

ソフトウェアGNSSの開発と周辺

東京海洋大学
久保信明

発表概要

- 簡単な歴史
- いくつかのフロントエンド
- ソフトウェアGNSSを利用できる領域
- ソフトウェアGNSSの概要（信号捕捉、追尾）
- ソフトウェアGNSSを用いた実データ
- 最近のActivity
- まとめ

ソフトウェアGNSSの歴史

- コンセプト自体は10年以上前に発表
- チップメーカーでは当たり前のコンセプトで、FPGA等で試験されてきた
- 一般の大学研究者に使えるようになってきたのはここ5年ほど。テキストも10年ほど前からいくつか出版されている
- 新たにGNSSに参入する企業にとっては評価開発用に便利
- 1周波のリアルタイム版は10年ほど前に市販化。現在は2-3周波の製品がある
- ここ数年、ソフトウェアGPS/GNSSを利用した大学研究者の発表論文が増加（ION-GNSS等でも1つのセッションが存在）

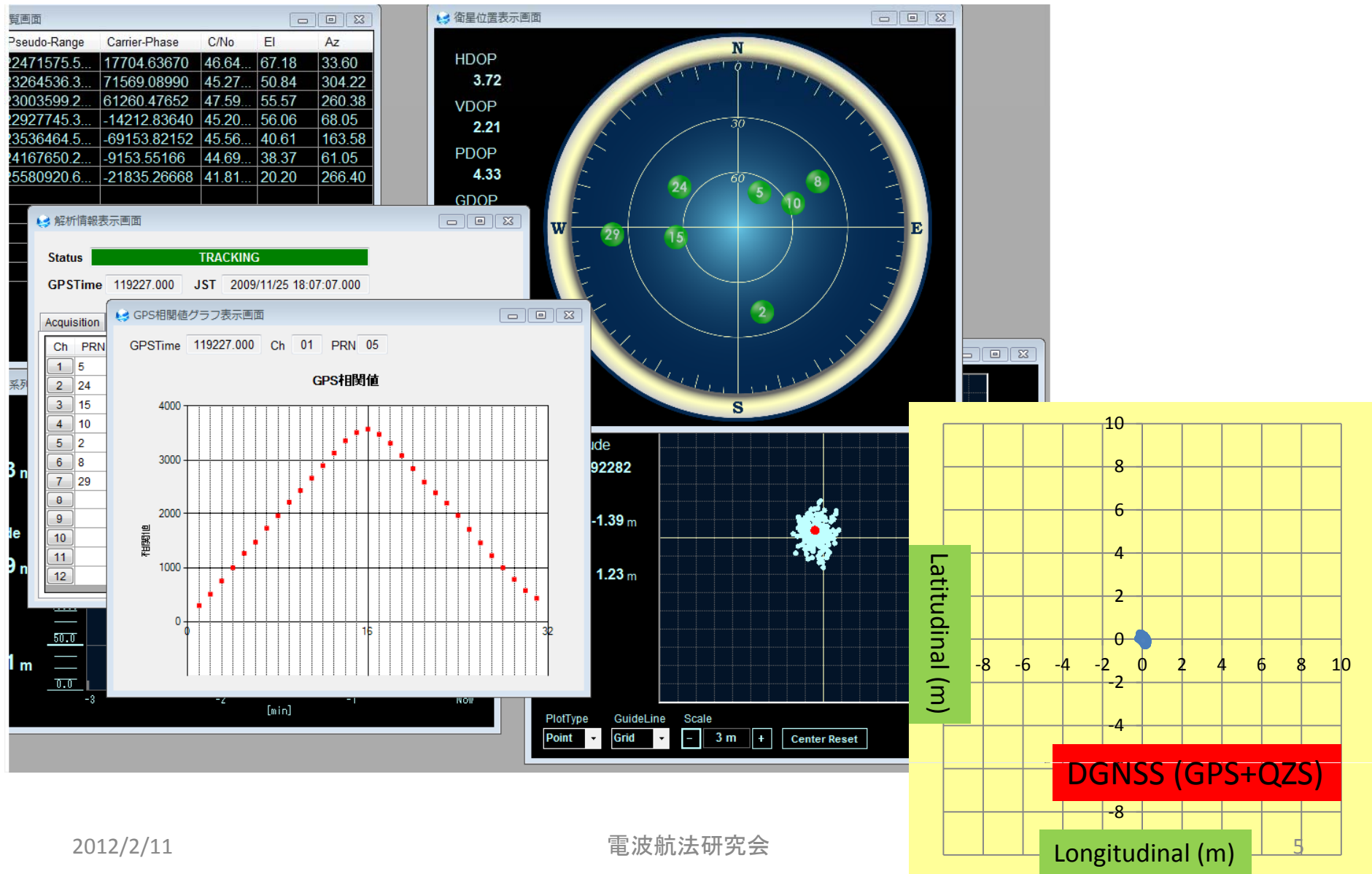
海洋大のActivity

- 呉さん(2001-2004) : Kai BorreのMatlabソースを利用してL1の信号解析
- 近藤君(2005-2008) : L2C信号の解析とそれに関連した研究テーマ
- 海老沼先生(2007-2009) : 海面反射波の観測用にソフトウェア受信機を利用
- 久保(2008) : 受信機の信号処理の勉強のためCで動かせるソースを作成
- 新宮君(2010) : 準天頂衛星の信号を解析
- 小林君(2010) : L5帯の信号を解析中、、、

SDRをベースにした発表論文 10件以上

SDRをベースにした査読論文 10件以上

研究室のソフトウェアGNSSのGUI

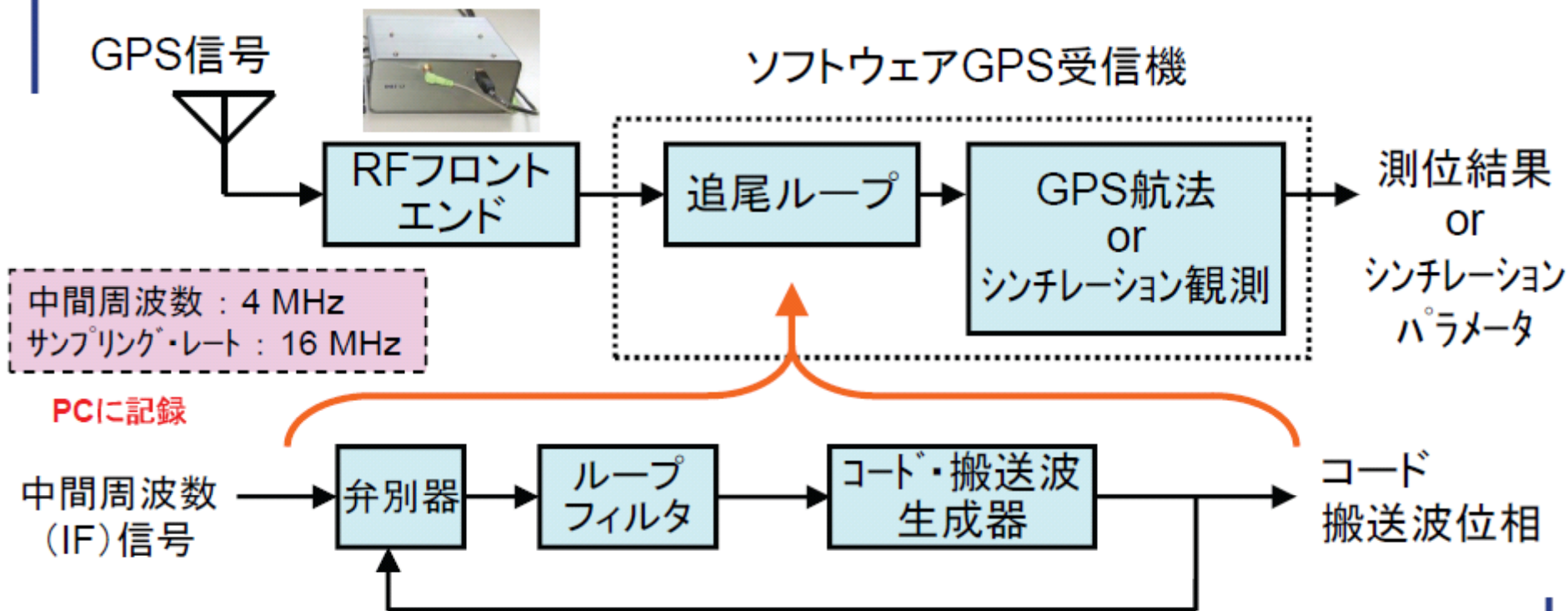


2012/2/11

電波航法研究会



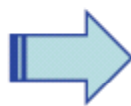
ソフトウェア受信機によるシンチレーション・モニタの開発



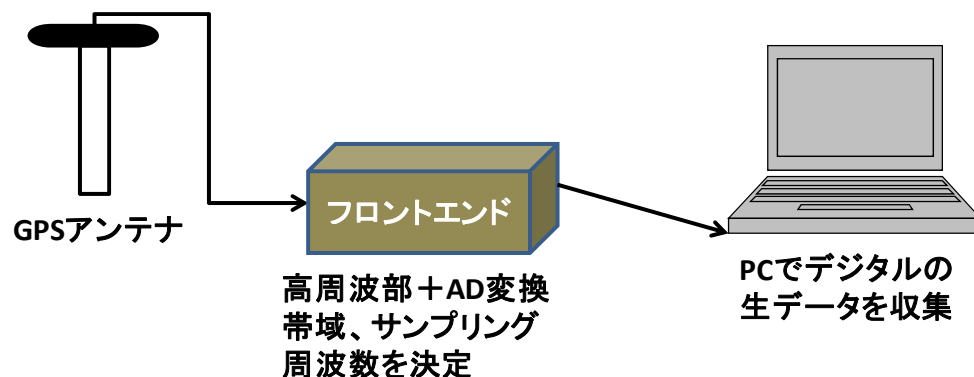
ソフトウェア受信機の利点

- ・弁別器、ループフィルタ仕様等、自由に変更できる
- ・IFデータがあれば改良アルゴリズムを後処理で評価できる

- シンチレーション観測の高機能化 (新しい指標の開発、等)
- INS複合による追尾のロバスト化

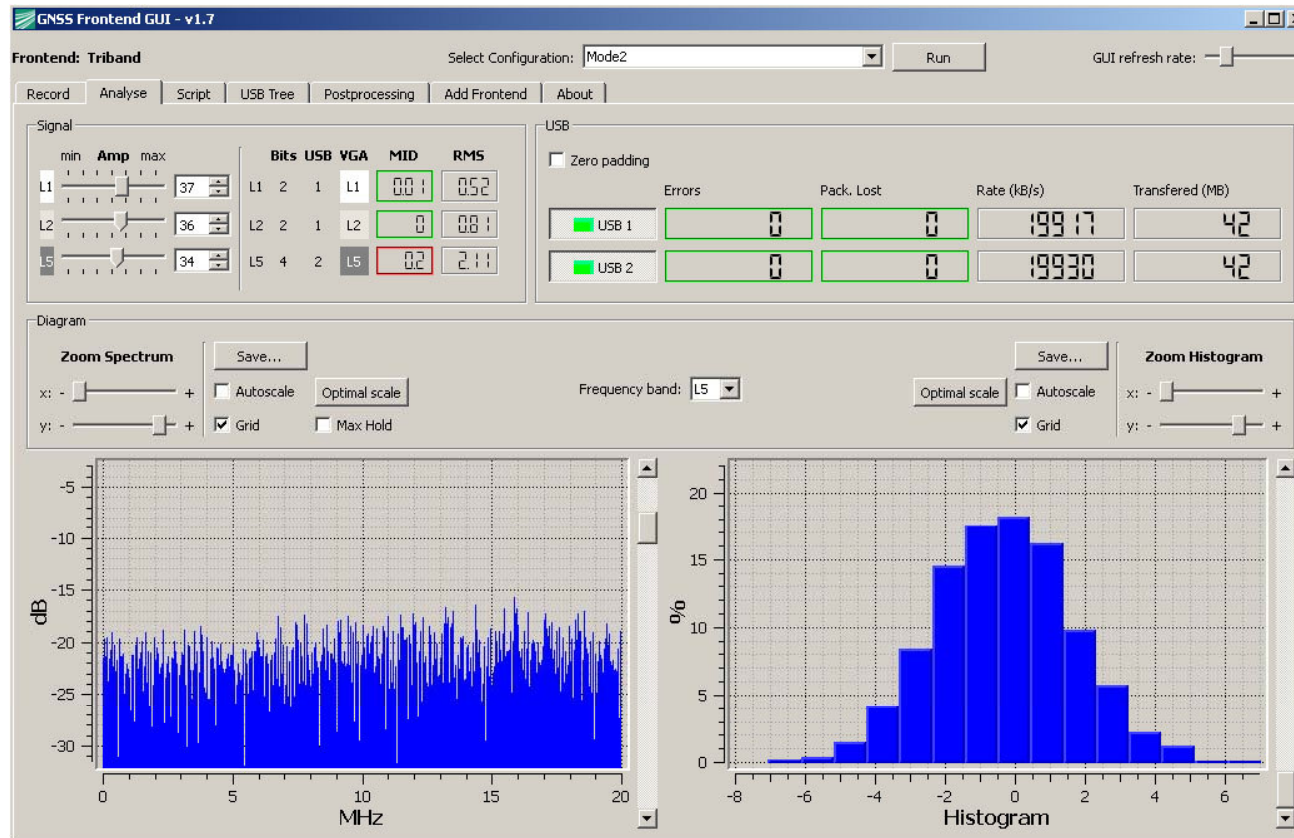


ソフトウェアGNSSのハード部



- USB経由で収集するものが多いが、データ転送スピードに限界もある
- 例：16MHz、2bitの場合、1分間で約240MBになる。10分で2.4GB
- フロントエンドを購入する必要がある。最近はIFデータ収集のみの機能の製品もあり安価になっている
- PC側は、1-2GB程度以上のメモリが必要か？10年以上前のPCでは収集不可のケースもある
- 用途に応じたフロントエンドが製品化されており、2周波や3周波のものも存在。帯域も2MHzから20MHzまで幅広い(→高須様のサイトに一覧がある)。

