

令和5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/宇宙航空人材育成プログラム」
委託業務成果報告書

令和6年5月
国立大学法人東京海洋大学

本報告書は、文部科学省の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5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/宇宙航空人材育成プログラム」の成果を取りまとめたものです。

目次

| | | |
|---------|-------------------------------------|----|
| 1 | はじめに | 1 |
| 1.1 | 委託業務の目的 | 1 |
| 1.2 | 業務の方法 | 2 |
| 1.3 | 当該年度における委託業務の結果概要..... | 3 |
| 2 | 実施内容 | 4 |
| 2.1 | 発展的課題への挑戦..... | 4 |
| 2.1.1 | ソフトウェア GNSS 受信機の FPGA 化..... | 4 |
| 2.1.1.1 | フロントエンド基板..... | 4 |
| 2.1.1.2 | GNSS 受信機プラットフォーム..... | 5 |
| 2.1.1.3 | GNSS 受信機開発の指導..... | 5 |
| 2.1.1.4 | 信号処理部の開発 | 6 |
| 2.1.2 | ソフトウェア GNSS 受信機による高精度化へのアプローチ | 8 |
| 2.1.3 | スプーフィング等の課題への利用 | 8 |
| 2.1.4 | GNSS と IMU の統合部での SDR 利用 | 13 |
| 2.1.5 | LEO 衛星の信号受信..... | 13 |
| 2.2 | GNSS シミュレータの実習..... | 16 |
| 2.2.1 | GNSS シミュレータ実習の講義内容..... | 18 |

| | | |
|---------|--|----|
| 2.2.1.1 | GNSS シミュレータの原理..... | 18 |
| 2.2.1.2 | GNSS シミュレータの実習..... | 20 |
| 2.2.1.3 | 多周波数対応 GNSS シミュレータの開発..... | 21 |
| 2.3 | コンテストの開催 | 26 |
| 2.3.1 | コンテストの概要..... | 26 |
| 2.3.2 | コンテストのためのデータ取得..... | 26 |
| 2.3.3 | 評価のためのリファレンス生成..... | 28 |
| 2.3.4 | コンテストの開催と実施方法..... | 29 |
| 2.3.5 | コンテスト結果 | 30 |
| 2.3.6 | 講評..... | 31 |
| 3 | 外部の方による支援..... | 33 |
| 3.1 | 第一線の企業で活躍された方によるソフトウェア GNSS 受信機開発に関する講義 | 33 |
| 3.2 | ソフトウェア GNSS 受信機の信号処理部および測位演算部に関する指導..... | 34 |
| 3.3 | ソフトウェア GNSS 受信機の高精度測位演算及び PocketSDR に関する講義 | 36 |
| 4 | まとめ..... | 37 |
| 5 | 添付資料..... | 38 |

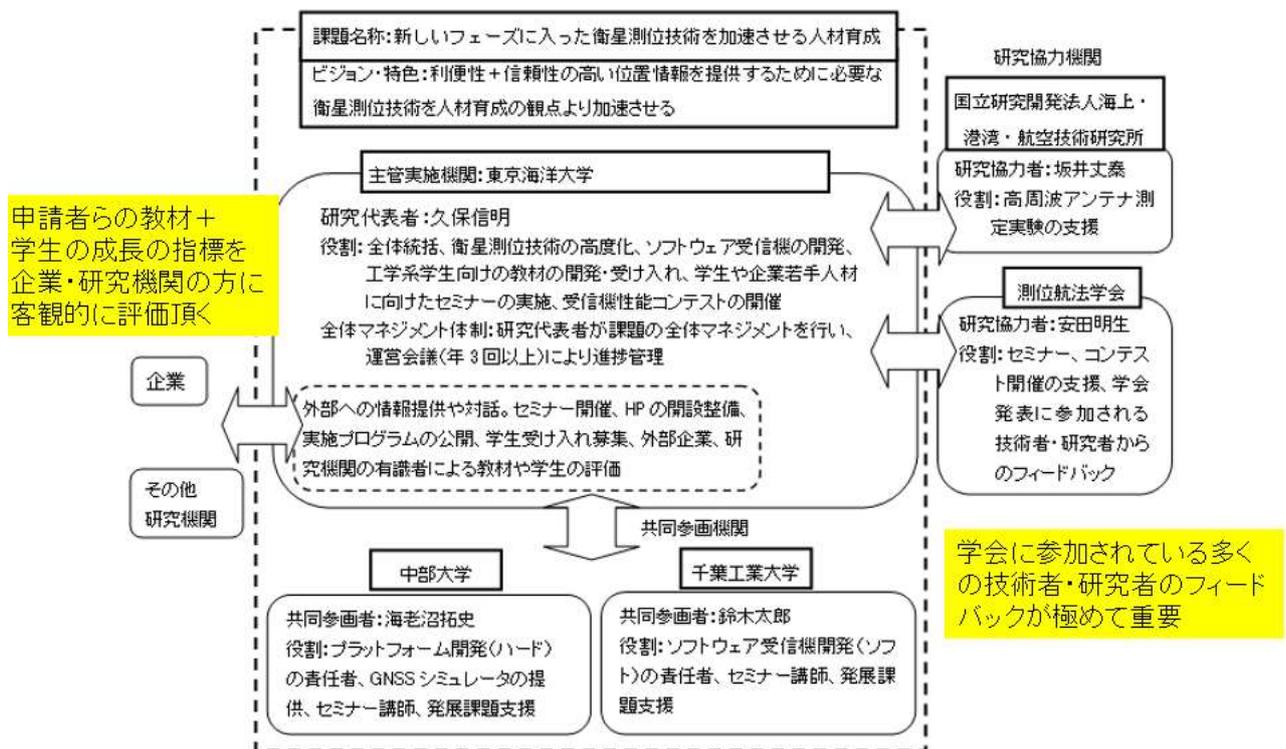
1 はじめに

1.1 委託業務の目的

本業務は、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、実際にユーザー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。図 1.1 に本業務の実施体制（2021 年度から 2023 年度）を示す。



【図 1.1: 本業務の実施体制（2021 年度から 2023 年度）】

1.2 業務の方法

令和5年度において予定されていた実施内容は以下のとおりである。

① 発展的課題への挑戦

令和4年8月、及び令和5年2月に開催した「ソフトウェア受信機プログラム」セミナーに参加した学生を対象に、学生らが興味を持った分野に応じて、いくつかの受信機の高付加価値に向けた発展的なテーマについて取り組む。例えば以下複数の分野において業務主任者、または専門分野の教員がオンライン中心で講義を行う。

- ・マルチパス誤差低減技術のための信号処理方法
- ・干渉・欺瞞信号に対する対策手法
- ・他センサとの統合を行うための手法
- ・低軌道衛星用の信号処理方法

本講義に参加することで、コンテストの課題への取り組みがスムーズに進むことも目的とする。参加学生に対して、衛星測位技術に関連する学会発表に関する情報を合わせて周知し、発表する学生を申請者らが支援する。

② GNSS シミュレータの実習

ソフトウェア受信機を開発する際、受信機テストの実施、及びその方法を習得することが重要である。GNSS シミュレータの使用方法を習得し、所定の信号を出力したときの受信機の振る舞いを確認することで、信号のテスト方法を学ぶ。使用受信機は開発したソフトウェア受信機と代表的な市販受信機も含めて比較できるようにする。1日の実習を1年間に2回程度実施する。学生の参加人数は、1回に10名程度とする。参加学生に事前に教材を配布する。尚、新型コロナウイルスの感染状況などによっては、オンラインでの開催もあり得る。

③ コンテストを開催

令和4年度に紹介したコンテストの具体的な内容を周知し、開催期間を設定する。令和5年度の下期を想定し、測位航法学会と連携して、コンテストの結果を発表するとともに、参加した学生の発表会を開催する。学会のシンポジウムの1つのセッションとすることで、学生らは学会発表の経験も合わせて体得することができる。同時にシンポジウムに参加される多くの大学・企業の関係者よりコメントを頂く。尚、新型コロナウイルスの感染状況などによっては、オンラインでの開催もあり得る。

1.3 当該年度における委託業務の結果概要

令和5年度における業務の結果概要は以下のとおりである。

① 発展的課題への挑戦

令和4年8月、及び令和5年2月に開催した「ソフトウェア受信機プログラム」セミナーに参加した学生を対象に、学生らが興味を持った分野に応じて、受信機の高付加価値に向けた発展的なテーマについて取り組んだ。以下5分野において業務主任者、または専門分野の教員、外部講師がオンラインまたは対面で講義を行った。

- ・マルチパス誤差低減技術など高精度化のための信号処理方法（久保）
- ・干渉・欺瞞信号に対する対策手法（久保）
- ・他センサとの統合を行うための手法（久保）
- ・低軌道衛星用の信号処理方法（久保）
- ・ソフトウェア受信機プログラムのFPGA化（海老沼）

本講義に参加することで、発展的課題への取り組みが進むことを目的とした。参加学生に対して、衛星測位技術に関連する学会発表に関する情報を合わせて周知し、積極的な発表を促した。

② GNSS(Global Navigation Satellite System)シミュレータの実習

ソフトウェア受信機を開発する際、受信機テストの実施、及びその方法を習得することが重要である。GNSSシミュレータの使用方法を習得し、所定の信号を出力したときの受信機の振る舞いを確認することで、信号のテスト方法を学んだ。使用受信機は開発したソフトウェア受信機と代表的な市販受信機も含めて、出力される測位結果等を比較できるようにした。1日の実習を1年間に2回実施した。学生の参加人数は、第1回に15名、第2回に24名であった。参加学生に事前に教材を配布した。尚、すべての実習は対面で実施した。

③ コンテストを開催

令和4年度に紹介したコンテストの具体的な内容を周知し、令和5年8月から9月の2か月間を設定した。測位航法学会と連携して、令和5年10月27日の測位航法学会シンポジウム2023内でコンテストの結果を発表するとともに、参加した学生の発表会を開催した。発表会を学会のシンポジウムの1つのセッションとすることで、学生らは学会発表の経験も合わせて体得することができた。同時にシンポジウムに参加した多くの大学・企業の関係者よりコメントを頂いた。尚、発表会は対面で実施した。

2 実施内容

今年度も昨年度に引き続き、一般社団法人測位航法学会の協力のもと様々なセミナーを開催した。また、ホームページの改修作業も Webcil へ依頼した。

2.1 発展的課題への挑戦

2.1.1 ソフトウェア GNSS 受信機の FPGA 化

本テーマでは、セミナーの参加者および令和 4 年度中間報告会の審査評価会委員から要望のあったソフトウェア GNSS 受信機の FPGA 化に取り組んだ。ソフトウェア GNSS 受信機は、信号処理のすべてがソフトウェアで処理されるため、受信機内部のすべてのパラメータにアクセス可能である。そのため、それらの可視化や変更が容易であり、教育目的には最適なツールである。しかし、ソフトウェアによる信号処理のために、少なくともノート PC 程度の計算機が必要となり、例えばドローンや自律走行車などに組み込むには、サイズや消費電力が問題となる。そこで、GNSS 信号の処理で特に計算負荷の大きな相関処理などを、FPGA によりデジタル回路化することで、組み込みシステムとして利用可能な小型、低消費電力の GNSS 受信機プラットフォームの開発を行った。

2.1.1.1 フロントエンド基板

ソフトウェア GNSS 受信機と同様に、FPGA 化された GNSS 受信機プラットフォームにおいて、信号処理部である FPGA にデジタル化された受信信号を提供するフロントエンドが必要となる。今回は、令和 4 年度に開発したソフトウェア GNSS 受信機用のフロントエンドである PocketSDR と同じ回路を FPGA 用にも採用した。ソフトウェア GNSS 受信機では、デジタル化された受信信号を USB 2.0 を通じて PC に転送しているが、FPGA 用では、直接 FPGA と接続することになる。図 2.1.1.1 に、今回開発した FPGA 用のフロントエンド基板の外観を示す。なお、SDR は Software Defined Radio の略称である。



【図 2.1.1.1 : FPGA 用フロントエンド基板】

2.1.1.2 GNSS 受信機プラットフォーム

FPGA ベースの GNSS 受信機プラットフォームの開発にあたり、その信号処理部には、FPGA と ARM プロセッサがひとつのチップに構成された AMD 社（旧 Xilinx 社）の Zynq を採用した。Zynq を用いることで、FPGA でデジタル回路を構成することによるハードウェアの開発だけではなく、ARM プロセッサを使用してソフトウェアの開発も行うことができる。さらに、これらがひとつのチップで構成されていることで、ハードウェアとソフトウェアの間のデータのやり取りを簡単に行えるという特徴を持つ。さらに、Zynq デバイスの開発環境として、FPGA 開発用の Vivado Design Suite とソフトウェア開発用の Vitis が、AMD 社から無償で提供されている。なお、この Vivado Design Suite は、令和 4 年度に実施したセミナーの「FPGA の活用」において使用した開発環境である。

Zynq を搭載した開発基板としては、Digilent 社から販売されている Zybo Z7-20 を採用した。Zybo Z7-20 は、教育目的の開発基板であり、価格および入手性に優れていると同時に、多チャンネル、多システムの GNSS 受信機の機能を実装するのに、十分な処理能力を備えている。Zybo Z7-20 にフロントエンド基板を接続した GNSS 受信機プラットフォームの外観を、図 2.1.1.2 に示す。



