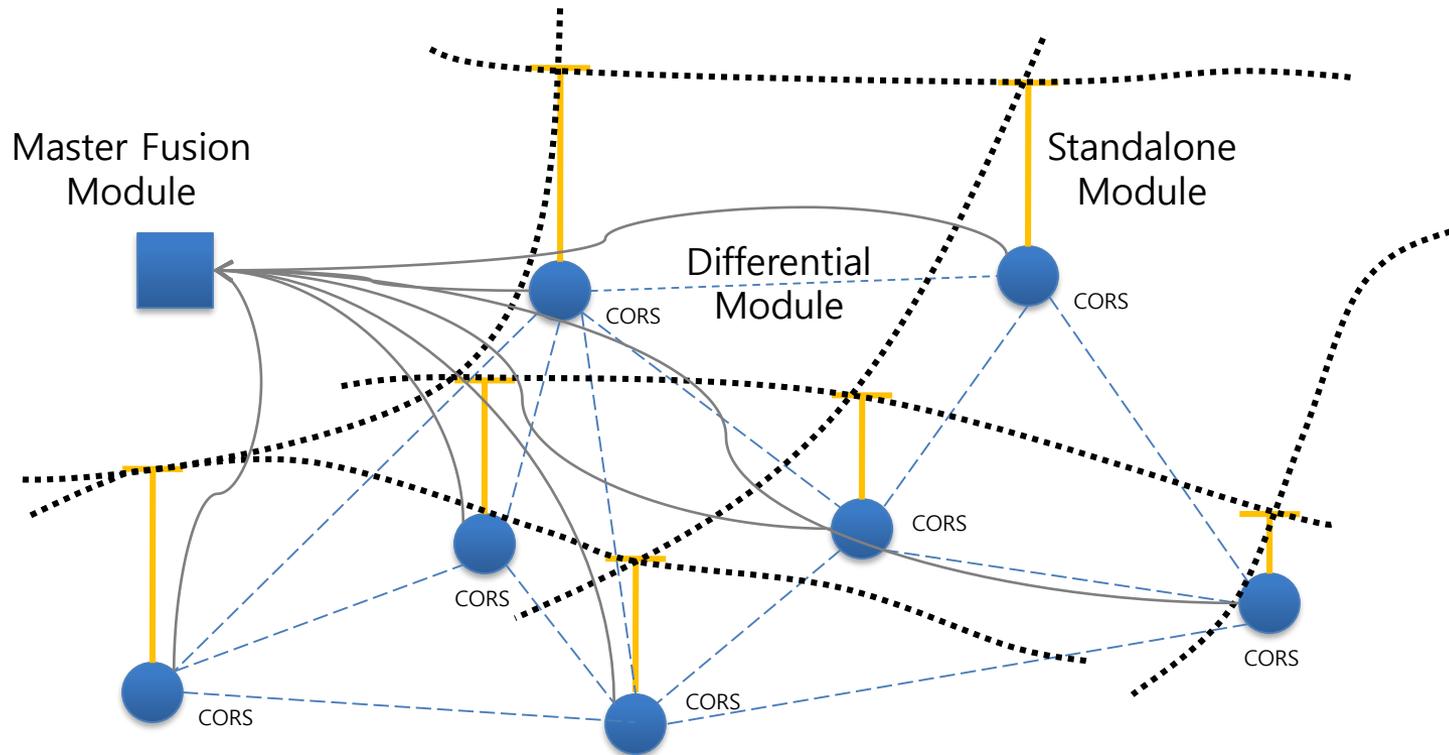
무중단 기준국 추가/분리

- 실시간 운영을 끊임없이 유지하면서 다수의 새로운 기준국들을 네트워크에 추가 / 분리할 수 있는 기능
- 기준국의 추가/분리 시에 네트워크에서 제공되는 다양한 정보 제공의 연속성 보장을 위하여 필요함

