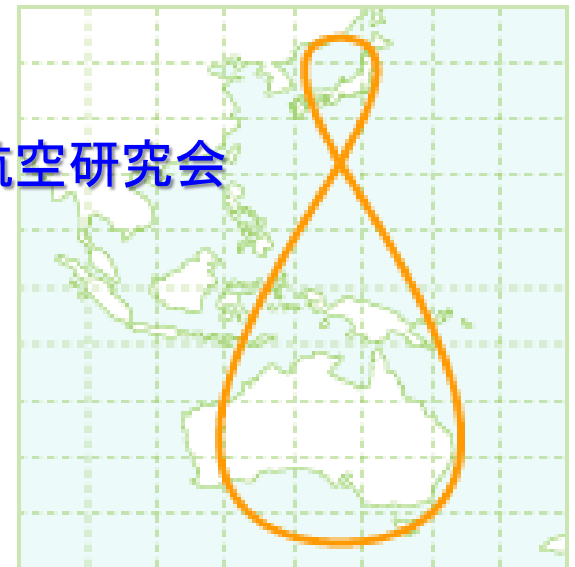




準天頂衛星システムによって向上する ドローンの測位性能

於 平成 29年 10月 21日
日本航海学会 第137回 講演会 宇宙航空研究会

AAI-GNSS 技術士事務所
荒 井 修



1. 測位性能の向上

- GPS (GNSS) 単独の性能を準天頂衛星システム (QZSS : Quasi-Zenith Satellite System)で向上
- 性能は
 - 精度 (Accuracy)
 - 測位結果の正しさ
 - QZSSでは誤差補正データを提供 (補強機能)
 - 利用率 (Availability)
 - 一定の水準の測位が行える確率
 - QZSSではGPSと同じ信号を送信することで、測位に使用できる衛星数を増やし、利用率の向上を図る (補完機能)
 - 完全性 (Integrity)
 - 情報の信頼性に関する指標の提供 (補強機能)
 - に分類できる

