

LEO衛星の話題と研究室での取り組み

2026/7/15

東京海洋大学 久保信明

現在のLEO衛星の様相

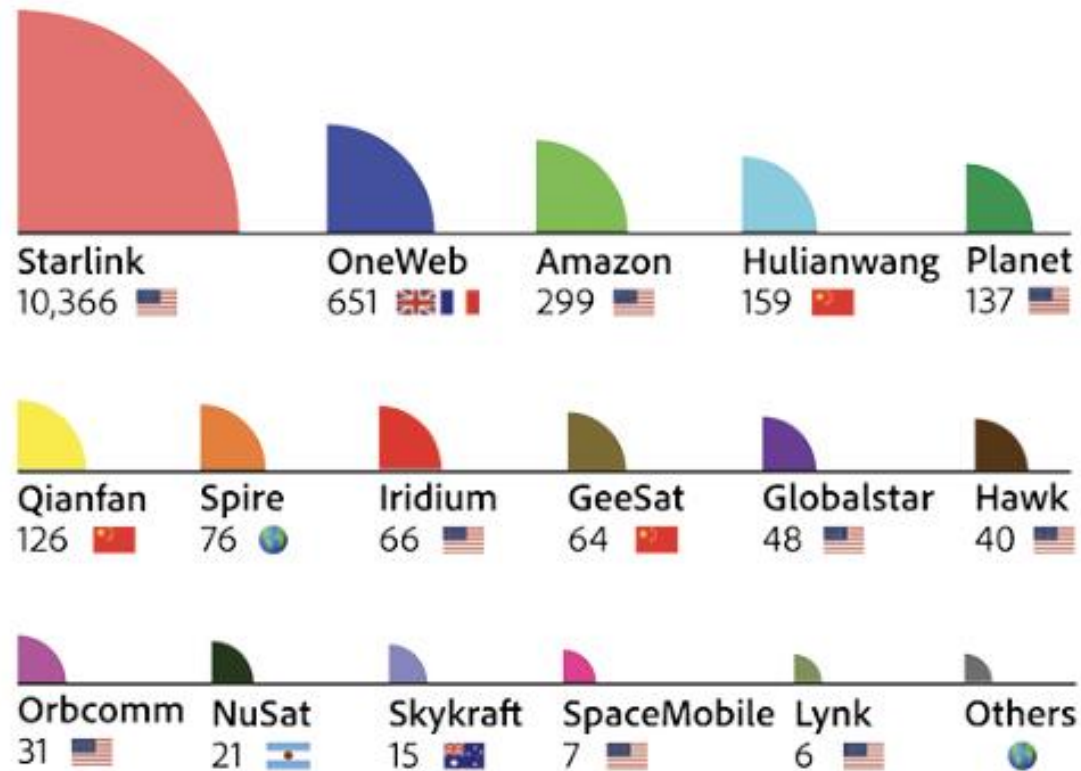
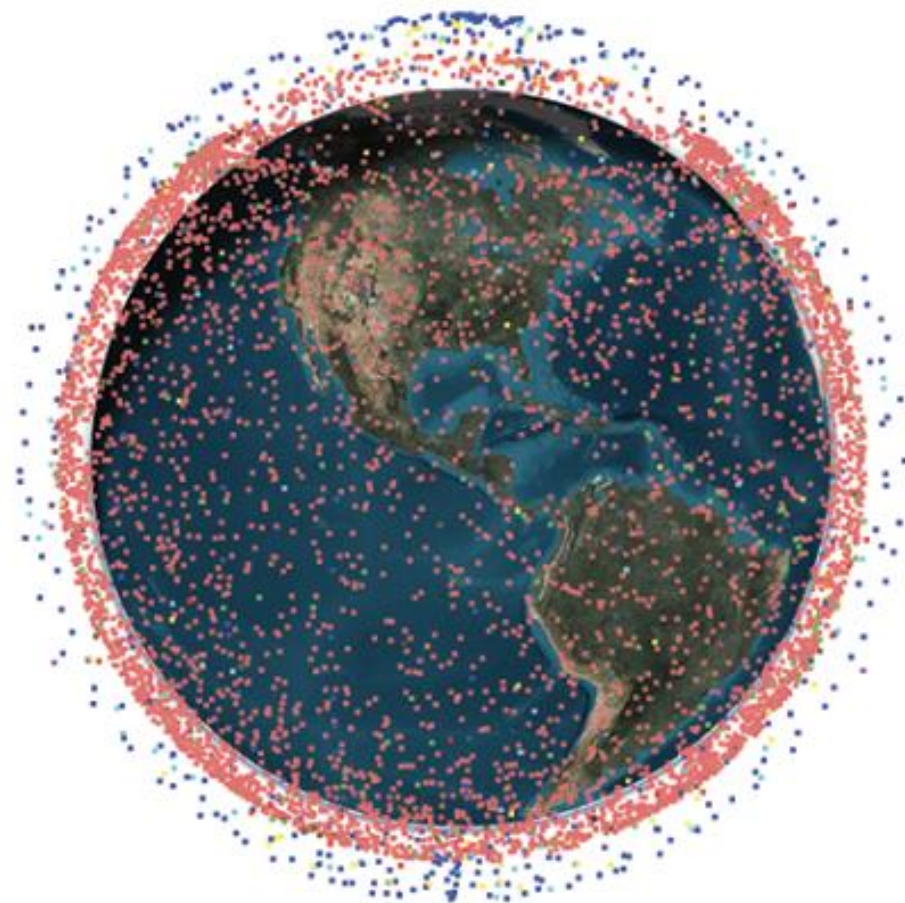


FIGURE 3 Number of LEO satellites per constellation, in descending order, in May 2026 with publicly published ephemerides (from CelesTrak and STK).

Xona Pulsar-0の2025年度の成果

- 商用LEO-PNT衛星「Pulsar-0」を打上げ(実証開始)

2025年6月、商用LEO-PNTに向けた最初の本格実証衛星 Pulsar-0 を打上げ。

- LEOから専用PNT信号を送信

LEO衛星から地上へPNTの専用信号を送信し、実環境での受信・評価を実施。

- 高精度測位への道筋を実証

10 cm級を目指すリアルタイム高精度測位信号の実証を進めると説明。

2026年公開の技術報告では、屋外・屋内におけるメートル級測位結果が提示。

- 認証機能によるスプーフィング対策を実証へ

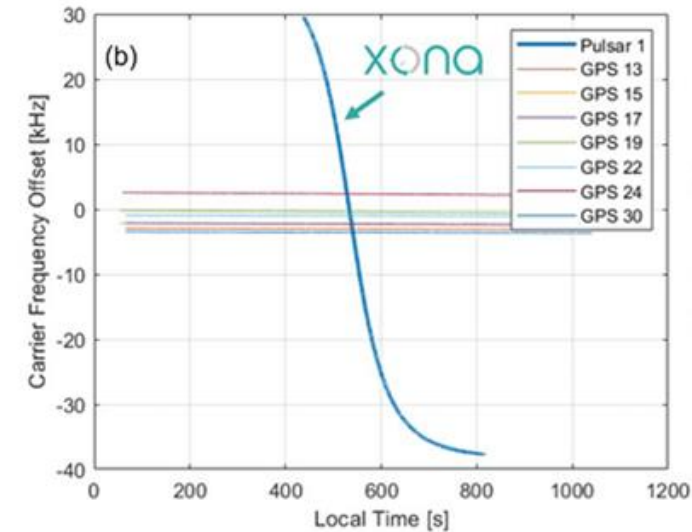
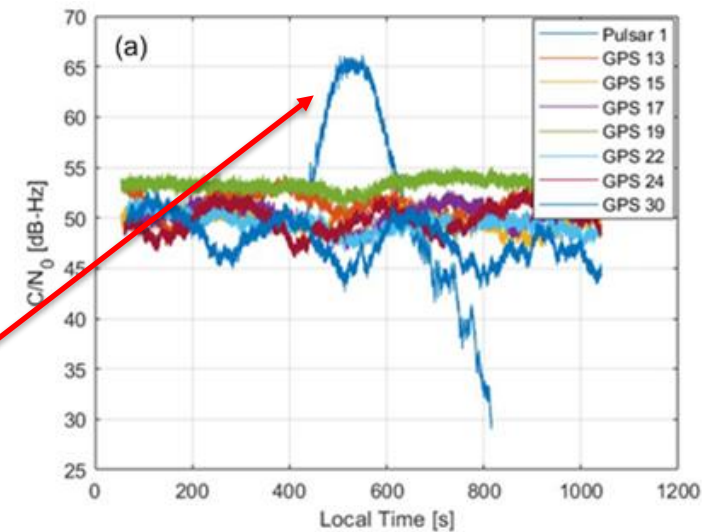
信号の真正性を確認する仕組み、すなわち range authentication を実証対象。

- GNSSより強い受信信号による耐干渉性を確認・訴求

受信信号強度が**従来GPSより約100倍強く設定し**、ジャミング環境や遮蔽環境での実効性を検証中。

- 既存GNSS受信機との共存性・互換性を確認

既存GNSSへの有害な干渉が確認されなかったと報告されている。



2025年9月の米国でのPNT学会

Xonaと村田製作所(最近の記事)