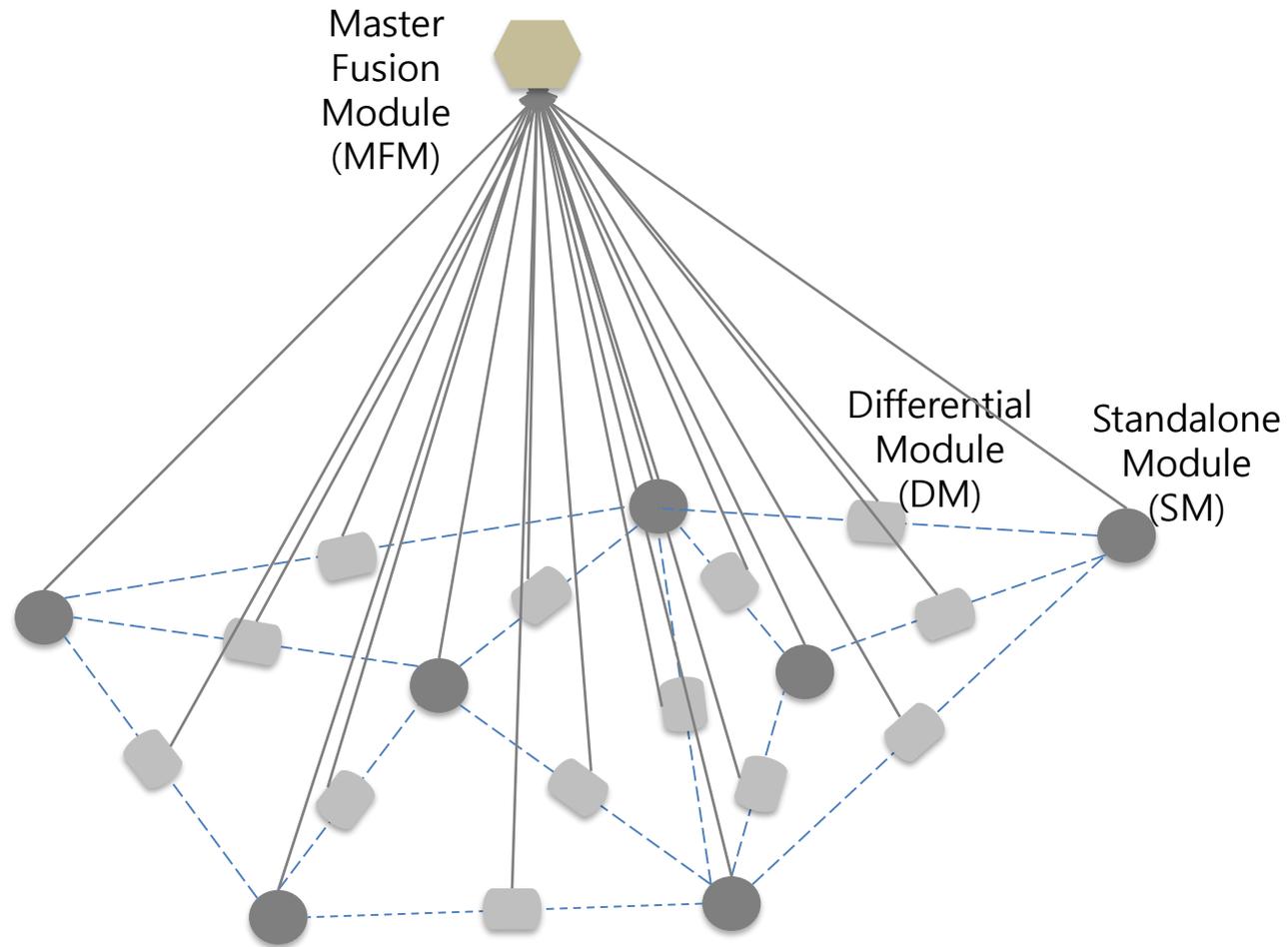


구조 연구

차분모듈을 고려한 분산화 구조

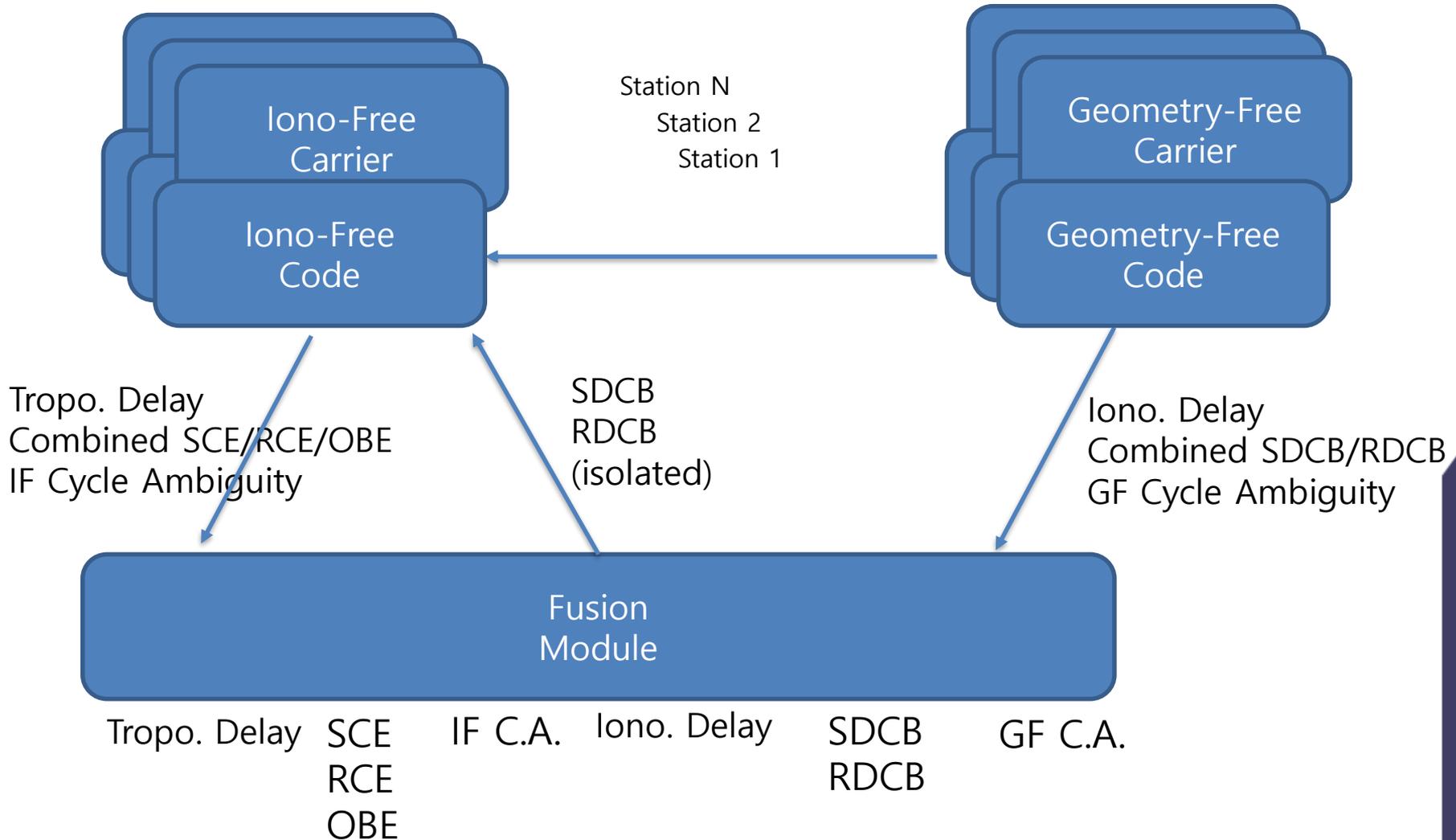


기본적인 분산 구조 개형



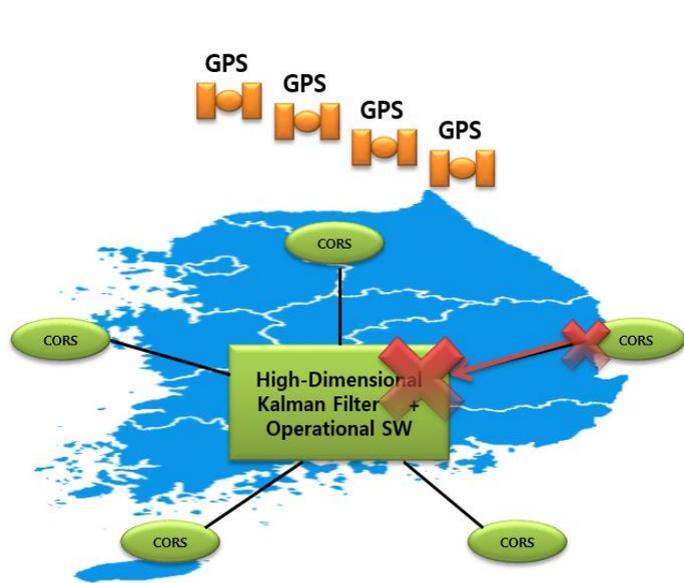
-
- A **DM** (differential module) generates **accurate** estimates on **differential** receiver DCB (differential code bias), ionospheric delay, and tropospheric delay
 - An **SM** (standalone module) generates **coarse** estimates on **absolute** DCB, ionospheric delay, tropospheric delay, and residual biases for each satellite
 - An **MFM** (master fusion module) combines information from DMs and SMs to generate **accurate** estimates on **absolute** values

주요 변수들 사이의 관계

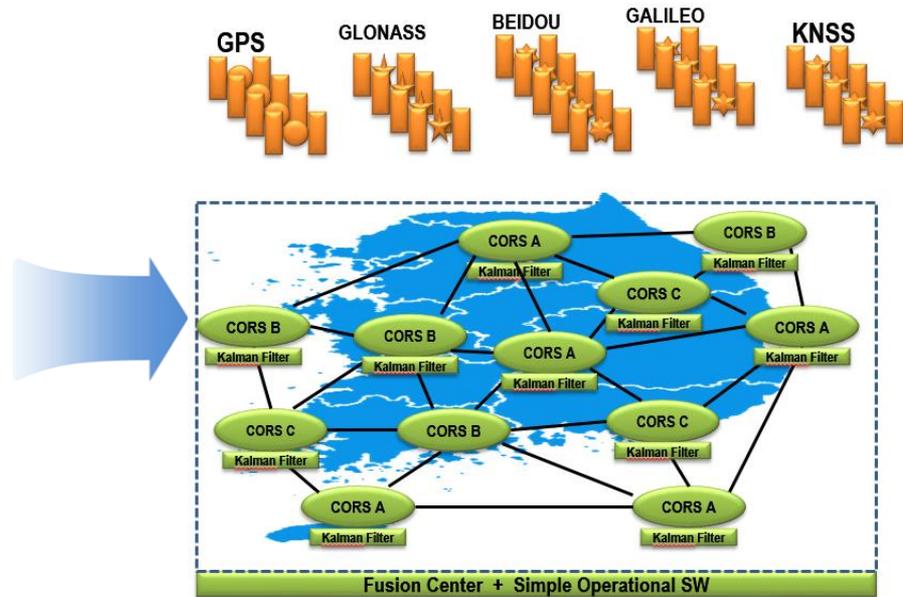


개선 방향

항 목	기 존	발 전
GNSS 네트워크 운용 소프트웨어 엔진	국외 제품 구매/변형 활용	자체 개발
측정치 융합 기법	공간 영역	시공간 영역
이기종 수신기 활용	활용 없음	활용 가능
보정 파라미터 생성	코드	코드/위상
고장 검출, 분리, 네트워크 재형상 기능	불가능	가능
네트워크 확장 및 분리의 용이성	불편함	용이함