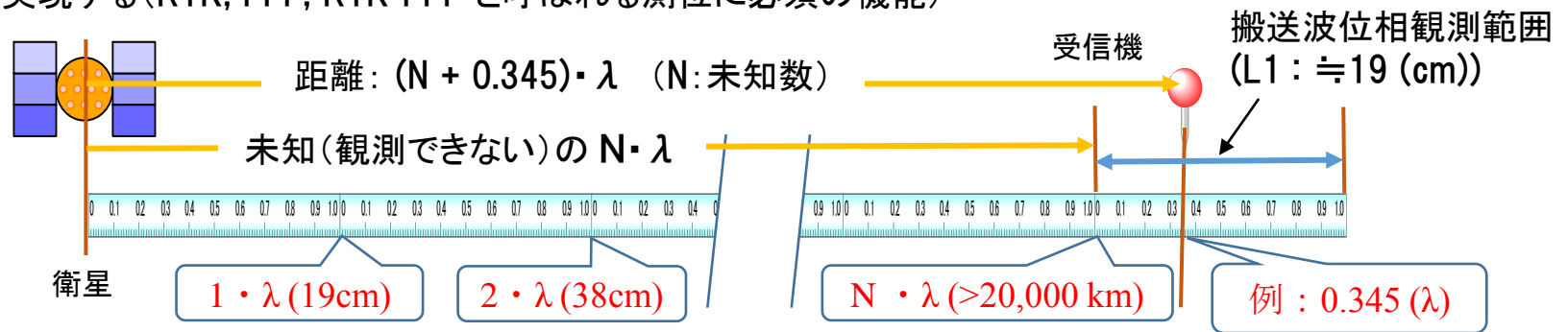
2. 準天頂衛星システムが提供する情報

周波数帯 (MHz)	信号名 (メッセージ)	機能 (PS-QZSS-001)	測位分類 (ユーザインタフェース仕様書)	OSR /SSR
L1 (1575.42)	L1C/A	衛星測位サービス GPS 補完	単 独 (IS-QZSS-PNT-001)	—
	L1C			—
	L1S	サブメータ級 測位補強	D.GPS (IS-QZSS-L1S-001)	OSR
	L1Sb *	SBAS (MSAS) 補強	WADGPS (MSAS)	SSR
L2 (1227.60)	L2C	GPS 補完	単 独	—
L5 (1176.45)	L5	GPS 補完	(IS-QZSS-PNT-001)	—
	L5S **	測位技術実証	WADGPS (二周波)	SSR
L6 (1278.75)	L6 (L6D)	センチメータ級 補強 (CLAS)	RTK-PPP (IS-QZSS-L6-001)	SSR
	L6 (L6E)	センチメータ級 補強 (実験) MADOCA Product 配信***	RTK-PPP (SLI-CLAS-E-001)	SSR

*: 静止軌道衛星(3号機)MTSATの機能、 **: 2号機以降、***: 現状

3. 測位精度向上(搬送波位相の利用)

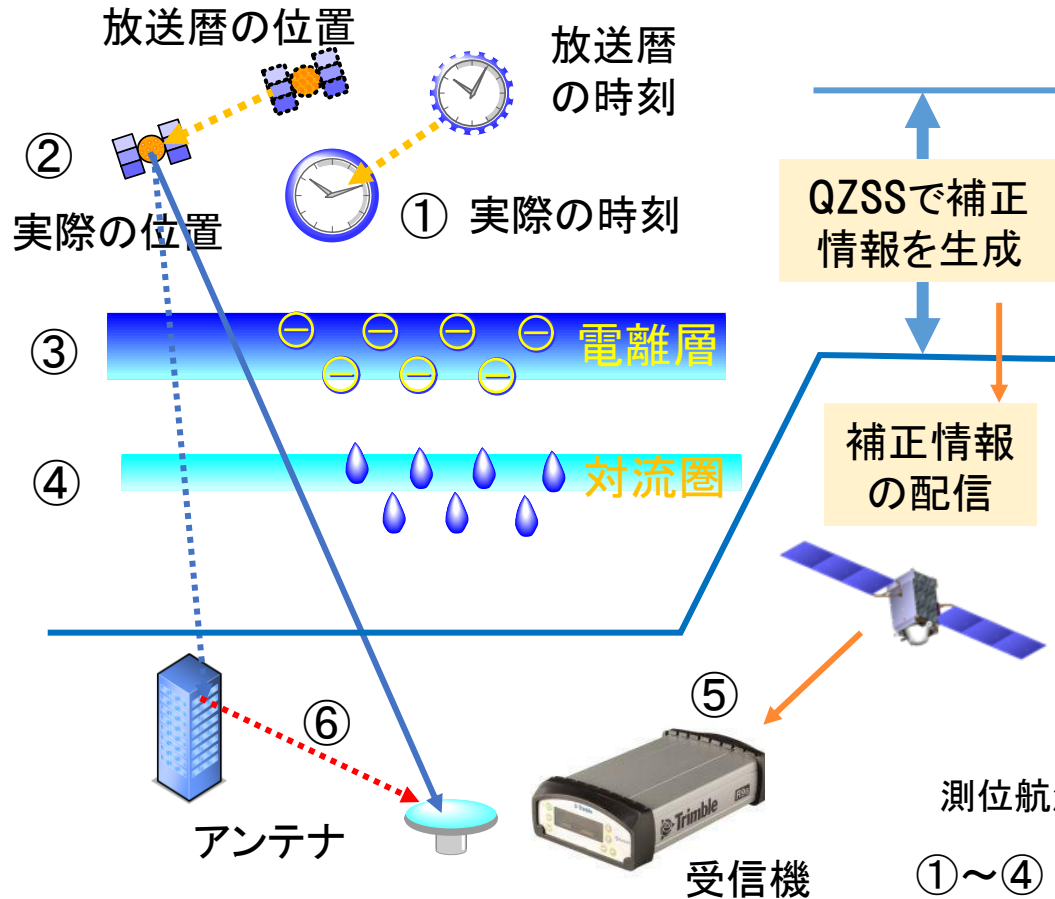
- 測位には衛星と受信機間の距離の観測データが必要
 - GNSS 受信機から擬似距離と搬送波位相の観測データが得られる
 - 擬似距離: 観測精度 数十(cm)~数(m)、搬送波位相: 数(mm)←高精度測位にしたい
- 搬送波位相は高精度。但し、衛星から受信機までの距離の内、最後の1波長の範囲の距離が観測可能で、未知数“N”を解かないと、位置の決定に必要な全体の距離は不明
- 測位演算の一部としてこの値を解く機能を持たせることで、搬送波観測データを用いた高精度測位を実現する(RTK, PPP, RTK-PPP と呼ばれる測位に必須の機能)



