

超小型月測位衛星LunaCubeの開発

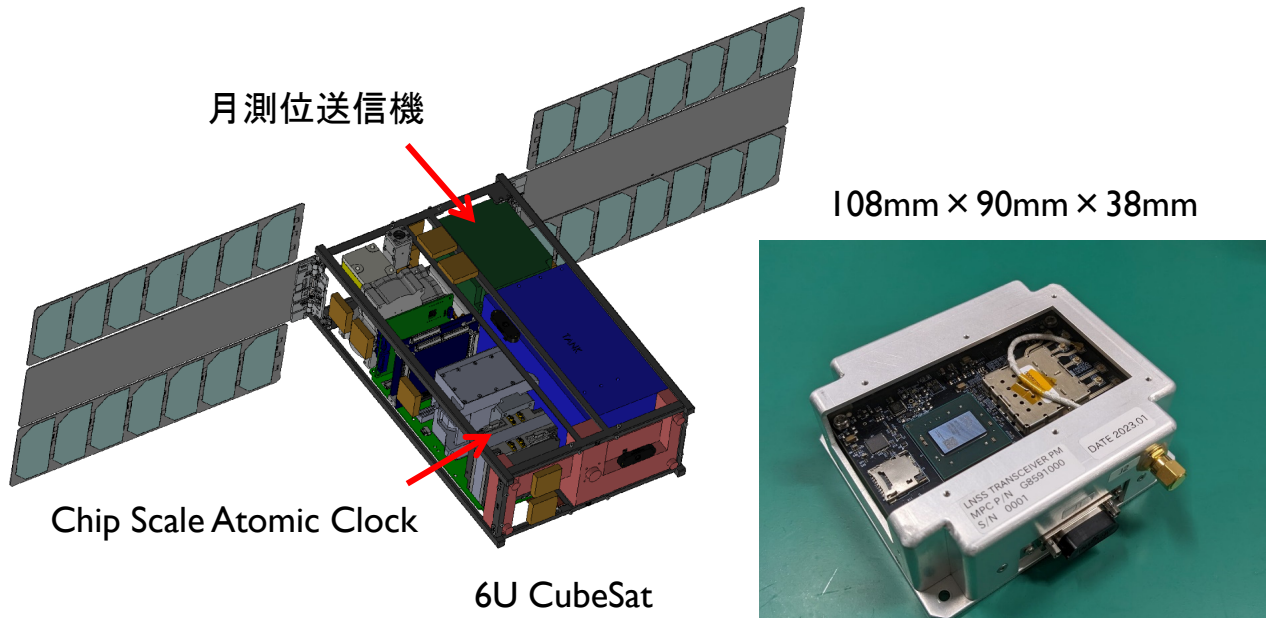
海老沼 拓史 (中部大学)

月測位衛星システム

- ▶ 将来の月探査ミッションの基盤となる測位衛星システムの研究開発が進められている。
 - ▶ JAXA: LNSS (Lunar Navigation Satellite System)
 - ▶ NASA: LunaNet
 - ▶ ESA: MoonLight
- ▶ 月版のGPS (GNSS) であり、複数の月周回衛星が必要となる。
- ▶ しかし、月周回軌道に多数の大型衛星を一度に打ち上げることは、費用の面から難しい。
- ▶ そこで、超小型月測位衛星であるLunaCubeを開発中
 - ▶ 月面ユーザに早期の測位と通信のインフラを提供

月測位衛星LunaCube

- ▶ 福井大学, 東京大学, 中部大学の共同開発
- ▶ 中部大学は測位送信機の開発を担当



従来の測位アルゴリズム

- ▶ 測位衛星システムでは, 地球を周回する衛星から放送される電波が受信機に到達するまでの時刻差(伝搬遅延)から, 衛星と受信機までの疑似距離を計測する.

$$\rho_R^S(t_i) = \underbrace{r_R^S(t_i)}_{\text{真の距離}} + c \left(\underbrace{d\tau_R(t_i)}_{\text{受信機クロックバイアス}} - \underbrace{dT^S(t_i^S)}_{\text{送信機クロックバイアス}} \right) + \underbrace{\omega_R^S(t_i)}_{\text{雑音}}$$