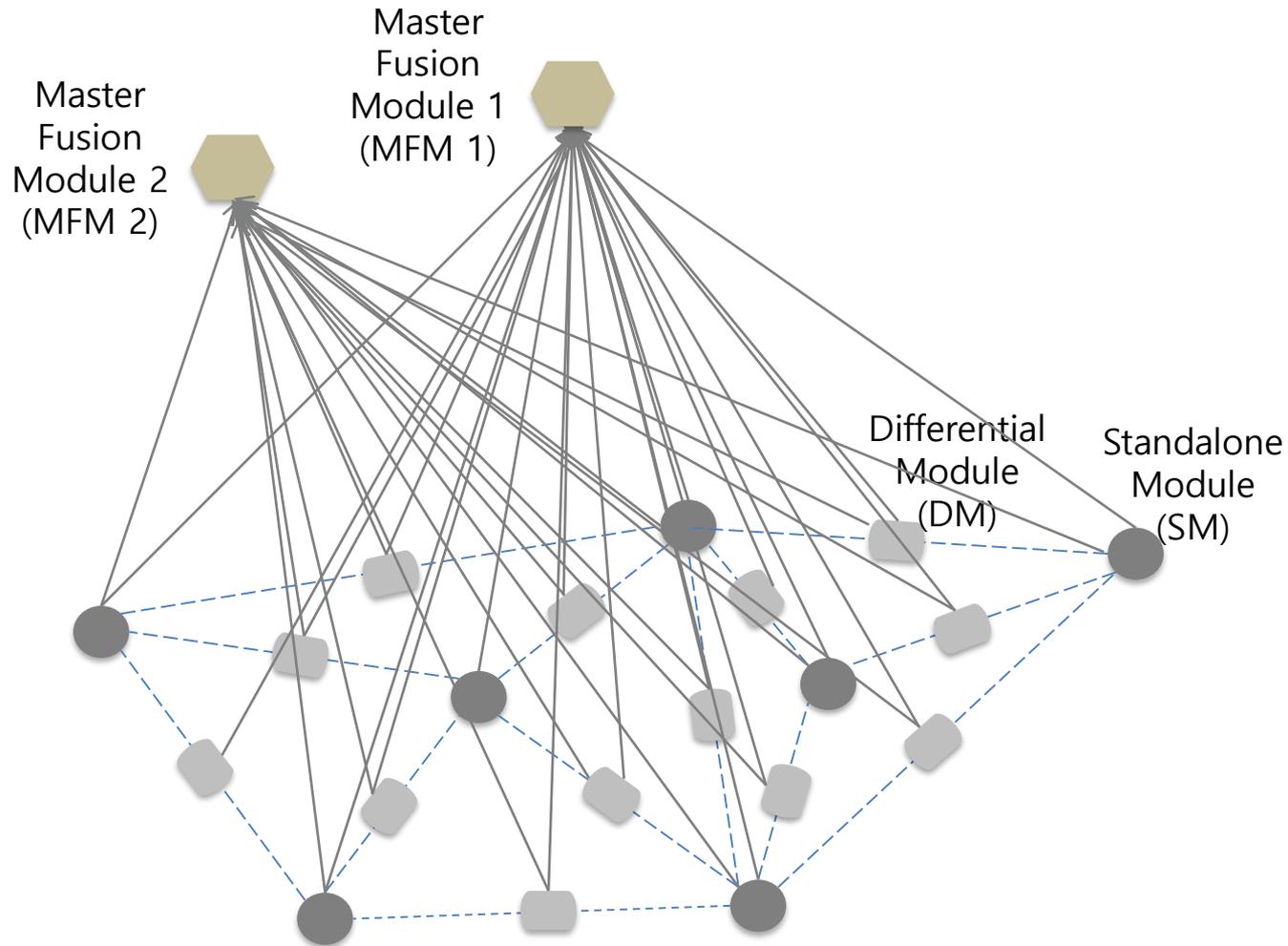


기존



발전

Fusion 모듈이 이중화된 분산 구조 개형



기능 평가 : 전리층 지연/DCB 분리 추정

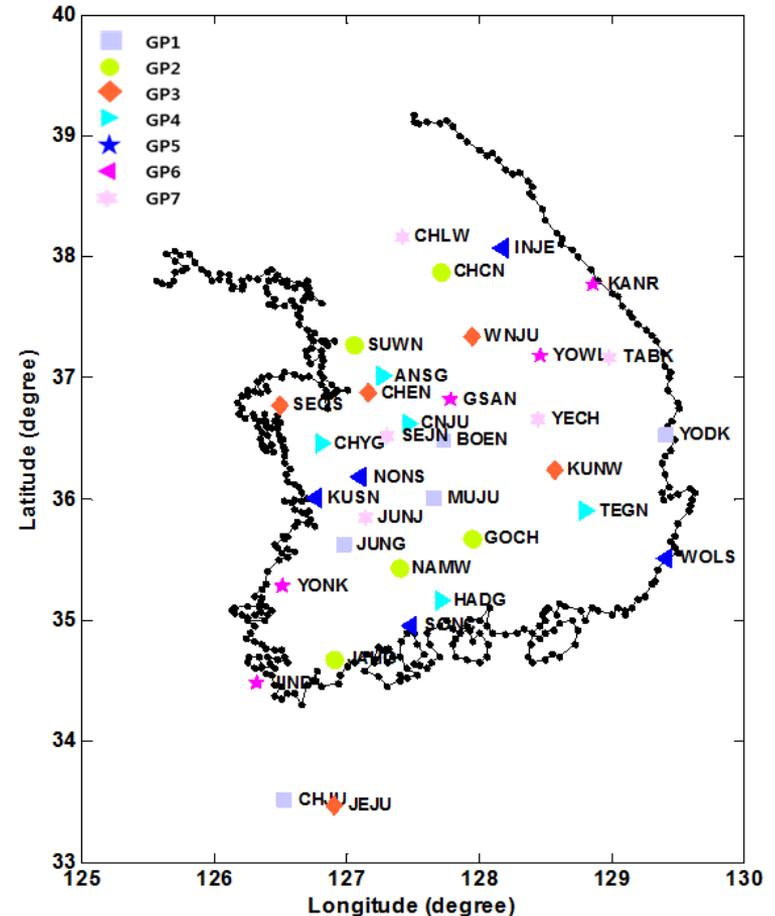
성능평가 (1/6)

실험 개요

Date	2015-06-03 ~ 2015-06-08 (6 days)
Sampling Interval	30 seconds
Number of GPS Receivers	5~35
RIM Update Interval (hour)	2 hours
Latitude Grid (degree)	15 ~ 55 (N)
Longitude Grid (degree)	105 ~ 150 (E)
Grid Interval (degree)	1