Frontends for GNSS (Fraunhofer)



Triband-Frontend

- Simultaneous reception of L1/L2/L5 and E1/E5a
- Possibility to use it as data recorder for corresponding bands
- Possible bandwidths (13 MHz or 18 MHz)
- Power supply and data transmission via USB interface
- Possible application for example as software receiver

DLLのコリレータの幅

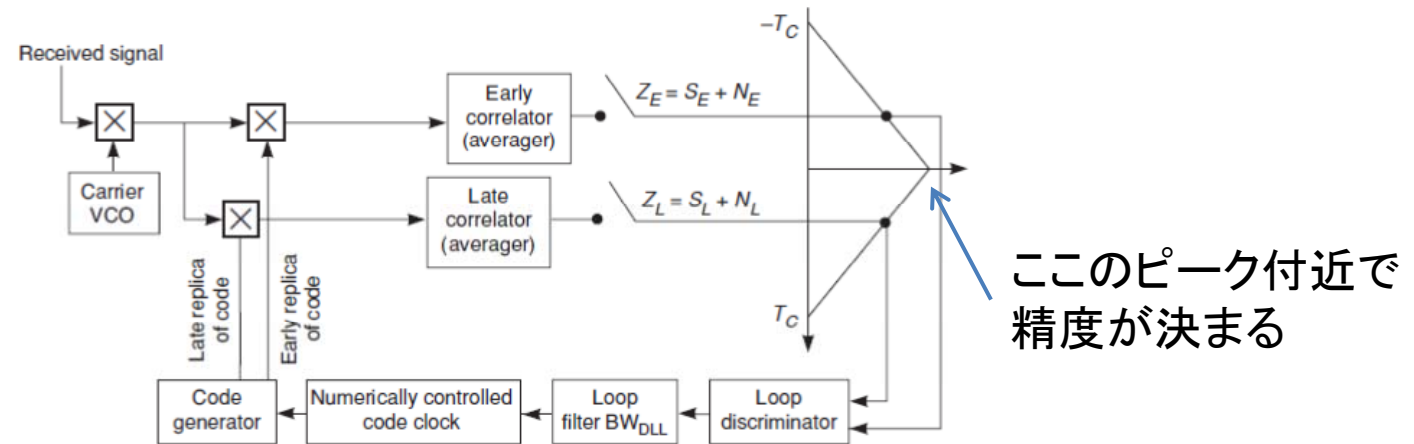
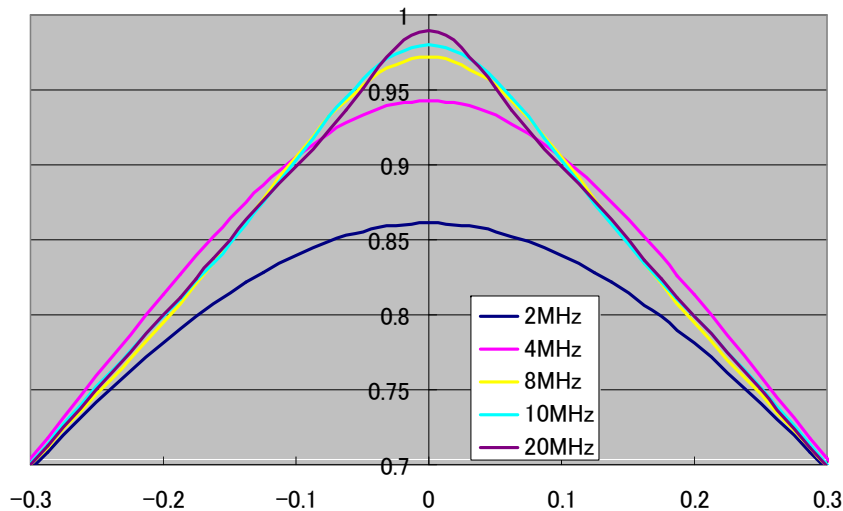


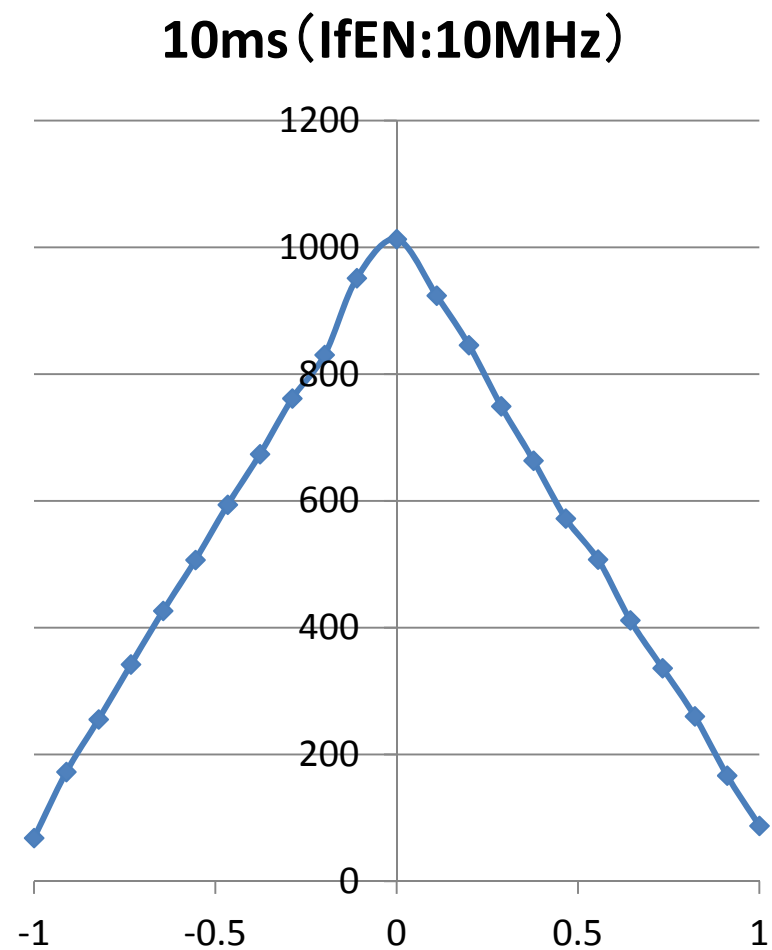
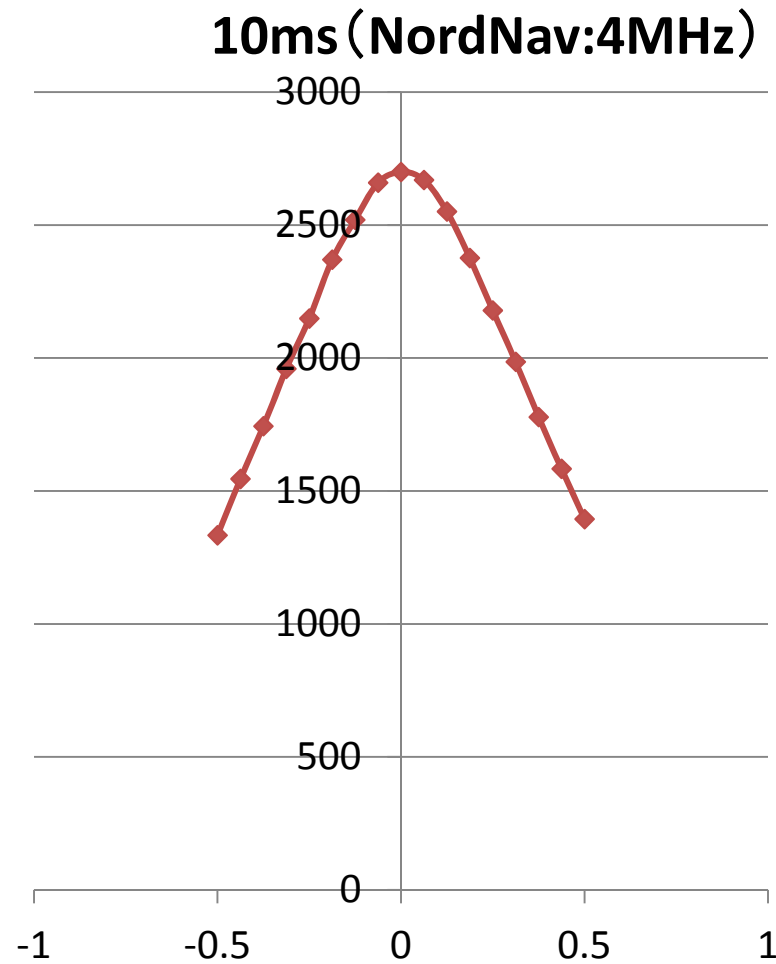
Figure 8.11 GPS delay lock loop to track code phase.



相関波形は、受信機内部の帯域幅によって異なることが知られており、例えば、**0.1chipのナローコリレータ**を有効に動作させるには、ある程度の帯域が必要。

HA: 0.1チップ以内

帯域による違い(実データ)



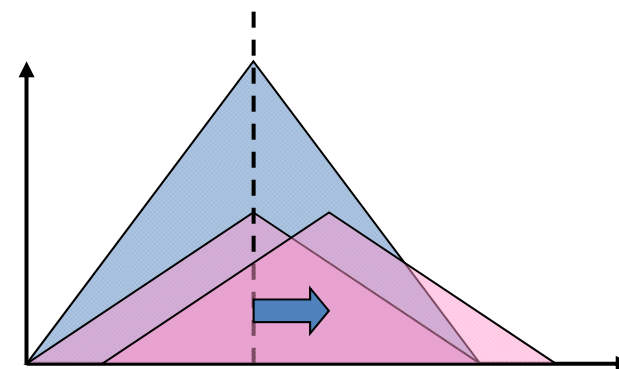
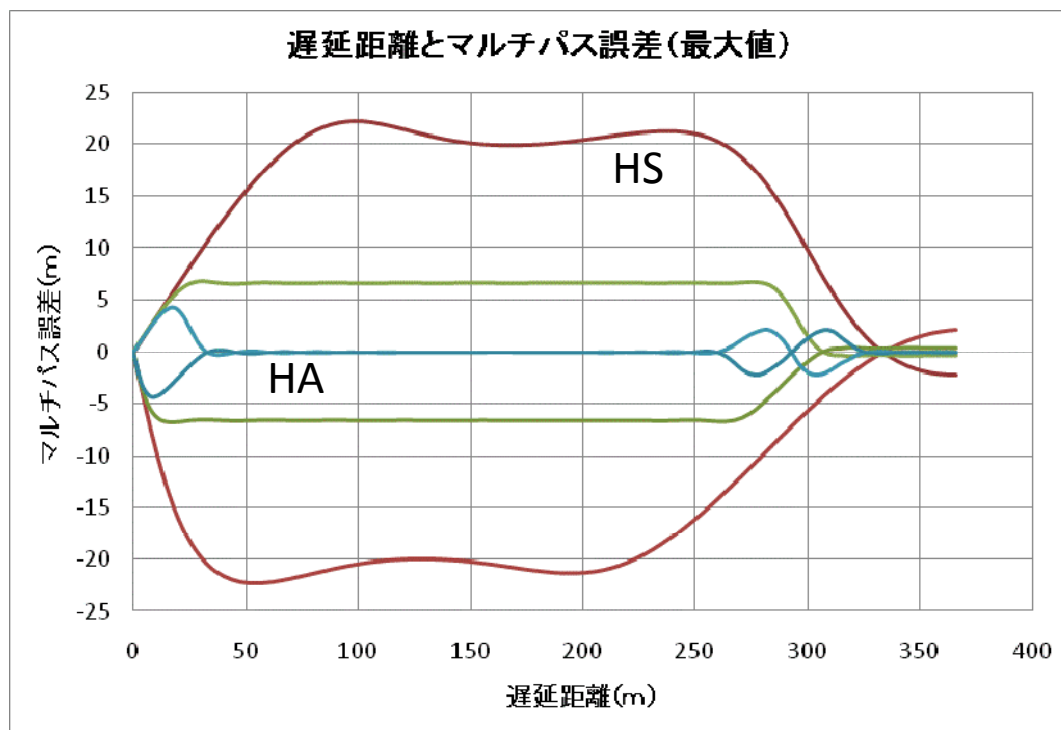
SX-NSR Software Receiver (IfEN)

