GPGPU를 활용한 다중 위성군/다중 주파수 실시간 SDR A-GNSS 수신기 설계 및 구현

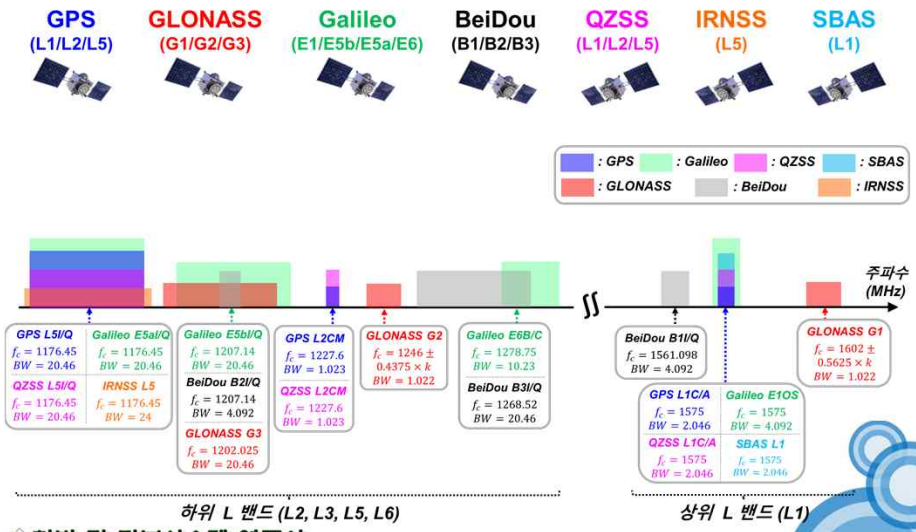
한국항공대학교 항공전자정보공학과
유 원 재

항법 및 정보시스템 연구실
Navigation & Information Systems Laboratory

1

연구 배경

- L 밴드 내 모든 GNSS/RNSS 신호



항법 및 정보시스템 연구실
Navigation & Information Systems Laboratory

6

2

연구 배경

SDR 적용 필요

- 기존 하드웨어 수신기로는 향후 주파수 및 변조 기법의 다변화를 만족시키기 어려움
  - 단일 하드웨어에 탑재된 소프트웨어의 조작을 통해 **동작 특성을 유연하게 변경 가능**
  - **RF 프론트엔드 특성 변경을 통해 현존하는 모든 GNSS/RNSS 신호 접근 가능**
  - **KPS (Korea Positioning System) 및 미래의 C 밴드 GNSS 신호에 대처 가능**
    - KPS 신호 검증 및 각종 테스트 시 매우 용이

SDR 기반 GNSS 수신기 연구 동향 및 선행 연구

- 미래지향적인 SDR GNSS 수신기 전 세계적으로 접목 시도
  - 다양한 저가형 SDR 플랫폼 (bladeRF, osmosdr, HackRFone, MAX2769B, MAX2112) 등에 의해 GNSS 수신 연구가 전 세계적으로 활발
    - 동일한 주파수 대역인 GPS L1, Galileo E1 을 하나의 협대역 RF 프론트엔드를 통해 수신 연구 수행
  - 전리층 신틸레이션 및 간섭신호 관측에 SDR 기준국 적용 시도
  - 상용 GNSS SW RTK-LIB 에 SDR 기반의 GNSS 수신 기능을 추가하여 알고리즘 테스트
  - SDR 플랫폼을 활용한 배열안테나 기반의 항재밍 알고리즘 개발 및 성능평가
  - 무선 인지 환경에 따른 L1/L2 주파수 대역 GPS/GLONASS/BeiDou 신호 처리 시도
  - MATLAB PCT 기반의 GPU 활용 GNSS 신호 처리 아키텍쳐 연구

3

연구 동향

SDR 기반 GNSS 수신기 연구 동향 및 선행 연구

- 대부분 **다중 RF-다중 스트림 구조**이며, 혹은 **단일 RF-단일 스트림 구조**인 경우 샘플링 주파수가 높지 않아 모든 Constellation 신호 수신 불가
  - USRP 활용 연구 또한 안정적인 샘플 제공 문제로 인한 약 10 MHz 부근 샘플링 주파수 사용
  - (L1)GPS L1C/A+Galileo E1B+BeiDou B1I, (L2)Galileo E5bI+BeiDou B2I, (L2)GPS L2C+GLONASS G2 등
  - L 밴드 내(L1/L2/L3/L5/L6)에서 수신 가능한 **모든 GNSS 신호를 다수의 SDR로 동시에 획득 및 신호 처리하기 위한 연구 필요**