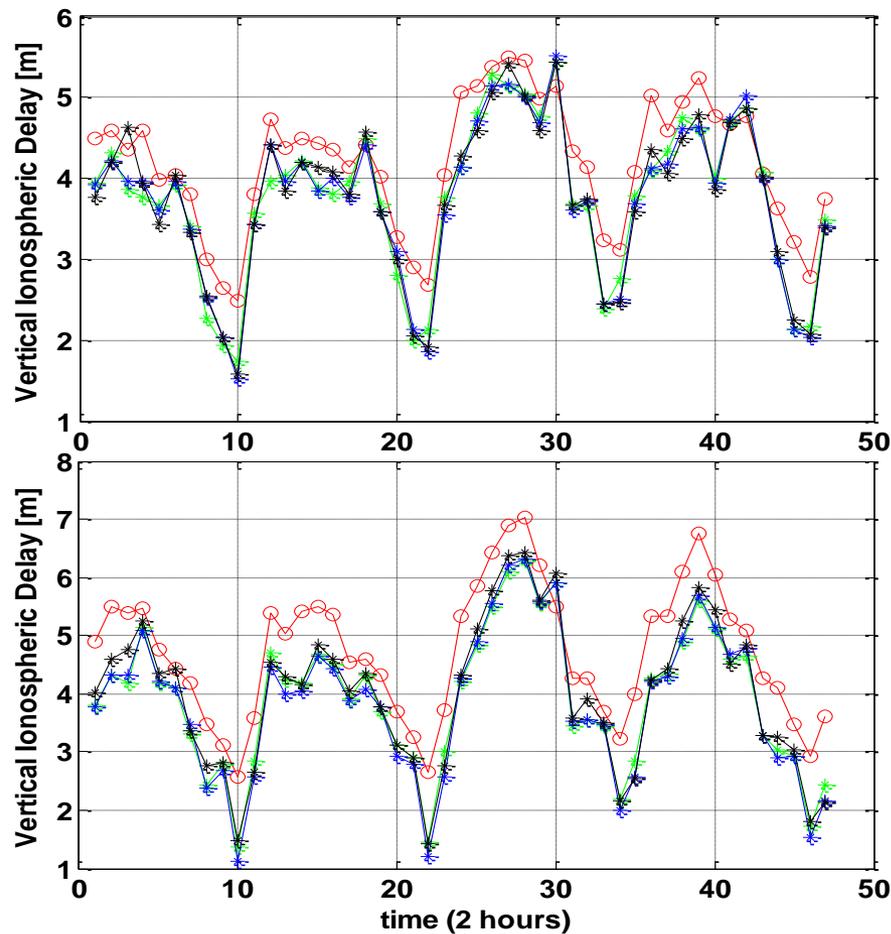
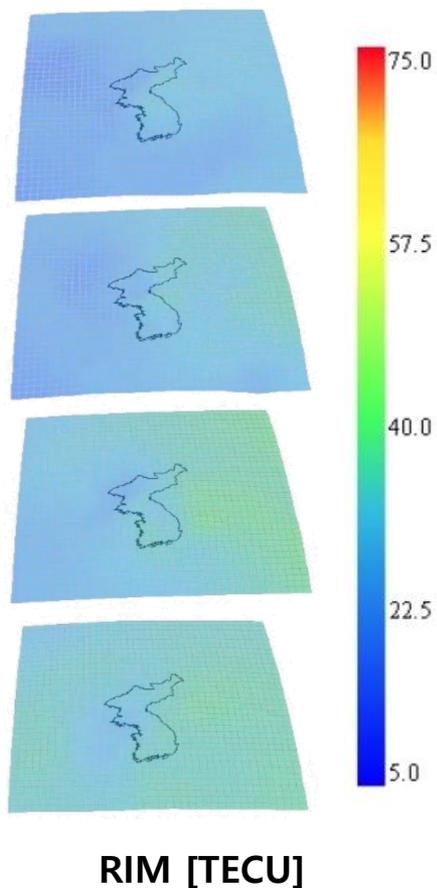
*GP m : group m (5 개의 수신기로 구성)

**GP mn : group m + group (m+1) + ... group n
(m ≤ n)



기준국 위치

성능평가 (2/6)



latitude: 40 °
longitude: 120 °
RMS difference: 0.53 m

* red line with circle
: IGS final product
* other lines
: proposed method

latitude: 35 °
longitude: 115 °
RMS difference: 0.87 m

성능평가 (3/6)

- L1 pseudorange measurement

$$\rho_{1,k}^j = r_k^j + c[\delta t_{u,k} - \delta t_k^j] + T_k^j + (\gamma - 1)OF_k^j \cdot VID_k + v_{1,k}^j$$

r^j : geometric distance from receiver to satellite

$c[\delta t_u - \delta t^j]$: receiver and satellite clock error

T^j : tropospheric delay

- Ionosphere-free measurement combination

$$\rho_{IF}^j = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \tilde{\rho}_1^j - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \tilde{\rho}_2^j \cong r^j + c[\delta t_u - \delta t^j] + T$$

$$\rho_{IF,error}^j = \rho_{IF}^j - r^j = c[\delta t_u - \delta t^j] + T$$

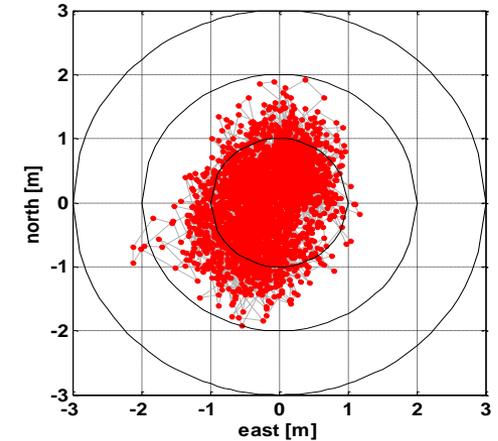
- Non-dispersive error correction

$$\rho_1^j - \rho_{IF,error}^j = r^j + OF^j \cdot VID^j + \varepsilon_{IF}^j + v_1^j$$

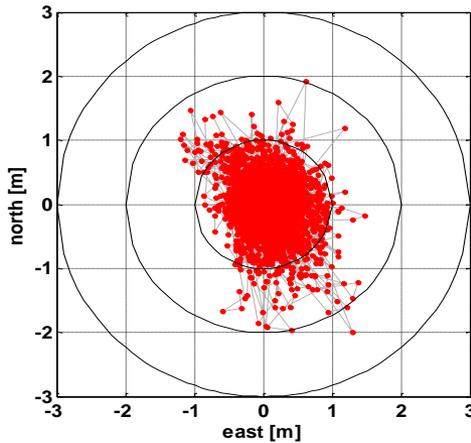
→ 오직 전리층 지연만이
위치 오차의 주요 요인이 되도록
인위적으로 실험 환경 설정

성능평가 (4/6)

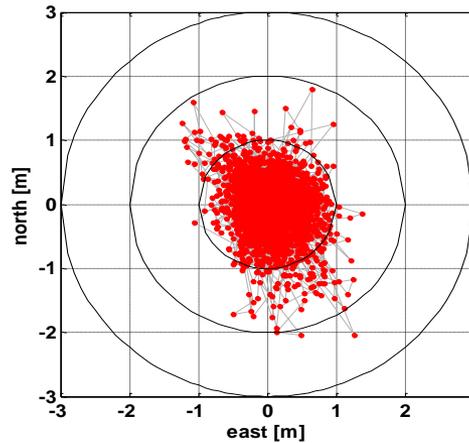
- 수평위치오차
 - *daej* 기준국
 - RIM 생성에 참여하지 않음
 - 오차요인을 전리층 지연으로 고정함



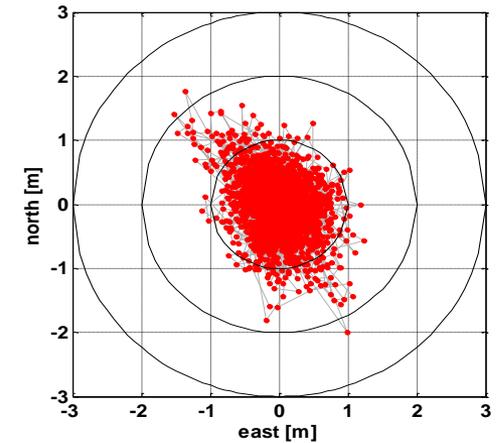
(a) Correction by the IGS final product



(b) Correction by GP13



(c) Correction by GP15



(d) Correction by GP17

성능평가 (5/6)

- 수평/수직 위치오차 (RMSE)