Applicationsの観点より

- The SX-NSR is the only commercially available software receiver offering advanced signal processing combined with a powerful quad-band RF-front-end delivering unrivalled performance to the GNSS scientific community. The major applications for the SX-NSR are:
- Scientific applications (e.g. GNSS signal reflectometry)
- **Multipath** and spoofing signal evaluation
- Interference monitoring and ionosphere scintillation
- Weak signal investigation and sensor fusion
- Dual-tracking or dual-heading applications
- GNSS signal recording

マルチパス対策効果の評価方法

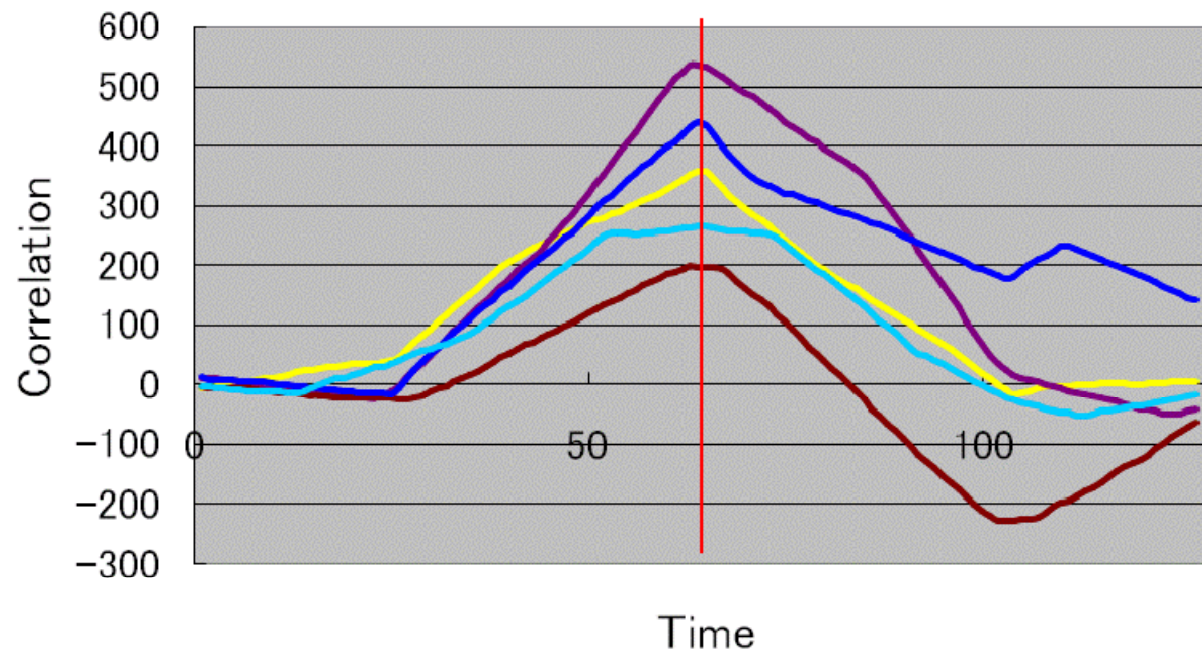
- 実際の観測データを用いて評価
- 仮想的にマルチパス波を発生させて評価



振幅比0.5のマルチパス波が
遅延距離で0～80m付近まで
存在したと仮定した場合の
マルチパス誤差を左に示した。

実際の相関波形

Received signal in downtown Tokyo
(Correlation Triangle: SV8)



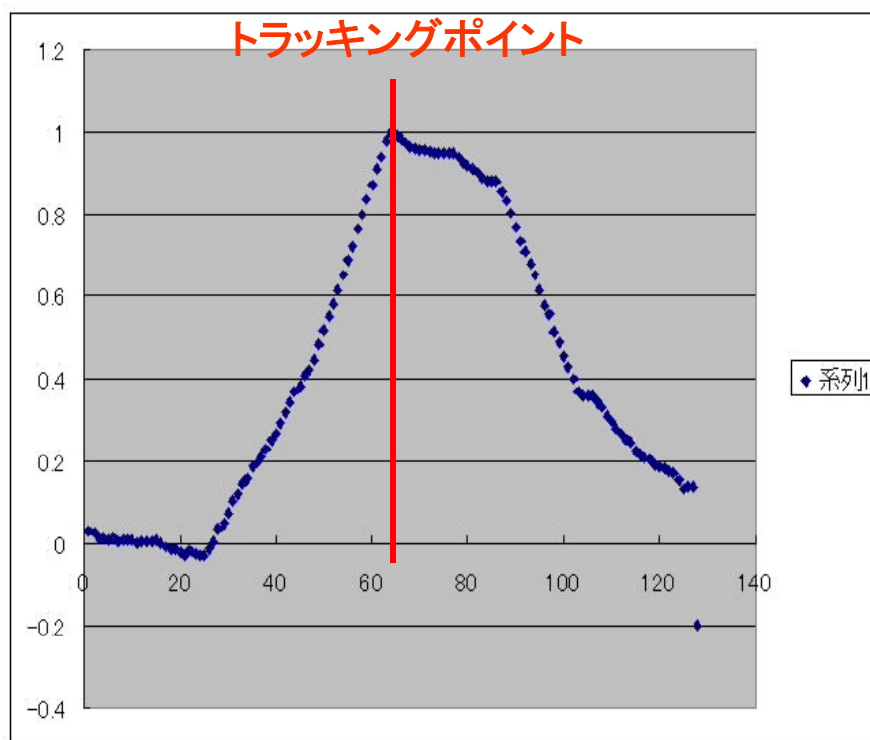
強い反射波が混入しているいくつかの相関波形のケース

場所は、東京丸の内
で、取得受信機は、
SQM受信機(ENRI殿、
古野電気製)

0.025チップごとの相関
値を5Hzで出力。帯域
は20MHz、サンプリン
グ周波数は40MHz

リアルタイム相関波形(丸の内)

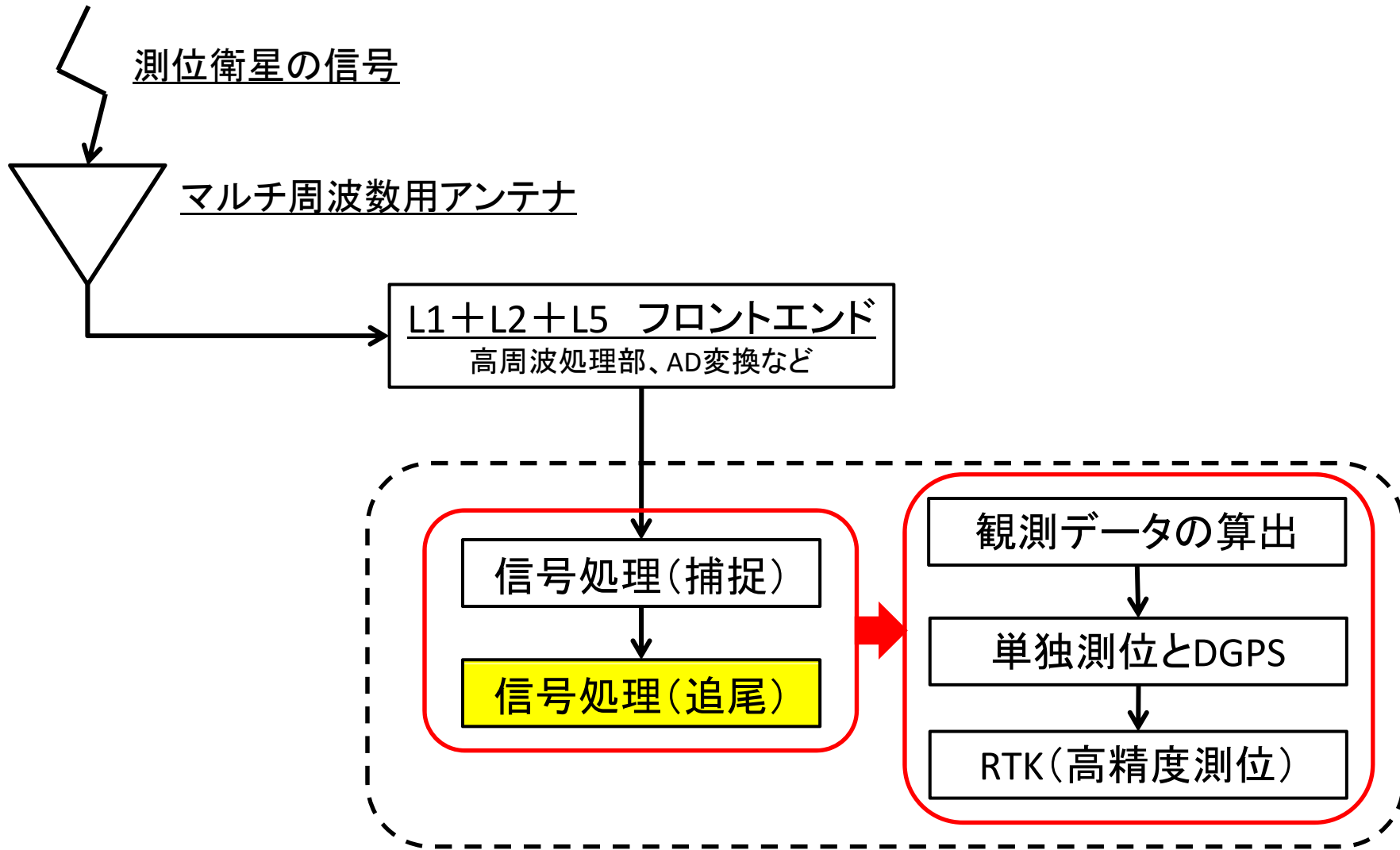
反射波の位相が変化
受信電力が直接波を上回る



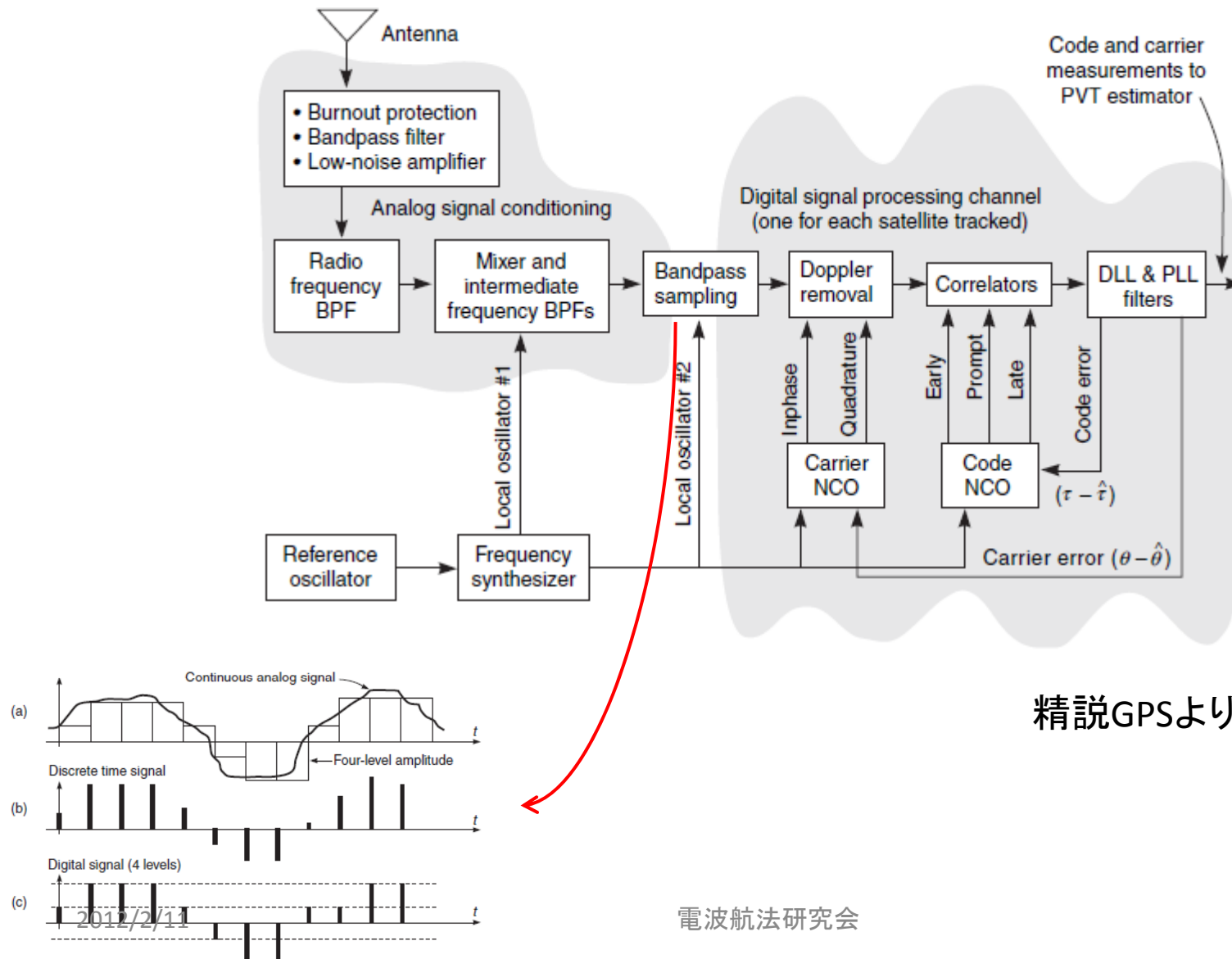
2007、土本(修士)