“N”が既知となれば、衛星と受信器間の距離を誤差数 (mm) で観測できる

- “N”を解くためには、各種の誤差成分を取り除く必要がある
 - GNSS から得られる情報のみでは解けない。補正情報を必要とする
 - “N”を解くには時間を要する。此の時間を「初期化時間」と呼んでいる
 - “N”が実数で得られた測位結果が実数(フLOAT)解、整数化した結果が整数(フィックス)解

4. 伝搬経路の誤差、測位精度向上



誤差要因	誤差量
① 衛星時計	~2 m (rms)
② 衛星軌道	~2 m (rms)
③ 電離層遅延	2~10 m
④ 対流圏遅延	2.3~2.5 m
⑤ 受信機雑音 (P.R. / C.P.)	0.25~0.5 m (rms) 1~2 mm (rms)
⑥ マルチパス (P.R. / C.P.)	0.5~1 m (rms) 0.5~1 cm (rms)
⑦ DOP	1~6

P.R.: 擬似距離、C.P.: 搬送波位相

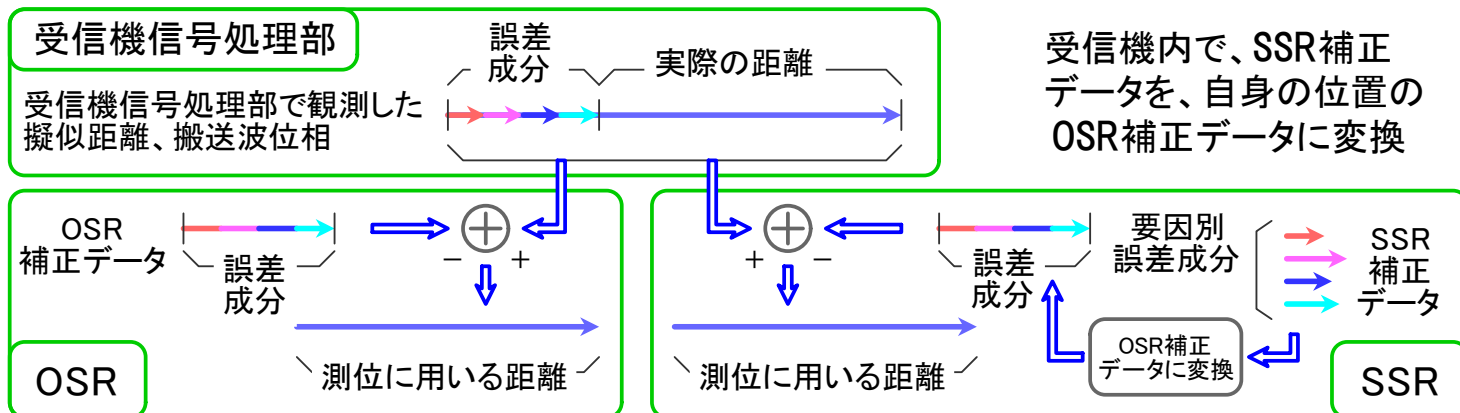
測位航法学会“精説 GPS 第二版” 表5.4 抜粋

- ①~④ : QZSSが補正データを提供
- ⑤~⑥ : ユーザ側で対処
- ⑦ : 衛星数と配置で決定される

これらの誤差を除去することで、測位精度の向上を図る

5. 誤差補正方法 (OSR / SSR)

