



【開示範囲】 関係者限定

GNSSの受信機を学ぶ意義や、 将来のGNSS、QZSSの期待

山田 英輝

JAXA衛星測位システム技術ユニット

令和4年8月26日

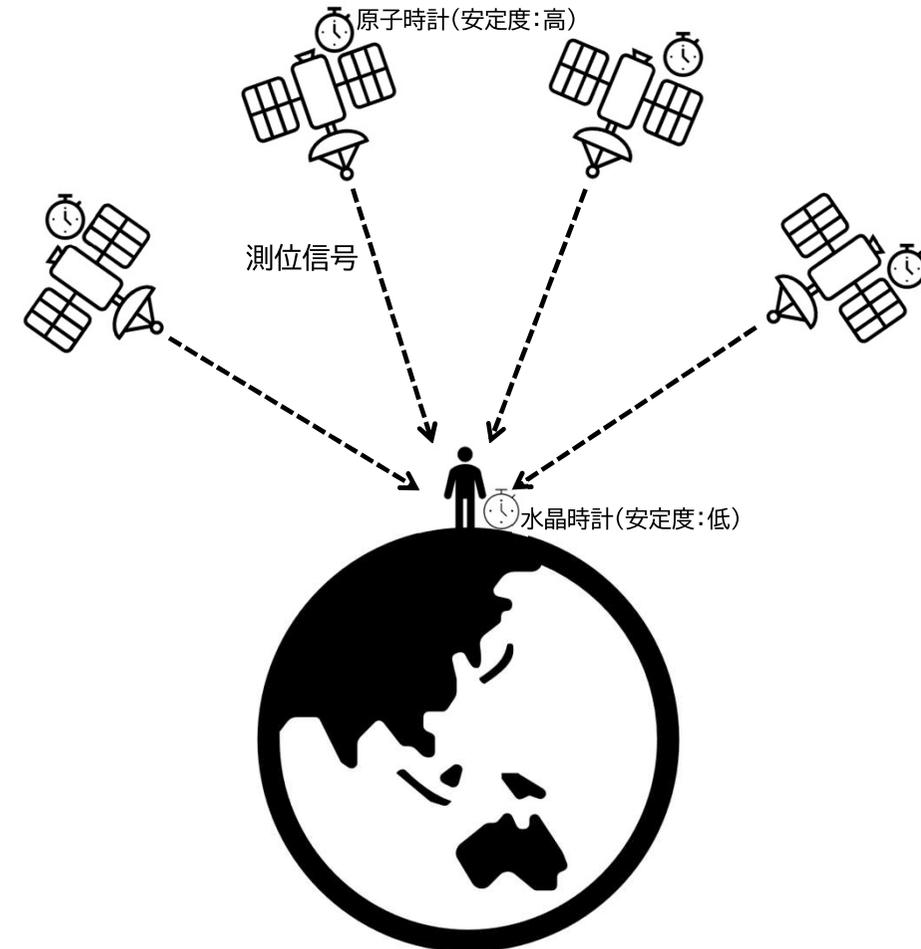
自己紹介

- 2011年に東京海洋大学で工学博士を取得。
- 2011年～2019年まで、電子航法研究所、東京海洋大学で研究員を3年間経験した後、日立造船株式会社に在籍。
- 2019年から宇宙航空研究開発機構に入社し、測位衛星を使った精密測位・航法の研究に従事。

- 衛星測位とMADOCA-PPP、QZSSの紹介と課題
- PPP、QZSSの視点から見たソフトウェア受信機(SDR)の意義
 - QZSSのL6測距信号の利用可能性
 - 低軌道衛星の軌道推定(PPP-Space)とSDR
 - 干渉、マルチパス、アレイアンテナ
- 今後の取り組み(PPP、SDR関連)

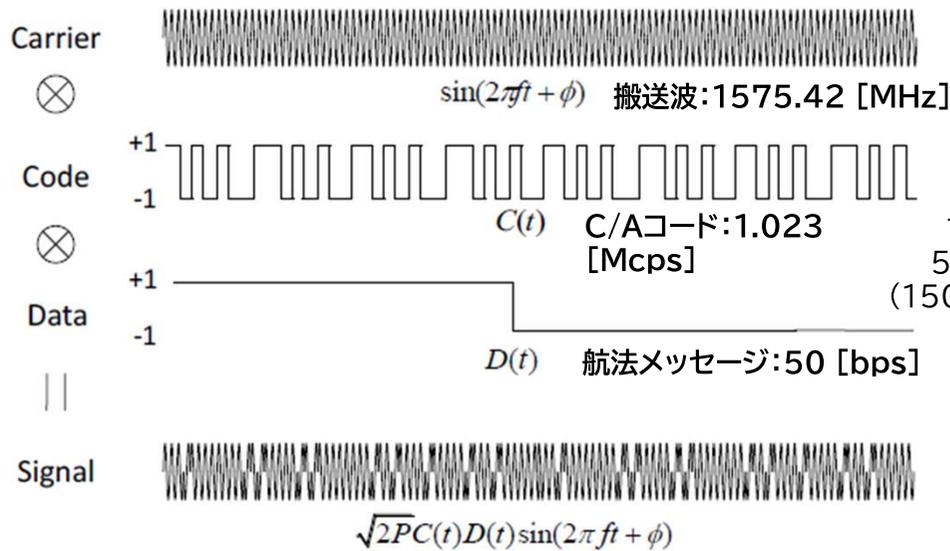
JAXA Explore to Realize 衛星測位とは

- 測位衛星から送信される信号を使用して、ユーザの位置を求める技術。
- ユーザの位置を正確に求めるためには、衛星-ユーザ間の距離を高精度に計測する必要があり、そのためには正確な時刻が必要。
- ユーザの位置(X、Y、Z)と時刻(t)を求めるためには、4機以上の測位衛星からの測位信号を受信する必要がある。



衛星測位信号

測位衛星から送信される信号(L1C/A)



航法メッセージ



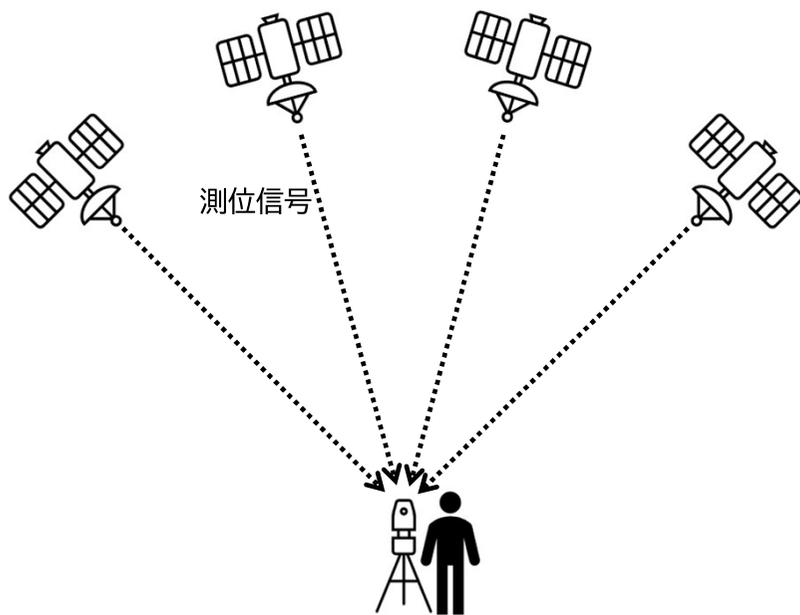
- サブフレーム#1: 各衛星の状態とクロック補正係数
- サブフレーム#2: 各衛星の軌道情報(1)(エフェメリス)
- サブフレーム#3: 各衛星の軌道情報(2)(エフェメリス)
- サブフレーム#4: 電離層遅延補正係数、UTCパラメータ、閏秒情報、
全衛星の軌道情報(アルマナック)
- サブフレーム#5: アルマナック

高精度なユーザ測位を実現するためには、
航法メッセージに含まれる誤差を補正した
高精度な衛星位置・時刻情報が必要

衛星測位方式(1/3)

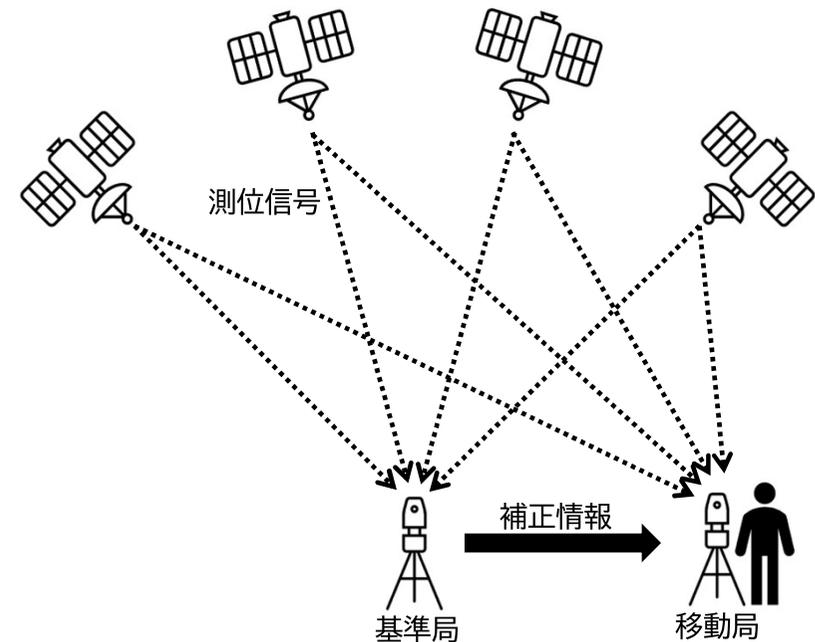
単独測位

ユーザは測位衛星からの測位信号のみを使用して測位を行う。



相対測位

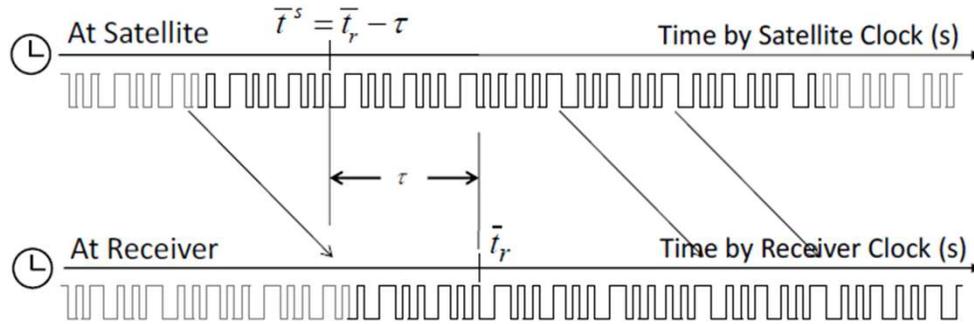
ユーザは基準局からの補正情報と、測位衛星からの測位信号を使用して測位を行う。



衛星測位方式(2/3)

コード測位

測位衛星がコードを送信した時刻とユーザがコードを受信した時刻の差から距離を計測(計測精度:数m)