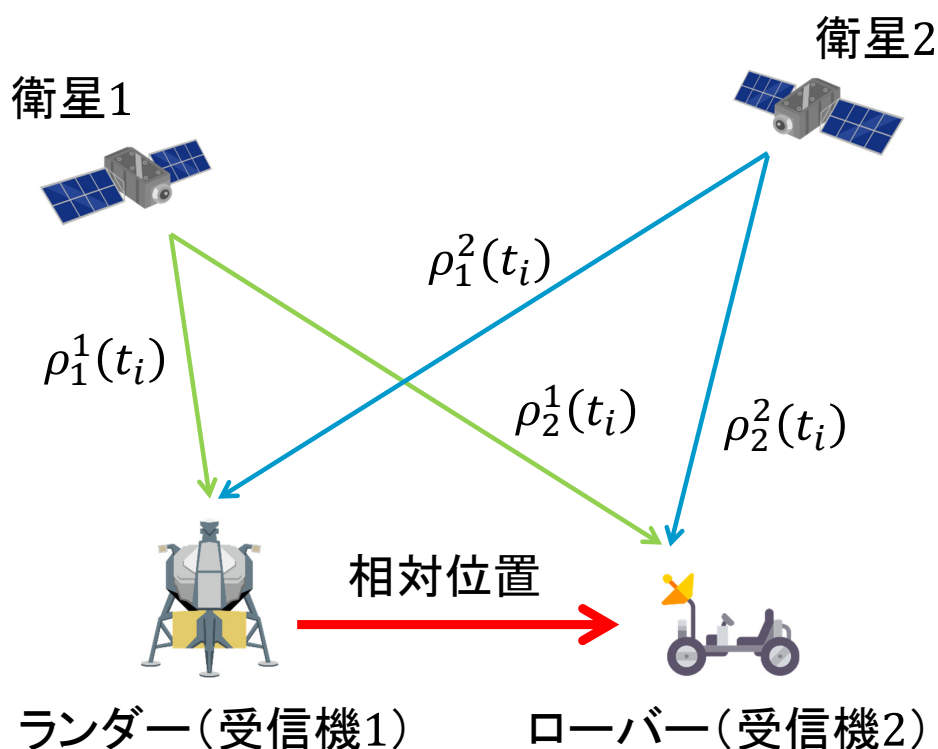
- ▶ 衛星の位置と送信機クロックバイアスが既知であれば, 3次元の受信機位置と受信機クロックバイアスからなる4つの未知数を推定するために, 少なくとも4衛星からの疑似距離観測値を必要とする.

月測位システムの課題と提案手法

- 測位演算に必要となる衛星数の削減
- 送信機クロックバイアス推定精度の劣化

- ▶ これらを解決するために最小2機の衛星による測位手法であるMulti-Epoch Double-Differenced Pseudorange Observation (MDPO)を提案.
- ▶ ランダー(着陸機)を基準局, ロバー(探査機)をユーザ局とする相対測位により, 測位に必要とされる衛星数や, 疑似距離誤差要因の除去を実現する.

ランダーとローバーの相対測位



ランダーとローバーでの疑似距離観測値

- ▶ ランダーとローバーに搭載された受信機 ($R = 1, 2$) と、2機の衛星 ($S = 1, 2$) から、4つの疑似距離を得る。

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_1^1(t_i) = r_1^1(t_i) + c \left(d\tau_1(t_i) - dT^1(t_i^1) \right) + \omega_1^1(t_i) \\ \rho_1^2(t_i) = r_1^2(t_i) + c \left(d\tau_1(t_i) - dT^2(t_i^2) \right) + \omega_1^2(t_i) \\ \rho_2^1(t_i) = r_2^1(t_i) + c \left(d\tau_2(t_i) - dT^1(t_i^1) \right) + \omega_2^1(t_i) \\ \rho_2^2(t_i) = r_2^2(t_i) + c \left(d\tau_2(t_i) - dT^2(t_i^2) \right) + \omega_2^2(t_i) \end{array} \right.$$