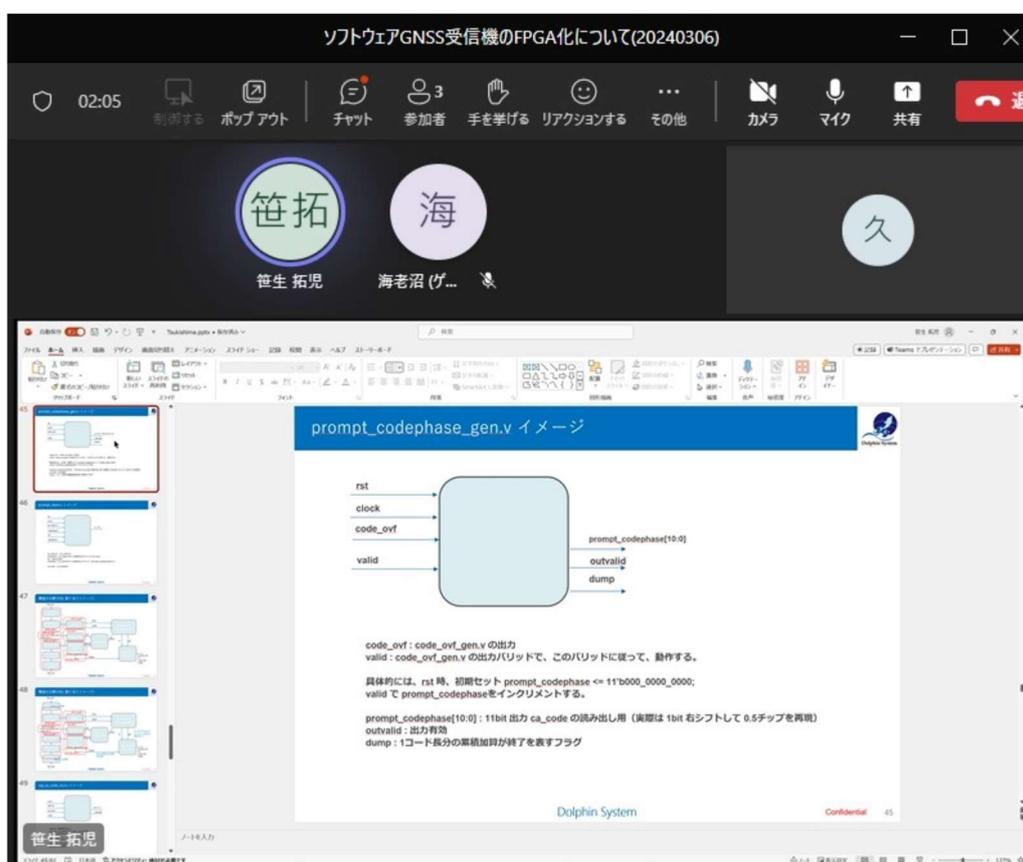
【図 2.1.1.2 : GNSS 受信機プラットフォーム】

2.1.1.3 GNSS 受信機開発の指導

発展的課題としてソフトウェア GNSS 受信機の FPGA 化に取り組むことを希望する参加者に対して、令和 5 年 11 月 21 日に東京海洋大学越中島キャンパスにて、GNSS 受信機プラットフォームの開発手順について指導を行った。指導内容としては、基本的な Vivado および Vitis の使用方法、さらに Zynq 搭載の ARM マイコンによるフロントエンドの設定方法について解説した。表 2.1.1.3 に、本課題への参加者リストを示す。

GNSS 受信機の信号処理において、もっとも計算負荷の高いものが相関処理である。相関処理とは、受信信号とレプリカ信号をサンプリング毎に掛け合わせ、それを拡散コードの長さ分だけ積算することで、受信信号とレプリカ信号の相関電力を計算する処理である。掛け算と足し算だけの簡単な処理であるものの、受信信号のサンプリング周期で実行されるために計算負荷が大きくなってしまふ。さらに、この処理を可視衛星のチャンネル数だけ、実行しなければならない。FPGA では、掛け算や足し算の演算をデジタル回路として実現することで高速化し、さらにそれらをチャンネル数だけ並列化することで、より高速な信号処理が可能となる。FPGA における相関処理の構成を図 2.1.1.4a に示す。

本開発では、相関処理回路の仕様をプロジェクト側で作成し、Verilog による実装をソフトウェア無線開発の実績が豊富なドルフィンシステムに依頼している。ドルフィンシステムとは、オンライン会議により月 1 回のペースで実装状況の確認を実施した。その様子を図 2.1.1.4b に示す。



【図 2.1.1.4b：相関処理回路開発の進捗確認】

上記の取り組みと並行して、室蘭工業大学の川口先生の研究室の学生が発展的課題へ参加し、信号捕捉部分の FPGA での実装を検討した。具体的には、本セミナーで利用した MATLAB のソースコードを渡し、一度概要を説明し、最初の信号捕捉部分の相関をとる箇所について、FPGA での高速化が可能かを卒業論文で取り組んだ。FPGA でのシミュレーションまで実装することができ、既存の高スペックの PC を利用した場合と FPGA を利用した場合で、チャンネル数でどの程度解析時間に差が出るか進めることができた。

その成果は電気学会の北海道支部で発表済みである。

2.1.2 ソフトウェア GNSS 受信機による高精度化へのアプローチ

精密測位手法である RTK (Real-Time Kinematic) 測位に利用できる観測データの算出部分の改良について、元古野電気の GNSS エンジニア山田勝雄氏にオンラインの Zoom でご教示いただいた。(詳細は本報告書 3.2 に記載) 具体的には、ソフトウェア GNSS 受信機用の 1 つのオープンソースプログラムを本セミナー前に公開しており、そのプログラムでは cm 級の測位ができない状況であったので、そのプログラムの信号追尾部と観測データ算出部を見ていただくことで、cm 級の測位が可能になるかどうか実際にプログラムを見ていただいた。こちらから、本セミナーで利用した PocketSDR で取得したデータと、あわせて同一アンテナで取得した市販受信機の観測データを準備することで、搬送波位相の二重位相差を出力し、その値が整数になるかどうかで確認した。ご教示いただいたポイントは以下の通りである。

- ・中間周波数による、コード位相の先頭のずれを修正するのではなく、基本信号追尾部で読み込むデータはすべての衛星チャンネルに対して一致させる→これまでコード位相の先頭から 1 ms ごとに読み込み、衛星のチャンネルごとにずれた処理をしていたが、そうではなく受信機側で発生させるコード相関情報をずらすことで IF データの 1ms 分の読み込みを完全に同期させる。

- ・同期した中間周波数のデジタルデータを読み込むことで、フロントエンドのクロックに同期した処理を必ず行う。

- ・航法データをデコードする際に、6 秒ごとのプリアンブル部を読み込むことで、データの正負を決定すること。プリアンブルの先頭が正になるようにすること。

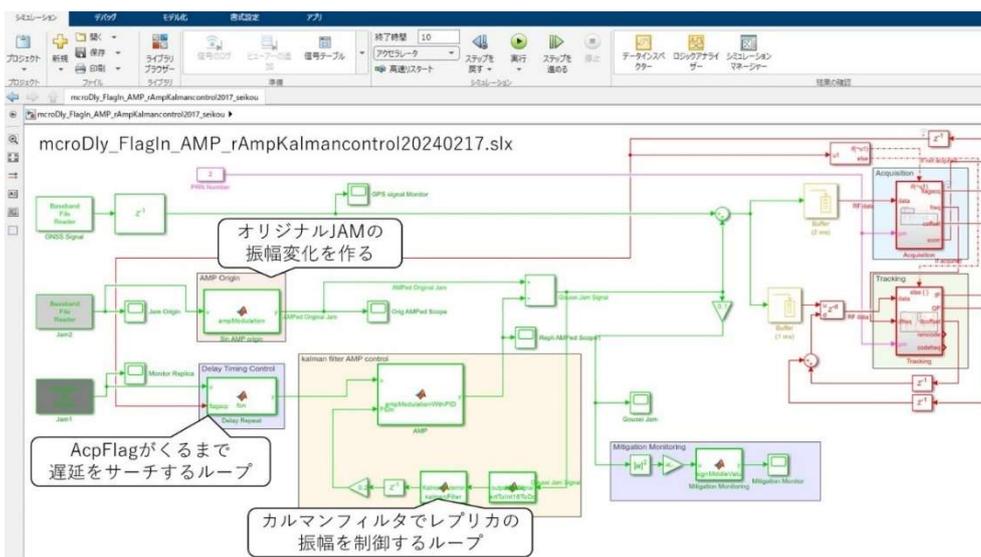
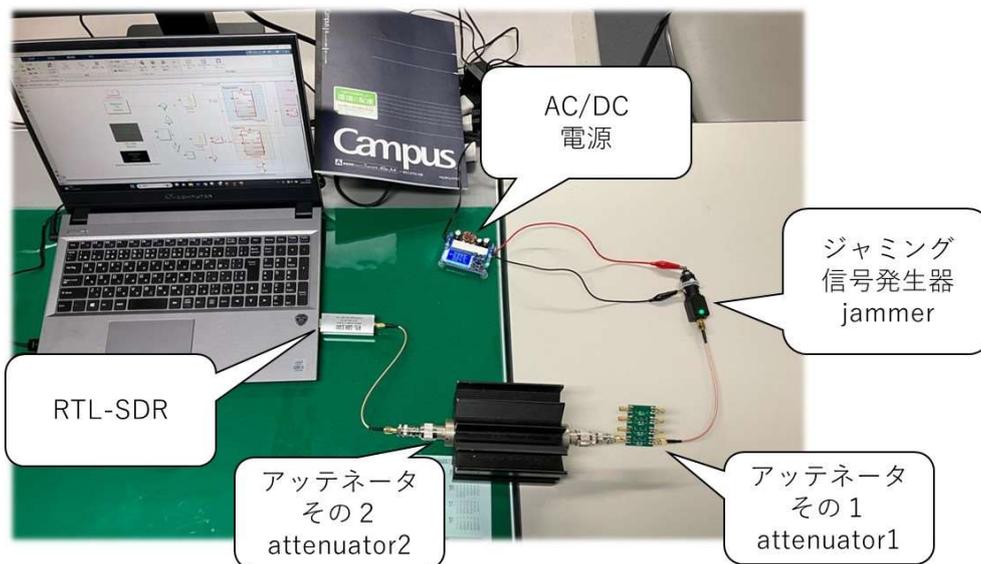
- ・擬似距離や搬送波位相を出力する際には、必ずすべての衛星に対して同一のタイミングになるように出力すること。同じタイミングのサンプリング数で出力する。衛星の時計と受信機側の時計が常にずれており、受信機側の処理は自身のクロックに依存しているため、そのクロックのタイミングでサンプリングしていることに注意すること。

- ・搬送波位相はドップラ周波数の積算値であり、その積算値は搬送波位相の追尾がロックしている限り、そのまま利用できる。

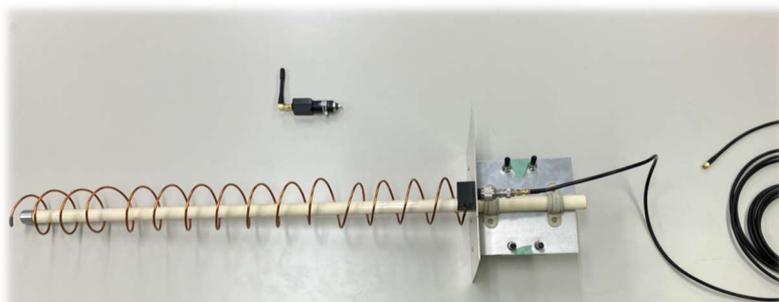
2.1.3 スプーフィング等の課題への利用

セミナー参加者の 1 人である海技教育機構海技大学校の奥富雄司氏は、GNSS の課題であるスプーフィングやジャミングの発生源である GPS ジャマーを購入し、実際にその波形等を確認した。その GPS ジャマーの信号を確認し、同様の信号をあえて発生させることで、ジャミングの影響を軽減できないか試みた。GPS ジャマーの信号はチャープ信号であった。その際に、本セミナーで習得した MATLAB ベースのソフトウェア GNSS 受信機の可視化ツールのうち、リアルタイムで IQ 信号を確認できるプログラムを利用し、実際に有効に活用できた。以下にそのときの実験の構成と、実際にセミナーで配布した MATLAB プログラムを改修している一例を示した。この手法は斬新であったが、市販の GPS ジャマーの内蔵クロックを模擬することは難しいことが大きな課題である。完全に模擬できなくともジャマー信

号の低減化を図れないか現在も検討中である。またスプーフィングの実験に必須である、指向性を持ったアンテナが市販でほぼ販売されていないことから、自身で試作し実際に実験で微弱電波の範囲内で GNSS 信号へのジャミング確認まで行うことができた。(図 2.1.3a、図 2.1.3b)