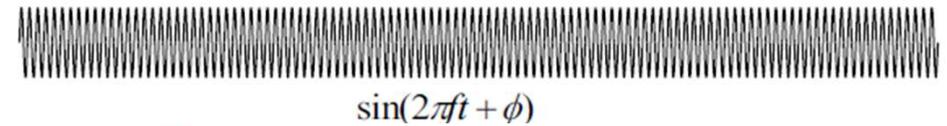


$$\begin{aligned}
 P_{r,i}^s &= c((t_r + dt_r(t_r)) - (t^s + dT^s(t^s))) + \varepsilon_P \\
 &= c(t_r - t^s) + c(dt_r(t_r) - dT^s(t^s)) + \varepsilon_P \\
 &= (\rho_r^s + I_{r,i}^s + T_r^s) + c(dt_r(t_r) - dT^s(t^s)) + \varepsilon_P \\
 &= \rho_r^s + c(dt_r(t_r) - dT^s(t^s)) + I_{r,i}^s + T_r^s + \varepsilon_P
 \end{aligned}$$

- $P_{r,i}^s$: 擬似距離[m]
- c : 光速[m/s]
- t_r : 受信時刻(受信機)[s]
- t^s : 送信時刻(衛星)[s]
- dt_r : クロックバイアス(受信機)[s]
- dT^s : クロックバイアス(衛星)[s]
- ε_P : 計測誤差[m]
- ρ_r^s : 衛星-受信機間距離[m]
- $I_{r,i}^s$: 電離圏遅延[m]
- T_r^s : 対流圏遅延[m]

搬送波位相測位

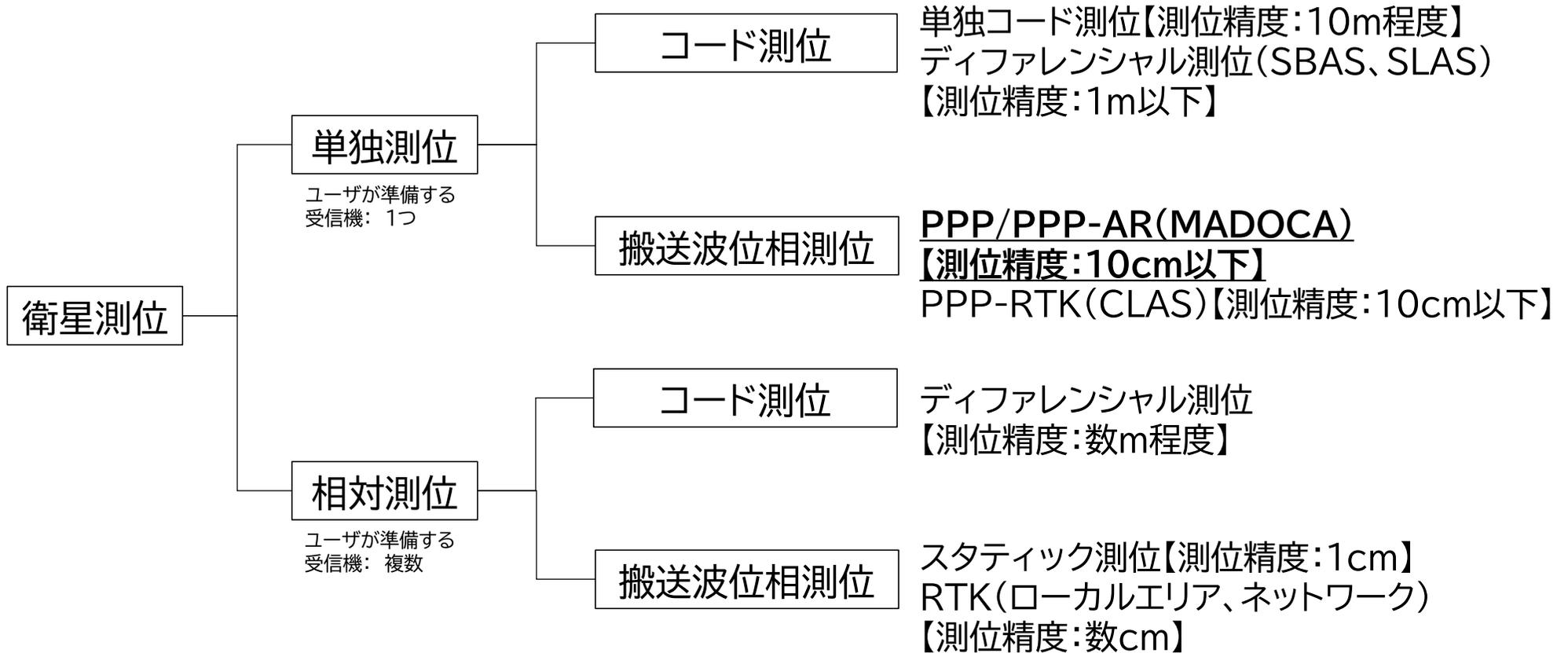
測位衛星-ユーザ間の搬送波の波数と位相から距離を計測(計測精度:数mm)



$$\begin{aligned}
 \Phi_{r,i}^s &= \lambda_i \phi_{r,i}^s \\
 &= c(t_r - t^s) + c(dt_r(t_r) - dT^s(t^s)) + \lambda_i(\phi_{r,0,i} - \phi_{0,i}^s + N_{r,i}^s) + \lambda_i \varepsilon_\phi \\
 &= \rho_r^s + c(dt_r(t_r) - dT^s(t^s)) - I_{r,i}^s + T_r^s + \lambda_i B_{r,i}^s + d\Phi_{r,i}^s + \varepsilon_\phi
 \end{aligned}$$

- $\Phi_{r,i}^s$: 搬送波位相距離[m]
- λ_i : 搬送波波長[m]
- $\phi_{r,i}^s$: 搬送波位相[cycle]
- c : 光速[m/s]
- t_r : 受信時刻(受信機)[s]
- t^s : 送信時刻(衛星)[s]
- dt_r : クロックバイアス(受信機)[s]
- dT^s : クロックバイアス(衛星)[s]
- $\phi_{r,0,i}$: 位相バイアス(受信機)[cycle]
- $\phi_{0,i}^s$: 位相バイアス(衛星)[cycle]
- $N_{r,i}^s$: 整数アンビギュイティ[cycle]
- ε_ϕ : 計測誤差[cycle]
- ρ_r^s : 衛星-受信機間距離[m]
- $I_{r,i}^s$: 電離圏遅延[m]
- T_r^s : 対流圏遅延[m]
- $B_{r,i}^s$: 搬送波位相バイアス[cycle]
- $d\Phi_{r,i}^s$: その他誤差[cycle]

衛星測位方式(3/3)



搬送波位相測位

RTK

- 基準局を用いた精密測位
(近傍基準局のデータが常時必要)
- ・測位精度数cm
 - ・観測量:搬送波位相

CLAS(PPP-RTK)

- 準天頂衛星経由(L6D)の補正情報を用いた精密測位(国内対象)
- ・測位精度:数cm-10 cm
 - ・観測量:搬送波位相
 - ・補正情報:GSI電子基準点を使用して生成

PPP/PPP-AR

測位Uの研究対象

高精度な軌道時刻情報を用いた
基準局によらない精密測位
(グローバル対象、MADOCA使用)

- ・測位精度:数cm-10 cm
- ・観測量:搬送波位相
- ・補正情報:準天頂衛星経由(L6E) or インターネット配信
- ・課題:収束時間(測位3D-RMS誤差 10 cm以内)

GPSのみを用いたPPP(チューニング無):

**static 30分(68 %)、
kinematic 約1時間半(68%)**

PPP-AR+local補正

基準局を用いた精密測位(PPP-AR初期化高速)
原理的に測位解収束後は基準局のデータは不要

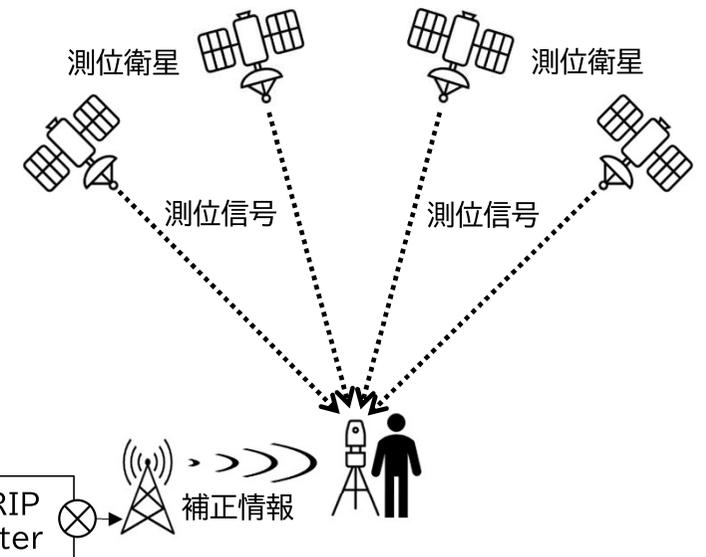
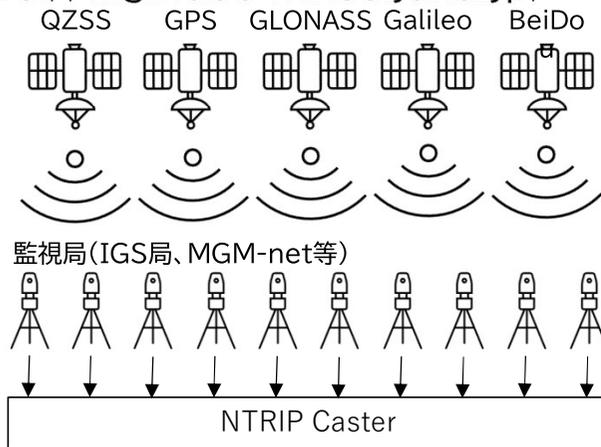
- ・測位精度:数cm-10 cm
- ・観測量:搬送波位相
- ・電離層・対流圏遅延量補正情報:
基準局のスタティックPPP-ARで推定し、距離補間したものをユーザ測位に適用

