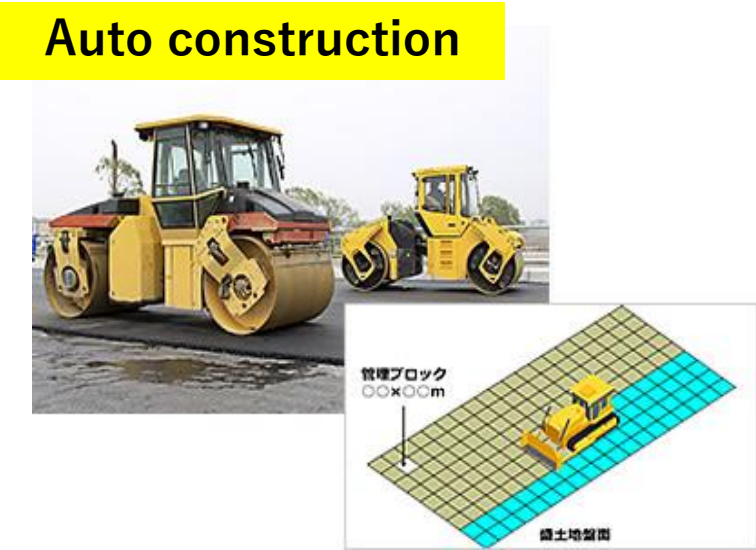




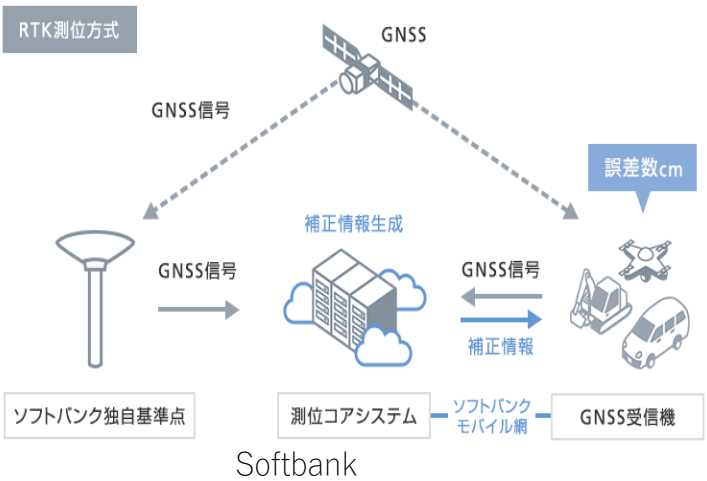
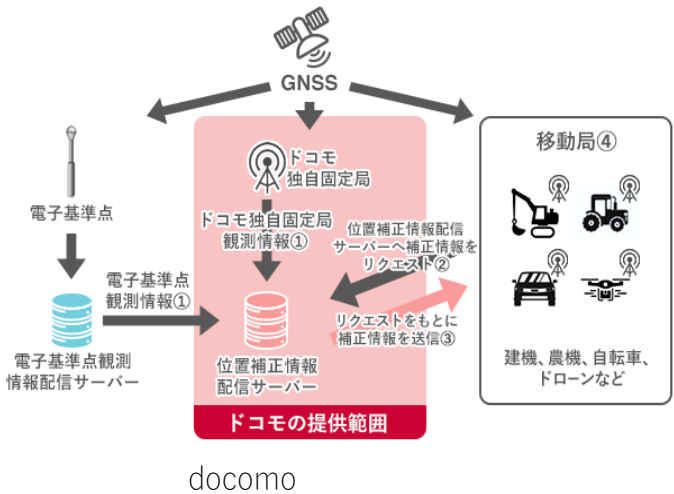
補正情報のアベイラビリティ及びシミュレーションより鑑みた PPPの将来性について

応用環境システム学専攻 情報通信工学研究室
尾関 友啓

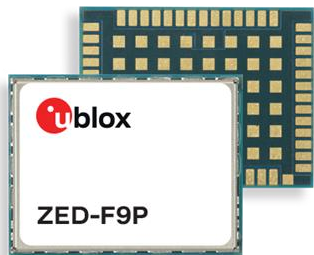
Background(GNSS Usage)



Correction data Services(JAPAN)



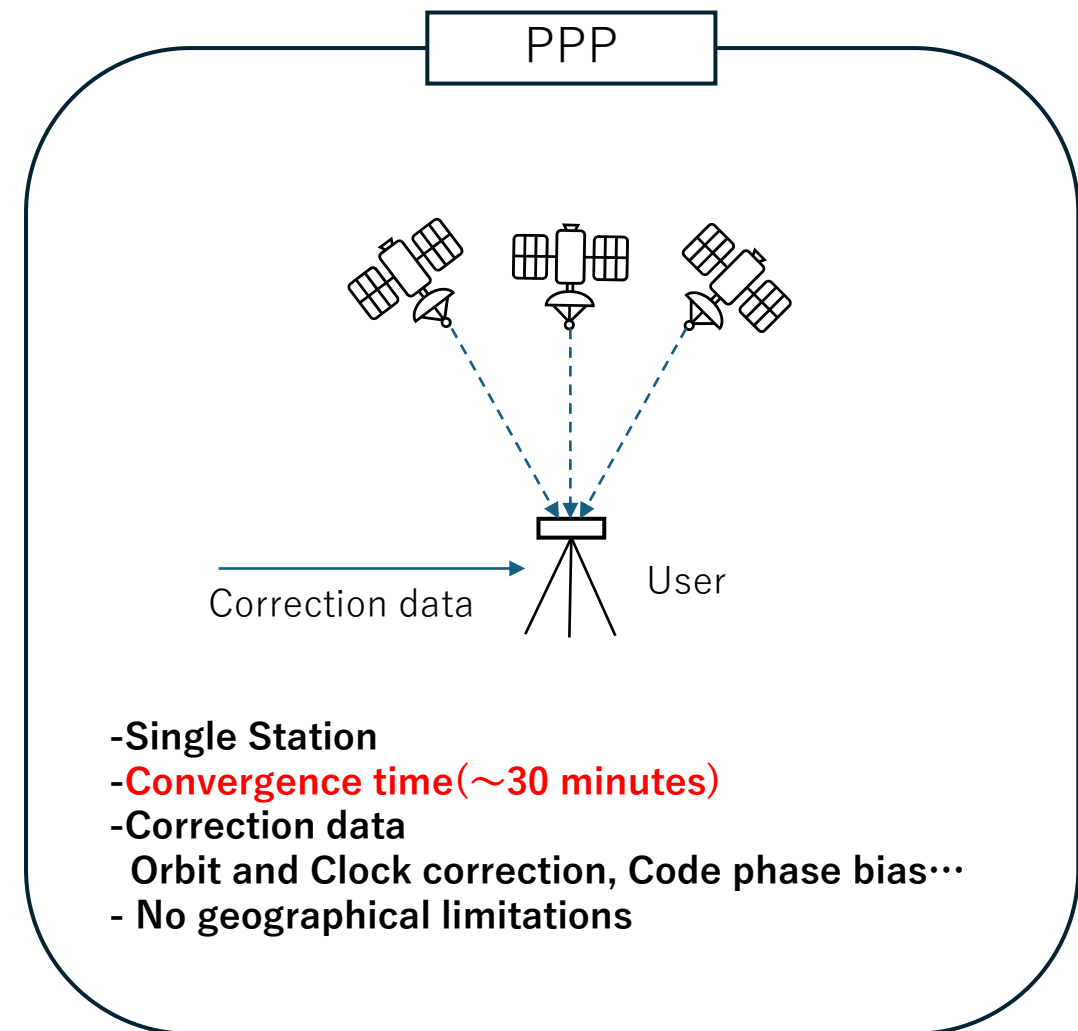
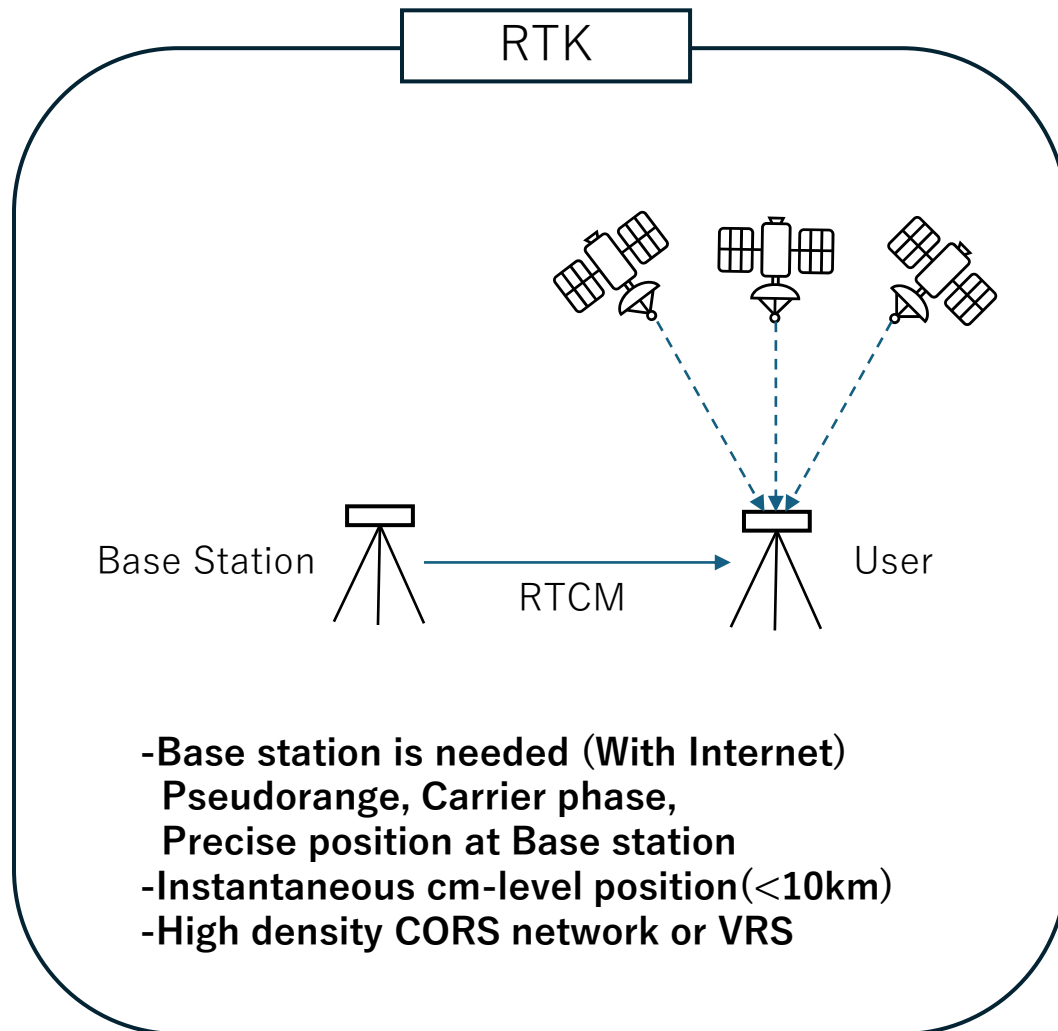
Low cost receiver



測位方式ごとの比較

Error Sources	RTK	DGNSS (SLAS)	PPP(MADOCA)	PPP-RTK
Precise orbit /clock	Double difference	Not separated	○	○
Ionosphere	Double difference		Iono-free	△
Troposphere	Double difference		Estimated	Estimated
Convergence	Instant (BL<10km)	Instant	~30 min.	1 min.
Measurement	Carrier phase	Code phase	Carrier phase	Carrier phase
Ambiguity	Fix	×	Float	Fix
Accuracy	1cm	1m	5cm	2~3cm