	DOY-155		DOY-156		DOY-157		DOY-158	
	Horizontal RMSE	Vertical RMSE						
IGS product	0.838	1.902	0.795	1.964	0.830	2.120	0.848	2.147
GP1	0.576	0.988	0.602	1.002	0.743	1.223	0.755	1.146
GP2	0.605	0.941	0.623	1.037	0.728	1.211	0.742	1.058
GP3	0.581	0.900	0.592	0.863	0.723	1.117	0.676	0.951
GP4	0.686	0.946	0.617	1.024	0.786	1.244	0.817	1.047
GP5	0.722	0.974	0.716	1.038	0.803	1.177	0.771	0.983
GP6	0.678	0.963	0.708	0.976	0.835	1.254	0.703	1.084
GP7	0.570	0.961	0.602	0.962	0.674	1.115	0.664	0.986
GP12	0.558	0.926	0.618	0.938	0.685	1.137	0.705	1.047
GP13	0.567	0.917	0.596	0.939	0.674	1.132	0.704	1.030
GP14	0.572	0.936	0.588	0.977	0.673	1.128	0.725	1.060
GP15	0.557	0.879	0.619	1.049	0.662	1.118	0.663	0.967
GP16	0.565	0.916	0.587	0.942	0.666	1.076	0.651	0.949
GP17	0.548	0.917	0.552	0.913	0.662	1.086	0.628	0.948

*unit : meter

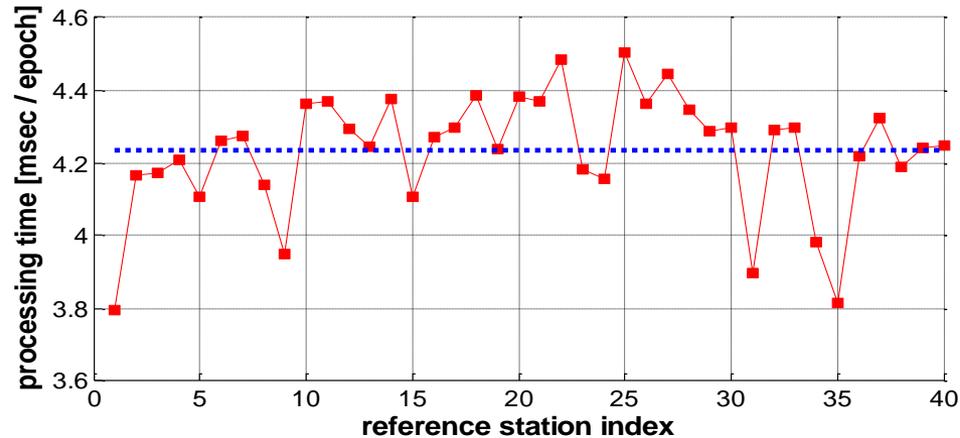
IGS *final* product 활용 대비

수직 : 52 ~ 57 % 향상, 수평 : 16 ~ 48 % 향상

성능평가 (6/6)

➤ Processing Time [ms]

지역필터에서의 매 시점 평균 처리시간

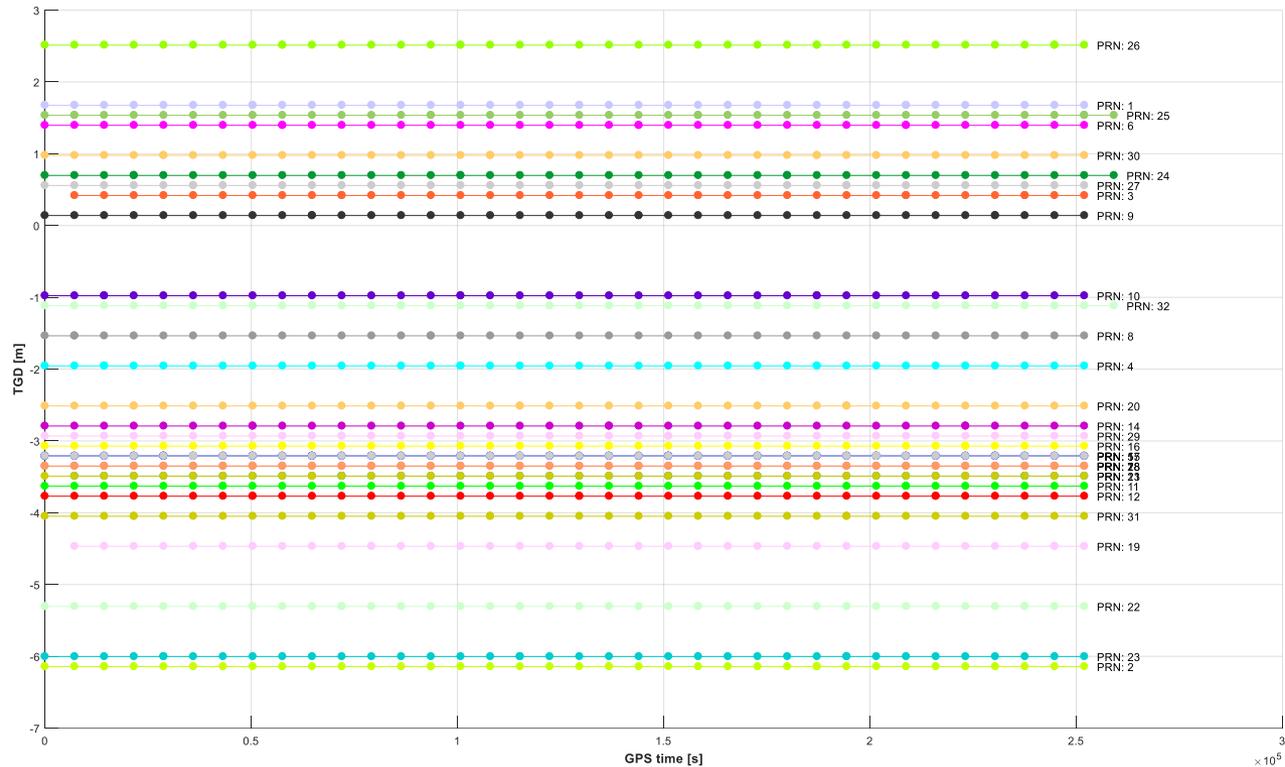


Reference Stations	Local Kalman Filter	RIM (Kriging)	Total
20	4.3	15	19.3
100	4.3	75	79.3

- 단일 중앙집중형 구조의 경우 100개의 기준국 활용 시 1초 이상의 시간이 소요될 것이라 예상됨
- 네트워크 지연은 포함되지 않음

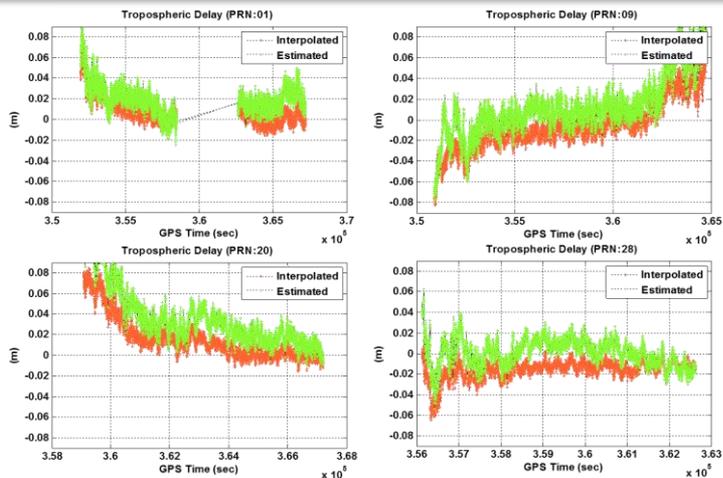
TGD (Timing Group Delay)

$$TGD^j \triangleq \frac{\Delta t_{sv,L1P} - \Delta t_{sv,L2P}}{1 - \gamma} = \frac{SDCB^j}{1 - \gamma}$$