JAXA MADOCAとは

- 和名:
複数GNSS対応高精度軌道時刻推定ツール(JAXA)
- 英名:
Multi-GNSS Advanced Demonstration tool for Orbit and Clock Analysis(JAXA)
- 世界各国に整備されているGNSS受信機の観測データを準リアルタイムで受信して、QZSS、GPS、GLONASS、Galileo、BeiDouの高精度軌道時刻推定、及び補正情報生成を行ってユーザに配信することにより、センチメートルオーダの測位精度を実現する(※後処理補正情報プロダクトも生成可:本発表の解析で使用)

https://ssl.tksc.jaxa.jp/madoca/public/public_index_en.html

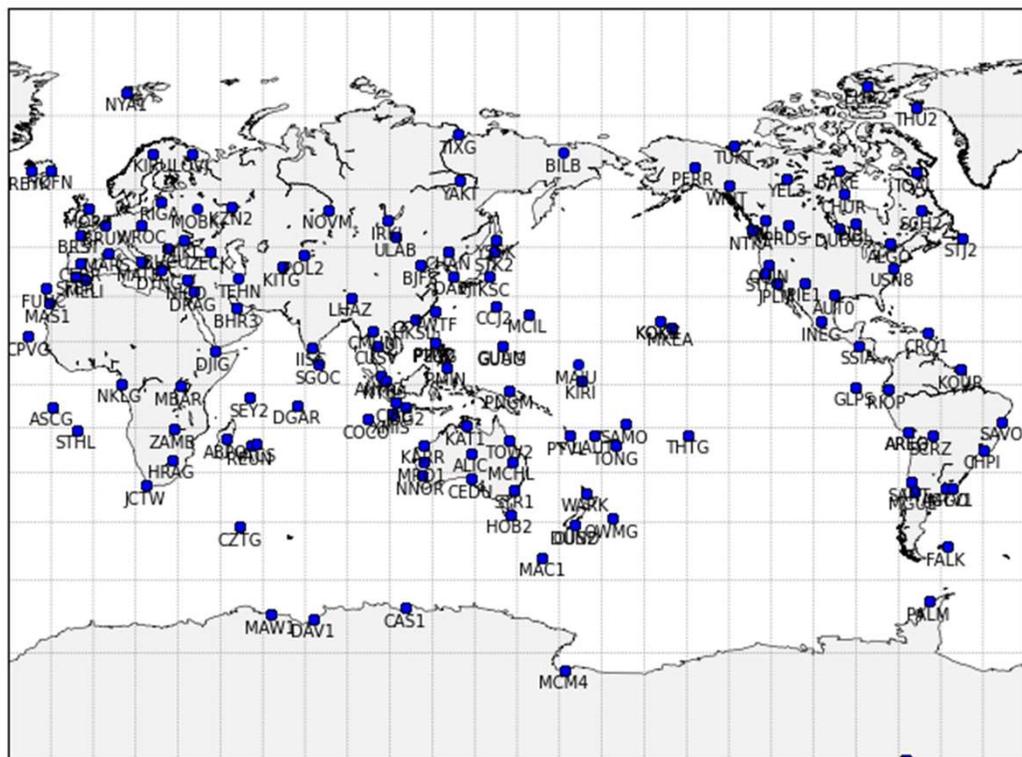
<https://mgmds01.tksc.jaxa.jp/>



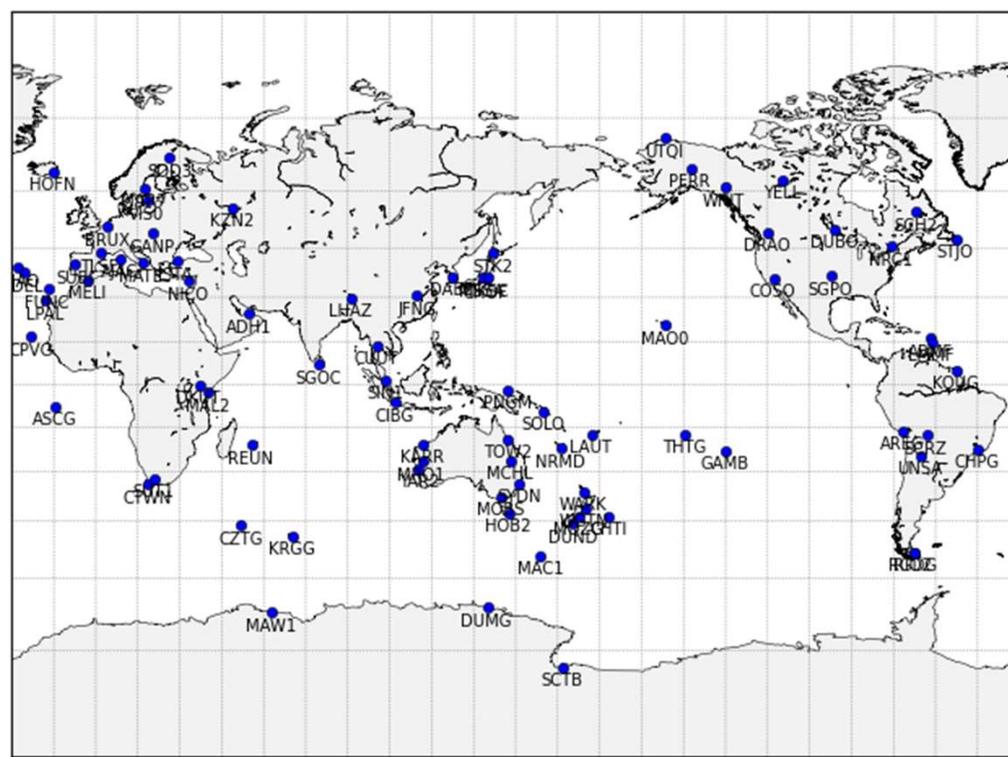
MADOCA(JAXA)が使用している監視局

2022/7/26時点

後処理(最終暦):163局使用



リアルタイム:84局使用



準天頂衛星(みちびき)が提供する測位サービス

サービス名称		信号名称	中心周波数 [MHz]	準天頂衛星							
				初号機	2号機	3号機	4号機	初号機 後継機	5号機	6号機	7号機
				準天頂軌道		静止 軌道	準天頂軌道		静止 軌道	準静止 軌道	
測位サービス	衛星測位サービス	L1C/A	1575.42	○	○	○	○	*1	*2	*2	*2
		L1C/B		-	-	-	-	*1	○	○	○
		L1C	○	○	○	○	○	○	○	○	
		L2C	1227.6	○	○	○	○	○	-	-	-
		L5	1176.45	○	○	○	○	○	○	○	○
測位補強サービス	サブメータ級測位補強サービス(SLAS)	L1S	1575.42	○	○	○	○	○	-	-	-
	センチメータ級測位補強サービス(CLAS)	L6D		○	○	○	○	○	-	-	-
	高精度測位補強サービス(MADOCA-PPP)	L6D	1278.75	-	-	-	-	-	○	○	○
		L6E		-	○	○	○	○	○	○	○
その他の 提供サービス	災害・危機管理通報サービス(DC-Report)	L1S	1575.42	○	○	○	○	○	-	-	-
	SBAS配信サービス	L1Sb		-	-	○	-	-	-	○	○
	測位技術実証サービス	L5S	1176.45	-	○	○	○	○	-	○	○
	衛星安否確認サービス(Q-ANPI)	S-Band	2000	-	-	○	-	-	-	-	○

*1 打上げ直後はL1C/Aを送信するが、7機体制確立時を目途に、L1C/AからL1C/Bへと切り替える

*2 L1C/AとL1C/Bの切り替え機能を有するが、通常の運用の中では、L1C/Aの送信予定はない



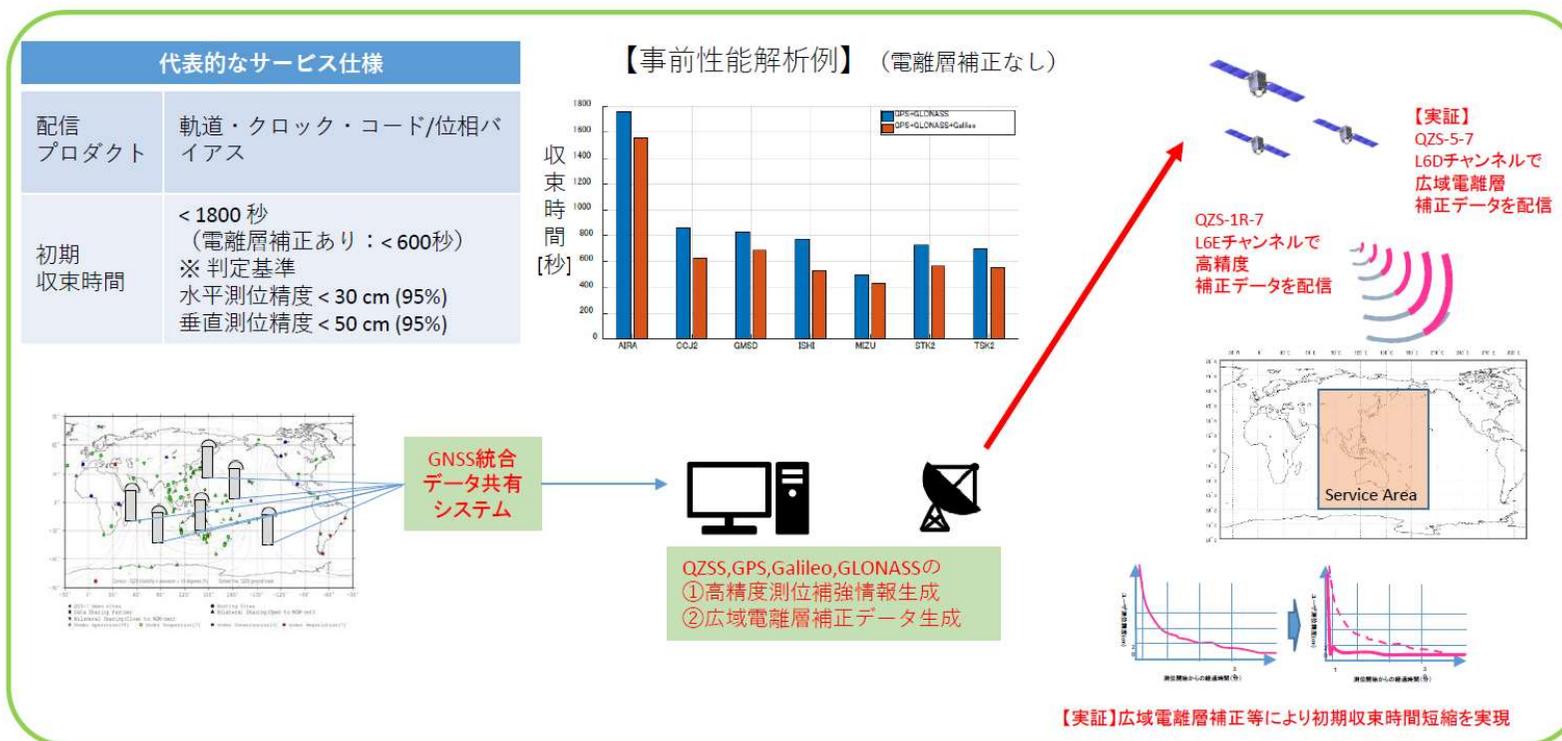
高精度測位補強サービス (MADOCA-PPP) について



出典：内閣府

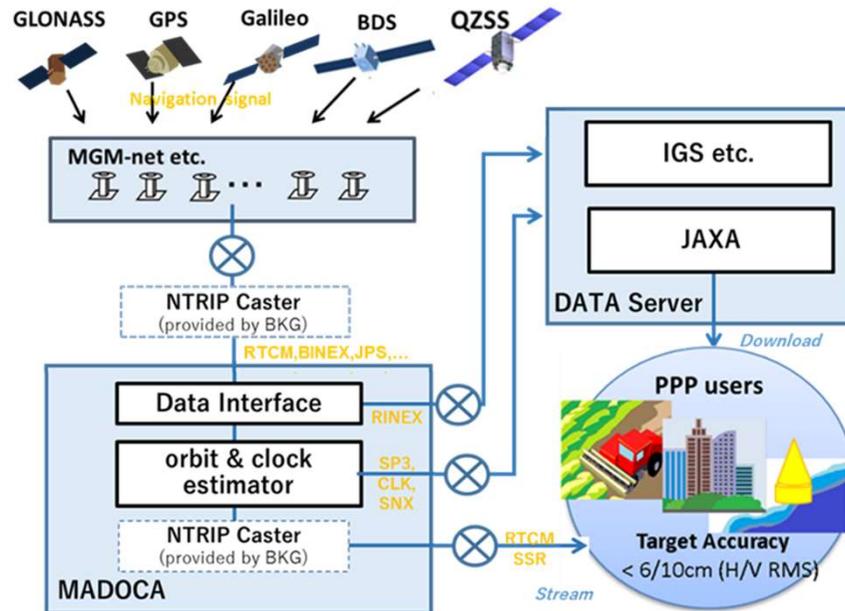
madoca_introduction
jp_20220228.pdf

- 高精度測位補強サービス(MADOCA-PPP)は、L6E信号によって精密単独測位(PPP)ユーザ向けに補正データを提供するものです。PPP方式やPPP-Ambiguity Resolution(AR)方式を利用するための衛星軌道、クロックオフセット、コード/位相バイアスに関する補正データをアジア・オセアニア地域に配信します。
- また2024年度からはMADOCA-PPPの技術実証として、アジア・オセアニア地域を対象とした広域電離層補正データを提供します。技術実証(電離層補正データ)メッセージはL6D信号で配信し、PPP初期収束時間短縮を行います。