基準局が近傍にある場合、RTKが一番良い測位手法となる



RTKは近傍に基準局があることを前提とした測位方式、僻地、離島、海上での利用が困難
→ **PPPを利用する最大のメリット**

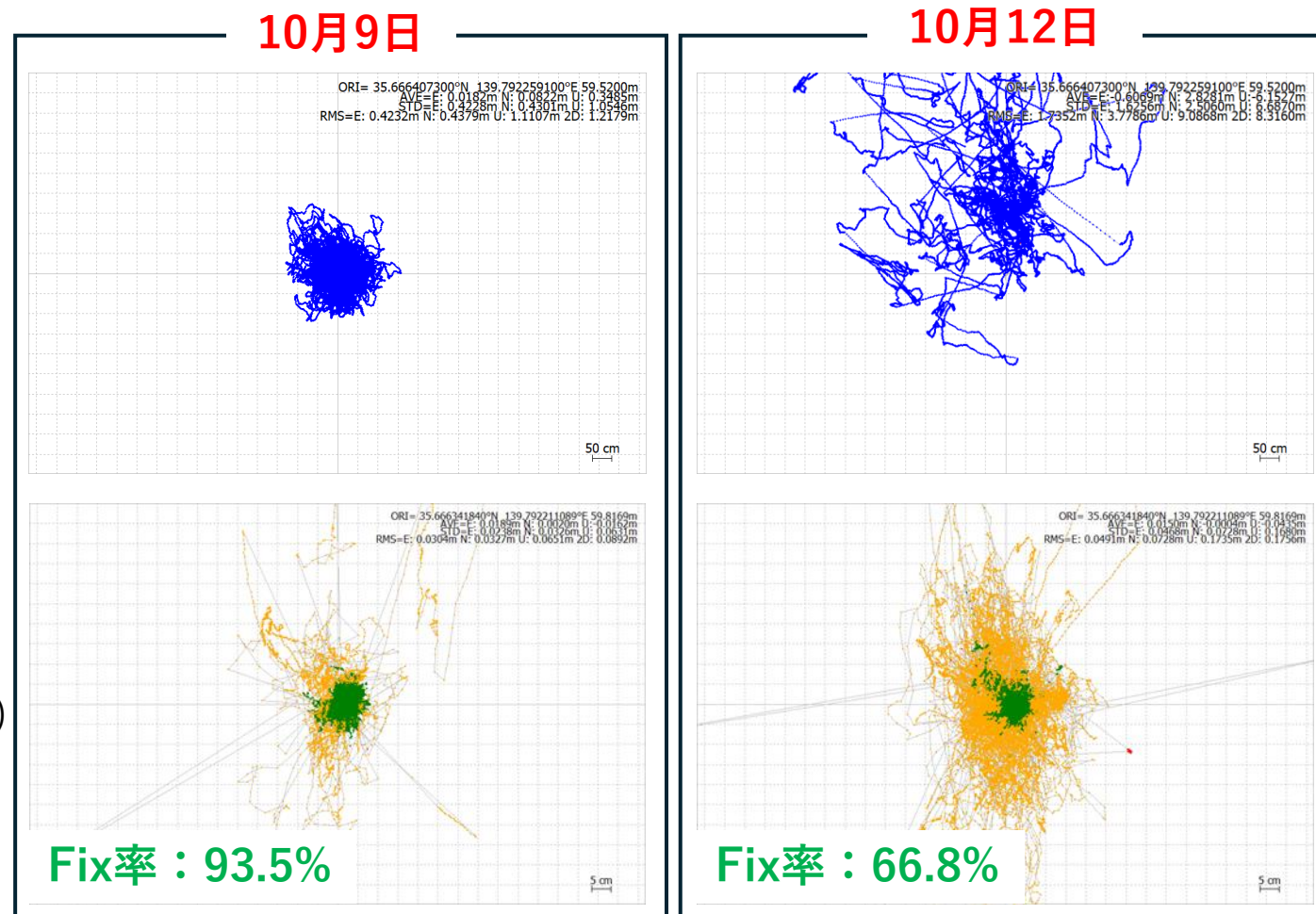
測位方式ごとの比較

Error Sources	RTK	DGNSS (SLAS)	PPP(MADOCA)	PPP-RTK
Precise orbit /clock	Double difference	Not separated	○	○
Ionosphere	Double difference		Iono-free	△
Troposphere	Double difference		Estimated	Estimated
Convergence	Instant (BL<10km)	Instant	~30 min.	1 min.
Measurement	Carrier phase	Code phase	Carrier phase	Carrier phase
Ambiguity	Fix	×	Float	Fix
Accuracy	1cm	1m	5cm	2~3cm

PPP-RTKは搬送波位相アンビギュイティを解くことでPPPの欠点(収束時間/精度)を改善した測位手法

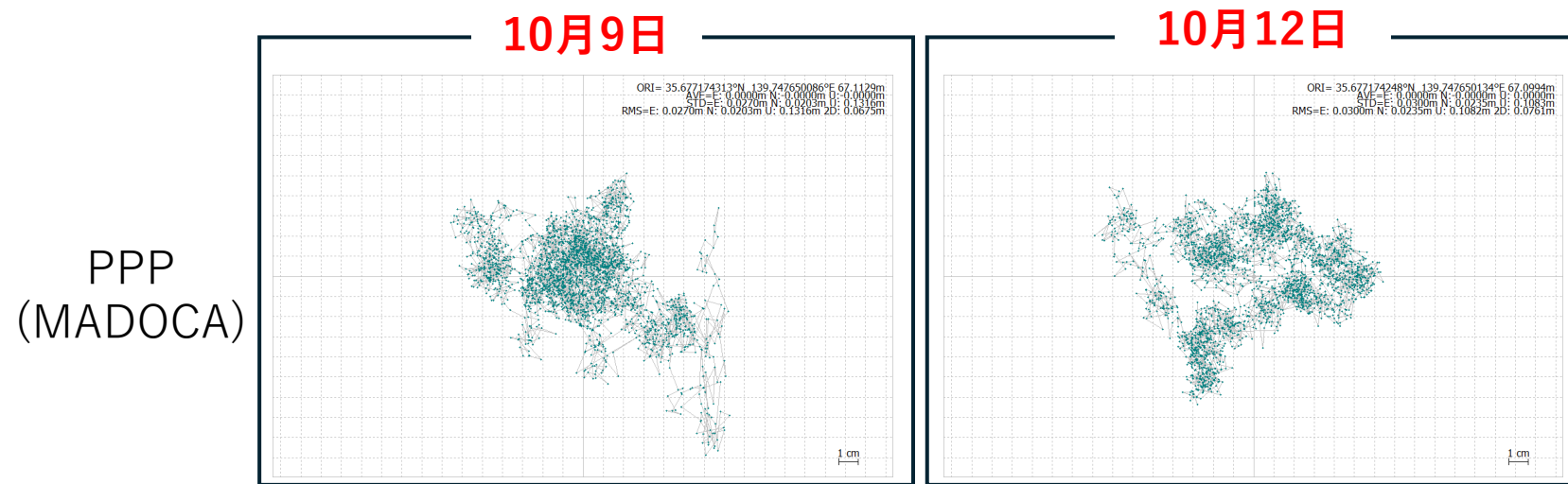
太陽フレアによる測位への影響(2024年10月9日)

日本時間10月9日（水）10時56分に太陽面中央付近に位置する黒点群13848において大規模な太陽フレア(X1.8)の発生を確認。この現象に伴い、コロナガスが地球方向へ放出されており、日本時間10月11日0時10分ごろに地球周辺に到来しました。（NICT ※）



太陽フレアにより、電離層誤差が拡大
→精度&Fix率が悪化している

太陽フレアによる測位への影響(2024年10月9日)



電離層誤差は周波数依存
→PPPは電離層結合を使用するため、
測位精度への影響は見られない

DGNSS(SLAS),PPP,PPP-RTKをまとめると、

- ・ DGNSS(SLAS),PPP,PPP-RTKは基準局を密に設置する必要はなく、 測位システムの構築時の費用が安い
- ・ 2024年10月9日に発生した太陽フレアの影響により、
DGNSS(SLAS)では測位精度の大幅な悪化, PPP-RTKではFix率の低下に繋がっている
- ・ PPPにおいては大きな影響は見られない
→複数周波数(L1/L2)を利用している&搬送波位相アンビギュイティを決定しない(Float)をとっている測位方法が
功を奏している

PPPの可能性を整理することが、本研究の目的

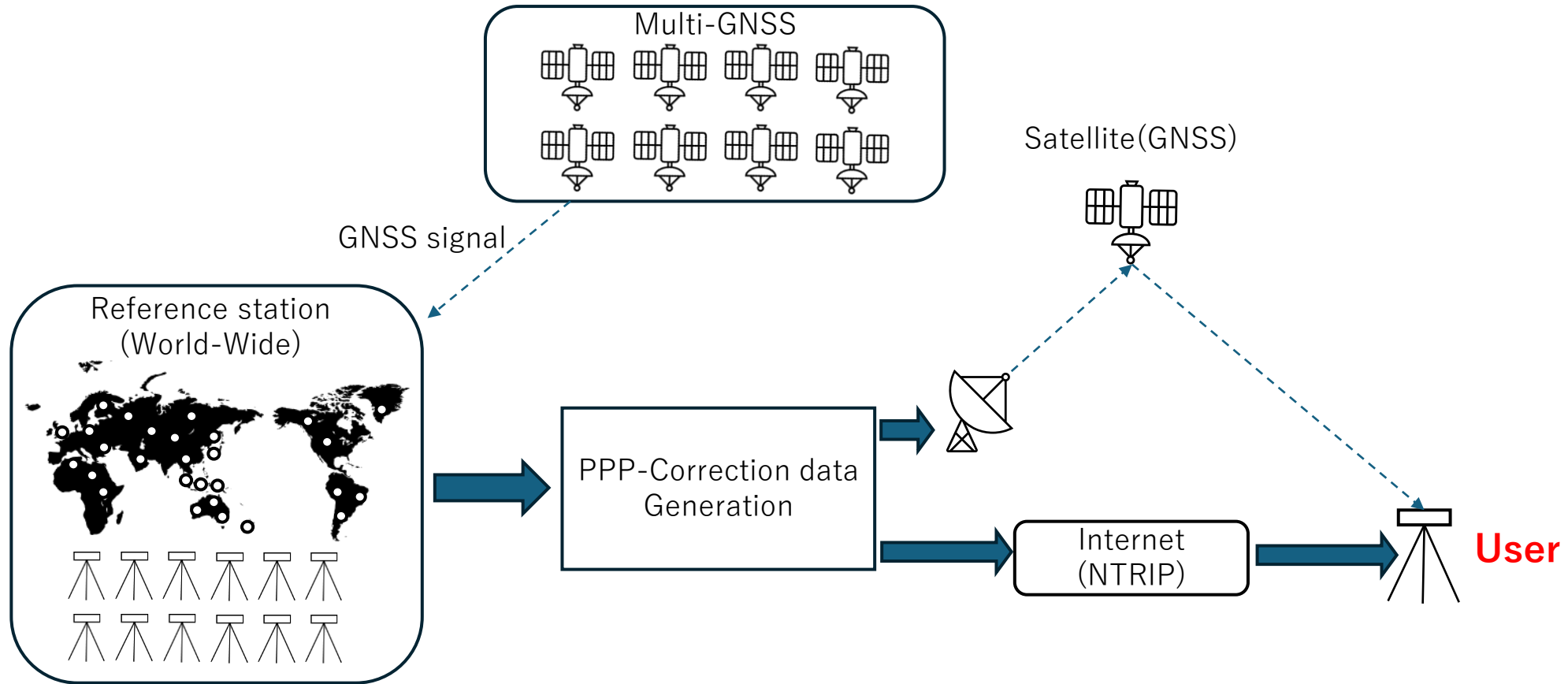
- ・ PPPにおける補正情報のアベイラビリティ調査

PPPには補正情報が必要不可欠であり、補正情報が無いと収束しない

- ・ シミュレーションを活用したPPPにおける補正情報と収束時間・精度の関係性

PPPは補正情報の精度及び補正内容で収束時間・精度の精度が変わることが考えられる

Correction data(via Satellite)

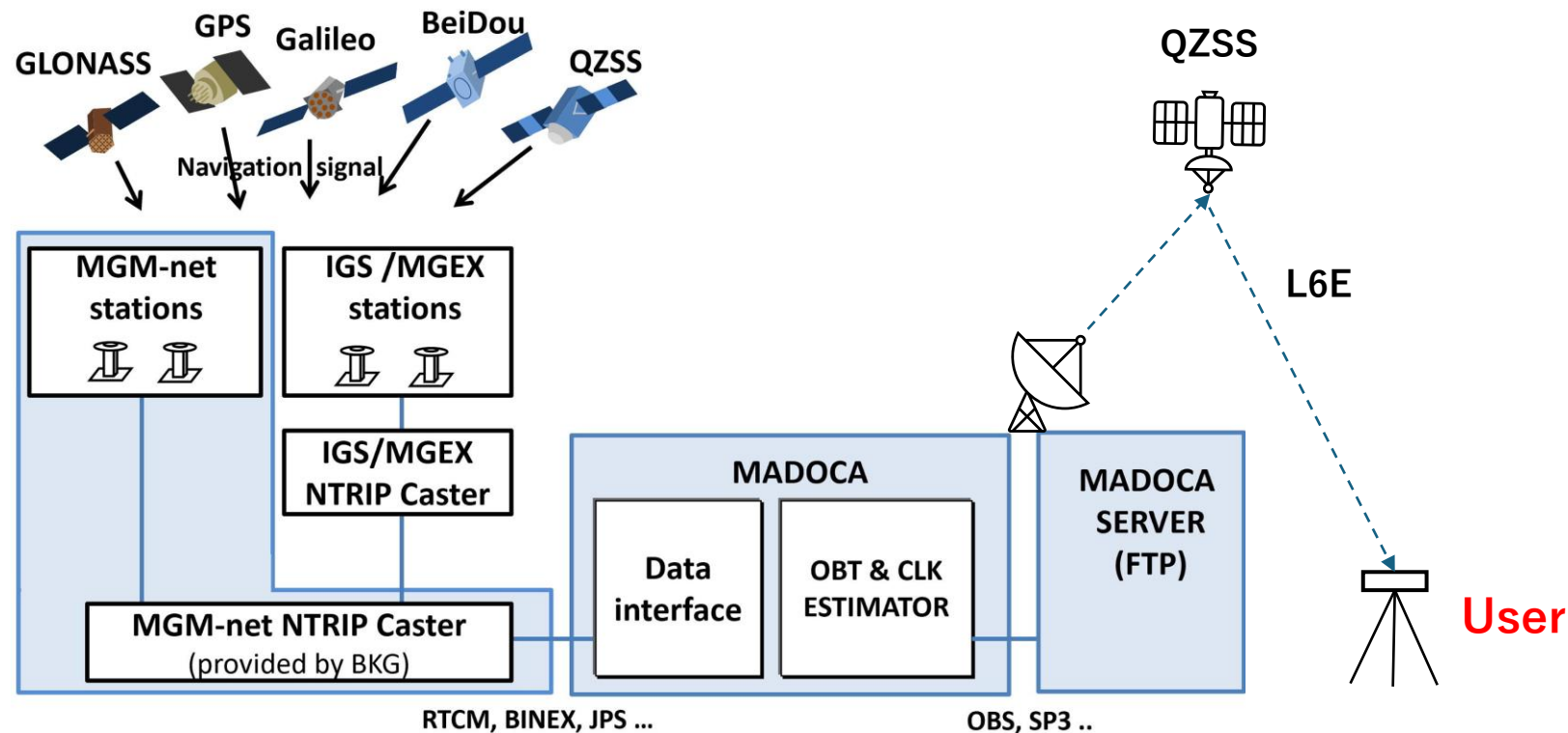


Via Internet : High bit rate, Availability of Internet = Availability of Correction data

