

Introduction of GNSS-SDR

Nobuaki Kubo, TUMSAT

スケジュール

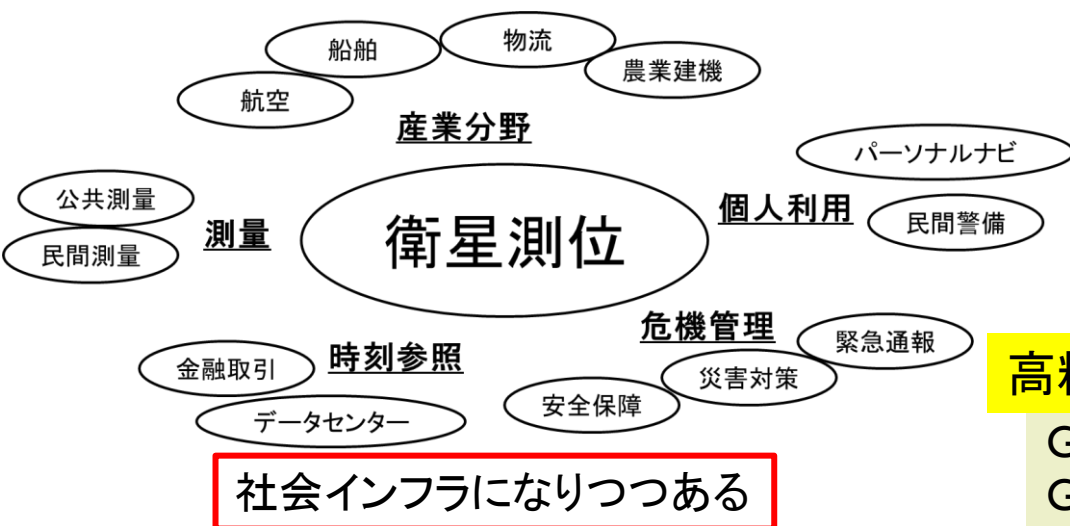
1	ソフトウェアGNSS受信機を学ぶ重要性	久保	オンデマンド
2	GNSSの基礎1 測位衛星、座標、時刻と衛星位置	久保	オンデマンド
3	GNSSの基礎2 観測誤差と測位方式等	久保	オンデマンド
4	フロントエンドの役割と概要(IF、ビット、サンプリング、IQ値等)	海老沼	教室
5	教材で利用するソフトウェアGNSS受信機の紹介(GithubやPCの動作環境等)	鈴木	教室
6	GNSSの信号について(衛星からの信号を知る)	鈴木	教室
7	信号の捕捉について(再捕捉の必要性)	鈴木	教室
8	信号の追尾について(DLL、FLL、PLL、信号強度、フィルター設計など)	鈴木	教室
9	航法データのデコードについて	鈴木	教室
10	観測データの生成と測位演算について	鈴木	教室
11	FPGAの活用(HDLの基礎)	海老沼	教室
12	FPGAの活用(Xilinx Vivado入門)	海老沼	教室
13	FPGAの活用(C/Aコードの生成とテストベンチ)	海老沼	教室
14	GNSSシミュレータの役割と概要、電波暗室の概要	海老沼、久保	オンデマンド
15	GNSS-SDRの有用性、将来GNSSそしてQZSSの計画と期待	JAXA	オンデマンド

事務局からの情報

- ▶ これまで通り、測位航法学会の方（吉原様）よりメールでのご連絡が中心となります
- ▶ 合わせて、公開できるものはすべてWEBサイトのニュースやブログにアップしております
- ▶ <https://gnss-learning.org/>
- ▶ 現在MATLABの事前学習やFPGAやポケットSDR関連の重要な情報を展開済みです



背景：インフラとしての衛星測位



移動体(陸海空)の
自動化への流れが加速

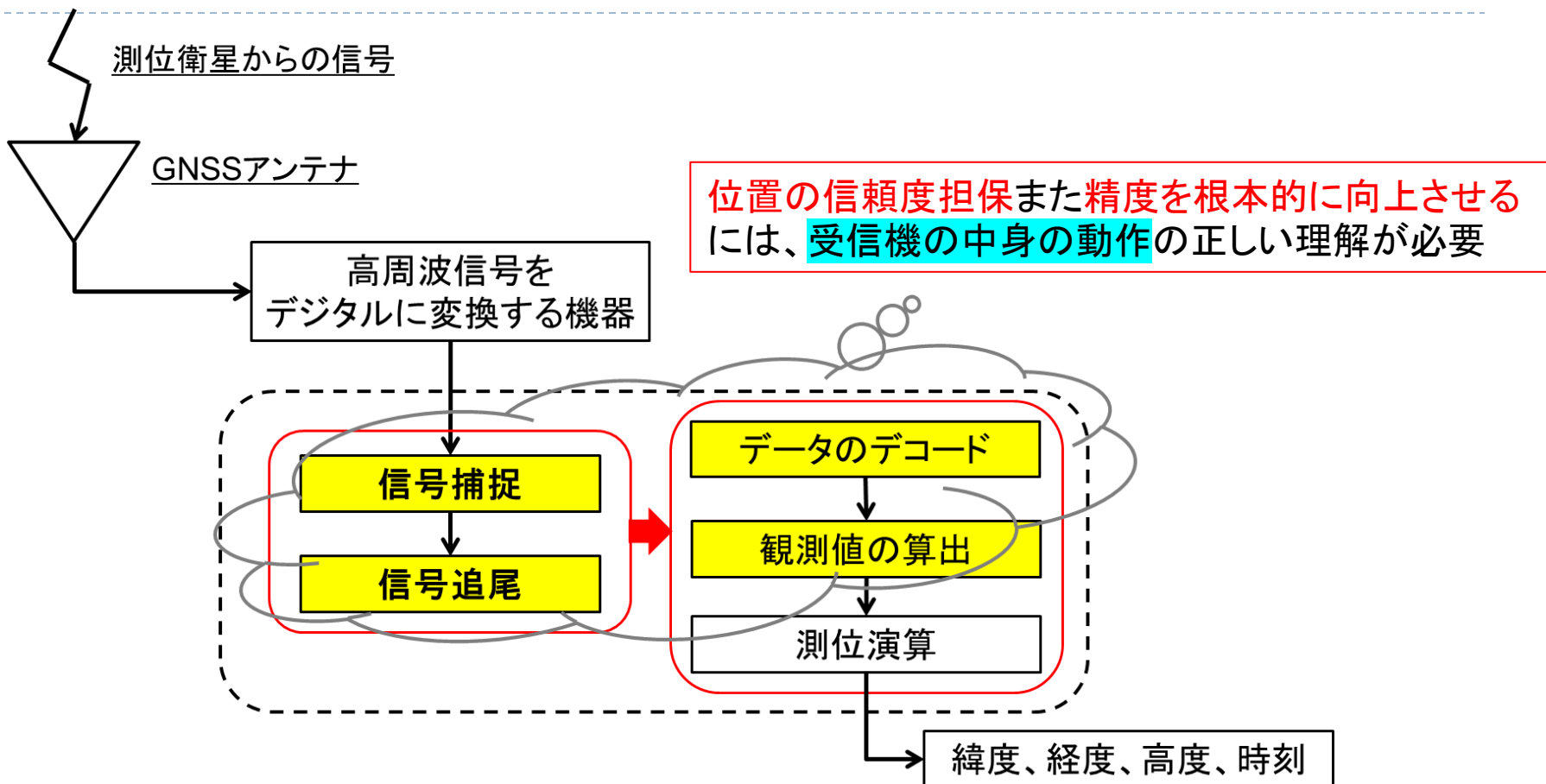
高精度の汎用化→高信頼・高安全

GNSSの位置の信頼度が求められる
GNSSと他センサの統合が必須
新たな脅威も出現(欺瞞、干渉)
自律型移動体は陸海空と多岐にわたる
→受信機の中身の理解が必須
→国内に基盤技術を確保することが急務

低軌道衛星(測位含む)の利用の本格化

宇宙開発へ民間企業の参入が本格化。低軌道測位衛星(米国、中国)が注目
→従来の国家的測位インフラ+コンシューマ向けの測位インフラへ
→低軌道測位衛星の場合、GNSSの受信機開発も新たに必要
→世界的に日本の競争力が低下(アジアで中国が台頭)
→高セキュリティ利用でGNSS受信機がブラックボックス(人材育成が極めて重要)

具体的に何を伝授するか



従来ハードウェアのブラックボックスであった点線枠部をソフトウェアで実現する
→ソフトウェア受信機と呼ばれる部分

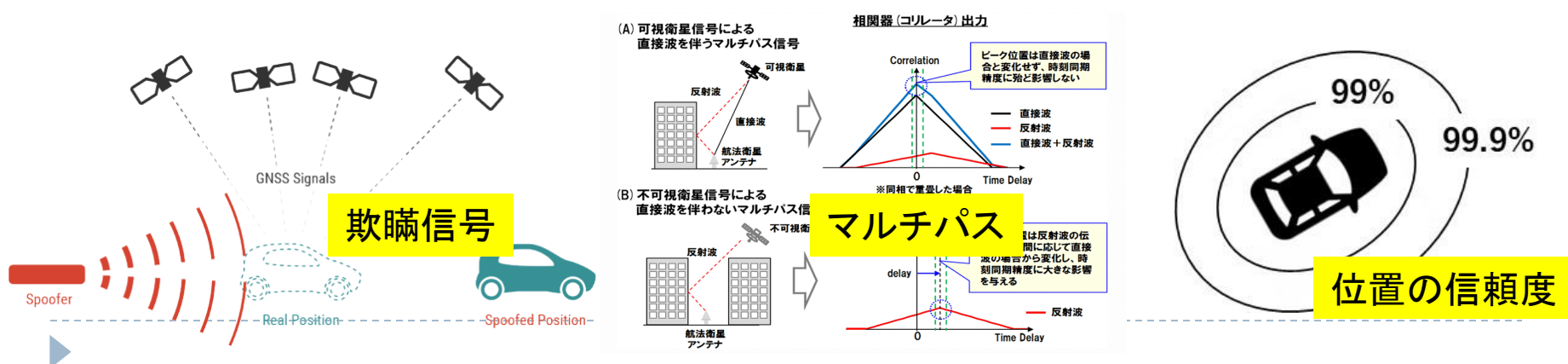
課題の概要

▶ 実施しようとする内容、達成目標

- ①衛星測位用のソフトウェア受信機の開発と教材準備、学生への伝授
- ②学生自らが改良できるレベルになるための指導
- ③測位精度だけでなく高信頼・高安全な位置情報への意識転換

▶ 予想される結果と意義

- ①以下に列挙したような喫緊の課題を本質から解決できる学生の育成
- ②彼らが企業で活躍することで、国内衛星測位分野での競争力が向上



目標

- ▶ 衛星測位用のオープンなソフトウェア受信機及び測位演算部の開発を行い、学生らに提供する機材及び教材を整える
- ▶ 学生らに伝授する場を提供し、ソフトウェア受信機の改良等を自らの手で実行できる学生を、3年間で10名以上輩出する。さらに本受信機のリアルタイム化やFPGA化に対応できる学生を3年間で3名以上輩出
- ▶ ソフトウェア改良につながる所定の課題を与え、コンテスト形式で、学生間で競争する場を提供。企業専門家による定期的な進捗確認（毎年2回）
- ▶ 業務終了後、申請者らが企業の資金を原資として、共同研究による開発・改良を継続し、国内関連企業へのフィードバック。測位航法学会等を通じて、学生への伝授の場を1年に1回以上提供



学会発表の機会を作ります

- ▶ 2022年度の秋の測位航法学会や測位技術振興会の発表会での積極的な発表をお願いします
 - ▶ GNSS-SDRのセッションを作る予定です
 - ▶ その場に企業や研究所の専門家が多くおられるので、みなさんの成長を測る上でとても重要です
 - ▶ もちろん、上記以外のみなさんが普段出ている学会でも全く問題ありません学会を問わず、GNSS-SDRに関連した発表をされた場合はぜひご連絡ください。またこちらからも連絡をさせて頂くと思います
 - ▶ 学会発表ができない場合でも、このような進展があったなどが重要です。できる限りサポートします
-



他流試合に挑む勇気

- ▶ 他流試合とは、学会やシンポジウムや、その他種々の機会をとらえて自分の研究を発表し、普段の研究室仲間以外の様々な立場の人々と、意見交換や議論をすることを指します。私は、これまで多くの学生を育ててきた自らの体験に照らして、若い研究者にとって他流試合がきわめて重要であることを知っております。他流試合は、若い研究者を確実に成長させるのです。他流試合では、自分と異なる見解に接することになりますが、とりわけ大切なのは、対立する意見と接することです。研究者は、対立する見解と接することで、自らの見解の弱点を知ることができます。それは、自らの見解をより完全なものにするための最良の機会を提供してくれるのです
- ▶ 対立する意見の接触は、しばしば論争に発展します。論争は、対立する意見の衝突を通じてより高次の真理に到達する機会です。ですから、研究者は決して論争を避けてはいけません。論争は、公開の場で理性的に行うことが、研究者の基本ルールです。未経験な若者にとっては、公開の場で論争することも、感情的にならないで論争することも、共に困難なことでしょう。その困難を乗り越えて、自らの感情を制御しながら公開の場で論争する経験は、若者を、研究者としても人間としても、急速に成長させるのです。その困難を乗り越える勇気が、私の言う「他流試合に挑む勇気」です

私の経験

- ▶ 2002年に商船大(現海洋大)に赴任し、1年以内の最初のほうの学会発表は擬似距離のマルチパス誤差低減に関するものでした。電子情報通信学会の研究会
- ▶ 壁の反射による影響を発表し、その際に私はGPSからの電波を線のようにとらえて説明しました
- ▶ 質疑のときに、もともと三菱電機におられた近藤先生より、線ではなく反射時は面的にとらえたほうがよいとアドバイスをうけました
- ▶ 反射面の凹凸や材質だけでなく、反射面の広がり(面積)によっても、反射係数が変わるということだったと思います



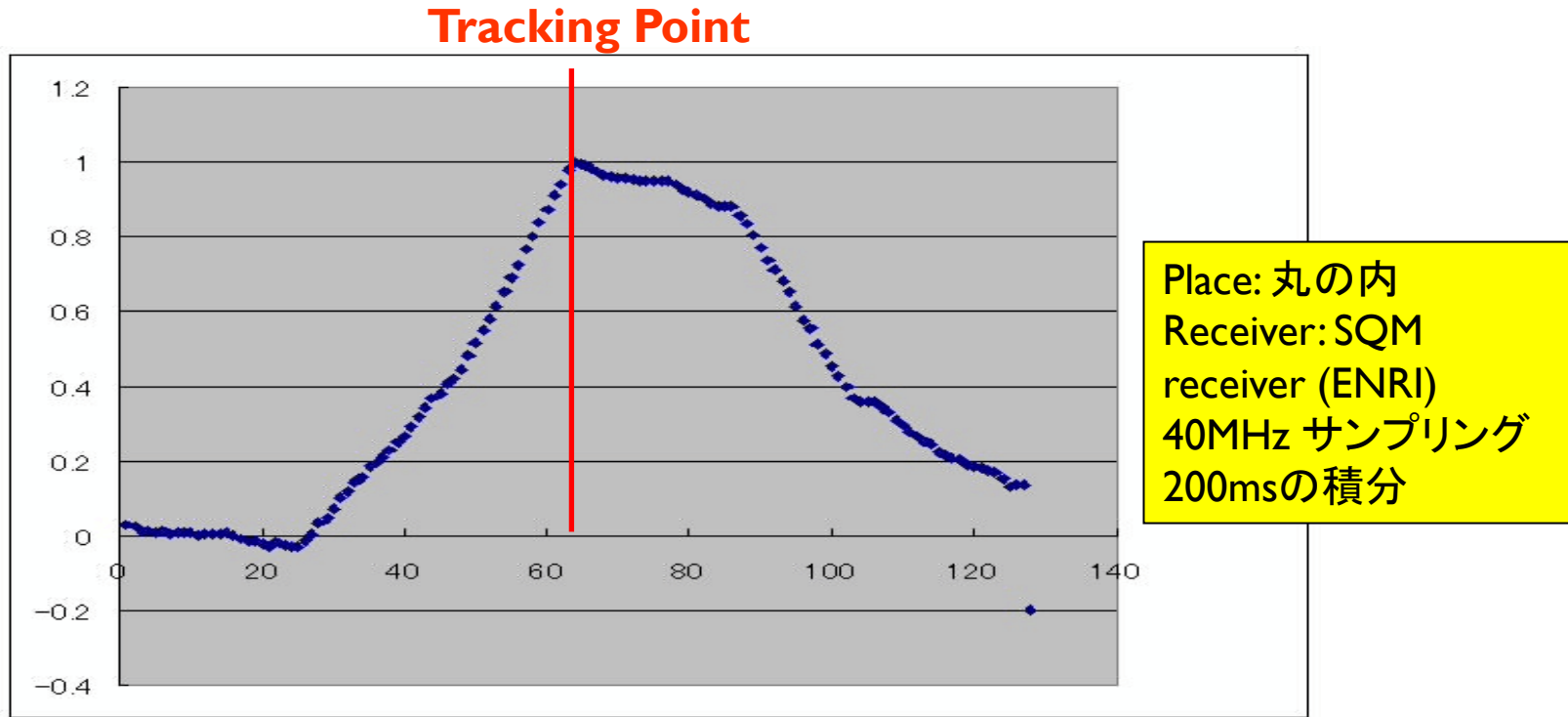
自分で改良できるとは？

- ▶ 今回のセミナーで、例えばGPS/QZSSのL1-C/AやL2C信号での動作を確認したとして、自分でL5信号(近未来の利用が予想される)の捕捉や追尾、擬似距離・搬送波位相算出を試みる
- ▶ 準天頂衛星に目を向けると、L6帯で補正信号が放送されています。この補正信号のデコードをやる→補正信号の仕様はこうしたほうがよいと提案
- ▶ 今後低軌道のLEO衛星を測位のために利用する可能性があります。このようにGNSSとは異なる仕様の新しい衛星の信号を自分のものにする