精密単独測位 (PPP) の概要

- PPPとは、Precise Point Positioningの略であり、1台のGNSS受信機を用いて、地上においてcm級の位置測定を行う測位技術である。
- JAXAでは、準天頂衛星初号機の開発の一環として、複数GNSS対応高精度軌道時刻推定ツール(MADOCA)の研究開発と、その利用推進の中でPPPの開発を実施している。



※一般ユーザへのRTCM配信は2021年度末を以て終了。

MADOCA: Multi-GNSS Advanced Demonstration tool for Orbit and Clock Analysis)

- 観測データ・プロダクト
 - 搬送波位相、疑似距離
 - 精密軌道・時計(MADOCA)
 - 初期位相バイアス(FCB)
- フィルタ
 - カルマンフィルタ(EKF)
- モデル
 - 対流圏、アンテナ位相中心オフセット、潮汐、位相ウィンドアップ、周波数間バイアス等

利点: 基準点の設置が不要
 欠点: 解の収束に時間がかかる

PPPによるパラメータ推定

観測方程式(観測量:搬送波位相Φ、疑似距離P)

$$\lambda_i^s \Phi_{i,SYS}^s = r^s + dt - dT^s + ISB_{GPS-SYS} - (f_1/f_i)^2 I_i^s + T^s + \lambda_i^s B_i^s + d\phi_i^s + pco_i^s + pcv_i^s + \varepsilon(\Phi)_i^s$$

$$P_{i,SYS}^s = r^s + dt - dT^s + ISB_{GPS-SYS} + (f_1/f_i)^2 I_i^s + T^s + pco_i^s + pcv_i^s + DCB_{i,SYS}^s + \varepsilon(P)_i^s$$

$$y_k = h_k(x) + \varepsilon \simeq h_k(x_0) + H_k(x - x_0) + \varepsilon$$

非線形モデルを現在の推定値で線形近似

$$x = \begin{pmatrix} x, y, z, dt, ZTD, ISB^1, ISB^2, ISB^3, ISB^4 \\ B_1^1, B_1^2, \dots, B_1^n, B_2^1, B_2^2, \dots, B_2^n, I_1^1, I_1^2, \dots, I_1^n \end{pmatrix}$$

EKF

状態量更新¹⁾ $\left\{ \begin{array}{l} \hat{x}_k^- = F \hat{x}_{k-1} \quad F = \text{diag}(1, 1, \dots, 1) \\ P_k^- = F P_{k-1} F + Q \end{array} \right.$

1) x,y,zの初期値・推定共分散:
static:前エポックのx,y,z と推定共分散,
kinematic:現在エポックのコード単独測位解のx,y,zと推定共分散(既定値)

観測更新 $\left\{ \begin{array}{l} K_k = P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + R_k)^{-1} \\ \hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (y_k - h(\hat{x}_k^-)) \\ P_k = (I - K_k H_k) P_k^- \end{array} \right.$

- 衛星-受信機間距離算出(r)と衛星時計誤差(dT)のモデル誤差をMADCOA暦を補間して補正。
- 電離層遅延はL1,L2の周波数の差を利用して大部分を低減する手法とランダムウォークを仮定して拡張カルマンフィルタ(EKF)で推定する手法がある。
→後者の手法は初期収束短縮技術が適用できる。
- PCO/PCV,DCB, dφ:モデルで補正。
- 位置座標以外に大気圏遅延量(T, I)も推定可能。

λ:波長(m/cycle), s:衛星を表す記号, i:L1またはL2を表す記号, f:L帯搬送波の周波数, Φ:搬送波位相観測値(cycle), P:疑似距離観測値(m), r:幾何学的距離(m), dt:受信機クロックバイアス(m), dT:衛星クロックバイアス(m), I:電離層遅延量(m), B:アンビギュイティ(cycle), dφ:Phase wind-up誤差(m), DCB:周波数間コードバイアス(m), pco:衛星及び受信アンテナ位相中心オフセット(m), pcv:衛星及び受信アンテナ位相中心変動(m), ε:受信機熱雑音(m)

MADOCAの利用、実証試験

• 気象学への応用

気象庁の気象観測データシステム、より正確な水蒸気量の把握にMADOCAプロダクトを利用。

Shoji, Y. (2017). The gnss remote sensing and its application to meteorology. The Journal of the Institute of Electrical Installation Engineers of Japan, 37(10), 728-731. doi:10.14936/ieiej.37.728.

• 津波警報システムへの応用検討

• MADOCAプロダクト配信を行う民間事業者

- インターネット経由でMADOCAプロダクト配信を行う。
- 現在、内閣府が実用準天頂衛星のL6E信号を用いて配信している実験信号は、民間事業者が生成したプロダクトを使用。

• 国土地理院における活動

災害直後の準リアルタイム地殻変動検知システムにおける精密暦(IGS暦)の補完として利用。

Munekane, H. (2017). A Prototype System for PPP Kinematic Positioning of Japanese GEONET Stations. Journal of the Geospatial Information Authority of Japan, 129, 1-10. URL: <https://www.gsi.go.jp/common/000184501.pdf>.

• 海外での実証

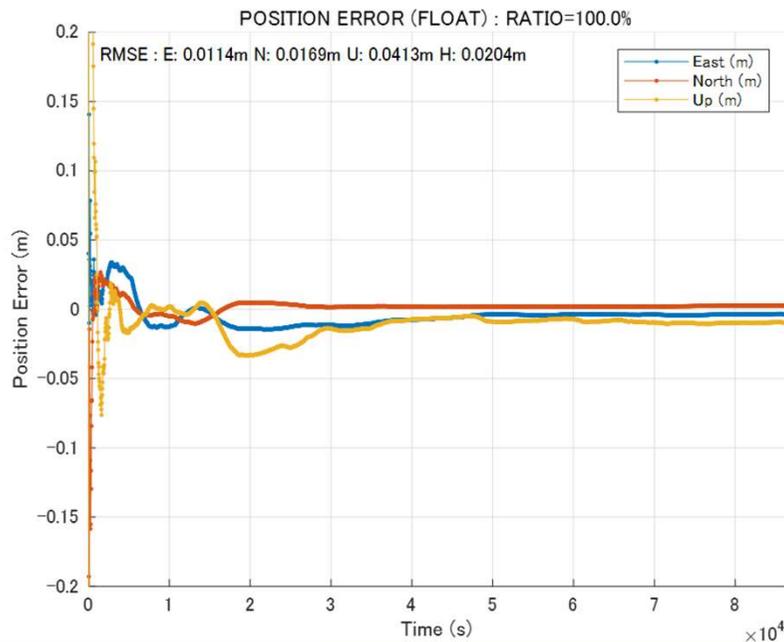
2010-2017 アジア・オセアニア地域でのMulti-GNSSを使った測位実証。

• 移動体(UAV、自動車等)での精度検証

マルチパス環境下におけるサブメートル級精度要求達成を目標に試験中。

PPPの課題(1/2)

- パラメータ値(受信機クロック誤差、大気圏遅延、アンビギュイティ等)の**正解が不明**な時点からフィルタによる推定を行うため、精密解に収束するまで時間(≠1エポック内の計算機処理時間)を要する。
- 収束性能は**PPPの利用促進**を行う上での課題の一つであり、最新の測位技術を実装し、課題の解決に取り組んでいる。



収束時間短縮のアプローチ	利点
① 精密暦・FCBの精度向上	モデルの高精度化
② 大気圏遅延補強情報の利用	
③ 複数GNSSの利用	観測データの増加
④ 複数周波数の利用	AR決定性能の向上
⑤ 疑似距離雑音の低減	観測データの品質改善

PPPの課題(2/2)

□MADOCA-PPPの応用検討の強化

MADOCAを用いたPPP測位技術の社会実装を進めるために、社会が抱える課題(低コスト、IMUとの統合等)を企業等とのヒアリングを行っている。

□PPPの参照OSS(オープンソースソフトウェア)の提供

リファレンスとなる**PPP測位プログラム及びアルゴリズム**を広く公開することで、PPPを用いた受信機・応用製品の開発の促進に繋げる。

□L6E対応受信機

- 現在、L6対応受信機は数社製品として市場にあるが、9月30日以降にL6Eから配信されるMADOCAの配信形式(SSR→Compact SSR(CSSR))への対応に向けて、受信機F/Wの改修が必要になる。
- リアルタイムPPPの実証実験に向けて、**リアルタイムでCSSR→SSRに変換できるツールの要望**も出ている。

- PPP

リアルタイムPPP技術の課題の一つであるフィルタの収束時間の短縮に取り組んでいる。収束後は数cmレベルの位置決定精度が得られる。

- PPP-AR

PPPの測位精度の改善、収束時間の短縮のため、アンビギュイティ解の決定技術の検討・高度化を進めている。

- PPP/INS

PPPとIMUの加速度と角速度を統合し、移動体におけるロバストな複合航法技術の検討を行う。

- PPP-Space

低・中軌道衛星のオンボード上での測位及び航法にPPPの技術を適用する精密測位・航法の研究を行っている。また、月面におけるPPPの実現可能性についても検討する。

- PPP、QZSSの視点から見たソフトウェア受信機(SDR)の意義
 - QZSSのL6測距信号の利用可能性
 - 低軌道衛星の軌道推定(PPP-Space)とSDR
 - 干渉、マルチパス、アレイアンテナ

先行文献

Jianghui Geng and Jiang Guo., “Beyond three frequencies: an extendable model for single-epoch decimeter-level point positioning by exploiting Galileo and BeiDou-3 signals”, Journal of Geodesy, pp. 1-15, 2020.