【図 2.1.3a：ジャマー信号に対する対処方法の検討】



【図 2.1.3b：GNSS のジャミング信号を送信するアンテナ制作】

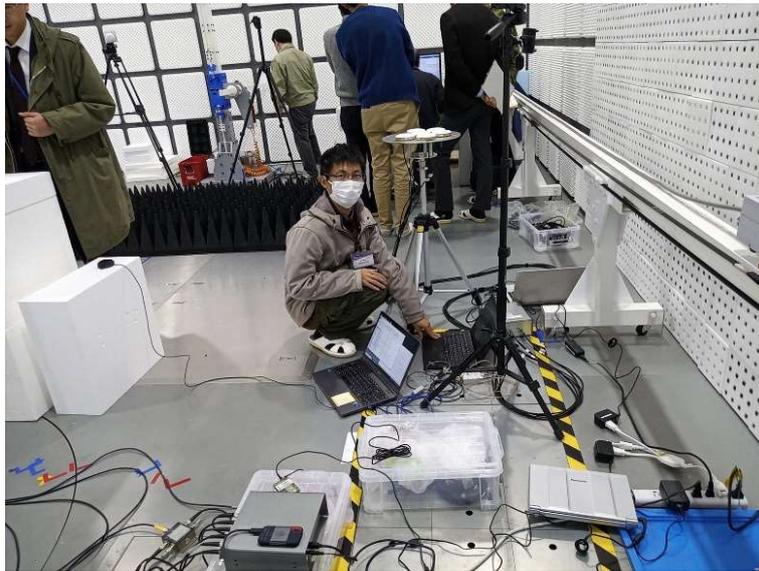
また、奥富氏にスプーフィング、ジャミングに関連するソフトウェア GNSS 受信機を用いた研究開発の動向及びその概要を調査して頂いた (図 2.1.3c)。それら調査結果は WEB に公開済みである。

| | 英語論文タイトル | 和訳タイトル | 発行会議 | 発表年 | URL | 概要に関するまとめ |
|----|---|--|----------|------|---|---|
| 1 | Baseline Spoofing Detection for Aircraft with Standard Navigation Hardware | 標準的なナビゲーション・ハードウェアを搭載した航空機のベースライン・スプーフィング検出 | ION GNSS | 2023 | https://doi.org/10.1109/ION52937.2023.10188881 | RTKソフトと市販アンテナのペアを使って航空機でスプーフィングを検知する。ベースライン崩壊とは何か知る必要性 |
| 2 | GNSS Spoofing Identification with Assistance of LEO Satellite Signal | LEO衛星信号の助けを借りたGNSSスプーフィング識別 | ITM | 2023 | https://doi.org/10.1109/ION52937.2023.10188881 | 真正信号とスプーフィング信号の2つを振幅と周波数コヒーレンスで分類して、2つに分けた後、LEO衛星の疑似レンジを使って、どちらが本物かを識別をシミュレーションを試みた |
| 3 | GNSS Spoofing Mitigation Using Multiple Receivers | 複数受信機によるGNSSスプーフィング緩和 | PLANS | 2020 | https://doi.org/10.1109/ION52937.2023.10188881 | 二つのアンテナが5m以上離れていればスプーフィングの軽減ができるという。単一のアンテナでスプーフィングされていればという条件付きであるが、搬送波位相の測定値を検出して除去することができる。Spirentのシミュレータを使った |
| 4 | Intelligent Antennas for Mitigating GNSS Jamming & Spoofing Hazards on the ERTMS Train Control | 欧州鉄道の列車管理システムにおけるGNSSジャミングとスプーフィングの危険性を軽減するインテリジェント・アンテナ | PNT | 2019 | https://doi.org/10.1109/ION52937.2023.10188881 | 商業的なアンチスプーフィング技術は鉄道用に設計されていない。インテリジェント・アンテナ・アレイに基づいており、VBR(Virtual Balise Reader)によっての回復力を向上させ、信号をクリーニングし、排除できる技法を提案する |
| 5 | Jamming and Spoofing Impact on GNSS Signals for Railway Applications | ジャミングとスプーフィングが鉄道アプリケーションのGNSS信号に与える影響 | ION GNSS | 2023 | https://doi.org/10.1109/ION52937.2023.10188881 | フロントエンド利得と搬送波対雑音電力密度の相関を利用した発見的判断アルゴリズムを導入する。データ解析の結果は、将来のGNSSベースの列車定位ソリューションに対する一連のテスト可能な要件を導き出すために使用できる |
| 6 | An Application for Detecting GNSS Jamming and Spoofing | GNSSジャミングとスプーフィングを検出するアプリケーション | ION GNSS | 2021 | https://doi.org/10.1109/ION52937.2023.10188881 | GNSSとネットワークの位置の比較、Androidの模擬位置フラグのチェック、GNSSとシステムの時刻の比較、自動利得制御(AGC)と搬送波対雑音密度(C/N0)の信号マトリクスの観察によって、スマホで使える検出アプリを議論する |
| 7 | Robust Dual -Antenna Receiver: Jamming/Spoofing Detection and Mitigation | 堅牢なデュアルアンテナ受信機: ジャミング/スプーフィングの検出と軽減 | ION GNSS | 2020 | https://doi.org/10.1109/ION52937.2023.10188881 | スプーフィングは複数のGNSS信号を生成し、単一のアンテナを使って送信するからスプーフィングされたPRNはすべて同じ伝搬チャネルを経験するため、空間的に相関がある。この特徴を利用して、空間的に分散した本物の信号と識別することができるが、デュアルアンテナを使用してそれを行う。 |
| 8 | A GNSS Jamming/Spoofing Test Suite for Smart Tachograph Applications | スマートタコグラフアプリケーションのためのGNSSジャミング/スプーフィング・テストに関する複数のアプリケーションセット(スイート) | ION GNSS | 2020 | https://doi.org/10.1109/ION52937.2023.10188881 | 自動車が行くシナリオを実験室のセットアップで作成し、各テストケースの詳細な説明を行う。さらに、この活動の主な目的でテスト中のGNSS受信機で観測されたいくつかの関連する結果も含まれている |
| 9 | Development of Array Receivers with Anti-Jamming and Anti-Spoofing Capabilities with Help of Multi-Antenna GNSS Signal Simulators | マルチアンテナGNSS信号シミュレータを用いたアンチジャミングおよびアンチスプーフィング機能を有するアレイ受信機の開発 | ION GNSS | 2019 | https://doi.org/10.1109/ION52937.2023.10188881 | シミュレータで構成されるシミュレータを使用し、対応する信号シナリオにおけるビームフォーミング、到来方向推定、スプーフィング検出の模範的な結果を得る。また、得られた結果を用いて、GNSSアレイ受信機が有望なアンチジャムおよびアンチスプーフィングソリューションの一部であることを説明する |
| 10 | Analyzing the Impact of GNSS Spoofing on the Formation of Unmanned Vehicles Swarms | 無人機(ドローン)群形成におけるGNSSスプーフィングの影響の分析 | ION GNSS | 2023 | https://doi.org/10.1109/ION52937.2023.10188881 | 群れを構成するほどの多くのドローンを対象にスプーフィングする。その耐性について調査し、通信アーキテクチャを使って堅牢なシステムにすべく、課題を明らかにしてドローン防御の道筋を示す。 |

【図 2.1.3c : 調査した内容一覧の一部】

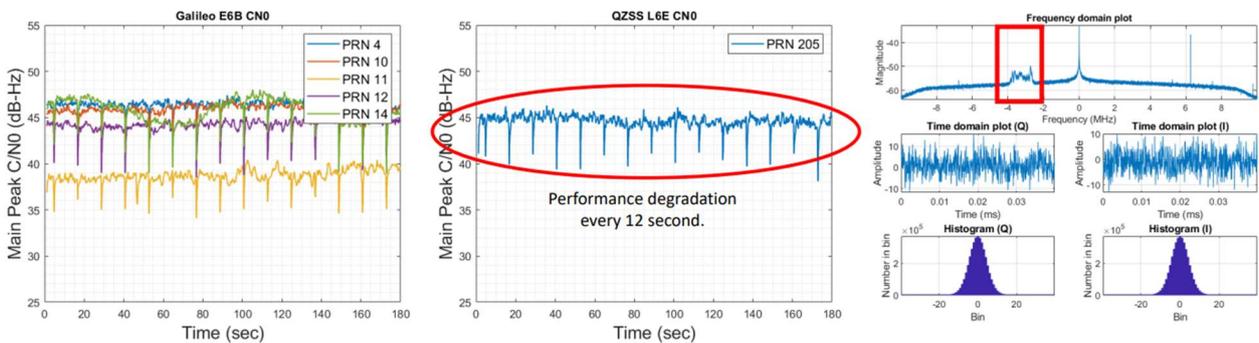
2023年11月29日~12月1日に大分県産業科学技術センターでGNSSスプーフィングテストを行った。テストは東京大学、ロケーションマインド(株)、JAXA、大阪公立大学と共同で行われ、暗室にてスプーフィング信号の受信データをさまざまなシナリオで取得した。主に PocketSDR を使用して Spoofing 中の IQ データの取得を行った。(図 2.1.3d)

また2024年3月11日から14日に福島県のテストフィールドにおいて、実際にジャミング・スプーフィング信号を屋外で送信するための予備実験を東京大学、ロケーションマインド(株)、JAXA、大阪公立大学と共同で実施した。



【図 2.1.3d : GNSS スプーフィングテストの様子】

海外の学生から数件問い合わせがあったものの、残念ながら対面でのセミナーに参加することはできなかった。しかし、発展的課題へ参加してもらい、そのひとつとして台湾成功大学の学生に PocketSDR を貸し出し、DME 及び TACAN によるみちびきの L6 信号への干渉の評価を行ってもらった。以下図 2.1.3e は、みちびきの L6E 信号への台湾の台南地域の飛行場近接での干渉の結果である。



【図 2.1.3e : DME 及び TACAN のみちびきの L6E 信号への干渉の様子】

東京大学の Dinesh 先生グループへ PocketSDR を貸し出し、特に信号認証における評価計画をたてることができた。実際の評価はこれからであるが、検討状況を以下に記載した。

QZSS SAS に対応した SDR の開発

- (ア) LNAV、CNAV、CNAV-2 (GPS、QZSS) の航法データストリームの出力
- (イ) I/NAV、F/NAV (ガリレオ) の航法データストリームの出力

- (ウ) L6E (MADOCA) の航法データストリームの出力
- (エ) 各信号のデータストリームからデジタル署名データを出力する。
- (オ) 信号認証の後処理を行う。
- (カ) 可能であれば、少なくとも準天頂衛星の LNAV や CNAV のような一部の信号については、リアルタイム化する。これにより、ユーザーは認証に関連する KPI (Key Performance Indicator : 重要業績評価指標) を検討することができる。QZSS と Galileo の認証は NMA (Navigation Message Authentication) に基づいているため、航法メッセージの Bit Error を調べる必要がある。市販の受信機で Bit Error を解析することは困難であるため、Bit Error の解析ツールも実装できると非常に便利である。すでに本セミナーへ参加した学生の中で検討を進めており、上記の(ア)、(イ)、(ウ)は実装済みであり、今後(エ)から(オ)を進める予定である。

PocketSDR を開発された高須知二氏による評価の中で、ジャミングやスプーフィング等への対処方法 (マルチパス誤差の対策も含む) として、アレイアンテナの開発が行われた。実際にソフトウェアを実装するところまで実施できていないが、以下の図 2.1.3f の通りアレイアンテナの制作がすでに実施された。大阪公立大学の参加学生がこれまで検討してくれていたが、このハード部の制作により、さらに他の大学の若手研究者がこのアレイアンテナを利用した研究開発が可能となるため、非常に有意義な取り組みである。この内容は、2024 年 2 月 26 日 (月)、27 日 (火) の 2 日間、東京海洋大学越中島キャンパスで行った高須氏の講義 (詳細は本報告書 3.3 に記載) の中でも紹介頂いた。

Snapshots of Spider SDR



【図 2.1.3f 研究開発用のアレイアンテナの制作】

2.1.4 GNSS と IMU の統合部での SDR 利用

GNSS と IMU の統合は、信号処理部ではなく GNSS の観測データや測位結果との統合処理は以前より実施されており、多くの論文や発表もされている。一方、GNSS の信号処理部での IMU との統合は Deep カップリングと呼ばれる領域で、発表件数は少ない分野であった。本セミナーで GNSS の信号処理部の改良を行うことができるようになったため、実際に課題となりそうな、建設機械の速度域での GNSS 信号の短時間の遮断で、どのように信号処理部が動作するかを、本セミナーに参加した企業の若手エンジニアと調査した。その結果より、コード位相やドップラ周波数はある程度出力できるものの、搬送波位相のロックはずれはすぐにはずれ、サイクルスリップが起こることがわかった。これは想定されていたことで、搬送波位相のロックはずれ時の生データを観察することで、フロントエンドのクロックの安定度も重要であることがわかった。

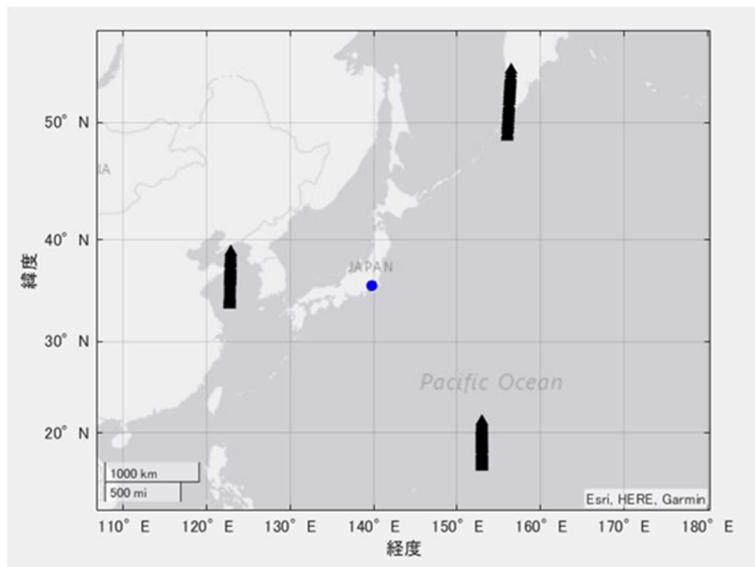
実際の IMU の出力値との統合については、これまで GNSS と IMU のタイトカップリングで実施してきた IMU の 3 軸の加速度と角速度値より、3 次元の位置の移動ベクトルを算出する部分を組み込み、その情報より、GNSS のデータがないときでも、あたかも GNSS の観測データがあるかのように GNSS 観測値を推定し、さらに逆算して信号処理部のコード位相と周波数を推定することで、GNSS 信号が実際にはないときに、どのように信号処理部が動作するか確認しているところである。まだ、具体的に IMU との統合で受信機の信号処理部が明らかに改善したという事例はだせていないが、今後の成果が期待される分野である。

