



2022 年 5 月 31 日

令和 3 年度地球観測技術等調査研究

委託事業

「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」

国立大学法人 東京海洋大学



本報告書は、文部科学省の令和３年度地球観測技術等調査研究委託事業による委託業務として、国立大学法人東京海洋大学が実施した令和３年度「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」の成果を取りまとめたものです。

目次

目的.....	5
1. 研究統括、教材・HP の開発	7
1.1 研究統括に関して	7
1.2 東京海洋大学で準備した機材について	7
1.2.1 RTL-SDR (フロントエンド)	7
1.2.2 USRP E310 (フロントエンド)	8
1.2.3 HG-SOFTGPS06 (フロントエンド)	8
1.2.4 NTLab NT1065 シリーズ (フロントエンド)	9
1.2.5 LabSat3 GNSS L1 記録再生システム	9
1.2.6 iP-Solutions リアルタイムソフトウェア受信機	10
1.2.7 GPS/GNSS 信号再放射キット	11
1.2.8 GPSdome	11
1.2.9 解析用 PC.....	12
1.3 15 回分の教材の概要	13

1.4	HP の立ち上げ	15
1.5	本取り組みの紹介	16
1.6	研究課題を含めた打ち合わせやアンケート	16
2.	ソフトウェア受信機の開発	19
2.1	GNSS ソフトウェア受信機概要	19
2.2	開発環境の選定と構築	20
2.2.1	既存のオープンソースソフトウェア GNSS の調査	20
2.2.2	開発環境と目標	21
2.3	ソフトウェア受信機の開発	22
2.3.1	信号入力部	23
2.3.2	各チャンネルの処理	24
2.3.3	信号捕捉	25
2.3.4	信号追尾	26
2.2.5	ナビゲーションメッセージデコード	27
2.2.6	疑似距離算出と測位	28

2.3 ソフトウェア受信機の評価	29
3. 受信機プラットフォームの開発	31
3.1 フロントエンドの選定.....	31
3.2 計算機の選定	33
3.3 受信機プラットフォームの開発	34
3.3.1 Xilinx Zynq-Based SDR.....	34
3.3.2 MAX2771 フロントエンドの開発.....	35
3.3.3 MAX2771 フロントエンドの動作試験	38
3.3.4 2周波数対応フロントエンド基板の開発	42

目的

「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」では、衛星測位用の受信機を自由に改修できるソフトウェアベースの受信機を開発・準備し、それらを教材として採用し、そのソフトウェア受信機の理論だけでなく信号処理や測位演算を同時に学ぶアクティブ・ラーニングによる宇宙航空人材育成を目的とする。

参加学生は、自分の手でソフトウェア受信機を改良しながら「なぜこのような処理なのか」「どうすればもっと性能が向上するのか」といった疑問や課題を自ら発見することで、それと並行して開催されるチュートリアルの中で、衛星測位用の受信機設計や測位と通信の基礎を主体的に学び、さらに、開発したソフトウェア受信機を利用したコンテストを実施することで、関連企業への広報活動を展開し、潜在的な人材の発掘にも努める。

国産の準天頂衛星の競争力を高めるために、実際にユーザの手元に届く受信機側の開発競争力を国内で促進し、持続的な宇宙航空人材育成サイクルの確立を目指す。

令和3年度は、以下の内容を実施する。

① 研究統括、教材・HPの開発

東京海洋大学が中心となってソフトウェア受信機、プラットフォームの開発、教材作成、HP作成等の研究全体の統括を行う。ソフトウェア受信機を利用するための教材を制作する。教材の制作に際して、今後の教育カリキュラムに組み込むことを想定し、90分の授業15回分程度で完了することを目安とする。各大学で雇用する技術補佐員または研究員の支援を受けながら進める。衛星測位技術では、次年度以降のシミュレータやアンテナのテスト方法まで含めた教材を合わせて準備する。教材、HPの内容は留学生や将来の教材化を見越し英語対応とし、教材については国内及び国外の関連する研究機関の方よりそれぞれ1名以上のチェックを受ける。また、複数企業・研究機関の専門家の方々の意見を聞く場を持ち、現場の課題等の具体化を開始する。それらは次年度以降の学生の課題につながるものとする。

② ソフトウェア受信機の開発

3大学のソフトウェア受信機のベースをもちより、学生用及び将来の開発に適した機材と動作させるツールの選定等を行う。想定される参加学生分の機材を準備し、リアルタイム化またはFPGA化を見据えたソフトウェア受信機の開発を行う。開発に際してはMATLABを中心に進め、高速化の必要な部分に応じてC言語での対応も検討することとする。なお、運用ソフトとなるMATLABの準備を合わせて行う。C言語はマイクロソフト社のVisual Studioを利用予定である。3大学でプログラムを含めた詳細情報を共有しながら準備する。各大学で1名の技術補佐員または研究員を雇用し、学生が中身を理解しやすいかどうか評価しながら開発を進める。

③ 受信機プラットフォームの開発

本業務で利用するソフトウェア受信機を動作させるための機器やツールの選定等を行う。特にアンテナから高周波部のフロントエンド、負荷の大きい計算に耐えうる計算機等の準備を行う。想定される参加学生分の機材を準備し、複数の測位衛星及び周波数に対応し、リアルタイム化またはFPGA化を見据えたプラットフォーム開発を行う。3大学で機器の連携や利用のしやすさ等を含めた詳細情報を共有しながら準備する。

1. 研究統括、教材・HP の開発

本業務では、ソフトウェア受信機、プラットフォームの開発、教材作成、HP 作成等の研究全体の統括を行った。まずソフトウェア受信機を利用するための教材を東京海洋大学、中部大学、千葉工業大学の3大学で分担して英語で制作した。今後の教育カリキュラムを想定し、90分授業で15回分を制作した。GNSSの基礎から、ソフトウェア受信機の動作に関する部分、FPGAの基礎、シミュレータの利用やアンテナ実習の概要に関するものをまとめた。また、本業務の内容が広く伝わるように、HPを開設し情報をアップデートした。教材については、国内国外の専門家の意見を聞いた。ソフトウェア受信機を利用した今後の課題について、複数の専門家よりアドバイスを頂いた。これら進捗について、国内の学会や衛星測位に関するワーキンググループで発表を行った。

1.1 研究統括に関して

3大学の代表教員で定期的に進捗や機器の選定、教材の内容について、東京海洋大学が中心となりZoomにより打ち合わせを実施した。打ち合わせを行った期日とその概要について以下の表1 打合せ概要にまとめた。

表1 打合せ概要

期日	打ち合わせ概要
10月26日	2021年度作業の確認とスケジュールについて
11月26日	フロントエンドの選定と各大学での購入予定機器の確認
12月21日	15回分の教材についての案を事前に準備し、持ち寄った内容の精査
1月24日	ソフトウェア受信機の進捗の確認とフロントエンドでの動作確認について
3月7日	2021年度の報告書分担や、2022年度に向けての計画

1.2 東京海洋大学で準備した機材について

本業務のソフトウェア受信機の動作で必要となる複数のフロントエンドと高スペックなPC及びGNSSの電波の放射キット等を選定し、準備した。以下に準備した機器とその概要について記載した。これら機材については可能なかぎり、受講者に貸出をできる状態にしておく予定である。

1.2.1 RTL-SDR (フロントエンド)

図1.2.1にRTL-SDR (フロントエンド)を示す。非常に低価格でソフトウェアGNSS受信機用に利用できるものである。1つの周波数帯のみで、帯域やサンプリング周波数に制限があるが、教育用には最適であるため、セミナーで受講者に配布することを前提で20セ

ット以上準備した。また研究室で利用してきたソフトウェア GNSS 受信機で動作確認をとり、問題ないことを確認した。中部大学、千葉工業大学でも利用実績のあるものである。



図 1.2.1 RTL-SDR (フロントエンド)

1.2.2 USRP E310 (フロントエンド)

図 1.2.2 に USRP E310 (フロントエンド) を示す。3 大学で合計 6 台 (東京海洋大学は 2 台) 準備した。上述のものに比較して、1 つの周波数帯での利用となるが、幅広い周波数帯域に対応しており、サンプリング周波数も高く設定できる。周波数帯域が広いので、GNSS だけでなく今後の低軌道衛星からの信号の受信にも利用できると想定している。



図 1.2.2 USRP E310 (フロントエンド)

1.2.3 HG-SOFTGPS06 (フロントエンド)

図 1.2.3 に HG-SOFTGPS06 (フロントエンド) を示す。1 台を準備した。これは MAX2771 という新しいチップセットを搭載した機器で、USB 経由で IF データ (GNSS 信号をデジタルに変換された後のデジタルデータのこと) を取得できるものである。1 つの周波数帯となるが、サンプリング周波数は 32MHz まで確認できており、研究室で利用してきたソフトウェア GNSS 受信機で動作確認済みである。ただし、カタログに記載のある GNSS の複数周波数のうち、L1 帯や L2 帯または L5 帯での取得について、L1 帯では確認できたが、L5 帯については動作確認がまだできていない状況である。なお、この MAX2771 のチップでのフロントエンドは、中部大学と高須産学連携研究員が別途フロントエンドを開発しており、すでに設計や動作確認までは終了済みである (2 つの周波数同時に取得可能)。



図 1.2.3 HG-SOFTGPS06 (フロントエンド)

1.2.4 NTLab NT1065 シリーズ (フロントエンド)

図 1.2.4 に NTLab NT1065 シリーズ (フロントエンド) を示す。トータル 6 セットを準備した。2 種類を 3 セットずつで、1 つ目の種類は GNSS の L1+L2+L6 を同時に取得できるもので、サンプリング周波数や帯域 (31MHz まで可能) も高い値の設定が可能である。2 つ目の種類は GNSS の L1+L5 を同時に取得できるものである。3 波同時に取得できる唯一のフロントエンドのため、購入し、L6 帯を含めてデータを取得することを確認した。



図 1.2.4 NTLab NT1065 シリーズ (フロントエンド)

1.2.5 LabSat3 GNSS L1 記録再生システム

図 1.2.5 に LabSat3 GNSS L1 記録再生システムを示す。1 セット準備した。この機材はフロントエンドとしても利用できるが、記録したデータをいつでも本機器を通じて出力することができるため、研究室に居ながら様々なシチュエーションテストを実施することができる。また、同じ IF データを繰り返し再生することができるため、開発中の機材のエラー調査や動作確認などを非常に効率的に行うことが可能である。フロントエンド及び再生機器として動作確認済みである。



図 1.2.5 LabSat3 GNSS L1 記録再生システム

1.2.6 iP-Solutions リアルタイムソフトウェア受信機

図 1.2.6a に iP-Solutions リアルタイムソフトウェア受信機を示す。受講者にソフトウェア受信機の完成形として準備したものである。GPS、QZSS と Galileo を利用した L1 帯の受信機で、相関波形等をリアルタイムに確認することができる。都市部のマルチパス環境でのデータを取得することで、実際に相関波形がどのように乱れているかを直感的に理解してもらうために利用することができる。また本課題でもリアルタイム化の講義を行う予定で、発展的課題では自ら開発できる受講者が出てくることを期待している。図 1.2.6b に相関波形を表示した例を示す。