- 村田製作所(フィンランド)とXona Space Systemsは、部品・モジュール技術と、Xonaの低軌道衛星による測位・航法・時刻同期(PNT)サービス「Pulsar」を組み合わせた製品およびソリューションを共同開発するため、覚書(MOU)を締結した。これは、既存の投資関係を商用製品開発へと発展させる提携
- 村田製作所はこれまで、WONDERSTONE Venturesを通じてXonaに出資していた。今回のMOUにより、その関係はさらにハードウェア開発へと進み、高周波通信、センサー、タイミングデバイス、モジュール設計に関する能力と、XonaのLEOベースのPNTインフラを組み合わせることになる
- Xonaは今年中にさらに6機のLEO-PNTを追加打ち上げ予定
- 村田製作所のIMUはPNT拠点チームでもメインIMUになるか

Inside LEO: LEO PNT – Why Now? By Zak M. Kassas

- **GNSS干渉は現実の脅威に**

ジャミングやスプーフィングは、軍事分野だけでなく民生分野にも広がり、経済的損失や安全上のリスクを生んでいる。そのため、GNSSが使えない・信頼できない状況に備えた補完・代替PNTが重要になっている。

- **LEO衛星は将来のPNT基盤の有力候補**

低軌道衛星は地球に近く、信号が強く、衛星の動きが速いため、測位に有利な特徴を持つ。GNSSを補完するだけでなく、GNSSが妨害・欺瞞・遮断された場合の宇宙ベースの代替手段となる可能性がある。

- **LEO-PNTは新しい概念ではない**

1960年代の最初の衛星測位システム「Transit」もLEOを利用していた。常時利用には多数の衛星が必要であり、Transitでは測位に1時間以上待つこともあった。

- **現在はメガコンステレーションが状況を変えつつある**

かつては困難だった多数のLEO衛星の展開が、商用メガコンステレーションにより現実的になってきた。その結果、LEOは測位・航法・時刻同期、通信、レジリエンスを支える新たな宇宙インフラとして注目されている。

- **課題も多い**

LEO-PNTには、技術、運用、事業性、制度・規制面の課題が残る。今後は、GNSSを単純に置き換えるのではなく、GNSS、LEO、地上系、センサを組み合わせた強靱なPNTアーキテクチャが重要になる。

ドイツの主要研究者の視点

- 商用化は不可能ではない

ただし、プロフェッショナル市場に絞り、要求性能と価格をきちんと合わせる必要がある。

- LEO-PNTは既存GNSS、PPP、RTK補正サービス、他のLEO-PNTと競争する

つまり「GNSSより少し良い」程度では、有料サービスとしては弱い。

- 高い市場シェアを取るには、**MEO-GNSSを明確に上回る性能**が必要

例えば、高信号強度、耐干渉性、認証、Integrity、冗長性、屋内・都市部での有効性など。

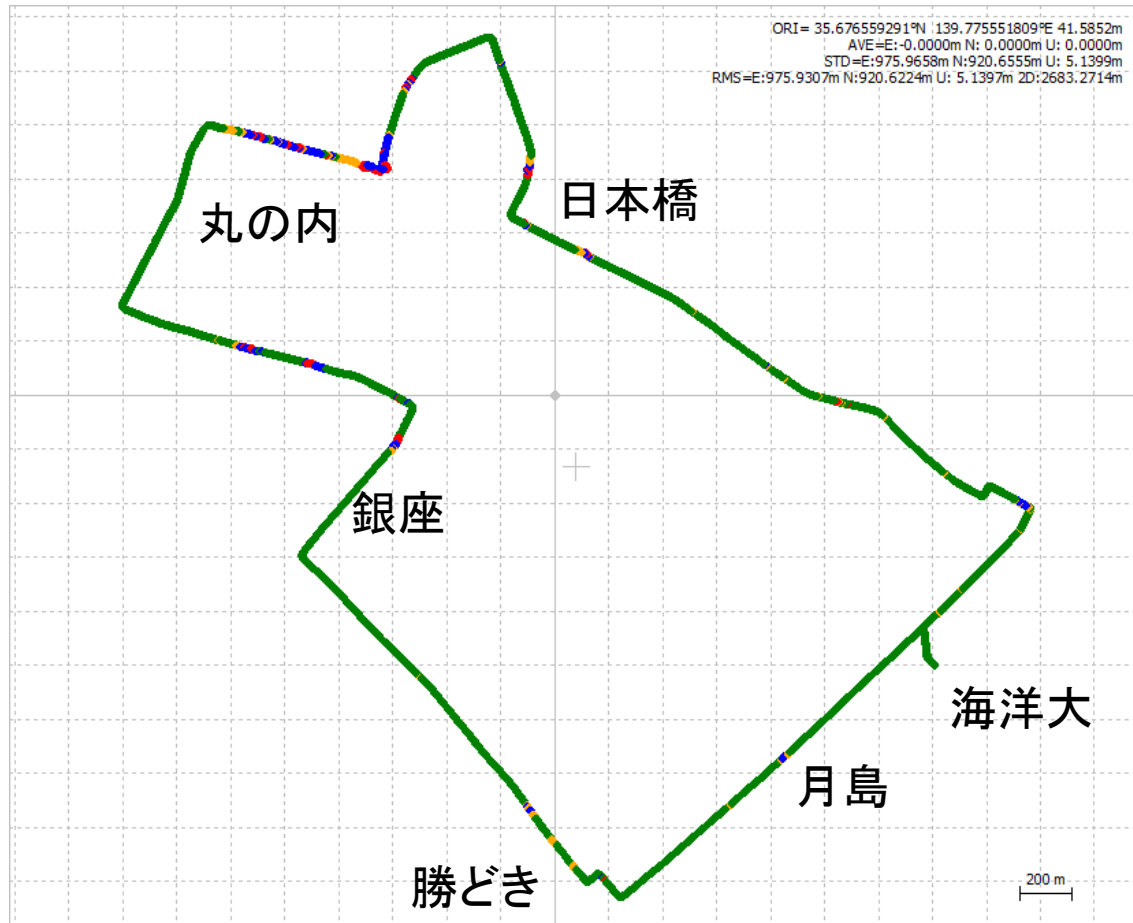
- 最大の課題は技術だけでなく、**マーケティングと顧客獲得(Xona どれだけ投資 開発を進めれるか)**

Trimble RTXが約10万顧客、Tesla FSDが約110万ユーザー、Starlinkが約1000万顧客と示されていた。

LEO-PNT単独で数十万～百万人規模の有料顧客を得ることができるか

GNSSに依存しない、位置情報と時刻情報を提供できるか？

GNSS高精度測位の都市部性能(RTK)



- 2026年7月15日 12～13時
- 現在のGNSSコンステレーション
- 海洋大→日本橋→丸の内→銀座→勝どき→月島→海洋大
- 中層から高層ビル街(道路幅が比較的広い:PNT拠点用コース)
- FIX率が90.7%(市販受信機)
- RTKのミスFIXが非常に少ない
- 観測データ利用で同性能を自前ソフトで達成
- ポケットSDRの受信機としての可能性
- CLAS、PPPでの性能向上(+他センサ)

StarlinkはSpaceX IPOの収益エンジン

- **現状**
SpaceXは2026年6月にIPO。Starlinkは単独上場ではなく、SpaceXの「Connectivity」事業
- **数字のポイント**
2025年のSpaceX売上は約186.7億ドル。そのうちStarlink中心のConnectivity事業が約114億ドル、全体の約6割を占める。加入者は約1,030万人、衛星数は約10,000機規模。
- **評価のポイント**
StarlinkはSpaceXの中で最も収益性が高い事業で、ロケット打上げ・Starship・AI/宇宙データセンター構想を支えるキャッシュエンジンと見られている
- **投資家が期待する成長領域**
家庭用衛星インターネットだけでなく、航空機、船舶、軍・政府、携帯直接通信、IoT、将来的な宇宙通信インフラ
- **リスク**
設備投資が巨大、衛星更新が継続的に必要、各国規制、周波数調整、Amazon Leoなど競合、宇宙デブリ・安全保障上の懸念、巨額の融資、政府・軍に依存

Starlink IPOの本質は、「衛星インターネット会社」ではなく、SpaceX全体の高評価を支える通信インフラ事業への投資か。

Signal Structure of the Starlink Ku-Band Downlink

Publisher: IEEE

Cite This

PDF

Todd E. Humphreys ; Peter A. Iannucci ; Zacharias M. Komodromos ; Andrew M. Graff All Authors

16

Full

Text Views



Starlink衛星(通信用)をGPSにイーロン・マスク協力拒否も独自研究で実現

Abstract

Authors

Keywords

Metrics

Abstract:

We develop a technique for blind signal identification of the Starlink downlink signal in the 10.7 to 12.7 GHz band and present a detailed picture of the signal's structure. Importantly, the signal characterization offered herein includes the exact values of synchronization sequences embedded in the signal that can be exploited to produce pseudorange measurements. Such an understanding of the signal is essential to emerging efforts that seek to dual-purpose Starlink signals for positioning, navigation, and timing, despite their being designed solely for broadband Internet provision.