Via Satellite : Wide area, Low bit rate and LOS(Line of Sight)

MADOCA-PPP, Galileo HAS, BDS PPP-B2b, Trimble RTX

MADOCA : Multi-GNSS Advanced Orbit and Clock Augmentation



※Kawate, K., Igarashi, Y., Yamada, H., Akiyama, K., Okeya, M., Takiguchi, H., ... & Kogure, S. (2023). MADOCA: Japanese precise orbit and clock determination tool for GNSS. *Advances in Space Research*, 71(10), 3927-3950.

- Provide **precise orbit&clock error** and code/phase bias using via QZSS (**L6E signal**).
- GPS/QZSS/Galileo/GLONASS are augmented .

L6E Navigation Message



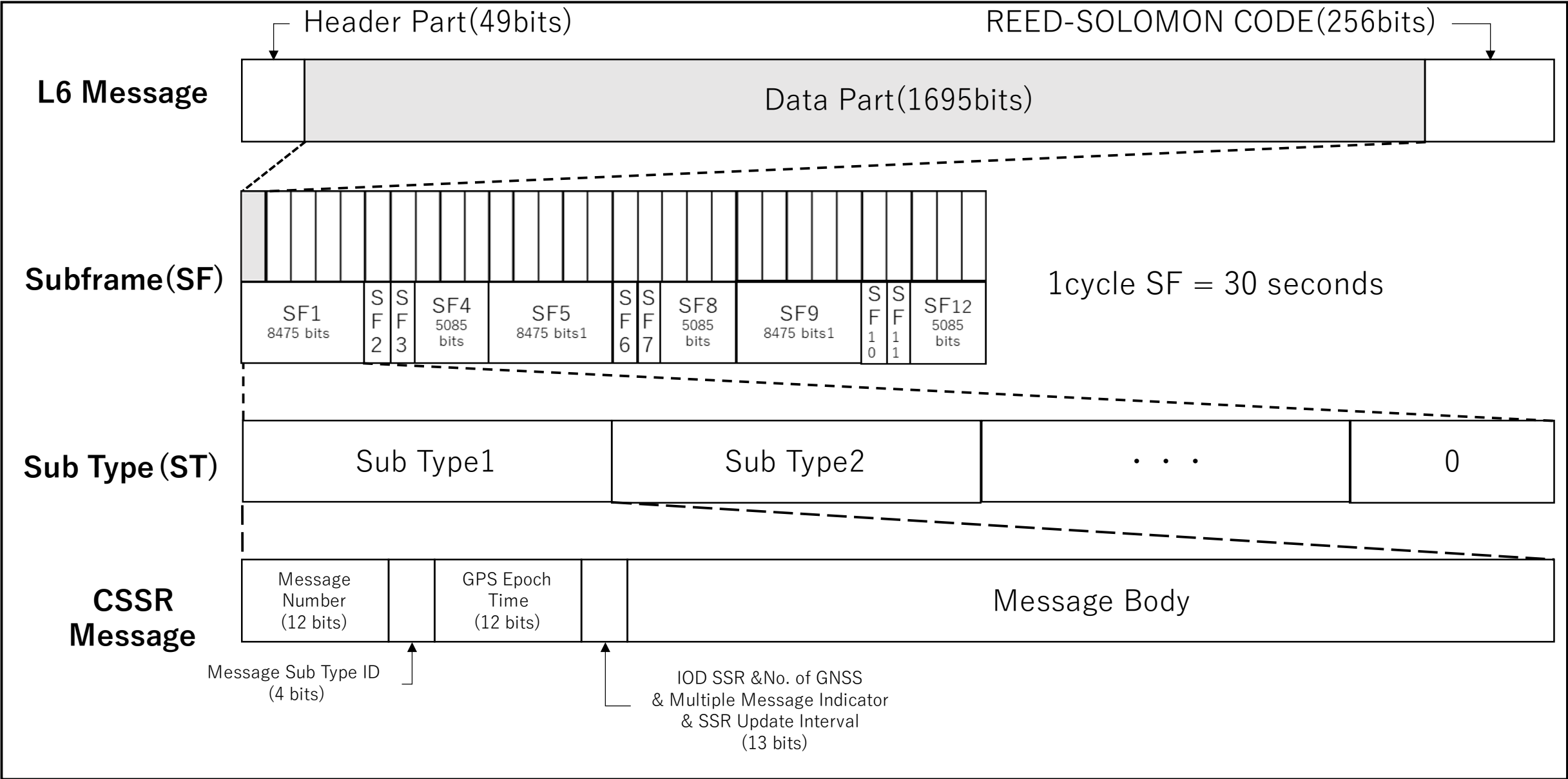
- 2000bits(2kbps)
Header Part(49bits)+Data part(1695bits)+ REED-SOLOMON CODE(256bits)=2000bits
- Using code shift keying (CSK) modulation
- Reed-Solomon error correction
- All QZSS satellites transmit L6 Message(J02,J03,J04,J07)

Message content & Interval

Subtype	Message content
Subtype 1	SSR Mask Message
Subtype 2	Orbit Correction Message
Subtype 3	Clock Correction Message
Subtype 4	Satellite Code Bias Message
Subtype 5	Satellite Phase Bias Message
Subtype 7	GNSS URA Message

Message Name	Nominal Update Interval [s]	Nominal Valid Period [s] (Before November 2023)
SSR Mask Message	30	60
Orbit Correction Message	30	60
Clock Correction Message	5	10
Satellite Code Bias Message	30	60
Satellite Phase Bias Message	30	60
GNSS URA Message	30	60

MADOCA-PPP(Compact SSR)



ST1 : SSR Mask

ST2 : Orbit Correction Message

ST3 : Clock Correction Message

ST4 : Code Bias Message

ST5 : Phase Bias Message

ST7 : URA Message

SUBFRAME1

		5 seconds				
		1 second				
0~4s	MADOCA-PPP	MADOCA-PPP	MADOCA-PPP	MADOCA-PPP	MADOCA-PPP	
5~9s	QZNMA	QZNMA	MADOCA-PPP	MADOCA-PPP	MADOCA-PPP	
10~14s	MADOCA-PPP	MADOCA-PPP	MADOCA-PPP	MADOCA-PPP	MADOCA-PPP	
15~19s	QZNMA	QZNMA	MADOCA-PPP	MADOCA-PPP	MADOCA-PPP	
20~24s	MADOCA-PPP	MADOCA-PPP	MADOCA-PPP	MADOCA-PPP	MADOCA-PPP	
25~29s	QZNMA	QZNMA	MADOCA-PPP	MADOCA-PPP	MADOCA-PPP	

Figure 4.1.1-2 Service assignment for the L6E message

SSR Mask：指定された衛星のみ補強対象(30秒に1回)

(ST1がデコードできていない場合、次のST1までの航法メッセージはデコード不可)

Orbit Correction：SSR Maskで指定された衛星のOrbit Correction Message(30秒に1回)

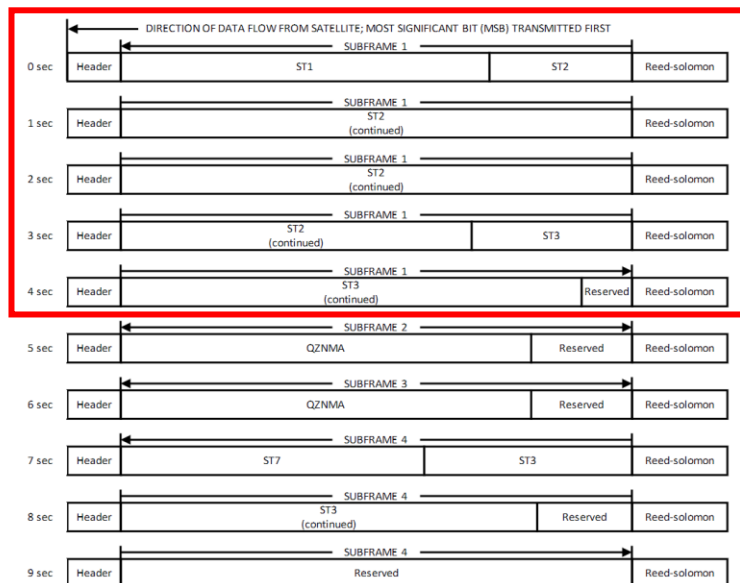


Figure 4.2.2-1 MADOCA-PPP Sub Type Transmission Pattern (Nominal)

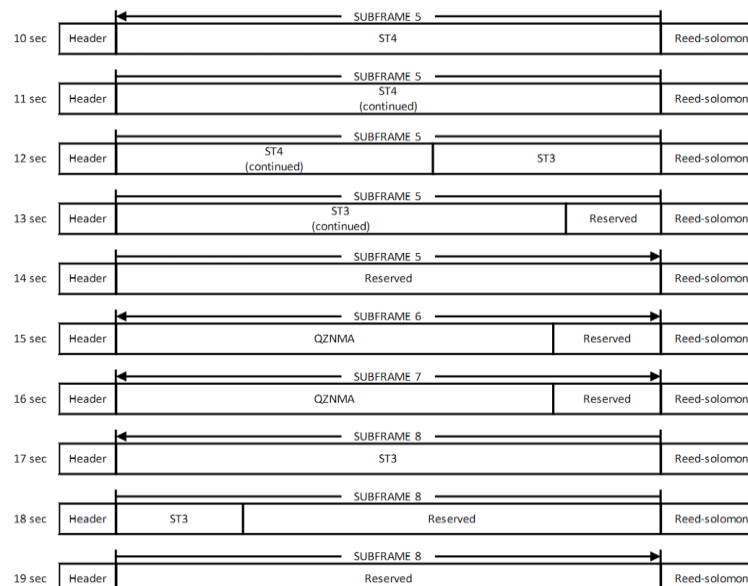


Figure 4.2.2-1 MADOCA-PPP Sub Type Transmission Pattern (Nominal) (continued)

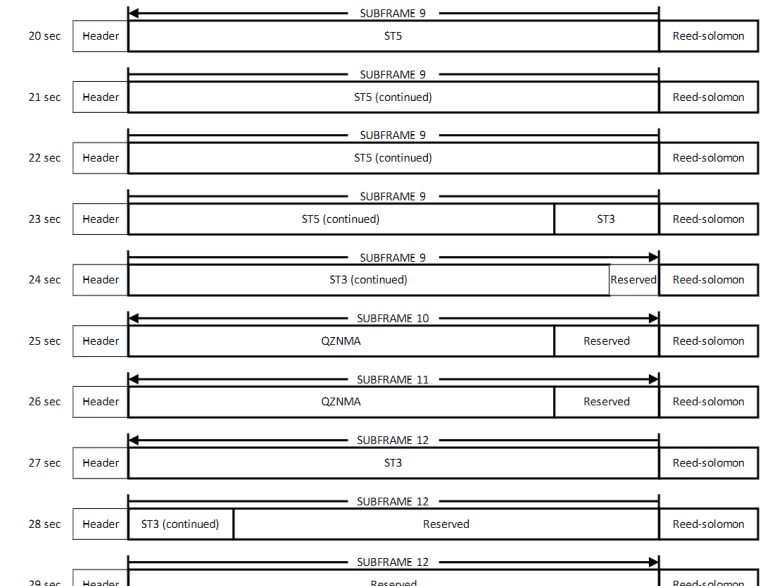


Figure 4.2.2-1 MADOCA-PPP Sub Type Transmission Pattern (Nominal) (continued)