衛星共通の誤差
受信機共通の誤差

二重差疑似距離

- ▶ これらから二重差疑似距離を生成することで、受信機および送信機のクロックバイアスが除去され、相対位置と雑音のみからなる観測値を得ることができる。

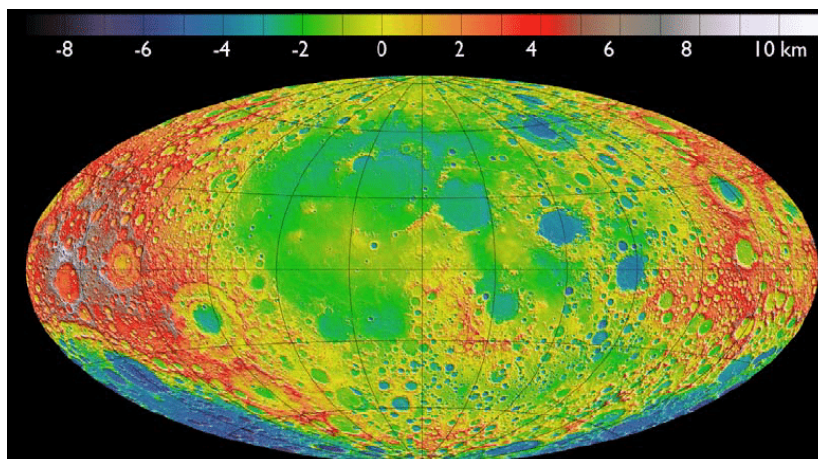
$$\begin{aligned} \Delta\nabla\rho(t_i) &= \underbrace{\left(\rho_1^1(t_i) - \rho_1^2(t_i) \right)}_{\text{衛星1に関する一重差}} - \underbrace{\left(\rho_2^1(t_i) - \rho_2^2(t_i) \right)}_{\text{衛星2に関する一重差}} \\ &= \left(r_1^1(t_i) - r_1^2(t_i) \right) - \left(r_2^1(t_i) - r_2^2(t_i) \right) \\ &\quad + \left(\omega_1^1(t_i) - \omega_1^2(t_i) \right) - \left(\omega_2^1(t_i) - \omega_2^2(t_i) \right) \\ &= \underbrace{\Delta\nabla r(t_i)}_{\text{真の距離の二重差}} + \underbrace{\Delta\nabla\omega(t_i)}_{\text{雑音の二重差}} \end{aligned}$$

複数時刻の二重差疑似距離

- ▶ ある時刻に観測された疑似距離から、1つの二重差疑似距離が得られる。
- ▶ 基準となるランダーの位置が既知であるとする、二重差疑似距離に含まれるローバーの相対位置の3つが未知数となる。
- ▶ 同様の観測を3つの異なる時刻 t_i ($i = 1, 2, 3$)で行い、この間にローバーが静止しているとする、3つの未知数に対して3つの二重差疑似距離を得ることができる。
- ▶ したがって、最小二乗法などにより、ローバーの相対位置を推定することができる。