図 1.2.6a iP-Solutions リアルタイムソフトウェア受信機

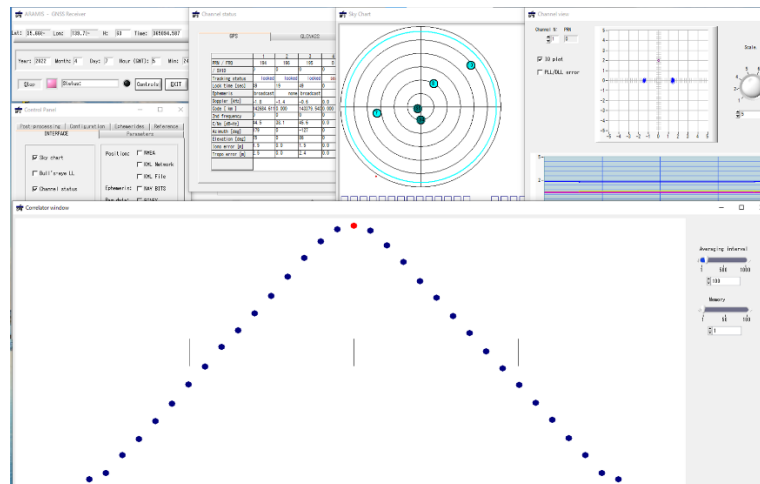


図 1.2.6b 相関波形の例

1.2.7 GPS/GNSS 信号再放射キット

図 1.2.7 に GPS/GNSS 信号再放射キットを示す。GPS/GNSS 信号を屋内で受信可能にするシステムです。ループ・アンテナからの GPS/GNSS 信号が増幅され、屋内に再放射される。セミナー等で屋内にいながら、ほぼ屋上にアンテナを設置した環境でソフトウェア GNSS 受信機の動作確認が可能となる。なお、L1/L2 帯だけでなく、L6 帯にも対応したものを購入したため、準天頂衛星の補強信号を受信することも可能である。ライブの信号と異なり放射アンテナが 1 つのため、スプーフィングを行うキットの代わりにみたてた実験を行うことも可能である。



図 1.2.7 GPS/GNSS 信号再放射キット

1.2.8 GPSdome

図 1.2.8 に GPSdome を示す。GPS の妨害やなりすましに対する保護を提供する小型のアドオンデバイスである。「妨害（ジャミング）」や「なりすまし（スプーフィング）」の状況下でも自律的なナビゲーションと動作の連続例を確保できる。このような保護機能

を提供する同様のソリューションにおいて、このように小型、軽量、低価格、設置が簡単なものは他にあまりない。本課題において、スプーフィングに対する正しい知識を習得することは重要であり、実際にこのような対応製品ができたことから、このような製品の限界を知る意味でも、実際に利用してみて実感することが大事であるとする。



図 1.2.8 GPSdome

1.2.9 解析用 PC

図 1.2.9 に解析用 PC を示す。それぞれ 5 台準備した。3 大学の打ち合わせで、今回開発するソフトウェア GNSS 受信機の動作に支障のない性能のものを選択した。どちらの PC についても、研究室のソフトウェア GNSS 受信機用のプログラムが動作するか確認済みである。



図 1.2.9 解析用 PC

1.3 15 回分の教材の概要

表 1.3 に『15 回分の教材』の概要を示す。これは、3 大学の教員で議論し、分担して作成した英語の教材が示してある。最初の導入や GNSS の基礎を東京海洋大学ソフトウェア GNSS 受信機の内容の部分を千葉工業大学、FPGA の基礎やシミュレータの基礎を中部大学が担当した。また、これらの教材については、国内では三菱電機株式会社の川口貴正氏、海外では IP Solutions の Ivan Petrovski 氏に目を通して頂き、専門的な意見を伺った。東京海洋大学では、海事システム工学部門に所属している学生にも目を通して貰った。中部大学では、工学部 宇宙航空理工学科の生徒にこれらの教材を使った模擬抗議を行い、学生から率直な意見をヒアリングした。

図 1.3a に『1. ソフトウェア GNSS 受信機を学ぶ重要性』の全体イメージを示す。また、図 1.3b に教材『4. フロントエンドの役割』全体イメージを示す。なお、2022 年度に実施予定の電波暗室でのアンテナ測定についての教材は、電子航法研究所の研究員の方にすでに依頼済みであり、2022 年度には準備される予定である。また将来の QZSS の計画と期待については、それら業務を中心となって進めている JAXA の研究員に依頼済みである。

表 1.3 『15 回分の教材の概要』

1	ソフトウェア GNSS 受信機を学ぶ重要性
2	GNSS の仕組み全般 (3 つのセグメント)、座標系、衛星位置計算
3	GNSS の誤差要因、測位演算
4	フロントエンドの役割と概要 (IF、ビット、サンプリング、IQ 値等)
5	教材で利用するソフトウェア GNSS 受信機の紹介 (Github や PC の動作環境等)
6	GNSS の信号について (衛星からの信号を知る)
7	信号の捕捉について (再捕捉の必要性)
8	信号の追尾について (DLL、FLL、PLL、信号強度、フィルタ設計など)
9	航法データのデコードについて
10	観測データの生成と測位演算について
11	FPGA の活用 (HDL の基礎)
12	Vivado Design Suite Tutorial 1 (XILINX)
13	FPGA の活用 (C/A コードの生成)
14	GNSS シミュレータの役割と概要
15	将来の GNSS そして QZSS の計画と期待

Basic of GNSS 1

GNSS, Coordinates/Time and Satellite Position

Contents

- ▶ Current GNSS
 - ▶ GPS/GLONASS/GALILEO/QZSS/BDS
- ▶ Coordinate Systems
- ▶ GNSS Time Systems
- ▶ Satellite Position

Basic of GNSS 2

Measurement Errors and GNSS Positioning

Contents

- ▶ Measurements Errors
 - ▶ Satellite / Receiver
- ▶ GNSS Positioning
 - ▶ Least Square / DOP
- ▶ Improved Positioning
 - ▶ DGNSS
 - ▶ RTK-GNSS
 - ▶ PPP/PPP-RTK

図 1.3a 教材『1. ソフトウェア GNSS 受信機を学ぶ重要性』

GNSS RF Frontend Architecture

1

What is modulation?

Modulation is defined as the process of superimposing a low-frequency information signal on a high-frequency carrier wave.

Amplitude Shift Keying (ASK)

Frequency Shift Keying (FSK)

Phase Shift Keying (PSK)

2

Generating BPSK signal

3

GPS signal power spectrum

The power spectrum of a rectangular chip is the well-known sinc function.

4

Frequency down converter

The conversion of a high-frequency radio signal to a band-limited lower frequency (intermediate frequency) at a lower sampling rate.

5

GNSS receiver architecture

6

Binary Phase Shift Keying (BPSK)

BPSK is a signal modulation scheme that conveys data by changing two different phases of the carrier wave.

Carrier Wave: $\cos(2\pi ft)$

Data: $D(t)$

BPSK: $D(t) \cos(2\pi ft)$

7

GPS signal architecture

8

Frequency down conversion

The conversion of a high-frequency radio signal to a band-limited lower frequency (intermediate frequency) at a lower sampling rate.

9

Heterodyne frontend architecture

10

Quantization

Typical GNSS frontend utilizes two-bit ADC.

ADC maintains an optimal signal level for the ADC input.

Since GNSS signal is smaller than thermal noise, the observed ADC output distribution should be Gaussian.

11

Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)

QPSK modulates two bits at once by selecting one of four possible carrier phase shifts of 0°, 90°, 180°, or 270°.

Phase Shift: 0°, 90°, 180°, 270°

Symbol: 00, 01, 10, 11

Example: 00, 01, 10, 11, 00

12

Constellation diagram

A constellation diagram displays the signal as a two-dimensional VC-plane scatter diagram at symbol sampling instants.

13

Coherent demodulator

The coherent demodulator recovers the original signal by multiplying the received signal with the carrier wave and then filtering the result.

14

PocketSDR

An open-source dual-frequency GNSS frontend designed by Tomer Talon, the creator of RTL-SDR.

MAX2771 x2 EZ-USB F2020

15

Quadrature amplitude modulation

Any phase shift keying can be generated by changing the amplitudes of two carrier waves.

The two carrier waves of the same frequency are out of phase with each other by 90°, a condition known as orthogonality in quadrature.

where $\phi = \frac{f(t)}{\sqrt{f(t)^2 + Q(t)^2}}$

16

QPSK and quadrature modulation

QPSK modulates two bits at once by selecting one of four possible carrier phase shifts of 0°, 90°, 180°, or 270°.

Symbol: 00, 01, 10, 11

Example: 00, 01, 10, 11, 00

17

Coherent demodulation

The coherent demodulator recovers the original signal by multiplying the received signal with the carrier wave and then filtering the result.

18

MAX2771 GNSS RF frontend

19

IF signal example

20

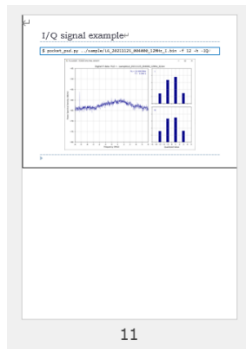


図 1.3b 教材『4. フロントエンドの役割』

1.4 HP の立ち上げ

本課題で実施している内容を公開するための HP を立ち上げた。技術補佐員が中心となって、教員の進めている内容や発表資料、教材の情報を公開している。同時に、世界の最新の GNSS の情報（GNSS 業界では、世界的に有名な 2 つの雑誌のトピックを毎月掲載）やソフトウェア GNSS 受信機に関連する情報やリンクを更新している。そして今後は実際のソフトウェア GNSS 受信機のプログラム等をアップ（またはリンクを掲載）していく予定である。HP のアドレスは以下である。できるかぎり英語にも対応する HP としている。

<https://gnss-learning.org/>

図 1.4a は日本語版 HP のトップページを示す。図 1.4b は英語版 HP のトップページを示す。順番にプログラム概要、ブログ、GNSS ニュース、プログラムおよび教材、コンテスト、発展的課題、発表資料、リンクという構成になっている。ブログでは、セミナーへの参加者からの質問をこちらでも受け付けることができるようにしている。2022 年 1 月に行われた米国航法学会主催の国際学会において、ソフトウェア GNSS 受信機を利用した発表が何件もあったため、それらの情報を HP 上に掲載した。上記で掲載した今年度準備したフロントエンド等だけでなく、以前より研究室で所有していたフロントエンドについても情報を掲載し、本課題に参加されるメンバーで必要な方がおられる場合は、貸し出しをすることとしている。



図 1.4a 日本語版 HP のトップページ



図 1.4b 英語版 HP のトップページ

1.5 本取り組みの紹介

本課題で実施している内容について、参加者を募る意味でも、2021 年度の学会やセミナー等で紹介を行った。表 1.5 に発表を行った期日と名称について示す。これらの発表の質疑において、GNSS の関係者からの本課題への大きな期待が感じられた。

表 1.5 発表を行った期日と名称

期日	主催	題目
10 月 29 日	測位航法学会 シンポジウム	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
11 月 8 日	QBIC	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
2 月 21 日	測位航法学会 WG	本課題の進捗報告
2 月 21 日	測位航法学会 WG	An Open Source GNSS SDR : Development and Applications
3 月	JST サクラサイエンス プログラムのセミナー	SDR-Receiver と SDR-Demo

1.6 研究課題を含めた打ち合わせやアンケート

本課題の取り組みにおいて、教員らで進めている内容を客観的に見て頂くために、1.5 本取り組みの紹介だけでなく、実際に本分野における国内国外のエキスパートの方々と対面または WEB 会議で打ち合わせを実施し、意見交換を行った。ここに記載した方々以外にも、3 大学で共同研究を実施している GNSS 関連の企業の方とも、この取り組みに対する期待や課題について意見交換を行った。特に関心の高い企業からは、若手のエンジニアを本課題のセミナーに参加頂くことで話しを頂いている。表 1.6a に打合せの詳細を示す。