Published in: IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems (Early Access)

Page(s): 1 - 16

DOI: 10.1109/TAES.2023.3268610

Date of Publication: 24 April 2023

Publisher: IEEE

LEO衛星による測位の発表が
ここ数年、測位系国際学会で増加

→この論文は既存のStarlink
衛星でGPSのような測位利用が
できるのではないかと提案

→2023年時点では拒否

2023年4月

16:19

SpaceX au - au

7月1日(水)

59 21:30 まで



インターネット
クがありません

Bluetooth

モード

Quick Share



16:20



衛星接続

衛星接続について

対象の au アカウントを使用して、衛星経由でテキスト メッセージを送受信できます

仕組み

モバイル ネットワークや Wi-Fi ネットワークが利用できない場合
お使いのスマートフォンを衛星通信に自動接続します。接続を最大限良好にするには、外に出て、空がよく見える場所に移動してください

スマートフォンが衛星通信に接続された後
テキスト メッセージは、緊急サービスを含め誰にでも送信できます。一部のアプリでは、データの使用（上限あり）も可能です。モバイル ネットワークが利用できる状態になると再接続されます。

スマートフォンでサポートされているアプリ

- マップ
- Find Hub
- 緊急情報サービス

16:20



衛星ネットワークを使用中

現在地

ラウンドワンスタジアム 福島店

衛星ネットワークを使用中

- アプリのパフォーマンスが低下する可能性があります
- アプリのパフォーマンスを向上させるには、外に出て、空がよく見える場所に移動してください
- インターネットに接続せずにマップを使用できるよう、モバイルデータ通信または Wi-Fi に次回接続したときに、オフラインマップをダウンロードしてください

閉じる

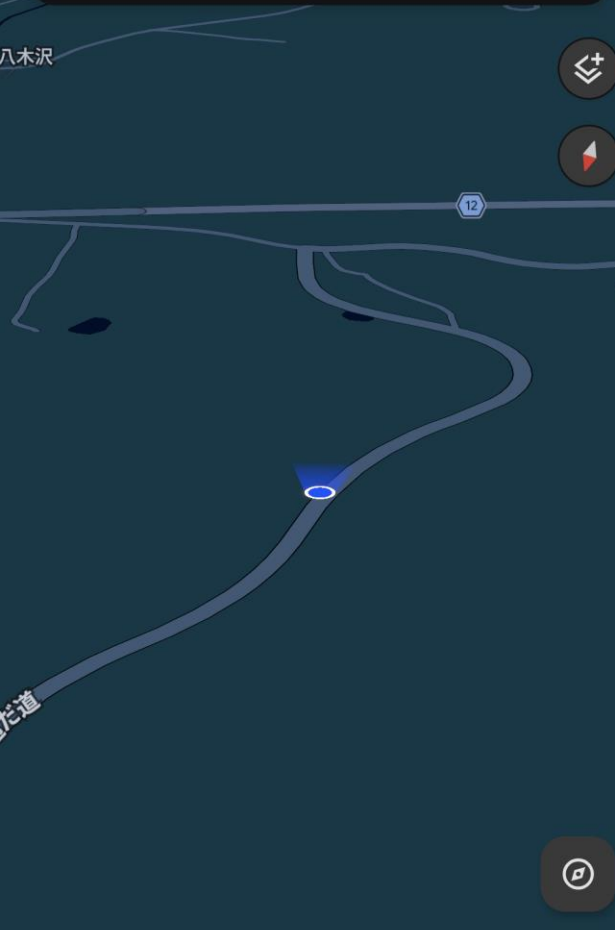
16:21



衛星ネットワークを使用中

現在地

ラウンドワンスタジアム 福島店



車

SpaceX以外で重要な企業(LEO衛星)

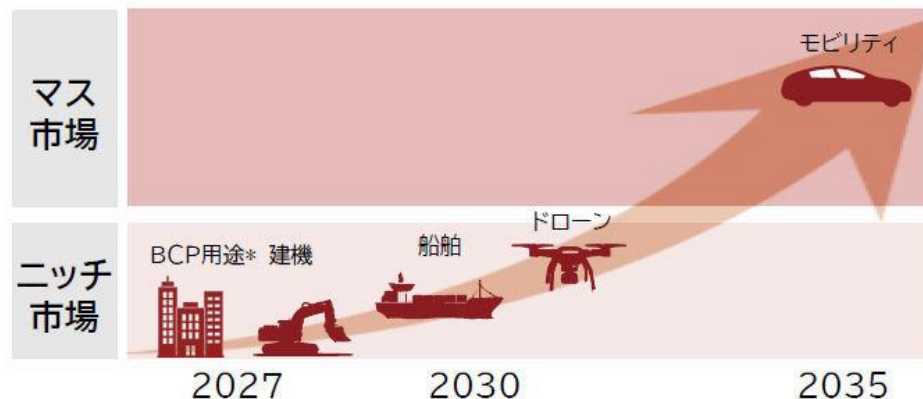
- Eutelsat OneWeb イギリス企業だったが、フランス傘下(帯域保証、安全性)
- Amazon Leo 現在350機程度投入? 超高速衛星通信(TeraWave)
- Telesat Lightspeed(ビジネス向け)
- AST SpaceMobile スマホと衛星を直接つなぐ
- Lynk Global/Omnispace
- Iridium: LEO衛星通信の老舗 PNT用チップを開発 エアリオンの買収を完了し、宇宙ベースのADS-Bを事業ポートフォリオに追加→ロケットラボ
- Globalstar Appleの緊急衛星通信
- China SatNet 国の系列と民間に分かれる

NTNは、地上網＋HAPS・LEO衛星で「どこでもつながる」通信レジリエンスを実現する次世代インフラ

- 全体動向：GEO・LEO・HAPSを組み合わせる“多層ネットワーク”へ
- NICT：光通信・HAPS・LEOの研究開発を推進
- NTT/docomo：HAPSを6G時代のカバレッジ拡張の柱に（Amazon）
- ソフトバンク：HAPSを“空飛ぶ基地局”として本格推進
- KDDI：Starlinkを使ったスマホ直接通信を商用化
- SKY Perfect JSAT 日本最大級の衛星通信事業者（早い動き）
- 楽天モバイル AST SpaceMobileとの連携。6/24にも発表。220平方メートルのアンテナ？スターリンクと違い常時は難しい？
- SHARPが様々なLEO衛星用のアンテナを開発？

シャープが衛星通信サービスに参入、「2027年の5G NTN標準化でビッグバンが起こる」 AQUOSの小型化技術を生かして端末開発も

シャープは、[ルクセンブルク](#)の世界大手衛星オペレーター・SESとのパートナーシップにより、法人向けの[衛星通信サービス](#)を2027年から提供すると発表した。



2035年 売上目標
1000億円

*BCP (Business Continuity Plan): 事業継続計画。企業において非常時でも事業を止めないために策定される事前計画

AI anywhere

セルラーでAI活用可能

99%?

これは、人口カバー率です
面積カバー率は遥かに低い

地球上でAI活用可能な面積

20%

地球の70%は海/陸上の40%以上は圏外*
高信頼性のクラウドAIの未開エリアは多く残る

ニーズに応える機種展開

ses
2027年発売



MEO衛星通信端末



LEO衛星通信端末



マルチオービット対応
衛星通信端末



超小型衛星通信端末

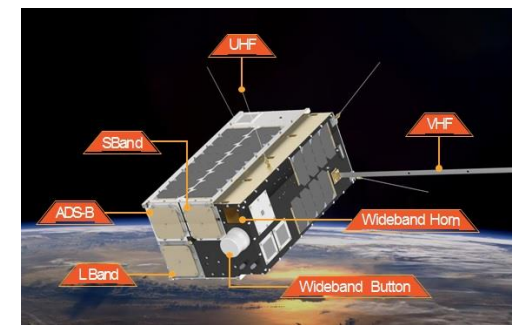
未開地域は広大
衛星通信が必要

HPより

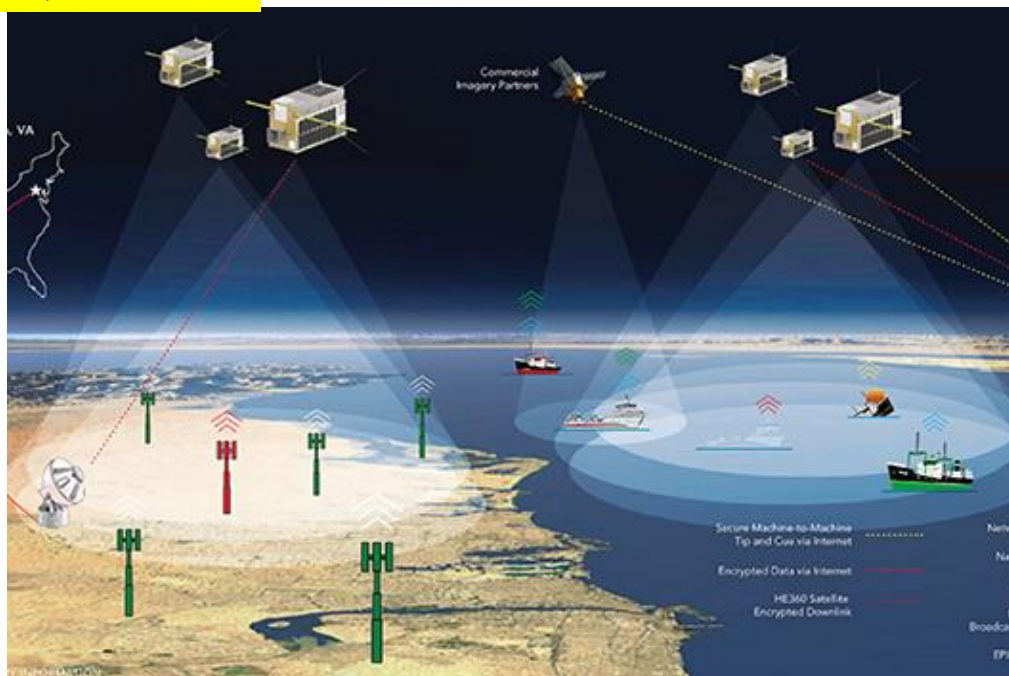
*当社による推定

HawkEye360

(世界初商用電波監視衛星)