- OSR (Observation Space Representation: 観測空間表現)
 - 全ての誤差成分を観測データ(擬似距離、搬送波位相)の次元で提供
 - 測位精度向上の基本。ディファレンシャル GPS、RTK などが OSR に分類される
 - 基準局と、利用者局の距離(基線長)が長くなると、誤差補正効果が低減
- SSR (State Space Representation: 状態空間表現)
 - 誤差成分を要素毎に分解して提供
 - 夫々の利用者の位置での衛星軌道、時刻、電離層、対流圏の誤差が推定できる
 - 測位精度の向上と広いサービスエリアが実現できる
 - 最初に実用化されたのは、航空機用の WAAS(MSAS)
- OSR/SSR の観測データ補正処理



6. CLAS 概要

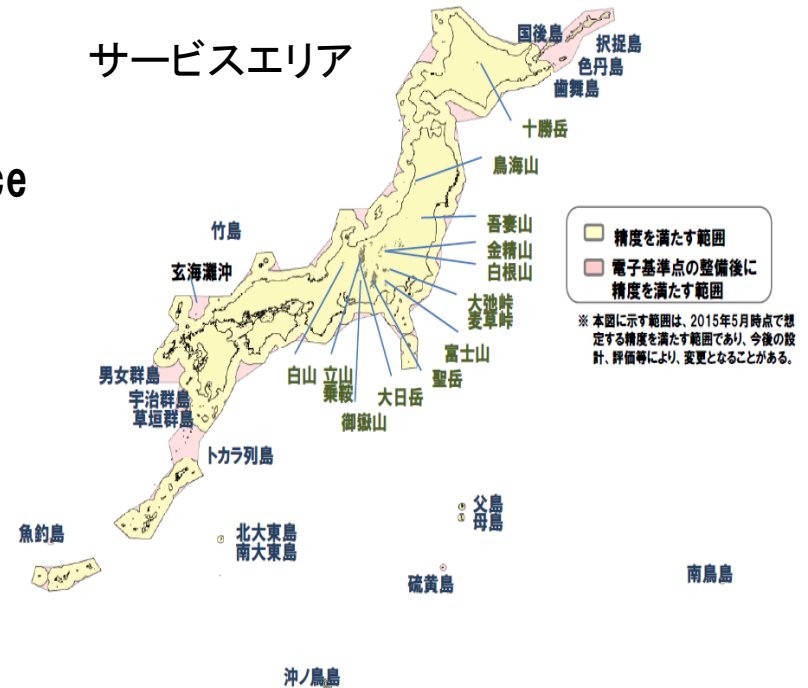
CLAS : Centimeter Level Augmentation Service

項目	内容
補強対象信号	GPS:L1 C/A, L1C, L2P(Y), L2C, L5 QZSS:L1 C/A, L1C, L2C, L5 Galileo:E1B, E5a GLONASS:L1 (CDMA), L2 (CDMA)
初期化時間	≤ 60 sec (95%)
完全性情報	SSR URA及びAtmospheric Quality Indicator
メッセージフォーマット	RTCM SC-10403.3