表 1.6a 打合せの詳細

期日	氏名	内容
11 月 5 日	辻井先生 (大阪府立大学→ 2022 年 4 月より大 阪公立大学)	辻井先生は、以前よりソフトウェア GNSS 受信機を利用した、航空機等でのロバストな GNSS 受信機を開発されてきた経験がある。対面での打ち合わせを府立大で実施し、辻井先生の研究室で実際にソフトウェア GNSS 受信機を用いた研究をされている内容について伺った。また研究室にいた大学院生の方々と研究内容について議論をすることができた。
11 月 26 日	山田氏 (JAXA)	JAXA の山田氏は特に RTK や PPP のアルゴリズム開発の経験をお持ちの方である。山田氏より本課題における研究課題の提示を頂いた。具体的には、将来の PPP や L6 信号の有効利用につながる研究課題であり、やや学生には難しい内容であったが、2022 年度のセミナーでの学生らの取り組みのレベルに応じて展開できればと思う。
	荒井氏 (AAI-GNSS 技術 士事務所)	荒井氏は、以前より測位航法学会のセミナー等でソフトウェア GNSS 受信機を担当されていた。現在はコンサルタントをされているが、以前は古野電気の GNSS 研究グループのトップの方であった。この時だけでなく折をみて全般的なアドバイスを頂いており、上述のセミナーで利用した教材等も参考にさせて頂いている。
5 月 17 日 7 月 12 日 9 月 13 日 11 月 16 日	川口 貴正様 (三菱電機株式会 社)	GNSS 関連の企業に勤めている川口氏には、「信号捕捉アルゴリズムの調査と改良」や、「月面活動に向けた測位技術開発 (GNSS 月ナビゲーション衛星システム)」といった有益な発展的課題への意見を頂いた。また、セミナーで使用する教材へ目を通して頂き、アドバイスを伺った。
12 月 13 日	Dinesh 先生 (東京大学)	Dinesh 先生は GNSS 関連の企業をへて、現在東大で Spoofing 対策や PPP 用の廉価な小型受信機を開発をされている。もともとソフトウェア GNSS 受信機を利用した、研究開発をされていた経験もあり、有益な研究課題のご提示を頂いた。また、今後の Spoofing 対策などについて、本課題に積極的に関わっていただける予定である。

3 月 11 日	Ivan 氏 (iP-Solutions)	Ivan 氏は、長い間、ソフトウェア GNSS 受信機やシミュレータの開発で起業された方であり、多くの経験がある。今回リアルタイムのソフトウェア GNSS 受信機を、Ivan 氏より導入することで、中のプログラムまで含めたアドバイスを頂くことで了解を得ている。また、有益な研究課題についてもご提示頂いた。
----------	--------------------------	--

表 1. 6b は、有識者の方々と打ち合わせをする中ででてきた研究課題についてまとめたものを示す。

表 1. 6b 研究課題

	課題名	概要
1	電離層シンチレーションモニター用受信機の開発	電離層のシンチレーションモニターは世界中ですでに実施されているが、対応する受信機がサイエンス用のため非常に高価であることが指摘されていた。SDR（ソフトウェア受信機）上では、100Hz 等で観測データを出力することは容易なため、低コストかつリアルタイムに上記のような受信機を代用できるか検討する。
2	QZS-1R で放送されている L1C/B 信号の解析	JAXA において QZS-1R の新しい信号を試験しており、そこで取得された SDR 用の IF データをベースに、L1C/B 信号の信号捕捉・追尾を実装し性能を把握する。
3	CSK 変調の信号追尾の可能性について	準天頂衛星の初号機は L6 信号が CSK 変調ではなく BPSK 変調であったため、搬送波位相の観測が容易で実際に市販受信機で出力された観測データも問題なかった。しかし、2-4 号機では CSK 変調とされているため、搬送波位相等の観測データの確認ができていない。そこで、CSK 変調されたデータでの、搬送波位相観測値の取得を試みる。
4	GNSS と IMU の Deep カップリング	GNSS と IMU 等の他センサーとの統合は広く行われているが、大部分がルースカップリングかタイトカップリングにとどまっている。本課題であるソフトウェア GNSS 受信機の信号追尾部を学ぶことで、この信号処理

		部での IMU 等とのカップリングが可能となり、より深いレベルでのカップリングを試すことができる。
5	LEO 衛星（低軌道衛星）からの信号処理	今回準備したフロントエンドでは、幅広い帯域に対応するものがあり、例えば LEO 衛星の周波数帯に応じた信号処理の開発が可能である。実際に、LEO 衛星を利用した測位等が、米国や中国で報告されており、これらはほとんどがソフトウェア受信機を利用したものである。

2. ソフトウェア受信機の開発

本事業では GNSS 受信機関連技術の教育プログラムとして、ソフトウェア受信機技術を用いる。GNSS の信号処理を汎用 PC 上のソフトウェアで処理する、ソフトウェア GNSS 受信機は現在幅広く利用されている。ソフトウェア GNSS 受信機は、GNSS 信号処理アルゴリズムが容易に変更可能であり、高精度化のための新たなアルゴリズムのテストや、新しく送信される GNSS の信号の受信が可能など、研究・開発用途として市販の GNSS 受信機と比較して多くの利点がある。

一方で GNSS 信号処理を学ぶ学生のためのプラットフォームとしても、ソフトウェア GNSS 受信機は有用である。ソフトウェア GNSS 受信機は、ソフトウェア上で GNSS の信号処理を順次行うため、ソースコードをベースに GNSS 信号処理をたどることができ、GNSS 受信機の処理を学ぶことが容易である。GNSS 受信機に含まれる技術は、測地学、宇宙、情報通信、数学的なバックグラウンドと多岐にわたり、初学者にはこれらの技術を網羅的に学ぶのは難しく、GNSS 研究者の人口が少ない原因でもあると考えられる。そこで、本事業では教育用途に開発した GNSS ソフトウェア受信機を通して、GNSS の信号処理を自分の手で実際に体験しながら学ぶことで、GNSS 信号処理を容易かつ効率的に学ぶプログラムを構築する。

2.1 GNSS ソフトウェア受信機概要

図 2.1 に GNSS 受信機の構成を示す。GNSS 受信機は RF 信号を受信しデジタライズするフロントエンド部と、デジタライズされた RF 信号から GNSS 信号をそれぞれの衛星ごとに捕捉、追尾、ナビゲーションメッセージのデコード、さらにそれらを統合して測位演算を行うベースバンド処理部から構成される。このベースバンド処理を汎用の PC 上で動作するソフトウェアで行う場合、ソフトウェア GNSS 受信機と呼ばれる。PC で GNSS 信号処理を行うために、アンテナを接続したフロントエンドを PC に接続し、USB やイーサネットなどの

インターフェイスにより PC にデジタライズされた RF 信号を取り込む。ベースバンド処理では、様々なプログラム言語で記述された信号処理プログラムにより、GNSS の信号処理を行う。

表 2.1 にハードウェア GNSS 受信機とソフトウェア GNSS 受信機の比較を示す。ソフトウェア GNSS 受信機の 1 番のメリットはその柔軟性である。信号処理のプログラムを容易に変更することができ、さらにソースコードから GNSS 信号処理の流れをたどることができる。このため、ソフトウェア GNSS 受信機を用いることで、GNSS 受信機の動作や信号処理詳細を効率良く学ぶことが可能となる。

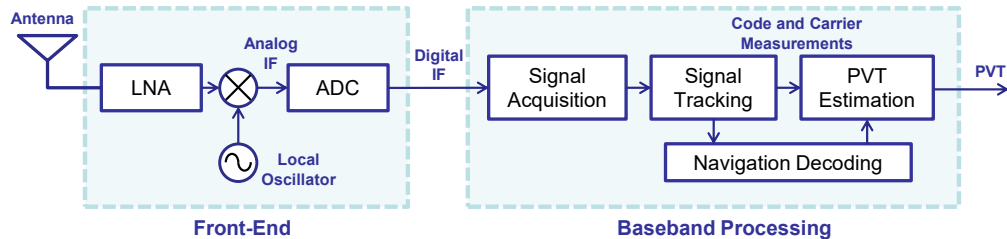


図 2.1 GNSS 受信機の構成

表 2.1 ハードウェア受信機とソフトウェア受信機の比較

	ハードウェア受信機	ソフトウェア受信機
ベースバンドアルゴリズムの変更	×	◎
新しい信号への対応	△	○
実行速度	◎	△
消費電力	○	×

2.2 開発環境の選定と構築

2.2.1 既存のオープンソースソフトウェア GNSS の調査

現在、いくつかのオープンソースのソフトウェア GNSS 受信機が公開されている。本事業ではソフトウェア GNSS 受信機を利用して GNSS 受信機技術を習得することを目指す、まず既存のオープンソースとして利用可能なソフトウェア GNSS 受信機について調査し、本事業で開発・利用するソフトウェア GNSS 受信機の目標を決定する。

表 2.2 に現在公開されているオープンソースのソフトウェア GNSS 受信機の代表的なものを示す。[1]に示す GNSS-SDR は、最も幅広く利用されているが、開発言語は C++であり、また非常に多くの外部ライブラリに依存している。ソースコードのファイル数も非常に多く、初学者がソースコードをベースに GNSS 信号処理を学ぶのには向いていない。[2]の GNSS-SDRLIB は C 言語で記述されており比較的シンプルではあるが、やはり信号処理の

流れをソースコードからたどるのは困難である。[3]は MATLAB ベースで記述された GNSS ソフトウェア受信機である。GNSS 信号処理について書かれた本と一緒に公開されており、GNSS 受信機の処理を学ぶのには向いているが、フロントエンドからのデジタルデータの入力とリアルタイム処理には対応しておらず、統合的に GNSS 受信機を学ぶのには向いていない。[4]は PocketSDR とよばれるオープンハードウェアの GNSS フロントエンドと Python で記述された GNSS 信号処理が公開されている。ソースコードは非常に簡潔に短く整理されており、信号処理の流れを追うのは容易である。しかし残念ながらリアルタイムでの GNSS 測位部分は含まれておらず、信号の追尾までの処理が公開されている。

表 2.2 オープンソースソフトウェア GNSS 受信機の比較

	GNSS-SDR [1]	GNSS-SDRLIB [2]	MATLAB SDR [3]	PocketSDR [4]
開発言語	C++	C	MATLAB	Python
リアルタイム処理	○	○	×	△
他周波数対応	○ L2, L5	△ LEX	×	◎ All Signals
マルチ GNSS 対応	○	○	×	○

2.2.2 開発環境と目標

上記のようにいくつかのオープンソースのソフトウェア GNSS 受信機が公開されているが、GNSS 受信機の実用用途として利用するにはいくつかの不足している点がある。[4]に示す PocketSDR プロジェクトは、ソースコードが理解しやすく、フロントエンドと併せて本事業でも利用する予定である。