Animation of Correlation

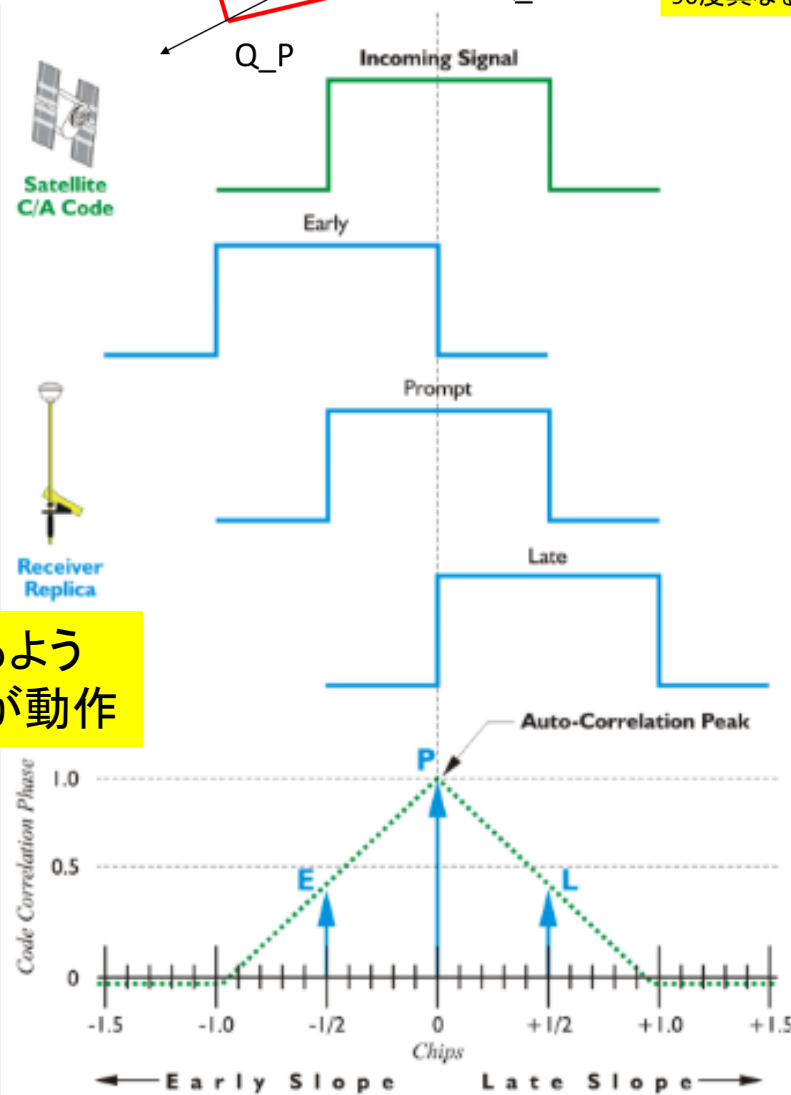
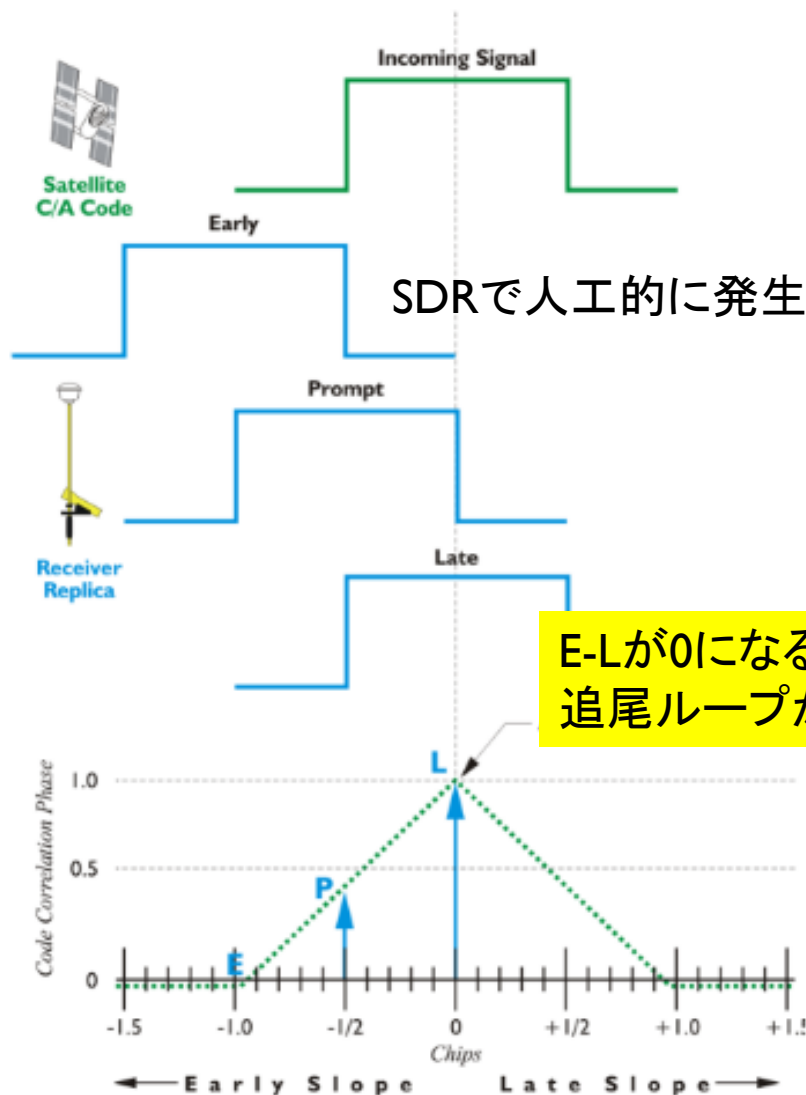
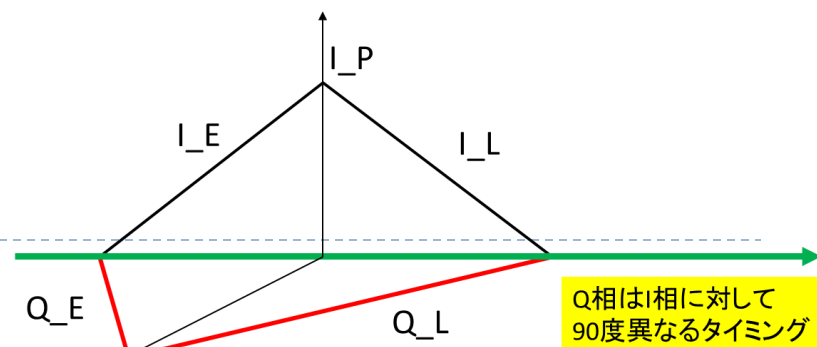
(car stopped at traffic signal in urban canyon)



**NLOSや強いマルチパスをイメージで判断できる
→現象をとらえて、信号処理部をどうすべきか考える**

鈴木先生はこの相関波形より機械学習でのマルチパス判別を提案

コード追尾

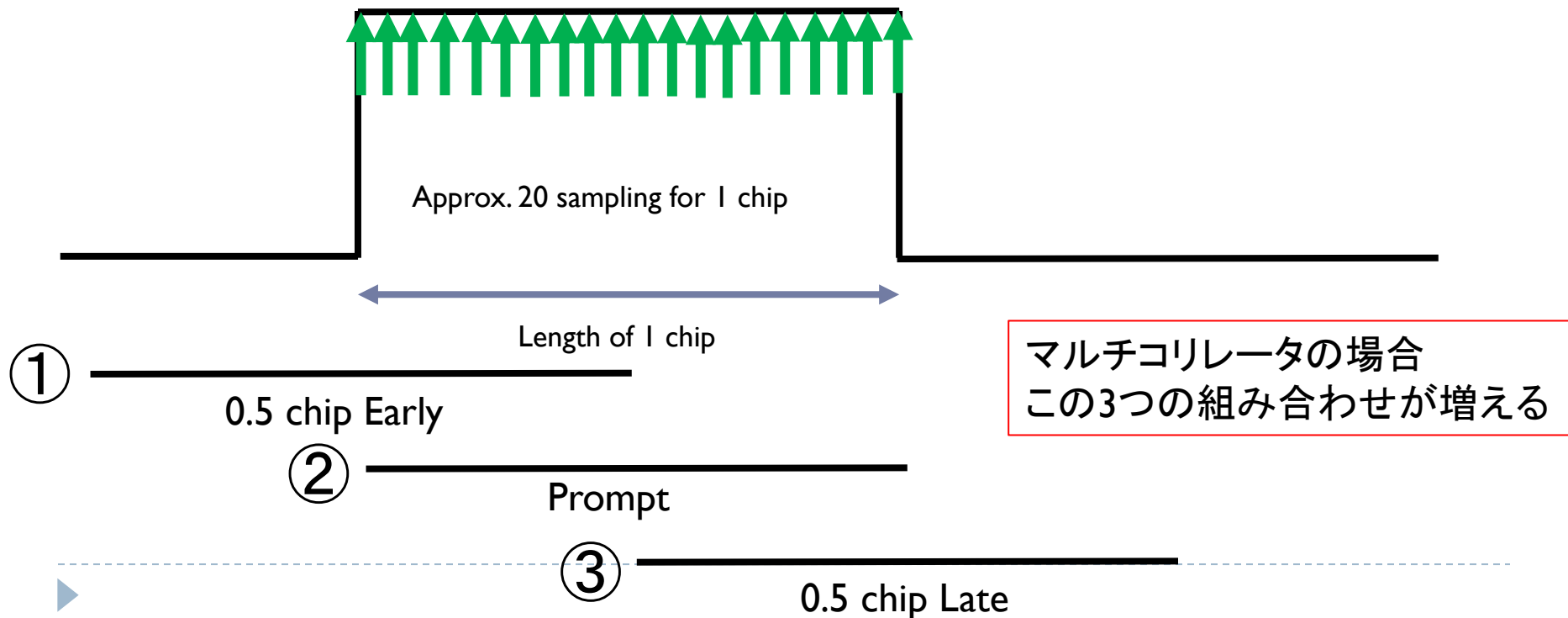


コリレータのスペーシング幅

▶ `earlyLateSpc = settings.dllCorrelatorSpacing;` (default : 0.5)

1 chip : 1/1023
C/A code : 1.023 Mcps
Sampling frequency : 20.25 MHz
 $20.25/1.023 = 19.794...$

0.5 chip : approx. 10 sampling
+/- 10 sampling
ちょうど0.5ではない



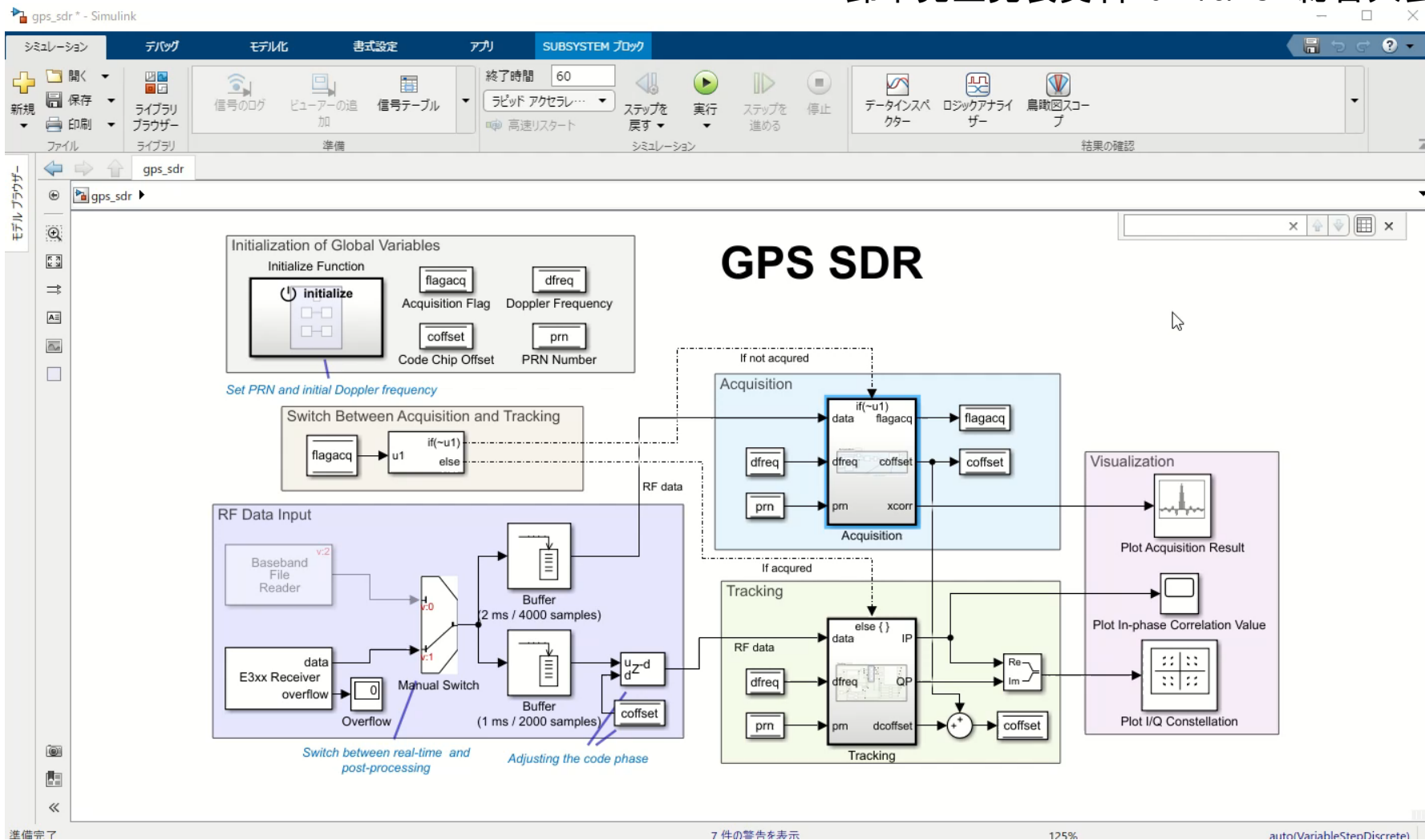
リアルタイム化

- ▶ SDRの内部演算で、相関をとる箇所には時間を要する。単純な演算ですが、サンプリング周波数が20MHzで、1msで20000回の位相波生成や相関処理(I、Q値を出力)がある
- ▶ 鈴木先生のプログラムですでにリアルタイム化は実装されていると思いますが、FPGA化は実装はしていません
- ▶ 海老沼先生よりFPGAの基礎は学びますが、例えばこの相関処理部分や信号捕捉部分をFPGA化することは、課題としてあります→学生のうちに原理を経験しておく

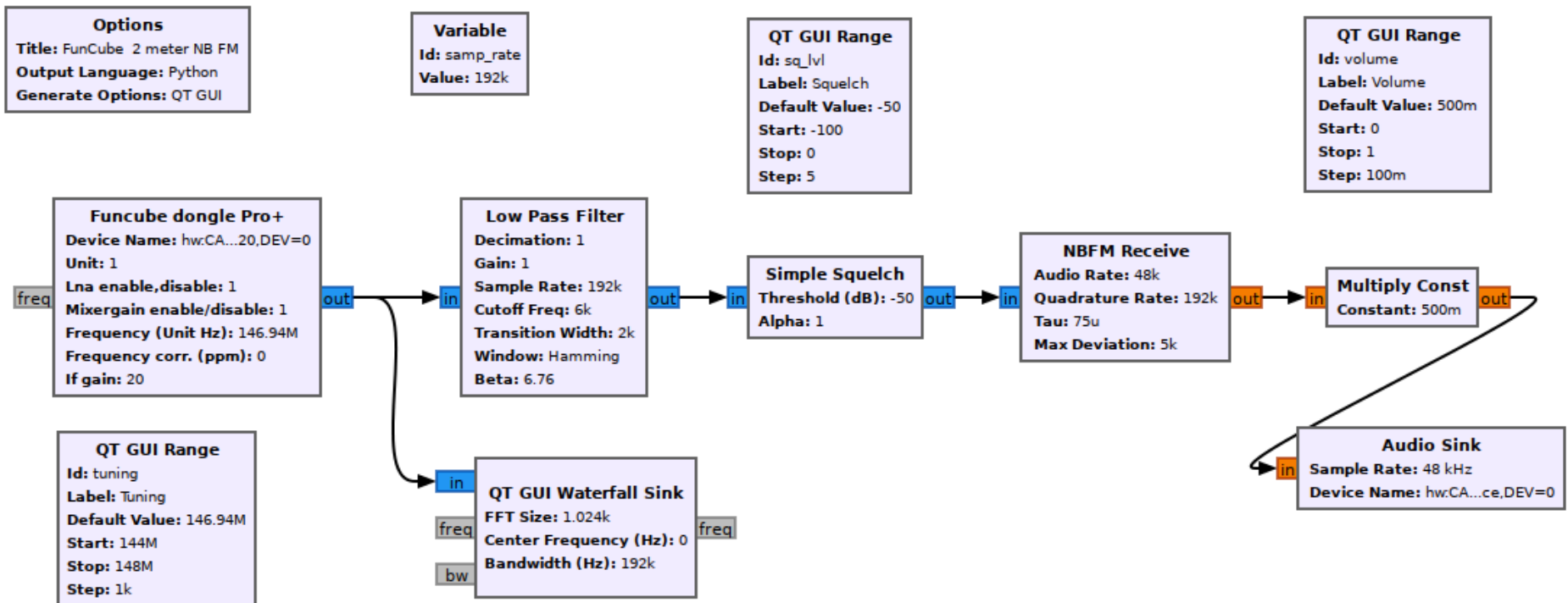


直観的なツールを使いこなす

鈴木先生発表資料2021/6/25 総合大会



他のツールの利用にもつながる



Gnu Radioの例

[GNU Radio - The Free & Open Source Radio Ecosystem](#) · GNU Radio

Tutorials (Gnu Radio)

Beginner Tutorials

Introducing GNU Radio

1. What is GNU Radio?
2. Installing GNU Radio
3. Your First Flowgraph

Flowgraph Fundamentals

1. Python Variables in GRC
2. Variables in Flowgraphs
3. Runtime Updating Variables
4. Signal Data Types
5. Converting Data Types
6. Packing Bits
7. Streams and Vectors
8. Hier Blocks and Parameters

Creating and Modifying Python Blocks

1. Creating Your First Block
2. Python Block With Vectors
3. Python Block Message Passing
4. Python Block Tags

DSP Blocks

1. Low Pass Filter Example
2. Designing Filter Taps
3. Sample Rate Change

Intermediate/Advanced Tutorials

Core GNU Radio Mechanics

1. Stream Tags
2. Polymorphic Types (PMTs)
3. Message Passing

Modulation and Demodulation

1. Narrowband FM
2. Single Sideband (SSB)
3. QPSK Mod and Demod
4. BPSK Demodulation
5. Frequency Shift Keying (FSK)
6. OFDM Basics
7. Packet Communications

Custom Blocks and Out of Tree (OOT) Modules

1. Creating an OOT (Python block example)
2. Creating an OOT (C++ block example)
3. Writing the YAML file for a block (GR 3.8+)

Miscellaneous

1. Understanding a Flowgraph's Python Code
2. Using GNU Radio With SDRs
3. IQ and Complex Signals
4. Understanding Sample Rate
5. Understanding ZMQ Blocks

Developer Resources

1. Porting Existing Flowgraphs to Newer Version
2. Porting Existing OOTs from 3.9 to 3.10
3. Porting Existing OOTs from 3.8 to 3.9
4. Porting Existing OOTs from 3.7 to 3.8
5. VOLK: What it does, why it rocks, how to write new kernels
6. Working with ALSA and Pulse Audio
7. Using Visual Studio Code for Source level debugging of C++ OOTs
8. Using Eclipse for Building and Source level debugging C++ OOTs
9. Using Code::Blocks IDE for GNU Radio Development
10. Git and GNU Radio
11. How to use Octave or Matlab with GNU Radio
12. The GNU Radio Scheduler [🔗](#)
13. Using Custom Buffers for Hardware Accelerated Blocks
14. Remote Control and Automation of Flowgraphs with XMLRPC



客観的な評価

- ▶ 8月8日のセミナー初日に、みなさんのソフトウェアGNSS受信機に対する理解がどの程度か確認するためのアンケート用紙をお渡します
- ▶ 各自異なるバックグラウンドとしますので、セミナーを受ける前から今年1年、来年1年でどのくらい理解が深まったかを確認します。その際に、やはり企業の方も多く参加される学会発表が適しており、測位航法学会や測位技術振興会での発表をお願いしているところです。どちらも年に2回あります。その他の学会発表でももちろん問題ありません
- ▶ 特にセミナー後に各自課題に取り組むにあたって、できるかぎり教員らでサポートさせていただきます



どこまでいっても自分次第

- ▶ 本セミナーで配布される教材やプログラム、またWEB上にある様々なツール
- ▶ それらを使いこなすのは、みなさんです
- ▶ 自ら課題をみつけて、それらツールを利用して、技術的な課題を解決していく
- ▶ 研究者であれば、その研究成果を学会で発表する
- ▶ 様々なコメントがあり、改善につなげていく
- ▶ 我々はこの2年できっかけを与えますが、基本は自分次第