2.1.5 LEO 衛星の信号受信

低軌道 (LEO) 衛星による衛星電話サービスを提供するイリジウムネクスト衛星を利用してドップラ周波数を受信し、その数値より受信機の位置を推定する FOA 測位について東京海洋大学の本セミナー参加学生が評価することができた。これは、ソフトウェア GNSS 受信機での経験が生きており、機材として利用したフロントエンドは本プロジェクトで利用していたものである。またイリジウム用のオープンソースプログラムを入手し、その改修を実施できたのは本プログラムでソフトウェア受信機に慣れていたことが大きい。具体的には、GNSS がスプーフィングやジャミングで利用できないときの代替測位手法として検討した。提案するドップラ周波数による測位でどの程度の精度がでるか検証したので、以下の図 2.1.5a、図 2.1.5b、図 2.1.5c に実験概要と実験結果を示した。イリジウム衛星の衛星位置の精度が 1 km 前後の精度であるため、数 m の精度を得ることはできていないが、今後、GPS 受信機が LEO 衛星に搭載されることで、このあたりの精度は改善すると予想している。



【図 2.1.5a：実験に利用した機材】



【図 2.1.5b：イリジウムネクストの衛星配置（約 90 秒間）】

| 観測時間[s] | データ数 | 誤差[km] | | | | 誤差[Hz] |
|---------|------|---------|----------|---------|---------|----------|
| | | lat | lon | hgt | 水平誤差 | |
| 10 | 14 | -1.9412 | -38.0842 | 48.5789 | 38.1336 | 696.9852 |
| 20 | 22 | -1.0127 | 18.2142 | 13.2512 | 18.2424 | 672.8404 |
| 30 | 39 | -0.3699 | -2.2356 | 1.3423 | 2.2660 | 781.5204 |
| 60 | 81 | -0.2348 | 1.7870 | -3.6920 | 1.8023 | 783.6565 |
| 90 | 112 | -0.1166 | -0.7548 | -1.7449 | 0.7638 | 779.0223 |
| 120 | 141 | 0.0479 | -1.4002 | -0.5590 | 1.4010 | 776.4424 |

【図 2.1.5c：FOA 測位による測位精度】

PocketSDR を貸し出した参加者からのレポートを表 2.1.5 に示す。

【表 2.1.5 : PocketSDR を貸し出した参加者からのレポート】

| 事業所名／大学名 | レポート |
|-------------------------------------|---|
| ボッシュ株式会社 | <p>今回、一般的な Linux 環境である Ubuntu20.04 と最新版の Pocket SDR の組み合わせで、実際に計測／解析が可能であることを確認した。また、つい最近 Pocket SDR に追加されたリアルタイム処理機能について、Pocket SDR 単独で NMEA および RTCM での元になるデータが既にリアルタイムで得られていることから、あともう少しで Pocket SDR から RTKLIB に直接 RTCM 等を入力したリアルタイム測位が可能になるため、他の測定器との比較や、この SDR 本体のユースケースの飛躍的な拡大が予想されアップデートを大変待ち遠しく思っている。</p> |
| 早稲田大学 | <p>課題として現状では捕捉できる信号が少ない問題が挙げられる。使用している LNB の指向性が高く、受信できる範囲が天頂方向に絞られている可能性がある。</p> |
| 立命館大学 | <p>PocketSDR では、作成したみちびきの擬似測位信号を受信することができた。しかし、pocket_trk コマンドから得られる受信結果のログから信号の Lock が数秒あり見失うことが多かった。受信精度が良好ではなかったことで、相関プロット、3次元プロットと信号復号がサンプルデータの様に出力されなかった。u-blox 受信機では、受信した信号を頻繁に見失うということがなかったので、PocketSDR との相性や受信環境に問題があると考え。受信の精度向上のため、PocketSDR の設定や受信環境の見直しをしなければならない。</p> |
| National Cheng Kung University (台湾) | <p>PocketSDR を 2 台レンタルすることで、準天頂衛星の L6 信号とガリレオの HAS 信号を同時に取得し評価に利用することができた。また、Github で公開されている、高須様の信号追尾プログラムについて、こちらの研究室で利用している別の追尾プログラムと比較しても十分な性能がでていることを確認できた。</p> |

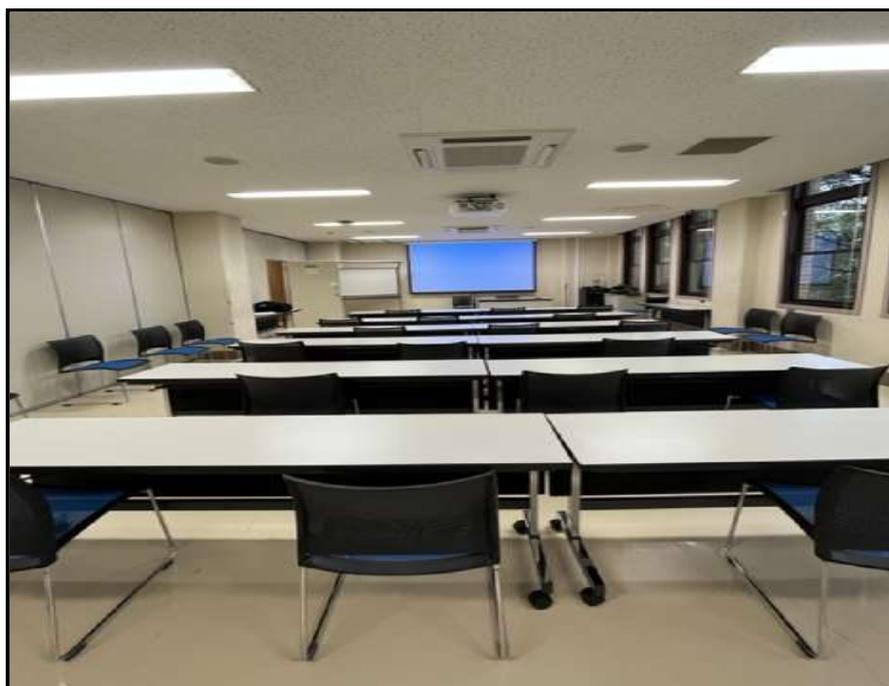
2.2 GNSS シミュレータの実習

中部大学の海老沼教員が中心となり、一般社団法人測位航法学会と連携して GNSS シミュレータの実習を年に 2 回実施した。表 2.2a に実習開催日を示す。

【表 2.2a：実習開催日】

| 名称 | 開催日 | 時間 | 開催場所 |
|---|---------------------|-------------|----------------------------|
| 第 1 回目「ソフトウェア無線機を利用した GNSS 信号シミュレータの実装」 | 2023 年 5 月 17 日 | 13:00～16:00 | 東京海洋大学越中島会館 2 階 セミナー室 3 |
| 第 2 回目「GPS 信号シミュレータセミナー」 | 2023 年 11 月 20 日 | 13:00～16:00 | 東京海洋大学越中島会館 2 階 セミナー室 3 |

開催は 2 回とも東京海洋大学 越中島キャンパス（〒135-8533 東京都江東区越中島 2-1-6）越中島会館 2 階セミナー室 3（図 2.2a）で行い、一般社団法人測位航法学会が中心となり会場の準備、運営等を実施した。



【図 2.2a：越中島会館 2 階セミナー室 3】

参加者は第 1 回目 15 名、第 2 回目 24 名の合計 39 名であった。表 2.2b に第 1 回目、表 2.2c に第 2 回目の受講者の内訳を示す。なお、希望する学生には旅費の支給を行った。

【表 2.2b：第 1 回目「ソフトウェア無線機を利用した GNSS 信号シミュレータの実装」受講者内訳】

| 事業所名／大学名 | 所属部署名／学部又は学科名 |
|----------------|----------------------------|
| 早稲田大学 | 基幹理工学研究科 機械科学・航空宇宙専攻 |
| 東京海洋大学 | 応用環境システム学 |
| 三菱重工株式会社 | ICT ソリューション本部 |
| 大阪公立大学 ※ | 工学研究科 |
| 日立産機システム | 研究開発本部 |
| アルプスアルパイン株式会社 | AD プロジェクト |
| ボッシュ株式会社 横浜事務所 | クロスドメインコンピューティングソリューション事業部 |
| 大阪公立大学 ※ | 工学研究科航空宇宙海洋系専攻航空宇宙工学分野 |
| 東京海洋大学大学院 | 海洋科学技術研究科海運ロジスティクス専攻 |
| 宇宙技術開発株式会社 | 宇宙システム技術部 先端技術開発グループ |
| 三菱電機株式会社 鎌倉製作所 | 防衛技術部 技術第六課 |
| 三菱電機 情報技術総合研究所 | スマートセンシング技術部 |
| 宇宙航空研究開発機構 | 航空技術部門航空安全イノベーションハブ |
| JAXA | 第一宇宙技術部門 衛星測位システム技術ユニット |
| 東京海洋大学 | 海事システム工学部門 |
| 合計 15 名 | ※旅費支給 |

【表 2.2c：第 2 回目「ソフトウェア GNSS 受信機プログラム」セミナー受講者内訳】

| 事業所名／大学名 | 所属部署名／学部又は学科名 |
|-------------------------|----------------------|
| 早稲田大学 ※ | 基幹理工学研究科 |
| 日本航空電子工業株式会社 | 商品開発センター |
| 東京海洋大学 | 海運ロジスティクス |
| 東京海洋大学 | 応用環境システム学専攻 |
| 三菱電機株式会社 | 鎌倉製作所 |
| 株式会社 アカサカテック | 技術部 研究開発担当 |
| 東京海洋大学 | 情報通信工学研究室 |
| 東京海洋大学 | 応用環境システム学専攻 |
| インターステラテクノロジズ株式会社 | 東京支社 開発部 |
| 大阪公立大学大学院 ※ | 工学研究科 |
| 東京大学 空間情報科学研究センター(CSIS) | |
| 株式会社 コア | GNSS ソリューションビジネスセンター |
| ロケーションマインド | |
| 防衛大学校 ※ | 電気情報学群電気電子工学科 |

| | |
|-------------------------------|-----------------------------------|
| 防衛大学校 ※ | 電気情報学群電気電子工学科 |
| 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) | 航空技術部門 設備技術研究ユニット |
| ヤンマーホールディングス株式会社 | 技術本部電動電制システム開発部 第二技術部 第一技術グループ |
| 三菱電機ソフトウェア株式会社 | 電子システム事業統括部 つくば事業所 第一技術部第三課 |
| 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 電子航法研究所 | 特別研究主幹 |
| 株式会社ドルフィンシステム | |
| 大阪公立大学大学院 ※ | 工学研究科 |
| 防衛大学校 | 電気情報学群 |
| 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) | 航空技術部門航空安全イノベーションハブ |
| アルプスアルパイン | AD プロジェクト |
| 合計 24 名 | ※旅費支給 |

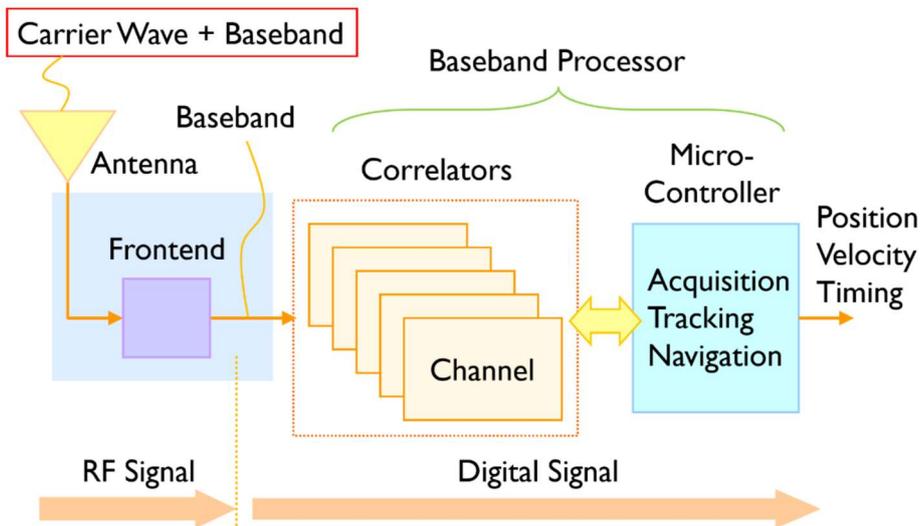
2.2.1 GNSS シミュレータ実習の講義内容

GNSS 受信機の開発において、その動作検証や性能評価のために、受信信号を模擬した RF 信号を生成する GNSS シミュレータが広く用いられている。GNSS シミュレータは、市販品としても入手可能であるが、GNSS 受信機製品を大量生産しているメーカなどで、その性能を確認するための治具として使用することを主な目的としているため、大型で高価な製品となり、研究開発の用途には向いていない。

そこで、本講義では、中部大学海老沼研究室で開発しているソフトウェア無線を利用した GNSS シミュレータである gps-sdr-sim を用いて、代表的な GNSS 信号である GPS 信号の構成とその生成方法、さらに安価なソフトウェア無線デバイスによる GPS シミュレータの実装についての講義と実習を行った。