:「GalileoとBeiDouの3周波以上の信号を利用したsingle epoch PPP」に関する論文。

ほぼ瞬時に水平10-30 cm(99%)@固定点



PPPでは複数GNSS精密暦+AR+3周波以上の実装は有望なアプローチ

観測方程式と推定パラメータ

観測方程式

$$\begin{cases} P_{ij}^k = \rho_i^k + g_{s,j}^2 \gamma_i^k + c(t_i - t^k) + d_{ij}^s - d_j^k \\ L_{ij}^k = \rho_i^k - g_{s,j}^2 \gamma_i^k + c(t_i - t^k) + \lambda_{s,j}(N_{ij}^k + b_{ij}^s - b_j^k) \end{cases} \quad (1)$$

For instant PPP-WAR, we estimated positions, receiver clocks, slant ionosphere delays and ambiguities epoch-by-epoch by imposing quite **weak temporal constraints on neighboring epochs**

Table 3 Data processing strategies and models for Galileo/BeiDou-3 multi-frequency data

Items	Strategies
Frequencies	Galileo: E1/E5a/E5/E5b/E6; BeiDou-3: B1C/B1I/B2a/B2b/B3I
Cutoff angle	10°
Weighting	Elevation dependent 3-mm and 0.3-m a priori noise for carrier phase and pseudorange, respectively
Positions	White-noise-like parameters
Receiver clocks	White-noise-like parameters
Inter-system code bias	Constant per day
Inter-frequency clock bias	Constant per day
Ionosphere delays	Random walk parameter with a process noise of 25 m/ $\sqrt{30}$ s
Troposphere delays	Not estimated but only a priori corrected with the Saastamoinen model
Ambiguities	White-noise-like parameters

Nは毎回初期化、ただし、1エポック前のNの共分散は使用。

- ワイドレーンとエクストラワイドレーンのアンビギュイティ(とその共分散)をLAMBDA法に入力して整数化。
- アンビギュイティ検定はRatio test(しきい値3)を使用。

(注記)

- ワイドレーン線形結合

L1,L2観測量の線形結合。波長が長くなる(0.862 m:GPS L1,L2の場合)。単一周波数よりもノイズは大きくなるが、アンビギュイティ決定は容易になる。

- エクストラワイドレーン線形結合

L2,L5観測量の線形結合。さらに波長が長くなる(5.861 m:GPS L2,L5の場合)。ワイドレーンよりもアンビギュイティ決定は容易になる。

- LAMBDA法

- P.Teunissenが提案。

- アンビギュイティ(N)間の無相関化を行い、フィックス解を求める手法。

ワイドレーン/エクストラワイドレーンのnoise factor

目的:L1,L2の搬送波位相よりノイズは大きい、疑似距離よりもノイズが小さい観測を手に入れて、シングルエポックで20-30 cmの測位精度を達成すること。

Ionosphere-free wide-lane combination observable

$$\begin{aligned}
 L_{i,ifw}^k &= \frac{g_{s,j}}{g_{s,j}-1} \underbrace{\left(\frac{g_{s,2}}{g_{s,2}-1} L_{i,1}^k - \frac{1}{g_{s,2}-1} L_{i,2}^k \right)}_{\text{Wide-lane combination}} \\
 &\quad - \frac{1}{g_{s,j}-1} \underbrace{\left(\frac{g_{s,j}}{g_{s,j}-g_{s,2}} L_{i,2}^k - \frac{g_{s,2}}{g_{s,j}-g_{s,2}} L_{i,j}^k \right)}_{\text{Extra-wide-lane combination}} \\
 &= \frac{g_{s,2}g_{s,j}}{(g_{s,2}-1)(g_{s,j}-1)} L_{i,1}^k \\
 &\quad - \frac{g_{s,j}}{(g_{s,2}-1)(g_{s,j}-g_{s,2})} L_{i,2}^k \\
 &\quad + \frac{g_{s,2}}{(g_{s,j}-1)(g_{s,j}-g_{s,2})} L_{i,j}^k
 \end{aligned} \tag{13}$$

Table 7 Combination coefficients of GPS/QZSS L1/L2/L5/LEX, Galileo E1/E5a/E5/E5b/E6 and BeiDou-2/3 B1C/B1I/B2a/B2b/B2I/B3I signals for the ionosphere-free wide-lane observables

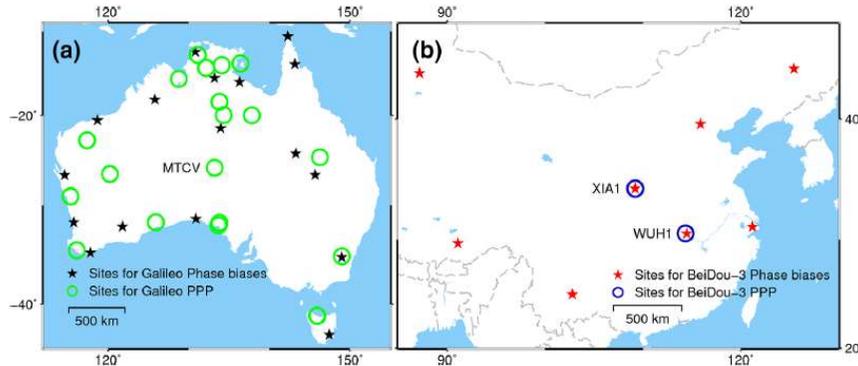
GNSS	L1/E1/B1C/B1I	L2/E5a/B2a	L5/E5b/B2b/B2I	E5/B3I	E6/LEX	Factor
GPS	17.9	-84.7	67.8			110.0
QZSS	17.9	-84.7	67.8			110.0
QZSS	24.1	84.7			-107.8	139.2
QZSS	21.0		33.9		-53.9	67.0
Galileo (E1/E5a/E5)	16.2	226.1		-241.3		331.0
Galileo (E1/E5a/E5b)	16.9	113.0	-128.9			172.3
Galileo (E1/E5a/E6)	21.0	33.9			-53.9	67.0
BeiDou-2 (B1I/B2I/B3I)	23.5		67.1	-89.6		114.4
BeiDou-3 (B1C/B2a/B2b)	16.9	113.0	-128.9			172.3
BeiDou-3 (B1C/B3I/B2b)	22.0		64.5	-85.4		109.3
BeiDou-3 (B1C/B3I/B2a)	20.3	37.7		-57.0		71.2

The last column shows the noise amplification factor compared to raw carrier-phase observations. Bold numbers highlight the favorable combinations with low noise amplifications

We find that the **E6-based Galileo ionosphere-free wide-lane combination observable** has the **smallest noise amplification factor of 67.0**, which is less than one-third of those for other Galileo combinations. The same amplification is **also found for QZSS L1/L5/LEX** signals since they have the same frequency assignments.

→Galileo E6やQZSS LEX(L6?)を基準にするワイドレーンがノイズが小さい。

評価結果(固定点)



Widelane Phase biasのSTD (Galileo E6, BeiDou B3Iを基準)

Table 4 Mean standard deviations (cycles) of wide-lane phase biases for Galileo and BeiDou-3 satellites spanning days 326–355, 2018, and days 35–41, 2019, respectively

GNSS	E1/B1I	E5a/B3I	E5b/B1C	E5/B2b
Galileo	0.016	0.006	0.004	0.006
BeiDou-3	0.030	0.029	0.036	0.033

Table 6 Mean RMS (m) of the position differences for Galileo-only instant five-frequency and triple-frequency PPP-WAR from daily position benchmarks at the 36 ARGN stations over the 30 days

Model	PPP-WAR	Success rate (%)	Single-epoch PPP
Five-freq. PPP-WAR using E1/E5a/E5/E5b/E6	0.20/0.19/0.65	99.5	0.49/0.48/1.19
Triple-freq. PPP-WAR using E1/E5a/E6	0.20/0.18/0.65	99.6	0.51/0.49/1.24
Triple-freq. PPP-WAR using E1/E5a/E5b	0.31/0.29/0.87	98.4	0.50/0.48/1.21
Triple-freq. PPP-WAR using E1/E5a/E5	0.35/0.33/0.93	97.6	0.49/0.48/1.19

The RMS is shown from the east, north to up components delimited by “/”. Column 3 shows the success rate of PPP-WAR solutions within all epochs

評価結果(移動体)

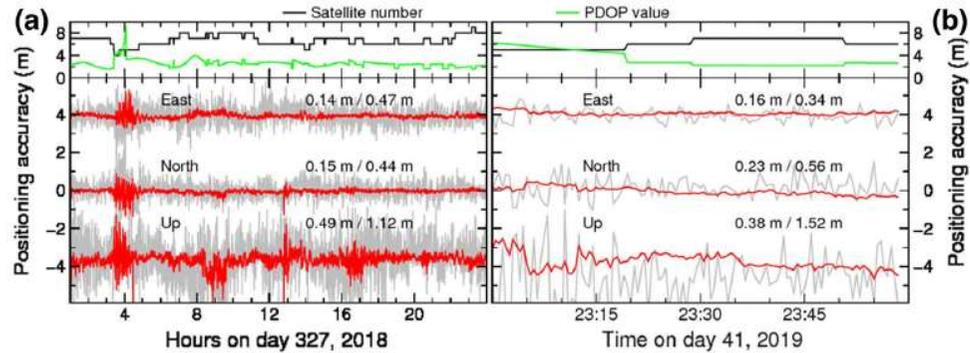
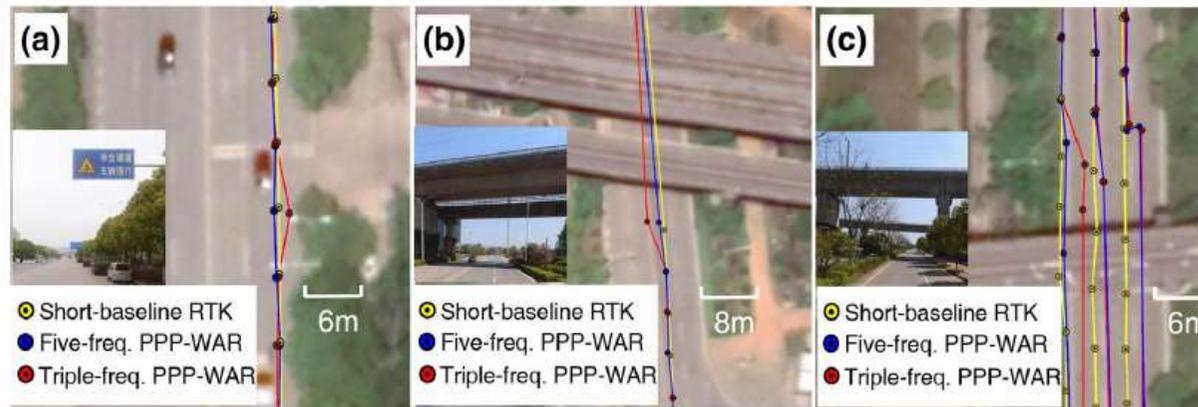