ST1 : SSR Mask

ST2 : Orbit Correction Message

ST3 : Clock Correction Message

ST4 : Code Bias Message

ST5 : Phase Bias Message

ST7 : URA Message

SUBFRAME1

		5 seconds				
		1 second				
0~4s	MADOCa-PPP	MADOCa-PPP	MADOCa-PPP	MADOCa-PPP	MADOCa-PPP	
5~9s	QZNMA	QZNMA	MADOCa-PPP	MADOCa-PPP	MADOCa-PPP	
10~14s	MADOCa-PPP	MADOCa-PPP	MADOCa-PPP	MADOCa-PPP	MADOCa-PPP	
15~19s	QZNMA	QZNMA	MADOCa-PPP	MADOCa-PPP	MADOCa-PPP	
20~24s	MADOCa-PPP	MADOCa-PPP	MADOCa-PPP	MADOCa-PPP	MADOCa-PPP	
25~29s	QZNMA	QZNMA	MADOCa-PPP	MADOCa-PPP	MADOCa-PPP	

Figure 4.1.1-2 Service assignment for the L6E message

Clock Correction : SSR Maskで指定された衛星のClock Correction Message(5秒に1回)
SUBFRAME1,4,5,8,9,12で補強

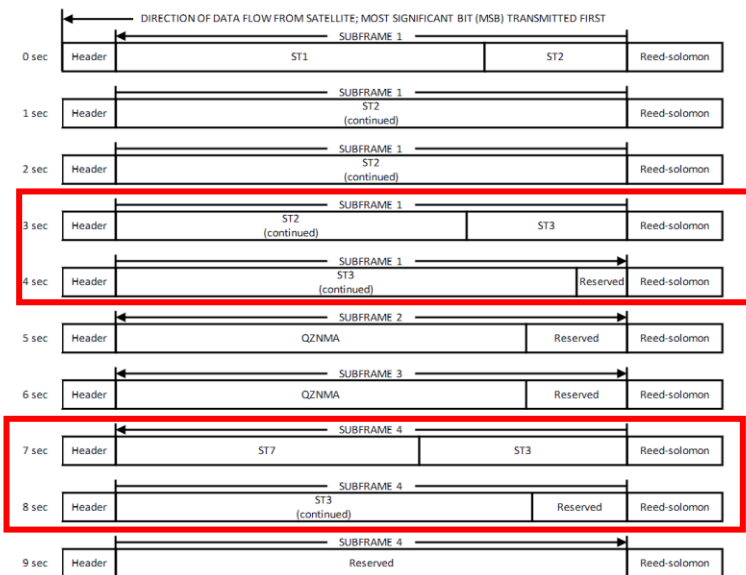


Figure 4.2.2-1 MADOCa-PPP Sub Type Transmission Pattern (Nominal)

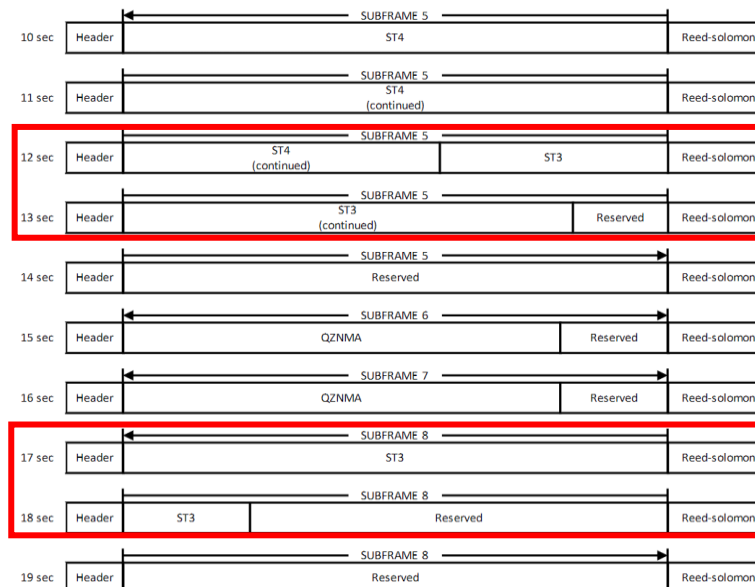


Figure 4.2.2-1 MADOCa-PPP Sub Type Transmission Pattern (Nominal) (continued)

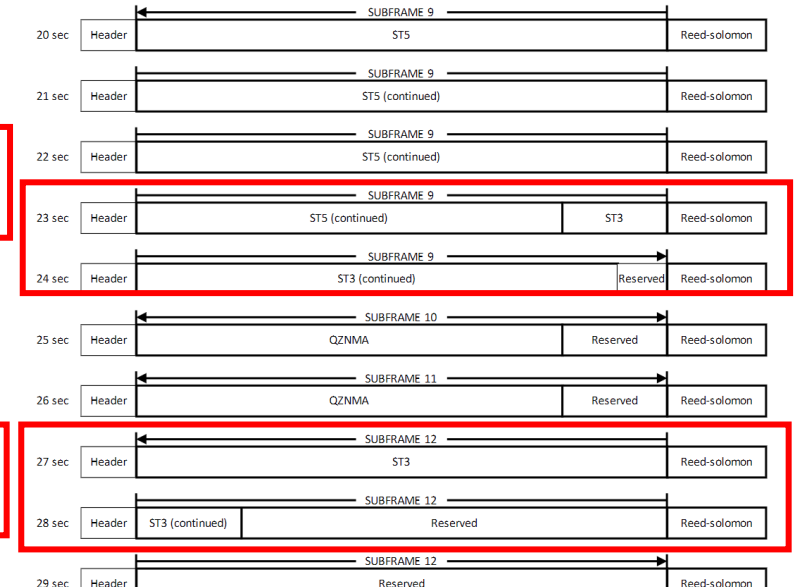


Figure 4.2.2-1 MADOCa-PPP Sub Type Transmission Pattern (Nominal) (continued)

ST1 : SSR Mask
 ST2 : Orbit Correction Message
 ST3 : Clock Correction Message
 ST4 : Code Bias Message
 ST5 : Phase Bias Message
 ST7 : URA Message

30秒中21秒はデコードしないといけない (MADOCA-PPPの場合)
 ただし1~2秒で再追尾する状況は考えにくいいため、連続的なデコードが必要

MADOCA-PPPはSSR Mask(SUBFRAME1)を初めてデコードしてから測位開始できる
 仮に1secからデコードできた場合、28秒+5秒=33秒後に測位が開始される

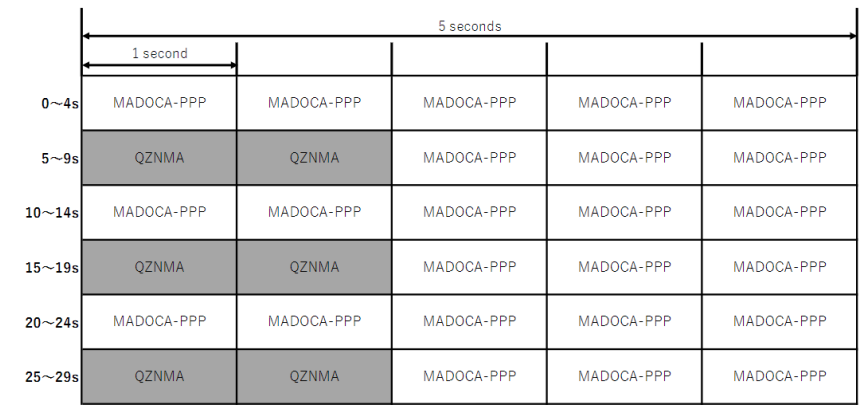


Figure 4.1.1-2 Service assignment for the L6E message

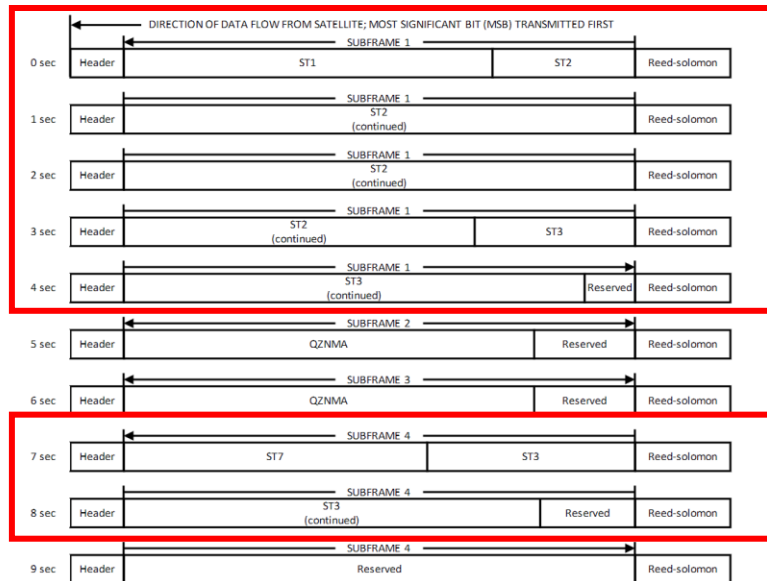


Figure 4.2.2-1 MADOCA-PPP Sub Type Transmission Pattern (Nominal)

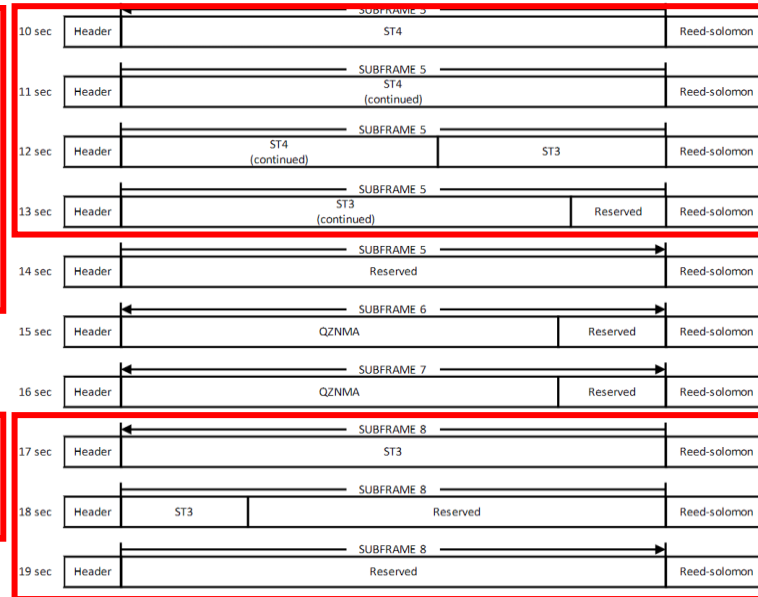


Figure 4.2.2-1 MADOCA-PPP Sub Type Transmission Pattern (Nominal) (continued)