2.2.1.1 GNSS シミュレータの原理

令和 4 年度に実施したセミナーでは、図 2.2.1.1a に示す GNSS 受信機の構成について講義を行っている。GNSS 受信機では、フロントエンドによって受信信号から高周波の無線信号である搬送波 (Carrier Wave) が取り除かれ、衛星測位に必要な情報を含むベースバンド信号が相関処理部に渡される。



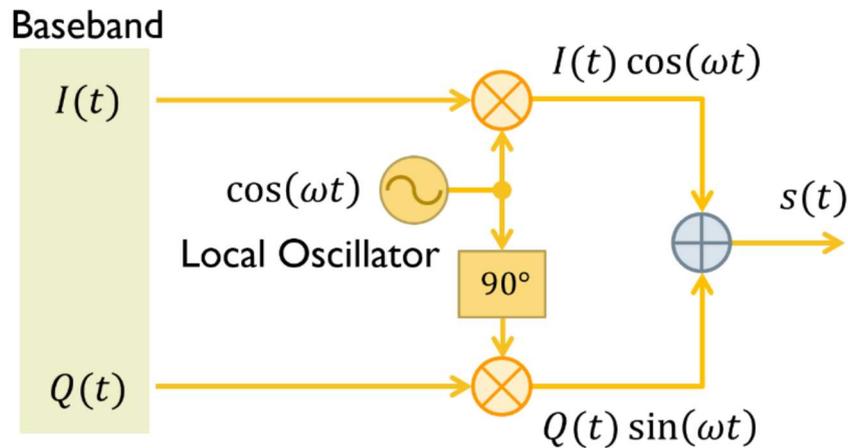
【図 2.2.1.1a : GNSS 受信機の構成】

GNSS シミュレータは、フロントエンドにおける処理の逆を行う送信機であり、受信されるベースバンド信号を模擬したデータを数値的に生成し、それをソフトウェア無線デバイスによって搬送波を含む高周波信号に変調している。GNSS 信号の変調には、位相変調が採用されており、搬送波の位相をベースバンド信号に応じて変化させる。この変調は、図 2.2.1.1b に示すように、直交する 2 つの搬送波にそれぞれ重みを掛けて足し合わせたことと等価になる。ここで、 $I(t)$ と $Q(t)$ はベースバンド信号に相当し、それぞれ In-Phase と Quadrature と呼ばれている。

$$\begin{aligned}
 & \text{Carrier Wave} \\
 s(t) &= A \cos(\omega t - \phi) \\
 & \quad \text{Amplitude} \quad \text{Phase} \\
 &= A \cos(\phi) \cos(\omega t) + A \sin(\phi) \sin(\omega t) \\
 &= I(t) \cos(\omega t) + Q(t) \sin(\omega t) \\
 & \quad \text{In-phase} \quad \quad \quad \text{Quadrature}
 \end{aligned}$$

【図 2.2.1.1b : 位相変調】

このような変調方式を直交位相振幅変調 (Quadrature Amplitude Modulation) と呼ぶ。ソフトウェア無線デバイスでは、与えられたベースバンド信号に対して、図 2.2.1.1c に示すような回路によって、直交位相振幅変調を行っている。

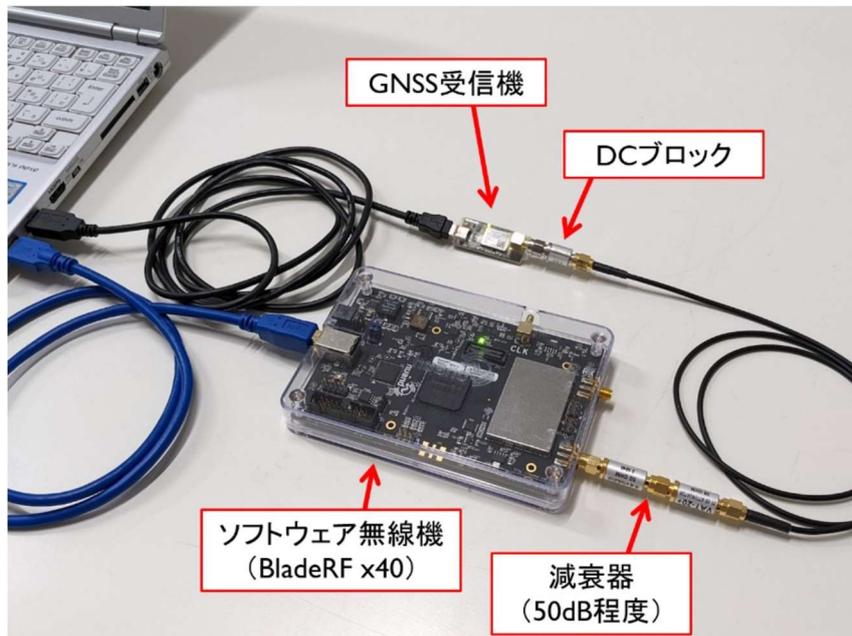


【図 2.2.1.1c：ソフトウェア無線デバイスによる直交位相振幅変調】

2.2.1.2 GNSS シミュレータの実習

今回の講義で用いた `gps-sdr-sim` は、直交位相振幅変調におけるベースバンド信号を数値的に生成するソフトウェアである。シミュレーションしたい受信機の位置、時刻、衛星軌道情報を入力することで、その位置で受信される GPS 信号のベースバンドを生成することができる。`gps-sdr-sim` は、オープンソースのソフトウェアとして公開しており、誰でもソースコードを入手し、ベースバンドの生成について学ぶことができる。本講義では、ベースバンドの生成に必要な疑似雑音符号の構成、疑似距離やドップラーの計算、航法メッセージのフレーム構造と生成などについて、ソースコードを読みながら解説を行った。

実習では、各自のノート PC でビルドした `gps-sdr-sim` を用いて、ベースバンドの生成手順について学んだ。さらに、生成したベースバンド信号を代表的なソフトウェア無線デバイスである BladeRF x40、USRP B205、ADALM-PLUTO を用いて無線信号として送信し、市販の GNSS 受信機で受信され、正しく測位演算が行われることを確認した。同時に、令和 4 年度の事業で開発したソフトウェア GNSS 受信機である PocketSDR でも受信し、出力される測位結果等の比較を行った。一例として、図 2.2.1.2 に BladeRF x40 を用いた GNSS シミュレータのセットアップと GNSS 受信機による動作確認の様子を示す。



【図 2.2.1.2 : GNSS シミュレータのセットアップ】

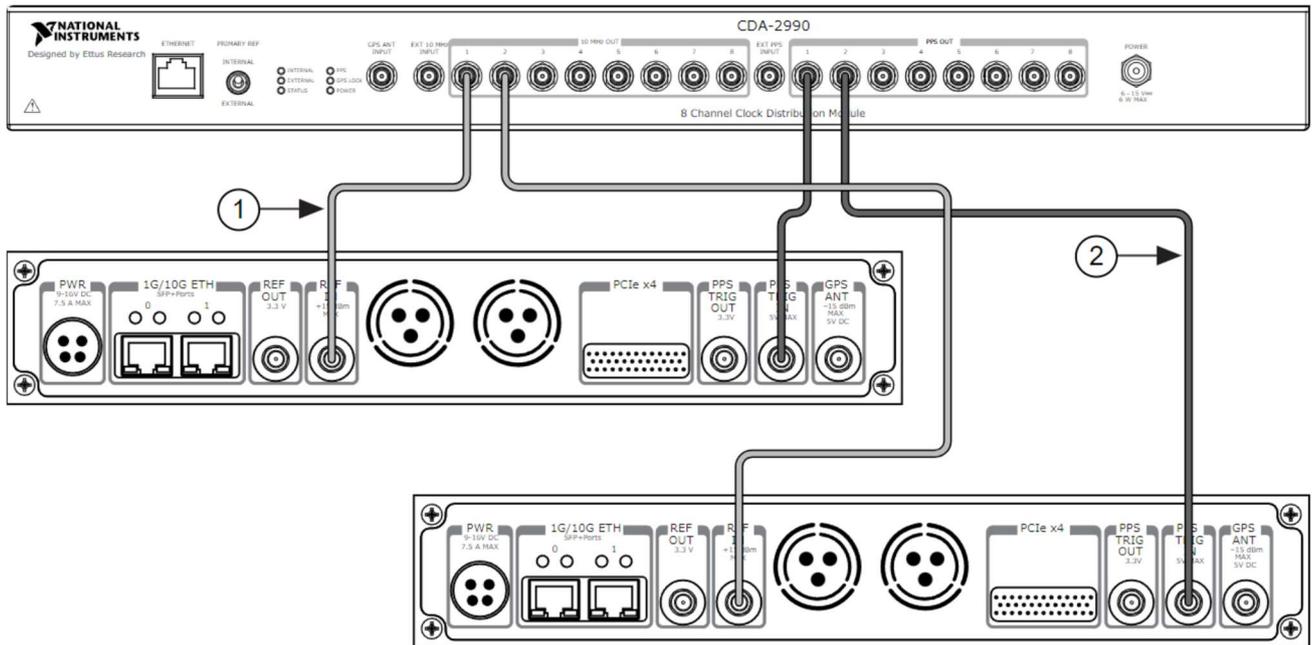
さらに、第 2 回目の実習では、東京海洋大学久保研究室により、gps-sdr-sim によって生成された GPS 信号によって、スマートフォンの位置情報を誤認させるいわゆるスプーフィング (spoofing) のデモが行われた。スプーフィングは、近年、民間航空機や船舶に搭載されている GNSS 受信機に対する意図的な攻撃として深刻なセキュリティ問題となっている。そのため、このような攻撃に対してもロバストな、新しい GNSS 受信機の信号処理手法の研究開発が強く望まれている。

2.2.1.3 多周波数対応 GNSS シミュレータの開発

これまで、多周波数・多システムに対応した GNSS 受信機といえば、高精度な測量目的の効果な製品であった。しかし、近年では、安価な組み込み用の GNSS 受信機も多周波数・多システムに対応している。そのため、本事業のセミナー参加者からも、ソフトウェア無線による多周波数対応の GNSS シミュレータの要望が多かった。そこで、GNSS シミュレータ実習の一環として、多周波数対応の GNSS シミュレータの開発を行った。

GNSS シミュレータ実習で用いた市販品のソフトウェア無線デバイスは、基本的にひとつの周波数の信号しか生成することができない。そのため、多周波数の GNSS 信号を生成するためには、複数のソフトウェア無線デバイスを同期させる必要がある。このような同期機能を持つ市販のソフトウェア無線デバイスとしては、National Instruments 社の USRP シリーズが挙げられる。USRP シリーズの一部の製品は、外部から基準周波数信号と時刻同期信号を入力する機能があり、基準周波数信号と時刻同期信号を分配する CDA-2990 と接続することで、複数のデバイスを同期することが可能である。その構成例を図 2.2.1.3a に示す。図中、①が 10MHz の基準周波数信号、②が GPS 時刻に同期した 1 秒周期の時刻同期信号である。今回の開発では、CDA-2990 に接続するソフトウェア無線デバイスとして、中部大学

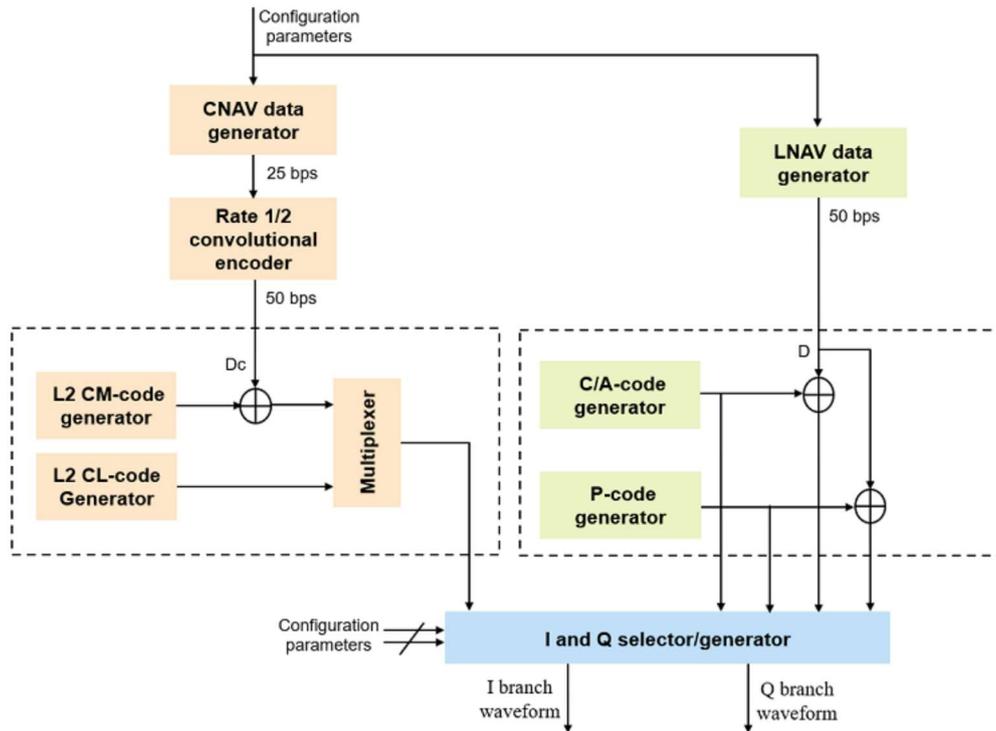
海老沼研究室が所有する 2 台の USRP-2901 を用いた。



【図 2.2.1.3a : CDA-2990 による複数 USRP デバイスの同期】

(<https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/usrp-294x-getting-started/page/synchronizemultiple-devices.html>)