Fig. 4 Positioning accuracy (m) of Galileo-only (panel a for station MTCV) and BeiDou-3-only (panel b for station XIA1) five-frequency instant PPP-WAR (red traces) and single-epoch PPP (gray traces). For symbol clarity, the east and up components are offset by 4 and -4 m, respectively. The RMS statistics are shown alongside each trace

where the numerals before “/” are for five-frequency instant PPP-WAR and those after are for single-epoch PPP. Satellite numbers and PDOP values are plotted inside the top panels. “Single-epoch PPP” throughout means a float PPP solution using only a single epoch of data



QZSSのL6測距信号の利用可能性

- 市販受信機(Trimble ALLOY)の確認状況
- GEONET局→QZSS L6(C6X,L6X)出力無し
- IGS局

MCHL(日本:小笠原),STR2(豪州),YAR2(豪州),JFNG(中国),CIBG(インドネシア)

→J01のみL6(C6X,L6X)の疑似距離と搬送波位相を出力。
J02,J03,J07のL6(C6X,L6X)は出力無し。

J01は、パイロット信号があってデータは載っていない=CSK変調ではなく、BPSK変調のみなので搬送波の観測データも問題なく取得できるが、2~4号機は2チャンネルともCSK変調のため市販の受信機は測距データを出力していない。



次世代QZSSで衛星数がより増えたときにQZSS L6を測距信号として3周波測位で使用するために、まずは現状のQZSSのL6信号について、CSK変調かかっている状態で搬送波位相が使用できないかSDRで検討する。

SDRを使った三・四周波PPPの課題・検討事項

- QZSS L6の疑似距離と搬送波位相を出力するPocket SDRの活用
 - ハードの部分が在庫切れで調達が困難。

- SDRで同時に複数GNSSかつ3周波信号をトラッキング
 - CPUへの負荷が大きい。普通のノートPC環境で実現できるものか？

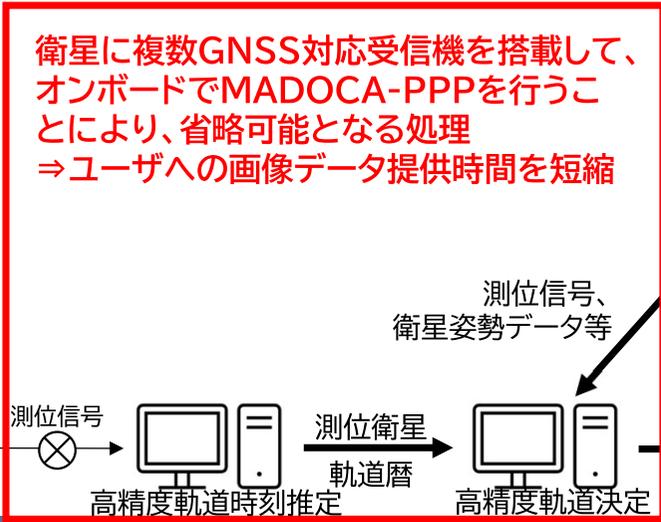
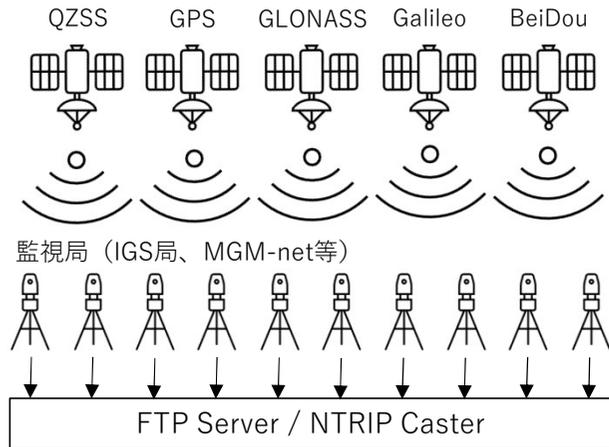
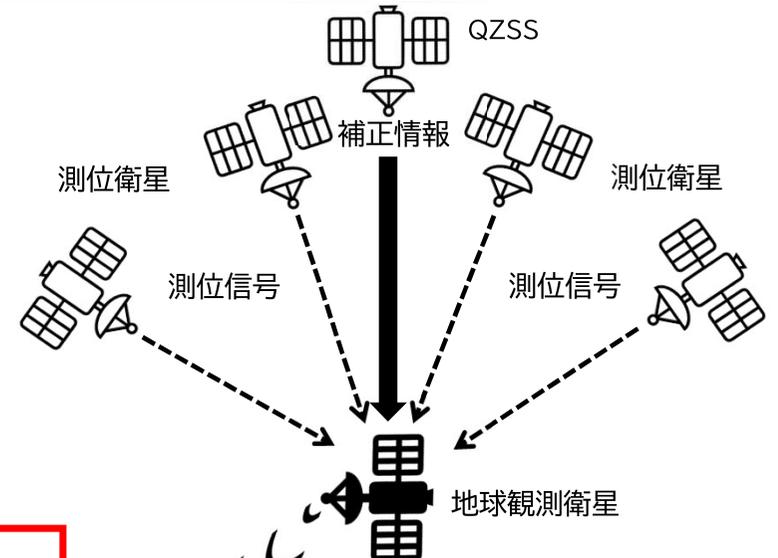
- フロントエンドの選定
 - フロントエンドで使用される基準発振器について、最終的にSDRからの測距データでPPPをする場合、どの程度気にする必要があるか？
 - フロントエンドに含まれるICには、GNSS専用のもものと汎用型のものがある。PPPを最終的に行う場合は、気にしたほうが良いか。

- PPP、QZSSの視点から見たソフトウェア受信機(SDR)の意義
 - QZSSのL6測距信号の利用可能性
 - 低軌道衛星の軌道推定(PPP-Space)とSDR
 - 干渉、マルチパス、アレイアンテナ

PPP in space

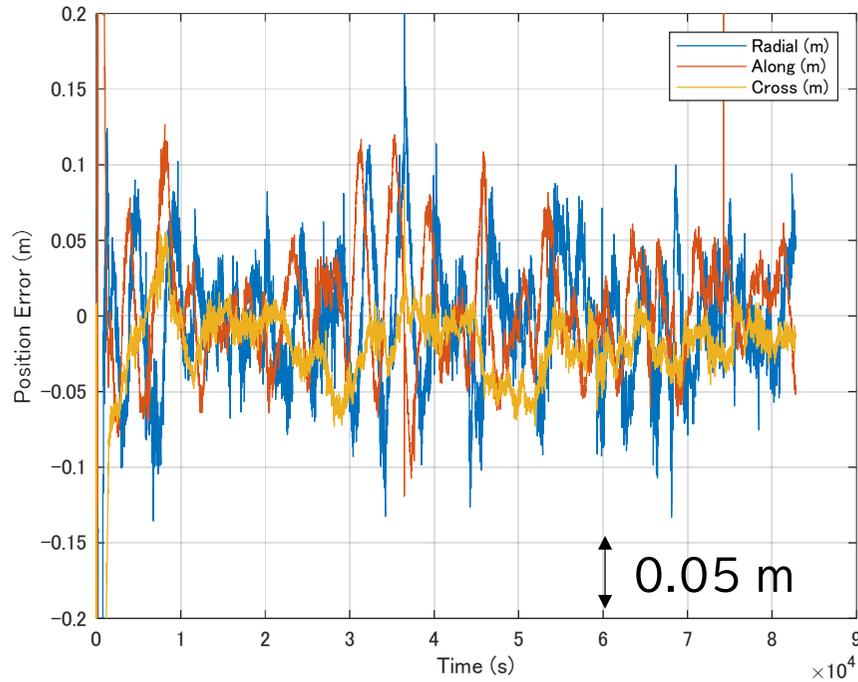
- 高分解能センサを搭載している地球観測衛星は、画像処理のために高精度軌道暦が必要
- 地球観測衛星の高精度軌道暦を生成するためには、「測位衛星の高精度軌道暦」と「地球観測衛星搭載GNSS受信機が受信した測位信号」が必要
- 上記処理に必要な時間は数時間程度

⇒地球観測衛星に複数GNSS対応受信機を搭載して、オンボードでMADOCA-PPPを行うことにより、ユーザへの画像データ提供時間を短縮することが可能

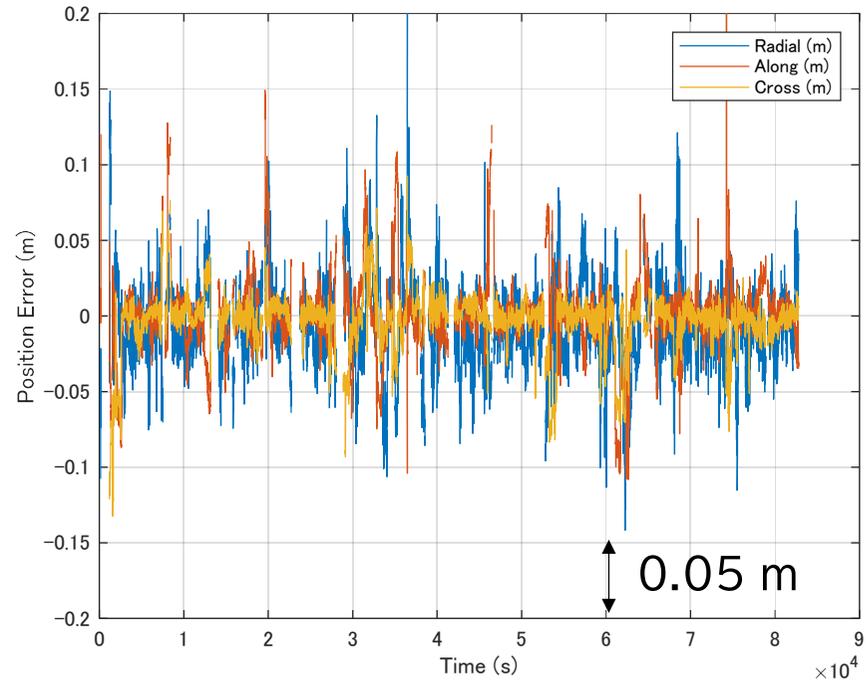


キネマティックPPP-AR(観測誤差 σ のチューニング結果)

フロート解



フィックス解



	フロート解	フィックス解
Radial/Along/Cross/3D(RMS誤差)	4.1/3.8/3.6/6.7 (cm)	2.9/2.5/0.3/4.7 (cm)
フィックス率	—	89.4 %

□L6E対応受信機の調達

- 現在、L6対応受信機は数社製品として市場にあるが、9月30日以降にL6Eから配信されるMADOCAの配信形式(SSR→Compact SSR(CSSR))に対応に向けて、受信機F/Wの改修が必要になる。
- リアルタイムPPPの実証実験に向けて、リアルタイムでCSSR→SSRに変換できるツールの要望も出ている。
- 宇宙用に受信機F/Wの改修が必要。
 - 地上移動体よりも高速に移動(28,800km/時)するため、ドップラー周波数の探索範囲を広くする。
 - 速度制限を解除する。
- 放射線耐性の確保が必要。
- 一からの開発は開発コストが高い。