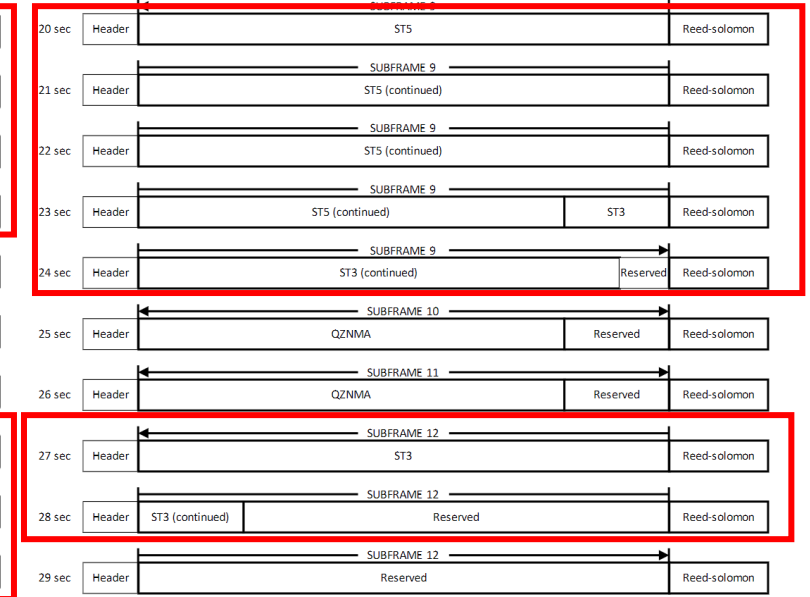
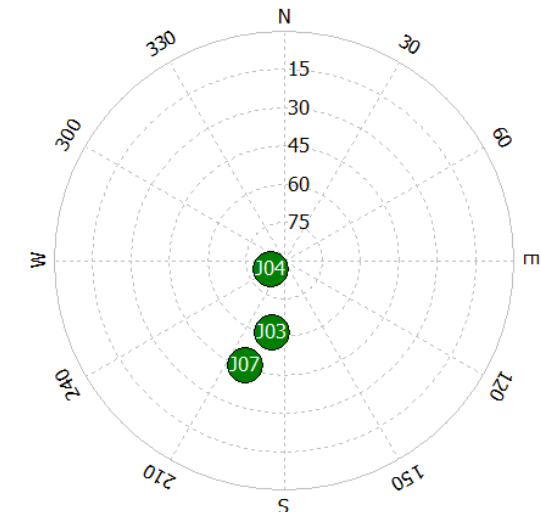
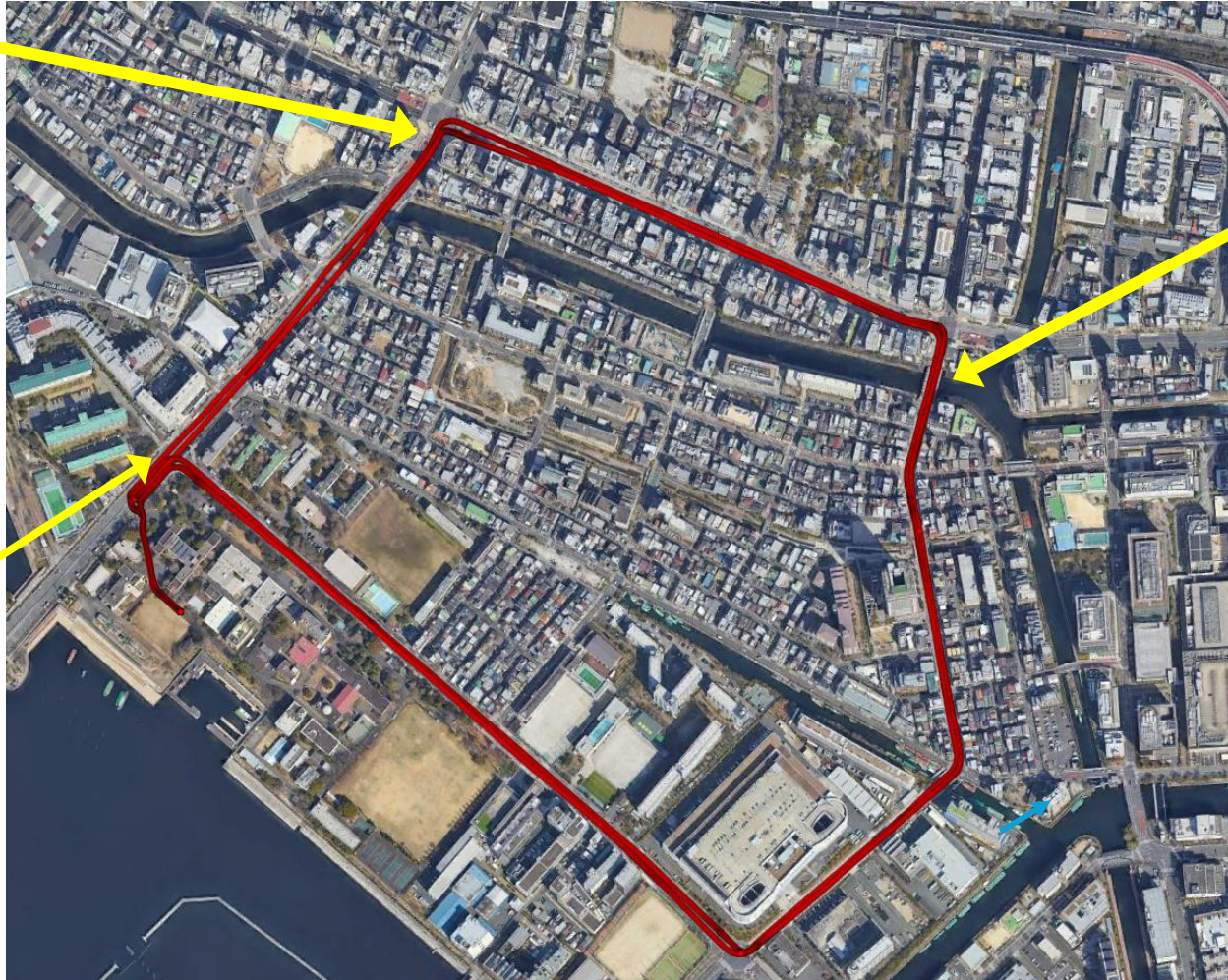


Figure 4.2.2-1 MADOCA-PPP Sub Type Transmission Pattern (Nominal) (continued)

Test environment

車に屋根にGPS-703-GGGを設置し、**Pocket-SDR**を用いてIFデータを取得(2023年10月10日174840～ 175960)



住宅街の中を2周走行(時計回り/反時計回り)

- The RF front-end device have 2-CH Maxim MAX2771 GNSS RF front-end.

CH1 : GNSS L1 band (1525–1610 MHz)

CH2 : GNSS L2/L5/L6 band (1160–1290 MHz)

TCXO : 24.000 MHz

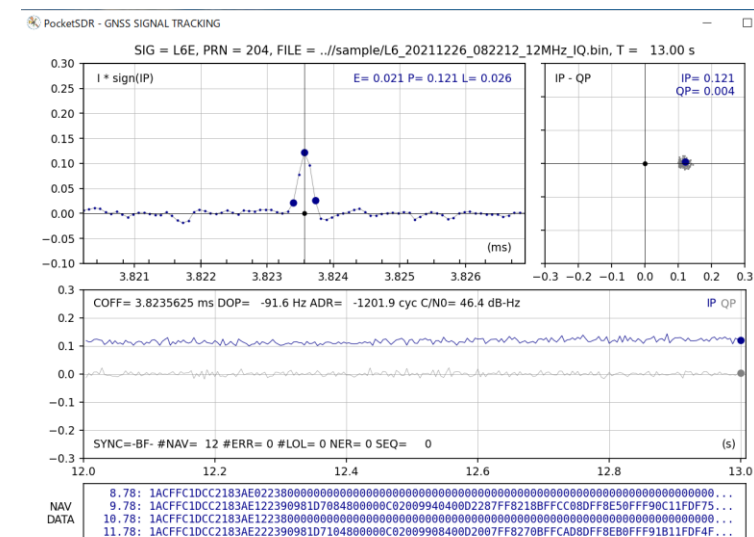
Sampling frequency : < 24 MHz(今回は12MHz)

※<https://github.com/tomojitakasu/PocketSDR>

-Software attached with Pocket-SDR is written in Python 3,
Analysis IF Data, Acquisition, Tracking, Navigation Data Decoding.

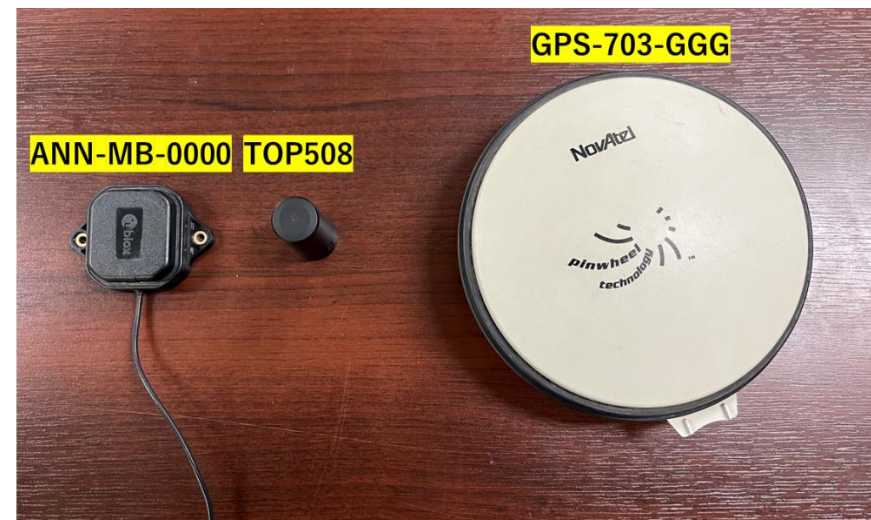


GPS	L1C/A,L1C,L2C,L5
QZSS	L1C/A,L1C/B,L1S,L1C,L2C, L5,L5S,L6D,L6E
GALIELO	E1B/C, E5a, E5b, E6B,E6C
BDS	B1I, B1C, B2I, B2a, B2b, B3I
GLONASS	L1C/A, L2C/A, L30C
NavIC	L5-SPS
SBAS	L1C/A, L5



- ・ 比較対象は低コストアンテナとして、ANN-MB-0000とTOP508
リファレンスとして測量級アンテナのGPS-703-GGG
- ・ 低コストアンテナは10000円程度で購入可能(測量級の10分の1以下)
- ・ 文部科学省の令和3年度の宇宙航空科学技術推進委託費にて採択された「新しいフェーズに入った衛星測位技術を加速させる人材育成」におけるアンテナ測定セミナーにおいて、アンテナパターン及び軸比を電子航法研究所の協力のもとに測定
- ・ マルチパス環境下での測位性能も評価

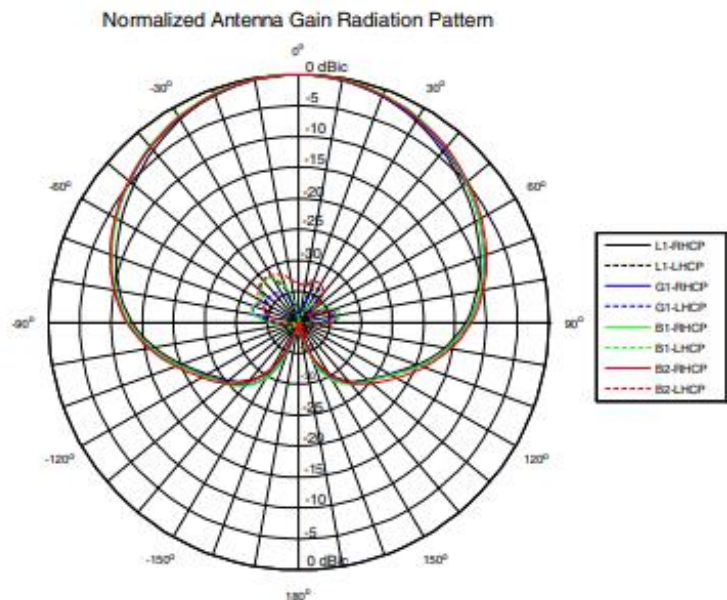
GNSS アンテナ	Frequency	Size (mm)	Weight (g)	LNA (dB)
TOP508	L1/L2/B1/B2/E1/E5b/G1/G2	27.5 diameter × 58.0	180	35
ANN-MB-0000	L1/L2/B1/B2/E1/E5b/G1/G2	82.0 × 60.0 × 22.5	173	28
GPS-703-GGG	L1/L2/L5/B1/B2/E1/E5/E5a/E5b/G1/G2/G3	185 diameter × 69	530	29



アンテナパターン：仰角ごとの利得を極座標系で示した図

軸比：左旋円偏波(LHCP)を取り除き、右旋円偏波(RHCP)のみ受信できる指標

- ・ 測量級アンテナはアンテナパターンや軸比に関する情報は公開されているが、低コストアンテナは×
- ・ アンテナパターン及び軸比はアンテナの性能(特にマルチパス耐性)を知るうえで重要な指標
→教育目的のセミナーに合致



Novatel 703-GGG

右左旋円偏波



右旋円偏波



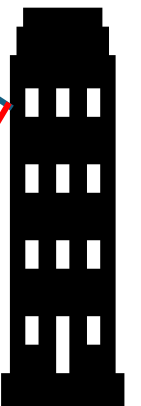
左旋円偏波



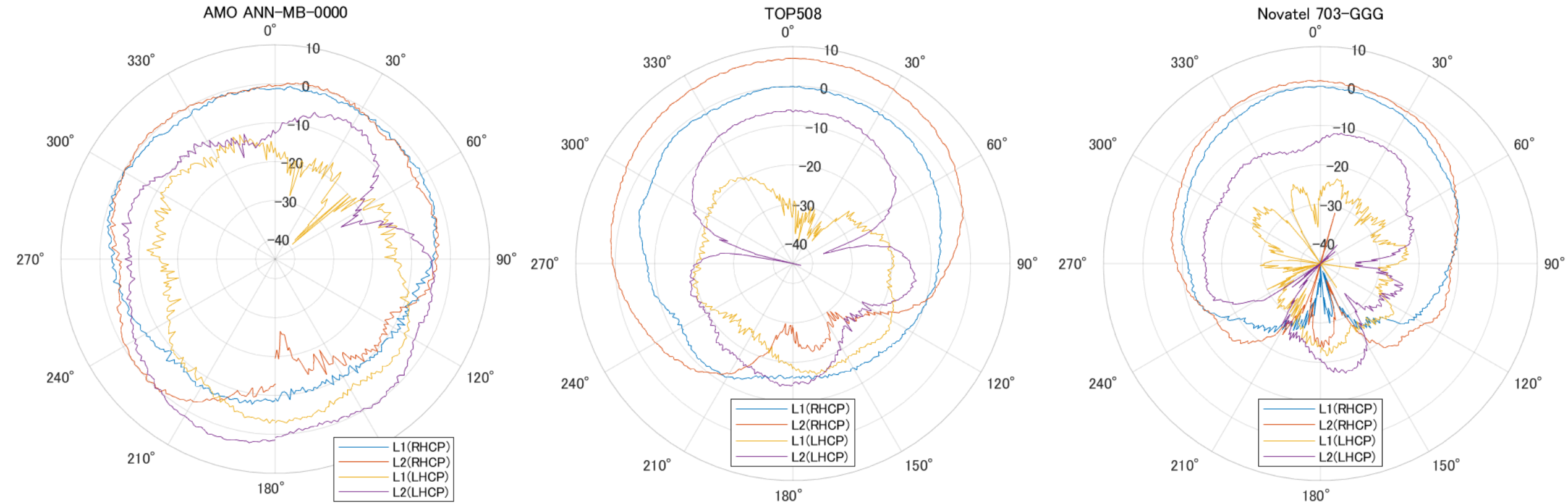
RHCP

RHCP

LHCP



- 交差偏波(右旋円偏波)のアンテナパターン
(L1信号の主偏波における最大値を0dBとして、キャリブレーション)