スカパーJSAT



- サイズ: 27 × 20 × 40cm
- 重量: 15kg
- 軌道(高度): 極軌道(575km)
- 位置制度: 1,000m以下(CEP)
- 再訪時間: 6時間(赤道)4時間(中緯度)
- ※10クラスターの場合20～30分
- 観測結果配信時間: 観測後4時間以内

陸海空の地理空間情報提供サービス

HawkEye³⁶⁰は、世界で初めての商用電波観測衛星。地上から発信される電波を3機1組の衛星(クラスター)で受信し、以下情報を提供

- 1.電波発信場所の特定
- 2.電波特性解析による対象物(船舶等)の特定
- 3.指定電波の電波密度を測定し、対象エリアの変化を観測

- AIS情報の正誤判定
- AIS以外の電波信号による船舶検出
- 不審船の追跡
- 電波ヒートマップからの異常検出
- GPS妨害電波発信源の特定
- レーダー電波発信源の特定

国内ではアークエッジ・スペースが技術開発

SAR衛星で有名なQPS研とJAXAのコラボ

-LEO-PNTに欠かせないLEO衛星の高精度cm級軌道決定-



JAXA

共同研究相手方

QPS社

研究開発部門

刷新P

高性能計算機の
開発・検討

第一宇宙技術部門

オンボード高性能単独測位
に関する研究・開発

オンボード
PPP
軌道上実証

機器等
引渡し

実証
知見

打上
調達

QPS衛星
機器搭載

ロケット
打上

本技術により、従来は地上で推定していた撮影位置や時刻情報を、衛星が撮影した時点で把握できるようになります。これにより、観測画像を利用できるまでの時間を「数日」から「数時間」へ短縮できます。

また、高精度な軌道決定を衛星側で行えるため、地上システムを簡素化し、運用負担を軽減できます。加えて、低軌道衛星群における軌道・クロック推定の精度向上により、安定した衛星測位サービスに必要な航法メッセージの生成にも貢献します。

日本の宇宙系ベンチャー企業

企業	主な分野	強み・特徴
Astroscale	宇宙デブリ除去・軌道上サービス	デブリ除去、衛星寿命延長、点検サービス。宇宙の「保守会社」を目指す
ArkEdge Space	超小型衛星コンステレーション	小型衛星の設計・量産・運用。通信、測位、月インフラまで視野
iQPS	<u>SAR</u> 地球観測	小型SAR衛星群による全天候観測。防災・安全保障向け
Synspective	<u>SAR</u> 地球観測・解析	SAR画像＋AI解析サービス。災害監視や都市分析
ispace	月輸送・月資源開発	月着陸船、月輸送、月面経済圏構築
Space BD	打上げサービス	ロケット・ISS利用仲介。宇宙版商社
ALE	宇宙エンタメ	人工流れ星、宇宙イベント

LEO衛星の今後

- LEO通信は、Starlinkのような一般向けブロードバンドだけでない。今後は、OneWebやTelesatのような企業・政府向け高信頼通信、ASTやLynkのようなスマホ直接通信、Space CompassやKeplerのような宇宙内光通信、さらにPNTとの融合が重要か
- 通信衛星は同時に、**測位・時刻同期(防衛)・干渉検知・宇宙状況把握の基盤**にもなり得る
- **自動運転**・SDV時代の車両通信は「地上5G/6G+LEO/**NTN**」のハイブリッド化
- LEO通信衛星は、通信だけでなく測位・時刻同期・GNSSバックアップにも使える可能性があり、自動運転に必要な「**通信の冗長性**」と「**測位の冗長性**」を同時に強化できる。



SX-CRANE

ユビキタスな自律移動社会を支える次世代PNT技術開発



実施機関名 ※太字：代表機関、細字：連携機関

東京海洋大学, 慶応大学, 麗澤大学, 大阪公立大学, 名城大学, 芝浦工業大学,
鹿児島大学, 千葉工業大学, ソフトバンク, ロケーションマインド, SSIL

目指す成果（アウトカム）

- ・ 宇宙・海・陸をつなぐPNT拠点
- ・ レジリエントな社会を、PNTから
- ・ 次世代モビリティを支えるPNT

技術開発内容（アウトプット）

PNTエコシステム設計	本技術開発と非宇宙分野との連携のための意見交換。 政策戦略立案、国際標準化、アジアへの展開
1.次世代衛星PNT技術	1-1. PNTシミュレータの開発(測位エンジン) 1-2. LEO衛星測位の検討と将来衛星測位の新しい信号の技術開発
2.次世代受信機技術	2-1. 高抗堪性・高信頼のための技術開発 2-2. 実証検証用ソフトウェア受信機の開発
3.PNT補完システム技術	3-1. 非GNSS空間への対応と他センサとの統合アルゴリズムの技術開発 3-2. 海上測位と海中測位 3-3. 山間部測位

実施期間（予定） ※ステージ評価等により変動

- ・ 2026年6月～2033年3月（8年間）

委託／補助 ※ステージ評価等により変動

- ・ 委託

メディア等向け問合せ先

- ・ ご担当者名（任意）
- ・ E-mail : nkubo@kaiyodai.ac.jp



PNTの世界動向

- ・ 米国・中国が先行
- ・ EUも独自路線
- ・ ロシア？
- ・ インドも伸びるか
- ・ 日本は衛星側は○

追いつくために、

- ・ 技術開発力の強化
- ・ 専門家集団の強化
- ・ PNT安全保障
- ・ 技術集団→事業化

採択通知後
お声がけした
企業研究機関

ソフトバンク(屋内測位実験の実証)
チューリング(GNSS+統合技術の成果を一部検証頂く)
清水建設(GNSSが困難な場所での精密モニタリング)
シリコンセンシング(GNSS+IMU 海外依存を打破)
古野電気(アドバイザー、LEO-PNTの共同実証、チップ化)
SONY(GNSS/IMU統合測位エンジンのチップ化)
日本無線(ジャミング・スプーフィング耐性技術の実証)
日本航空電子(慣性航法による位置推定の積極的な実証)
三菱電機(CRPAアンテナの開発と実証)
構造計画研究所(PNTシミュレータの企業への展開)
海運企業(干渉欺瞞信号検知受信機の評価と開発)
電子航法研(干渉欺瞞信号対策、地上系測位)
Oceanic Constellations(多数のUSVの展開)