ベースバンド信号の生成には、MATLAB による信号処理のサンプルとして MathWorks 社が公開している GNSS 信号生成のスクリプトを利用した。このスクリプトは、gps-sdrsim と同様に、シミュレーションしたい受信機の位置や時刻、衛星軌道情報を入力することで、GPS L1 C/A 信号だけではなく、GPS L2 CM 信号のベースバンドが生成される。その構成を図 2.2.1.3b に示す。



【図 2.2.1.3b : 2 周波数ベースバンド信号の生成】

(<https://jp.mathworks.com/help/satcom/ug/gps-waveform-generation.html>)

MATLAB によって生成された 2 つのベースバンド信号を、同期した 2 台の USRP デバイスに Ethernet 経由で送信することで、L1 C/A と L2 CM の 2 周波数に対応した GNSS 信号の生成が確認できた。今後は、GPS L5 信号や、GPS 以外の Galileo や Beidou のベースバンド信号が生成できるソフトウェアを開発し、多周波数・多システムに対応した GNSS シミュレータの実現を目指したい。

2.2.2 講評

第1回目のGNSSシミュレータ実習は昨年度のSDRセミナー参加者限定で行われたが、参加者から大変好評だったため、第2回目は測位航法学会のシンポジウムの中で告知募集をして開催し、SDRセミナーに参加されていない方も参加できるようにした。当日は会場のキャパシティーを超える参加者を集めた。

講義の様子を図2.2.2a、図2.2.2bに、またSDRセミナーに参加した方限定でアンケートを取り、回答のあった16件のうち重要そうなものの一部を表2.2.2に示す。



【図 2.2.2a：講義後講師へ質問に集まる参加者】



【図 2.2.2b：第 2 回目講義の様子】

【表 2.2.2：参加者へのアンケート】

| Q | GNSS シミュレータへの期待や要望等、なんでも結構ですのでご自由にお書きください |
|---|--|
| 1 | 今回の講義の内容（前半）は、去年の SDR セミナーの内容を思い出すのに丁度良かった。後半の内容はすぐに理解が出来なかったため、復習が必要です。 |
| 2 | GNSS シミュレータは講義で紹介いただいた用途以外にも、GNSS セキュリティ評価のための機器（GNSS スプーファ）にも活用できると考えています。 スプーファとして活用し、市販機のセキュリティ評価が可能なツール、そのような機能が実装されたシミュレータを期待します。 |
| 3 | 現在、弊社開発製品の GNSS 機能評価に gps-sdr-sim を使用させていただいております。社内では 2 周波か他衛星システムの対応要望が挙がっており、追加機能として期待する点になります。 |
| 4 | 市販品の GNSS シミュレータは先生がセミナー内でおっしゃっていたように何百万、何千万円の価格帯である一方、本日の講義を受けて GPS-SDR-SIM（または同じようなベースバンド信号を生成するソフト）と SDR の組み合わせでかなり柔軟な検証、実験ができると感じました。 自分でやってみたい内容として、GUI 上で任意のコンステレーションを設定してエフェメリスを生成するような機能が追加できれば手軽に開発等にも応用できると感じました。 |
| 5 | シミュレータが作り出そうとする信号の構造と考え方を学ぶことが出来ました。 数式の解説・I 相・Q 相の考え方が大変分かりやすく勉強になりました。 自分自身が信号の処理と C 言語の記述についてもっと学ぶ必要があると感じました。 貴重な学びの場を設けて下さり誠にありがとうございました。 海老沼先生のシミュレータソフトがブラック BOX ではなく、考えていけば読んでわかるものであるという勇気をもらいました。 |
| 6 | 実環境では熱雑音や一般的な無線通信サービス等、様々な雑音があります。全ての雑音を模擬することは難しいですが、熱雑音はデジタル的に模擬したいです。 |
| 7 | 昨日の講義の中でも海老沼先生から課題が残る部分ではあるとご説明があったとは存じますが、マルチパスや NLOS といった環境まで模擬した信号生成ができる安価なシミュレータがあるとさらに便利と考えております。 実験で特定のマルチパスシナリオを再現しようとする、コスト面や不要なマルチパスの混入等が課題となるため、机上検討の段階である程度作りこんだシナリオを模擬して評価できると効率的と考えております。 |
| 8 | GNSS シミュレータはコストパフォーマンスの関係からあくまでも製品テストのようなものに向くと説明がありましたが、コストの低いソフトウェア無線機であれば研究のような場面でも活用できるように見受けられたので、GNSS 研究に役立つツールとして GNSS シミュレータが使えないか期待しています。 |

2.3 コンテストの開催

2.3.1 コンテストの概要

ソフトウェア GNSS 受信機の技術的な理解を深め、GNSS 受信機の開発を活発にするためにソフトウェア GNSS 受信機に関するコンテストを開催した。コンテストの開催は令和 4 年度に周知しており、今回具体的なコンテスト内容として、GNSS フロントエンドで取得した RF データを取得した時間・場所を非公開の状態で開催し、参加者に公開した RF データから GNSS の信号捕捉と追尾にチャレンジし、どれだけ多くの GNSS 信号の捕捉と追尾が可能かを競うという内容を設定した。参加者の技術レベルに応じてコンテストに参加できるように、具体的には下記の 2 つのレベルの課題を設定した。

レベル 1 捕捉

- RF データに含まれる衛星番号+信号種類のリストを提出
- 衛星番号は RINEX 準拠（例: G01, J01 …）、フォーマット自由
- それぞれの衛星の信号捕捉のエビデンスになるもの（捕捉時の画面キャプチャや相関波形の画像など）

レベル 2 追尾

- それぞれの衛星の生の航法メッセージのビット列
- ファイル名を衛星番号_信号種類にすること（例: G01_L1CA.csv, C03_B1I.csv）
- ビットの値は 0, 1 にすること

レベル 1 は信号捕捉にチャレンジしてもらうことを想定した課題であり、より多くの衛星の信号を捕捉できた参加者を評価する。レベル 2 は信号捕捉だけでなく信号を追尾する必要がある、衛星仰角の低い信号強度の低い信号なども含めて、より多くの信号を正しく追尾できた参加者を評価する。これらの信号捕捉・追尾に利用するソフトウェアやアルゴリズムは自由であり、参加者の工夫を期待した。

2.3.2 コンテストのためのデータ取得

コンテストで公開するための RF データを、ソフトウェア GNSS 受信機のフロントエンドを用いて取得した。ここで、フロントエンドとして、和 4 年度に開発したソフトウェア GNSS 受信機用のフロントエンドである PocketSDR を利用した。2023 年 8 月 2 日 7:35-7:40 (UTC) の 5 分間、東京海洋大学の屋上に設置したアンテナにおいて、RF データの取得を行った。データの取得時間は、RF データを公開する際のファイルサイズの制限と GNSS 信号の捕捉・追尾が十分に可能かを考慮して 5 分間とした。ここで、異なる中心周波数を設定して下記に詳細を示す設定において 2 つの RF データを取得した。

共通設定

- サンプリング周波数: 6 MHz
- 中間周波数: 0Hz (ダイレクトコンバージョン)
- サンプリングビット数: 2 bits
- 取得時間: 300 秒
- データフォーマット : IQ サンプリング

RF データ 1

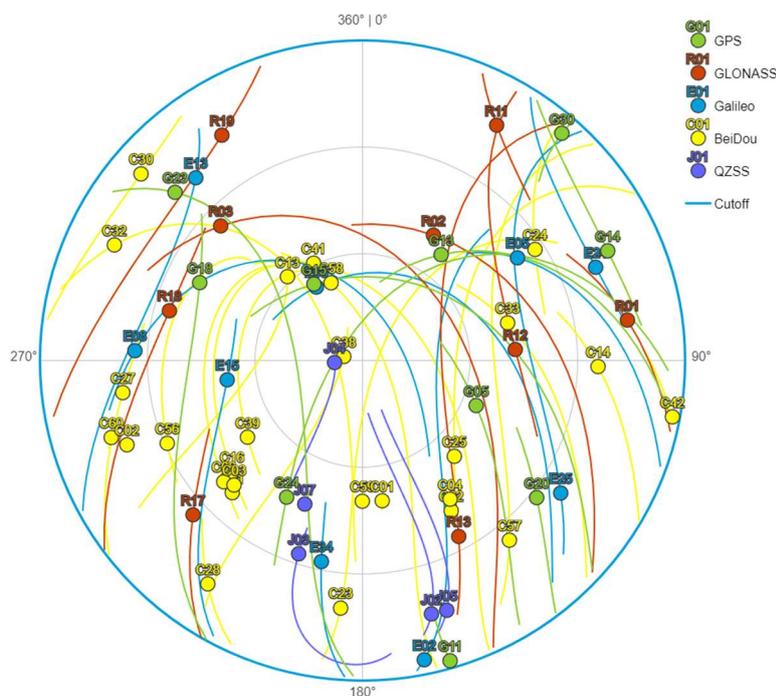
- 中心周波数: 1575.42 MHz

RF データ 2

- 中心周波数: 1561.098 MHz

RF データの中心周波数以外は、2つの RF データは共通の設定で取得されている。異なる中心周波数で RF データを取得したのは、GPS、Galileo、QZSS、SBAS らの信号が存在する 1575.42 MHz と、BeiDou の B1I 信号が存在する 1561.098 MHz の RF データを取得することで、L1 帯に存在する GNSS 信号をできるだけ網羅するためである。また、上記の RF データの取得の設定は参加者には公開するが、データの取得日時、場所は公開しない。

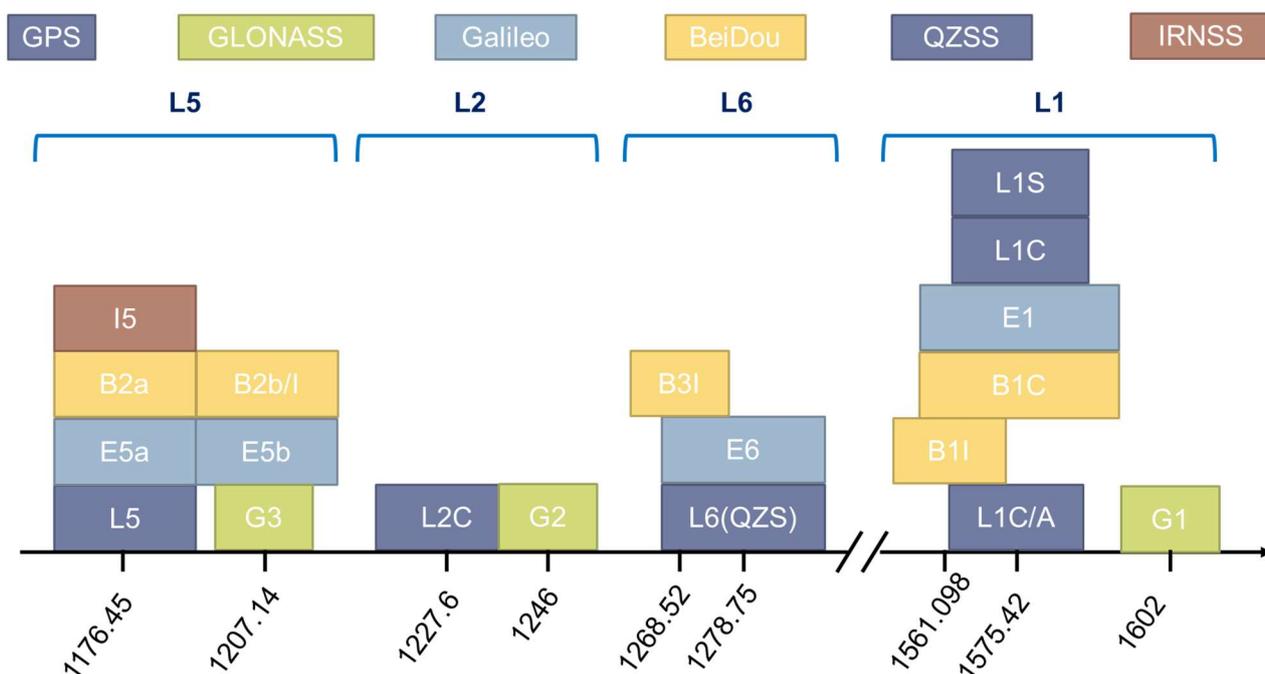
図 2.3.2 に RF データ取得時の GNSS 衛星配置を示している。多くの衛星が存在し、取得した RF データには多数の GNSS 信号が含まれていることが確認できる。



【図 2.3.2 : RF データ取得時の衛星配置】

2.3.3 評価のためのリファレンス生成

コンテストにおいて参加者が提出する捕捉した GNSS 衛星、追尾結果を評価するためのリファレンスを生成した。リファレンスの生成には、自作の GNSS 信号捕捉、追尾プログラムを利用した。図 2.3.3a にコンテスト実施時に衛星から送信されている GNSS の信号の種類と周波数を示す。この図に示すように、中心周波数 1575.42 MHz の RF データ 1 には、GPS/QZSS の L1C/A、L1C 信号、BeiDou の B1C 信号、Galileo の E1 信号、QZSS の L1S 信号、SBAS の L1C/A 信号が含まれている。また、中心周波数 1561.098 MHz の RF データ 2 には、BeiDou の B1I 信号が含まれている。