リアルタイムで走行中に観測することにより、停止時に大きなマルチパスを受けることを実感できた

ソフトウェア受信機の概要



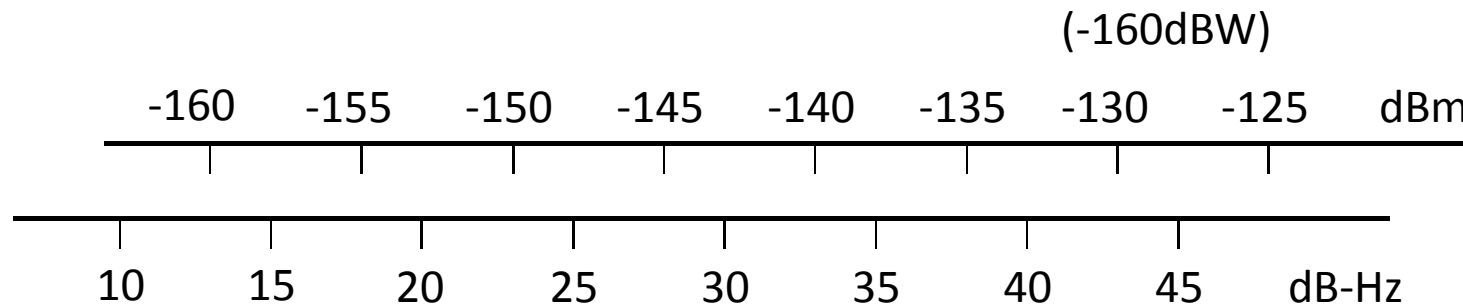
信号処理部のブロック図



精説GPSより

Acquisition (信号捕捉)

- 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-125dBmから-130dBmと非常に低い
- 認識できる信号に戻すために、コード位相やドップラー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
- 相関器はコード位相の遅延と周波数のレプリカが入力信号を一致したときに最も高い値を取得する。この過程はすべての衛星に対して同様に行われる



いくつかの場所での典型的な信号レベル

環境	信号レベルdBm	信号レベルdBHz
屋外	-123 to -130	51-44
1ー2階建の建物	-130 to -150	44-24
窓のオフィス	-135 to -160	39-14
駐車場	-135 to -150	39-24

A-GPSより

送信及び受信信号を眺める

$$s(t) = \sqrt{2P_{\text{mit}}} D(t)x(t) \cos(2\pi f_L t + \theta_{\text{mit}})$$

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

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。

Tracking(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。

PLLの外乱要因と追尾特性

外乱要因	ループ帯域 (等価雑音帯域幅)		
	狭い	←→	広い
ユーザーの運動	×	←→	○
白色雑音	○	←→	×
クロック変動	×	←→	○

JRC 鷲頭様資料

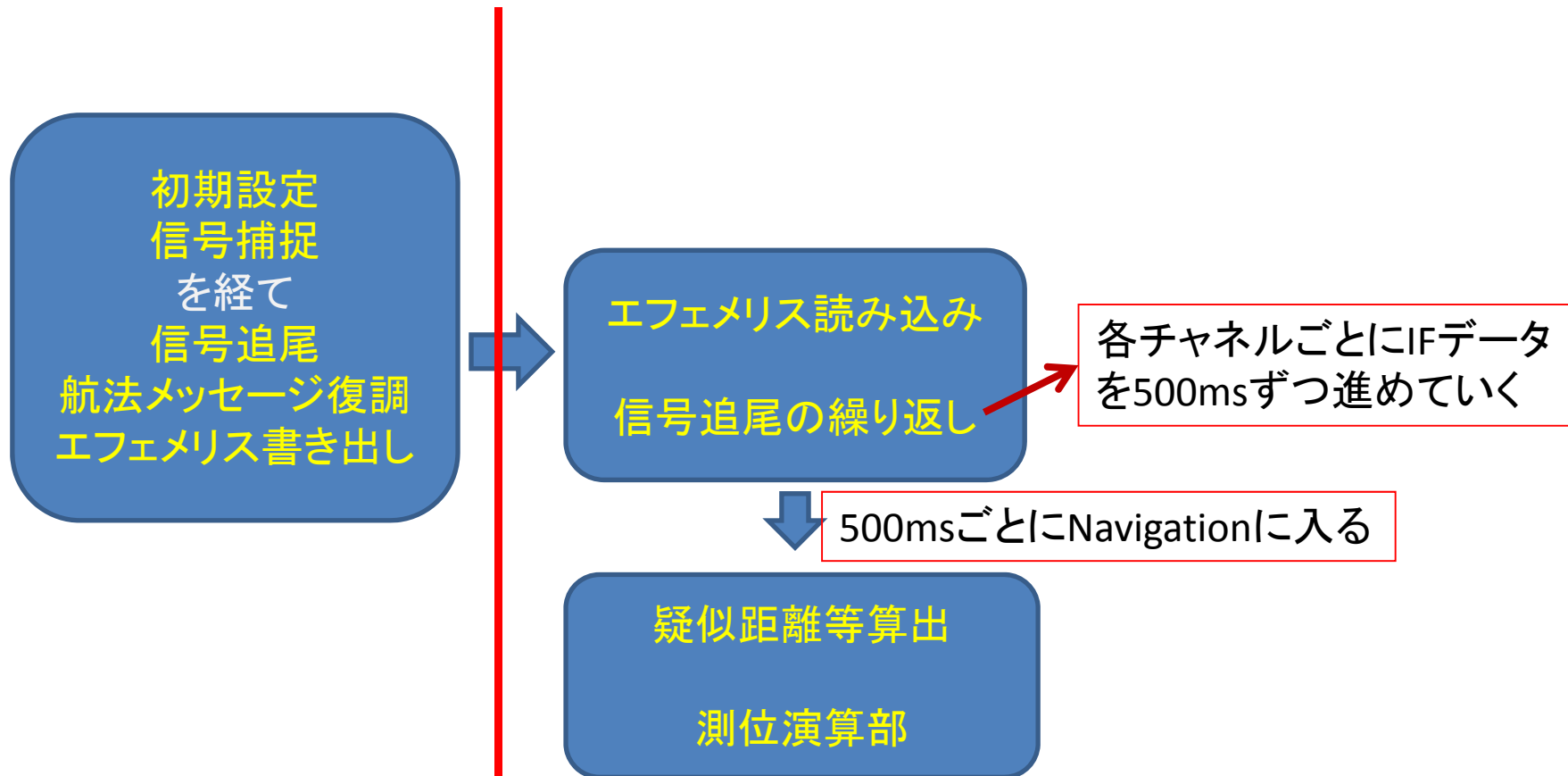
各外乱に対する追尾特性のバランスを取るため
最適なループ帯域の選定が必要

実際の解析例

- 2010年 研究室屋上データ(約1分)
- 2011年 江東区内移動体データ
(車10分以内を数か所、基本はオープンスカイ)
- SDRの中身の概要
- Tracking部のintegrationの変更
- 搬送波支援によるDLLの動作
- DGPS
- キャリアスムージング、RTK

- iP-Solutions社製
- Sampling rate : 16.3676MHz
- Bit resolution: 2
- Bandwidth: 4 MHz

プログラムの大枠



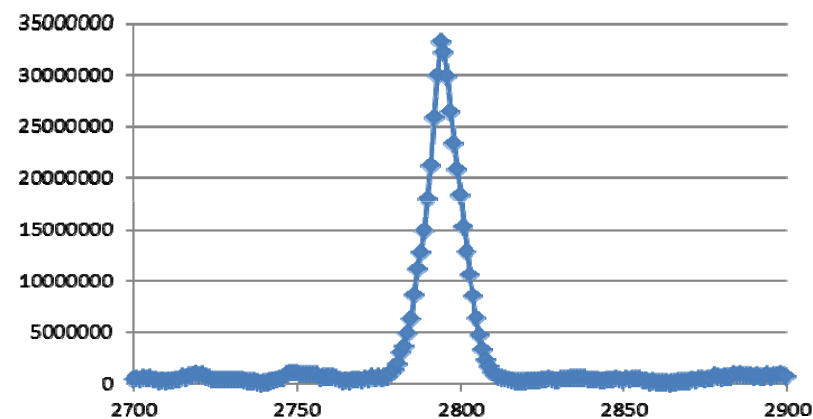
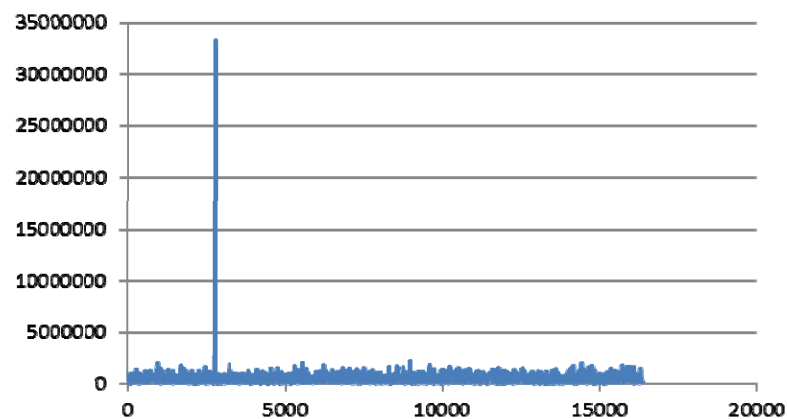
エフェメリスファイル(navファイル)が準備できていれば、
右側のルーチンだけ計算できる
(航法メッセージ先頭の時刻は必要)

ノンコヒーレントによる積分効果

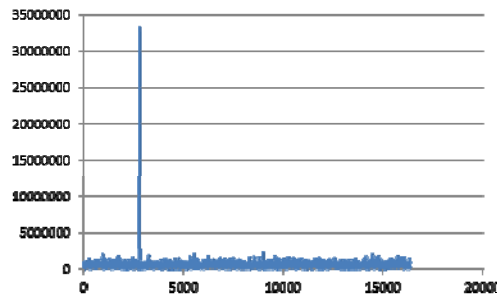
(peak/second_peak値で比較)

	PRN4	11	17	20	23	28	32	193
仰角	27	32	70	56	29	38	27	82
10ms	7.0	7.7	29.6	24.0	9.5	15.2	4.6	20.3
5ms	5.0	4.0	29.9	17.9	9.1	10.1	4.4	15.5
4ms	4.1	2.8	29.0	15.8	8.1	9.9	4.1	15.1
2ms	3.7	2.6	20.6	12.0	5.9	6.4	2.6	10.0
1ms	2.1	1.9	13.7	5.9	5.2	3.2	2.0	7.9