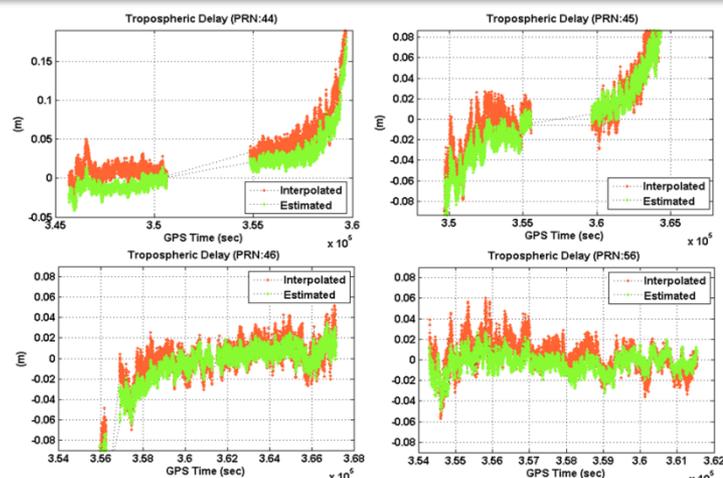


기능 평가 : 상대 전리충 추정

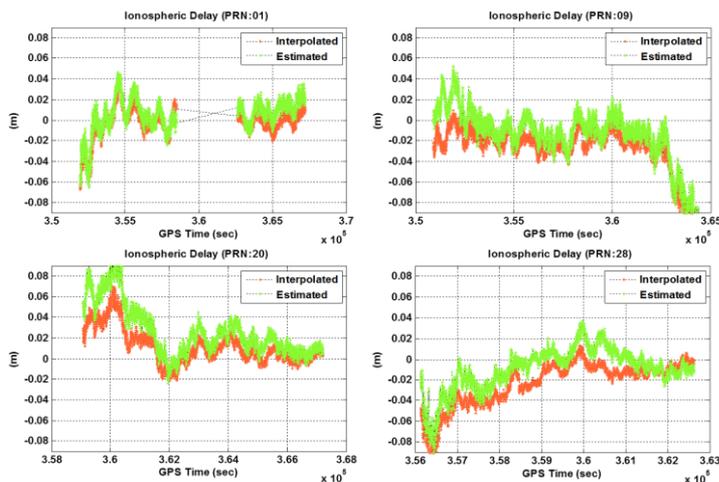
성능평가 : Interpolated Dispersive/Non-Dispersive Error



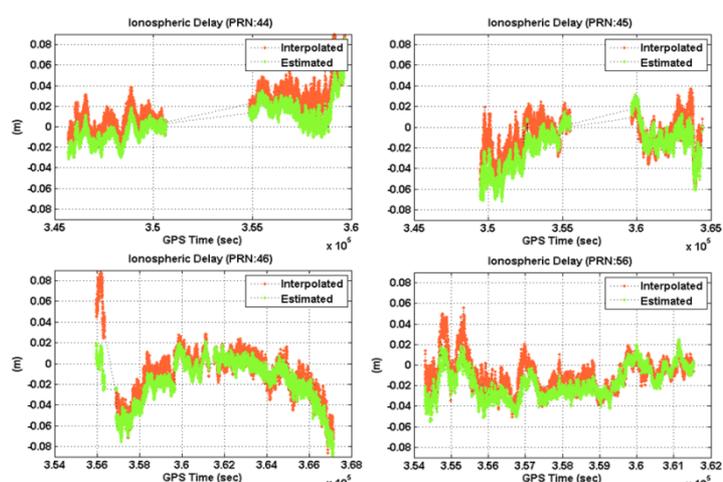
비전파 CD (GPS) : 1, 9, 20, 28



비전파 CD (GLONASS) : 44, 45, 46, 56

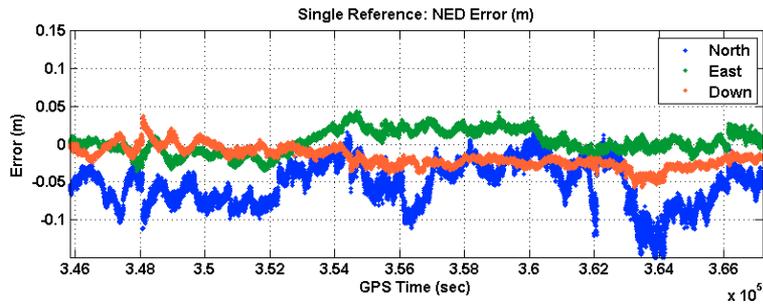


전파 CD (GPS) : 1, 9, 20, 28



전파 CD (GLONASS) : 44, 45, 46, 56

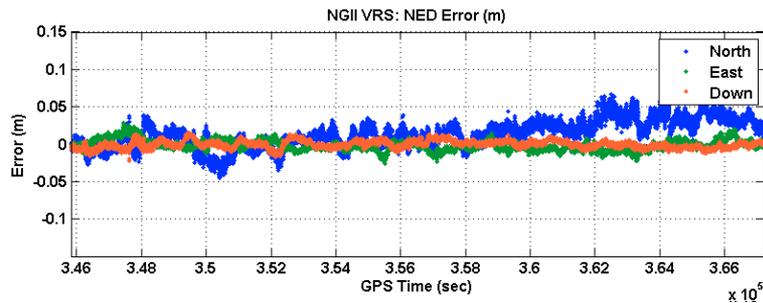
Comparison of Relative Positioning Accuracy