- GNSSの**脆弱性**が、ここ数年で広く知られるところとなってしまった
- 次世代モビリティでは、これまでの利便性から**高信頼・高安全**へ

衛星測位（GNSS）の脆弱性と宇宙ビジネスの新局面

顕在化したリスク：ホルムズ海峡の混乱

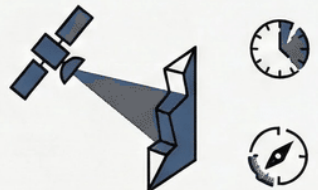
**1,100隻以上
の船舶が位置情
報を喪失**

信号偽装により、船舶が内陸部や原発
敷地内に表示される異常事態が発生した。



保険会社による 保証のキャンセル

物理的攻撃だけでなく、電波環境の悪化
が民間保険市場の撤退を招いた。



PNT（測位・航法・時刻） の構造的欠陥

衛星信号は比較的容易に遮断・偽造が可
能であり、短期間での完全解決は困難。

次世代の対策：宇宙ビジネスの新たな役割

GNSS単独依存 からの脱却

慣性航法や地上
ネットワーク、AIによる
偽装検出技術の統合が
急務である。



慣性航法



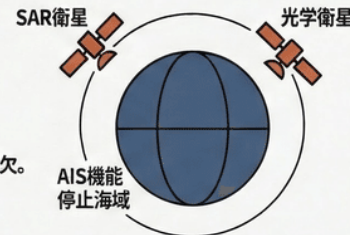
地上ネットワーク



AIによる
偽装検出技術

独立した観測・監視 需要の拡大

AISが機能しない海域での、SAR衛星や
光学衛星による独立した船航追跡が不可欠。



「信号を疑う」前提の 事業継続

不安定な軌道・周波数環境を前提とした、
新たなリスク管理が宇宙事業者者に求められる。



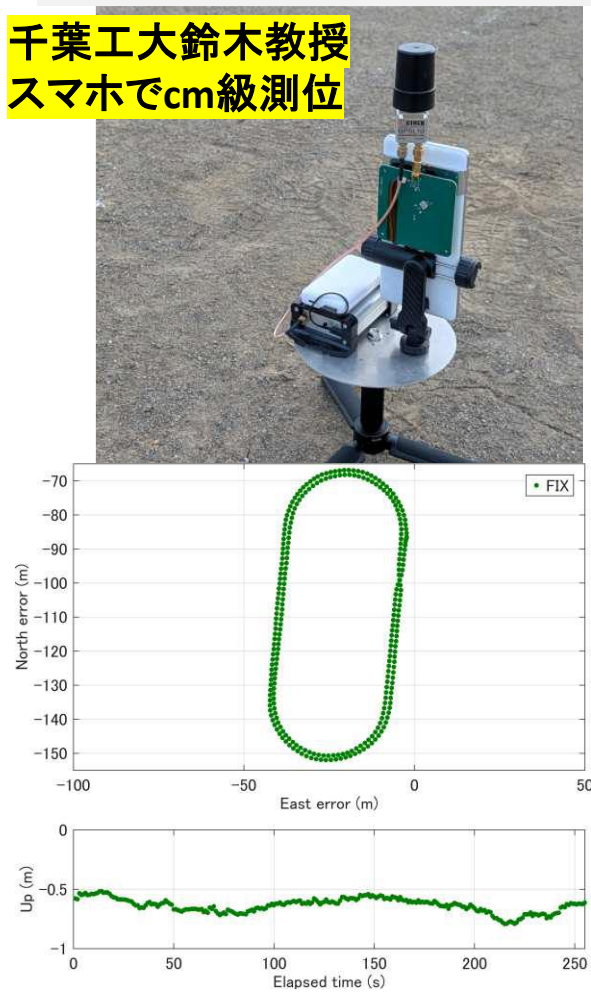
GNSS位置推定とインテグリティ（信頼性）



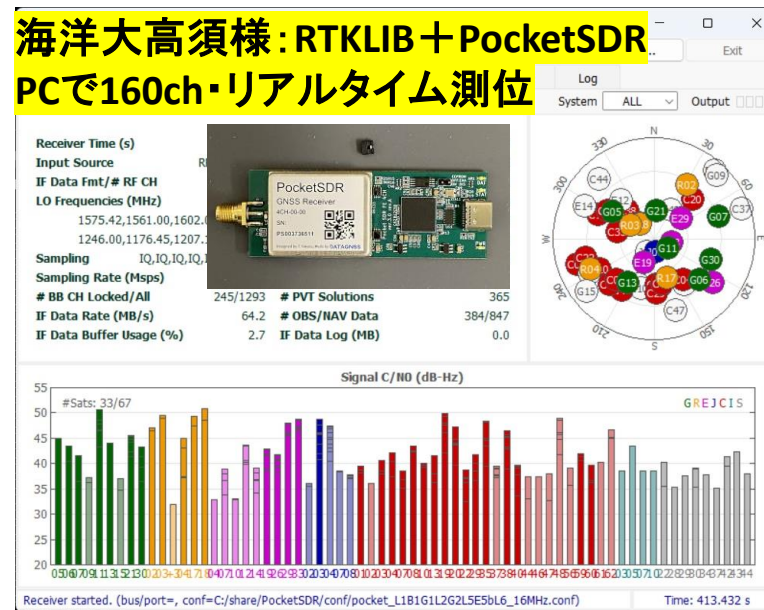
Integrityを議論する技術開発が必要

●測位の研究開発の土台を作ってきた

千葉工大鈴木教授
スマホでcm級測位

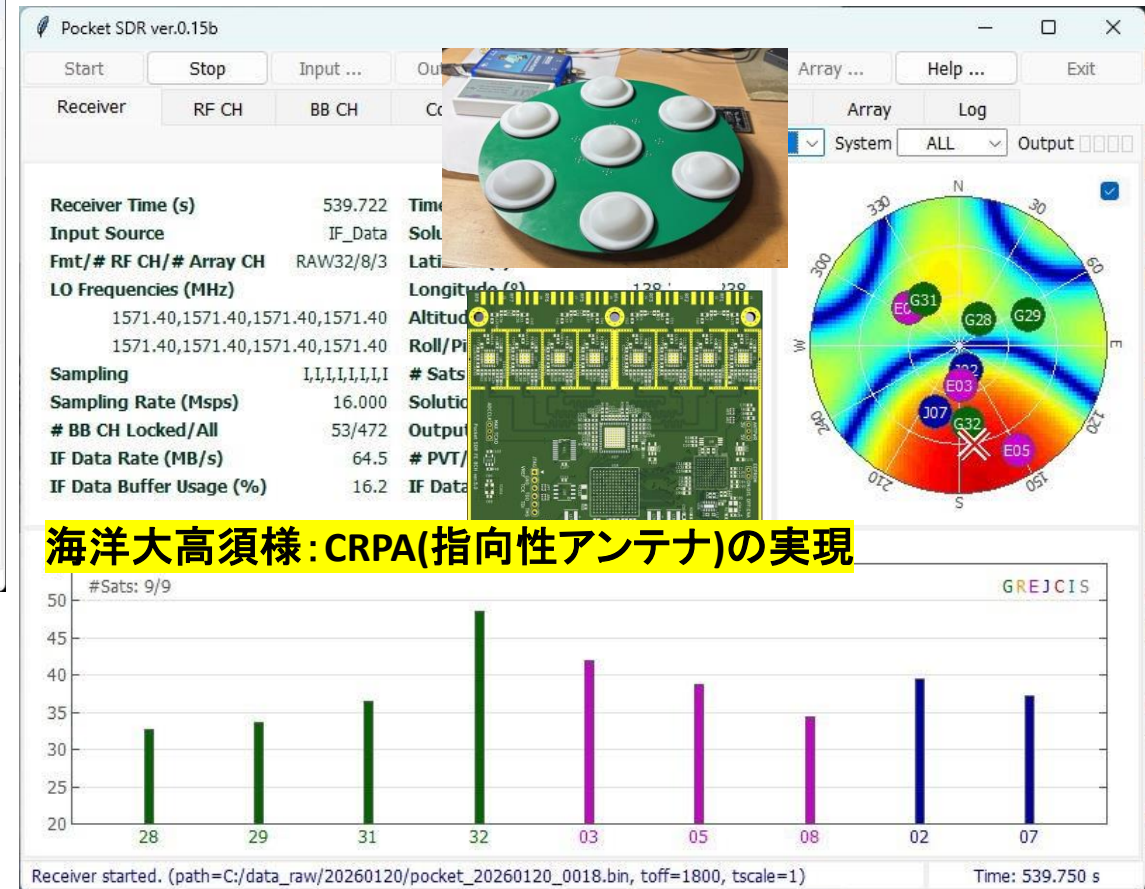


海洋大高須様: RTKLIB + PocketSDR
PCで160ch・リアルタイム測位

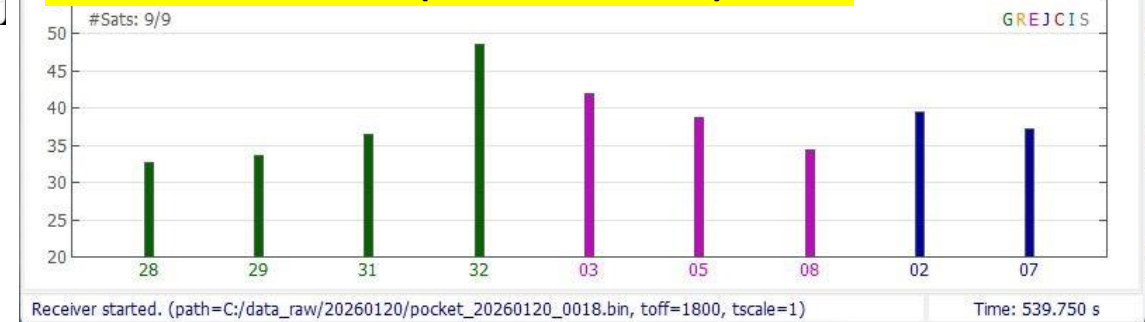


レイトレース法とSDRにより比類のないフレキシビリティとGNSS信号の高度なリアリティを追求するGNSS信号ジェネレータ

中部大海老沼教授 + 構造計画研究所
自前のGNSSシミュレータ



海洋大高須様: CRPA(指向性アンテナ)の実現

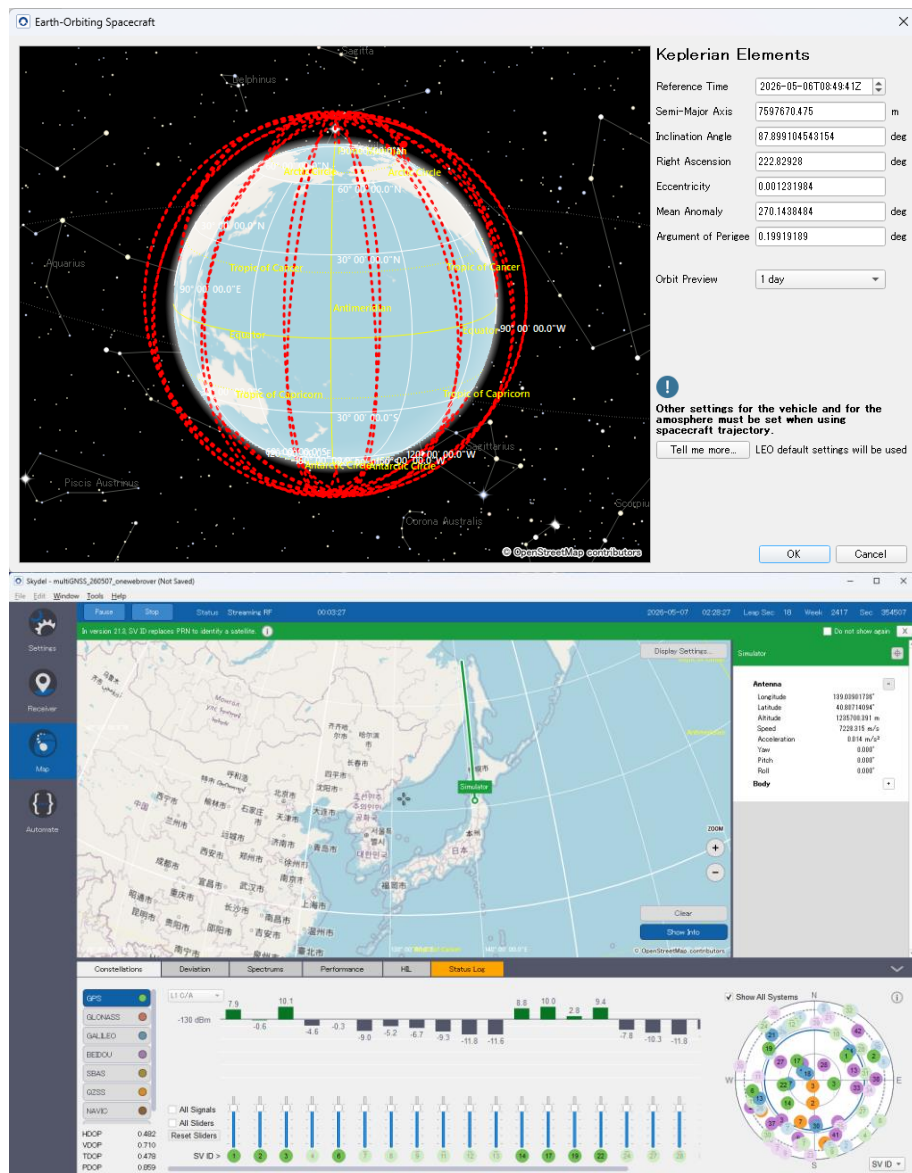


技術開発項目のLEO衛星に関連して

- **SoOP** (**Signals of Opportunity**) の追求
- **LEO-PNT**を想定したときの単独での測位シミュレータ
- GNSSとLEO-PNTの統合測位シミュレータ(ユーザ側の視点)
- LEO-PNTの測位信号をどうするか
- LEO衛星オンボードGNSS受信機の評価(信号追尾)
- 他国の動向調査
- Omni-SLRでの測距