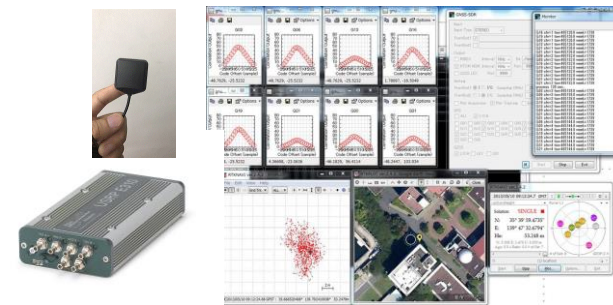


スケジュール（各年度）

令和3年度：申請者らがプラットフォームと教材を開発

プラットフォームの開発（MATLAB、C等）

プラットフォーム用教材の作成（英語教材も作成）



令和4年度：全国の大学・高専学生の受け入れ、セミナー、実習を開催

参加学生の募集（10名以上）

セミナーを実施（1.5時間×15コマ）→集中講義で1日×3

コンテストの紹介（習熟度を測りつつより高みへ）

高周波アンテナ測定試験の実習（電波の入口であるアンテナも重要）



令和5年度：発展的テーマの取り組み、シミュレータ実習、コンテスト開催

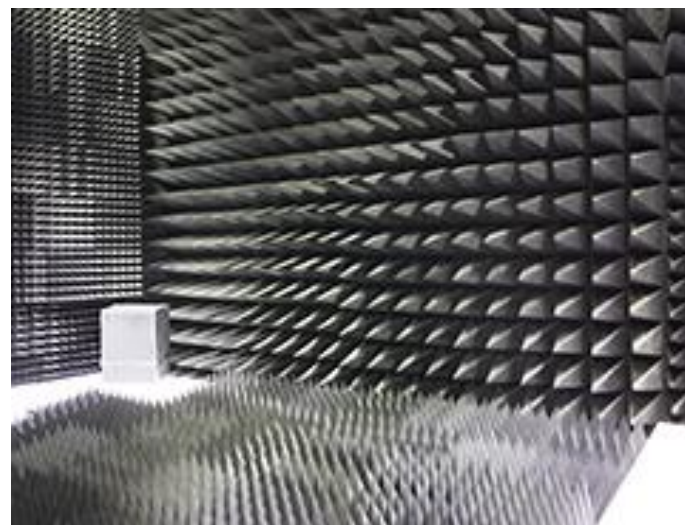
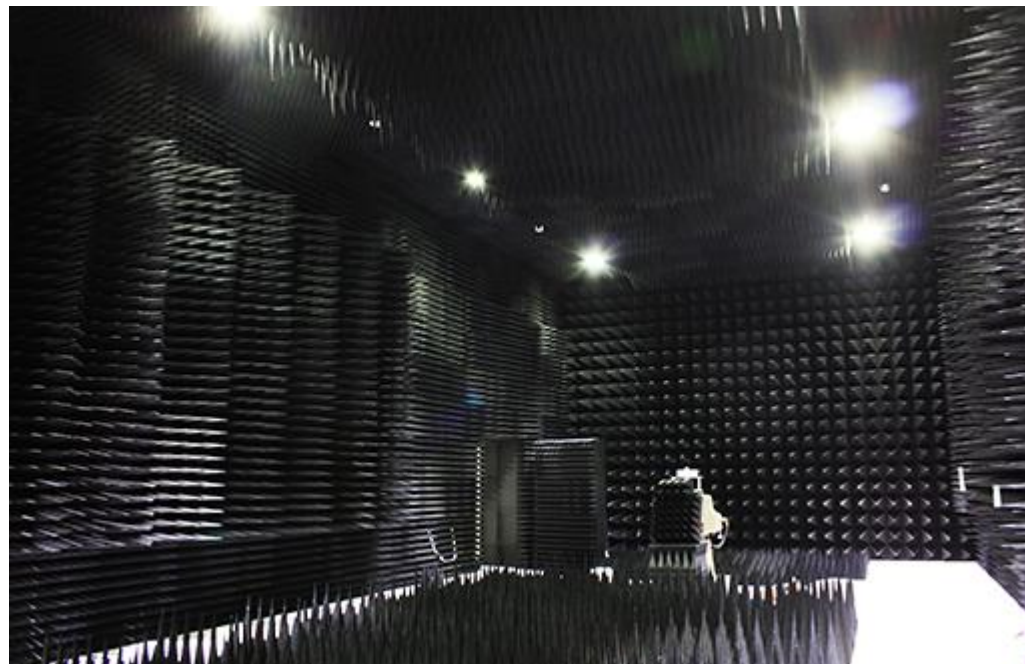
発展的課題への挑戦（企業の持つ課題へつなげる）

GNSSシミュレータの実習（シミュレータに慣れる）

コンテストを開催（学生の選抜）



電子航法研究所の電波暗室



内部寸法(外寸):	32.0m×6.2m×4.2m
使用周波数帯域:	1-110GHz
無反射範囲:	23m 以上
反射減衰量(中心部):	50dB 以上
遮蔽減衰量(中心部):	90dB 以上

電波暗室でのアンテナパターン測定

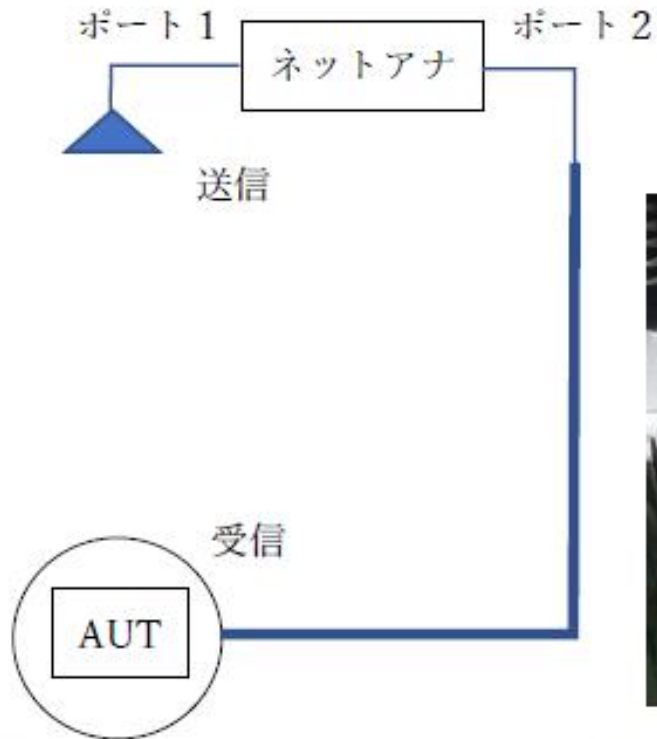


図1 ネットワークアナライザによる測定系

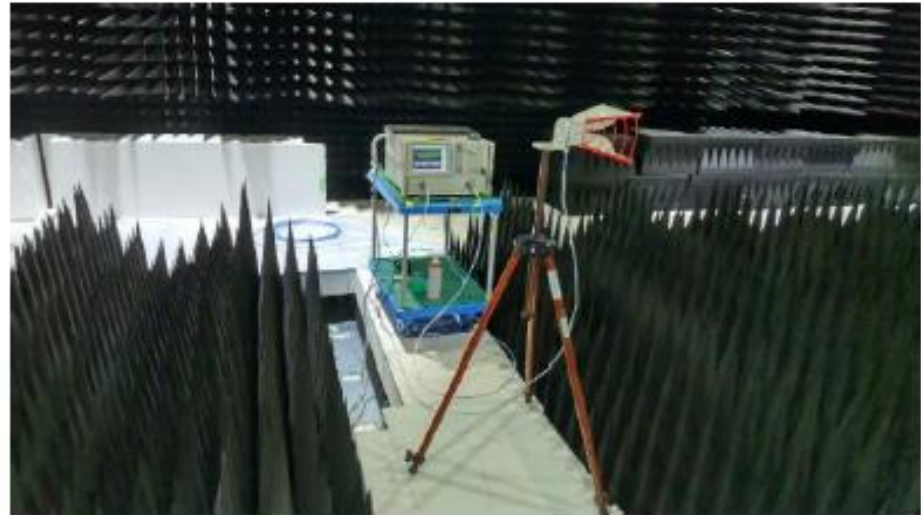
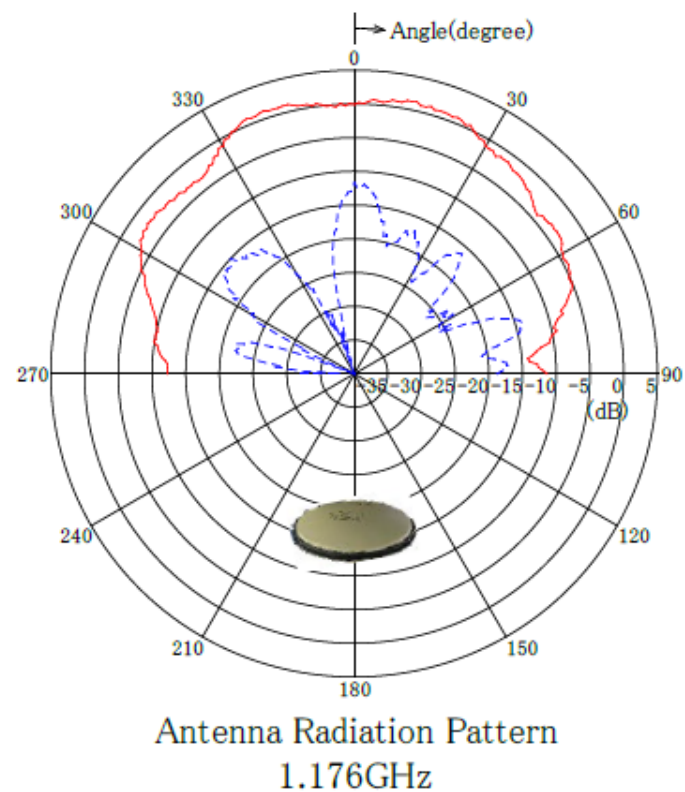
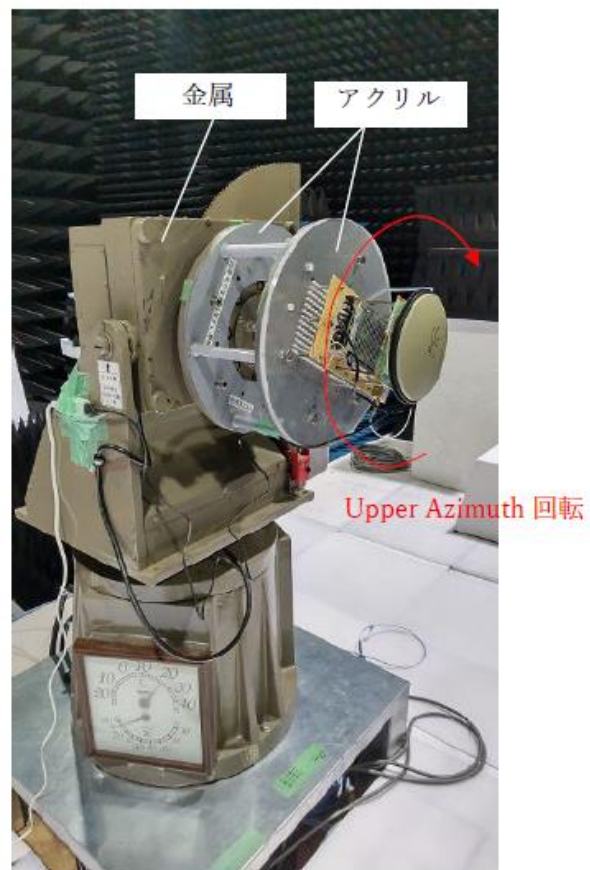
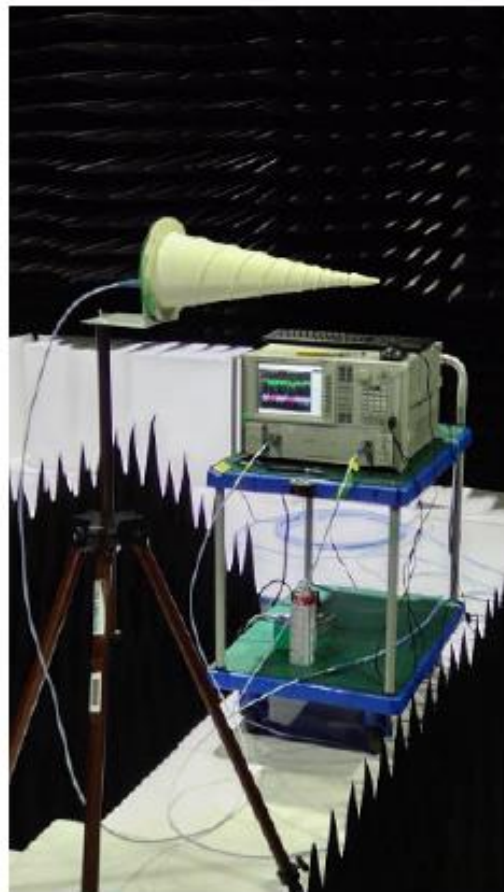


図2 送信側

電波暗室でのアンテナパターン測定



今回利用するアンテナ

- ▶ NovAtel社のGPS-703-GGG
- ▶ u-bloxのF9Pに付属のAMO社のアンテナ(2周波)
- ▶ ドローンに適した軽いヘリカルアンテナ(2周波)



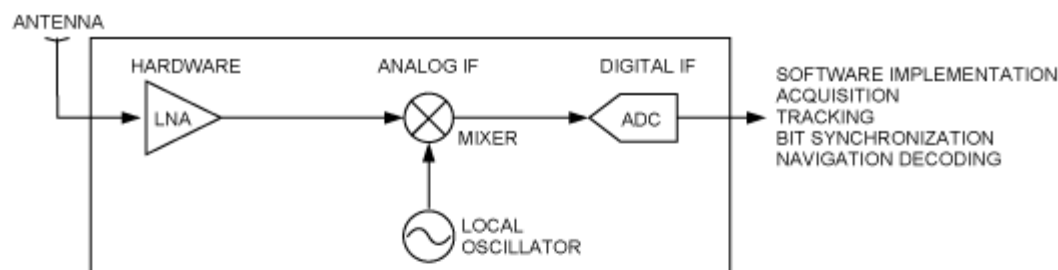
MAX2771の紹介

[MAX2771 - Multiband Universal GNSS Receiver \(maximintegrated.com\)](http://maximintegrated.com)

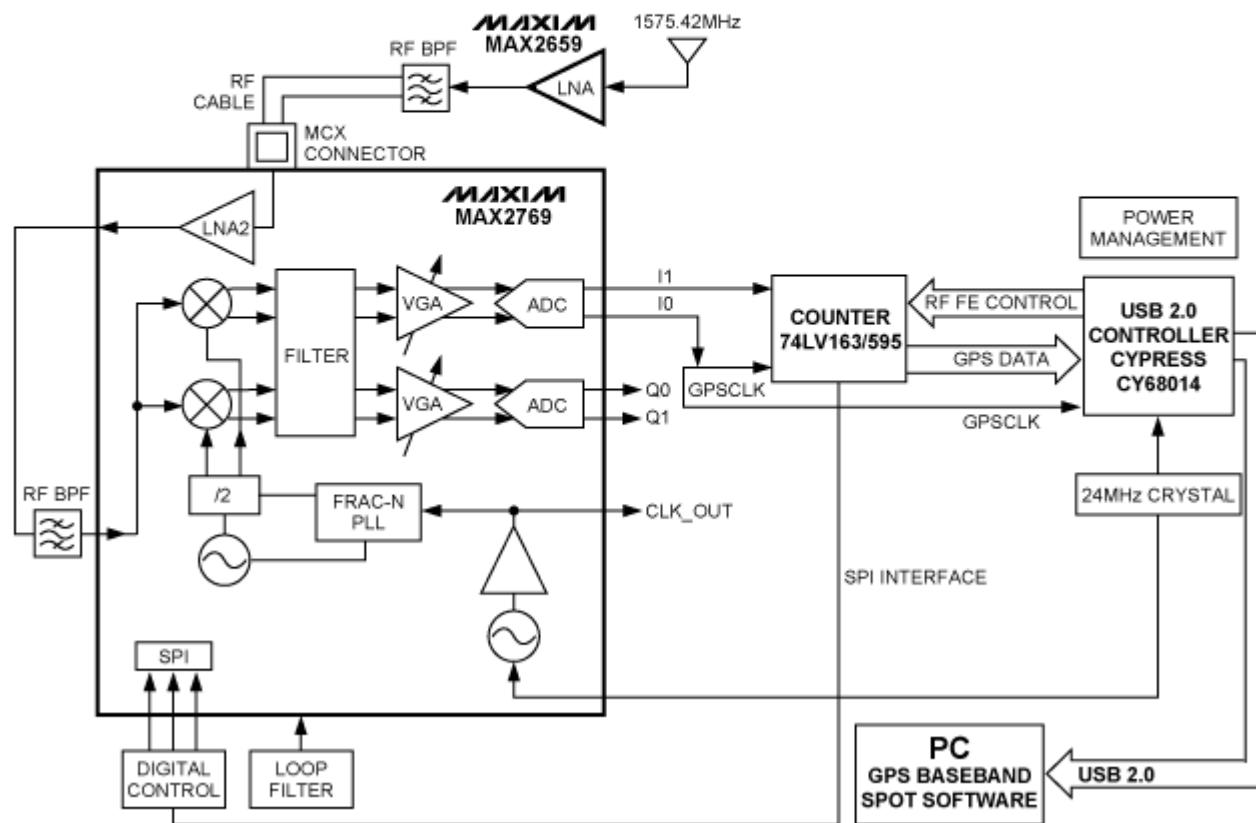
- ▶ Multi-Constellation Support • GPS, Galileo, GLONASS, BeiDou, IRNSS, QZSS, SBAS
- ▶ Multiband Support • L1, L2, L5, E1, E5, E6, B1, B2, B3
- ▶ Programmable IF Bandwidths of 2.5MHz, 4.2MHz, 8.7MHz, 16.4MHz, 23.4MHz, 36MHz • Supports Wide-Band Carriers for Precision Applications (e.g., GPS L5, Galileo E5)
- ▶ Operates in Low IF or Zero IF Mode • Programmable IF Center Frequency
- ▶ Fractional-N Synthesizer with Integrated VCO Supports Wide Range of Reference Frequencies
- ▶ On-Chip LNAs to Support Multiple Bands
- ▶ 1.4dB Cascaded Noise Figure and 110dB of Cascaded Gain with Gain Control Range of 59dB from PGA
- ▶ Integrated Crystal Oscillator
- ▶ Supply Voltage Range: 2.7V to 3.3V
- ▶ 28-Pin, RoHS-Compliant,



フロントエンドの役割



(a)



(b)

LNA: ゲイン20~30dB程度

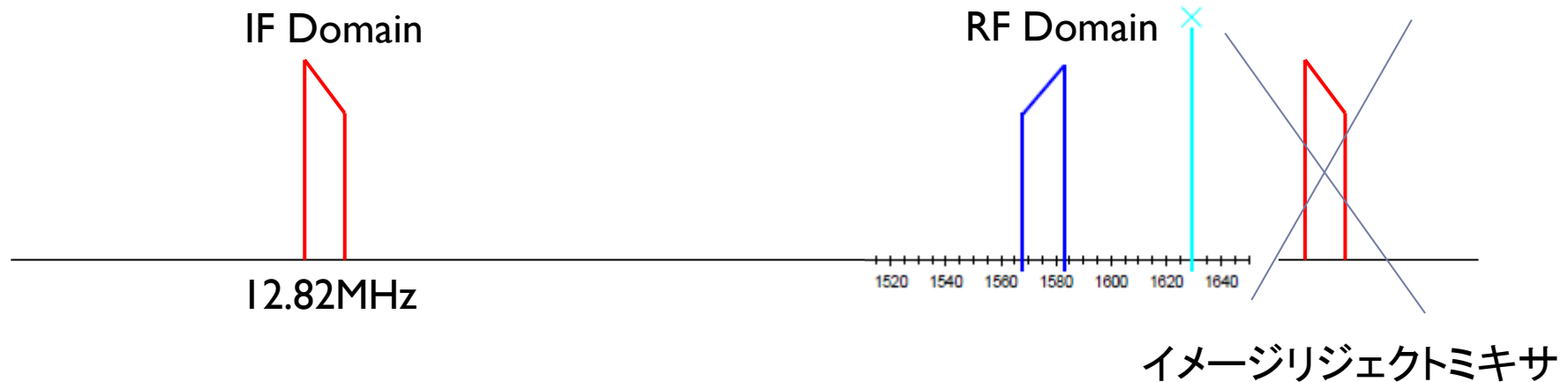
NF(雑音指数): 2dB以下

ダウン・コンバータ:
例えばGPSのL1信号である1575.42MHzを扱いやすい数MHzの中間周波数(IF)にダウン・コンバートします。

A-Dコンバータ: IF信号のデジタル化。一般に1ビットや2ビット(1.2dB程度の損失)
AGCで量子化を最適に
VGA:可変ゲインアンプ

PCに取り込むための
USBインターフェース

別のフロントエンドでの補足説明



The sign in the IF domain is opposite to the sign in the RF domain by mixing.