本事業で GNSS 信号処理を学ぶメインの方法として、モデルベース開発 (MBD: Model Based Development) を GNSS 信号処理に適用する。MBD は様々な「モデル」を作りシミュレーションで検討をする開発手法であり、個別のモデルを接続していくことで全体の処理を実現する。MBD のソフトウェアとしては、MATLAB/Simulink が最も利用されており、様々な業界でスタンダードな開発環境となっている。MATLAB/Simulink には様々な信号処理のモデル (ブロック) が既に用意されている。これらのモデルを組み合わせることでソフトウェア GNSS 受信機を実現することで、信号処理の流れを容易に理解することが可能になり、GNSS 初学者のための教育用として非常に有用になると考えられる。

図 2.2 に本事業で想定するソフトウェア GNSS 受信機の概要を示す。プログラム受講者それぞれの個別のノート PC 上で、それぞれ GNSS 信号処理を実行し、GNSS 受信機の信号処理や動作を学習することを想定する。ノート PC には本事業で選定したフロントエンド、

GNSS アンテナを接続し、ノート PC にリアルタイムに RF データを取り込む。ノート PC 上では、MATLAB/Simulink により開発した MBD ベースのソフトウェア GNSS 受信機でリアルタイムに信号処理を行い、その内容を可視化する。プログラム受講者は GNSS 信号処理のパラメータや構成を MBD で変更しながら、GNSS 信号処理を学ぶことができる。

表 2.3 に開発環境の詳細を示す。MATLAB/Simulink 2021b を利用し、各ツールボックスを利用して、モデルを構築する。また、処理の高速化のために、モデルを C 言語に変換してコンパイルして実行する Simulink Coder を利用する。

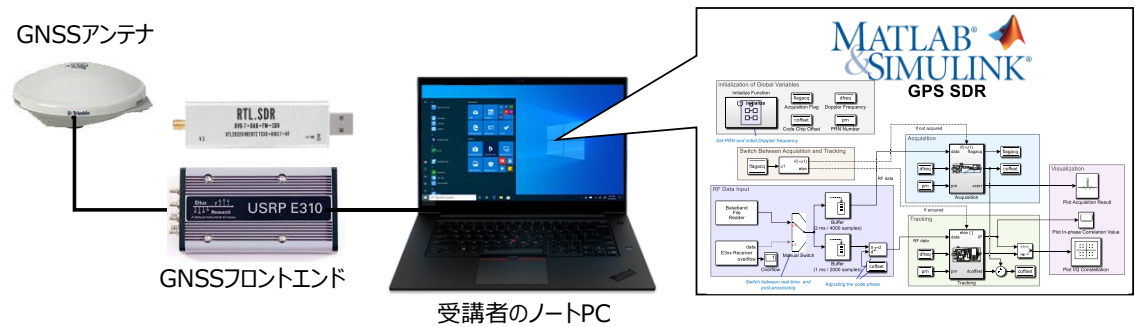


図 2.2 本事業で目指す GNSS ソフトウェア受信機の概要

表 2.3 ソフトウェア GNSS 受信機開発環境

OS	Windows 10
プロセッサ	Intel Core i7-1185G7
RAM	32GB
ソフトウェア	MATLAB/Simulink 2021b
利用 Toolbox	Communications Toolbox DSP System Toolbox Instrument Control Toolbox Simulink Coder

2.3 ソフトウェア受信機の開発

本年度は本事業で利用する MATLAB/Simulink を用いたソフトウェア GNSS 受信機のプロトタイプ開発を行った。図 2.3 に MATLAB/Simulink で作成した GNSS ソフトウェア受信機のモデルの概略図を示す。ソフトウェア受信機の入力パラメータとして、各チャンネルに割り当てる GPS の PRN (Pseudo Random Noise) 番号を指定している。PRN 番号数のチャンネルにおいてそれぞれ信号捕捉、追尾、ナビゲーションメッセージのデコードが行われ、全てのチャンネルの出力が統合されて疑似距離の観測値が計算される。ソフトウェア GNSS

受信機の出力として、RTCM MSM フォーマットで疑似距離とナビゲーションメッセージが TCP/IP によりソフトウェア外部へ出力される。それぞれのブロックの詳細について、以下で説明する。

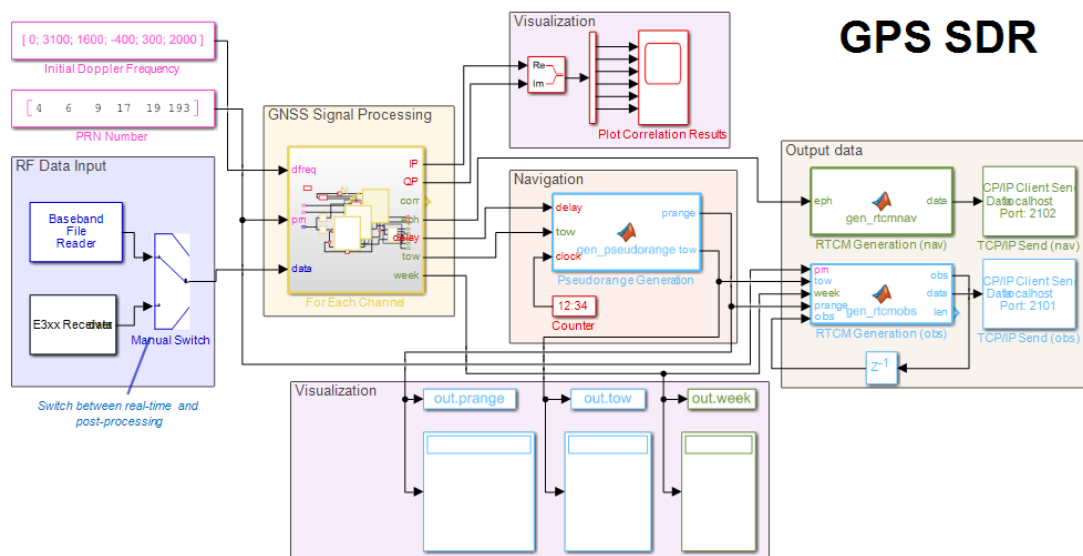


図 2.3 GNSS ソフトウェア受信機のプロトタイプのプロット図

2.3.1 信号入力部

GNSS 信号をデジタル化し PC へ取り込むためのフロントエンドとして、USRP E310、RTL-SDR の 2 つを使用する。これらのフロントエンドは Simulink でサポートされており、前者は FPGA を内蔵し Simulink で作成したモデルを FPGA へ実装することが可能である。後者の RTL-SDR は非常に低価格であることから、教育用途に向いている。フロントエンドの選定の詳細、それぞれのフロントエンドの性能の詳細は 3 章で示している。

図 2.4 に信号入出力部のモデルの詳細を示す。フロントエンドからリアルタイムで RF データを入力するモードと、事前にフロントエンドを利用して取得したベースバンドファイル (BB ファイル) からデータを読み込む後処理の 2 種類に対応している。これらはトグルスイッチにより明示的に切り替えることができる。図 2.5 に信号入力部のパラメータ設定を示す。中心周波数、サンプリング周波数などを設定することができる。ここでは、中心周波数として GNSS の L1 信号である 1575.42MHz、サンプリング周波数として 2MHz を設定している。

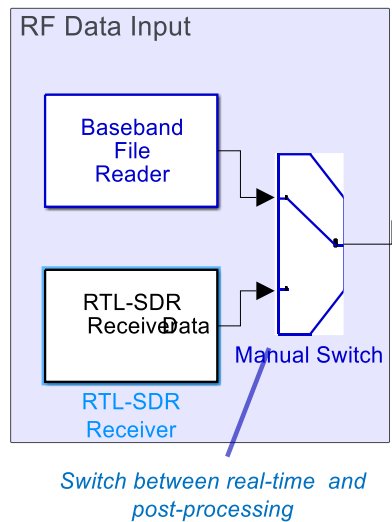


図 2.4 信号入力部

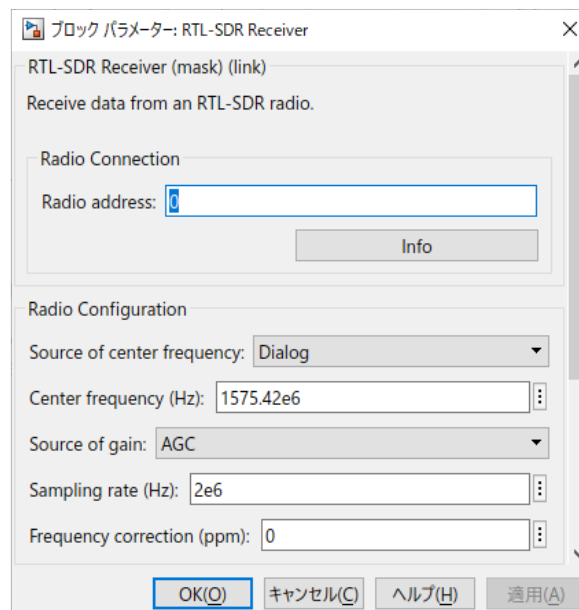


図 2.5 信号入力部のパラメータ設定

2.3.2 各チャンネルの処理

図 2.6 にそれぞれのチャンネルごとの信号処理のブロック図を示す。信号処理は、信号捕捉、信号追尾、ナビゲーションメッセージのデコードの 3 つにわかれる。それぞれの詳細について説明する。

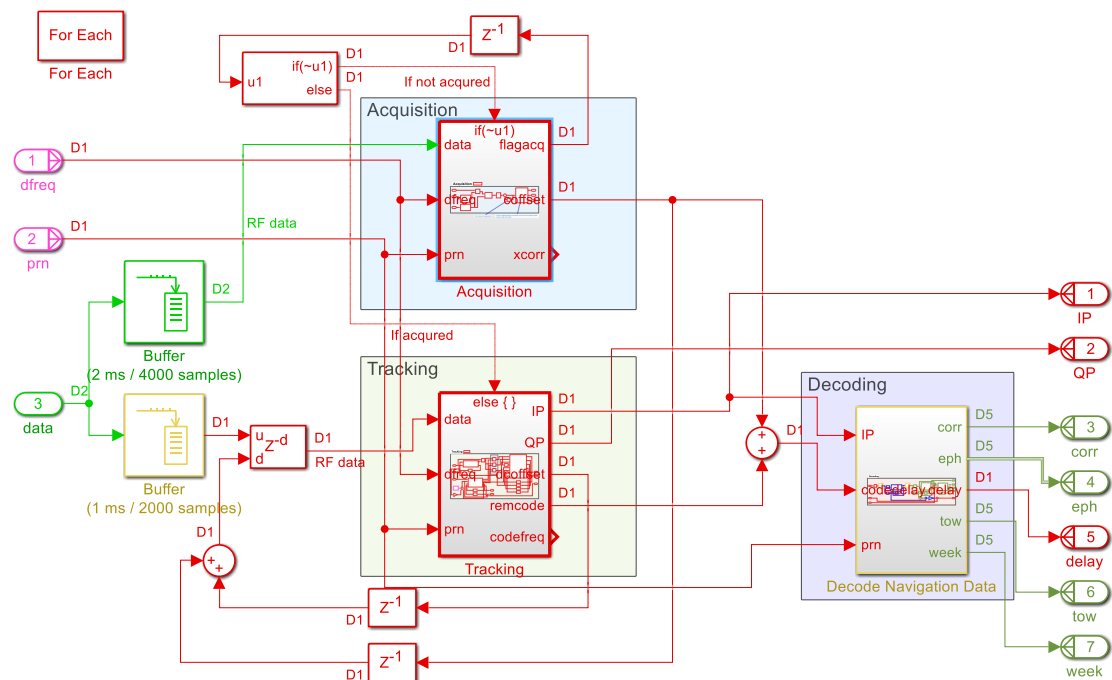


図 2.6 各チャンネルの信号処理モデル

2.3.3 信号捕捉

信号捕捉ブロックの中の処理を図 2.7 に示す。GNSS 信号には PRN コードと呼ばれるコードが BPSK 変調され重畳されており、PRN コードを用いて信号の捕捉や追尾、タイミングの同期が行われる。入力された RF 信号はまずそれぞれの PRN 番号の受信機内部のレプリカコードとコードの位相を変化させながら相関をとることで、その PRN 番号の衛星の信号が含まれるかどうかの信号捕捉が行われる。ここで主に衛星の速度と受信機クロック変動による受信機-衛星間の相対速度から、各衛星の信号にはドップラー周波数が発生する。信号の捕捉では、コード位相とドップラー周波数の 2 次元探索が必要となる。ソフトウェア受信機ではこのコード位相の探索に、FFT (Fast Fourier Transform) を用いた並列探索を用いる。今回開発したモデルでは、Zero Padding FFT と呼ばれる 2 倍のコードを用いた相関値計算手法を用いる。GPS の L1CA 信号の場合、PRN コード長は 1ms である。このため 2ms 分の長さの RF データサンプルを入力し、搬送波位相を除去 (Carrier Wipe-off) した後にドップラー周波数の探索ステップごとに FFT による相関を計算する。ここで、FFT による相関には MATLAB の Communication Toolbox に含まれる Cross-Correlation ブロックを使用している。相関結果を設定回数分積分し (non-coherent integration)、Check Acquisition ブロックにおいて相関ピークが設定値を上回った場合に信号を捕捉完了とし、その際のドップラー周波数とコード位相を出力する。