□L6受信・デコード機能を持ったSDR(Pocket SDR)の活用

- 開発コストの低コスト化、既存の宇宙用受信機と組み合わせて使用できる。
- オンボード計算機におけるCPU負荷、計算量を測定し、見通しを立てる。

RUAG'S SPACEBORNE GNSS-RECEIVERS

- 22 delivered AGGA-2 based heritage receivers
- 69 delivered AGGA-4 based GNSS receivers of the current generation
 - Support of GPS and Galileo
 - PODRIX - Triple frequency (L1C/A, L2P(Y), L2C, L5, E1BC, E5a) single antenna for precise orbit determination
 - LEORIX - single frequency (L1C/A, E1BC) single antenna for high-accuracy real-time navigation in LEO
 - GEORIX - single frequency (L1C/A, E1BC) dual antenna for navigation in GTO and GEO
 - 4 flight models of this family already in space, operating flawlessly



Together ahead. **RUAG**

PODRIX:

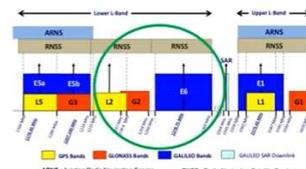
- GPS/Galileo対応
- 三周波対応
- PPP対応、E6対応
(代わりにGPS L2非対応)
- SDRが搭載されS/W更新で機能追加
- Sentinel 1-Cで実証予定(今年)
→HASのデコード処理、アンビギュイティ推定が追加され、CPU負荷増大したため、最適化したとのこと。

2 | Galileo HAS Based Precise Point Positioning of LEO satellites | RUAG Space | Navitec, 2022

PPP4PODRIX

- PODRIX HW is re-used
- E6 band ~50MHz above L2 band → reception is possible with PODRIX antenna and RF front-end

RF front-end is reconfigured from GPS L2 to Galileo E6 → GPS L2 cannot be processed
- Galileo only operation but can be extended to GPS L1/L5 in future



Additional SW enhancements

- Extension of PODRIX SW with
 - Acquisition and tracking of Galileo E6B signal
 - Navigation data download of FEC and RS encoded E6B HAS messages
 - Usage of HAS data in the navigation solution computation
 - Usage of carrier-phase based range measurements in the navigation solution computation (with float ambiguity resolution)
- Additional CPU load due to:
 - Decoding of 1000symbols/s FEC and RS encoded HAS message data stream
 - Float ambiguity estimation of carrier phase based ranging
- Several optimizations were necessary due to limited Leon-2FT CPU resources in AGGA-4, e.g. FEC decoder for high data rates

3 | Galileo HAS Based Precise Point Positioning of LEO satellites | RUAG Space | Navitec, 2022

Together ahead. **RUAG**

4 | Galileo HAS Based Precise Point Positioning of LEO satellites | RUAG Space | Navitec, 2022

Together ahead. **RUAG**

Algorithm evaluation

Test setup

- Used HW:
 - PODRIX EQM was used
 - Spirent GSS9000 transmitting GPS L1C/A & L5 and Galileo E1BC & E5a & E6B with E6B HAS message data stream generated with HMGT
 - PODRIX EQM and Spirent simulator controlled by RUAG's Electrical Ground Support Equipment (EGSE)
- Used scenario:
 - Spacecraft altitude ~680km
 - 31 GPS SVs and 27 Galileo SVs
 - Mean constellation orbit error for GPS and Galileo: 1.6m
 - Remaining mean orbit error after HAS correction: 5cm
 - Remaining mean clock error after HAS correction: 2.5cm

7 | Galileo HAS Based Precise Point Positioning of LEO satellites | RUAG Space | Navitec, 2022

Together
ahead. RUAG

Algorithm evaluation

Used GNSS SV for NavSol

- Usage of Galileo SVs limited by availability of HAS correction data
- Availability of HAS correction data depends on transmission scheme and number of spatial segments + number of serviced Galileo SVs per segment
- Simulated validity of clock correction: 10s
- Simulated validity of orbit correction: 60s
- 3 spatial segments simulated
- 5 uplinks per spatial segment
- Correction data of 8 GPS SVs and 8 Galileo SVs per spatial segment transmitted

8 | Galileo HAS Based Precise Point Positioning of LEO satellites | RUAG Space | Navitec, 2022

Together
ahead. RUAG

HAS補強メッセージ

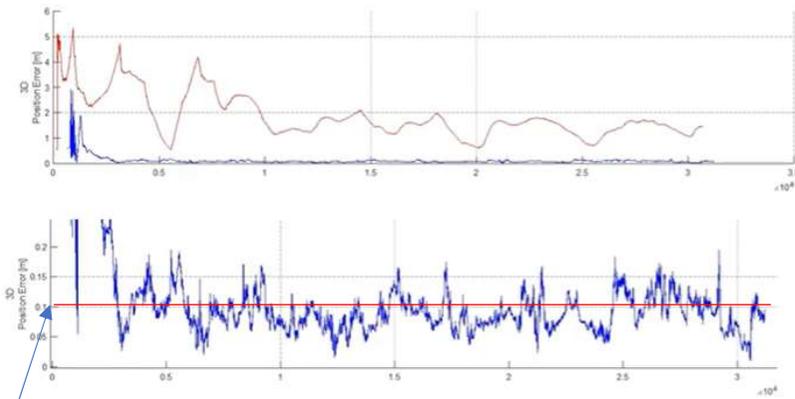
- デコードプログラムの検証
- HASのテストデータを用いて地上で検証済み。
- オンボード航法アルゴリズムの検証
- Spirent simulator + HMGT (HAS補強メッセージ生成)
 - 補強メッセージUplink地上局: 3か所
 - 5機のGalileo衛星から配信

JAXA 実験結果 (約9時間のデータ)

Explore to Realize

Algorithm evaluation Position performance

電離層フリー線形結合



Red ... Standard PODRIX SW
Blue ... PPP4PODRIX SW

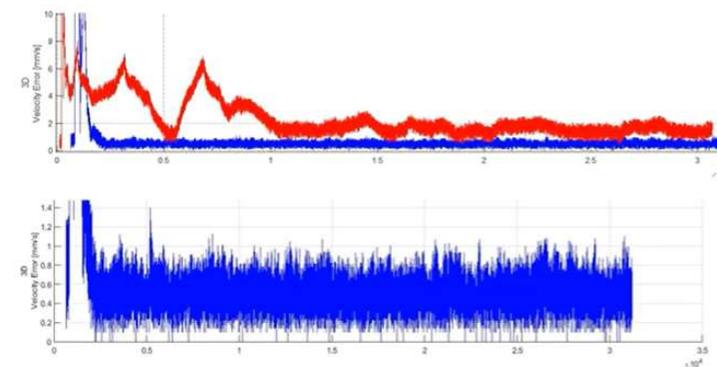
PODRIX SW:
Pos. error
• 1.31m 3D RMS
• 2.04m 3D 3σ

PPP4PODRIX SW:
Pos. error
• 0.09m 3D RMS
• 0.17m 3D 3σ

10 | Galileo HAS Based Precise Point Positioning of LEO satellites | RUAG Space | Navitec, 2022

Together
ahead. **RUAG**

Algorithm evaluation Velocity performance



Red ... Standard PODRIX SW
Blue ... PPP4PODRIX SW

PODRIX SW:
Vel. error
• 1.5mm/s 3D RMS
• 2.6mm/s 3D 3σ

PPP4PODRIX SW:
Vel. error
• 0.5mm/s 3D RMS
• 1.0mm/s 3D 3σ

11 | Galileo HAS Based Precise Point Positioning of LEO satellites | RUAG Space | Navitec, 2022

Together
ahead. **RUAG**

10 cm

出典



On Orbit Experimentation of QN400 Software Defined Radio Receiver

Francesco Longhi, Fabio Bernhart, Marco Bernasconi, Marco Bergamini, Samuele Ferraresi
Qascom Srl

5-7 April 2022
NAVITEC

Trust in Mine, Control in Matter.

INTRODUCTION
GNSS Space Receiver Trends

- 'New Space' is defining new drivers for the design of GNSS space receivers' electronics and software:
 - The use of Commercial Off the Shelf (COTS) hardware, often equipped with non-space-graded components,
 - The use of Software-Defined Radio (SDR) that offers features such as re-programmability or self-healing capabilities

- GNSS SDR processing expands the capabilities to experiment in space new applications for positioning, security and science

Slide 2 UNCLASSIFIED – FOR PUBLIC USE
All rights reserved © 2022 QASCOM

Trust in Mine, Control in Matter.

INTRODUCTION
QN400-Space Roadmap

- In the context of the EU-funded ENSPACE project, Qascom design and developed the QN400-Space receiver.
- QN400-Space, at the end of the project, was integrated in a 3U CubeSat and tested in a real LEO environment
- The spaceborne receiver is going through a process of upgrade within the GEYSER project

GARISS (2016-2018)
QN400 L5/E5a Core

- SW only (for JPL SDR)
- Dual Constellation GPS and Galileo
- Single frequency L5/E5a
- Apps: Navigation & Timing

ENSPACE (2018-2020)
QN400 L1/E1 Core

- SW only (for Zynq)
- Compatibility with GomSpace SDR (COTS)
- Dual Constellation GPS and Galileo
- Single Frequency L1/E1
- Apps: Navigation & Timing, POD, AD, Security

GEYSER (2020 - ...)
QN400 L1/E1 & L5/E5a Core

- New Hardware SDR Board
- Dual Constellation GPS and Galileo
- Dual Frequency L1/E1 + L5/E5a
- Apps: Cybersecurity, Robust PNT, Dual Frequency POD, High Dynamics

Slide 3 UNCLASSIFIED – FOR PUBLIC USE
All rights reserved © 2022 QASCOM

欧米のプロジェクトでは、宇宙用GNSS受信機の民生品利用、SDR化が進む。
(GARISS→ENSPACE→GEYSER)

QN-400はQascomが設計。
CubeSatに搭載し、LEO上で試験実績あり。

QN-400の紹介

QN400 SPACE RECEIVER

QN400-Space Receiver versions

- QN400-Space v1.0
 - RS422 D-Sub 9 and Ethernet D-Sub 15 connectors
 - Reference clock input
 - GAL E1BC, GPS L1
 - High dynamic navigation
 - Snapshot processing capability
 - Software based radiation resiliency
- QN400-Space for Cubesat (GomSpace SDR)
 - Form factor suited for cubesats
 - CSP implemented
- QN400-Space v2.0 (Designed for small-sats)
 - New HW boards
 - GAL E1/E5, GPS L1/L5
 - Rugged custom enclosure
 - Cybersecurity, Robust PNT, High accuracy POD





Slide 5

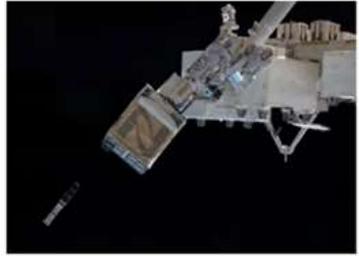
UNCLASSIFIED - FOR PUBLIC USE
All rights reserved © 2022 QASCOM

- ・GPS, Galileo二周波対応、
- ・疑似距離、搬送波、ドップラー出力

BOBCAT-1 MISSION AND LAUNCH

Overview

- Mission led by Ohio University
- 3U CubeSat with:
 - QN400-Space GNSS receiver
 - NovAtel OEM719 GNSS receiver
 - On-Board PC
 - AntCom G5ANT-1.9AS-1-3 patch antenna
- Launched the 3rd of October 2020 with the NGI Antares rocket to the ISS
- Deployed on the 5th of November by the NASA astronauts



BOBCAT-1 Deployment (courtesy of NASA)



Bobcat-1 ground track (Jan-2022)

Slide 10

UNCLASSIFIED - FOR PUBLIC USE
All rights reserved © 2022 QASCOM

CubeSatで2020年に試験(NovAtel受信機も搭載)
アンテナはAntCom社のパッチアンテナ

- PPP、QZSSの視点から見たソフトウェア受信機(SDR)の意義
 - QZSSのL6測距信号の利用可能性
 - 低軌道衛星の軌道推定(PPP-Space)とSDR
 - 干渉、マルチパス、アレイアンテナ



ロバスト高精度測位技術の紹介

- HARSH project
- Meta-signal(同じ衛星の異なる周波数の信号)の利用
- Side band signal processing

**Innovative Technologies
for Robust High Accuracy
Position in Harsh
Environment (HARSHTAG)**

NAVITEC 2022

© GMV Property – 2022 - All rights reserved



The HARSHTAG Project

ESA Activity: demonstrator for proof of concept of innovative GNSS techniques, targeting high accuracy and availability in urban environments.