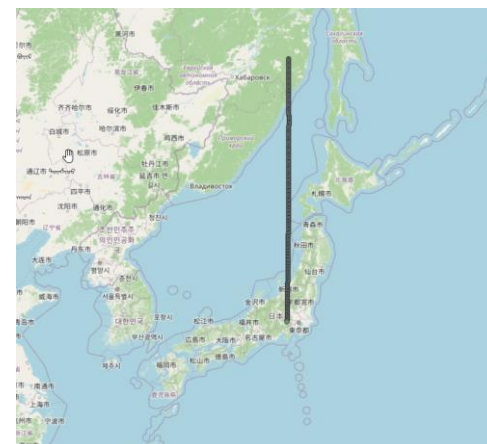
Safran Skydel

LEOオンボード (OneWEB) シミュレーション



The "System Options" dialog box contains the following settings:

- Epoch Interval for PVT (s): 1.0
- Max Epoch Lag for PVT (s): 0.5
- Elevation Mask for PVT (°): 15
- Correlator Spacing (chip): 0.2
- Integration Time for Acquisition (s): 0.005
- Integration Time for DLL (s): 0.005
- DLL Loop Filter Bandwidth (Hz): 1.0
- PLL Loop Filter Bandwidth (Hz): 20.0
- FLL Loop Filter Bandwidth Wide (Hz): 20.0
- FLL Loop Filter Bandwidth Narrow (Hz): 5.0
- Max Doppler Frequency to Search Signal (Hz): 20000
- C/N0 Threshold for Signal Locked (dB-Hz): 34.0
- C/N0 Threshold for Signal Lost (dB-Hz): 30.0
- Bump Jump for BOC Modulation: OFF
- Signal Acquisition Mode: Full-Search
- Max Code Length for direct acquisition (ms): 4.0
- FFTW Wisdom Path: (empty)
- Receiver Options: (empty)



測位結果 (数m)

→PCで生成した
IFデータをSDRで
実際の電波へ



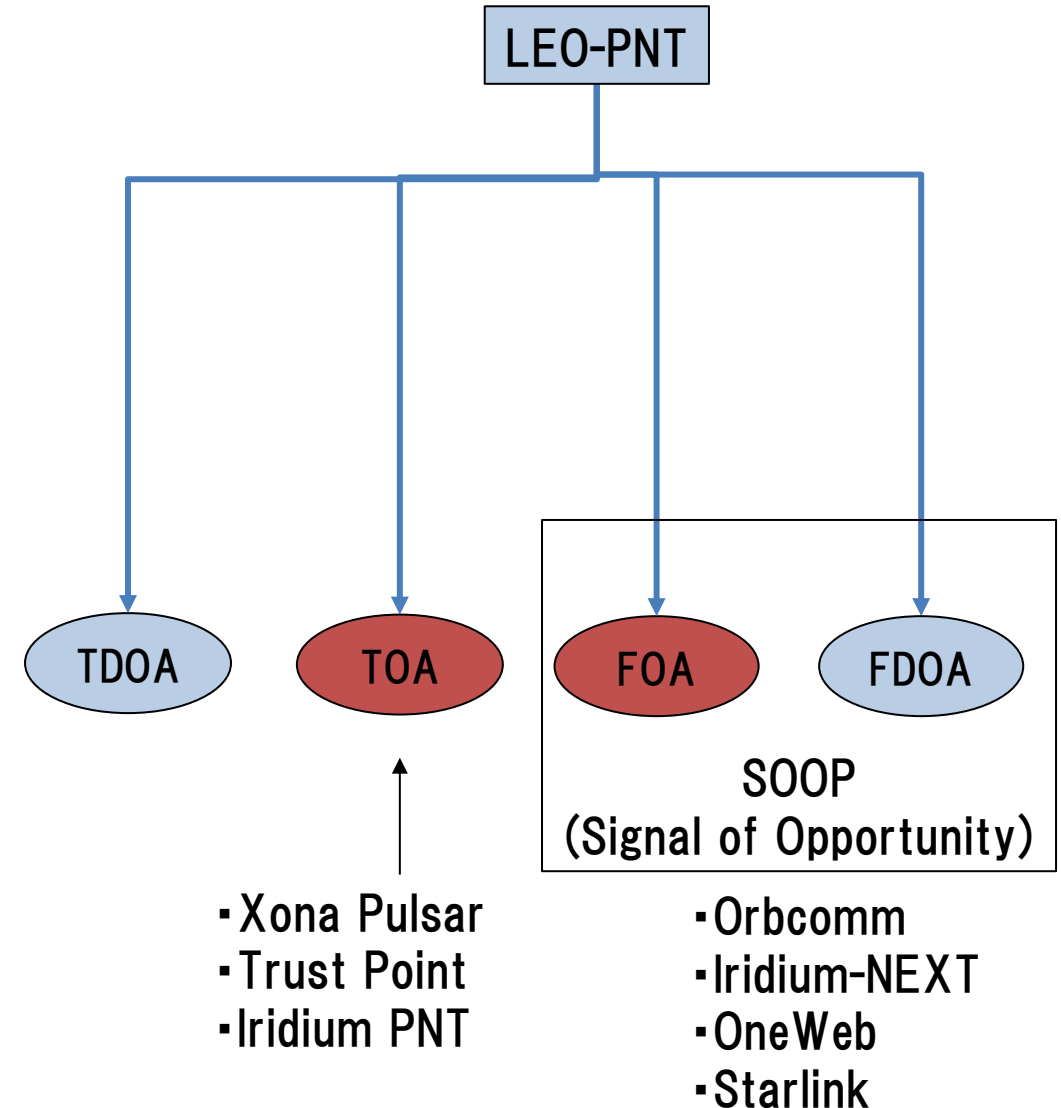
LEO-PNTにおいて擬似距離と周波数を結合したハイブリッド測位 手法の検討

小林海斗、久保信明
IEICE SAT/SANE研究会
神戸ポートオアシス

2026/07/22

研究背景

- これまでLEO-PNTは通信衛星の受信信号の周波数を使用するSOOP(Signal of Opportunity)測位がメインだった。
- しかし近年既存衛星または新規衛星から測距信号を発信してTOA(Time of Arrival)測位ができるLEO-PNTが出現しつつある。
- ただし、実際に測位信号を受信できる機材や環境はない。
- 本研究ではLEO衛星から測位信号が送信された場合をシミュレーションし、TOA測位とFOA(Frequency of Arrival)測位を組み合わせる手法を提案した。