(a) 단일 기준국 기반 RTK

	North	East	Down
RMSE (cm)	2.19	1.58	6.60

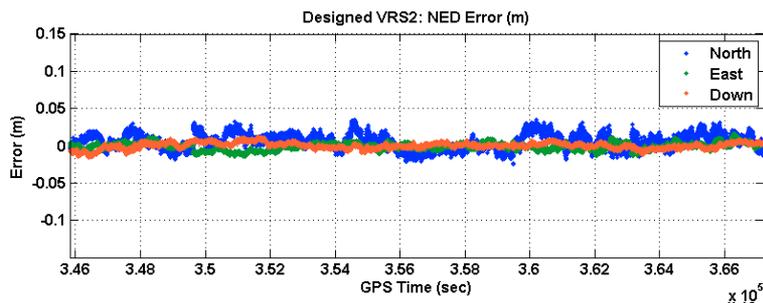
(a) 단일 기준국 기반 RTK



(b) 상용 VRS 기반 RTK

	North	East	Down
RMSE (cm)	0.49	0.71	2.28

(b) 상용 VRS 기반 RTK



(c) 개발 VRS 기반 RTK

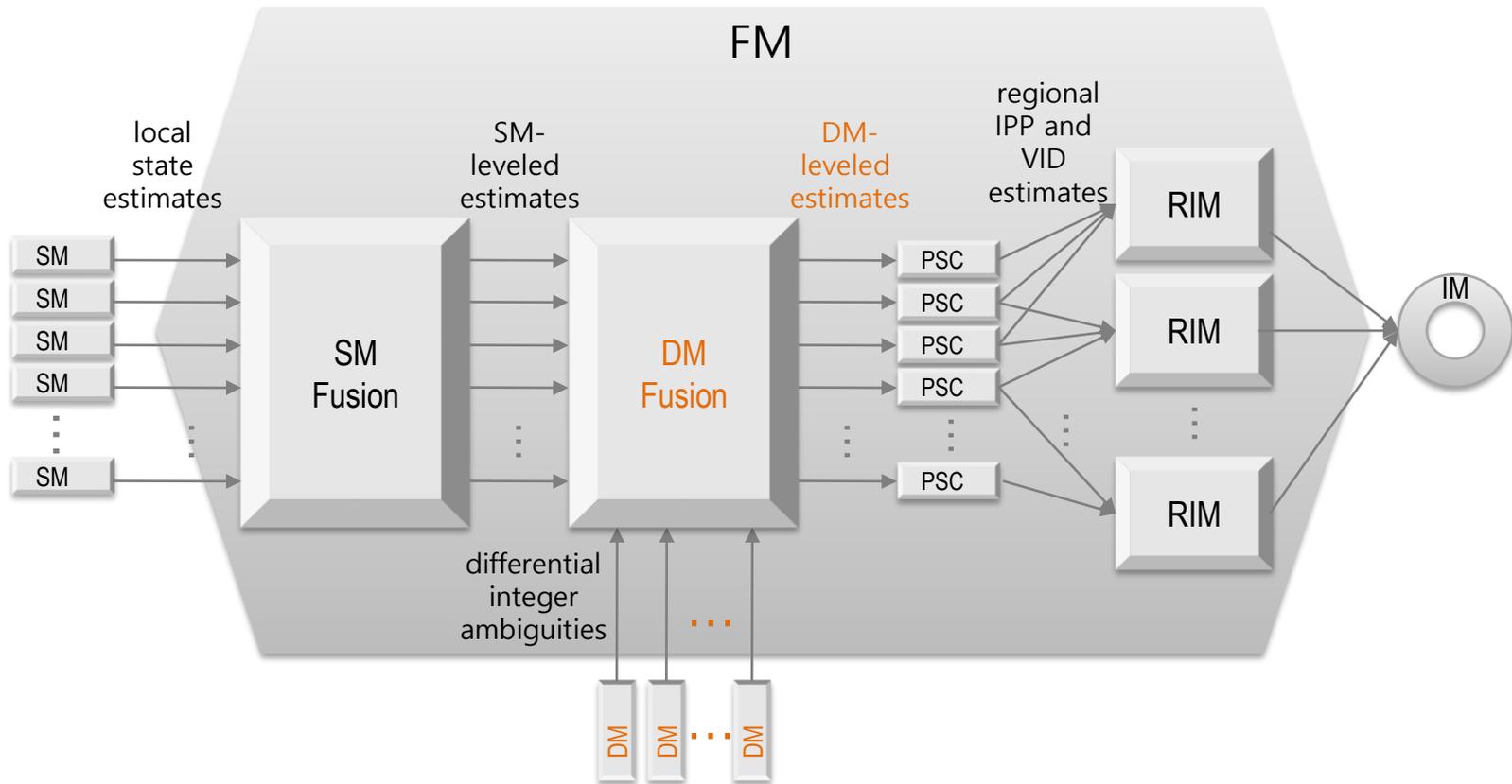
	North	East	Down
RMSE(cm)	0.41	0.47	1.14

(c) 개발 VRS 기반 RTK

상대 전리층 지연 추정치의 활용 용도

SM : Standalone Module
 DM : Differential Module
 FM : Fusion Module
 PSC : Partial State Correction

RIM : Regional Ionospheric Map
 IPP : Ionospheric Pierce Point
 VID : Vertical Ionospheric Delay
 IM : interface module

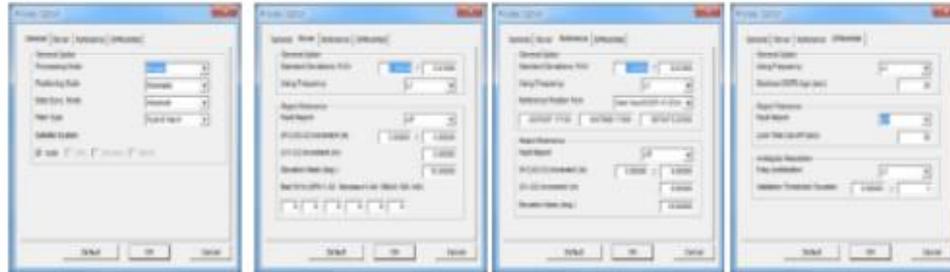


수신기/네트워크 인터페이스

소프트웨어 패키지 **GAFAS**의 구성



Main Window



File Setting
(Open/Create)



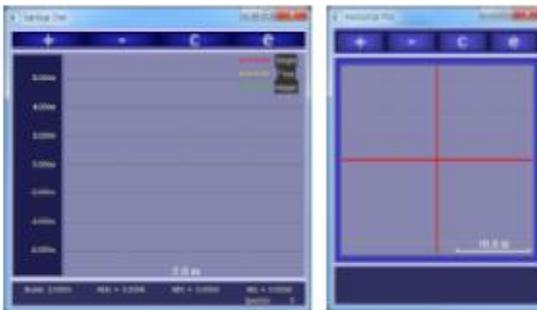
Communication
Setting



TCP/IP Setting
(with Ntrip Client)



Serial Port
Setting



Plot



*GAFAS is the abbreviation for
"GNSS Algorithm For Accuracy and Safety"*

GAFAS 현황

- 작성 언어 / 환경
 - C++ / Windows
- 활용 가능한 위성항법군의 종류
 - GPS, Glonass, Galileo, *BeiDou*
- 수용 가능한 수신기의 종류
 - Trimble, Novatel, Septentrio, U-blox
- 인터페이스의 다양성
 - File, Serial
 - TCP/IP : Sever, Client, *P2P*
 - Ntrip : Broadcaster, Server, Client mode
- 메시지 포맷의 다양성
 - 다수 제조사들의 고유 포맷
 - RINEX 2.0, *RINEX 3.0*
 - RTCM 2.3, RTCM 3.0
- 동기 가능한 센서의 종류
 - IMU, 영상센서, 고도계, *OBD-II*

* 최근에 추가된 기능들

GAFAS 실행파일의 다운로드

연구실 홈페이지
(<http://nisl.kau.ac.kr>)에서
GAFAS 링크를 클릭하면
실행파일과 매뉴얼을
다운로드할 수 있습니다~

Navigation & Information Systems Laboratory (반갑습니다 ^^ 한국항공대학교 항법 및 정보시스템 연구실 입니다. 저희 연구실에서는 측위, - Windows Inter...
http://nisl.kau.ac.kr/

항법 및 정보시스템 연구실
Navigation & Information Systems Laboratory

Introduction
Members
Tools
Pub/Prj
Lectures
Links

* Welcome to Navigation & Information Systems Laboratory (NISL) ^^

* NISL performs various researches on position, location and navigation systems for Location-Based Services (LBS), Intelligent Transportation Systems (ITS), Ubiquitous Sensor Networks (USN) and Robotics.