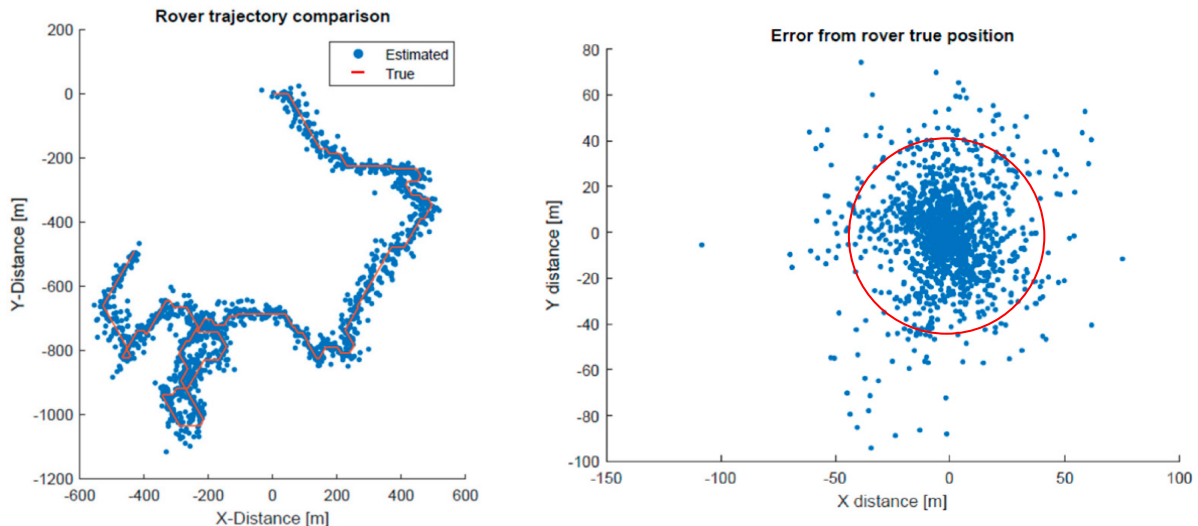
月面DEMの利用

- ▶ さらに、月面のDEM(数値標高モデル)を利用し、高度を既知とすることで、相対位置の未知数は水平方向の2つとなる。
- ▶ これにより、2つの時刻の二重差疑似距離から相対位置の推定も可能となる。



月測位シミュレーション

- ▶ 2つの衛星と月面DEMを用いたMDPOによる月測位シミュレータを開発.
- ▶ 疑似距離観測値の雑音を0.4mとしたとき, 水平方向で45.6m(95%)の測位精度が得られた.

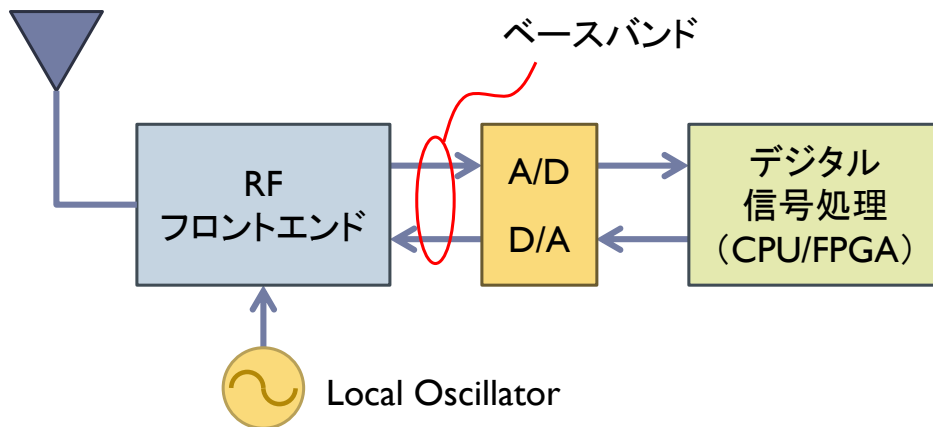


月測位送信機のアーキテクチャ

- ▶ 月測位システムの検討は, JAXA, NASA, ESAでも進められており, 測位信号の運用互換性を確保することも重要. しかし, 周波数や変調方式は調整中であり, 現時点では未定.
- ▶ 将来的に周波数や変調方式を変更することが可能である月送受信機として, ソフトウェア無線 (SDR: Software Defined Radio) 技術を取り入れたアーキテクチャを採用している.
- ▶ さらに, 測位信号の生成機能は, MATLAB/Simulinkによる モデルベース開発 (MBD: Model Based Development) で実装.

ソフトウェア無線とは？

- ▶ 無線通信システムの機能を、ハードウェアは変更せずに、ソフトウェアあるいはプログラマブルな回路（FPGAなど）を使用して、再構築可能な通信技術

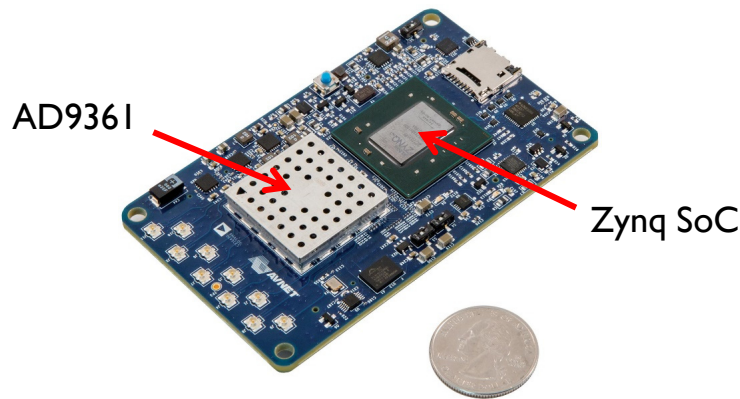


モデルベース開発とは？

- ▶ 実際のハードウェアをモデル化したデジタルツインによるシステムの開発と検証
 - ▶ ハードウェアのプロトタイプでは再現が困難なテスト条件でも検証が可能
- ▶ 動作検証を終えたモデルから、ハードウェア用のコードを自動生成
 - ▶ 手作業でのコーディングによる時間を節約し、エラーも防ぐ。
- ▶ モデルベース開発により、制御システム、信号処理、通信システムなどの動的システムを、効率的に開発できる。