このフロントエンドでは、1575.42MHzに対して、1,000Hzのドップラ周波数の衛星があったとして、IFの領域では、符号が反対になっているので注意が必要（周波数オフセットは0と仮定）

搬送波位相ドメイン 中間周波数ドメイン
 $1575.42 + 0.001 \text{ (MHz)} \rightarrow 12.82 - 0.001 \text{ (MHz)}$

RTL-SDRの紹介



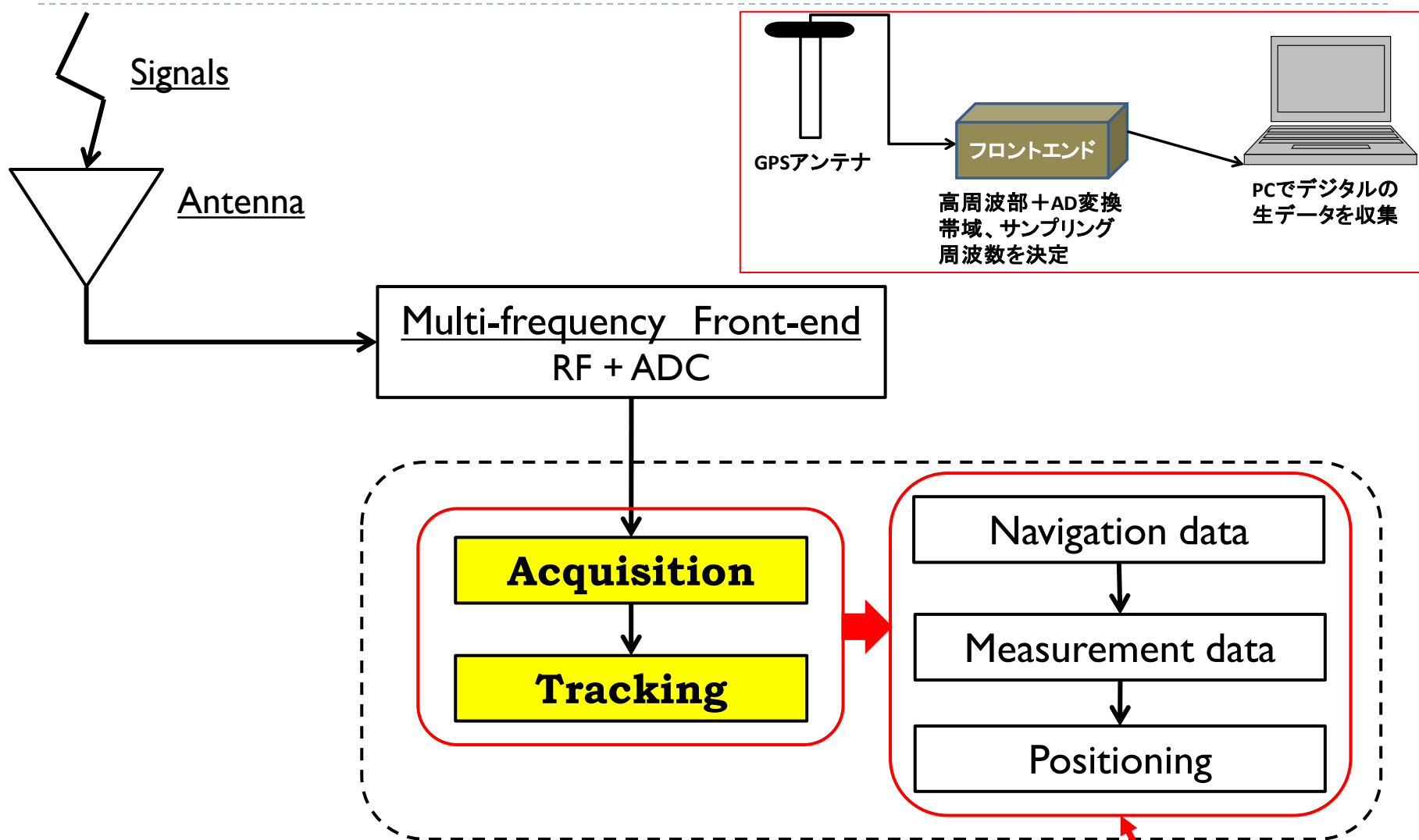
- RTL2832U+R820T/R820T2搭載チューナー互換、新規導入の際はRTL-SDRドライバーインストール方法、
<https://goo.gl/8QyBw7>
- RTL2832U+R820T2周波数範囲24-1700MHz[アンテナ入力 SMA-Jコネクタ][アルミダイキャストケース][USB電源バイアス・ティ回路接続パッド][TCXO 温度補償値 1PPM/初期周波数偏差 2PPM]
- チューナー単体: VHF UHFアマチュア無線(AM/FM/SSB)、航空無線, ADS-B, AIS, NOAA/APT, 業務無線, 簡易無線/ダイレクトサンプリングモード及び別売HFコンバーター使用時: HFアマチュア無線(SSB/CW/SSTV), 中波放送, 短波放送, DRM放送, ラジオファクシミリ, HF洋上管制, HF DL、などの受信が可能
- チューナー本体のみ、受信の際は受信する周波数に合ったアンテナをご使用ください、金属ケースのためUSBケーブルは必ずシールドタイプを使用してください

受信機の動作を理解すると良い点

- ▶ 市販受信機より出力される、観測値がどのように生成されているかイメージできる
- ▶ 欺瞞信号等の対策を信号処理部で対応可能
- ▶ マルチパス等の低減案を信号処理部で対応可能（＋アレイアンテナの利用）
- ▶ ロバストな信号追尾のための他センサとの統合
- ▶ 新しい測位衛星（LEO含む）への対応が可能



GNSS-SDR それぞれの分担



測位誤差の原因追及

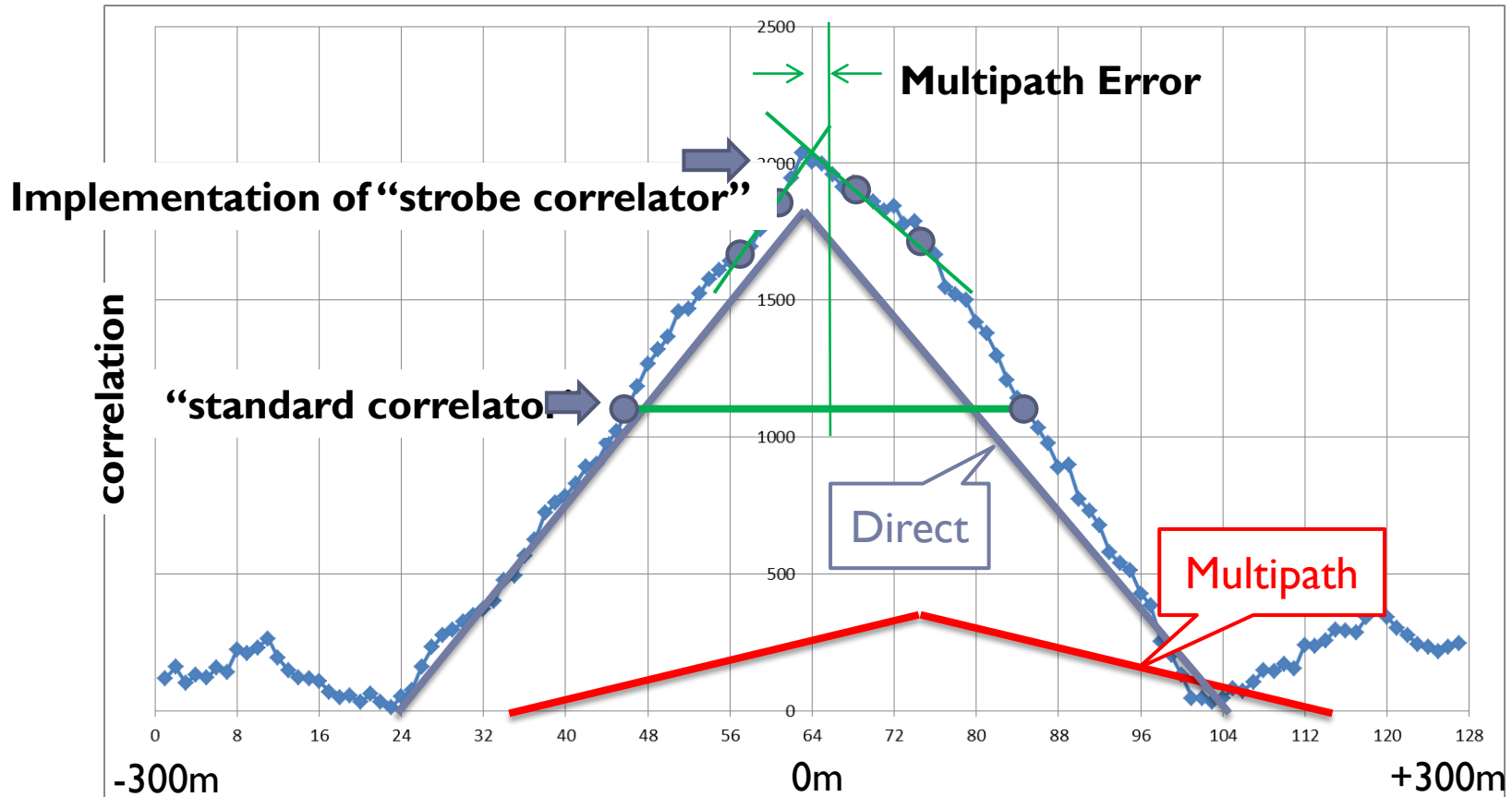
- ▶ RTKLIBや測位演算ソフトで、RINEXデータでの演算を行うと、必ず課題がでてくる。例えばRTKでFIXしないやミスFIXをする
 - ▶ おおむね、観測データの中身と測位演算部を見ていくことで原因がわかる
 - ▶ しかし、それら観測データ自体は、実は受信機の信号追尾の結果出てきたものであり、必ずその信号処理部分の影響を受けている
 - ▶ 例えば信号レベルですが、信号レベルである程度の誤差を見積もることが行われることがある。もしくは30dBHz未満の衛星を利用しないなど。では、この信号レベルそのものはどのように計算されているのか？ここを知っておくことも重要なときがある
 - ▶ 昨今の市販受信機は洗練されており、おおむねそのまま観測データを利用しても同様の結果になる
-



Example of “particular signal case”

---B4 student study : multipath mitigation---

従来より利用されているストロボコリレータの実装



自分で実装していくと見えてくる

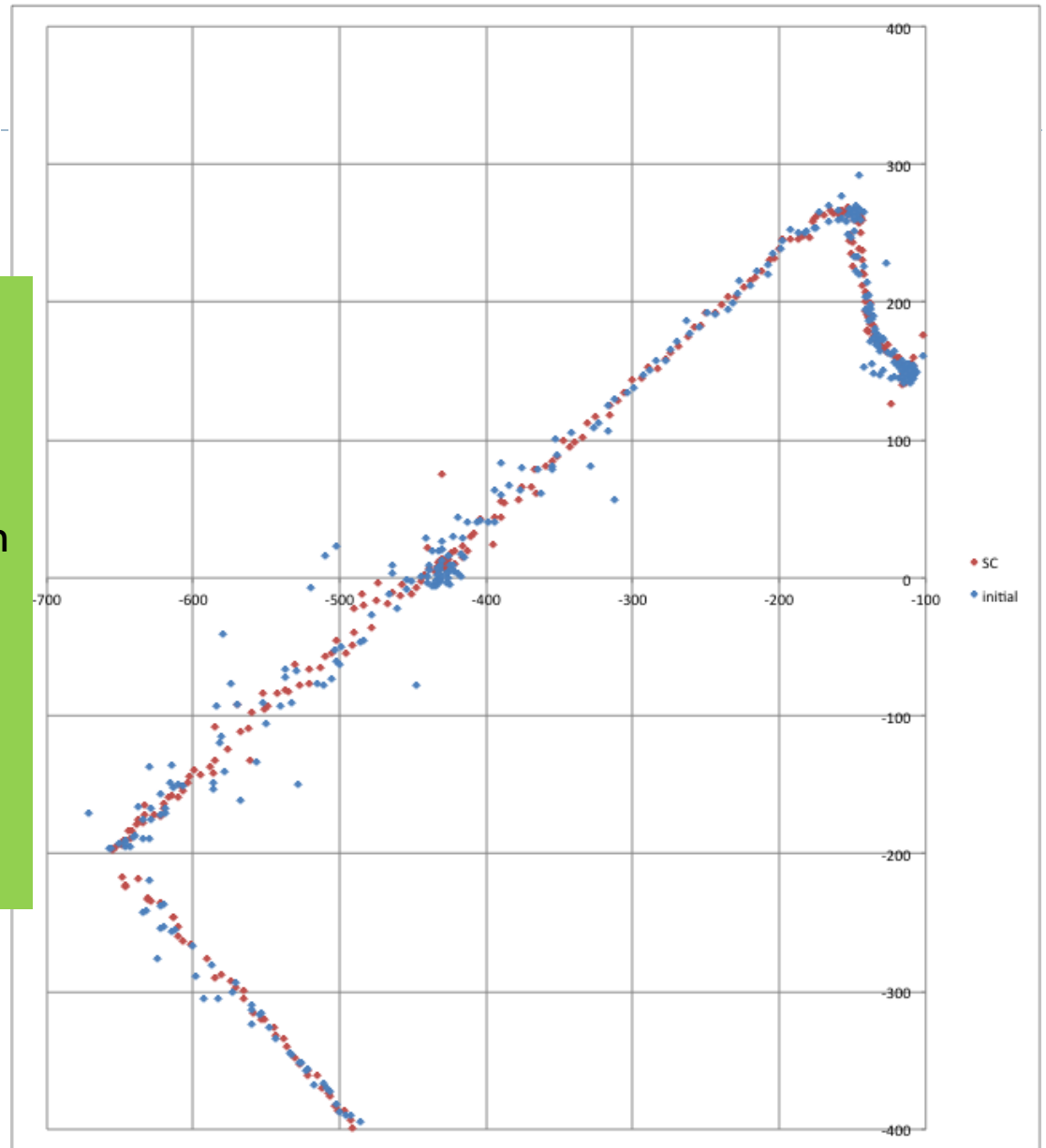
測位精度の改善

SDRのIFデータを
海洋大周辺で取得(月島)

Blue plots -> Initial results
Red plots -> After implementation

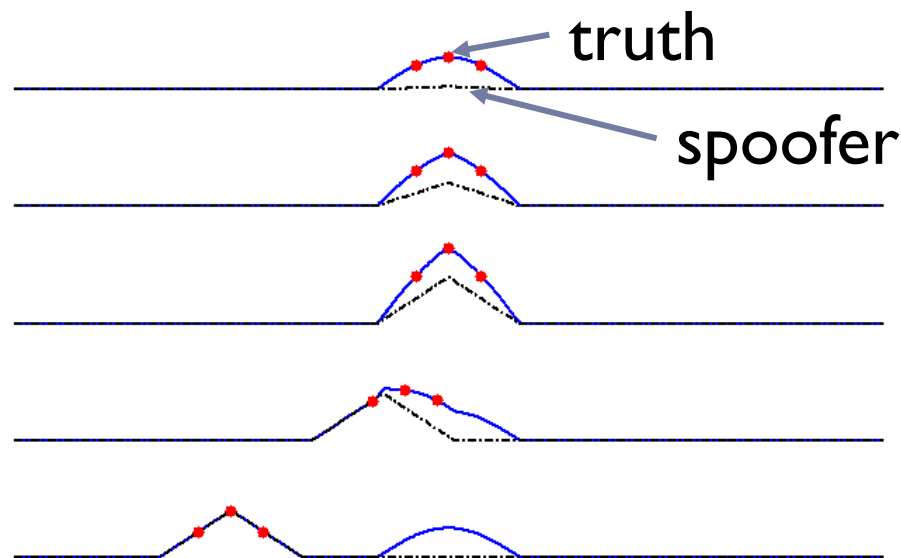


卒論の課題であったが、実際に
ストロボコリレータを組み込む
ことで、都市部での精度が
多少なりとも改善した。



Spoofingをする側の基本

Receiver Design, Signal Processing



Receiver/spoofing attack sequence viewed from a victim receiver channel. Spoofer: black dash-dotted curve; sum of spoofer and truth: blue solid curve; receiver tracking points: red dots.