【図 2.3.3a : GNSS の信号の種類と周波数の関係】

2つの RF データからコンテストのリファレンスとなる、GNSS 信号を捕捉・追尾した結果を図 2.3.3b に示す。信号の捕捉が確認できた衛星は、56 衛星、77 信号となった。特に、BeiDou は非常に多くの衛星が利用可能であり、新しい第 3 世代の衛星は L1C 信号を送信しており、複数の信号がこの周波数帯に集中している。また、QZSS からは L1C/A、L1C、L1S の三種類の信号を受信することができる。GPS に関しては Block III 衛星が L1C 信号を送信しており、この信号を受信することができる。このリファレンスを利用して、参加者の提出した GNSS 信号の捕捉数と追尾数を評価する。

評価方法として、参加者の提出した GNSS 信号の捕捉リスト、信号追尾結果から、全 77 信号のうちいくつの信号が捕捉、追尾できたかを計算し、信号捕捉結果と追尾結果の 2 つを合計して順位付けを行う。

| GPS | | Galileo | | QZSS | | SBAS | | BeiDou | | | | | |
|------|------|---------|-----|------|------|------|------|--------|------|-----|------|-----|-----|
| 信号 | 衛星 | 信号 | 衛星 | 信号 | 衛星 | 信号 | 衛星 | 信号 | 衛星 | 信号 | 衛星 | 信号 | 衛星 |
| L1CA | G05 | E1 | E03 | L1CA | J02 | L1CA | S22 | B1C | C23 | B1I | C01 | B1I | C25 |
| | G13 | | E05 | | J03 | | S28 | | C24 | | C02 | | C27 |
| | G14 | | E08 | | J04 | | S30 | | C25 | | C03 | | C28 |
| | G15 | | E13 | | J07 | | S32 | | C27 | | C04 | | C32 |
| | G18 | | E15 | | J02 | | S34 | | C28 | | C06 | | C33 |
| | G20 | | E24 | | J03 | | S37 | | C30* | | C08 | | C38 |
| | G23 | | E25 | | J04 | | S43 | | C32 | | C09* | | C39 |
| | G24 | | E34 | J07 | S44 | | C33 | | C13 | | C41 | | |
| | G29* | | J02 | | C38 | | C14* | | C58 | | | | |
| | G30 | | J03 | | C39 | | C16 | | C59 | | | | |
| L1C | G14 | L1S | J04 | L1C | J04 | B1C | C41 | B1I | C23 | B1I | C24 | B1I | C60 |
| | G18 | | J07 | | C42* | | C62 | | | | | | |
| | G23 | | | | | | | | | | | | |

【図 2.3.3b : RF データに含まれていた GNSS 信号のリスト】

2.3.4 コンテストの開催と実施方法

2023 年 8 月 7 日にホームページ上にコンテストの参加者募集及び概要を掲載した。図 2.3.4 に掲載したコンテストの概要を示す。

2023 年 8 月 7 日、昨年度開催したセミナーの参加者 30 名へコンテスト開催の告知をメールで行い、全員の参加を呼び掛けた。またセミナーに参加していない方も参加できるよう、ホームページにも募集要項を記載した。セミナーに引き続き若手の人材育成の観点から、コンテストの参加者の年齢も 35 歳以下とした。必要なデータの入手については、データの URL をホームページ上に公開し、担当教員にアクセス権の申請をするという方法で配布した。

締め切りは 2023 年 9 月 30 日とし、結果の提出は 1 人 1 回まで、提出したファイルの差替えは不可とした。

SDRコンテスト概要（2023年8月24日更新（更新・追記部分青字））

- 本コンテストはGNSSフロントエンドで取得したRFデータから、RFデータに含まれるGNSS信号の捕捉、追尾にチャレンジするコンテストです
 - QZSS, SBASなどのRNSSも含まます
- RFデータのフォーマット、中心周波数、サンプリング周波数のみ公開されています
- RFデータに含まれるGNSS衛星（レベル1・捕捉）、それぞれの衛星の生の航法メッセージビット列（レベル2・追尾）を提出してもらいます
- より多くの衛星を捕捉（レベル1）し、より長い時間正しく追尾（レベル2）できた人を表彰（上位者に測位航法学会より賞金または景品を出します）
- 参加された方の希望者や上位者には、10月25日から27日に海洋大で開催される測位航法学会のシンポジウムで発表頂く機会があります
- 去年のセミナーで紹介していないガリレオやBeiDouの信号追尾方法を記載したPDFを次のアドレスにアップしました。 <https://gnss-learning.org/wp-content/uploads/2023/08/SDRコンテスト用解析例.pdf>

提供データについて

- 異なる中心周波数で異なる時間に取得した2つのRFデータを提供します
- 中心周波数以外は2つのRFデータは同一です
 - サンプリング周波数: 6 MHz
 - 中間周波数: 0Hz (ダイレクトコンバージョン)
 - サンプリングビット数: 2 bits
 - 取得時間: 300秒
 - データフォーマット
 - I (1 byte, signed char) Q (1 byte, signed char) I Q I Q …
- rfddata1.bin
 - 中心周波数: 1575.42 MHz
- rfddata2.bin
 - 中心周波数: 1561.098 MHz

【図 2.3.4：コンテストの概要】

2.3.5 コンテスト結果

参加者は計 8 名、内訳は昨年度のセミナー参加者 4 名、非参加者 4 名であった。1 名は海外からの参加となった。前述した評価方法によって 1 位となった参加者は、全 77 信号のうち捕捉: 66/77、追尾: 55/77 であり、全受信可能信号に対して非常に多くの信号の捕捉、追尾ができたという結果となった。2 位となった参加者は捕捉: 46/77、追尾: 46/77 であり、3 位となった参加者は、捕捉: 46/77、追尾: 46/77 であった。この入賞者 3 名へは、事前に告知していた測位航法学会シンポジウムで発表の機会を設けた。シンポジウムでは、入賞者は各自の取り組みについて説明した。特に、1 位となった参加者は、オープンソースで公開されているソフトウェア GNSS 受信機をベースに、新たな信号に対応させ本コンテストに取り組んだことを報告しており、ソフトウェア GNSS 受信機の信号処理に手を加え、より多くの信号が受信できるように開発をしたことが報告された。なお、コンテスト終了後に、東京海洋大学の本セミナー参加学生に、再度、本コンテストデータでの解析を依頼し、1 位となった結果よりも多い信号捕捉に成功したので、そのプログラムとともに WEB サイトへ公開し、閲覧できるようにした。

2.3.6 講評

測位航法学会 シンポジウム 2023 にて結果報告会及び表彰式 (図 2.3.6a、図 2.3.6b)



【図 2.3.6a：鈴木教員によるコンテスト結果の発表】



【図 2.3.6b：入賞者への表彰状授与】

昨年度のセミナー参加者へは全員コンテストへ参加してもらうよう呼び掛けたが、実際に参加したのは4名だった。そのため、参加できなかった理由を調査するために、コンテスト実施後に無記名のアンケートを実施した。アンケートの内容をまとめたものを表2.3.6に示す。

【表2.3.6：コンテスト実施後のアンケート】

| | 質問 | 回答の傾向 |
|---|---------------------|--|
| Q1 | 開催時期について | 別の時期が良かったという意見も多少あったが、概ね適切だったという結果であった |
| Q2 | 参加・不参加について | 時間がなくて参加できないというのが大多数であった |
| Q3 | 難易度について | 普通→難しい→簡単という順番に回答数が多かった |
| Q4 | 情報開示から締め切りまでの期間について | 一部短いという意見もあったが、殆どが最適という結果であった |
| 自由記述欄にあった意見（一部抜粋） | | |
| SDR に触れてみるという観点ではこういった課題形式で何に取り組めばいいか明確だと初学者としてはやりやすくて良いのではないかと感じた。院試などが終わって研究テーマに本腰を入れられる B4 秋くらいのタイミングで取り組むのに丁度よさそうだと感じた(時期については弊研究室はスロースタートなので...)。配布された I/Q データのデータ構造について Pocket SDR 準拠? であったので苦労せずに処理できたが、本来 SDR の研究を進めるにあたってデータ読み込み部の実装(機器やソフト間のインターフェース)ができないといけないと思うので、データ構造(エンディアンや 1byte 内に複数時系列データを含むなど?)に対応させる課題や補足説明があれば研究遂行のハードルを下げる意味では有意義なのかなと感じた。コンテストで何を指すのか(SDR を用いた研究の普及なのか、GNSS の信号捕捉や追尾のアルゴリズムの理解なのか)によるのかなと思います。拙い意見ながら失礼しました。 | | |
| 取り組むことで勉強になった。コンテスト形式で、自分なりの試行錯誤や自分ができないことを認識することができる非常によい機会となりました。ありがとうございました。 | | |

シンポジウムに参加した大学・企業の関係者のコメント

冨永氏（古野電気）：今回のソフトウェア GNSS 受信機での取り組みは、基本的な内容であるが、講評にあったように非常に多くの信号を見つける必要があり、課題として十分な内容であると思う。このような取り組みはこれまでなかったので、受信機メーカーとしては今後も継続してほしい。

辻井先生（大阪公立大）：自身の研究室の学生が参加することができてよかった。今後スプーフィングやジャミングに対する応用課題について継続的に取り組む予定なので、このように大学の横の連携を深めることが大事だと思う。

高須氏：ポケット SDR を有効活用して頂いており、ありがたい。ここ最近では、RTKLIB の改修よりも、ソフトウェア GNSS 受信機の課題に取り組むことが多くおもしろいと感じている。研究課題もありそうなので、個人的にも協力できればと思う。

3 外部の方による支援

ご協力いただいた外部の方の一覧を表 3 に示す。

【表 3：協力者一覧】

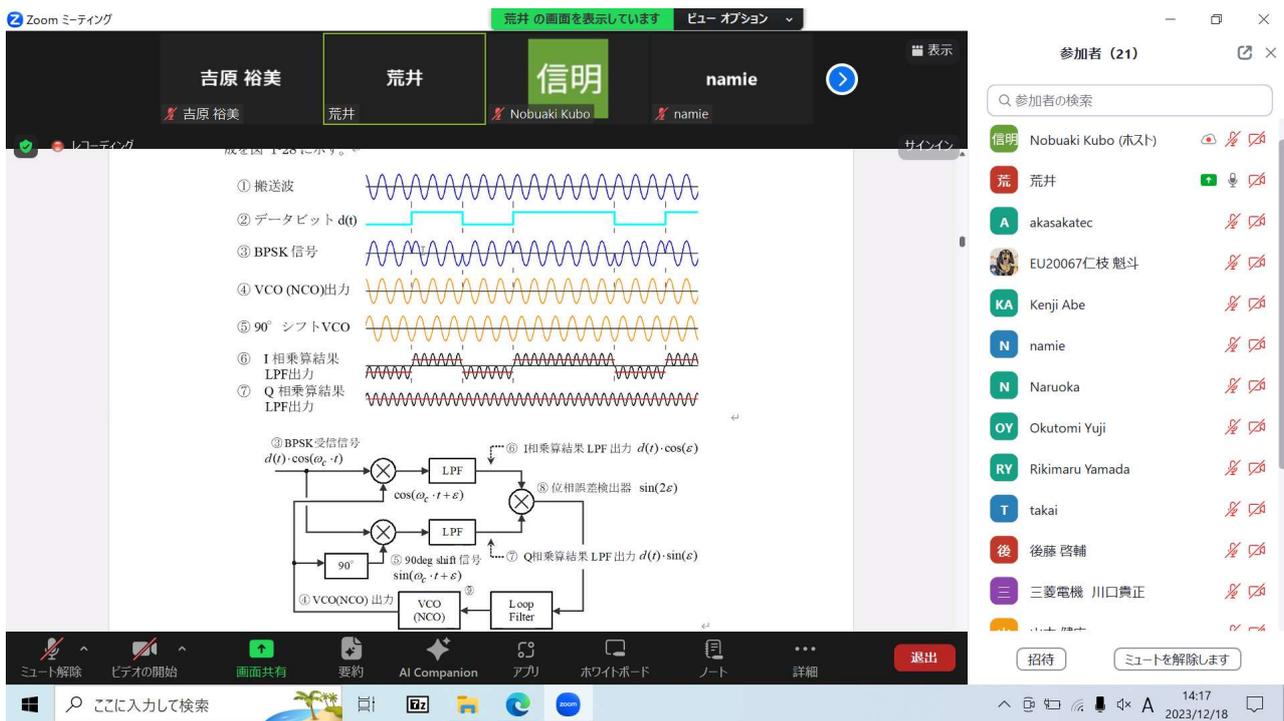
| | 氏名 | 所属機関 | 支援内容 |
|---|------------------|-----------------------|---|
| 1 | 荒井修 | AAI-GNSS 技術士事務所 | ソフトウェア受信機でのアドバイス、発展的課題を見越したアドバイス |
| 2 | Dinesh Manandhar | 東京大学 | ソフトウェア受信機でのアドバイス、発展的課題を見越したアドバイス |
| 3 | 辻井利昭 | 大阪公立大学 | 発展的課題を見越したアドバイス |
| 4 | 川口秀樹 | 室蘭工業大学 | 発展的課題を見越したアドバイス |
| 5 | 高須知二 | — | ソフトウェア受信機でのアドバイス、発展的課題を見越したアドバイス |
| 6 | 山田勝雄 | — | 高精度測位まで見越した SDR の設計へのアドバイス |
| 7 | 奥富雄司 | 海技教育機構海技大学校 東京海洋大学 | スプーフィング、ジャミングに関連するソフトウェア GNSS 受信機を用いた研究開発の動向及び内容の調査 |
| 8 | 笹生拓児 | (株)ドルフィンシステム | ソフトウェア GNSS 受信機の FPGA 化に関する Verilog シミュレーション (Verilog による GPS 信号補足のプログラム開発) |