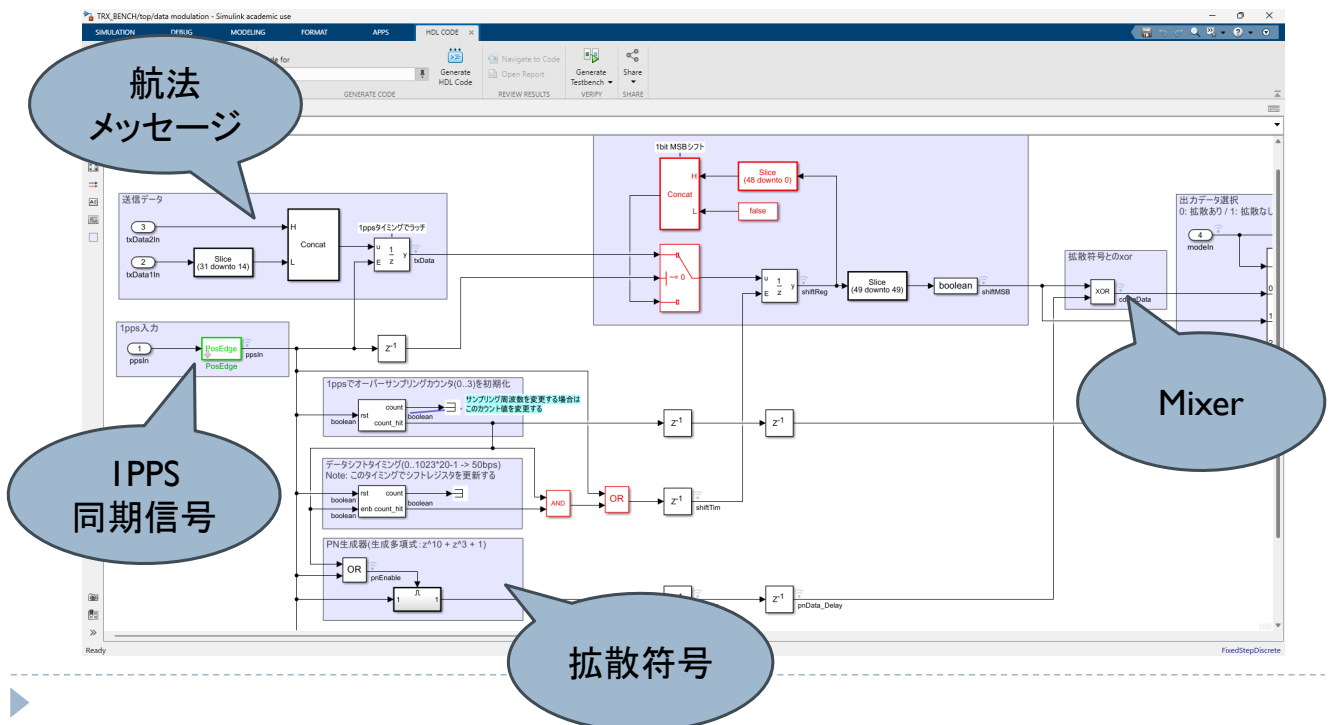
月測位送信機の構成

- ▶ ターゲットデバイスは、Analog Devices社が提供するADRV9361-Z7035を採用
 - ▶ RFフロントエンドのAD9361は3G/4Gの基地局向けのトランシーバであり、6GHzまでの周波数帯に対応
 - ▶ デジタル信号処理部には、FPGAとARMプロセッサが一体となったAMD社(旧Xilinx社)のZynq SoCを搭載