信号認証

- ▶ 準天頂衛星システムでは、昨今、対策の必要性が認識されているスプーフィング（なりすまし）について、暗号技術を活用し、測位信号に含まれる航法メッセージの発信元を認証する「信号認証（航法メッセージ認証）」機能の整備を計画しています。信号認証機能の実環境での性能を計測し、システムの性能仕様を規定するために、準天頂衛星から放送するL1C/A信号において、信号認証情報を付与した試験信号を下記の通り配信します
- ▶ この時、GNSS-SDRで仕様通りにデコード機能を実装すれば、すぐに認証信号を確認（検証）できる

Alternate Radionavigation

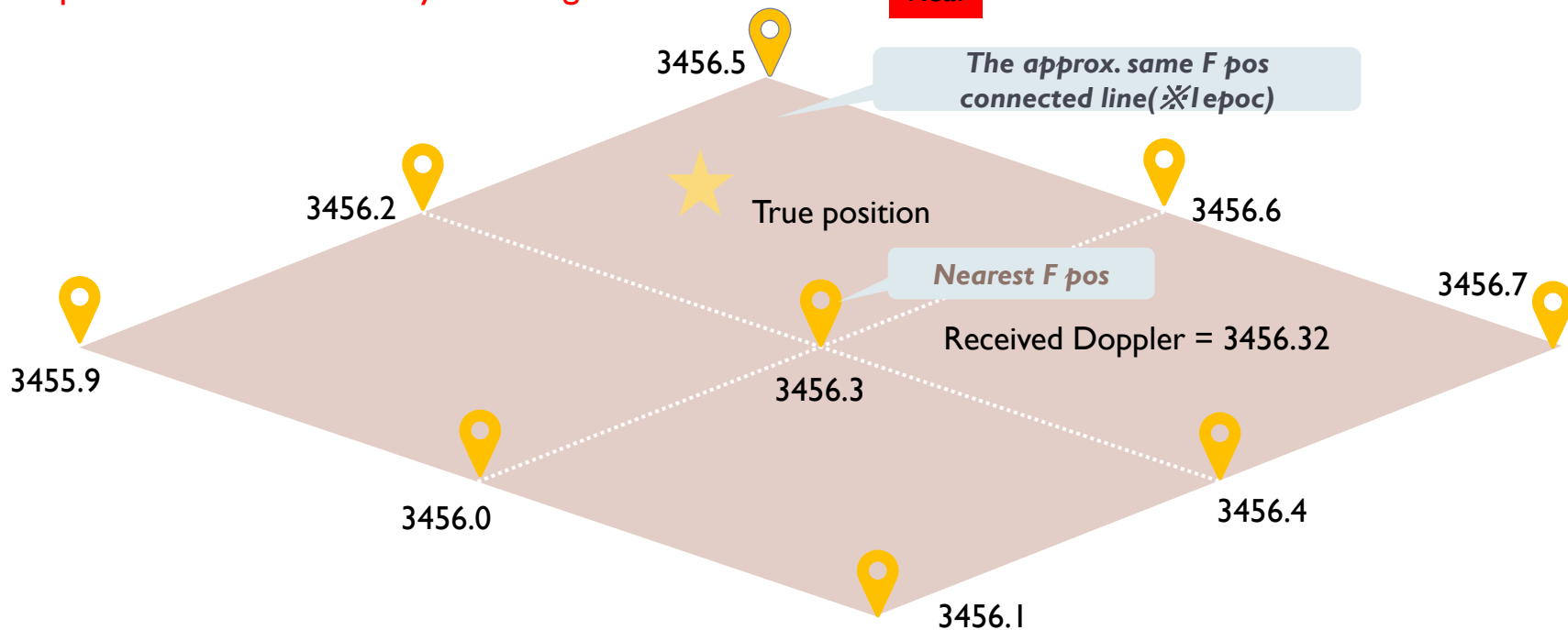
Fingerprint like positioning using only Doppler frequency of LEO

1. Received Doppler frequency is determined by the position
2. We prepare a Doppler map according to the grid position
3. Compares the received Doppler with prepared one
4. The position is determined by matching them

Simulation

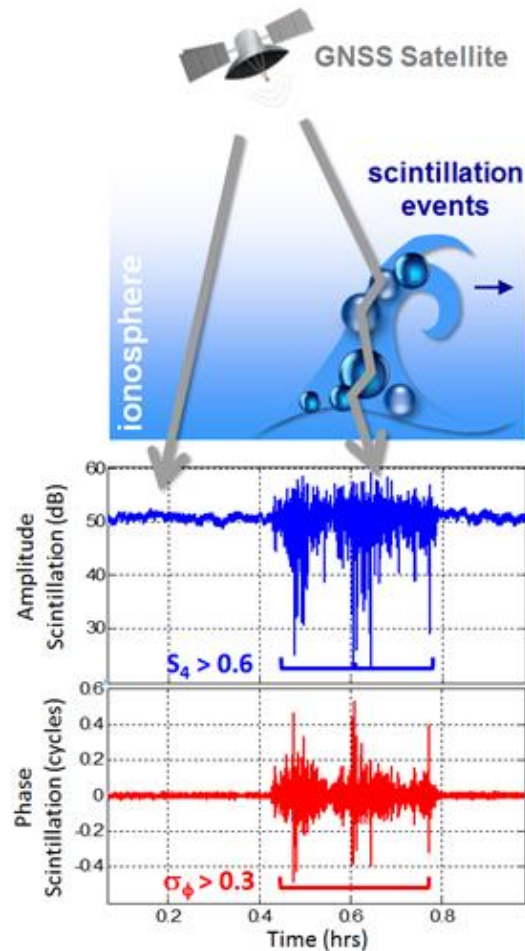


Real



現存するLEO衛星の信号仕様がわかれば、SDRでプロトタイプ受信機を開発できる

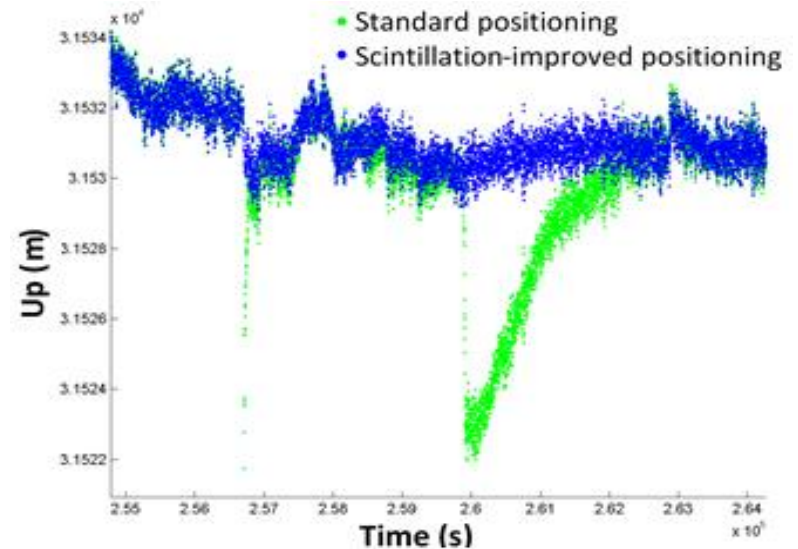
電離層シンチレーションモニタリング



Data supplied by J.-M. Sleewaegen, Septentrio, Belgium

振幅指数

位相指数

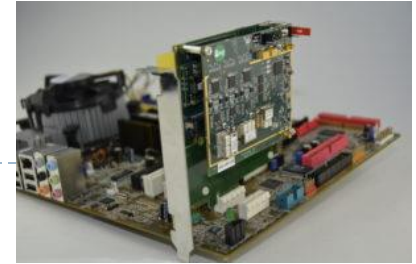


The height of a static PolaRxS receiver with and without scintillation-improved algorithms.
(Supplied by: B. Bougard from data collected as part of the CIGALA project, Brazil)

大阪公立大におられる辻井先生はこのシンチレーションに対応した航空機用受信機の開発を実施 (SDR利用)

ドイツでの例 (GOOSE)

GOOSE is meant as a rapid prototyping solution for the development of GNSS receivers.



FPGAの部分以外オープン

- 60 hardware channels
- Up to 25 Hz raw data output (code, carrier, navigation data)
- Supported signals: almost available
 - **Galileo OS-NMA** implemented
- Open GNSS Receiver Protocol (OGRP[®]), fully documented with parsing tool using CONVBIN from RTKLIB as RINEX converter
- C++-API to access the tracking I&D values and to close the tracking loops
- Logging of tracking I&D values
- 10 MHz reference input/output, PPS output
- 1 Ethernet port, 2 full speed USB ports
- Digital recording and playback of front-end IF samples in real time

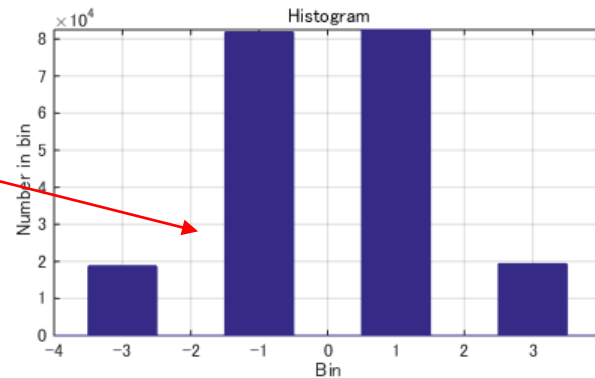
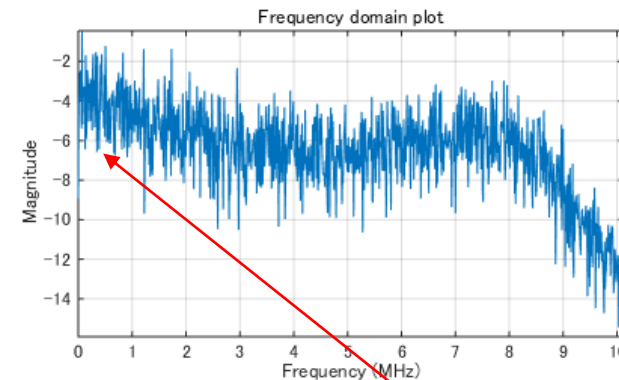
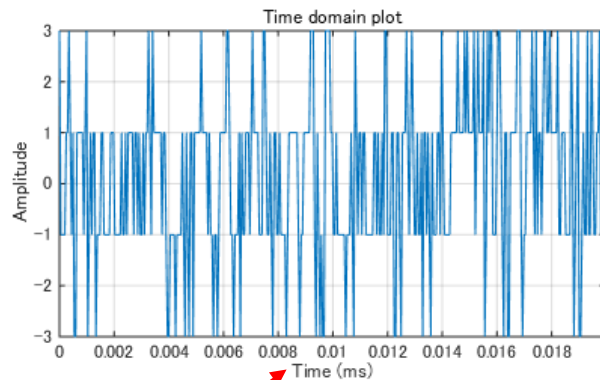


GNSS-SDRの基本の基本（セミナー前）

- ▶ 信号捕捉
- ▶ 信号追尾
- ▶ コードとドップラ周波数



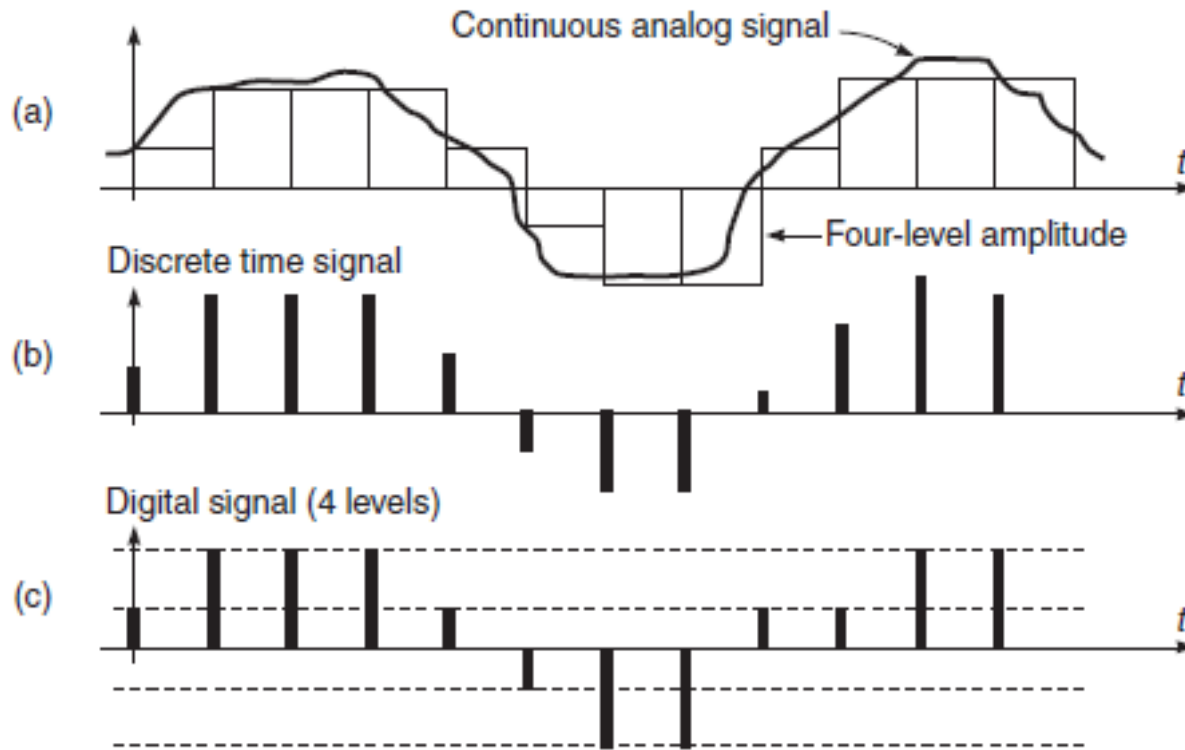
今回利用したフロントエンドのデータ (1ms分)



This is raw data after A/D convert.
About 202.5 for 0.01 ms.
A/D is analog to digital(-3,-1,1,3)

Center frequency for LI-C/A
is 1575.42 MHz.
It is transited to 0.529 MHz
which is intermediate frequency.

サンプリング

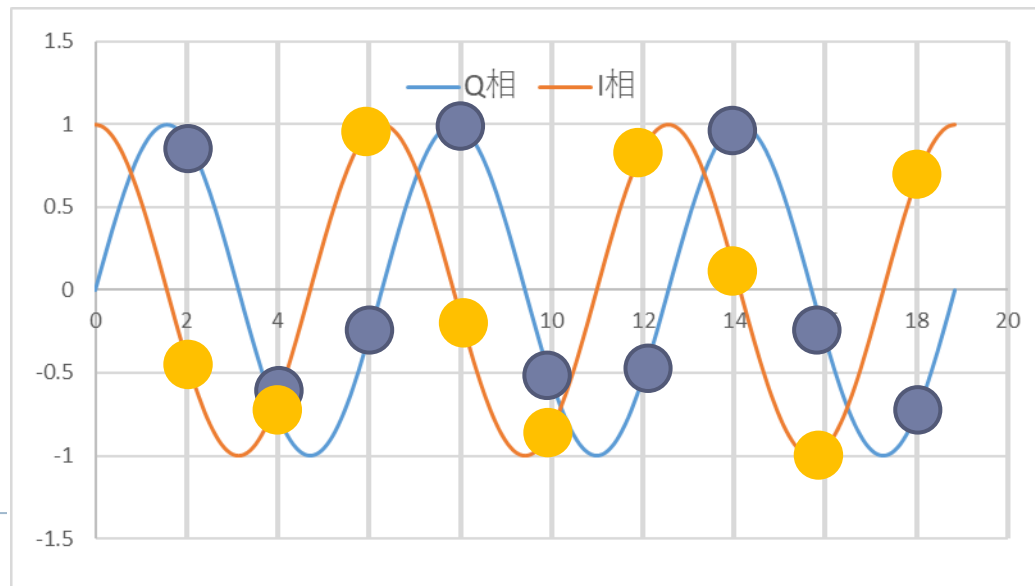


例
3
|
-1
-3

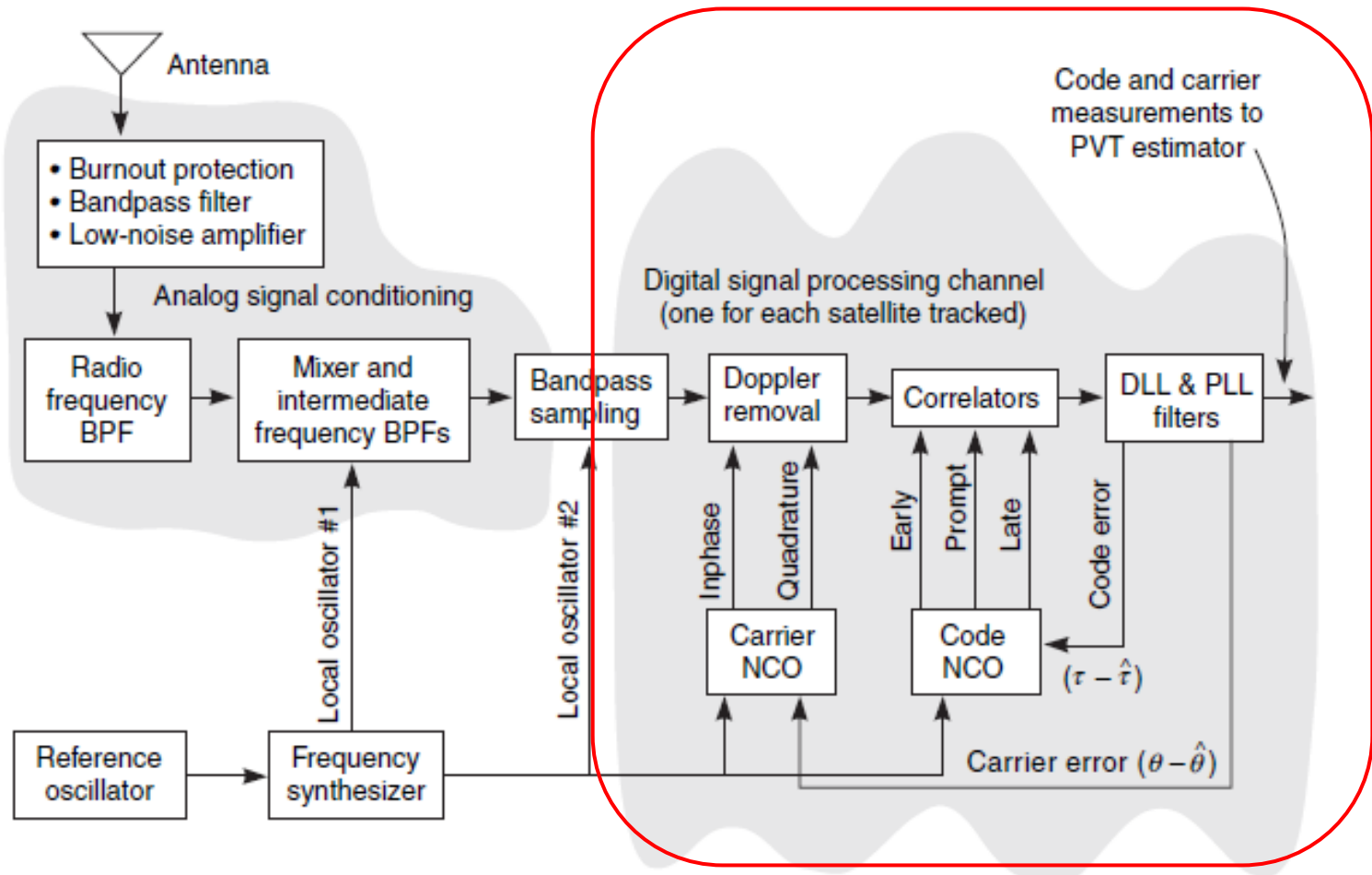
2ビットのものが多。設定可変のものも

I,Qサンプリング

- ▶ 最近のFE (GNSS関連) はほとんどI,Qでサンプリングしたデジタル信号を出力。FE側でI相と90度位相がずれたQ相のデジタル値を出力
- ▶ 信号処理の観点よりIサンプリング (20MHz) のみの信号とI,Qサンプリング (20MHz) では、その情報量も異なる

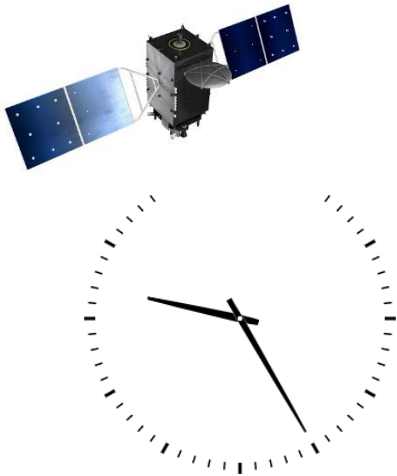


信号処理部のブロック図



信号捕捉・追尾の目的

- ▶ GPSによる測位は、衛星時計の時刻を観測することからはじまる



受信したコード

両者のタイミングが一致→**衛星時計の時刻を得た**
→伝搬時間(距離分と受信機クロックオフセット)を測定できる

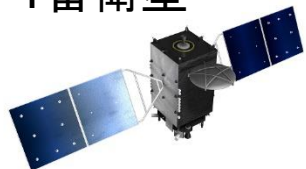


レプリカコード



伝搬時間を測定

1番衛星



(タイミングが一致済み)

受信データ(衛星からの信号時刻は刻印されている)



0秒

0.001秒

0.002秒

$\tau = 75\text{ms}$

0.075秒

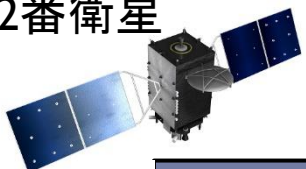
0.076秒

0.077秒

受信機の時刻



2番衛星



受信データ(1番衛星と同一の取得タイミング。他の衛星も同様)



0.005秒

0.006秒

0.007秒

$\tau = 70.3\text{ms}$

0.075秒

0.076秒

0.077秒

受信機の時刻



異なる衛星に対して、タイミングを一致させる。ただし受信機の時刻は1つ
→ 同じタイミングで伝搬時間を測る → 擬似距離

どのようにタイミングを一致させるか

- ▶ 衛星からのコードと受信機で発生させるレプリカコードの相関値を利用
- ▶ この相関値を最大にすることで、両者のタイミングが一致する
- ▶ 最初にラフな相関をとり(これが**信号捕捉**)、その後衛星と受信機間の相対距離は時々刻々変化するため、常にレプリカ時計の遅進を修正する必要がある→これが**信号追尾**