Novatel 703-GGG(測量級)：交差偏波の利得が抑えられている

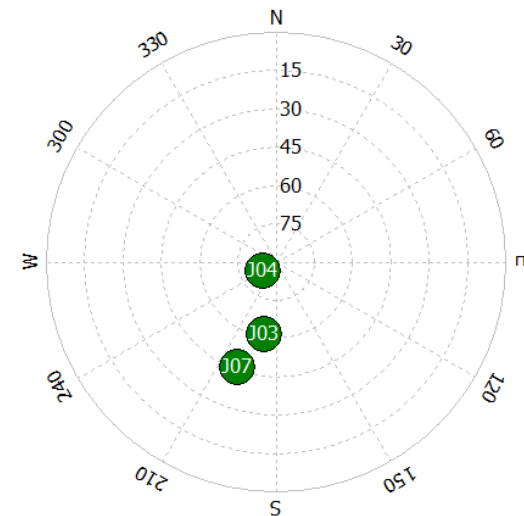
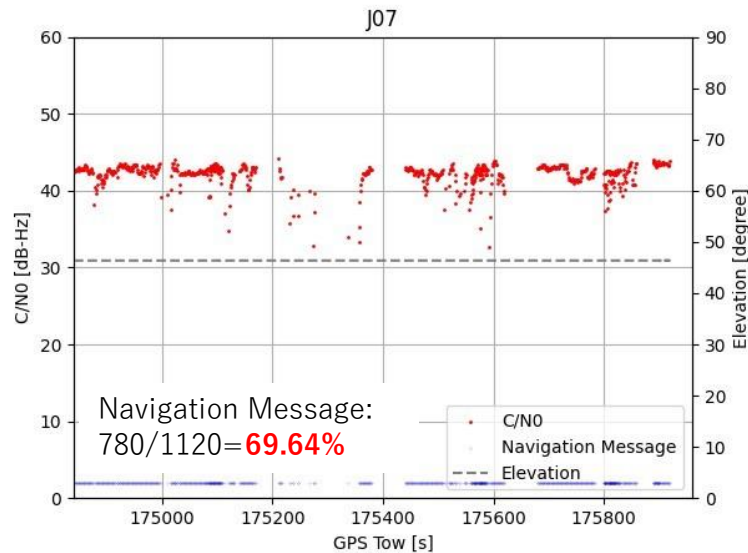
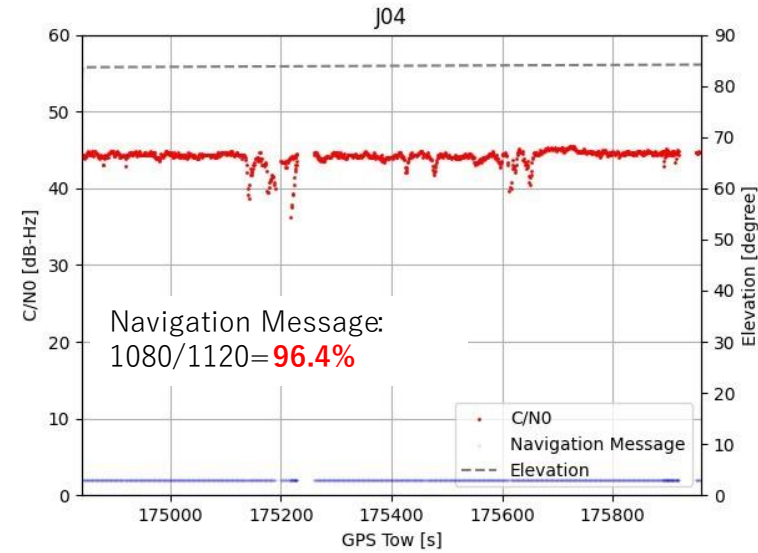
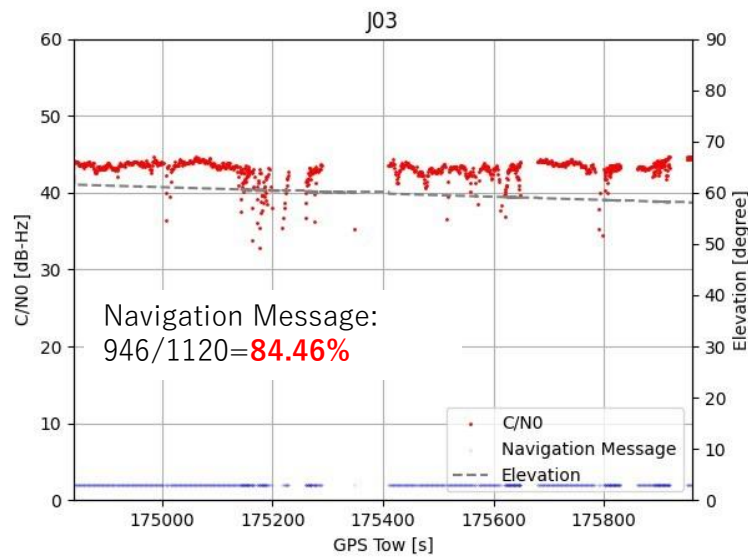
TOP508(ヘリカルアンテナ)：交差偏波の利得が抑えられている

ANN-MB-0000(パッチアンテナ)：交差偏波の利得が抑えられていない、水平線下では利得が高い

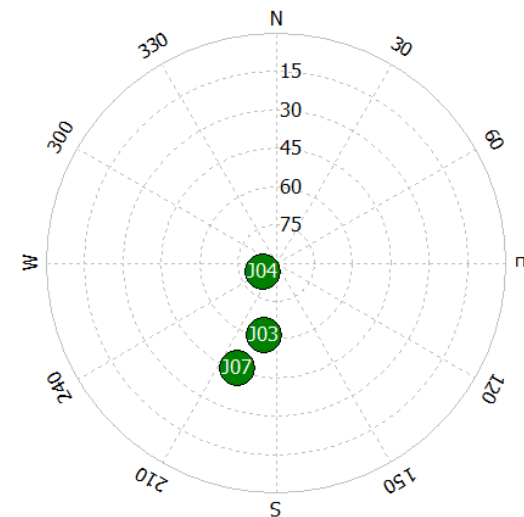
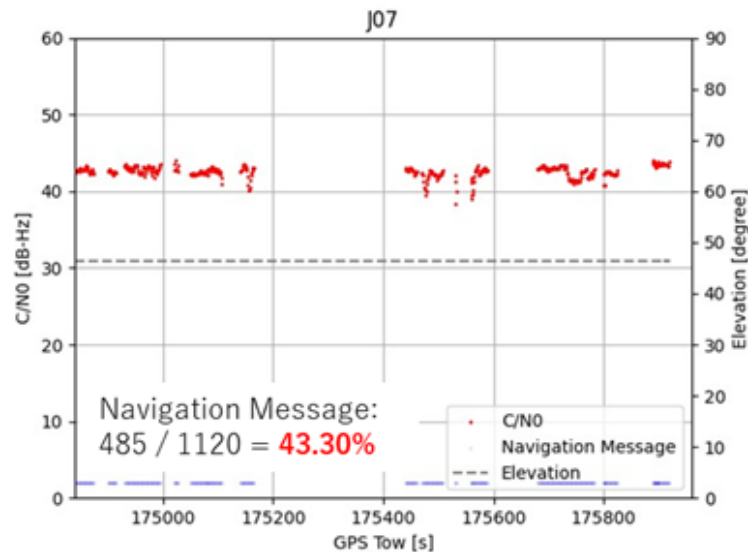
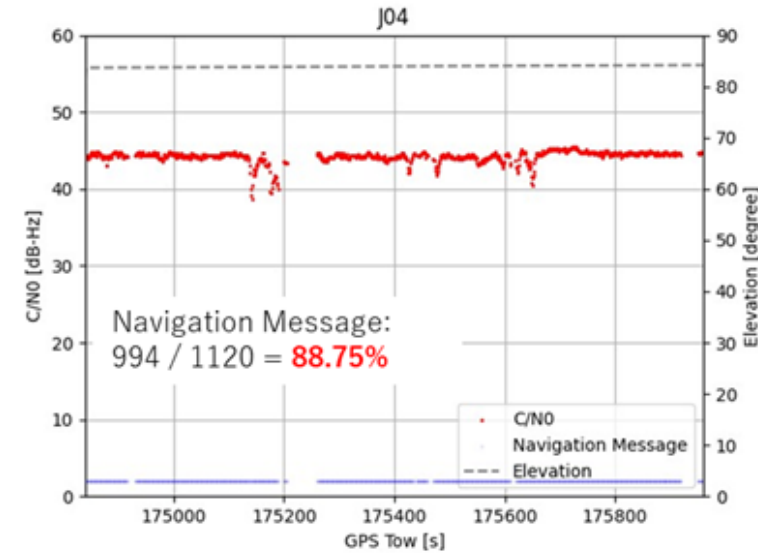
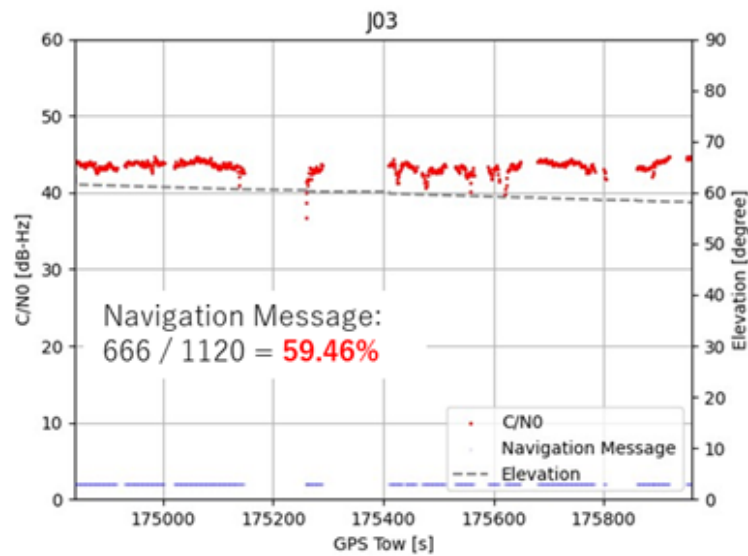
- ・ 軸比の測定結果は以下の通り
ANN-MB-0000に関しては、測位結果がおかしいため記載せず
(軸比は最大2.0dBと公開)
- ・ TOP508は軸比が良いため、1回反射したマルチパス信号を抑制しやすいことが分かる

703-GGG	長軸ゲイン	短軸ゲイン	軸比[dB]	TOP508	長軸ゲイン	短軸ゲイン	軸比[dB]
L1	-24.36	-26.35	1.99	L1	-24.28	-25.64	1.36
L2	-22.72	-25.2	2.48	L2	-18.10	-19.43	1.33
L5	-24.1	-25.74	1.64	L5	-32.17	-33.45	1.28

Result of C/N0 and decode rate



Result of C/N0 and decode rate



Result of availability

J03	Broadcasted message	Decoded message	Availability[%]
SSR Mask	38	29	76.32
Orbit Correction	38	28	73.68
Clock Correction	224	130	58.04
Code Bias	37	24	64.86
Phase Bias	37	18	48.65
URA	38	25	65.79

J04	Broadcasted message	Decoded message	Availability[%]
SSR Mask	38	36	94.74
Orbit Correction	38	36	94.74
Clock Correction	224	199	88.84
Code Bias	37	34	91.89
Phase Bias	37	30	81.08
URA	38	35	92.11

J07	Broadcasted message	Decoded message	Availability[%]
SSR Mask	38	25	65.79
Orbit Correction	38	21	55.26
Clock Correction	224	93	41.52
Code Bias	37	16	43.24
Phase Bias	37	13	35.14
URA	38	19	50.00

J03	Broadcasted message	Decoded message	Availability[%]
SSR Mask	38	29	76.32
Orbit Correction+VALID	38	33	86.84
Clock Correction+VALID	224	141	62.95
Code Bias+VALID	37	29	78.38
Phase Bias+VALID	37	27	72.97
URA+VALID	38	31	81.58

J04	Broadcasted message	Decoded message	Availability[%]
SSR Mask	38	36	94.74
Orbit Correction+VALID	38	38	100.00
Clock Correction+VALID	224	208	92.86
Code Bias+VALID	37	35	94.59
Phase Bias+VALID	37	34	91.89
URA+VALID	38	37	97.37

J07	Broadcasted message	Decoded message	Availability[%]
SSR Mask	38	25	65.79
Orbit Correction+VALID	38	26	68.42
Clock Correction+VALID	224	104	46.43
Code Bias+VALID	37	22	59.46
Phase Bias+VALID	37	21	56.76
URA+VALID	38	26	68.42

Broadcasted Message : The number of correction messages broadcasted from the satellite during an experiment.