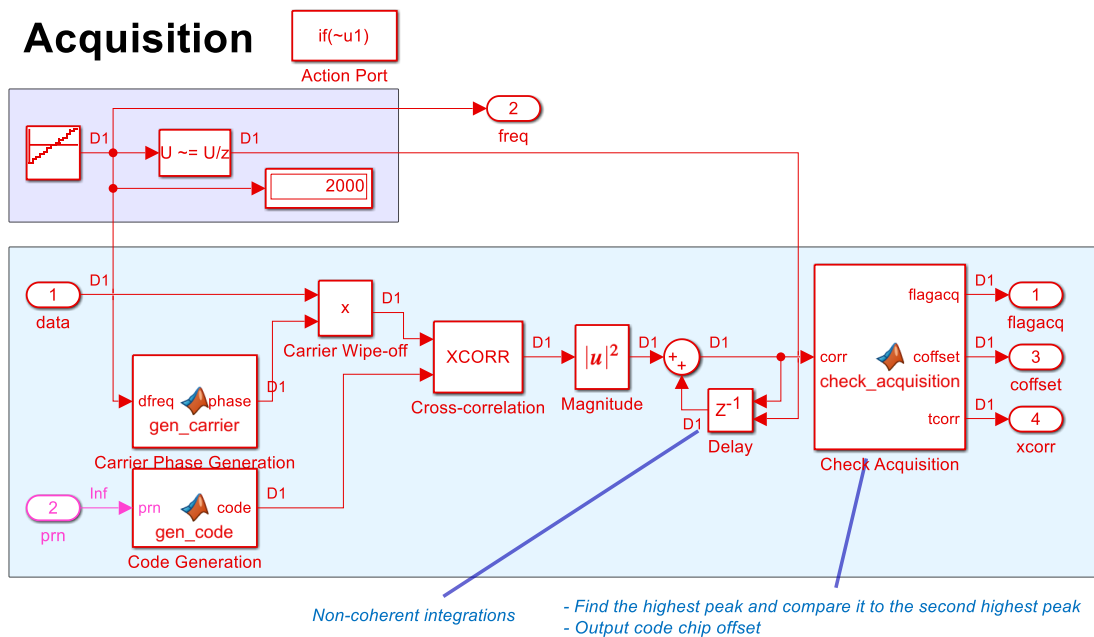


図 2.7 信号捕捉ブロック

2.3.4 信号追尾

図 2.8 に信号追尾ブロックの中の処理を示す。信号追尾ブロックの入力は信号捕捉ブロックで推定されたコード位相によりタイミングを同期した 1ms 分のサンプリングである。信号追尾ブロックでは信号捕捉ブロックと同様に、搬送波位相を除去した後に、Early-Prompt-Late (E-P-L) の 3 点でコード位相をシフトしたレプリカコードとの相関を計算する。E-P-L 相関器の出力から、Delay Lock Loop (DLL)、Phase Lock Loop (PLL)、Frequency Lock Loop (FLL) により、ドップラー周波数とコード位相の修正量を算出し、フィードバックする。これらの処理を 1ms ごとに繰り返すことで、GNSS 信号を追尾する。GNSS 信号が追尾できている場合、相関値の In-Phase 成分には、ナビゲーションメッセージビットが表れる。信号追尾ブロックの出力は、推定したドップラー周波数とコード位相、さらに In-Phase 相関値となる。

Tracking else {}

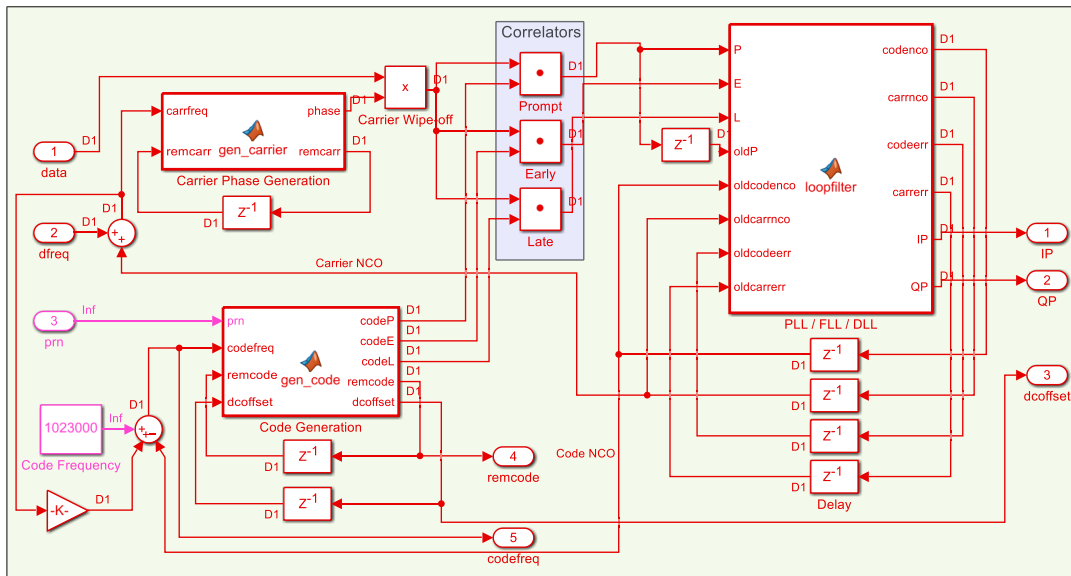


図 2.8 信号追尾ブロック

2.2.5 ナビゲーションメッセージデコード

図 2.9 にナビゲーションメッセージデコードブロックの中の処理を示す。1ms の In-Phase 相関値から 20ms のナビゲーションメッセージのビット同期とビットの決定を行う。L1CA 信号のナビゲーションメッセージは 300 ビットで 1 サブフレームとなる。ナビゲーションビットからサブフレーム先頭のプリアンブルを探索し、サブフレームビット同期を行う。さらに 300 ビットのサブフレーム単位でナビゲーションビットのデコードを行う。ナビゲーションメッセージデコードブロックの出力は、デコードされたナビゲーションメッセージ（エフェメリス、衛星時計情報）と、サブフレームの同期タイミングの情報である。

[illegible]

2.2.6 疑似距離算出と測位

28

2.3 ソフトウェア受信機の評価

本事業で作成したプロトタイプソフトウェア受信機の評価のために、フロントエンドとしてRTL-SDRを用いたリアルタイム動作の確認を行った。GNSS アンテナは空が開けた環境に設置し、GPS の6 衛星を対象に信号捕捉、追尾、ナビゲーションメッセージのデコードを実施した。図 2.11 に1 衛星の信号の捕捉結果を示す。信号捕捉により検出したピークのコード位相とドップラー周波数が信号追尾ブロックに送信される。図 2.12 に信号追尾ブロックの出力の相関値の出力を示す。この図から、それぞれのチャンネルにおいてGNSS 信号が正しく追尾できていることが確認できる。図 2.13 にRTKLIB による測位結果を示す。ソフトウェア GNSS 受信機を用いて、リアルタイムに測位が可能であることを確認した。以上により本年度 MATLAB/Simulink で開発したソフトウェア GNSS 受信機のプロトタイプが正しく動作していることを確認した。