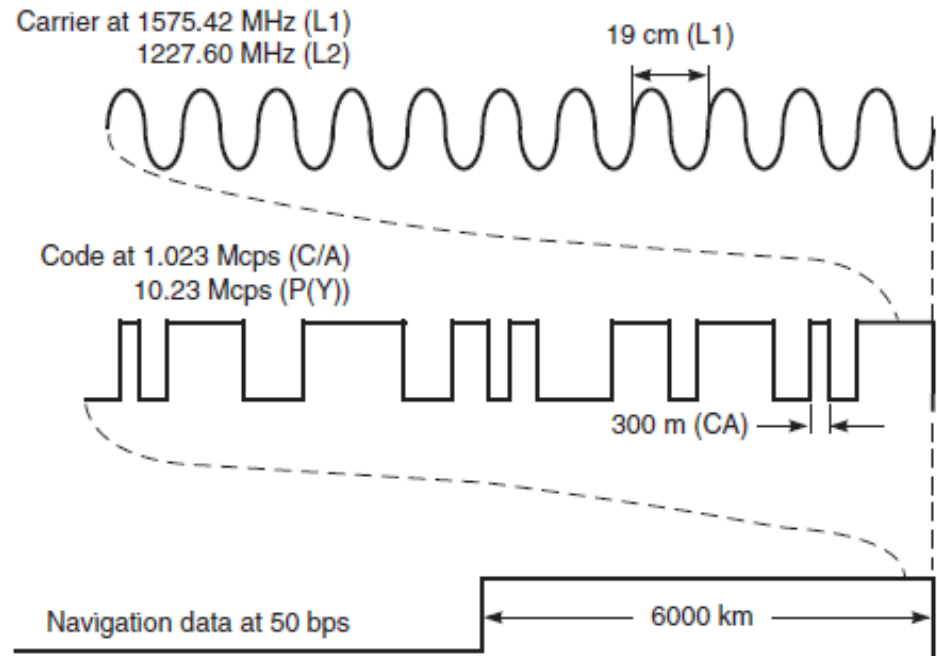
GPSの信号

$$S_{L1}(t) = \sqrt{2P_{C1}}D(t)x(t) \cos(2\pi f_{L1}t + \theta_{L1})$$

$$+ \sqrt{2P_{T1}}D(t)y(t) \sin(2\pi f_{L1}t + \theta_{L1})$$

$$S_{L2}(t) = \sqrt{2P_{T2}}D(t)y(t) \sin(2\pi f_{L2}t + \theta_{L2})$$

送信信号



伝搬時間

ドップラ周波数

位相

$$r(t) = \sqrt{2P_{rcv}}D(t - \tau)x(t - \tau)\cos(2\pi(f_L + f_D)t + \theta_{rcv}) + n(t)$$

受信信号

赤丸部分をどうにかして推定するために信号処理がある

受信信号を眺める

$$r(t) = \sqrt{2P_{\text{rcv}}} D(t - \tau) x(t - \tau) \cos(2\pi(f_L + f_D)t + \theta_{\text{rcv}}) + n(t)$$

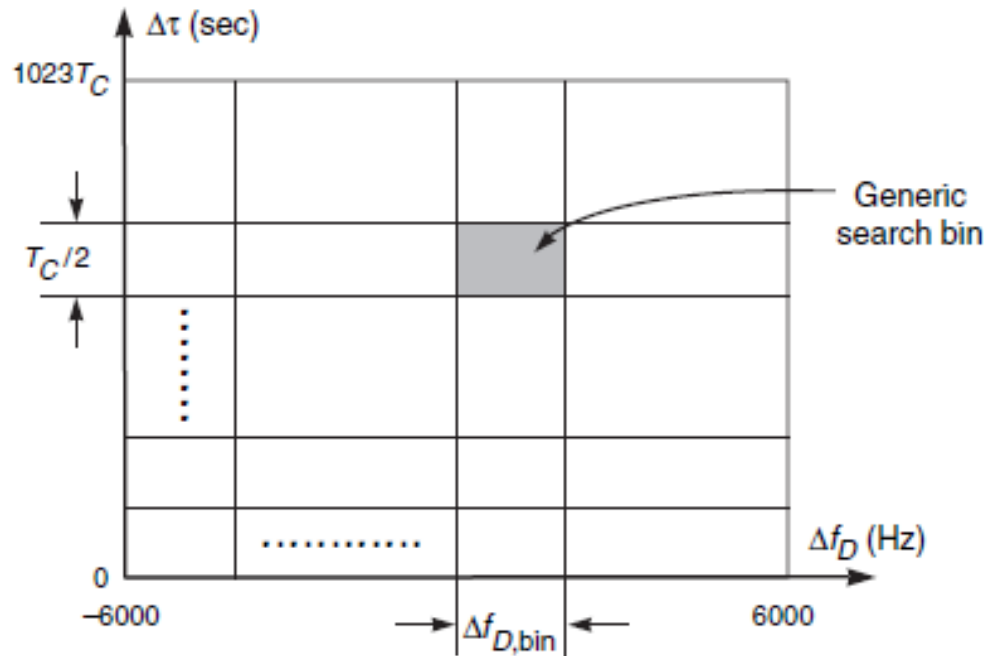
信号はデジタル処理に適した形になっているが、まだまだたくさんの処理を行わなければならない。まず、到着時刻 τ を推定しなければならない。その理由は、 τ には基本距離 (basic range) およびユーザ位置およびクロックオフセットを計算に必要な時刻情報が含まれているためである。また、ドップラシフト (f_D) も推定しなければならない。これは、ユーザ速度とクロック周波数の計算に使用する擬似距離変化率が含まれているからである。究極の測位精度を望む場合には、搬送波位相オフセット ($\delta\theta$) の推定および追尾が必要となる。

鍵となる三つの要素 ($\tau, f_D, \delta\theta$) は、二つの段階に分けて推定される。最初の段階は、(τ, f_D) の概算値を広域探索 (global search) する動作であり、信号捕捉 (signal acquisition) として良く知られている。第二段階は、(τ, f_D) の正確な推定を行う狭域探索 (local search) であり、これには搬送波位相の推定が含まれることもある。狭域探索が搬送波位相を推定する場合、コヒーレント信号追尾と呼ばれる。搬送波位相を無視する検索は、非コヒーレント信号追尾と呼ばれる。本節では、信号捕捉について述べる。信号追尾については、第 12 章で解説する。

Acquisition（信号捕捉）概要

- ▶ GPS信号はスペクトラム拡散符号で変調されており、かつ地上で受信可能な信号レベルは-123dBmから-130dBmと非常に低い（スペアナで雑音レベルを見ると-110dBmくらい）
- ▶ 認識できる信号に戻すために、**コード位相やドップラ周波数**を含んだ搬送波の正確な遅延量を知る必要がある。そこで、レプリカ信号と入力信号の相関をとる
- ▶ 初期段階の信号捕捉では、**衛星番号（GPSだと1-32）、コード探索範囲、周波数探索範囲**などが与えられる。事前情報があると、探索する衛星を絞れる。また**短時間での再捕捉**の場合、コード位相やドップラ周波数がそれほど変化していないはずなので、探索範囲も絞れる→時間を節約

探索領域



もしサンプル周波数が20.25MHzの場合、1msのIコード長で20,250のチップのサンプリングとなる。同様に500Hz間隔で7kHzのドップラサーチには28の組み合わせが必要。合計、 $20,250 \times 32 \text{ 衛星} \times 28 = 18,144,000$ シフトが必要！

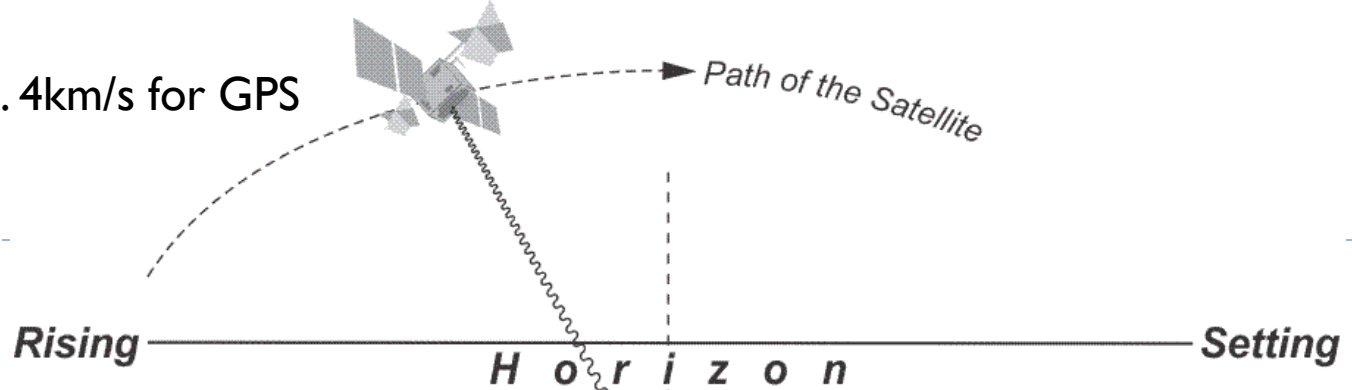
信号の探索領域は、ドップラ周波数 (Δf_D) とコード位相 ($\Delta \tau$) をカバーする。探索領域のセルの総数 M は、コード位相のビン数とドップラのビン数の積である。

実際には、縦のコード位相ビンはサンプリング周波数に横の周波数ビンは積分時間に応じて決定する(1msで500Hz毎)

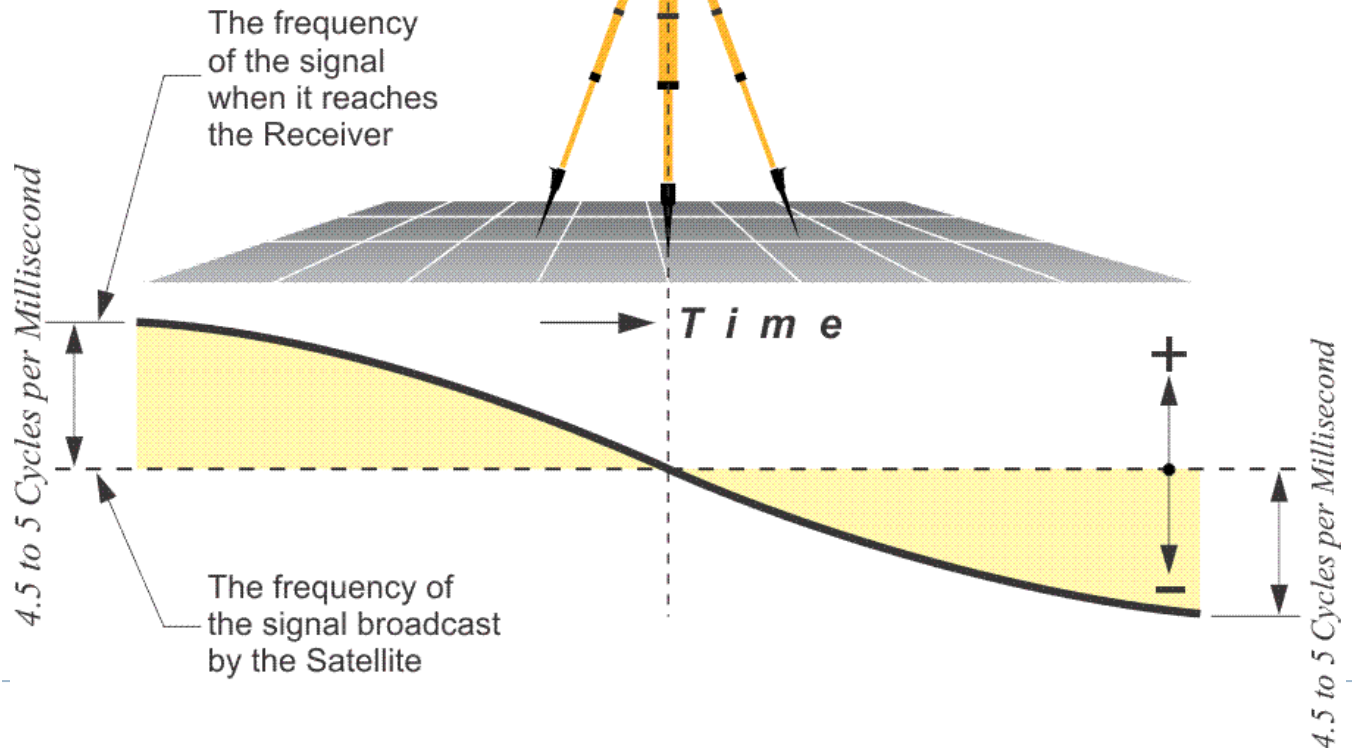
ドップラ周波数について

- ▶ 衛星とユーザ受信機との相対速度で考えると $\pm 5\text{kHz}$ で十分だが、受信機の時計誤差やジッタを考慮して $\pm 7\text{kHz}$ 程度サーチする
- ▶ 搬送波に与えるドップラ周波数の影響はそのままオフセットとしてあらわれる
- ▶ コードに与えるドップラ周波数の影響は $1/1540$ (1.023MHz と 1575.42MHz の比で求まる) である。静止時最大の 5kHz で影響は 3.2Hz (小さい) である
- ▶ OCXO やルビジウムを基準発信器とすると、受信機側の周波数オフセットはほぼ 0 になる → 出力されるドップラ周波数はそのままオフセットを含まない値

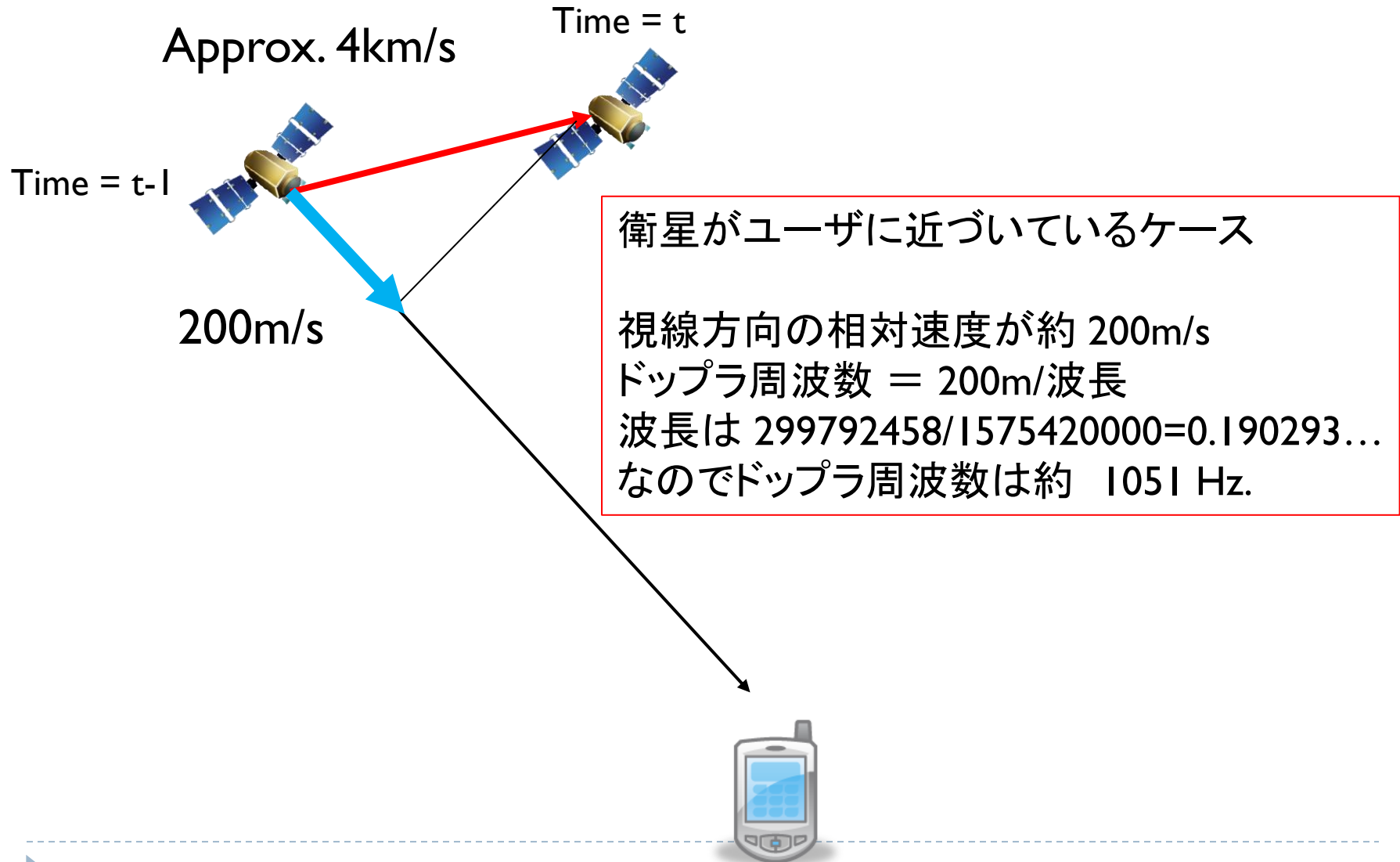
Approx. 4km/s for GPS



4,500-5,000 Hz per second in maximum

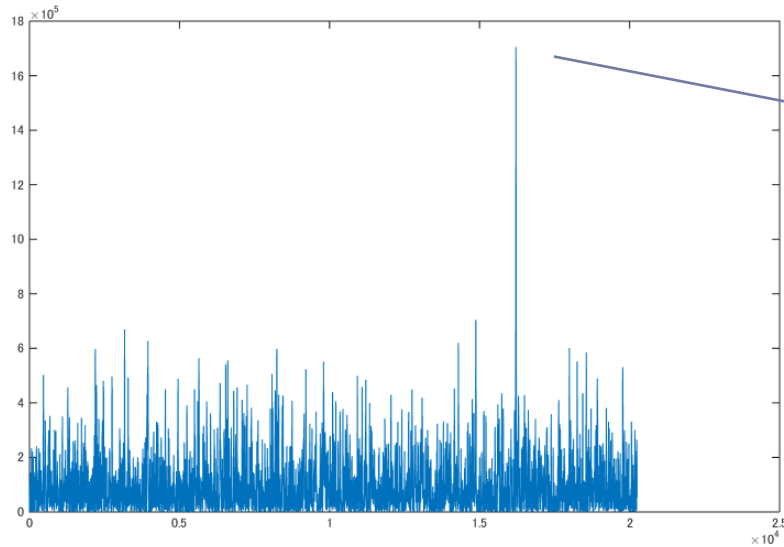


衛星と受信機の相対速度

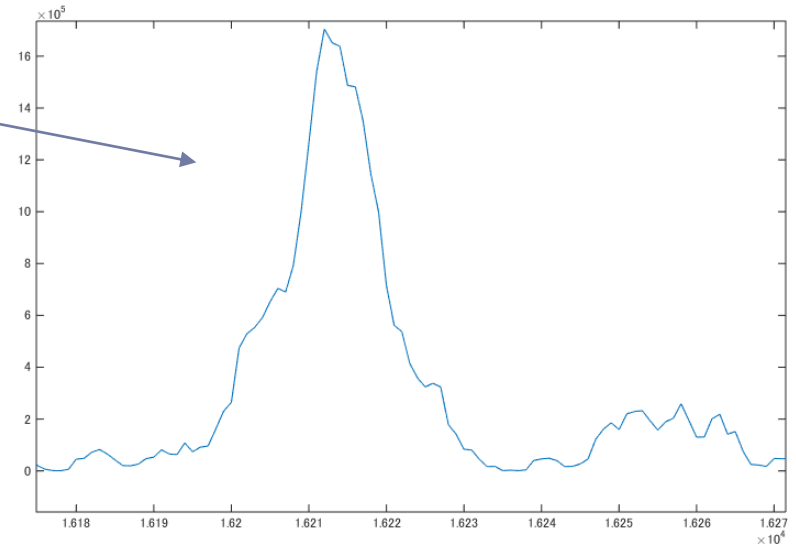


実際の信号捕捉（コード位相）

周波数も500Hzごとでサーチ済み



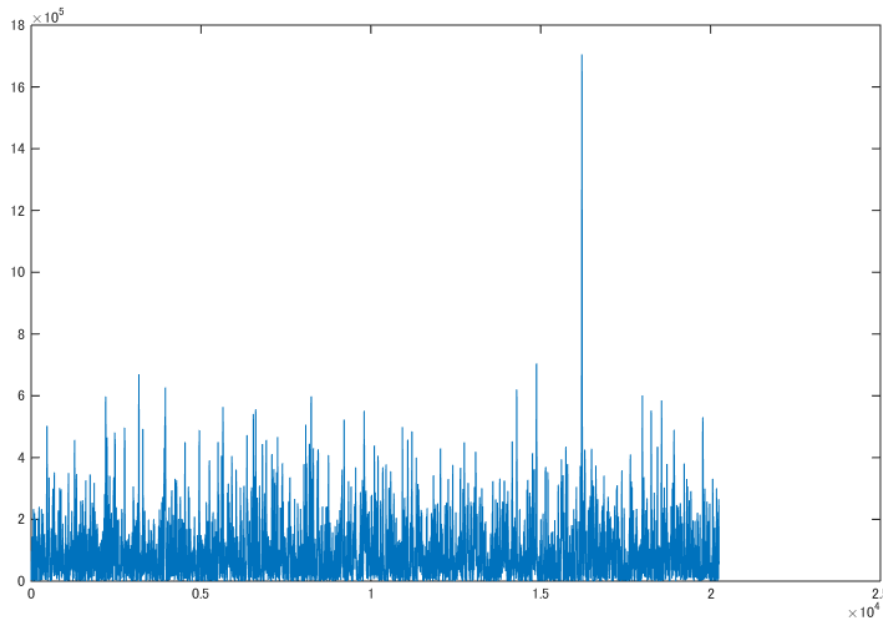
One shot of GPS 14



拡大図 16212番目付近にピーク

サンプリング周波数=20.25MHzなので1msで20250サンプル

コード位相の先頭のイメージ



We search the peak of correlation.