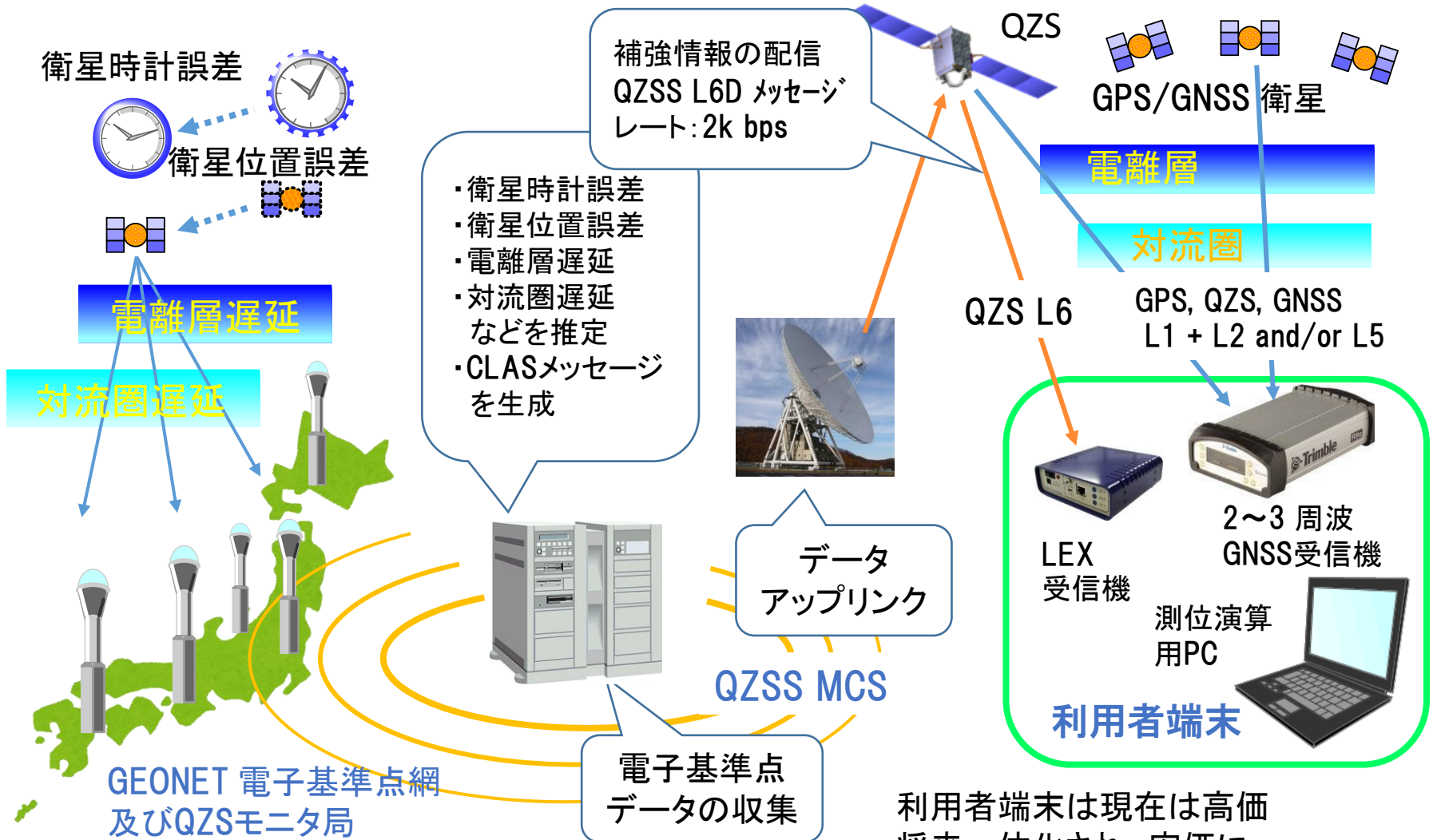
種別	測位精度	
	水平	垂直
静止	≤6 cm (95%) (3.47 cm (rms))	≤12 cm (95%) (6.13 cm (rms))
移動体	≤12 cm (95%) (6.94 cm (rms))	≤24 cm (95%) (12.25 cm (rms))

Qasi-Zenith Satellite System Performance Standard (PS-QZSS-001)
Draft Edition (H29.07.24)