Decoded message : The number of correction messages that can be decoded using a Pocket SDR.

Result of availability

J03	Broadcasted message	Decoded message	Availability[%]
SSR Mask	38	29	76.32
Orbit Correction	38	28	73.68
Clock Correction	224	130	58.04
Code Bias	37	24	64.86
Phase Bias	37	18	48.65
URA	38	25	65.79

J04	Broadcasted message	Decoded message	Availability[%]
SSR Mask	38	36	94.74
Orbit Correction	38	36	94.74
Clock Correction	224	199	88.84
Code Bias	37	34	91.89
Phase Bias	37	30	81.08
URA	38	35	92.11

J07	Broadcasted message	Decoded message	Availability[%]
SSR Mask	38	25	65.79
Orbit Correction	38	21	55.26
Clock Correction	224	93	41.52
Code Bias	37	16	43.24
Phase Bias	37	13	35.14
URA	38	19	50.00

J03	Broadcasted message	Decoded message	Availability[%]
SSR Mask	38	29	76.32
Orbit Correction+VALID	38	33	86.84
Clock Correction+VALID	224	141	62.95
Code Bias+VALID	37	29	78.38
Phase Bias+VALID	37	27	72.97
URA+VALID	38	31	81.58

J04	Broadcasted message	Decoded message	Availability[%]
SSR Mask	38	36	94.74
Orbit Correction+VALID	38	38	100.00
Clock Correction+VALID	224	208	92.86
Code Bias+VALID	37	35	94.59
Phase Bias+VALID	37	34	91.89
URA+VALID	38	37	97.37

J07	Broadcasted message	Decoded message	Availability[%]
SSR Mask	38	25	65.79
Orbit Correction+VALID	38	26	68.42
Clock Correction+VALID	224	104	46.43
Code Bias+VALID	37	22	59.46
Phase Bias+VALID	37	21	56.76
URA+VALID	38	26	68.42

Broadcasted Message : The number of correction messages broadcasted from the satellite during an experiment.

Decoded message : The number of correction messages that can be decoded using a Pocket SDR.

Availability = Decoded message / Broadcasted Message

Result of availability

J03	Broadcasted message	Decoded message	Availability[%]
SSR Mask	38	29	76.32
Orbit Correction	38	28	73.68
Clock Correction	224	130	58.04
Code Bias	37	24	64.86
Phase Bias	37	18	48.65
URA	38	25	65.79

J04	Broadcasted message	Decoded message	Availability[%]
SSR Mask	38	36	94.74
Orbit Correction	38	36	94.74
Clock Correction	224	199	88.84
Code Bias	37	34	91.89
Phase Bias	37	30	81.08
URA	38	35	92.11

J07	Broadcasted message	Decoded message	Availability[%]
SSR Mask	38	25	65.79
Orbit Correction	38	21	55.26
Clock Correction	224	93	41.52
Code Bias	37	16	43.24
Phase Bias	37	13	35.14
URA	38	19	50.00

J03	Broadcasted message	Decoded message	Availability[%]
SSR Mask	38	29	76.32
Orbit Correction+VALID	38	33	86.84
Clock Correction+VALID	224	141	62.95
Code Bias+VALID	37	29	78.38
Phase Bias+VALID	37	27	72.97
URA+VALID	38	31	81.58

J04	Broadcasted message	Decoded message	Availability[%]
SSR Mask	38	36	94.74
Orbit Correction+VALID	38	38	100.00
Clock Correction+VALID	224	208	92.86
Code Bias+VALID	37	35	94.59
Phase Bias+VALID	37	34	91.89
URA+VALID	38	37	97.37

J07	Broadcasted message	Decoded message	Availability[%]
SSR Mask	38	25	65.79
Orbit Correction+VALID	38	26	68.42
Clock Correction+VALID	224	104	46.43
Code Bias+VALID	37	22	59.46
Phase Bias+VALID	37	21	56.76
URA+VALID	38	26	68.42

Broadcasted Message : The number of correction messages broadcasted from the satellite during an experiment.
Decoded message : The number of correction messages that can be decoded using a Pocket SDR.
+VALID : The number of messages decoded + considering the valid period defined for each message.

- CSSRはST1のSSR Maskのデコードが必須(30秒に1回)
ST1がデコードできない場合は次のST1までのデータを捨てることになる
- Pocket-SDRを用いて、都市部移動体におけるL6航法メッセージを評価
天頂方向の衛星が補正情報配信におけるアベイラビリティの向上に一番寄与している
→IGSOの特徴が十分に表れている
仰角が低い衛星(特にGEO)は都市部移動体ではかなり厳しいデコード率となる
今回の走行ルートには南側に建物が多かったのも要因の1つ
GEO(J07)が向くのはオープンスカイ環境、マルチパス環境下のStatic測位に向いている
- 補強メッセージごとのアベイラビリティでは、更新頻度が高いクロックのアベイラビリティが最も低い

- ・ PPPにおける補正情報のアベイラビリティ調査

PPPには補正情報が必要不可欠であり、補正情報が無いと収束しない

- ・ シミュレーションを活用したPPPにおける補正情報と収束時間・精度の関係性

PPPは補正情報の精度及び補正内容で収束時間・精度の精度が変わることが考えられる

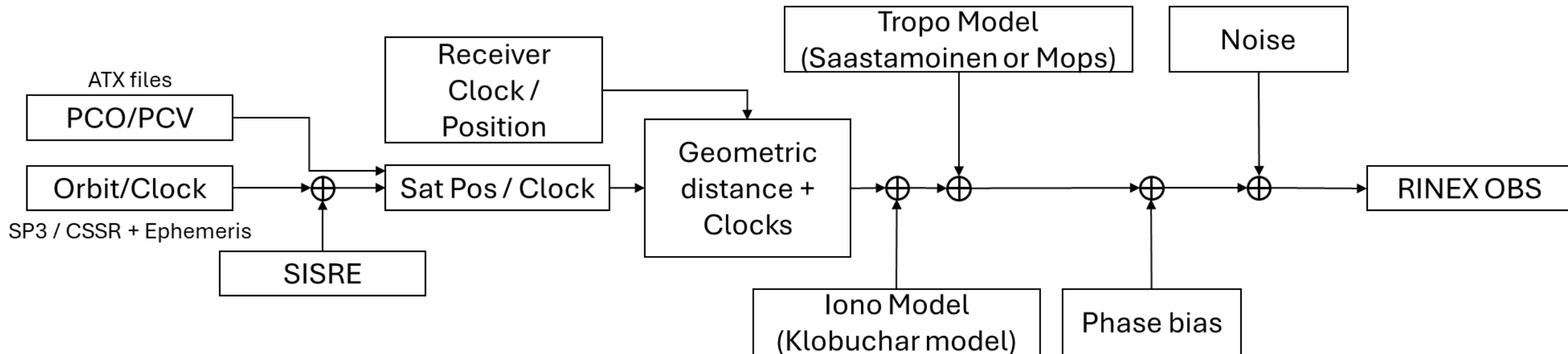
- 以下に示す 8 の誤差がPPPにおいて補正及び推定しなければならない
- MADOCAのように軌道誤差や衛星時計誤差を補正しているサービスもあるが、彼らのICDは推定方法の全てを記載しているわけではないので、性能向上の研究が難しい
- 現在MADOCAはL1/L2のGPS,QZSS,GALILEO,GLONASSを補強しているが、BDSを追加した場合、3周波(L5)を追加した場合の性能向上はどうか？(LEOも)

Error sources in PPP

- Ephemeris error (Satellite Position/Clock)
- Code Bias,TGD(P1-C1,P2-C2 bias)
Use DCB file or code bias from SSR, but need to check definition of code bias.
- Phase Wind up effect
Modeled, but need to check satellite yaw model (Need to much correction data generation side and User)
- Satellite PCO/PCV
ANTEX file (Latest atx?)
- Ionosphere delay
Impact of 2nd order of Ionosphere delay?
- Troposphere delay
- FCB (PPP-AR)
- Site Displacement & Earth Tides
- DOP

上記を踏まえたうえで、PPPの測位性能(収束時間,測位誤差)の限界を
シミュレーションで求める

PPPシミュレーター(構成図)



衛星位置/時計誤差：エフェメリス/SP3/TLEから生成

SISRE：事前に設定した正規分布誤差(詳細は次ページ)

受信機位置及び時計誤差：事前に設定

対流圏遅延量：Saastamoinen modelに事前に設定した正規分布誤差を加える

電離層遅延量：Klobuchar modelより設定

Phase bias(Ambiguity)：ランダムで設定した値を入力

観測雑音(Noise)：RTKLIBの式を参考に搬送波位相を3mm,擬似距離30cmを基本とする $\text{SQR}(100) * (\text{SQR}(0.001) + \text{SQR}(0.001) / \sin(\text{el}))$

SISRE : Signal-in-Space Ranging Error

衛星位置誤差の視線成分と衛星位置誤差を意味しており、SISREとDOP(衛星数)がPPPの収束時間/精度を左右する

以下の式はSISREの計算方法

$$SISRE = \sqrt{(\alpha R - Clk)^2 + (A^2 + C^2)/\beta} \quad R : \text{Radial}, A : \text{Along}, C : \text{Cross}, Clk : \text{Clock}$$

	GPS	GLONASS	GALILEO	BDS(MEO)	QZSS/BDS(GEO/IGSO)
α	0.98	0.98	0.98	0.98	0.99
β	49	45	61	54	127

エフェメリスが1m程度、最終歴で5cm以下,リアルタイム歴(MADOCA)で10cm程度とされている

シミュレーションにおいてはSISRE=5cmは平均0,標準偏差5cmの正規分布とみなす

SISREのシナリオは5cm10cm15cm,20cm

Date : 2023/12/24 00:30:00～

Interval : 30sec

2時間ごとに初期化し、計12回の測位結果の平均を評価

Convergence time : Horizontal Diff < 10 cm & 5分間以上10cm以内を切り続けていた場合

Position : 35.666,139.7922 (TUMSAT)

Satellite : GPS/GALILEO/GLONASS/BDS

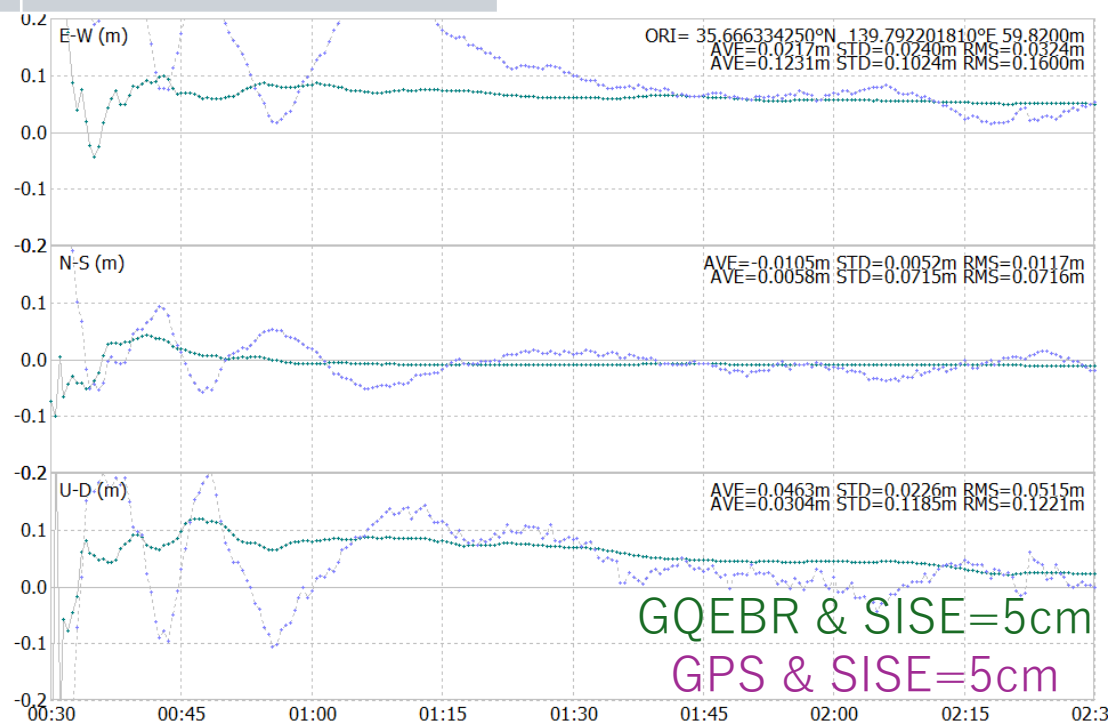
SISE : 5cm(Final),10cm(MADOCA),15cm,20cm