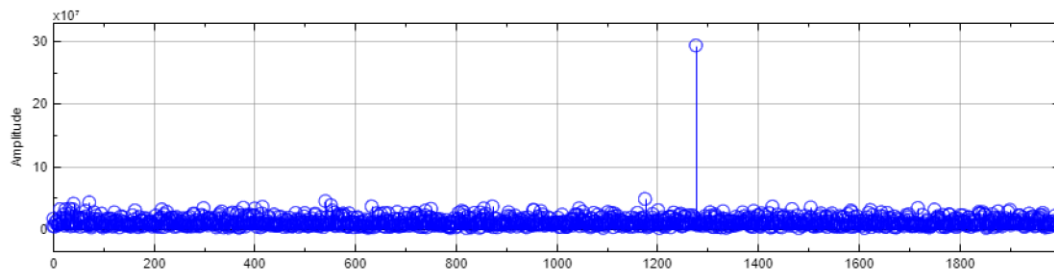


図 2.11 信号捕捉結果

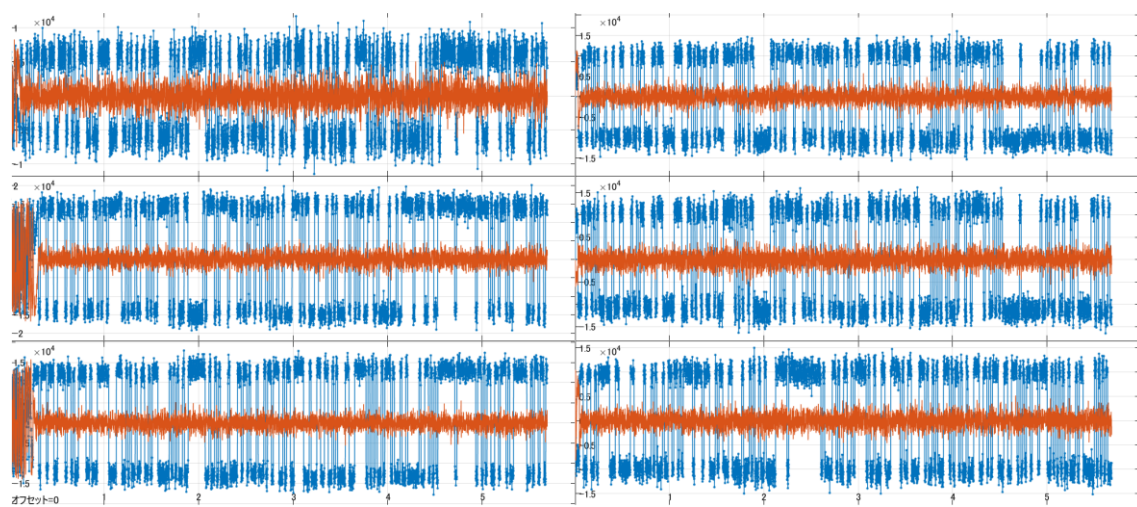


図 2.12 信号追尾状況の可視化

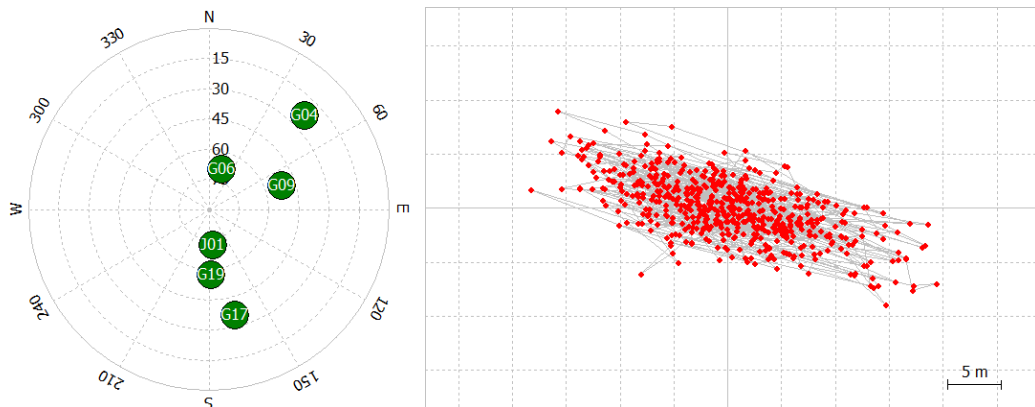


図 2.13 測位結果

参考文献

- [1] GNSS-SDR: <https://gnss-sdr.org/>
- [2] GNSS-SDRLIB: <https://github.com/taroz/GNSS-SDRLIB>
- [3] Borre, Kai, et al. *A software-defined GPS and Galileo receiver: a single-frequency approach*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [4] <https://github.com/tomojitakasu/PocketSDR>

3. 受信機プラットフォームの開発

本業務では、人材育成事業に利用するソフトウェア受信機を動作させるための機器やツールの選定を実施した。特に、アンテナから高周波部のフロントエンド、負荷の大きな計算に耐えうる計算機などの検討を行った。さらに、将来的なリアルタイム化やFPGA化を見据えた受信機プラットフォームの開発を行った。本章では、これら機器やツールの選定結果に加え、受信機プラットフォームの開発成果について報告する。

3.1 フロントエンドの選定

本事業では、モデルベース開発（MBD: Model Based Development）でのソフトウェア受信機開発のために、Matlab/Simulinkを採用している。Matlab/SimulinkのCommunication Toolboxでは、すでにいくつかのソフトウェア無線フロントエンドがサポートされており、その機能ブロックをSimulink上で接続するだけで、無線信号のサンプリングデータを取り込むことができる。現在、Communication Toolboxがサポートしている市販フロントエンドは、表1にまとめる。それぞれ、最終的な製品化に向けた開発キットであったり、教育向けの製品であったりと、ターゲットの異なるフロントエンドとなっている。

表1：モデルベース開発向けのフロントエンド

フロントエンド	開発用	教育用	価格
Xilinx Zynq-Based SDR	◎	×	\$4,000
USRP Embedded Series (E310)	○	○	\$4,500
USRP Networked, Bus, and X Series	△	○	\$2,500
ADALM-PLUTO SDR	×	◎	\$230
RTL-SDR	×	◎	\$30

Xilinx Zynq-Based SDRは、ソフトウェア無線の製品化に向けた開発キットであり、Xilinx社が提供するSoC（System on Chip）デバイスであるZynqシリーズの評価基板と、Analog Devices社が提供する高集積化RFトランシーバであるAD9361の評価基板で構成される。USRP Embedded Seriesの製品であるE310は、Xilinx Zynq-Based SDRと同じZynqとAD9361をパッケージ化した製品であり、開発用にも教育用にも利用可能である。USRP Networked, Bus, and X Seriesは、同Embedded SeriesのE310よりも安価であるが、対応する周波数や帯域幅など、機能面においてE310よりも制限が多い。ADALM-PLUTO SDRは、教育向けに開発された製品であり、Analog Devices社のAD9363トランシーバICが搭載されている。開発向けの他の製品に比べて安価であるが、搭載されているリファレンスクロックの周波数安定度がやや低いという問題がある。RTL-SDRは、アマチュア無線

などのホビー用途に販売されているフロントエンド製品であり、受信のみに対応している。非常に安価であるが、帯域幅が 2MHz 程度とやや狭く、広帯域の GNSS 信号の受信には対応できないという問題がある。

このような検討結果をもとに、本事業では、ソフトウェア GNSS 受信機のフロントエンドとして、USRP Embedded Series の E310 と、RTL-SDR を採用した。これらフロントエンドの外観を図 1 に示す。さらに、詳細な性能比較を表 2 にまとめる。



図 1：ソフトウェア GNSS 受信機フロントエンド

表 2：フロントエンド性能比較

	USRP E310	RTL-SDR
周波数レンジ	70MHz～6GHz	24MHz～1.8GHz
帯域幅	56MHz	2.56MHz
ADC ビット数	12	8
サンプルレート	61.44MHz	2.56MHz
受信チャンネル数	2	1
送信チャンネル数	2	0
インターフェイス	1000 Base-T Ethernet	USB 2.0
無線 IC	Analog Devices AD9361	Realtek R820T2
周波数安定性	2ppm	<1ppm

USRP E310 は、すべての GNSS 信号をカバーできる周波数レンジと帯域幅を持っており、フルスペックでのソフトウェア GNSS 受信の動作に最適なフロントエンドといえる。また、小型なアルミケースに収められており、堅牢で携帯性も高く、屋外での実験などにも利用可能である。しかし、高額であるため数を揃えることは難しく、参加者全員が同時に利用するようなハンズオンの演習などには不向きである。

一方で、RTL-SDR は帯域幅が狭く、GNSS 信号としては代表的な GPS L1 C/A 信号の受信以外は難しく、ソフトウェア GNSS 受信機のフロントエンドとしての利用範囲は限定されてしまう。しかし、価格は\$30 程度と非常に安価であり、ハンズオンの演習などで、参加者全員が同時に利用できる数を揃えることができる。そのため、モデルベース開発によるソフトウェア GNSS 受信機の機能に触れるための入門的なフロントエンドとしては最適といえる。

このように、本事業では、ソフトウェア GNSS 受信機の入門的な学習からフルスペックでの動作実験までカバーできるように、これら 2 種類のフロントエンドを選定した。

3.2 計算機の選定

ソフトウェア GNSS 受信機は、その内部動作を可視化し、理解しやすいという利点がある反面、受信機内部の信号処理をソフトウェアで実行するため、処理能力の高い計算機が必要となるという欠点がある。そこで、本事業では、ソフトウェア GNSS 受信機のモデルベース開発に利用する Matlab/Simulink や、そのフロントエンドである USRP E310 や RTL-SDR のシステム要求から、信号処理を実行する計算機の要求仕様を検討し、ハンズオンの演習などで使用する計算機の選定を行った。

現時点の Matlab/Simulink の最新リリース版である 2020a のシステム要求を表 3 にまとめる。

表 3 : Matlab/Simulink のシステム要求

項目	推奨システム
OS	Windows 10
プロセッサ	Intel/AMD 64 ビットプロセッサ 4 コア以上 AVX2 拡張命令のサポート
主記憶装置	SSD (31GB 以上のディスクスペース)
RAM	1 コアあたり 4GB
グラフィックボード	Communication Toolbox には不要

これらシステム要求に加えて、USR P E310 はインターフェイスに 1000 Base-T Ethernet を使用しているため、計算機側も Ethernet ポートを装備していることが望ましい。また、ハンズオンの演習で利用することを想定すると、計算機はデスクトップではなく、持ち運びが可能なラップトップであることが求められる。

これらの要求仕様を満足する計算機として、本事業において選定した製品を表 4 にまとめる。Mouse 社の DAIV 5P/5N は、ラップトップでありながら、インターフェイスとして 1000 Base-T Ethernet のポートを標準装備している製品である。

表 4：計算機の選定結果

実施機関	東京海洋大学	中部大学
メーカー / 型番	Mouse / DAIV 5P	Mouse / DAIV 5N
OS	Windows 10 Pro 64 ビット	Windows 10 Pro 64 ビット
プロセッサ	Intel Core i7-11800H 8 コア / 16 スレッド 2.3GHz (最大 4.6GHz)	Intel Core i7-10870H 8 コア / 16 スレッド 2.2GHz (最大 5GHz)
主記憶装置	512GB NVMe SSD	2TB NVMe SSD
RAM	32GB DDR4-3200	32GB DDR4-2666
インターフェイス	Ethernet, USB3.1	Ethernet, USB3.1

3.3 受信機プラットフォームの開発

本事業では、Matlab/Simlink によるモデルベース開発のソフトウェア GNSS 受信機に加えて、将来的なリアルタイム化や FPGA 化に向けた新しい教育用の受信機プラットフォームの開発を実施した。このような受信機プラットフォームの開発には、モデルベース開発のソフトウェア GNSS 受信機の資産が活用できるよう、Matlab/Simulink の Communication Toolbox がサポートしてる Xilinx Zynq-Based SDR を採用した。さらに、ハンズオンの演習などでも利用できる新しい教材として、小型、低価格でありながら、多システムかつ多周波数の GNSS 信号対応のフロントエンドの開発と評価を実施した。

3.3.1 Xilinx Zynq-Based SDR

Xilinx Zynq-Based SDR は、Xilinx 社が提供する SoC (System on Chip) デバイスである Zynq シリーズの評価基板と、Analog Devices 社が提供する高集積化 RF トランシーバである AD9361 の評価基板で構成される開発キットである。表 5 に本事業で採用した評価基板をまとめる。また、これら評価基板を接続した開発キットの外観を図 2 に示す。

表 5 : Xilinx Zynq-Based SDR の構成

評価基板	メーカー / 型番
Zynq 評価基板	Digilent / ZYBO-Z7
AD9361 評価基板	Analog Devices / AD-FMCOMMS3-EBZ

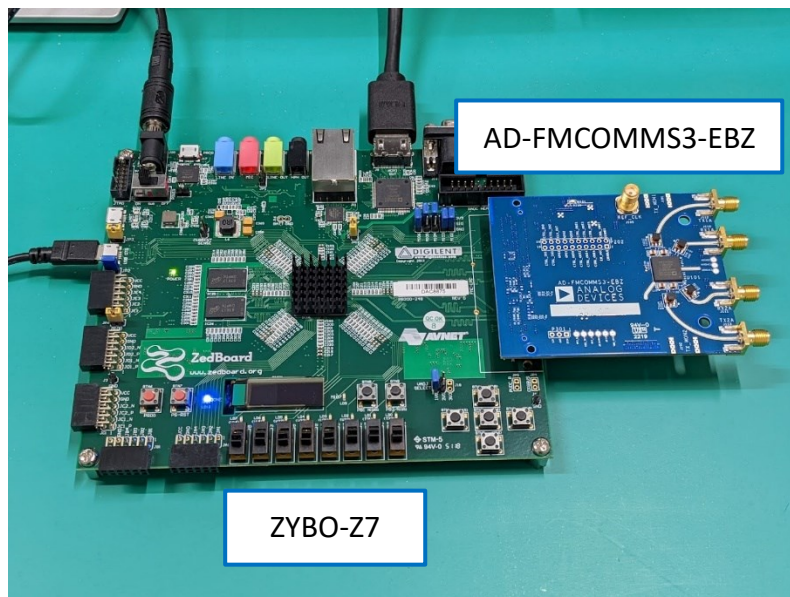


図 2 : Xilinx Zynq-Based SDR の外観

Xilinx 社の Zynq は、デュアルコアの ARM Cortex-9 プロセッサと Artix-7 FPGA を統合した SoC デバイスである。GNSS 信号の関連処理などの高頻度・低レベルな処理を FPGA で、航法メッセージのデコードや測位演算などの低頻度・高レベルな処理を ARM プロセッサで実行することで、リアルタイムで動作可能な受信機プラットフォームを実現する。