The set of techniques implemented cover:

- Multi-antenna processing, boosting GNSS MIMO applications.
- Multi-constellation and multi-frequency GNSS signals.
- Exploitation of wide-band (meta-)signals with high Gabor bandwidth.
- Unambiguous Position Estimator for false lock mitigation in multi-peaked ACF.
- Observation Pre-Processing, including pre-filtering and FDE.
- GNSS/INS Sensor Fusion.

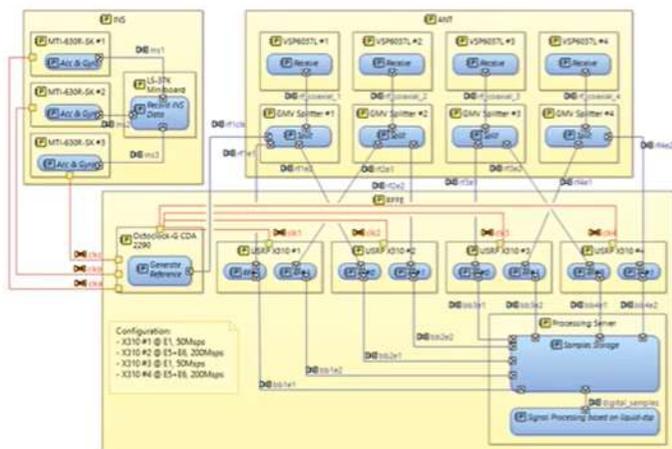
To support all these features, a state-of-the-art recording platform has been built, allowing the recording of live GNSS signal in different environments and use cases.

- ESAのプロジェクト
- For Urban positioning
- 最新のロバストなGNSSの手法をすべて実装し、実証するプロジェクトの様。
後に記載する実験装置もすごい。

JAXA Explore to Realize 移動体実験のプラットフォーム

Platform Design

Recording Platform (II)



© GMV Property - 2022- All rights reserved

gmv

データ収録装置(車に積む)
GNSSアンテナ×4、IMU×3、SDR(USRP X310)×4、
データ同期:1 pps(10 MHz)を入力



後処理計算機(64コアCPU、GPU NVIDIA)
→マルチアンテナ・広帯域信号処理が可能。

Building Blocks Description

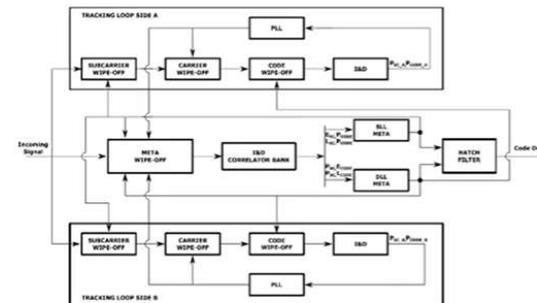
CORR / XRC Software Receiver (I)

Module	Techniques
Aiding	Expected Doppler provided to Acquisition through RINEX/TLE + rough PVT
Acquisition	Parallel Code Phase Search
Tracking	PLL-Aided DLL-based code tracking DLL+SLL Wide-band Meta Signal Tracking
C/N0 Estimator	SNV
Reacquisition	Parallel Code Phase Search

- Software Receiver: GMV's **XRC**.
- State-of-the-art Tracking Loops for Galileo and GPS modulations.
- Software in **Python** for modularity and easy prototyping of techniques and new signals.
- Novel Technique implemented the **SLL+DLL Meta-signal processing**.

Building Blocks Description

CORR / XRC Software Receiver (II)



- **Meta-signal tracking** based on subcarrier and code tracking, SLL+DLL.
- Providing an accurate (SLL) but unambiguous (DLL) estimation via a hatch filter combination.
- **Proof of Concept** with E5aQ+E5bQ. To be further explored via the E5bQ+E6C tracking.

© GMV Property – 2022- All rights reserved



© GMV Property – 2022- All rights reserved



Multi-GNSSは
GPS, Galileoのみの様。
SLL+DLLが特徴。

Meta-signal tracking:

同じ衛星の異なる周波数(E5a、E5b等)の信号について、サイドローブの信号を活用。
信号の帯域幅がより広げられ、よりマルチパス環境に強い疑似距離が得られるという考え方の様。

関連文献: Synthetic Meta-signal Measurements from Side-band Observations, Inside GNSS, March 31, 2022

Preliminary results

@rural condition, 90 min
 XRC:GPS+Galileo, CNES暦、
 IONEX

Table 2: Summary statistics position error distributions for the XRC and u-blox F9P. All processing was conducted using Doppler smoothing and precise product corrections.

Direction	Receiver/Freqs	Mean (m)	STD (m)	RMS (m)	95% (m)
Horizontal	XRC L1, E1, E5b	+0.603	0.319	0.682	1.098
	F9P L1, E1, E5b	+0.423	0.216	0.475	0.830
Vertical	XRC L1, E1, E5b	-0.326	0.951	1.006	1.945
	F9P L1, E1, E5b	-0.083	0.450	0.457	0.808

Table 3: Summary statistics position error distributions for the XRC E5meta and E5b datasets. All processing was conducted using Doppler smoothing and precise product corrections.

Direction	Receiver/Freqs	Mean (m)	STD (m)	RMS (m)	95% (m)
Horizontal	XRC E5meta	+0.940	0.252	0.973	1.373
	XRC E5b	+0.940	0.278	0.980	1.455
Vertical	XRC E5meta	+0.097	0.722	0.729	1.220
	XRC E5b	+0.096	0.802	0.808	1.449

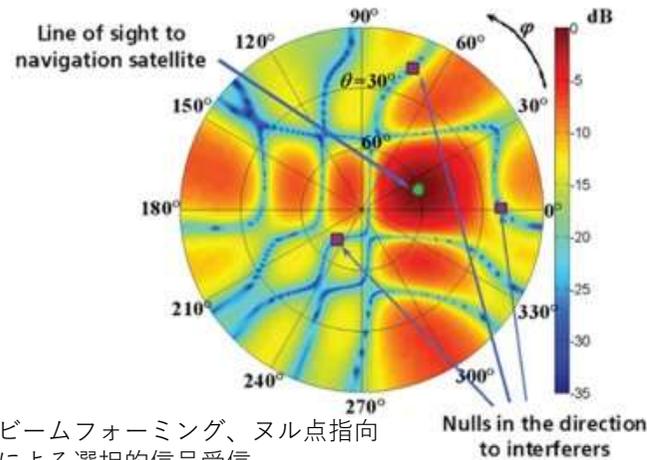
u-blox F9Pのほうが結果は良かった。今後、GMVのソフトは改良やチューニング等を行うとのこと。

アレイアンテナ利用: GALANT project

- DLRのGalileo対応アンテナのデモ開発プロジェクト(2006-2020)
https://www.dlr.de/kn/en/desktopdefault.aspx/tabid-2081/6941_read-9224/
- 2x2のアクティブアレイアンテナを開発
 - 干渉波の方向にヌル点を向けることで干渉を回避
 - マルチパス、反射波を干渉波同様に除外し、マルチパス環境での精度劣化低減にも利用可能
 - 90mmφの小型アンテナの開発にも成功



初期のアレイアンテナ試験の様子



ビームフォーミング、ヌル点指向による選択的信号受信



アレイアンテナの小型化 (フリスビー状の金属性のものはグランドプレーン)

出典: 左・中 https://www.dlr.de/kn/en/desktopdefault.aspx/tabid-2081/6941_read-9224/

右 Stefano Caizzone他, A Miniaturized Multiband Antenna Array for Robust Navigation in Aerial Applications

- 準天頂衛星 = 高仰角
 - ジャミング・スプーフィング脅威の多くは地上の干渉・妨害源から
 - 低仰角で低ゲイン、天頂方向に高いゲインを持つ低コストなアレイアンテナができれば、データセンターや電子商取引用の時刻同期サーバー向けに需要が期待できる



受講生への期待:

低コストなアクティブアレイアンテナ、干渉波抑圧、除外、或いは成型ビームで天頂付近のQZSSを追尾するアルゴリズムの開発

マルチパス、スプーフィング信号の検知

- 通常を受信機出力のみから、マルチパスや反射波、スプーフィング信号を検知するのは困難
- SDR: 相関波形などGNSS信号のデジタル処理を使って、マルチパス、スプーフィング信号検知に活用できないか
- 機械学習との組み合わせ



受講生への期待:

マルチパス、反射波などのNLOS信号検知、スプーフィング信号検知の新しいアルゴリズム開発

将来のGNSS, QZSSへの期待

- 近年、検討されている地上移動体(UAV、自動車等)とLEO間、IoT間でデータ通信を行うサービス構想への貢献。
 - IoT端末の異常等を検知、収集して、ユーザに通知する仕組み
 - 地上移動体の航法の高精度化、収束時間短縮
 - MADOCAのリアルタイム補強情報の活用、高度化
 - QZSSの補完信号の活用
 - 干渉、マルチパス対策、Alternative PNT
 - クラウド上で測位計算、信号処理を処理→端末上で低消費電力で測位が可能
 - 端末の計算機性能・サイズに応じた精密測位アルゴリズム
- ユーザの利用ケースに応じて、各測位方式(RTK, PPP-RTK, PPP/PPP-AR等)、GNSSの品質検定アルゴリズム等を最適に切り替えて測位する必要がある。

先行文献・発表

- Xuan Zou , Weiming Tang , Chuang Shi and Jingnan Liu, Instantaneous ambiguity resolution for URTK and its seamless transition with PPP-AR, GPS solution 2015.
- 寺尾和洋((株)コア), RTK-CLAS、RTK-MADOCA自動切替機能搭載GNSS受信機の開発, GPS/GNSSシンポジウム2021