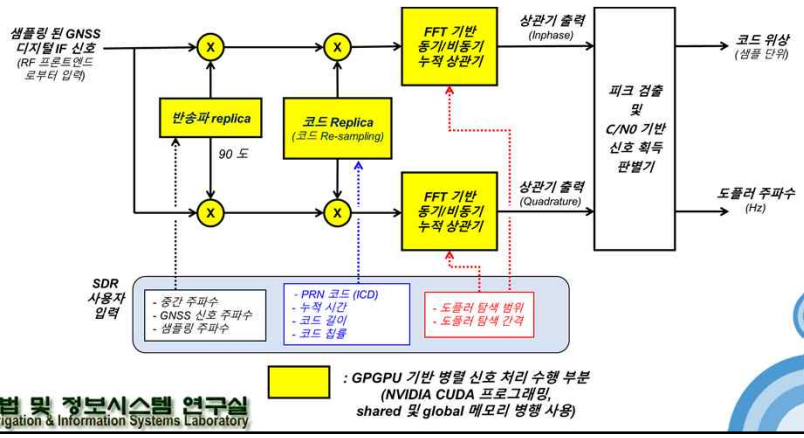
개발기관	CTTC	칭화대	TUMSAT	PLAN
플랫폼 (HW/SW)	GNSS-SDR / GESTALT	STARx	GNSS-SDRLIB	GNSRx
연산용 하드웨어	• Dell'sPowerE • dgeR730Rack • Server • TeslaK10 • GPU	• PC (GTX 580 & i7-3770K)	• 대부분의 PC 지원 (현재 GPU 가속 미지원)	• 대부분의 PC지원 (GPU, DPS 가속 지원)
수신 가능 위성신호	• GPS L1C/A, L2C • GLO G1, G2 • GAL E1B, E5a, E5b • BDS B1I, B2I	• GPS L1C/A, L1C, L2C, L5 • GLO G1,G2 • GAL E1,E5a/b • BDS B1I, B2I	• GPS L1C/A • GLO G1 • GAL E1B • BDS B1I	• GPS L1C/A, L1C, L2C, L5 • GLO G1, G2 • GAL E1B, E5a, E5b • BDS B1I
RF Front-end	• NavX-NCS • USRP X300 • TeleOrbits'FI • Exibandreceiver • NSLStereo	• 자체개발	• NSLStereo • USRP N210 • SiGeGN3SS • RTL-SDR • NuandBladeRF	• SiGeGn3SS • GSS7700 • SiGe'sSE4110
활용 사례	• 차세대 GNSS 수신기 개발 및 연구 • 전리층모니터링	• 배열안테나 기반 재밍대응 성능평가	• RTK 알고리즘 개발 및 평가	• 지진 및 전리층 관찰 • 재밍대응 알고리즘 개발 및 성능평가

종류	GNSS-SDR (USRP)	GNSS-SDRLIB (USRP)
RF 프론트엔드	• 표본화 주파수 • LO 주파수 • 필터 계수 • 실수/복소 신호	• 실수/복소 신호 • RF Front-end종류
수신기 채널	• 각 GNSS 신호 채널 수 • 잡음 대역폭 • 추적루프 필터 차수 • 도플러 주파수 탐색범위 • 도플러 주파수 탐색단계 • 신호획득 문턱값 • 누적 시간	• PRN • 시스템 종류 • 코드 종류 • 잡음대역폭 • 상관기 개수 • 상관기 간격 • 도플러 주파수 탐색범위 • 도플러 주파수 탐색단계 • 신호획득 문턱값
PVT	• 시스템 선택 • Moving Average 윈도우 크기 • PVT 출력주기 • 결과 저장주기	• PVT 출력주기

4

SDR 기반 다중 항법군/다중 주파수 신호 획득 (1/2)