* Currently, NISL is developing the following technologies ~

- GAFAS_Ver1.0.1.zip
GPS/GNSS Network RTK 기술에 기반한 Cm급 정밀 항법/계측 추출 소프트웨어 (클릭 후 다운로드 가능, L1 RTK, RINEX 데이터 처리)
- 이동 기준국 기반 GPS/GLONASS/INS 정밀 상대 항법
- GNSS 전리층 지연, 주파수간 편이, 채널간 편이, 그리고 미지정수의 분리 추정
- High-Resolution Regional Ionospheric Map
- Decentralized GNSS Master Station + (Real-Time Interface)
(An Efficient GNSS Network Architecture for Accuracy, Safety, and Flexibility)
- Localization Exploring Network Measurement Occurances (LENMO)
(An Innovative New Positioning Technology)
- Networked GNSS Algorithm For Accuracy and Safety (NGAFAS)
(C/C++ GPS/GNSS Software Package to Build and Use Customized Real-Time Cm-Level Network RTK Systems)

인터넷 | 보호 모드: 해제 125%

시뮬레이션 : 기준국 유입 및 소실에 대응하는 재형상 기능

- Network Configuration
 - Delaunay 삼각 분할 활용
 - 기준국의 유입 및 유출을 고려

(a) 접속중인 기준국 네트워크



(b) 기준국 유입 (네트워크 내부)



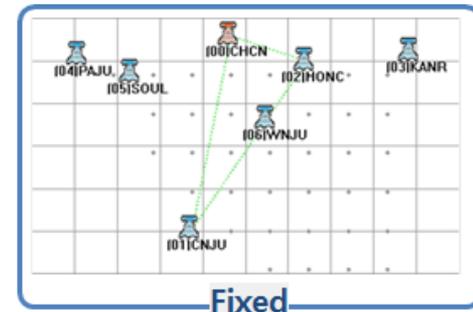
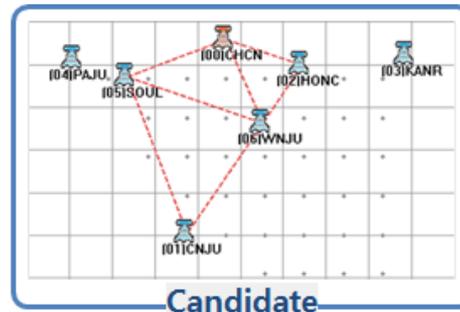
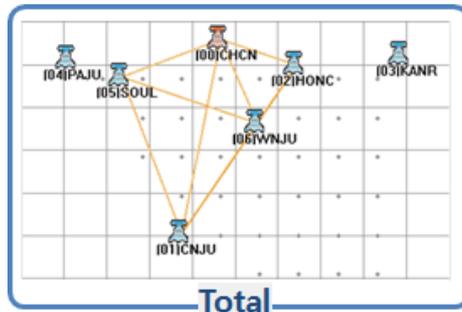
(c) 기준국 소실 (네트워크 내부)



(d) 기준국 유입 (네트워크 외부)



- 기선별 데이터 처리 상태를 기선의 미지정수 결정 여부에 따라 나누어 관리



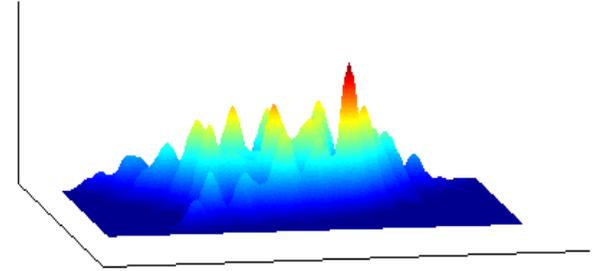
결론

결론

- 위성항법 지상부분은 고장에 대한 대비를 위하여 점진적으로 다중화하는 추세임 (GPS 현대화)
- 중요도와 보안성이 다른 서비스 별로 참여 기준국을 달리 활용하는 추세임 (QZSS, BDS)
- 보다 향상된 서비스를 위해서는 점진적으로 기준국(Monitoring Station)의 수를 증가시키는 추세임 (QZSS, BDS)
- 자국의 위성항법시스템 뿐 아니라 타 위성항법시스템의 성능을 모니터링하고 활용하는 추세임 (QZSS MADOCA)
- 추후 한국형 위성항법시스템 개발에 있어서는 적어도 1개 이상의 서비스는 타국에 대한 의존 없이 독자적으로 개발할 필요 있음
- 다양한 고장과 유지/보수 상황에 위성항법 지상부분이 유연하게 대응하고 끊임 없이 서비스를 제공하기 위해서는 무중단 실시간 고장 검출/분리/재형상 기능이 고려되는 것이 바람직함

참고문헌

- 이형근, "GAFAS: 정확성과 안전성을 위한 GPS 알고리즘", 2004 항공전자 심포지엄 논문집, Nov. 11, 2004
- 이형근, "GPS 측정치 처리용 소프트웨어 모듈 GAFAS의 소개", 한국항행학회, Nov. 4, 2005
- H.S. Kim, J.Y. Shim, H.K. Lee, "Designing a GPS Receiver Network with GNSS Algorithm for Accuracy and Safety," Paper #135, Proceedings of IGNSS 2007, 4-6 Dec., Sydney, Australia, 2007
- H. K. Lee and C. Rizos, "Position-Domain Hatch Filter for Kinematic Differential GPS/GNSS", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 44, No. 1, pp. 30-40, 2008
- H.S. Kim, H.K. Lee, "Real-Time Implementation of L1 RTK System Based on Position-Domain Hatch Filter," Proceedings of European Navigation Conference, May 3-6, Naples, 2009
- H.S. Kim and H.K. Lee, "Compensation of Time Alignment Error in Heterogeneous GPS Receivers," Proceedings of IAIN World Congress, Oct. 27-30, Stockholm, 2009
- H.S. Kim, H.K. Lee, "Real-Time Implementation of L1 RTK System Based on Position-Domain Hatch Filter," Proceedings of European Navigation Conference, May 3-6, Naples, 2009
- 김희성, 이재영, 박제두, 최광호, 이영준, 최종준, 김민우, 이형근, "국내 GPS/GNSS 상시 관측소 데이터의 실시간 통합 활용 방안 연구", 제17차 GNSS 워크샵 논문집, Nov. 4-5, 제주, 2010
- 김희성, 이형근, "차선별 교통 모니터링을 위한 위성항법 수신기망 설계 및 성능 평가", 한국항행학회 논문지, Vol 14, No. 2, pp. 151-160, 2010
- H.S. Kim, J.Y. Lee, and H.K. Lee, "A Differential Reference Station Algorithm for Modular Decentralized GPS/GNSS Master Station Architecture," Proceedings of International Symposium on GPS/GNSS, Oct. 26-28, Taipei, 2010
- 최광호, 이재영, 최종준, 김희성, 이형근, "GNSS 상시관측소 기준국망을 이용한 실시간 지역 전리층 감시 기법", 제18차 GNSS 워크샵 논문집, Nov. 3-4, 제주, 2011
- H. S. Kim, J. Y. Lee, and H. K. Lee, "Estimation of Inter-Channel Bias and Ambiguity Resolution Strategy in GPS/GLONASS Combined RTK Positioning," Proceedings of IAIN World Congress, Oct. 1-3, Cairo, 2012
- K. H. Choi, H. S. Kim, J. Y. Lee, J. H. Lim, and H. K. Lee, "Real-time Monitoring of Detailed Regional Ionospheric Activities by GPS CORS Networks," Proceedings of IAIN World Congress, Oct. 1-3, Cairo, 2012
- H. S. Kim and H. K. Lee, "Elimination of Clock Jump Effects in Low-Quality Differential GPS Measurements," Journal of Electrical Engineering & Technology Vol. 7, No. 4, pp. 626-635, 2012
- K. H. Choi, J. Y. Lee, H. S. Kim, J. R. Kim, and H. K. Lee, "Simultaneous Estimation of Ionospheric Delays and Receiver Differential Code Bias by a Single GPS Station," Measurement Science and Technology, Vol. 23, No. 6, Article # 065002, 2012
- J. Y. Lee, H. S. Kim, and H. K. Lee, "Detection of Multiple Faults in Single Frequency Differential GPS Measurements," IET Radar, Sonar and Navigation, Vol. 6, No. 8, pp. 697-707, 2012
- 김희성, 이재영, 최광호, 임준후, 강성진, 이형근, "분산형 네트워크 RTK 시스템 구현 및 성능평가", 한국위성항법시스템학회 정기학술대회, 제주, Nov. 6-8, 2013
- K. H. Choi, J. H. Lim, W. J. Yoo, and H. K. Lee, "Distributed Processing of GPS Receiver Network for Regional Ionosphere Map," Measurement Science and Technology, Vol. 29, No. 1, Article #015104, 2017



경청해 주셔서 감사합니다!