Real collected first 1ms data

Real collected first 1ms data

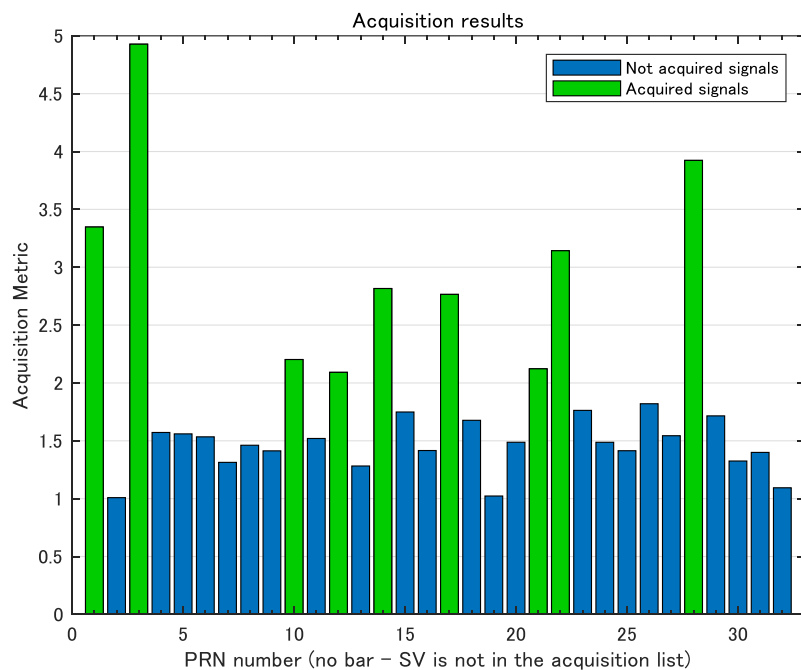
C/A code for GPS L4

Sampling Frequency is 20.25 MHz

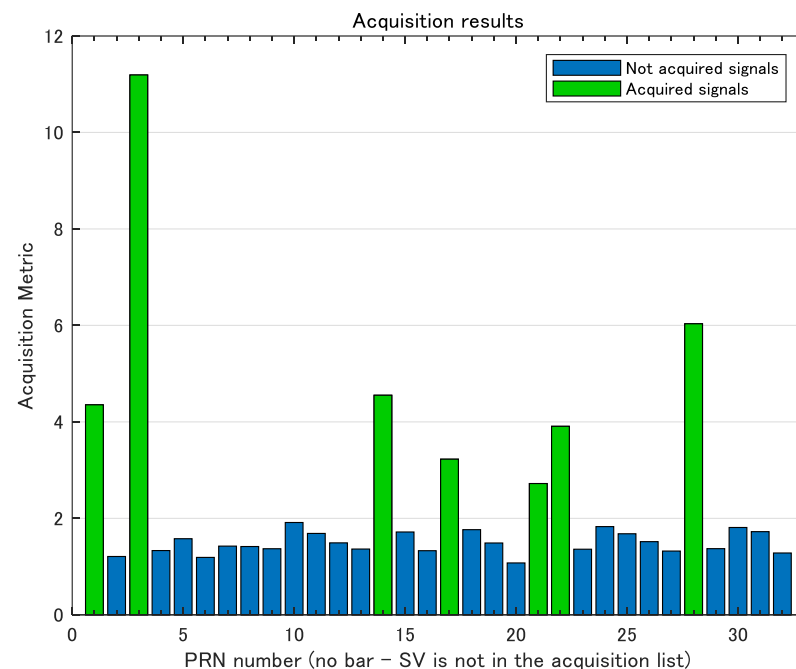
It means that the number of sampling is 20250 in every 1ms.

GPS/QZSS L1-C/A code repeats every 1ms.

別のデータで「I」と「I+Q」の比較



「IFデータ:I相のみ」



「IFデータ:I相+Q相」

信号追尾

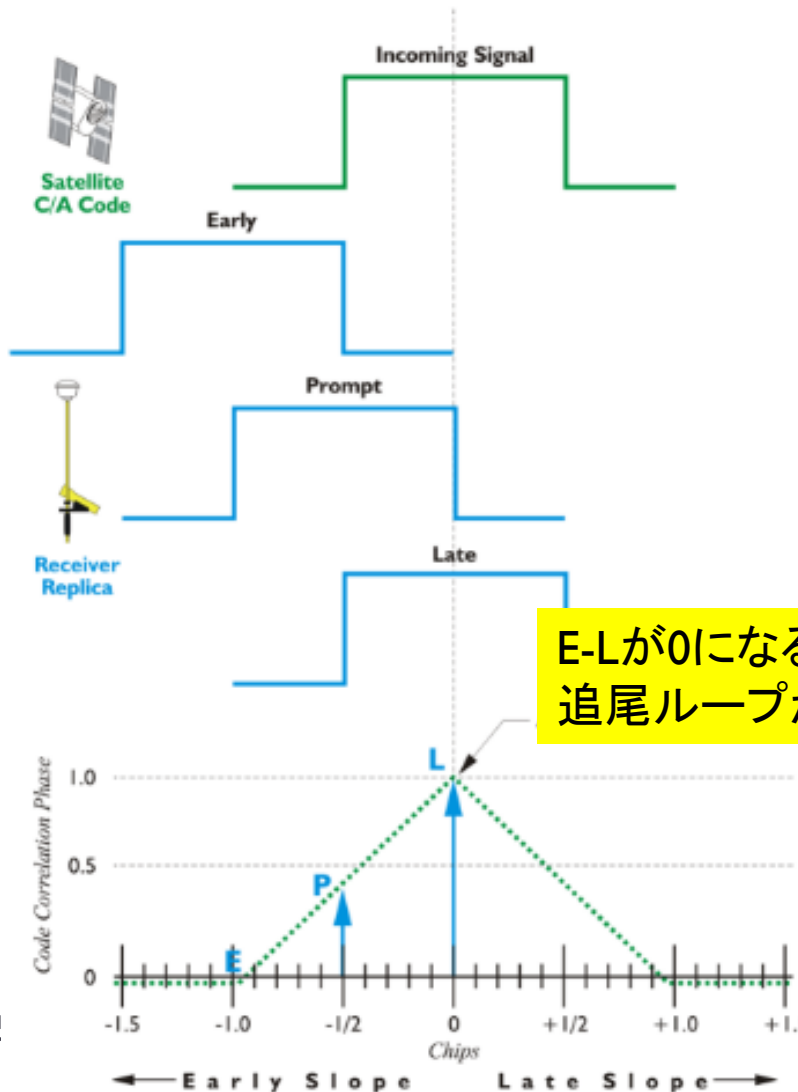
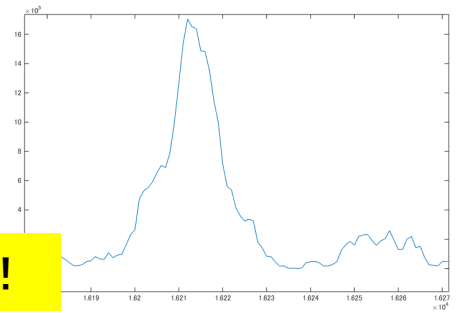
本章では遅延ロックループ（DLL：Delay Lock Loop）と位相ロックループ（PLL：Phase Lock Loop）を紹介する。付録では周波数ロックループ（FLL：Frequency Lock Loop）を議論する。第 11 章で議論したように、信号捕捉はコード位相 τ とドップラ周波数 f_D の概略の推定値を与える。DLL は、このコード位相の初期推定値の精度を高め、その後の変化に追従する。このため、DLL は衛星が送信している PRN コードのレプリカ（模造）を発生し、受信コードとの同期を維持する。擬似距離全体を得るため、コード位相の推定値は 5.1 節で説明した他の項と一緒に用いられる。FLL はドップラ周波数の初期推定値の精度を高め、その後の変化に追従する。このため、FLL は正弦波の搬送波を発生し、受信搬送波の周波数との同調を維持する。FLL と同様、PLL は搬送波追尾ループであるが、搬送波位相 θ の推定値も与える。PLL は入力搬送波の位相に同期させるため、レプリカである正弦波の周波数と位相を調整する必要がある。コードと搬送波のこれら操作の全体を信号追尾と呼ぶ。

DLL→コード追尾

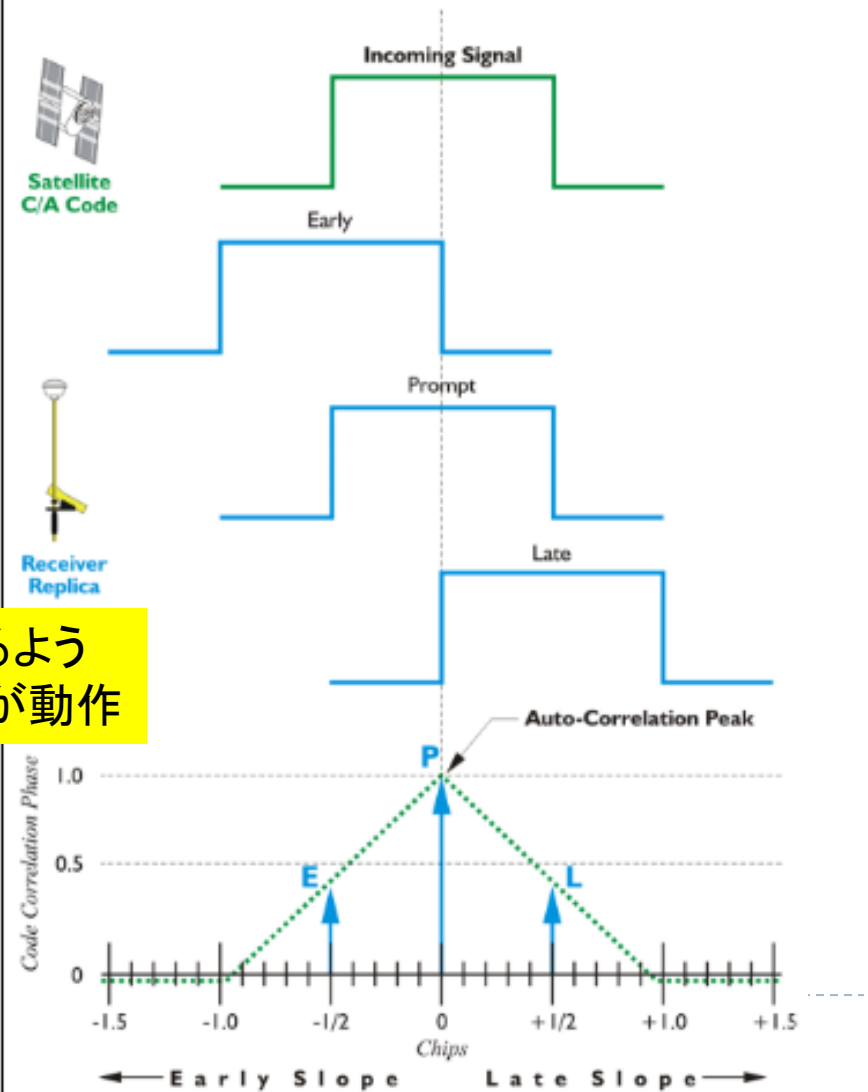
FLL→周波数追尾
PLL→位相追尾

コード追尾

信号捕捉時にすでに三角形の山の頂点の情報はある！



E-Lが0になるよう
追尾ループが動作

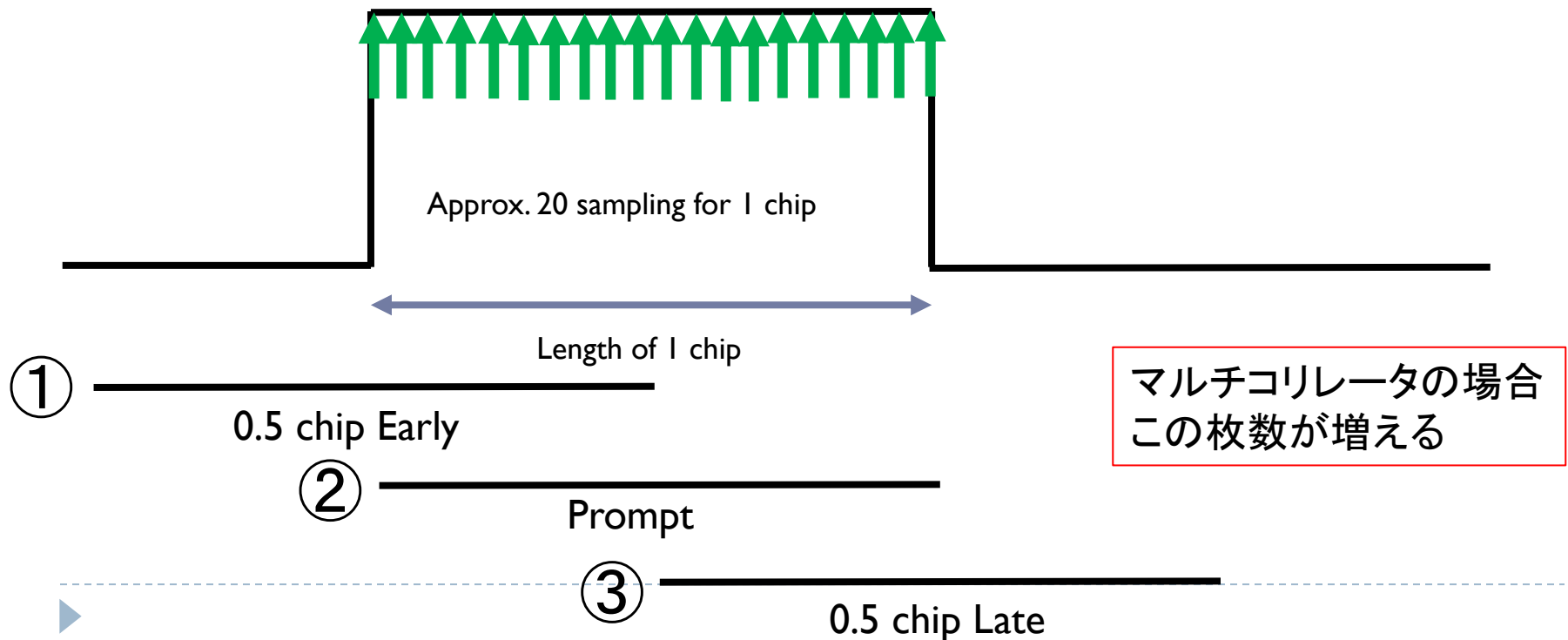


dllCorrelatorSpacing

▶ `earlyLateSpac = settings.dllCorrelatorSpacing;` (default : 0.5)

1 chip : 1/1023
C/A code : 1.023 Mcps
Sampling frequency : 20.25 MHz
 $20.25/1.023 = 19.794...$

0.5 chip : approx. 10 sampling
+/- 10 sampling



DLLの動作

- ▶ すでに三角形の頂点情報があるため、あとはこの山の頂点をはずさないように毎ms追尾を継続
- ▶ コード位相に対するドップラ周波数の影響は $1/1540$ (LI帯)で大きくない。通常、次の相関ピークはほぼ1ms分のサンプリング数進ませたところにあります
- ▶ 細かい進み遅れの微調整を実際の6つの相関値(IQとPrompt, Early, Lateで6つ)と判別器、ループフィルタで実装します

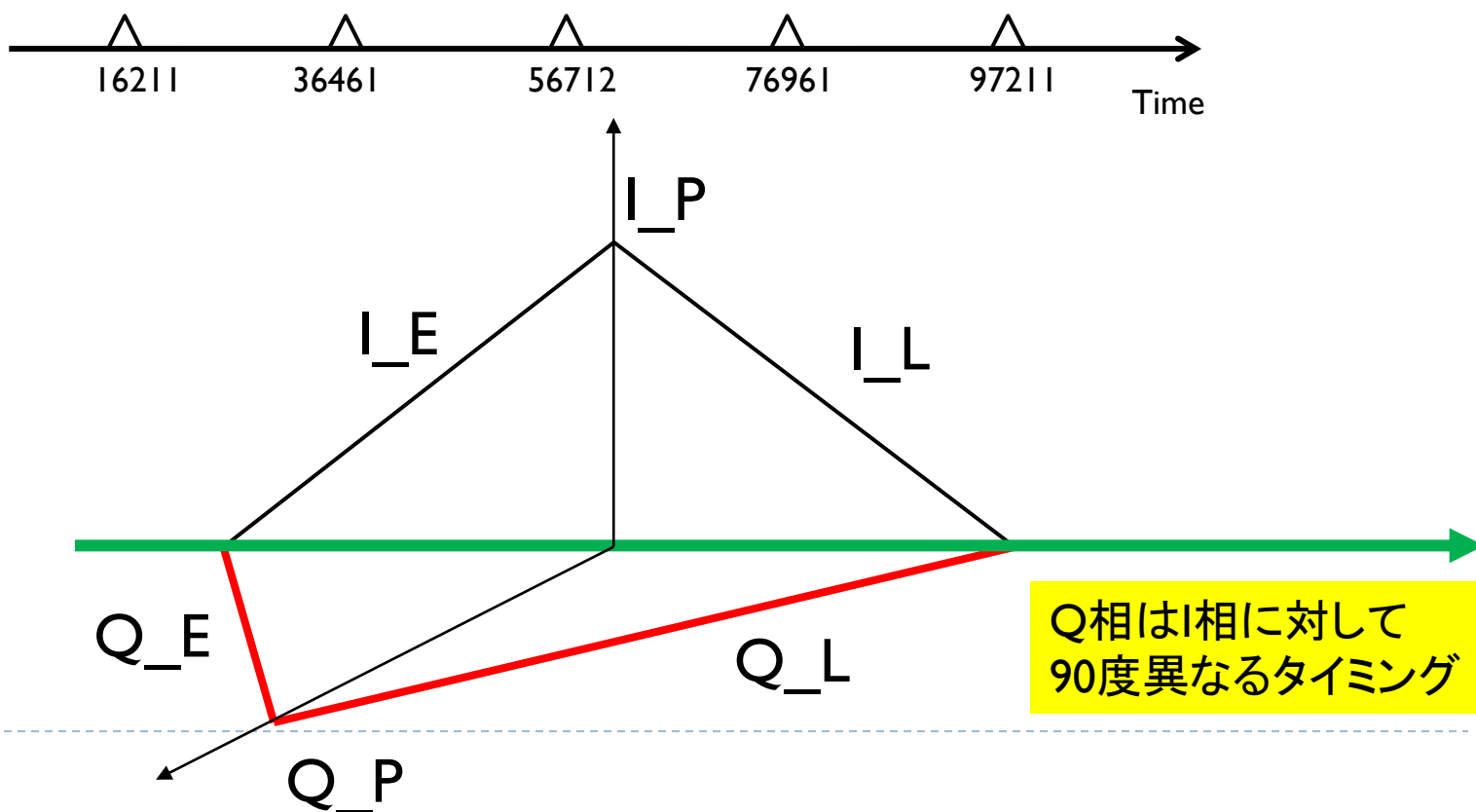
Image of tracking (PRN 14)

The result of acquisition is almost correct.