サービスエリア



7. CLAS システム

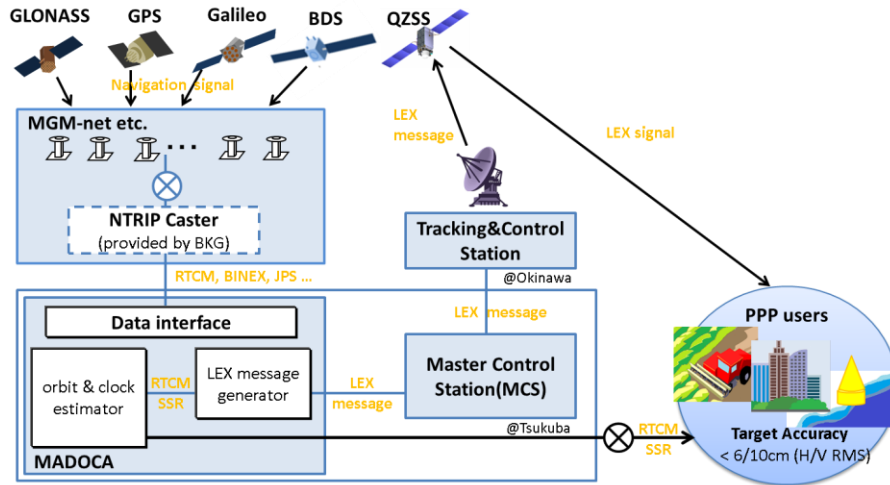


利用者端末は現在は高価
将来一体化され、安価に

8. MADOCA 概要

- **MADOCA: Multi-GNSS Advanced Demonstration tool for Orbit and Clock Analysis**
 - JAXA (宇宙航空研究開発機構) 開発の衛星精密軌道、クロック推定ソフトウェア
 - 全世界に展開したモニタ局で観測した GPS/GNSS 衛星観測データから、衛星軌道、時計誤差などを推定 (観測データの誤差をcmレベルに抑える)
 - これらの結果を「成果物」(Products)と呼んでいる
- **MADOCA Productsを用いると、高精度測位が可能になる**
 - MADOCA Products によって、衛星の軌道、時計誤差を補正
 - 受信機側で、電離層、対流圏などの誤差を推定
 - 結果として、衛星と受信機間の距離を高精度で観測可能で、cmレベルの測位精度を得ることができる
 - PPP(Precise Point Positioning): フロート解を得る
 - PPP-AR(PPP-Ambiguity Resolution): 整数解を得る(より長い初期化時間を要する) (現時点の GNSS の測位技術の中で最も難易度が高い)
- **システムの構成は CLAS に類似するが、**
 - モニタ局は全世界に展開(H28年3月25日時点で98局が運用中)
 - サービスエリアは全世界
 - 位置のみではなく、時刻同期にも利用できる(CLASに時刻同期は期待しにくい)

9. MADOCA 評価結果

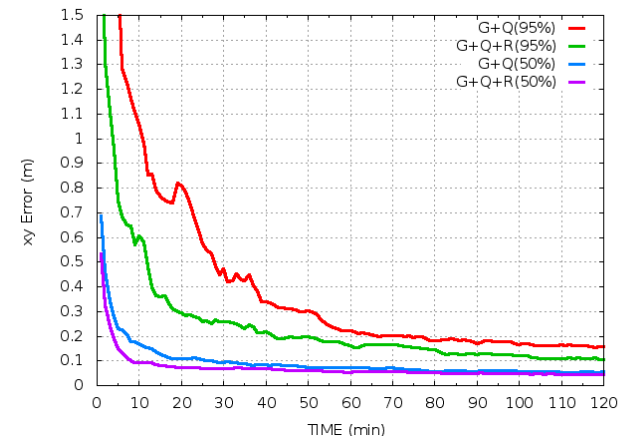


MADOCA 成果物の精度

成果物	オフライン		リアルタイム	
	GPS	GLO /QZS	GPS	GLO /QZS
軌道	3 cm	7 cm	6 cm	9 cm
時計	0.1 ns	0.25 ns	0.1 ns	0.25 ns

MADOCA を用いたReal-Time PPP Service の構成

- リアルタイムの二周波PPP: 定点観測で水平・垂直とも10cm(rms)以下の精度を達成
- CLAS に比べ初期化時間が長い
 - 現状:30~40分、要求:1分以内
- ローカル補正情報の利用
 - 地上回線でローカルに配信



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

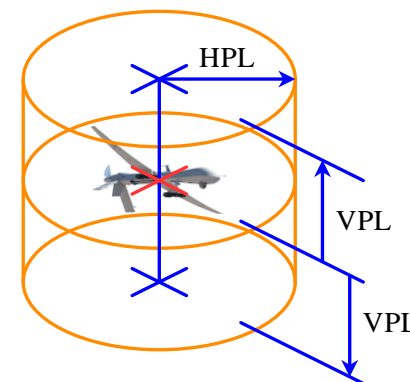
MADOCA Products を用いた、筑波に於ける PPP 測位結果をリアルタイムで表示している