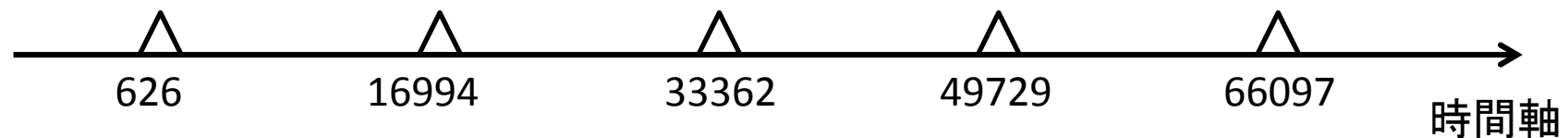
3.0以上で信号があると判断
実際には2.5でも問題ない



追尾のイメージ

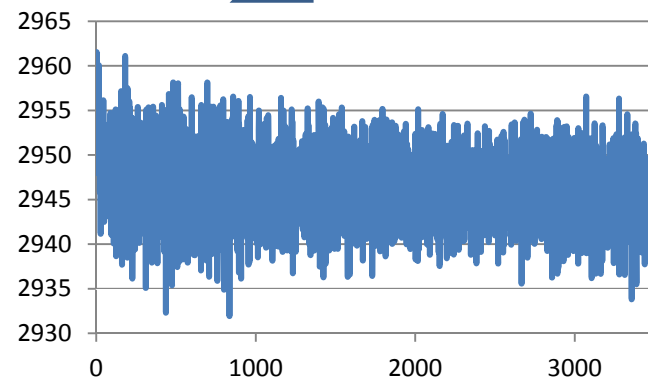
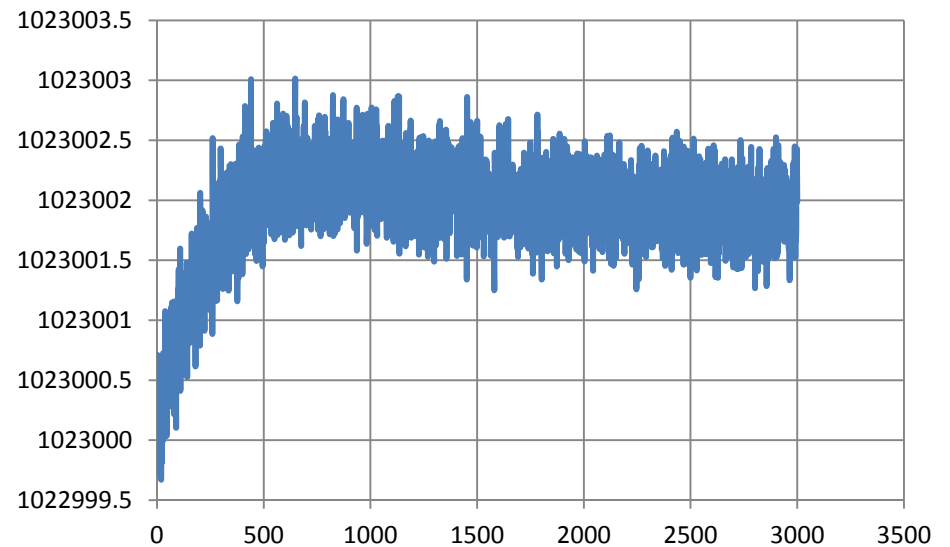
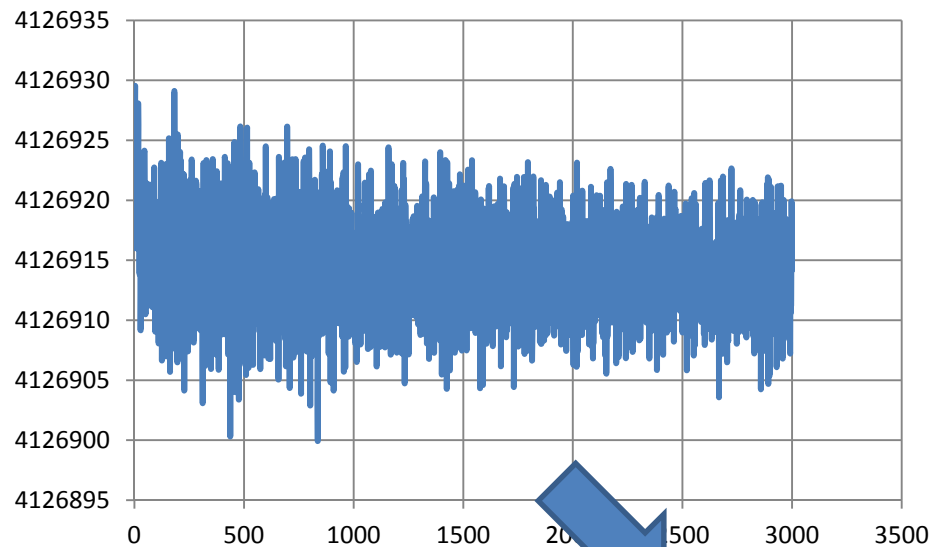


最初にAcquisitionで得たコード位相の先頭がほぼ正しいため、通常のダイナミクスであれば、それ以降、IFデータを1ms分のサンプリング値進ませる。ドップラー周波数等でも微妙に変化する



- * 上記は実際のPRN17番の数値(最初から)
- * 結果としてIFデータをほぼ16367か16368進ませている
- * これはIFデータの中にあるC/Aコードの先頭がそこに存在することを意味
- * この相関値のピークをI_Pとしている
- * 搬送波の位相が受信信号とずれてくると、コリレータのピーク値が振幅

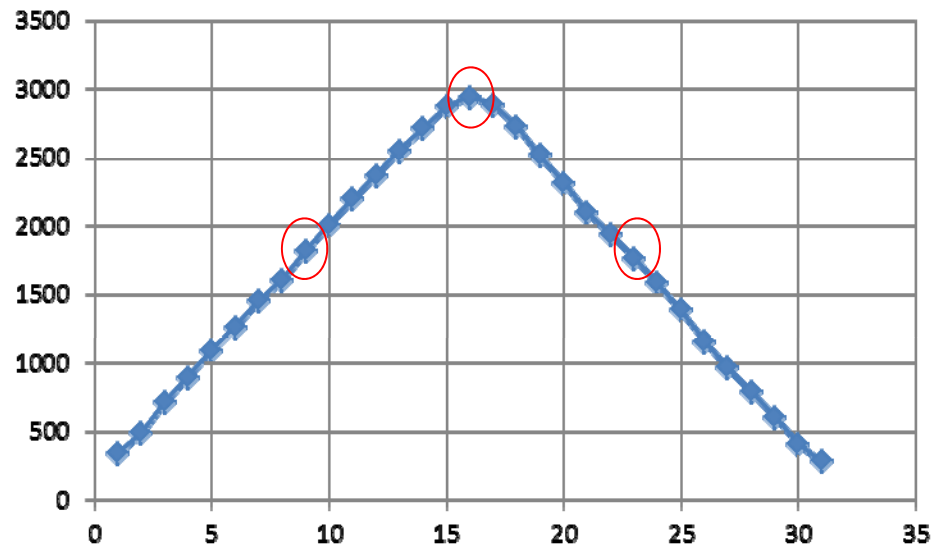
キャリアとコードの周波数 (PRN17 最初の3秒)



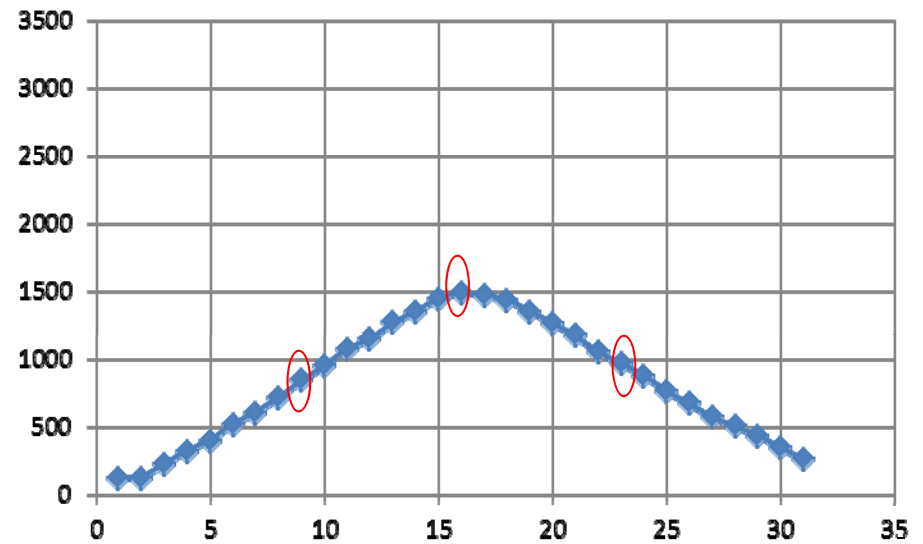
左上が時間軸に対するキャリアで
左がドップラー周波数 $f_f = 4123968\text{Hz}$

DLLの相関器による1ショット

横軸1目盛りが約18m 縦軸は相関値

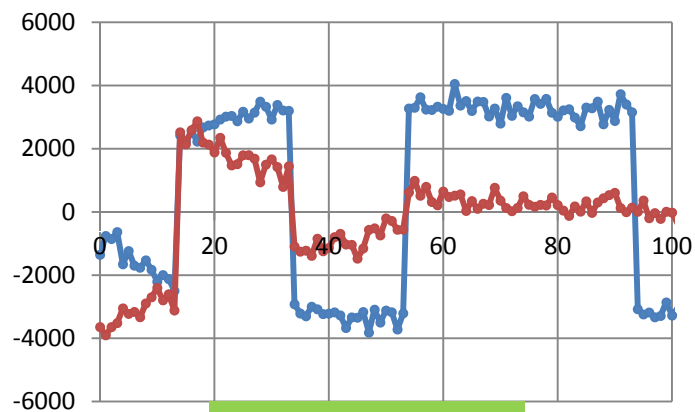
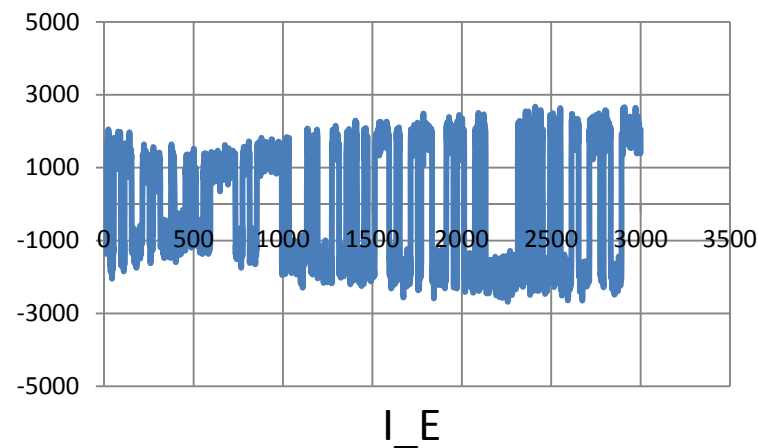
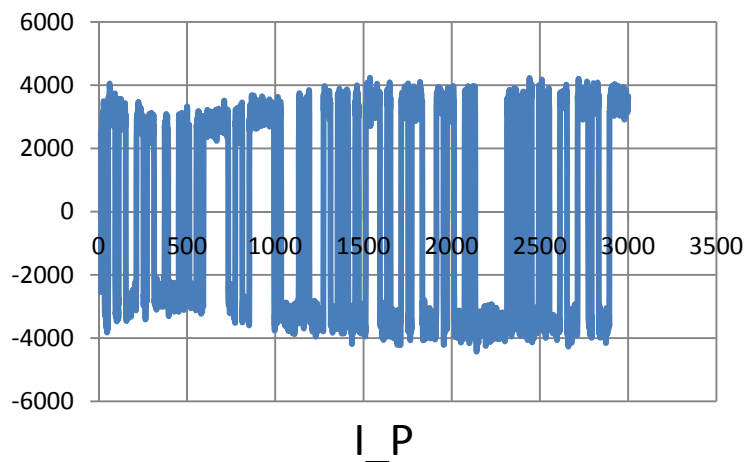


実習で解析するデータより 193番(準天頂)
左からEarly,Prompt,Late

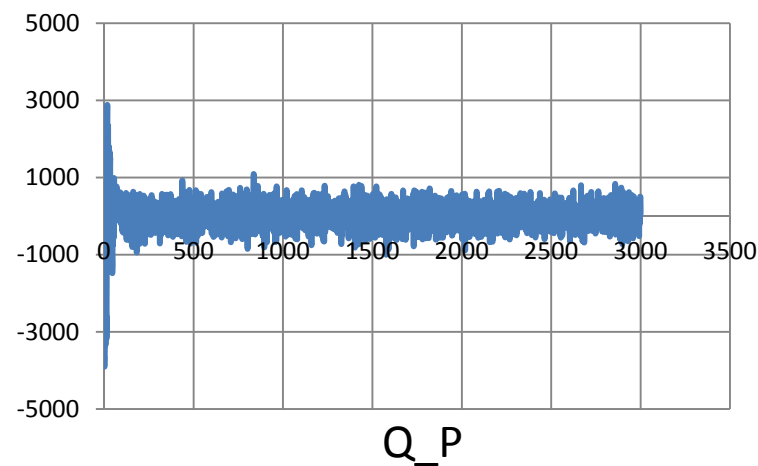


同じくPRN32

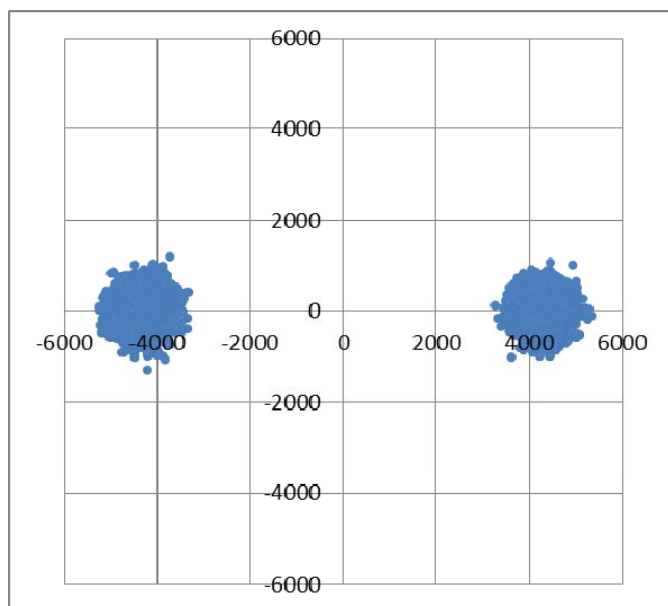
I_P、I_E、Q_Pの推移 (PRN17 最初の3秒と100ms)