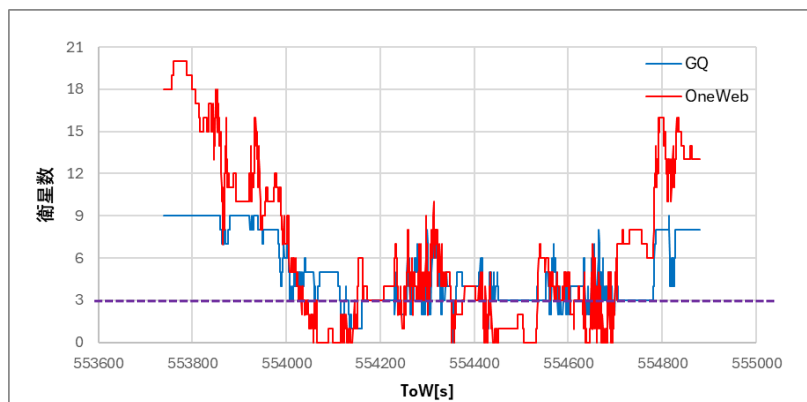


研究背景

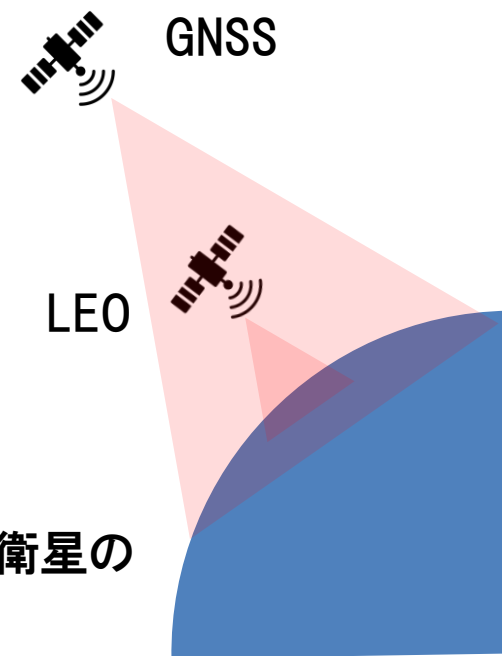
- ただしLEO-PNTはコンステレーションの完成まで可視衛星数がGNSSより少ないという問題がある。
- XonaやTrust Pointはまだ衛星打ち上げ中であり(数機)、Iridium PNTは66機だが可視衛星数は最大で4機。
- TOA測位で3次元位置を求めるには最低4機の同時観測が必要。衛星数が増えても都市部では4機を下回る可能性がある。

↓

- 擬似距離(TOA)と受信周波数(FOA)を両方使用することで観測量が2倍になり3機でも測位可能になりアベイラビリティ向上。



GPS+QZSS(37機)とOneWeb(600機)の都市部可視衛星数(可視衛星数=3は12%)



GNSSとLEOでは1衛星の
カバレッジが違う

シミュレーション設計

- 現在日本上空で擬似距離信号を送信するLEOは存在しないため、擬似距離、受信周波数をシミュレーションで作成した。
- シミュレーション結果を使用して提案手法を評価する。
- 衛星:Iridium-NEXT 3機
- 受信機:東京海洋大学屋上
- 2/4 2:46:10~2:47:50の100秒データ。
4秒間隔で25エポックの観測。送信周波数は1626.27MHzでIridium-NEXTのRing Alertを想定。

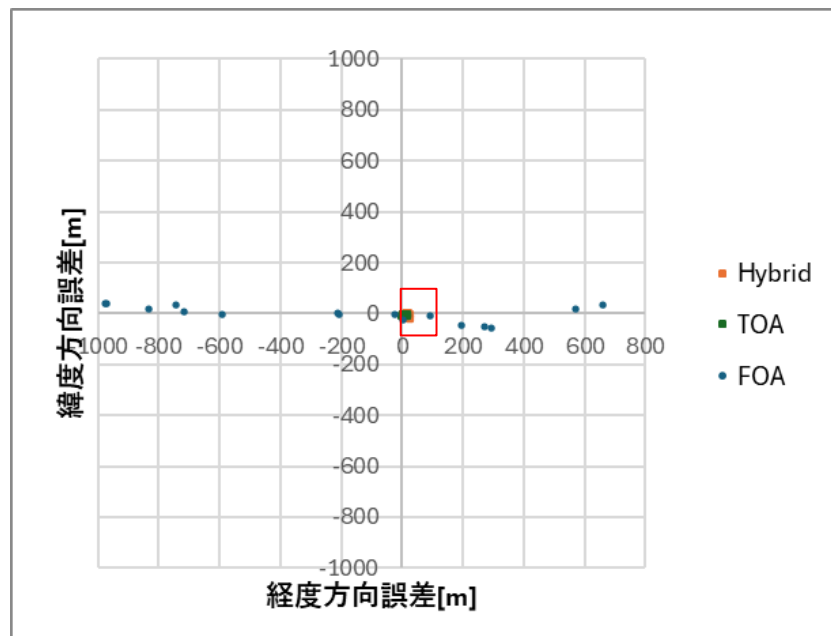


- 擬似距離の作成
 - 衛星の位置、受信機の位置から幾何学的距離を計算。
 - 衛星位置誤差(標準偏差5m)
衛星時計誤差(標準偏差2m)
電離層遅延量(マッピング関数)
対流圏遅延量(Saastamoinenモデル)
の誤差要因を加算。
- 受信周波数の作成
 - 衛星の位置・速度、受信機の位置・速度、送信周波数からドップラーシフトを計算。
 - 受信機クロック雑音(標準偏差1ns)
信号追尾誤差(標準偏差0.5Hz)
を加算。
- 衛星位置の真値はTLEからSGP4で計算した座標とした。

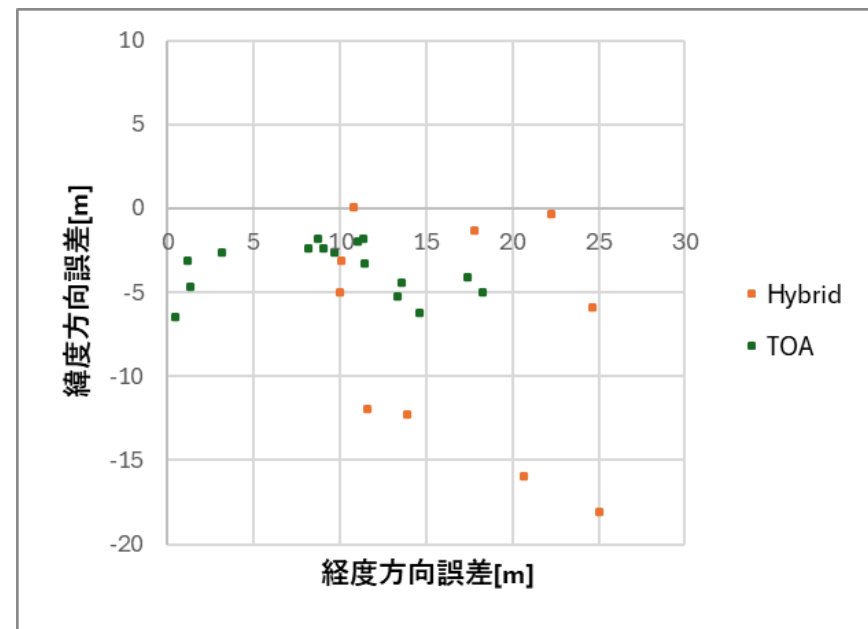
シミュレーション結果

- 静止点測位結果
- ハイブリッド測位でTOAに比べて垂直精度が向上。
- FOAで視線方向の拘束が強く効くため。
- 水平精度に関してはTOAの方が若干良い。

固定点	FOA測位 10エポック	TOA測位 10エポック	ハイブリッド測位 1エポック
水平誤差RMS[m]	663.90	9.79	20.15
垂直誤差RMS[m]	360.03	171.58	51.60



拡大



水平誤差プロット

SDRを使用した場合の測位結果

- Safran社のGNSSシミュレーターSkydelを使用して、ほぼ同じ配置のIridium-NEXT3機から静止点で受信したTOA信号をIQデータに保存。
- ただしSkydelでは自由にTOA信号を作れないので、Iridium-NEXTの軌道でGalileo衛星を飛ばしてそこからE5a信号(1176.45MHz)を送信した。
- 生成したIQデータをPocketSDR(ソフトウェア)で追尾して擬似距離とドップラー周波数を取得。
- 観測値は1Hzで5分間。
- 衛星位置・クロックの誤差はなし。電離層・対流圏遅延はあり。