発展的課題に取り組む参加者へより高度で専門的な指導を行うため、外部の方の支援を受け、以下のような 3 つの講義を追加で開催した。

3.1 第一線の企業で活躍された方によるソフトウェア GNSS 受信機開発に関する講義

2023 年 12 月 18 日月曜日、19 日火曜日の 2 日間、AAI-GNSS 技術士事務所の荒井修氏による講義を Zoom によるオンラインで行った。

昨年度行われた SDR セミナー及び GPS 信号シミュレータセミナー参加者へ案内メールを、またホームページ上でも募集をし、24 名の応募があった。図 3.1 に Zoom での講義のスクリーンショットを示す。



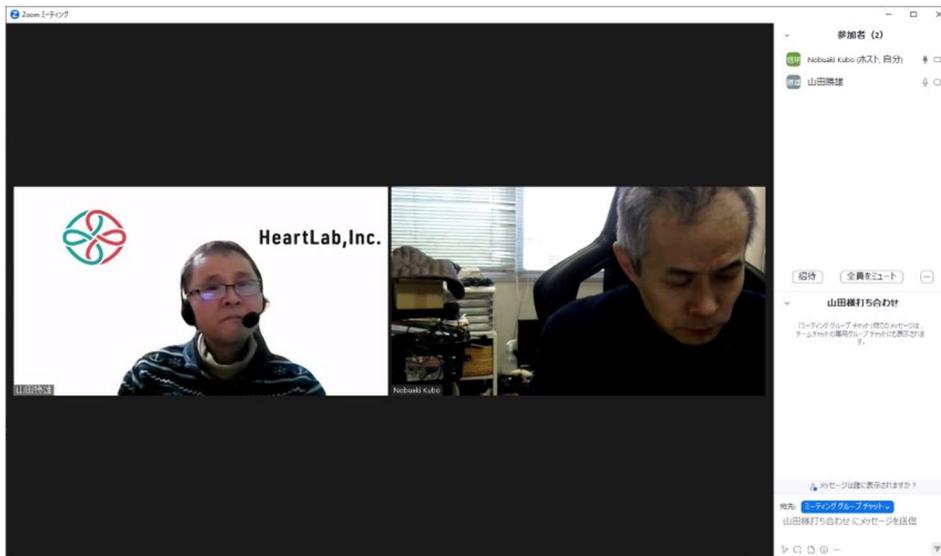
【図 3.1 : Zoom 講義のスクリーンショット】

3.2 ソフトウェア GNSS 受信機の信号処理部および測位演算部に関する指導

ソフトウェア GNSS 受信機の信号処理部と測位演算部、特に cm 級の測位を可能にする搬送波位相算出部について山田勝雄氏（元古野電気の GNSS エンジニア）に Zoom でアドバイスを頂き（図 3.2a）、プログラムの開発までして頂いた。

cm 級が可能となる二重位相差という観測値を確認頂いたもので、cm 級測位が可能なレベルに達していることを確認した。

共同で開発頂いたプログラム（VisualStudio の C/C++）の概観を図 3.2b に記載した。



【図 3.2a：Zoom でアドバイスを頂いている様子】

```

214
215
216
217
218
219
220
221
222
223
224
225
226
227
228
229
230
231
232
233
234
235
236
237
238
239
240
241
242
243
244
245
246
247
248
249

/*
    if(step-(iter-1)*500>=400 && step-(iter-1)*500<=499){
        for(kk=0;kk<=25;kk++){
            if(i>=kk && i<=b_kolizekk){
                tel[ern][kk] = (w[prn][kk] + promptCode[i]*kk) * Baseband;
                i1[ern][kk] = i1[prn][kk] + promptCode[i]*kk;
            }
        }
    }

    rowCarbPhase[ern] = (i1[prn][kk] / (i1[prn][kk] + promptCode[i]*kk)) / (i1[prn][kk] / (i1[prn][kk] + promptCode[i]*kk));
    Adr[prn] = Adr[prn] + -1.0*(carbFreq[prn] - settings.IF)*(h1size/settings.samplingFreq);
    Adr[krx] = Adr[prn] + -1.0 * (carbFreq[prn] - settings.IF) * (20250 / settings.samplingFreq);

    //For SNR Calculation
    if(step-(iter-1)*settings.navSoIPeriod==Subframe_top-(Trans_t_Time+1)-10 && step-(iter-1)*settings.navSoIPeriod==Subframe_1
        p_acc[prn] = ip_acc[prn] + abs(r_F);
    }

    //搬送波を雑音開始するポイントなので重要
    //if (step == subFrameStart[channelNo]) {
    //    i_P = 0;
    //    Half_sab[ern] = 0;
    //} else
    //    Half_sab[ern] = 0.5;
    //}

    if(step-(iter-1)*settings.navSoIPeriod==Subframe_top-(Trans_t_Time+1)){//ここは疑似距離のタイヨシクと合わせたいか
        i_P_ext[ern] = rowCodPhase[ern];
        Adr_ext[ern] = Adr[prn];
    }

```

【図 3.2b：プログラムの概観】

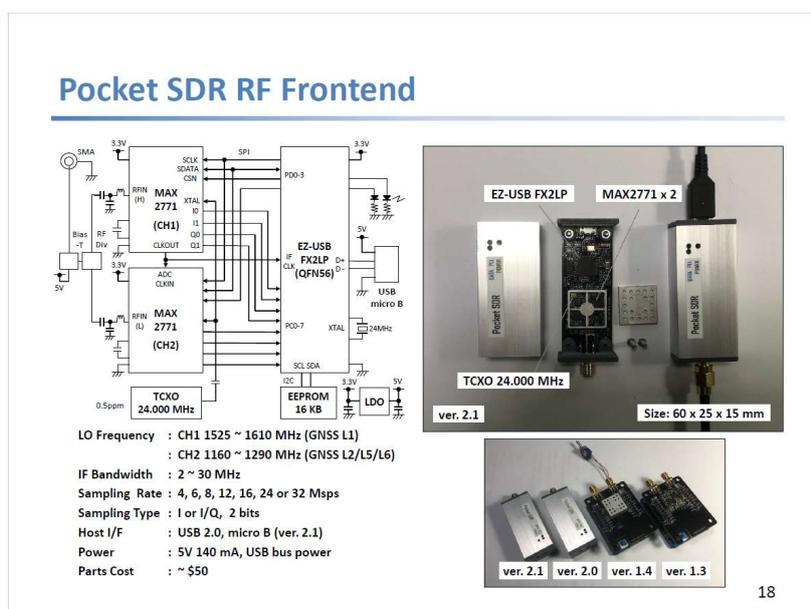
3.3 ソフトウェア GNSS 受信機の高精度測位演算及び PocketSDR に関する講義

RTKLIB の RTK 及び PPP に関する質疑を事前に募り、講師の高須知二氏に解説していただくという質疑応答を中心とした講義を 2024 年 2 月 26 日月曜日、27 日火曜日の 2 日間、東京海洋大学越中島キャンパスで行った。

より深いディスカッションができるよう、講師を含め 14 名の少人数で開催した。講義の様子を図 3.3a、講義に使用した資料を図 3.3b に示す。



【図 3.3a：講義の様子】



【図 3.3b：講義に使用した資料の一部】

4 まとめ

2023年度は過去2年間で習得した知識やプログラムを元に、発展的課題への挑戦、GNSSシミュレータの実習、そしてコンテストを開催した。発展的課題への挑戦は、本セミナーに参加した全員が参加することはできなかったが、少なくとも5つのテーマについて、教員だけでなく外部講師の支援を受けて実施することができた。参加した学生や若手の企業エンジニアの方々は、教員からみて確実に実力をつけており、GNSS受信機の中身のわかる人材として、現場での活躍が期待される。

発展的テーマの中でも、GNSS受信機のFPGA化や干渉・欺瞞信号への対策、低軌道衛星を利用した測位については2024年度も継続して各大学が企業との共同研究等を利用して取り組む予定である。

GNSSシミュレータの実習では、これまでGithub上で多くの海外からの支持を受けていたプログラムを国内の若手研究者に利用してもらう絶好の機会となった。市販のGNSSシミュレータはこれまで高額であったため一般の研究者になじみの薄いものであったが、本活動により、少なくとも国内の関連する若手研究者への裾野を確実に広げることができた。

次にソフトウェアGNSS受信機を利用したコンテストを開催した。内容は想定していた移動体データは難易度が高く、静止データでの開催となったが、実際に信号処理をしてみるとGNSSのL1帯及びB1帯の周波数だけで、77個もの信号が捕捉できることがわかり、改めて信号処理を自分でできるようになることが重要であることがわかった。また参加者の方々も、例えばL1帯の信号に習熟することで、コードを変更するだけで容易に他の多くの信号を解析できる良い機会になったと考える。この経験を生かして、さらにL2帯やL5帯の信号処理への習熟にトライして頂ければと考えている。またそのような機会を、2024年度以降も測位航法学会やSAPT等のセミナーを利用して実施していく予定である。

最後に、上述の通りソフトウェアGNSS受信機を市販受信機のレベルに近づけるための取り組み、具体的にはFPGA化や高精度測位の可能なプラットフォームの構築は今後も実施する予定で、本プログラムで利用したWEBサイトを通じて順次公開していく予定である。

5 添付資料

≪学会等発表実績≫

【教員による発表】

| 発表した成果 (発表題目、口頭・ポスター発表の別) | 発表者氏名 | 発表した場所 (学会等名) | 発表した 時期 | 国内外 の別 |
|---------------------------------------|------------------------|------------------|---------------------|-----------|
| Pocket SDR による MADOCA-PPP と HAS の同時受信 | 高橋 賢 (広島市立大学) | 測位航法学会 全国大会 | 2023 年 5 月 19 日 | 国内 |
| GNSS 受信機の概要 I アンテナ信号入力から、擬似距離出力まで | 荒井 修 (AAI-GNSS 技術士事務所) | | 2023 年 12 月 18 日 | 国内 |

【参加者の成果】

| 発表した成果 (発表題目、口頭・ポスター発表の別) | 発表者氏名 | 発表した場所 (学会等名) | 発表した 時期 | 国内外 の別 |
|---|---|--------------------------|--------------------|-----------|
| Nullspace Projection を適用した MUSIC 法によるスプーフィングの方向推定 | 米山まうむ (大阪公立大学大学院) | 測位航法学会全 国大会 | 2023 年 5 月 19 日 | 国内 |
| GNSS 妨害波に関する 試験的实施と軽減対策の検討 | 奥富雄司 (東京海洋大学) | 日本航海学会 GPS/GNSS 研究会 | 2023 年 6 月 4 日 | 国内 |
| アレーアンテナによる GNSS スプーフィングの方向推定及び低減に関する研究 | 米山まうむ, 辻井利昭 (大阪公立大学大学院) 他 | 測位技術振興会 第 5 回 研究発表講演会 | 2023 年 9 月 1 日 | 国内 |
| GNSS-SDR を利用した人材育成に関する取り組みにおける進捗状況と成果について | 尾関友啓, 久保信明 (東京海洋大学) 他, 海老沼拓史 (中部大学), 鈴木太郎 (千葉工業大学) | 測位技術振興会 第 5 回 研究発表講演会 | 2023 年 9 月 1 日 | 国内 |

| | | | | |
|--|--|--|-----------------|----|
| 船用 GNSS 受信機への妨害信号入力の試行と軽減対策について | 奥富雄司, 久保信明 (東京海洋大学) 他 | 測位技術振興会 第 5 回 研究発表講演会 | 2023 年 9 月 1 日 | 国内 |
| Conceptual Design of Hardware Acceleration Circuit for GPS Signal Correlation Processing | Chenxu Wang, Hideki Kawaguchi, Nobuaki Kubo, | 令和 5 年 電気学会 電子・情報・システム部門大会 (2023) | 2023 年 9 月 1 日 | 国内 |
| Evaluation of Actual Performance of PPP in Urban Areas Using Pocket SDR | Tomohiro Ozeki, Nobuaki Kubo, Taro Suzuki, Takuji Ebinuma, Tomoji Takasu | ION GNSS+ 2023 | 2023 年 9 月 13 日 | 国外 |
| Applications of GNSS Measurements from Smartphones | <i>Nobuaki Kubo, Tomohiro Ozeki, Kaito Kobayashi</i> | ION GNSS+ 2023 | 2023 年 9 月 13 日 | 国外 |
| オープンソースによるソフトウェア GNSS 受信機の紹介 | 後藤啓輔, 久保信明 (東京海洋大学) | 2023 年電子情報通信学会ソサイエティ大会 | 2023 年 9 月 15 日 | 国内 |
| PlutoSDR and MATLAB Example | Ellarizza Fredeluces (東京海洋大学) | PlutoSDR の動作確認 (シミュレータと受信のテスト含む) | 2023 年 12 月 1 日 | 国内 |
| Spoofing Test with CLAW GPS Simulator | Ellarizza Fredeluces (東京海洋大学) | CLAS GPS Simulator の動作確認 (スマホと市販受信機へのスプーフィングテスト含む) | 2023 年 12 月 1 日 | 国内 |

| | | | | |
|------------|--------------|-------------------|--------------------|----|
| コンテストのおさらい | 後藤啓輔（東京海洋大学） | SDR コンテスト 捕捉結果 | 2024 年 3 月 14 日 | 国内 |
|------------|--------------|-------------------|--------------------|----|