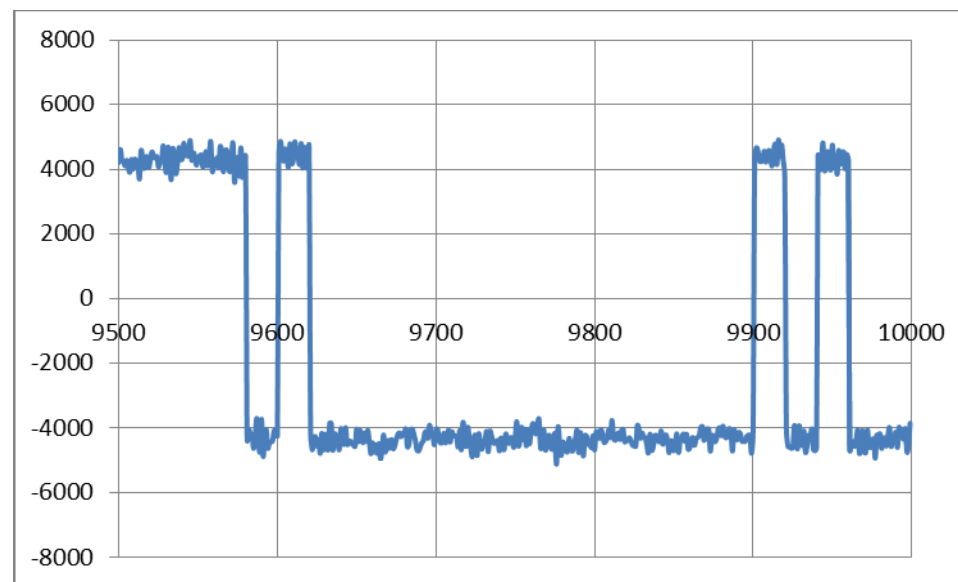
最初の100ms
赤Q_P 青I_P



I相とQ相のPromptの推移



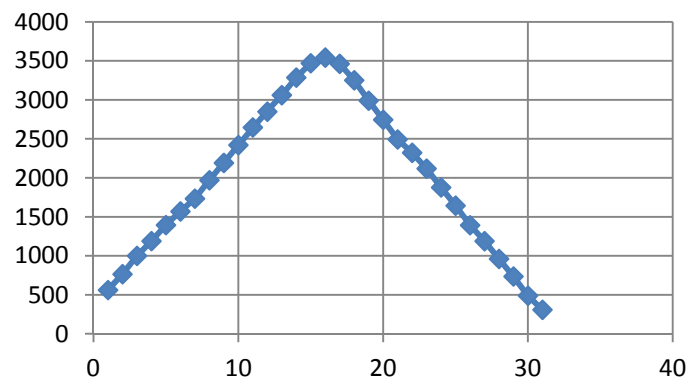
横軸がI相 縦軸がQ相の値



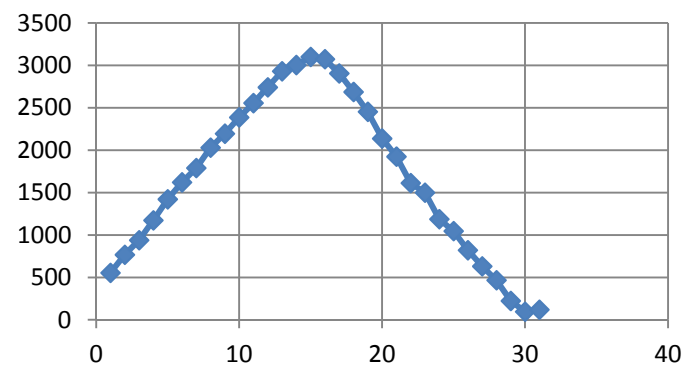
9500msから10000msまでのI相の推移

相関波形と単独測位

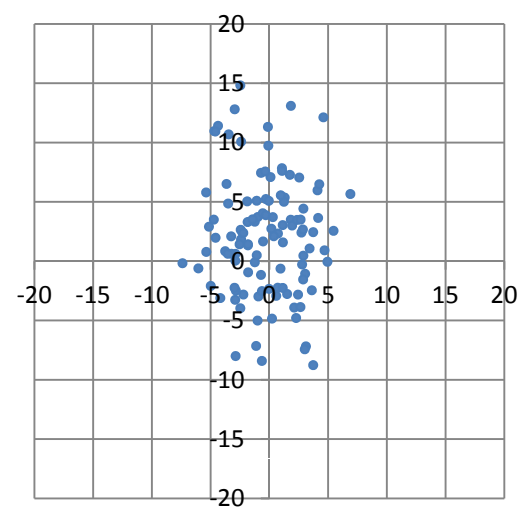
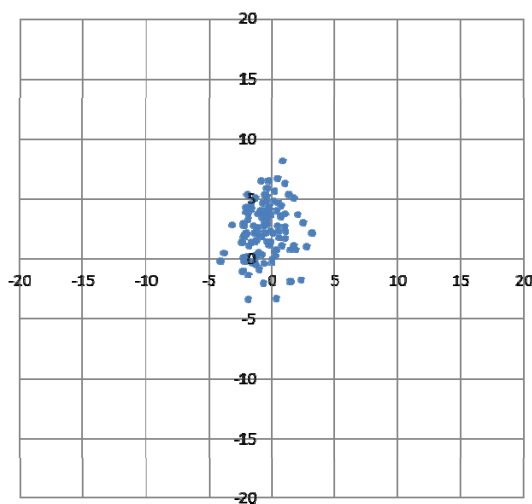
(同時刻の10ms分と1ms分での違い)



10ms分足して10で割った相関値

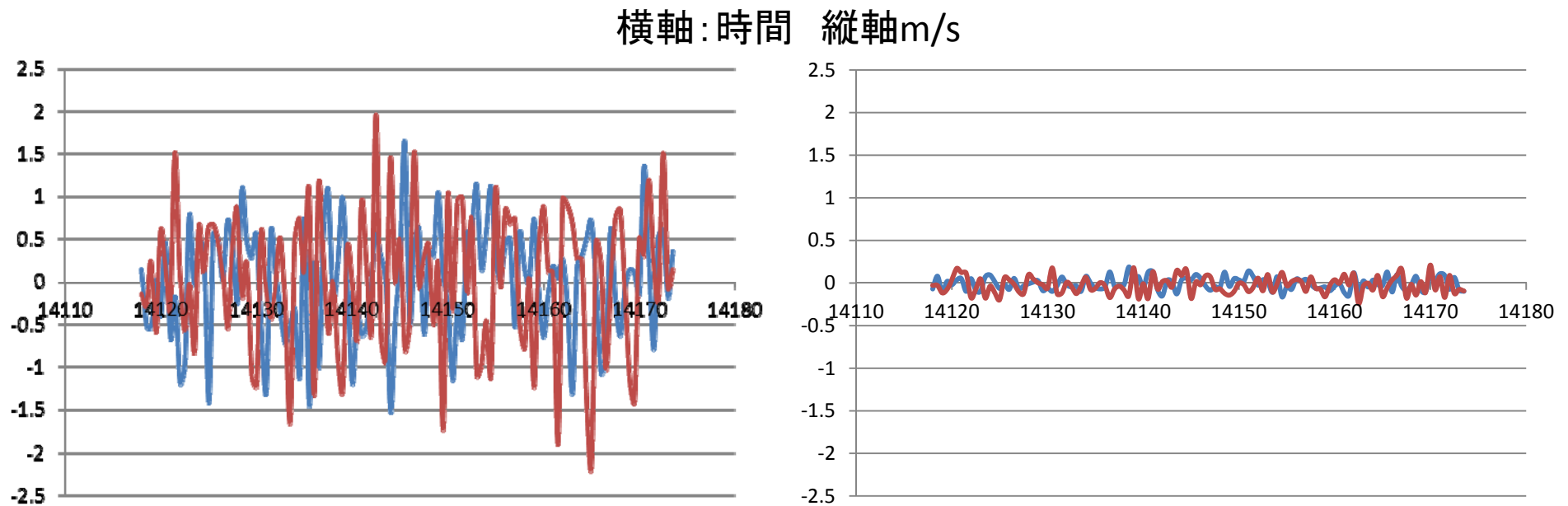


1ms分利用



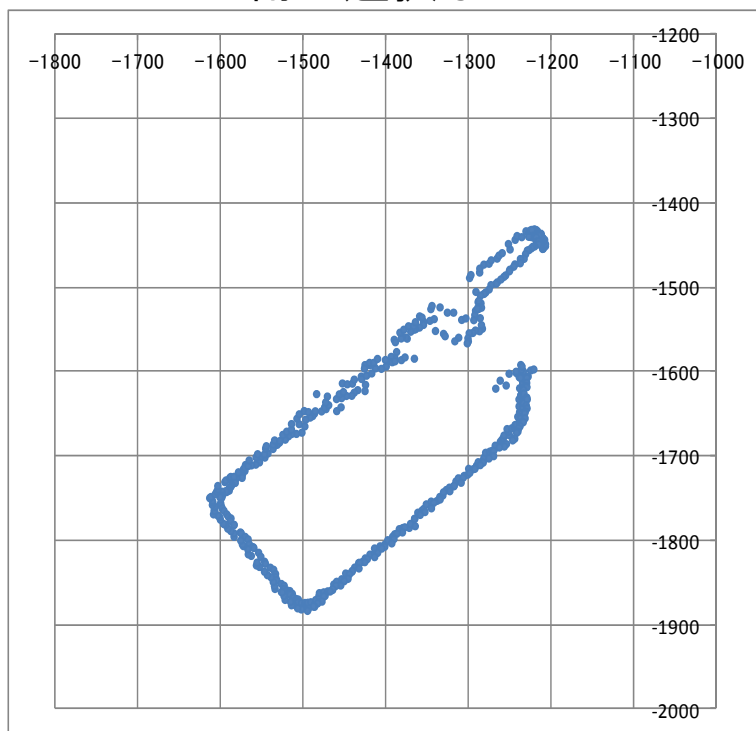
ドップラー周波数を利用した速度計算

(左1ms 右20ms 青:経度方向 赤:緯度方向)

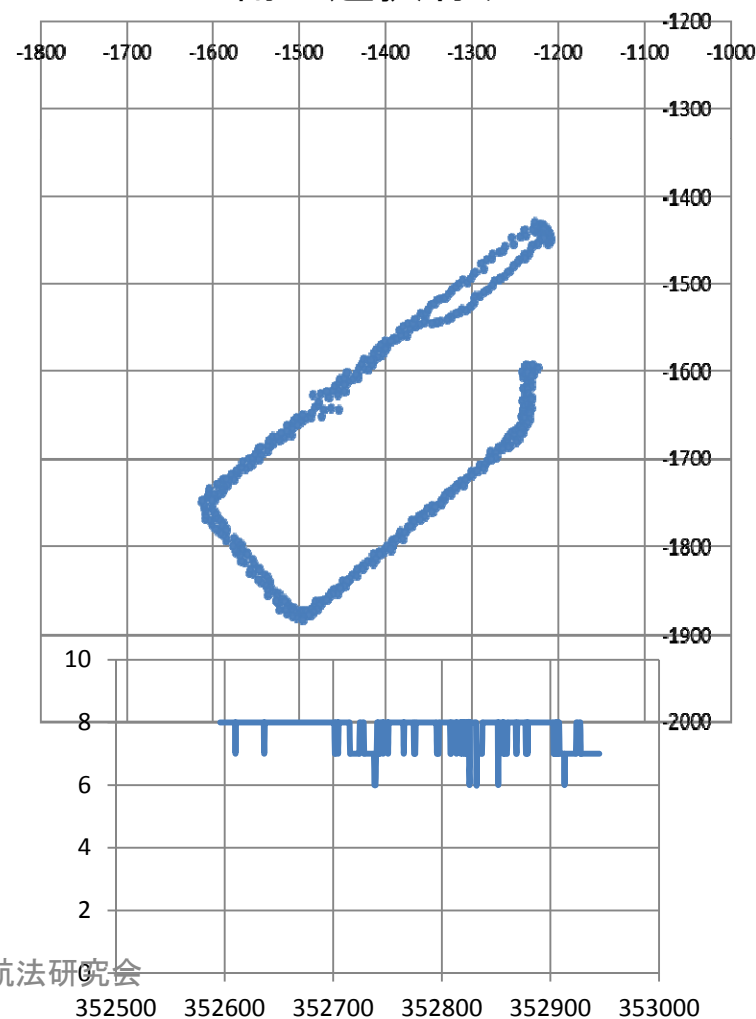


衛星選択を無効/有効にした測位結果 (晴海移動体、選択は信号強度のみ)