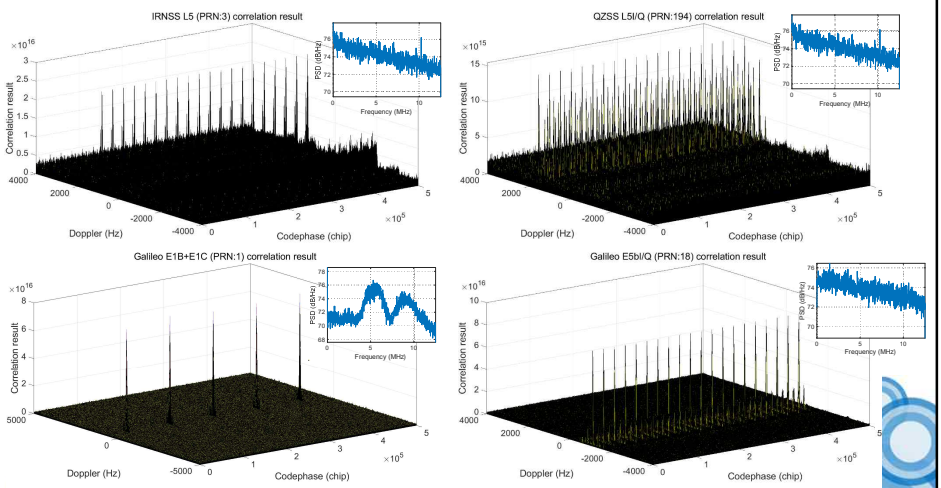
- **GPGPU를 활용한 가속화된 다중 항법군/다중 주파수 신호 획득**
  - GNSS/RNSS Interface Control Document (ICD) 기반 모든 PRN 코드 생성 모듈 설계
    - Upper 10-bit Linear Shift-register, Hexadecimal 코드(메모리 코드) 등
  - BPSK, Binary Offset Carrier (BOC), Alternate BOC (AltBOC) 변조 전부 허용
  - 데이터/파일럿 채널 존재 신호에 대해서, 신호 결합 후 동시 상관 수행



5

SDR 기반 다중 항법군/다중 주파수 신호 획득 (2/2)

- **GPGPU를 활용한 가속화된 다중 항법군/다중 주파수 신호 획득**
  - BPSK(1), BPSK(10), BOC(6, 1, 1/11), AltBOC(15, 10)



6

다수 SDR 결합 코드 위상/도플러 기반 위치해 추정 (1/3)

단일 SDR 코드 위상 및 도플러 기반의 사용자 위치 해 추정

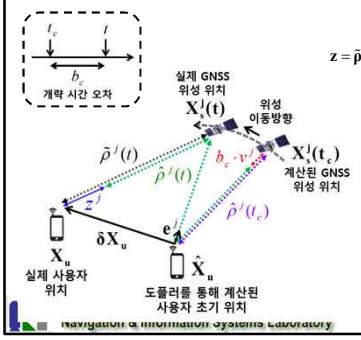
- 일반적인 거리 측정 : GNSS 위성과의 시각 동기 기반의 거리 측정
- GNSS 수신기 내 XO, TCXO 등 저가형 Oscillator 탑재
  - GNSS 위성과 시각 미 동기 시, 참 시간과 오차 크게 발생 가능성 높음
  - GNSS 위성과 시각 미 동기 된 수신기 내부 시간 : **개략 시간 (Coarse-time)**
- 신호 상관기 획득 결과값 **(1. 코드 위상 : 샘플 단위로 측정)**
  - GNSS 위성으로부터 반복적으로 송신되며 한 주기의 코드 내에서 반드시 시작 지점 존재
  - 코드 위상 : 코드의 시작 지점을 찾기 위한 상관기 내 시간 지연 값
  - **(코드 반복 횟수 x 코드 주기) + 코드 위상** 을 **거리 측정치로 환산** 가능
  - 거리해상도는 샘플링 주파수에 비례
- 정확한 코드 반복 횟수 계산을 위해 외부로부터 **GNSS 위성 천체력데이터 (보조 정보 : 위성 위치/속도 계산 시 필요)** 제공 요구 및 약 100 km 이내의 **사용자 초기 위치** 필요
  - 코드 반복 주기 1 ms = 약 300 km 이므로 100 km 이내의 초기 위치에서, 코드 반복 횟수 동일
- 신호 상관기 획득 결과값 **(2. 도플러 : Hz 단위로 측정)**
  - 4 개 이상의 **도플러 측정치** 를 활용해 충분히 수~수십 km 수준의 위치 추정 가능
  - **사용자 초기 위치**로 활용