Therefore, the prompt sampling values for the tracking changes + approx. 20250.

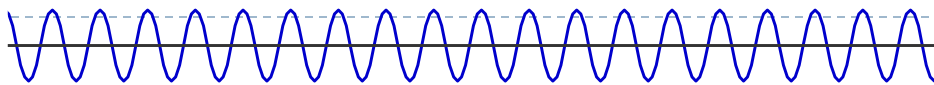
(20250はサンプリング周波数が20.25MHzで1ms分のサンプリング数)

It changes slightly due to Doppler frequency and clock drift.



位相の追尾のイメージ

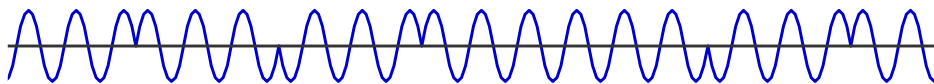
① 搬送波



② データビット $d(t)$



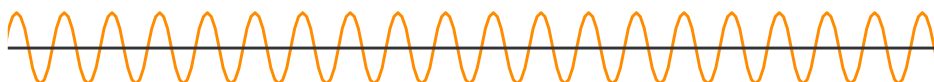
③ BPSK 信号



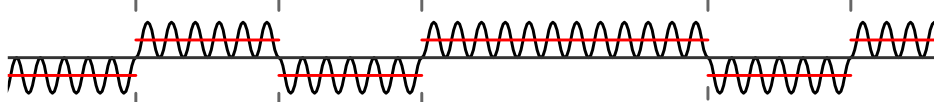
④ VCO (NCO)出力



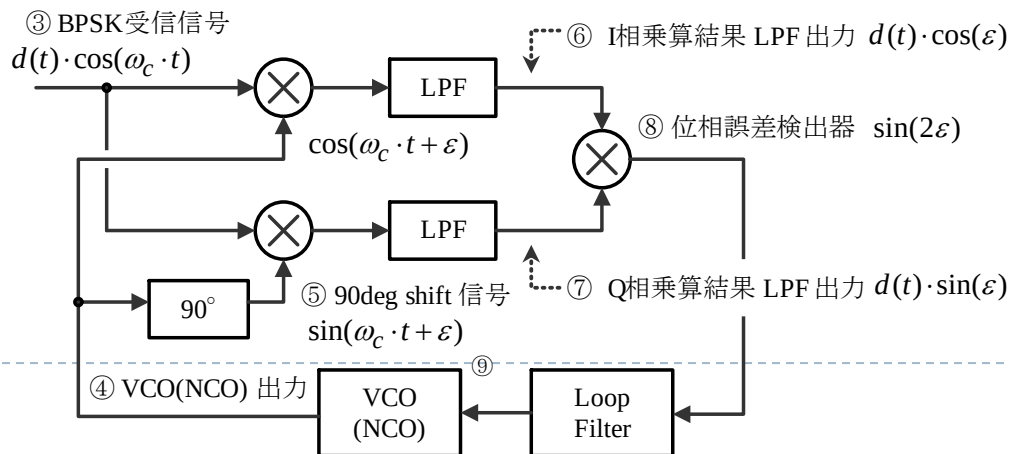
⑤ 90° シフトVCO



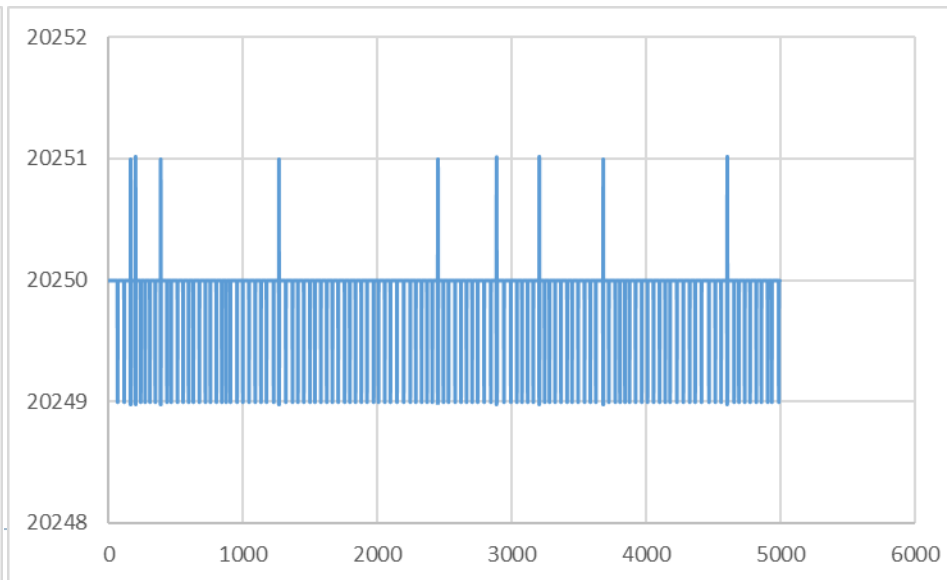
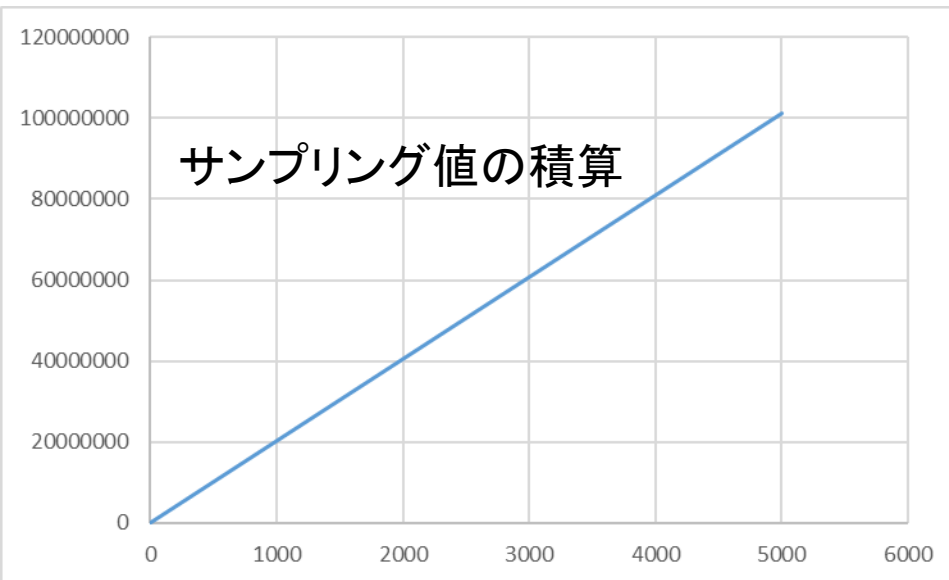
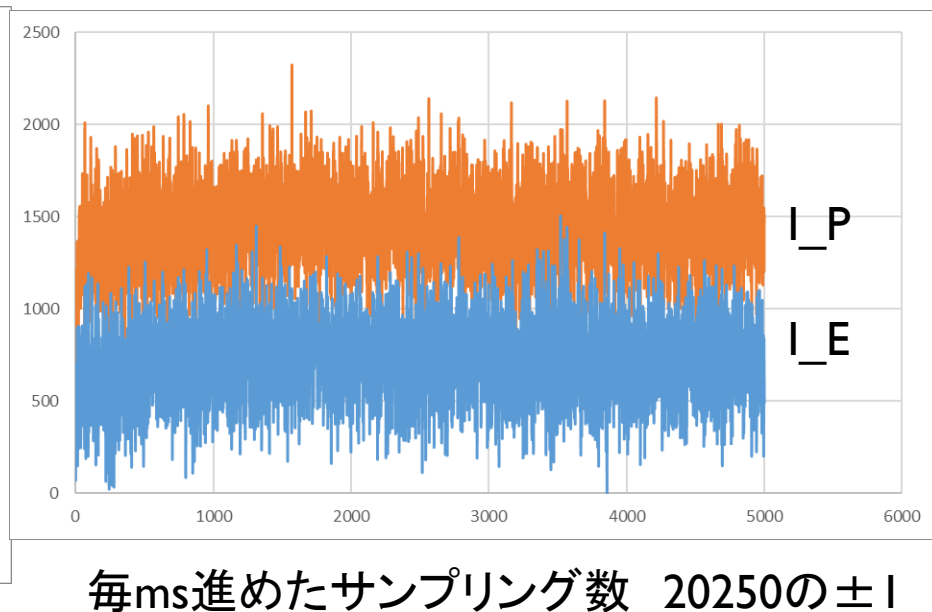
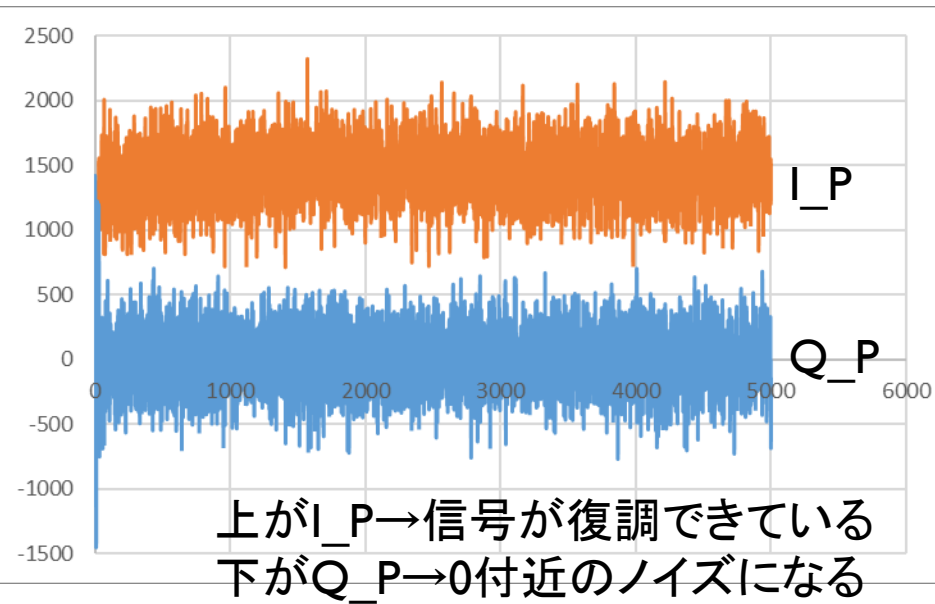
⑥ I 相乗算結果
LPF出力



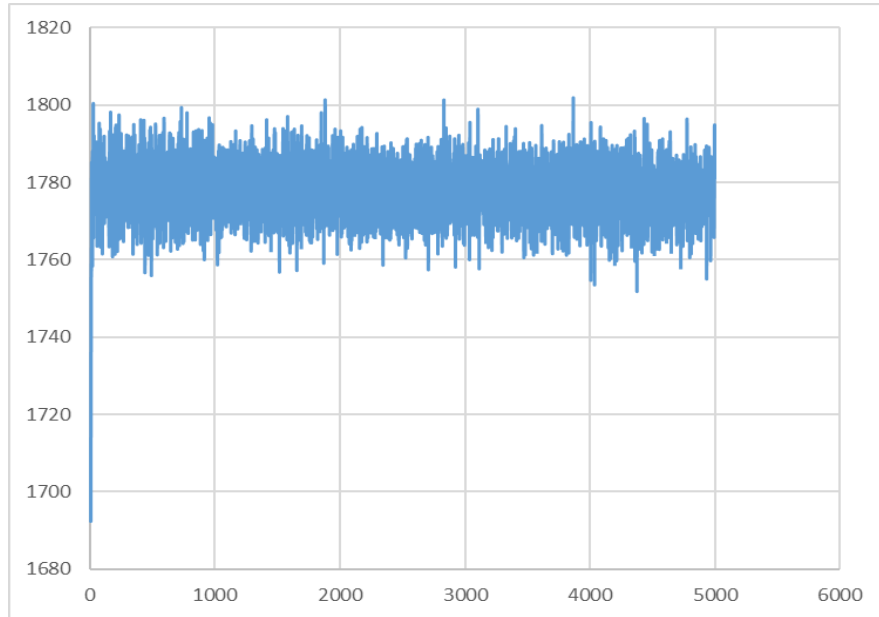
⑦ Q 相乗算結果
LPF出力



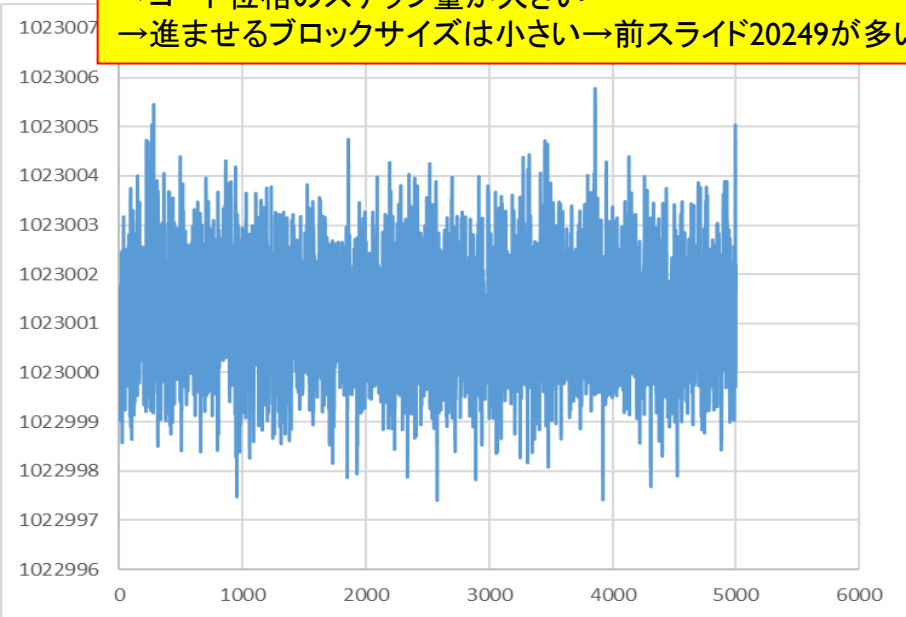
I_PとI_Qと進めたサンプリング数



Carrier(Doppler) and Code frequency (PRN14 : first 5 seconds)



コード周波数が1.023Mcpsに対して大きい
→コード位相のステップ量が大きい
→進ませるブロックサイズは小さい→前スライド20249が多い

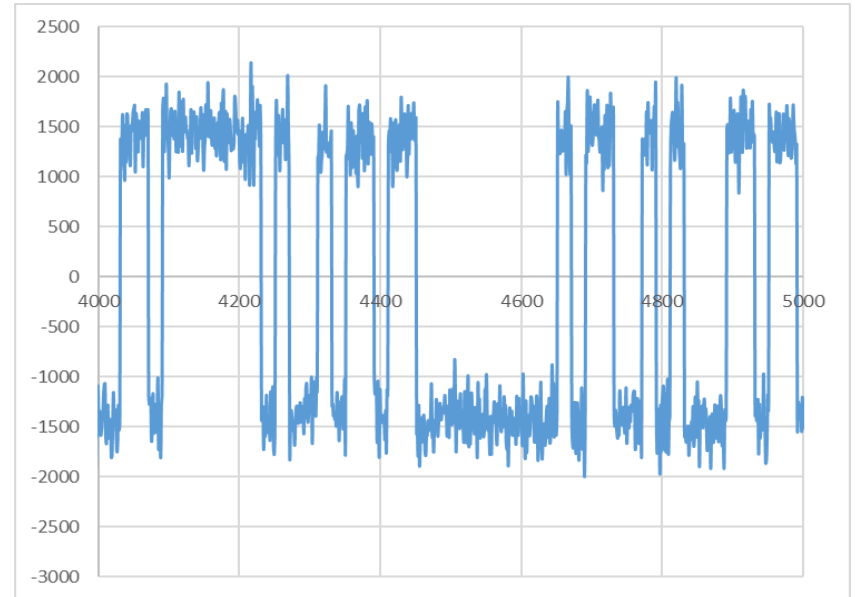
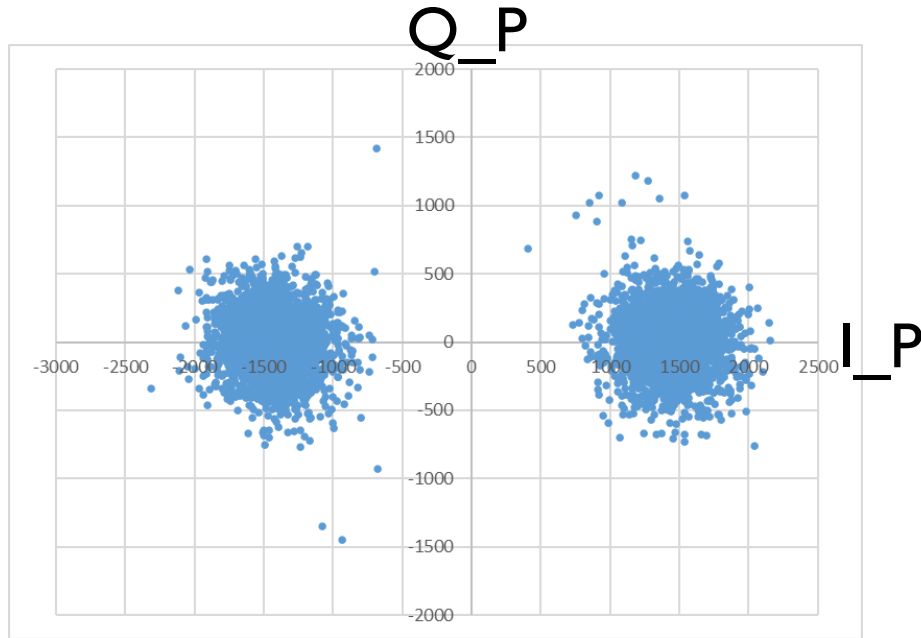


IF=0.529375MHz (depends on Front-end)
Doppler frequency = Carrier frequency – 0.529375 MHz
Acquisition stage : 1741Hz
Tracking stage : approx. 1770Hz

Code frequency
= 1.023MHz + Doppler frequency/1540
= 1.023MHz + 1.15Hz

1540 = 1.57542GHz / 1.023 MHz
搬送波とコードの周波数比
1770/1540=1.149 1790/1540=1.162
Carrier周波数のほうがノイズが少ない

I_P and Q_P values



BPSK modulation : + or - The data is decoded.

Navigation data (GPS LI-C/A) is 50bit/s.

You can see the data every 20 ms.