衛星選択なし

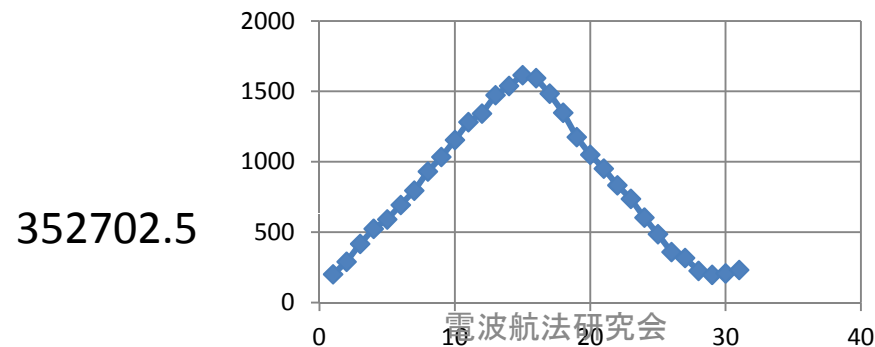
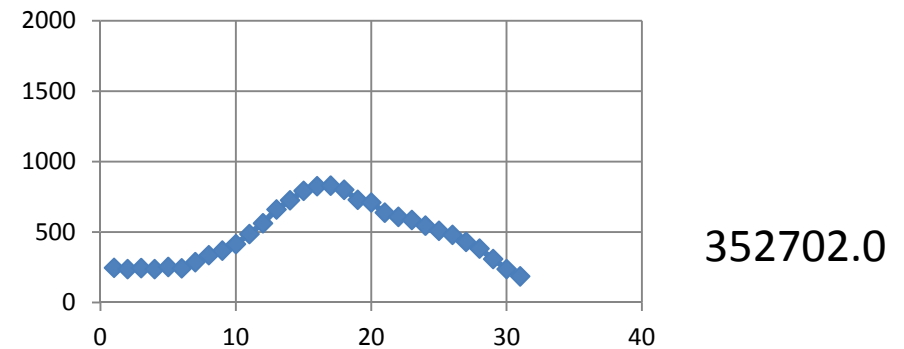
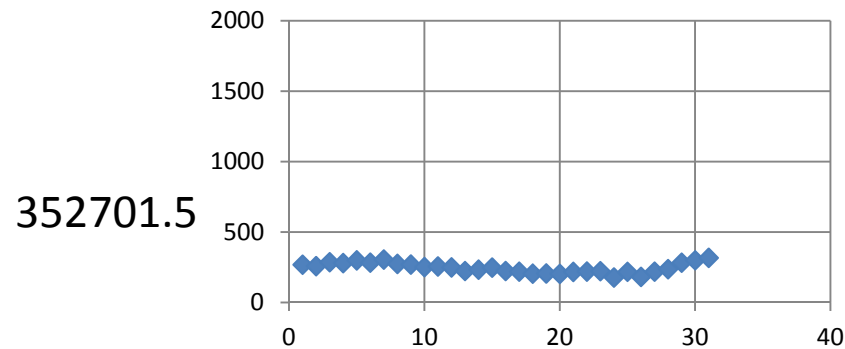
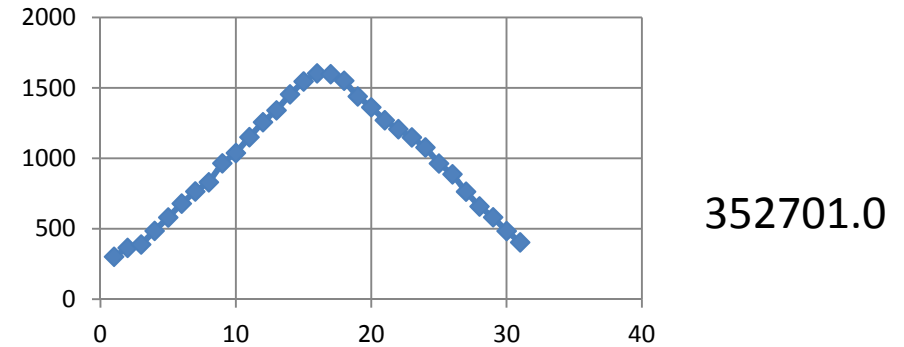
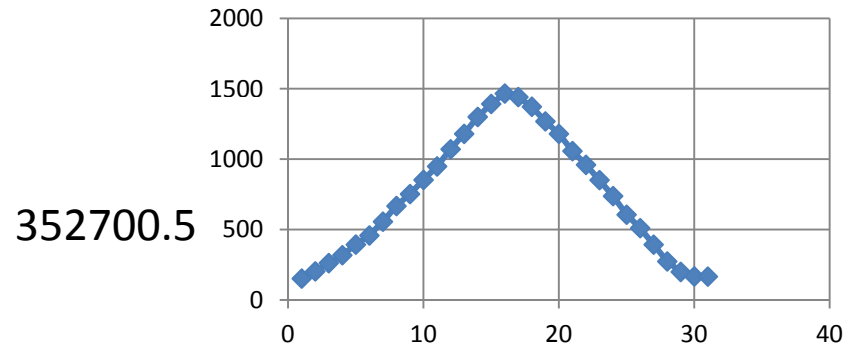


衛星選択有り

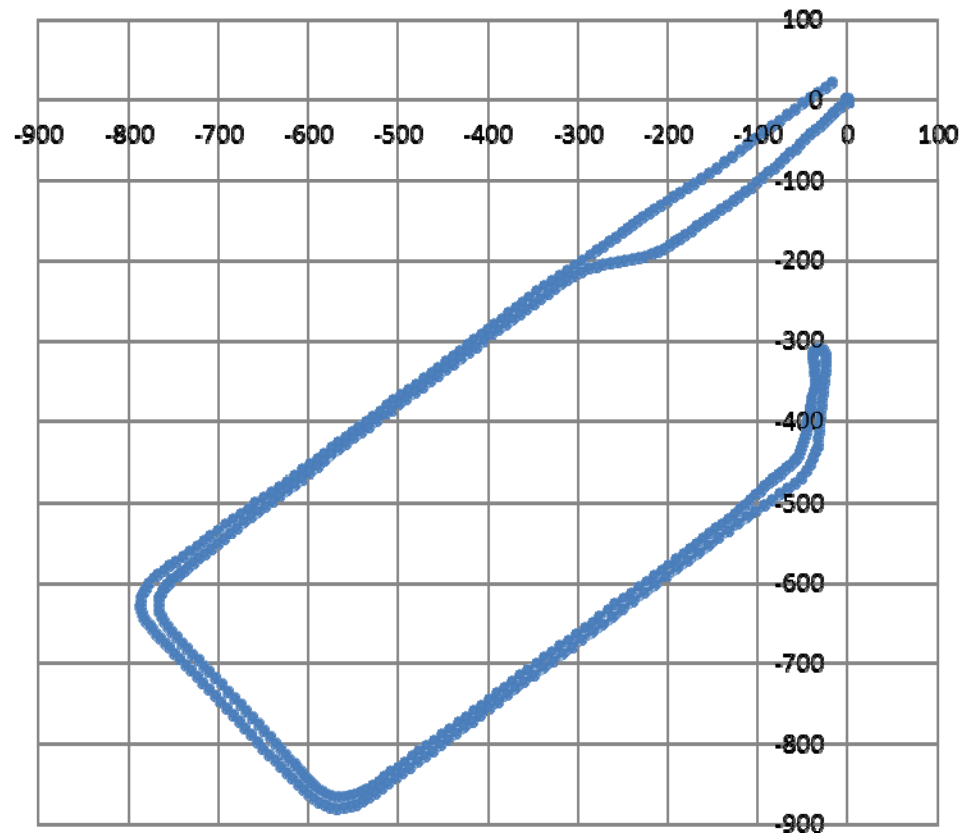


352700.5秒から352702.5秒までの推移

(352701.5秒と352702.0秒で信号強度より、この衛星は測位に使用していない)



衛星選択を有効にした2Hzの 速度情報の積分値



2Hzの情報ではあるが、最後の位置でも大きな誤差（おそらく1-2m以内）はなく、最初停止していた場所の反対車線までのデータであったことがわかった

これは出力した観測データを利用した解析であるが、ソフトウェア受信機の最大の利点は、観測データを出す前の追尾ループにおいて、様々なアルゴリズムを試すことができる！

高層ビル街での測位例(丸の内)



u-bloxの水平DGPS



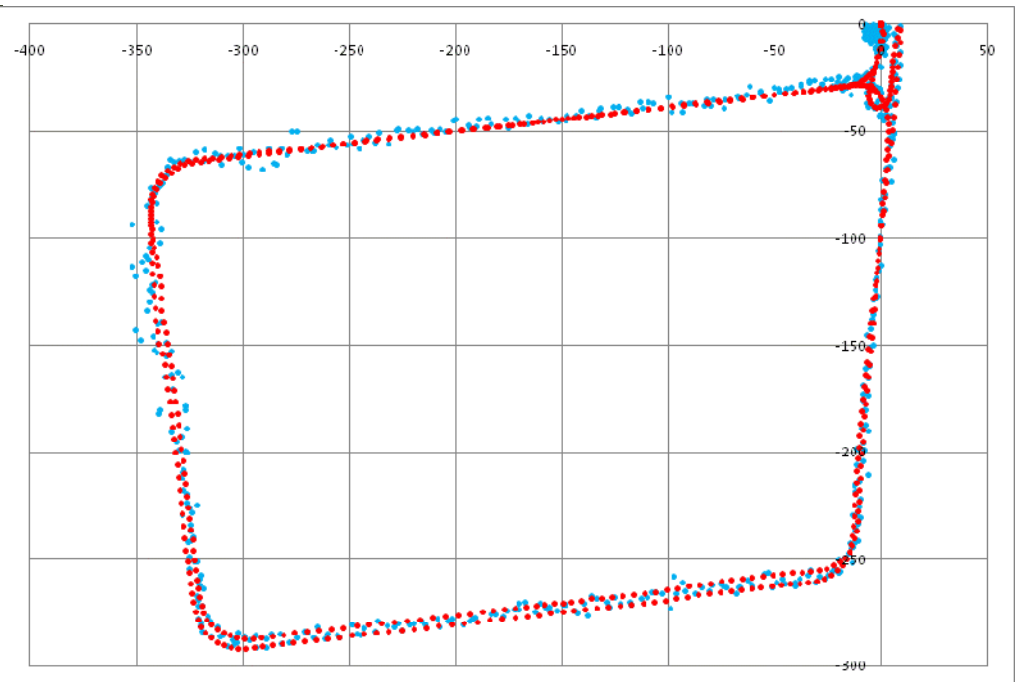
u-bloxのNMEA出力位置

ドップラ周波数からの速度情報を利用 (江東区若洲付近、移動体)



赤: UBLOX

緑: ソフトウェアGPS

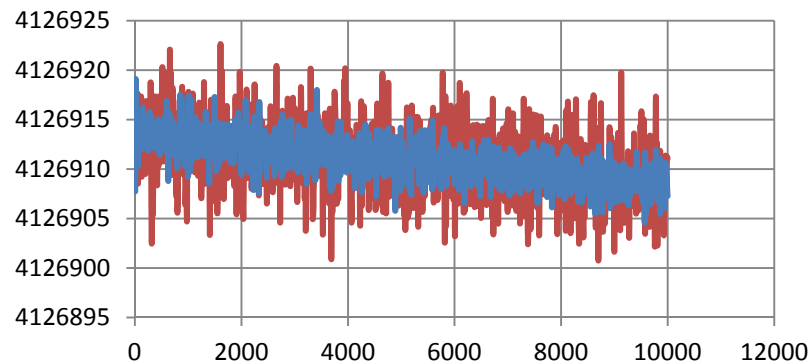


赤: 速度積分

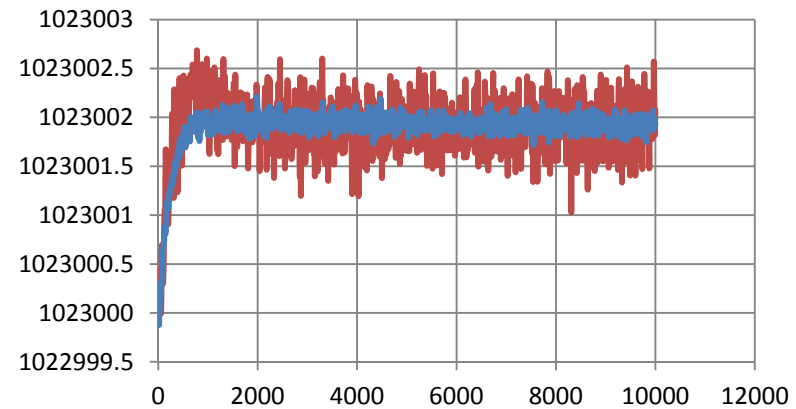
青: ソフトウェアGPS

Integrationと帯域の効果

(赤:1ms 青:10ms DLLのみ10ms 17番衛星)