7

다수 SDR 결합 코드 위상/도플러 기반 위치해 추정 (2/3)

단일 SDR 코드 위상 및 도플러 기반의 개략 위치 추정

- 개략 시간(Coarse-Time) 이 사용자에게 미치는 영향
  - **거리 측정치 영역**에 영향 : 모든 측정치에 동일하게 영향 미침 **(수신기 시계 오차)**
  - **거리 추정치 영역**에 영향 : 위성 위치 계산 시 발생
    - 위성의 비선형 움직임으로 인해 각 위성 별로 미치는 영향이 다름 **(개략 시간 오차)**
- 비 시각 동기 된 SDR RF 프론트엔드 K 개를 사용하는 경우
  - 시간 오차 추정 변수가 각 RF 별 2 개 (수신기 시계 오차, 개략 시간 오차)
  - **추정 변수 개수 : 3** (사용자 위치) **+ 2 * K** (SDR RF 프론트엔드 당 시간 오차 2 개)



$$\mathbf{z} = \tilde{\boldsymbol{\rho}} - \hat{\boldsymbol{\rho}} = \begin{bmatrix} \tilde{\rho}^1(t) \\ \tilde{\rho}^2(t) \\ \vdots \\ \tilde{\rho}^N(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{\rho}^1(t) \\ \hat{\rho}^2(t) \\ \vdots \\ \hat{\rho}^N(t) \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} -\mathbf{e}^1 \\ -\mathbf{e}^2 \\ \vdots \\ -\mathbf{e}^N \end{bmatrix} \delta\mathbf{X}_u + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \delta b_r + \begin{bmatrix} v^1 \\ v^2 \\ \vdots \\ v^N \end{bmatrix} \delta b_c + \begin{bmatrix} \varepsilon^1 \\ \varepsilon^2 \\ \vdots \\ \varepsilon^N \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} -\mathbf{e}^1 & 1 & v^1 \\ -\mathbf{e}^2 & 1 & v^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -\mathbf{e}^N & 1 & v^N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta\mathbf{X}_u \\ \delta b_r \\ \delta b_c \end{bmatrix} + \boldsymbol{\varepsilon}$$

t : 실제 시간 (참 시간)
t_c : 개략 시간
b_c : 개략 시간 오차 ($t - t_c$)
v^j : 의사거리 변화율 (/ 번째 위성)
$\tilde{\rho}^j(t)$: 거리 측정치 (/ 번째 위성)
$\hat{\rho}^j(t)$: 실제 시간에서의 거리 추정치 (/ 번째 위성)
$\hat{\rho}^j(t_c)$: 개략 시간에서의 거리 추정치 (/ 번째 위성)
e^j : 위성과 사용자 초기 위치 간 시선각 벡터 (Line of Sight, / 번째 위성)
N : 측정치 개수
ε^j : 측정치 오차 (/ 번째 위성)

$\delta\mathbf{X}_u = \mathbf{X}_u - \hat{\mathbf{X}}_u$
$\delta b_r = b_r - \hat{b}_r$
$\delta b_c = b_c - \hat{b}_c$

8

다수 SDR 결합 코드 위상/도플러 기반 위치해 추정 (3/3)

- 다수 SDR 코드 위상 및 도플러 기반의 개략 위치 추정 (총 4 대 USRP)

$$\mathbf{z} = \tilde{\boldsymbol{\rho}} - \hat{\boldsymbol{\rho}} = \begin{bmatrix} \tilde{\rho}_1^1(t) \\ \vdots \\ \tilde{\rho}_1^{N_1}(t) \\ \tilde{\rho}_2^1(t) \\ \vdots \\ \tilde{\rho}_2^{N_2}(t) \\ \tilde{\rho}_3^1(t) \\ \vdots \\ \tilde{\rho}_3^{N_3}(t) \\ \tilde{\rho}_4^1(t) \\ \vdots \\ \tilde{\rho}_4^{N_4}(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{\rho}_1^1(t) \\ \vdots \\ \hat{\rho}_1^{N_1}(t) \\ \hat{\rho}_2^1(t) \\ \vdots \\ \hat{\rho}_2^{N_2}(t) \\ \hat{\rho}_3^1(t) \\ \vdots \\ \hat{\rho}_3^{N_3}(t) \\ \hat{\rho}_4^1(t) \\ \vdots \\ \hat{\rho}_4^{N_4}(t) \end{bmatrix}$$