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

10. 課題 - 1 測位結果の信頼性

- 測位結果の信頼性

- 測位結果の誤差は 2drms
(2 x distance root mean square) 等で評価される
 - 2drmsは95%の結果が収まる範囲を示しているに過ぎない
- より高い率で、誤差の範囲を示す必要がある
 - 航空機用のGPS受信器ではHPL, VPLが出力できる
 - 各補正情報にはその誤差の推定値が付属
 - 測位結果の誤差を計算し、HPL, VPLに換算
 - HPL:Horizontal protection level (水平保護レベル)
 - VPL:vertical protection level(垂直保護レベル)



HPL、VPLを上回る誤差を生じる率は非常に低い(0.0000001/hour)

((WAAS) PERFORMANCE STANDARDS 1st ed.)

CLASが提供する完全性情報 ($P_{TTA} \leq 1 \times 10^{-5}$ [/ hour])

(1) Alert flag	1-bit flag
(2) SSR RA	6-bit index to URA [mm]
(3) Atmospheric Correction Quality Indicator	STEC: 1σ of TECU, Tropo: 1σ [m]

Seigo Fujita et al. “Design of Integrity Function on Centimeter Level Augmentation Service (CLAS) in Japanese Quasi-Zenith Satellite System” ION GNSS 2016

11. 課題 - 2 機器の信頼性

• GARMIN社の二つの受信器

General aviation 向けGPS受信器

GPS TSO'd to C146c authorized
GPS WAAS-certified (Gamma-3)

\$ 11,600.00



GTN 650

航空機の航法に使用できるGPS受信機は厳密に要求仕様が定められており、米国ではFAAの認証を必要とする

Premium GPS navigator
with smart features

Garmin DriveLuxe 51 LMT-S



\$ 329.99

機能・性能の保証 : ???

機能性能に対する要求: RTCA DO-229D
ソフトウェア信頼性: RTCA DO-178B

ドローン用のGNSS受信機に要求される信頼性は？

12. 課題 - 3 妨害波

妨害波による障害の例

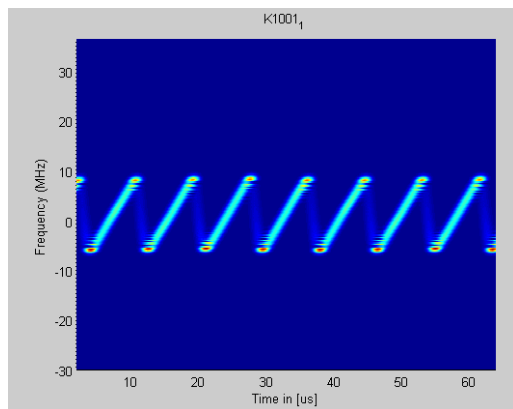
発生日	2010/8/23-26	2011/3/4-14	2012/4/28-5/13
場所	発生:開城市(北朝鮮) 影響:金浦市、坡州市、江原道		
影響	携帯電話基地局:181 航空機 :15 戦艦 :1	携帯電話基地局:145 航空機 :106 船舶 :10	航空機:1,016 船舶:256



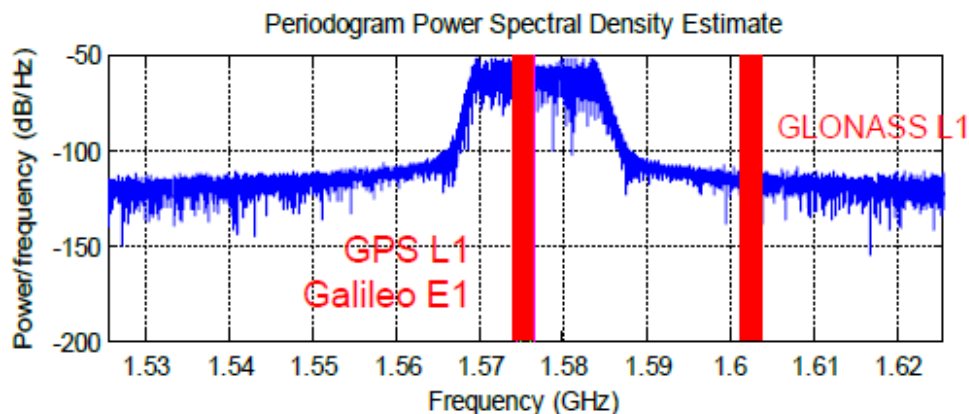
妨害波発生器の例

製造・販売、使用はすでに多くの国で禁止されている

“Interference Detection and Mitigation and GNSS Jammers” ION GNSS+ 2016 U.S. Coast Guard