Iridium-NEXT TLE

Skydel

E5a信号

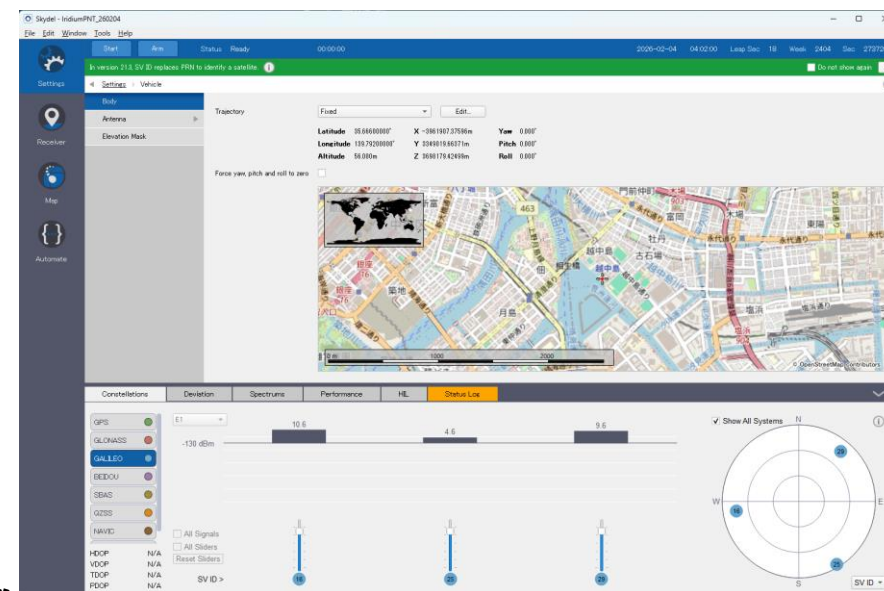
IQデータ

PocketSDR

Rinex

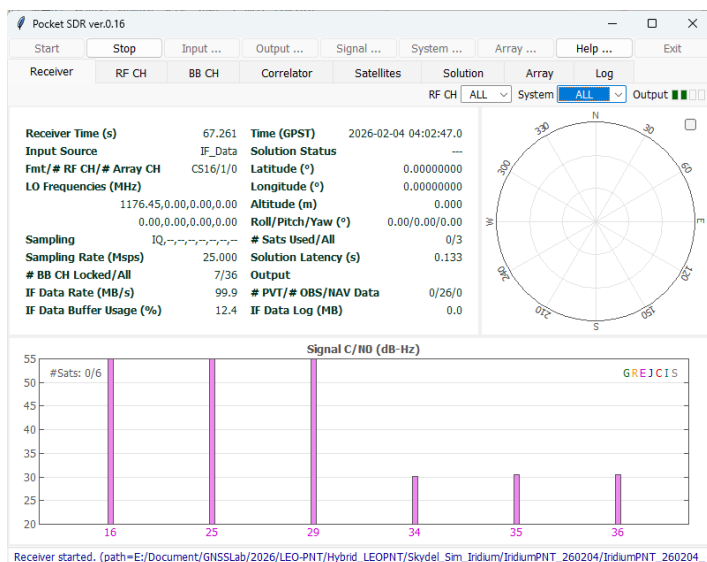
擬似距離
ドップラー周波数

Skydelシミュレーター

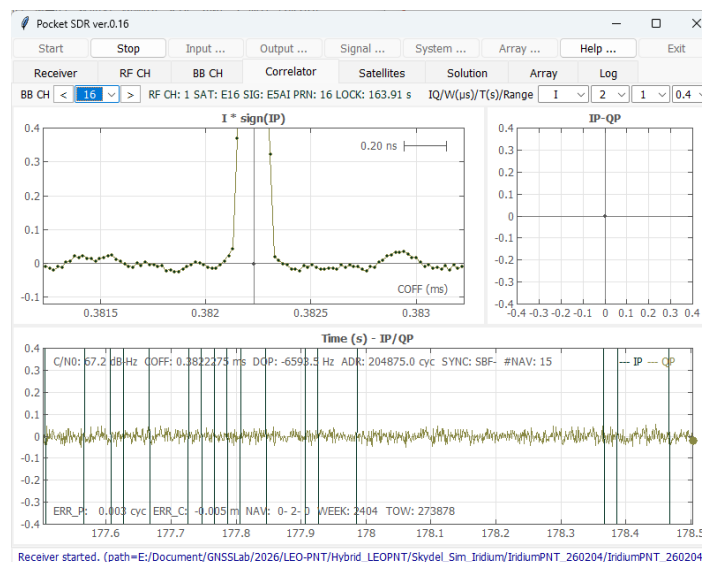


SDRを使用した場合の測位結果

- PocketSDRでの信号追尾はGNSS用からLEO用にパラメーターを変更。
- E1ではなくE5a信号を使ったのはビットレートが10倍で、周波数変化が大きくても追尾しやすいため。
- 3機追尾し、エフェメリスもデコードできている。
- 衛星位置はGNSSと軌道が異なるためか計算できていない。



PocketSDRでの信号追尾



The screenshot shows the 'System Options' dialog box in PocketSDR. It contains various settings for the receiver. The settings are as follows:

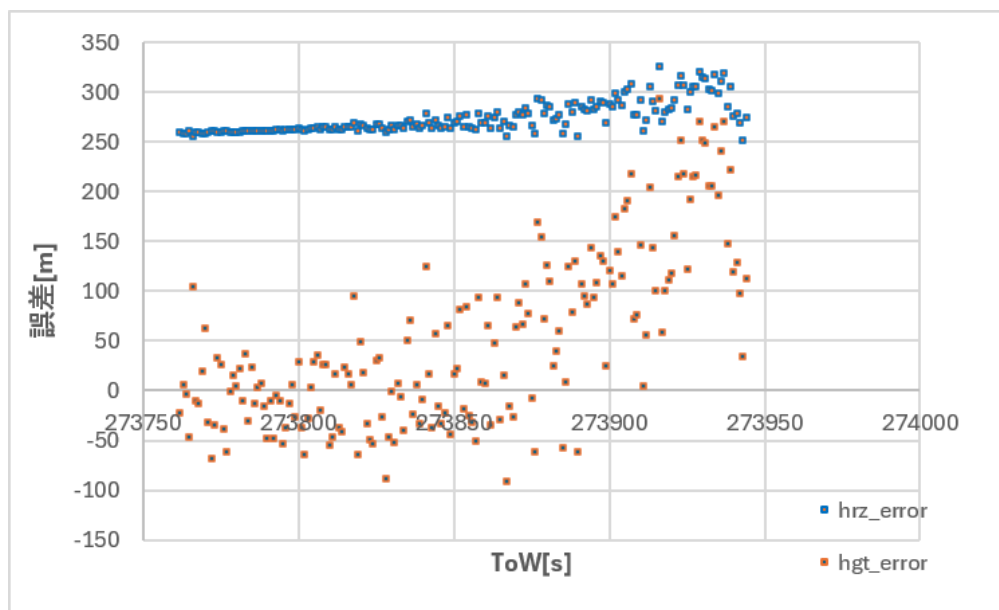
Parameter	Value
Epoch Interval for PVT (s)	1.0
Max Epoch Lag for PVT (s)	0.5
Elevation Mask for PVT (°)	0
Correlator Spacing (chip)	0.25
Integration Time for Acquisition (s)	0.002
Integration Time for DLL (s)	0.005
DLL Loop Filter Bandwidth (Hz)	4
PLL Loop Filter Bandwidth (Hz)	20
FLL Loop Filter Bandwidth Wide (Hz)	100
FLL Loop Filter Bandwidth Narrow (Hz)	20
Max Doppler Frequency to Search Signal (Hz)	80000
C/N0 Threshold for Signal Locked (dB-Hz)	37.0
C/N0 Threshold for Signal Lost (dB-Hz)	30.0
Bump Jump for BOC Modulation	ON
Signal Acquisition Mode	Fast-Search
Max Code Length for direct acquisition (ms)	4.0

PocketSDRのパラメーター

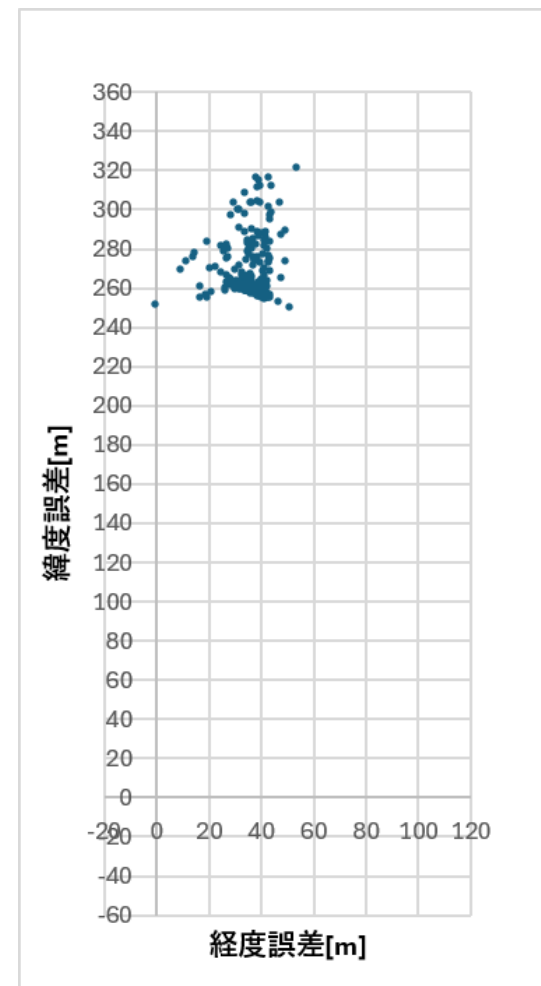
SDRを使用した場合の測位結果

- PocketSDRで追尾した結果から1エポックごとにTOA+FOAハイブリット測位を行った結果、北方向に260mほどのバイアスあり。
- 水平誤差標準偏差=16.0m
- 垂直誤差標準偏差=87.9m

ここに見られるバイアスは
推定したドップラ周波数
のバイアスと思われる



時系列誤差プロット



水平誤差プロット

まとめ

- 測距信号を放送するLEO-PNTの構築が進んでいるが、完全な配備までは都市部などでは可視衛星数が少ない。
- 1エポックの観測で位置を測位するためにTOAとFOA、2種類の観測値を使用して最低3機の衛星で測位できるアルゴリズムを提案。
- 静止点のシミュレーションで水平20m、垂直51mの精度であった。FOAの利用によりTOAよりも垂直精度が向上。
- IQデータとSDRでの追尾による観測値を使用して測位したところ水平16m、垂直88mの精度であった。ただし信号追尾でのドップラー周波数誤差によって大きなバイアスが存在することを確認。
- LEOとGNSSでは信号追尾アルゴリズムに変更が必要。
- 本研究のSkydelシミュレーターの使用についてはSafran社のMinerva Academic Programにより行われました。