※ 추정 변수 : 총 11 개
(사용자 위치 ECEF XYZ, 수신기 시계 오차 * 4, 개략 시간 오차 * 4)

※ 측정치 요구 개수 : 각 USRP 별 최소 2 개 이상 및 총 11 개 이상
(USRP 측정치 1 개인 경우, 해당 USRP 오차 산출 불가)

$$= \begin{bmatrix} -\mathbf{e}^1 \\ \vdots \\ -\mathbf{e}^{N_1} \\ -\mathbf{e}^{N_1+1} \\ \vdots \\ -\mathbf{e}^{N_1+N_2} \\ -\mathbf{e}^{N_1+N_2+1} \\ \vdots \\ -\mathbf{e}^{N_1+N_2+N_3} \\ -\mathbf{e}^{N_1+N_2+N_3+1} \\ \vdots \\ -\mathbf{e}^{N_1+N_2+N_3+N_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta x_u \\ \delta y_u \\ \delta z_u \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \vdots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta b_{r_1} \\ \delta b_{r_2} \\ \delta b_{r_3} \\ \delta b_{r_4} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_1^1 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & 0 & 0 & 0 \\ v_1^{N_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & v_2^1 & 0 & 0 \\ 0 & \vdots & 0 & 0 \\ 0 & v_2^{N_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & v_3^1 & 0 \\ 0 & 0 & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & v_3^{N_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & v_4^1 \\ 0 & 0 & 0 & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & v_4^{N_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta b_{r_1} \\ \delta b_{r_2} \\ \delta b_{r_3} \\ \delta b_{r_4} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon^1 \\ \vdots \\ \varepsilon^{N_1} \\ \varepsilon^{N_1+1} \\ \vdots \\ \varepsilon^{N_1+N_2} \\ \varepsilon^{N_1+N_2+1} \\ \vdots \\ \varepsilon^{N_1+N_2+N_3} \\ \varepsilon^{N_1+N_2+N_3+1} \\ \vdots \\ \varepsilon^{N_1+N_2+N_3+N_4} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} -\mathbf{e} & \mathbf{r} & \mathbf{v} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \mathbf{x}_u \\ \delta \mathbf{b}_r \\ \delta \mathbf{b}_c \end{bmatrix} + \boldsymbol{\varepsilon}$$

$$\mathbf{e} = \begin{bmatrix} \mathbf{e}^1 \\ \vdots \\ \mathbf{e}^{N_1} \\ \mathbf{e}^{N_1+1} \\ \vdots \\ \mathbf{e}^{N_1+N_2} \\ \mathbf{e}^{N_1+N_2+1} \\ \vdots \\ \mathbf{e}^{N_1+N_2+N_3} \\ \mathbf{e}^{N_1+N_2+N_3+1} \\ \vdots \\ \mathbf{e}^{N_1+N_2+N_3+N_4} \end{bmatrix} \quad \mathbf{r} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \vdots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{v} = \begin{bmatrix} v_1^1 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & 0 & 0 & 0 \\ v_1^{N_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & v_2^1 & 0 & 0 \\ 0 & \vdots & 0 & 0 \\ 0 & v_2^{N_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & v_3^1 & 0 \\ 0 & 0 & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & v_3^{N_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & v_4^1 \\ 0 & 0 & 0 & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & v_4^{N_4} \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon^1 \\ \vdots \\ \varepsilon^{N_1} \\ \varepsilon^{N_1+1} \\ \vdots \\ \varepsilon^{N_1+N_2} \\ \varepsilon^{N_1+N_2+1} \\ \vdots \\ \varepsilon^{N_1+N_2+N_3} \\ \varepsilon^{N_1+N_2+N_3+1} \\ \vdots \\ \varepsilon^{N_1+N_2+N_3+N_4} \end{bmatrix}$$

$$\delta \mathbf{X}_u = \begin{bmatrix} \delta x_u \\ \delta y_u \\ \delta z_u \end{bmatrix} \quad \delta \mathbf{b}_r = \begin{bmatrix} \delta b_{r_1} \\ \delta b_{r_2} \\ \delta b_{r_3} \\ \delta b_{r_4} \end{bmatrix} \quad \delta \mathbf{b}_c = \begin{bmatrix} \delta b_{r_1} \\ \delta b_{r_2} \\ \delta b_{r_3} \\ \delta b_{r_4} \end{bmatrix}$$