Positioning Mode : Kinematic (L1-L2 Ionosphere-free)

結果(SISRE&衛星数)

SISE=5cm	Convergence time
GQEBR	21 min
GQER	33 min
GQR	37 min
GQ	48 min
G	62 min

GQEBR	Convergence time
5cm	21 min
10cm	56 min
15cm	58.5 min
30cm	60.5 min



以下がL1/L2/L5の搬送波位相を書き下した式

$$\varphi_{L1}^{sv1} = \lambda_{L1}^{-1}(\rho - ion_{L1}^{sv1} + tropo + f_{L1}(dt_{sv} - dT) + mp + N_{L1} + noise)$$

$$\varphi_{L2}^{sv1} = \lambda_{L2}^{-1}(\rho - ion_{L2}^{sv1} + tropo + f_{L2}(dt_{sv} - dT) + mp + N_{L2} + noise)$$

$$\varphi_{L5}^{sv1} = \lambda_{L5}^{-1}(\rho - ion_{L5}^{sv1} + tropo + f_{L5}(dt_{sv} - dT) + mp + N_{L5} + noise)$$

3周波(L5)を追加した場合、変化するのは電離層結合時におけるノイズ(以下)
ノイズが異なる観測データを用いることで収束時間の短縮が期待されている
GPSの場合、次の式のようなになる

$$\begin{aligned}\delta_{IF_L1L2} &= \sqrt{\left(\frac{f_{L1}^2}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2}\right)^2 + \left(\frac{f_{L2}^2}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2}\right)^2} \cdot \delta_{L1} \\ &= 2.978 \cdot \delta_{L1}\end{aligned}$$

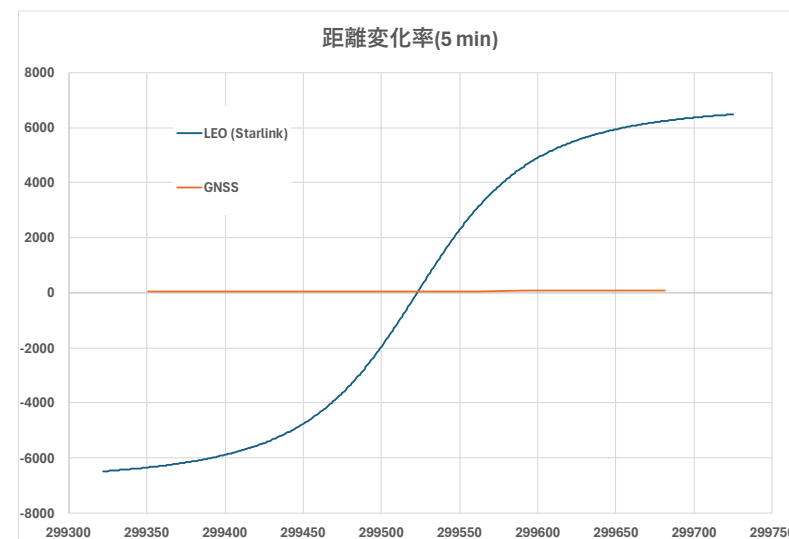
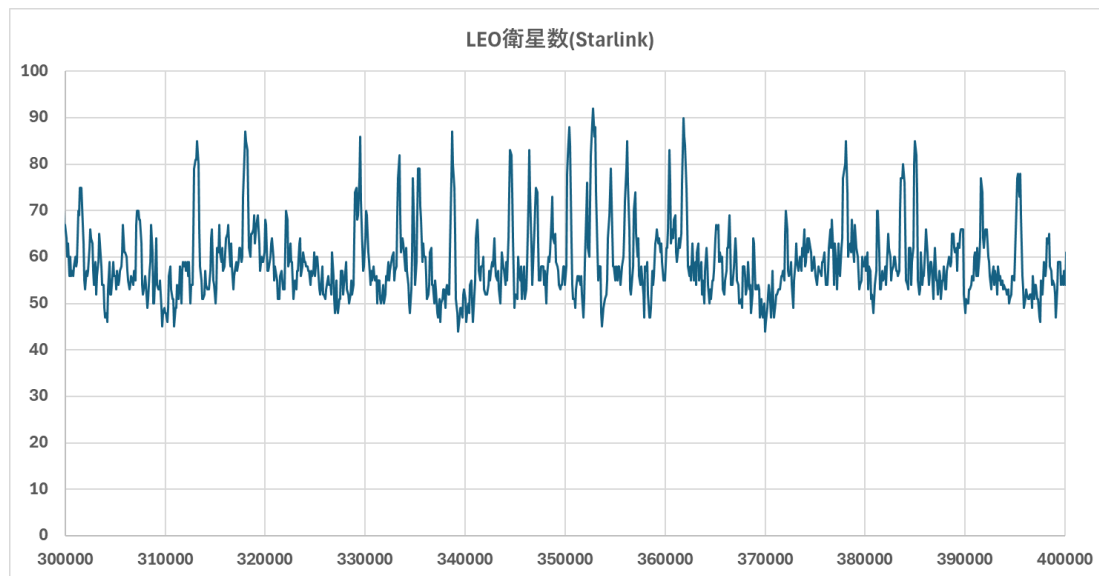
$$\begin{aligned}\delta_{IF_L1L5} &= \sqrt{\left(\frac{f_{L1}^2}{f_{L1}^2 - f_{L5}^2}\right)^2 + \left(\frac{f_{L5}^2}{f_{L1}^2 - f_{L5}^2}\right)^2} \cdot \delta_{L1} \\ &= 2.588 \cdot \delta_{L1}\end{aligned}$$

3周波をGPS/QZSS/GALIELO/BDSが送信した場合、
SISRE=5cmで2周波の場合：21min
SISRE=5cmで3周波の場合：**18min**

結果(LEO衛星)

近年注目されているLEO衛星(Starlink)より測位信号が送信された場合、次の2点でPPPの収束時間短縮が期待できる

- ・ 使用可能衛星数の増加(GNSS+LEOになるため)
- ・ LEO衛星は相対速度が速いため、距離変化率が大きい
→ 収束時間に寄与する



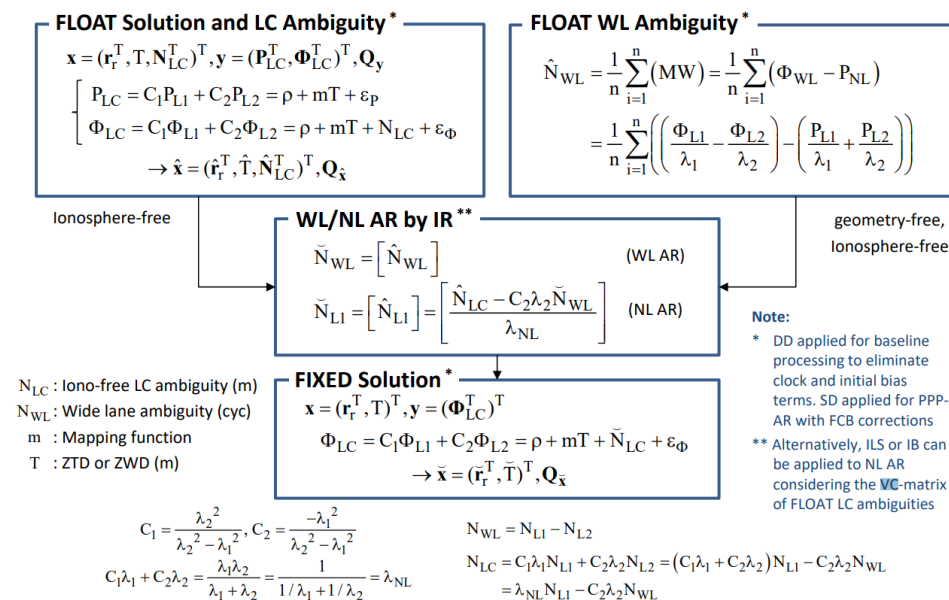
3周波をGPS/QZSS/GALIELO/BDS/GLONASSが送信した場合、

SISRE=5cmでGNSSの場合：21min

SISRE=5cmでGNSS+LEOの場合：**14min**

→ 高度550kmの場合、可視可能時間が最大で6分程度 & 衛星の切り替わりが激しいことが原因

WL/NL AR with Iono-free LC

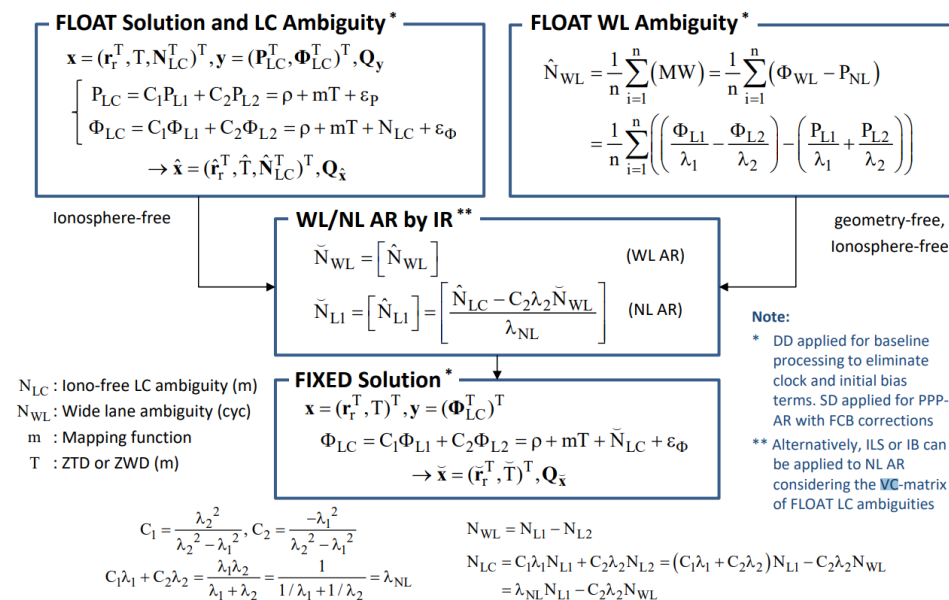


12

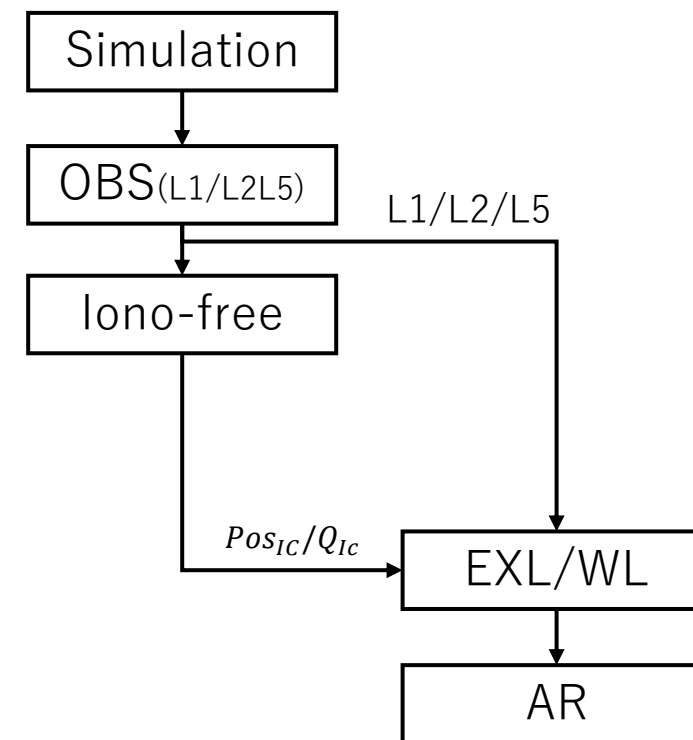
3周波をGPS/QZSS/GALIELO/BDSが送信した場合、
 SISRE=5cmで2周波の場合：21min
 SISRE=5cmで2周波の場合：19.3min
 SISRE=5cmで3周波の場合：**18min**
 SISRE=5cmで3周波+線形結合の場合：**15.2min**

- ・ シミュレーターを使用して、補正情報の補正内容(SISRE,衛星数, 3周波, LEO)ごとにPPPを評価
- ・ SISRE及び衛星数は収束時間と密接な関りがある
→ 将来のBDS拡張及びSISREの改善した場合、PPPに大きな影響があると言える
- ・ 3周波の使用することでノイズが異なる観測データが使用できるため収束時間の短縮する
ただし現状は3周波を全ての衛星が送信している訳ではない
- ・ LEOは距離変化率が大いなので収束時間の短縮するが、滞空時間の短さも結果に効いている
適切な高度及び衛星数を模索する必要、
また測位演算時にGNSSとLEOの観測値を同等として扱っているが、適切か再検討が必要

WL/NL AR with Iono-free LC



12



3周波をGPS/QZSS/GALIELO/BDS/GLONASSが送信した場合、

SISRE=5cmで2周波の場合：21min

SISRE=5cmで2周波AR(Rounding)の場合：19.3min

SISRE=5cmで3周波の場合：**18min**

SISRE=5cmで3周波+線形結合の場合：**15.2min**