具体的な GNSS 受信機機能の実装は、令和 6 年度以降に実施予定の発展的課題のテーマのひとつとして実施する予定である。

3.3.2 MAX2771 フロントエンドの開発

Xilinx Zynq-Based SDR に採用されている無線 IC である AD9631 は、4G/5 基地局を主なターゲットとして開発された高集積化 RF トランシーバであり、70MHz～6GHz の範囲で中心周波数を設定することが可能である。また、帯域幅も最大で 56MHz に対応している。非常

に柔軟性の高いフロントエンドであるが、送受信の両方に対応した高価なデバイスであり、GNSS 信号を受信する目的としては高機能すぎる面もある。

そこで、本事業では、ハンズオンの演習などで RTL-SDR の代わりとして利用できる新しい教材を目指して、小型、低価格でありながら、多システムかつ多周波数の GNSS 信号対応のフロントエンドの開発を行った。このようなフロントエンドの無線 IC として、MAXIM 社の MAX2771 を採用している。MAX2771 は、GNSS 信号専用の無線 IC として開発され、単一チップで L1/E1、L2、L5/E5、L6/E6 帯のいずれかの GNSS 信号をカバーすることができる。チップには、デュアル入力 LNA およびミキサ、それに続くフィルタ、可変ゲインアンプ、マルチビット ADC と含む受信機回路とともに、フラクショナル N 周波数シンセサイザおよび水晶発振器が内蔵されている。これらフラクショナル N 周波数シンセサイザやフィルタのパラメータを、外部コントローラから SPI インターフェイス経由で設定することで、各種 GNSS 信号に対応することが可能となる。

本事業では、MAX2771 の動作確認のために、評価用のフロントエンド基板を設計した。図 3 に部品実装後のフロントエンド基板の外観を示す。

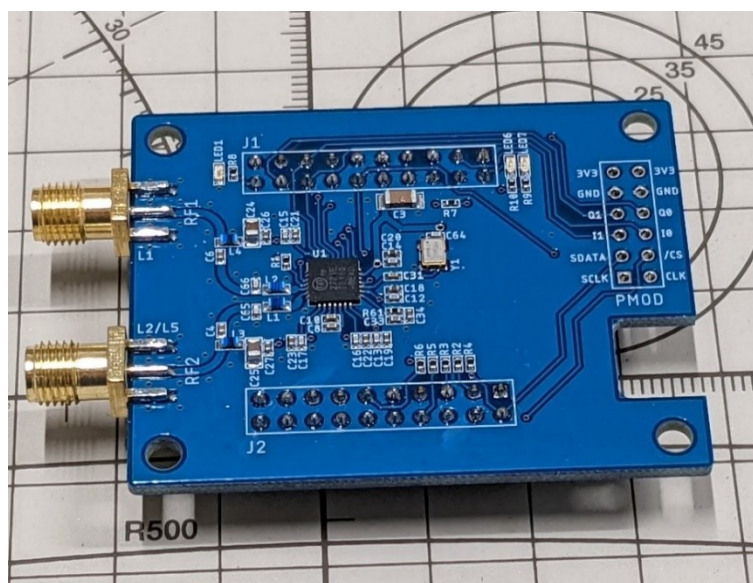


図 3 : MAX2771 評価基板の外観

MAX2771 で受信された GNSS 信号は、中間周波数信号やベースバンド信号にダウンコンバートされた後に、ADC でデジタル化される。このデジタル信号を PC に取り込むために、USB 2.0 デバイスコントローラである EZ-USB FX2LP を採用した。

EZ-USB FX2LP には、USB 2.0 の最大 480Mbit/s の転送レートを活用するために、スレーブ FIFO と呼ばれる機能が組み込まれている。スレーブ FIFO では、MAX2771 がマスターと

して動作し、ADC のサンプリングクロックである CLKOUT 信号で FX2LP の FIFO 入力を駆動する。これにより、ADC 出力のサンプリングデータを FIFO に取り込む。FIFO に入力されたサンプリングデータは、OUT 転送に設定された FX2LP のエンドポイントから PC に転送される。

EZ-USB FX2LP の基板には、Infineon 社から販売されている評価基板である Discovery Kit を採用した。図 4 に Discovery Kit の外観を示す。外部デバイスとのインターフェイスのために、搭載されている FX2LP の入出力ピンがすべてソケットピンに引き出されている。図 3 に示すフロントエンド基板は、この Discovery Kit に搭載できるように設計されている。



図 4 : EZ-USB FX2LP Discovery Kit の外観

EZ-USB FX2LP のファームウェアおよび PC 側のホストアプリケーションは、Infineon 社が提供するバルク転送のサンプルコードをベースに開発をおこなった。このバルク転送のサンプルコードは、EZ-USB FX2LP のデータバスに入力されるデータを最大レートで PC に転送するだけのプログラムである。これにより、フロントエンドのサンプリングデータを PC に転送し、保存している。このバルク転送に加え、フロントエンド基板上の MAX2771 を制御するために、EZ-USB FX2LP に内蔵されているマイコンから、SPI 経由で MAX2771 の各種パラメータを設定する機能も追加している。

3.3.3 MAX2771 フロントエンドの動作試験

MAX2771 フロントエンド基板を EZ-USB FX2LP Discovery Kit に搭載し、GNSS 信号の取り込みを行っている様子を図 5 に示す。この例では、GNSS アンテナを L1/E1 信号帯に対応した同軸コネクタ (RF1) に接続して、L1 信号の受信を試みている。

フロントエンド基板で取得した L1C/A 信号帯の中間周波数信号のパワースペクトル密度と 10ms 分のサンプリングデータの頻度分布を、それぞれ図 6 と図 7 に示す。逆拡散前の GNSS 信号は、熱雑音以下の信号強度であるため、図 6 では GNSS 信号のパワースペクトル密度の波形を観測することはできず、MAX2771 で設定したバンドパスフィルタの形状が現れている。パワースペクトル密度に目立ったスプリアスは観測されず、良好な信号が取得されている。

また、この時点で観測されている信号はほぼ熱雑音であることから、AD 変換後のサンプリングデータの頻度分布は正規分布に従うことになる。MAX2771 は 2 ビットの ADC を搭載しており、観測信号が $(-3, -1, +1, +3)$ の離散値に量子化される。この離散値が正規分布に従うとすると、 1σ に相当する $(-1, +1)$ が全体の 68% を占めることになる。図 7 の頻度分布では、やや DC バイアスによる分布の非対称性が現れているものの、信号が飽和するようなことはなく、正常にサンプリングされていることが確認できる。

さらに、ソフトウェア GNSS 受信機によって、取得した中間周波数信号の信号捕捉を行った結果を図 8 に示す。ここでは、例として GPS PRN12 番の L1C/A 信号の相関波形を示している。最大値を中心に、左右 1 チップのコード遅延分だけ広がる三角形の相関波形が確認できる。