$\{N_i\}_{i=1,2,3,4}$: USRP 1,2,3,4 각각의 측정치 개수

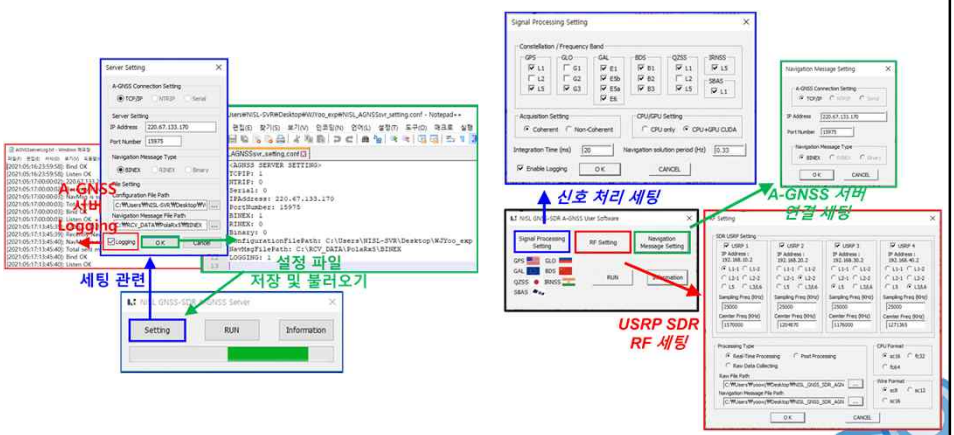
$\{\delta b_{r_i}\}_{i=1,2,3,4}$: USRP 1,2,3,4 각각의 수신기 시계 오차

$\{\delta b_{c_i}\}_{i=1,2,3,4}$: USRP 1,2,3,4 각각의 개략 시간 오차

9

실시간 SDR A-GNSS 소프웨어 구현

- 실제 구동 중인 실시간 SDR A-GNSS 서버/수신기 외형

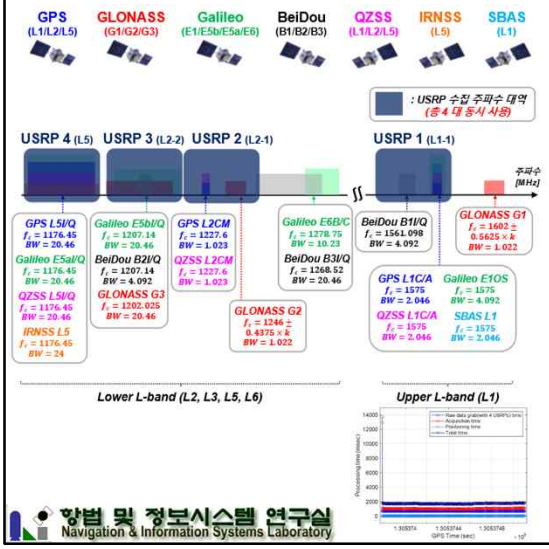


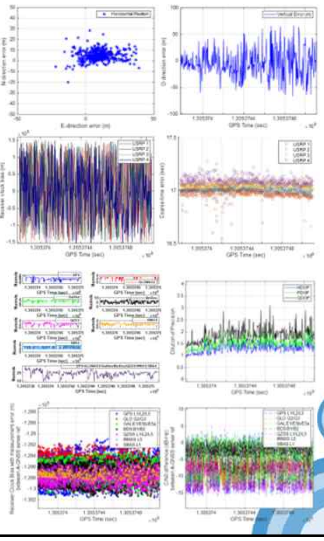
10

실시간 SDR A-GNSS 검증 실험 (1/2)

❖ 다중 USRP/다중 주파수 대역 실시간 SDR A-GNSS 수신기 실험

➢ 결과도시 : L1-1 + L2-1 + L2-2 + L5 (20 ms 동기 누적)