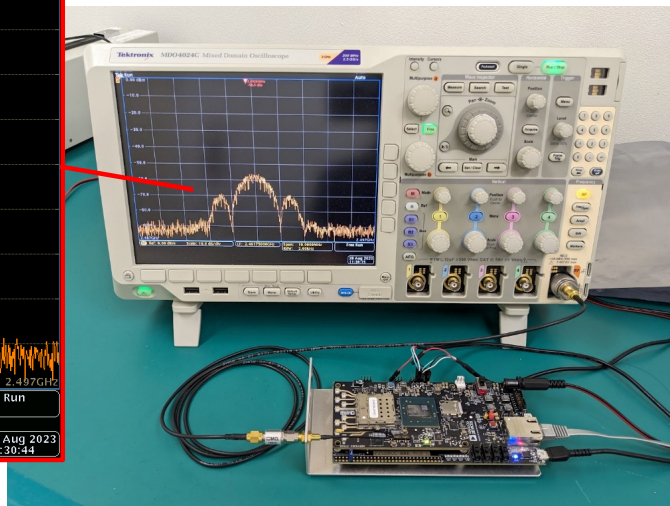
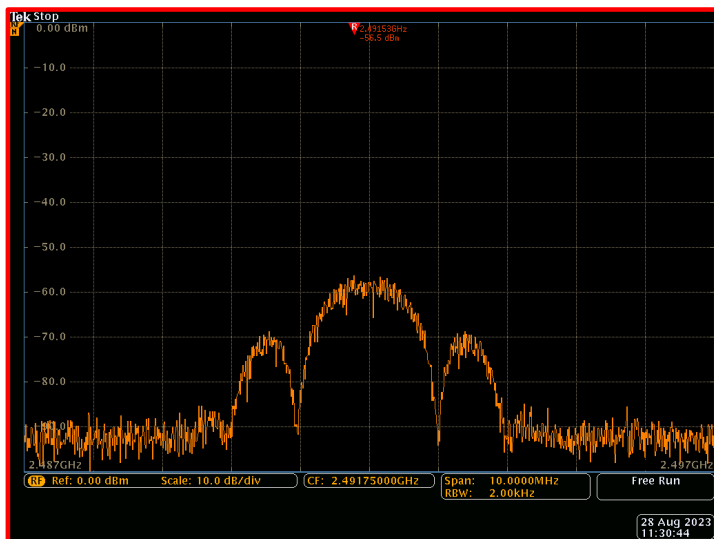
月測位送信機のモデル化

- ▶ GPSと同様のBPSK変調によるスペクトル拡散と、航法メッセージの送信機能をMATLAB/Simulinkでモデル化



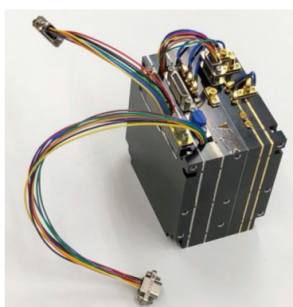
HDLコードの自動生成と実装

- ▶ MATLAB/Simulink上で動作の確認されたモデルから、HDL Coderを用いてFPGAのコードを自動生成し、ADRV9361-Z3065に実装



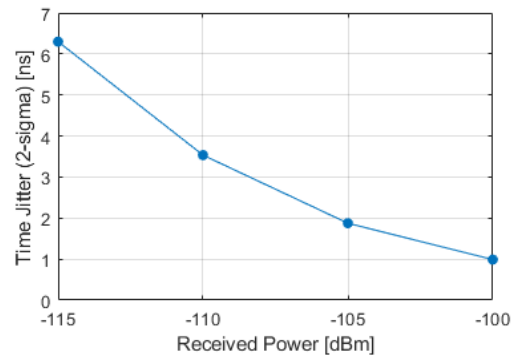
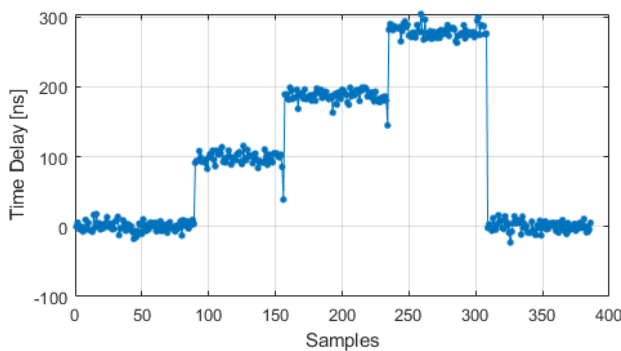
時刻同期