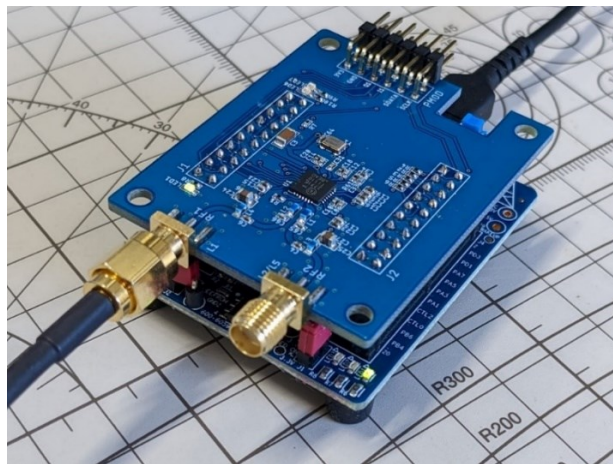


図 5 : MAX2771 フロントエンド基板の動作確認

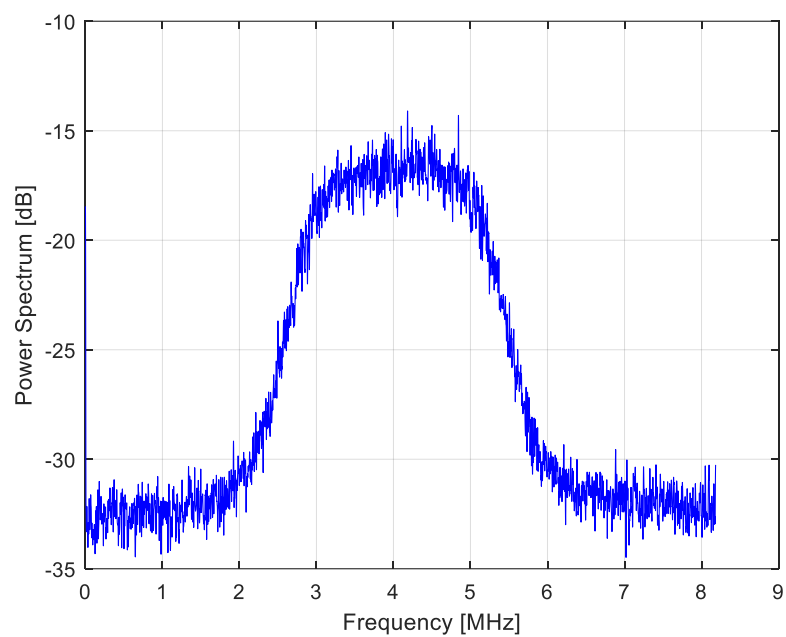


図 6 : GPS L1C/A 信号帯のパワースペクトル密度

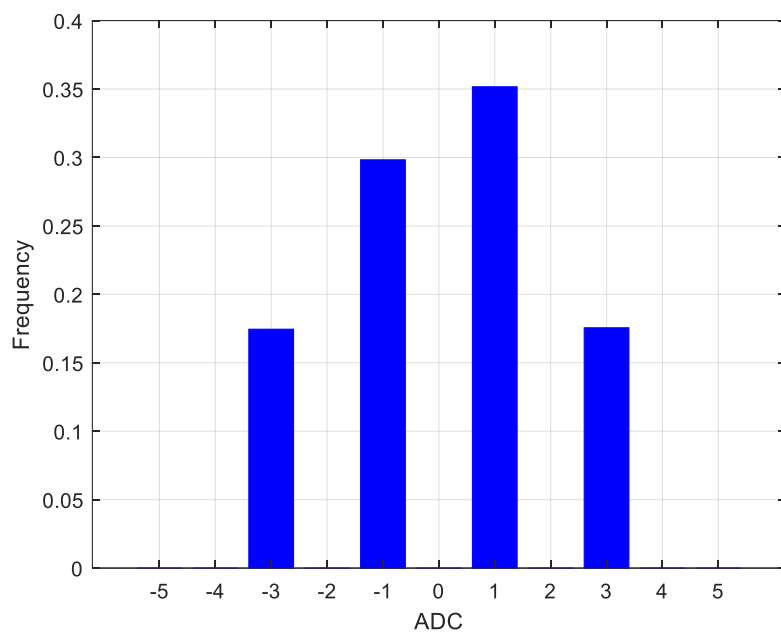


図 7 : GPS L1C/A 信号帯の ADC 頻度分布

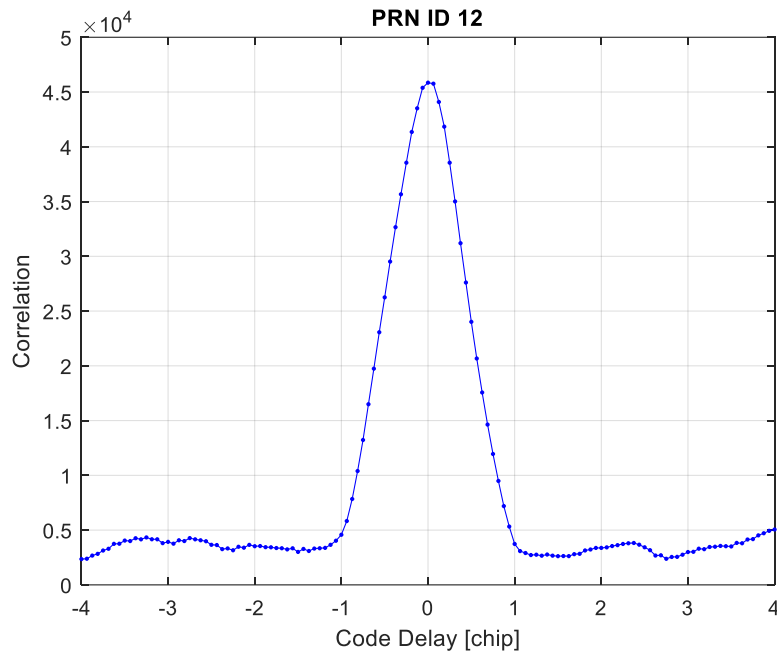


図 8 : GPS RPN12 衛星 L1C/A 信号の相関波形

同様に、MAX2771 の設定を L5 信号帯のベースバンド信号に切り替え、広帯域な測位信号を I/Q サンプリングで取得した例を図 9 と図 10 に示す。サンプリングデータの長さは、L1C/A 信号と同様に 10ms である。

図 9 のパワースペクトル密度では、DC 成分が顕著に表れている。図 6 の L1C/A 信号帯のパワースペクトル密度にも、同様に DC 成分が発生しているが、中間周波数信号の場合は、0Hz の DC 成分はバンドパスフィルタの帯域外となるため、十分に減衰されている。しかし、I/Q サンプリングのベースバンド信号では、DC 成分が帯域の中央に現れてしまうため、フィルタで減衰することが困難である。この DC 成分は、主に局部発振信号のリークによって生じるものであり、MAX2771 に搭載されている PLL やシンセサイザの設定を適切に選ぶことにより低減することができると思われる。

図 10 の頻度分布では、I/Q の両成分ともに、目立った偏りはなく、正常にサンプリングが行われていることが確認できる。

さらに、ソフトウェア GNSS 受信機によって、取得したベースバンド信号の信号捕捉を行った結果を図 11 に示す。ここでは、例として GPS PRN25 番の L5 信号の相関波形を示している。L1C/A 信号と同様に、最大値を中心に、左右 1 チップのコード遅延分だけ広がる三角形の相関波形が確認できる。

本報告書では、GPS L1C/A 信号と L5 信号の信号捕捉の例を示したが、同様に GPS L2C 信号、QZSS L6 信号など、各種 GNSS 信号の受信が確認できている。

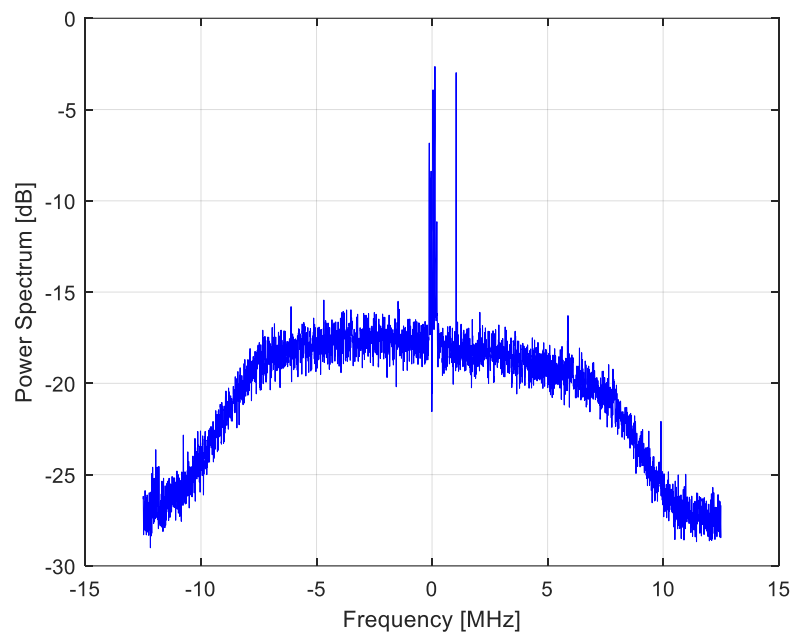


図 9 : GPS L5 信号帯のパワースペクトル密度

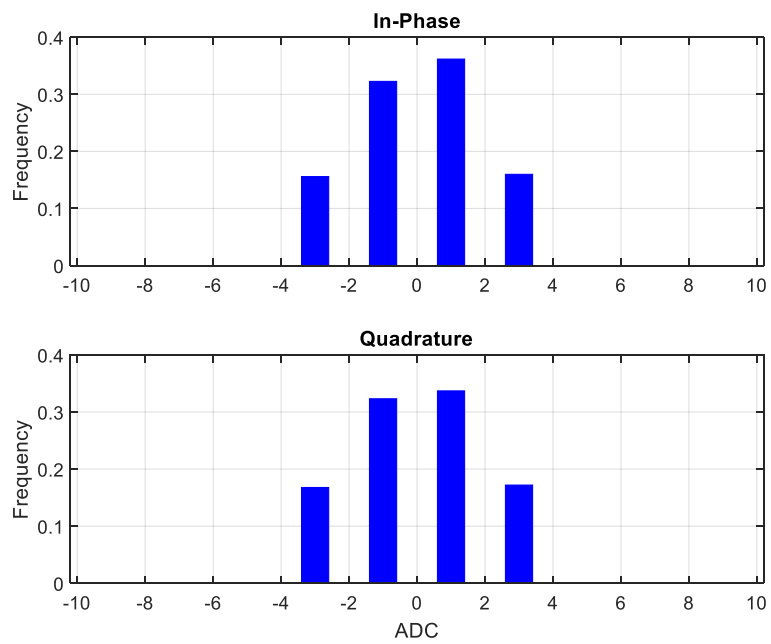


図 10 : GPS L5 信号帯の ADC 頻度分布

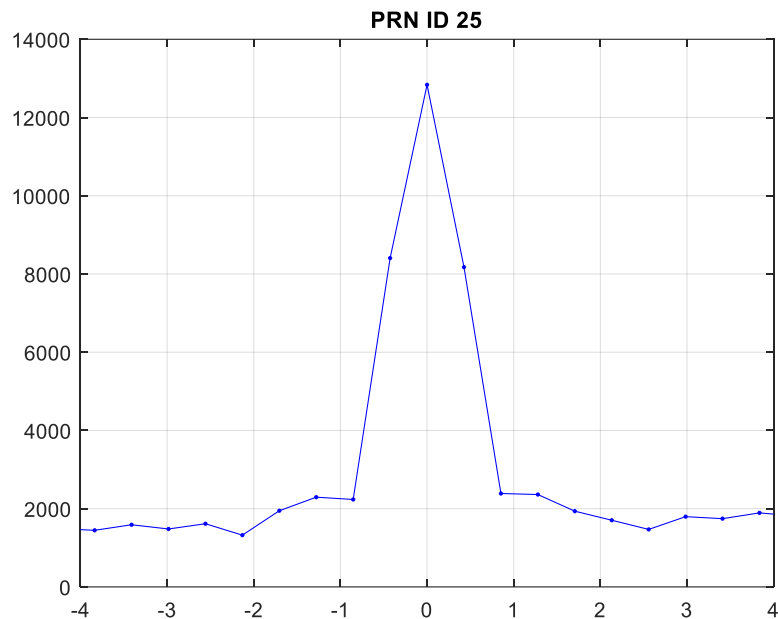


図 11 : GPS RPN25 衛星 L5 信号の相関波形

3.3.4 2 周波数対応フロントエンド基板の開発

MAX2771 は、各種 GNSS 信号の受信に対応しているものの、単一チップでは、いずれかひとつの信号しか受信できない。そのため、多周波数対応のフロントエンドにするためには、異なる周波数に設定した複数の MAX2771 を、共通のリファレンスクロックで同期させ動作させる必要がある。

本事業では、このようなフロントエンド基板として、2 周波対応のために 2 個の MAX2771 を搭載した基板の設計を行った。その回路パターンを図 12 に示す。アンテナで受信された測位信号は、電力分配器によって 2 つに分けられ、それぞれの MAX2771 に入力されている。なお、このフロントエンド基板も、EZ-USB Discovery Kit に搭載できるように設計されている。

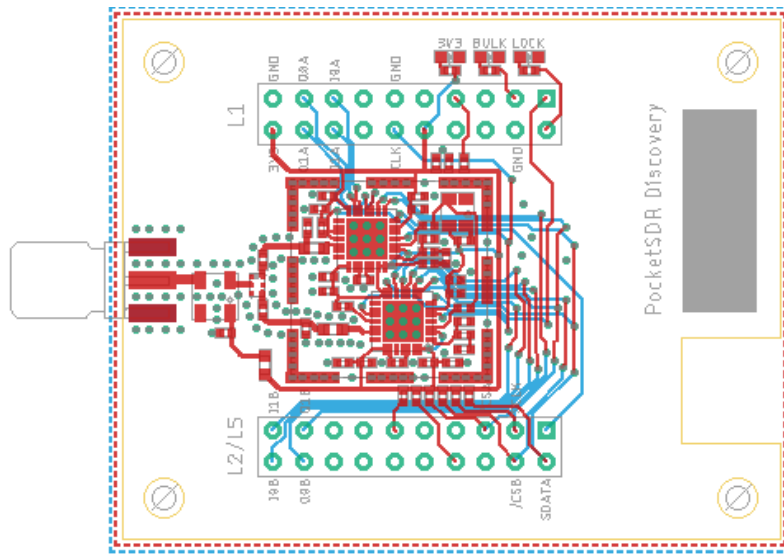


図 12 : 2 周波数対応フロントエンド基板の回路パターン

本事業で設計した 2 周波対応フロントエンドは、令和 5 年度に実施予定のセミナーや、令和 6 年度に実施予定の発展的課題などで、多周波数の GNSS 信号に対応した受信機の教材として活用する計画である。

参考資料 2022年3月10日に中部大学宇宙航空理工学科の生徒に対して、教材『4. フロントエンドの役割』を使った模擬抗議を行った。その様子を示した写真を参考資料として提示。