妨害波の周波数変化の例



妨害波の周波数分布の例

故意の妨害波(広帯域)の影響を除くのは容易ではない

“Experimental Evaluation of the Impact of Jamming on Maritime Navigation” ION GNSS+ 2016 Institute of Communications and Navigation Nautical Systems Department

13. 課題 - 4 欺瞞 (Spoofing) 信号 - 1/2

- 欺瞞信号によるものと考えられる事例
- 2011.12.4 米無人偵察機RQ-170 Sentinelは、偽のGPS信号に騙されてイラン国内に着陸させられた
 - https://en.wikipedia.org/wiki/Iran%E2%80%93U.S._RQ-170_incident
- 7月22～24日にかけて黒海の多くの船舶から、GPSの測位結果が異常、空港に位置しているとの報告
 - Oct. 11 2017 GPS World
 - <http://gpsworld.com/spoofing-in-the-black-sea-what-really-happened/>



イランに着陸した米無人偵察機

- シミュレータなどで実際の衛星を模擬した(位置は異なる)信号を生成し、送信すると、信号レベルが衛星より高ければ、受信機が偽の信号の追尾を優先し、誤った位置情報を入力する

GNSS シミュレータの例



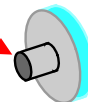
Real GNSS Satellite



Rf Amp.



L Band Antenna



???



Spoofing Signal

>\$ 100,000.00

シミュレータは非常に高価

14. 課題 - 4 欺瞞 (Spoofing) 信号 - 2/2

- CPUの高性能化に伴い、信号処理をソフトウェアで行う SDR (Software Defined Radio) GNSS受信機の研究が進んでいる(同時にopen source化の流れ)
 - ソフトウェアで拡散コードの複製を生成する...衛星の信号と同じものができる...
- 受信機の逆の発想で、SDR GNSS シミュレータの研究もされつつある
- 近年ソフトウェア無線の開発用機材が安価に入手できるようになってきた(\$数十~\$数百)
- SDR GNSS シミュレータは安価に構成可能

Blade RF x40



An open source SDR platform

- 300MHz - 3.8GHz RF frequency range
- Independent RX/TX 12-bit 40MSPS quadrature sampling
- 16-bit DAC factory calibrated
- 38.4MHz +/-1ppm VCTCXO
- On-board 200MHz ARM9 with 512KB embedded SRAM (JTAG port available)
- On-board 40KLE or 115KLE Altera Cyclone 4 E FPGA

- 研究の動機に Pok'emon Go がある

<https://hackaday.com/2016/07/19/pokemon-go-cheat-fools-gps-with-software-defined-radio/>

15. まとめ

- 準天頂衛星システムによる補完、補強信号によって
 - 高精度測位に必要なデータが無料で提供される(世界初)
 - ドローンの測位性能(精度、利用率、完全性)は大きく向上できる
 - 物品配送、農業、設備監視・点検 など利用範囲拡大
 - 社会に大きな変化をもたらす可能性がある(ビジネス面の期待も大)
- 課題として
 - 受信機の小型、軽量、安価の実現(現状GLASの受信機は可也高価)
 - 利用者側の機器に対する仕様の明確化や信頼性の確保
 - カーナビや PND (Personal Navigation Device) と同じ作り方で良いのか？
 - 仕様に対して、適合していることの確認は必要ないか？
 - 妨害波や欺瞞信号に対する耐性の強化
 - などが挙げられる

ご清聴ありがとうございました

osamu.arai@jttk.zaq.ne.jp