- ▶ 月測位衛星システムの時刻同期には、GNSSの漏れ電波を利用する方式が、広く検討されている。
- ▶ しかし、高利得アンテナの搭載や地球方向への姿勢制御が必須となり、超小型衛星のリソースでは難しい。
- ▶ LunaCubeでは、OMOTENASHIで実績のあるXバンドトランスポンダに、PNコードおよびサブキャリアの位相に同期する機能を追加し、地上局との高精度な時刻同期を実現する。



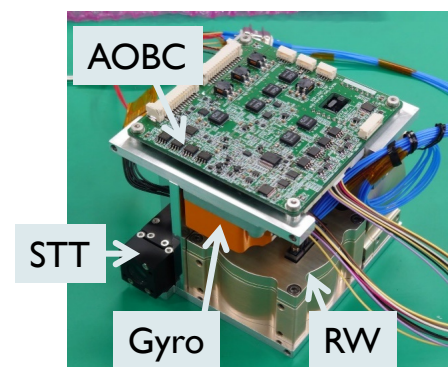
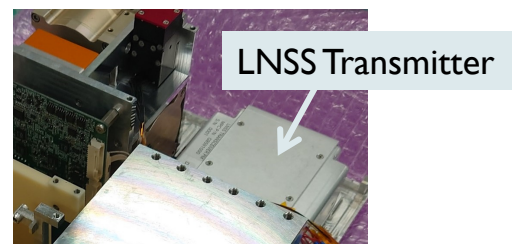
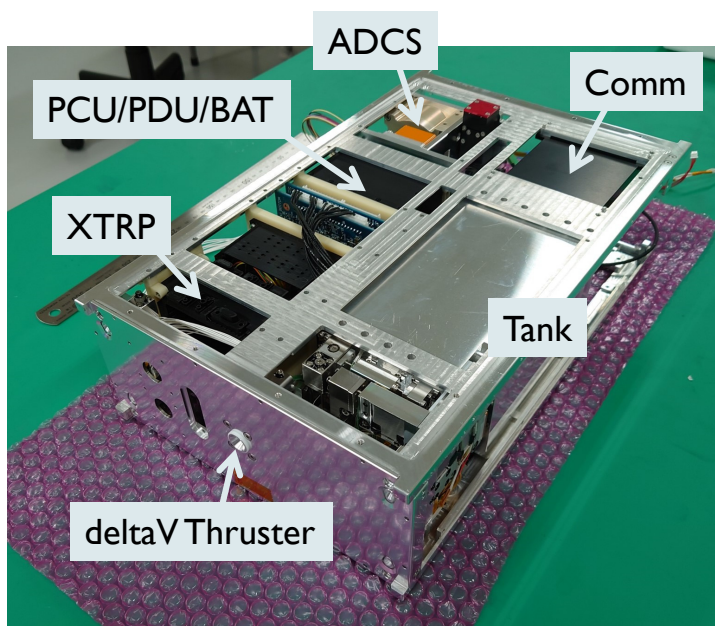
位相同期精度の評価

- ▶ 地上局には福井工業大学の口径13.5mパラボラアンテナを想定すると、ノミナルの受信電力は-110dBm
- ▶ シグナルジェネレータで生成したレンジング信号に100nsの遅延を段階的に挿入し、ジッタを計測
- ▶ ノミナルで、およそ3.5ns(距離にして約1m)の同期精度が期待される



LunaCube EMの開発状況

- ▶ 今年度中にEMの開発を完了し、温度サイクル試験、熱真空試験、振動試験を実施予定



まとめ

- ▶ 月面ユーザへの測位および通信のサービスを早期かつ簡便に提供することを目的とした6U CubeSatサイズの月測位通信衛星LunaCubeを紹介
 - ▶ 2機の衛星で測位を実現するMDPOアルゴリズムの提案
 - ▶ ソフトウェア無線とモデルベース開発による月測位送信機の開発
- ▶ 今年度中にEM開発を行い、月周回軌道を想定した環境試験までを完了予定
- ▶ フライトモデルの開発、打ち上げ、実証に関してはまだ未定であるが、実証に向けてプロジェクトを推進させたい



謝辞

- ▶ 本研究は文部科学省宇宙航空科学技術推進委託費JPJ000959の助成を受けたものです。