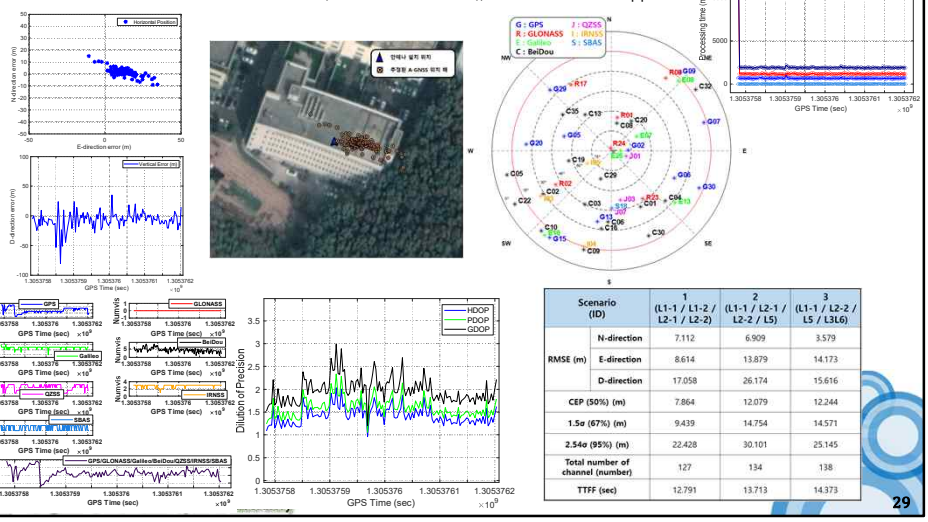
11

실시간 SDR A-GNSS 검증 실험 (2/2)

❖ 다중 USRP/다중 주파수 대역 실시간 SDR A-GNSS 수신기 실험

➢ 결과도시 : L1-1 + L2-2 + L5 + L3L6 주파수 대역 (20 ms 동기 누적)

- 약 10 분 간 실험 수행 (위치해 갱신주기 3초), 나머지 대역 결과 Appendix



Scenario (ID)		1 (L1-1 / L1-2 / L2-1 / L2-2)	2 (L1-1 / L2-1 / L2-2 / L5)	3 (L1-1 / L2-2 / L5 / L3L6)
RMSE (m)	N-direction	7.112	6.909	3.579
	E-direction	8.614	13.879	14.173
	D-direction	17.058	26.174	15.616
CEP (50%) (m)		7.864	12.079	12.244
1.5σ (67%) (m)		9.439	14.754	14.571
2.54σ (95%) (m)		22.428	30.101	25.145
Total number of channel (number)		127	134	138
TTFF (sec)		12.791	13.713	14.373

12

결 론

SDR A-GNSS 수신기 설계

- SDR 기반 다중 항법군/다중 주파수 신호 획득
  - 사용자 입력 기반의 Parametric 구조로 설계되어 유연성 및 높은 확장성
  - 소프트웨어 기반 모든 L 밴드 내 GNSS OS 신호 획득 모듈 설계
  - GPGPU CUDA를 활용하여 연산 속도 대폭 가속화
- 다수 SDR 결합 코드 위상/도플러 기반 위치해 추정
  - RNSS 항법메세지 해독을 위해 Binary 형태 BINEX Raw Subframe/String/Page/Block 직접 해독 수행
  - 매우 짧은 ms 단위의 샘플만으로 정확도 및 신뢰성 만족하는 A-GNSS 사용자 위치해 신속 산출
  - 실제 적용 가능하다면 전력 소모 대폭 감소 및 사용 수명 대폭 증가
- 실시간 구동 가능한 SDR A-GNSS 서버/수신기 설계
  - USRP 직접 제어 및 구동 위한 UHD C++ API 적용
  - 100 MHz 샘플링 주파수 ms 길이 데이터 실시간 수집을 위한 메모리 버퍼 관리 알고리즘
  - 실시간 수집 및 동시에 신호 처리를 위한 Multi-Thread 기반 구조로 설계
  - 다양한 SDR 조합 및 다양한 환경에서의 후처리/실시간 실험을 통해 충분한 정확도의 실시간 위치해 산출

13

Thanks for Your Attention

Q&A

14