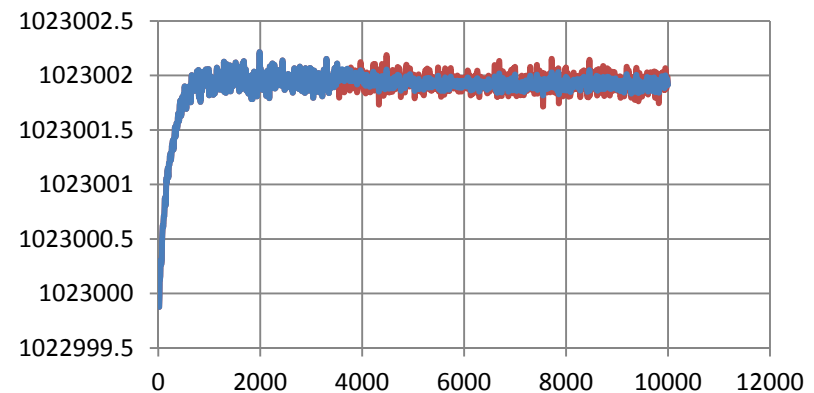
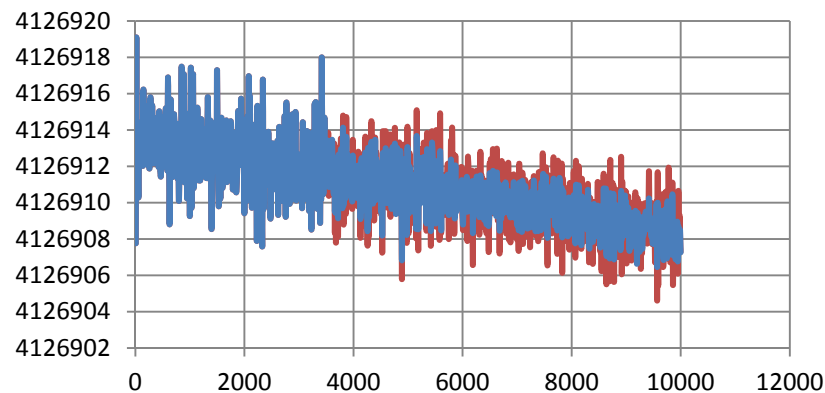


DLL10ms積分(キャリア)



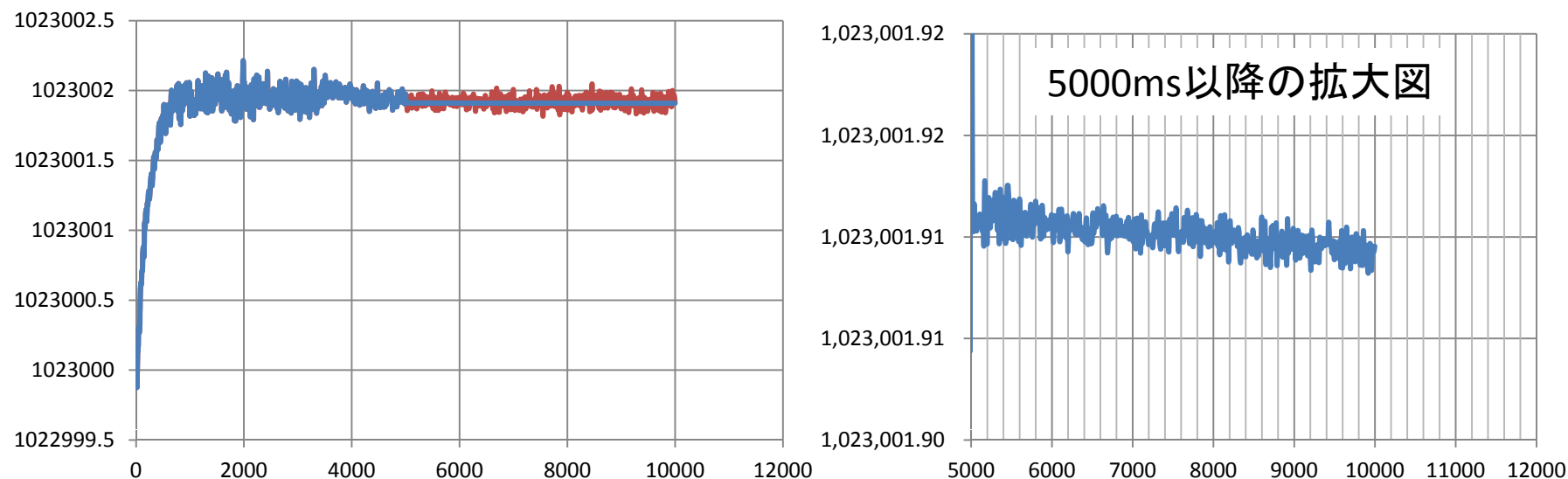
DLL10ms積分(コード)

3000msでDLLの帯域を0.5HzへPLLを20Hzへ、さらに5000msでDLLを0.25Hzへ、PLLを15Hzへ変更



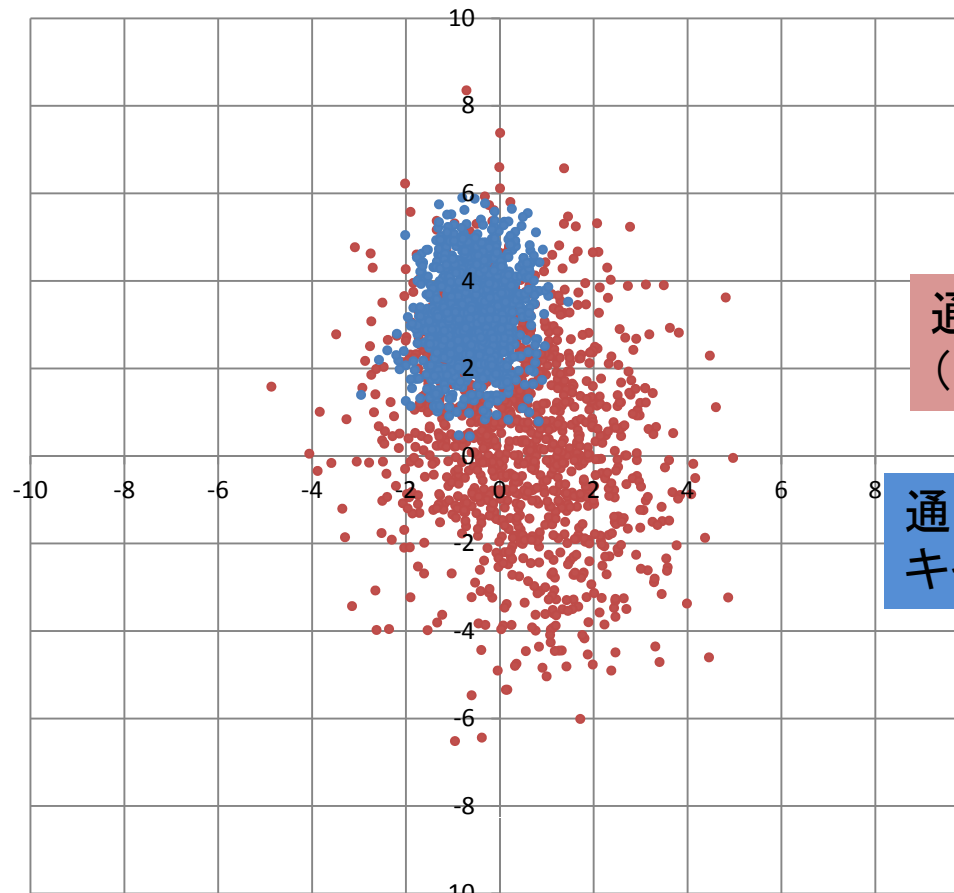
キャリア支援DLL

(赤: 10ms + 帯域 青: 10ms + 帯域 + キャリア支援 17番衛星)



本結果は、7000msでDLLの帯域を0.125Hzへ、9000msで0.05Hzへ
また、5000msでキャリア支援をON。キャリア支援が入ると帯域の
効果以上にスムーズになることが明瞭。帯域もさらに狭めることが可能。
ただしPLLが追尾していることが前提

水平プロット比較



通常の10ms分での疑似距離の結果
(DLLの帯域は0.5Hz)

通常の10ms分での疑似距離の結果＋
キャリア支援あり(DLLの帯域0.05Hz)

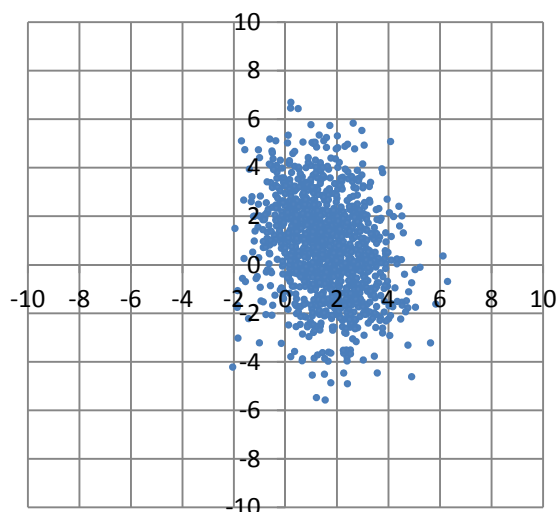
水平方向の標準偏差で比較すると2.7mが1.1mへ低減
キャリア支援により、本ソースでの疑似距離計算手法
においてもノイズの低減が確認された

DGPSとキャリアスMOOTHING(+RTK)

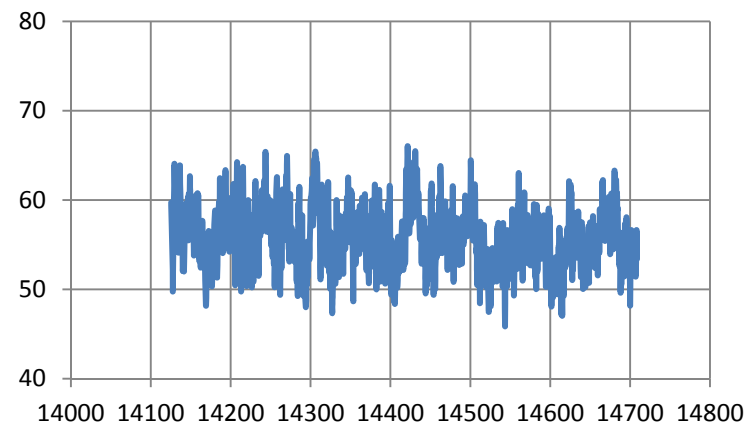
- 準天頂衛星の軌道情報が試験的に放送されるようになり、軌道精度も安定しているとの情報があったため(2010年12月)、GPS+QZSのデファレンシャルの精度を評価した
- 2010年12月12日(日曜日)の12時54分から13時4分まで10分間取得
- 評価方法は、研究室屋上のアンテナを分岐し、同機種の2台のFEをつなげ、完全な環境で評価した。マルチパスも大部分低減され、誤差に残るのはノイズ成分である

単独測位 (ROVER側) とDGNSS

単独

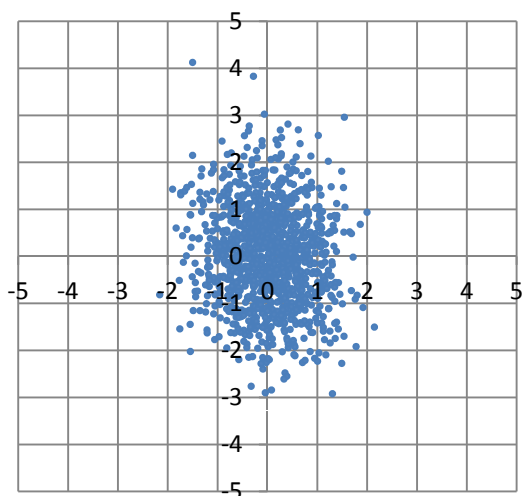


2.4m(1 σ)、1.7m(平均値ずれ)

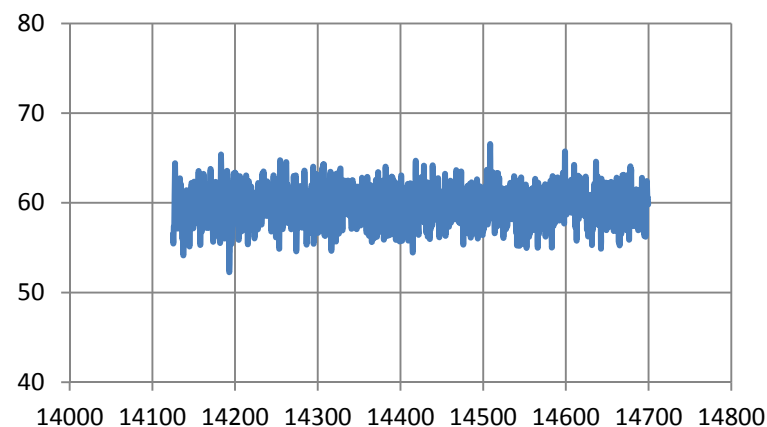


3.3m(1 σ)、3.9m(平均値ずれ)

DGNSS



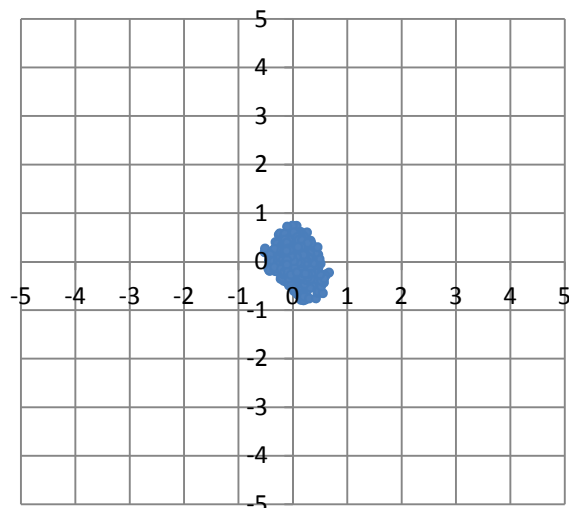
1.3m(1 σ)、0.03m(平均値ずれ)



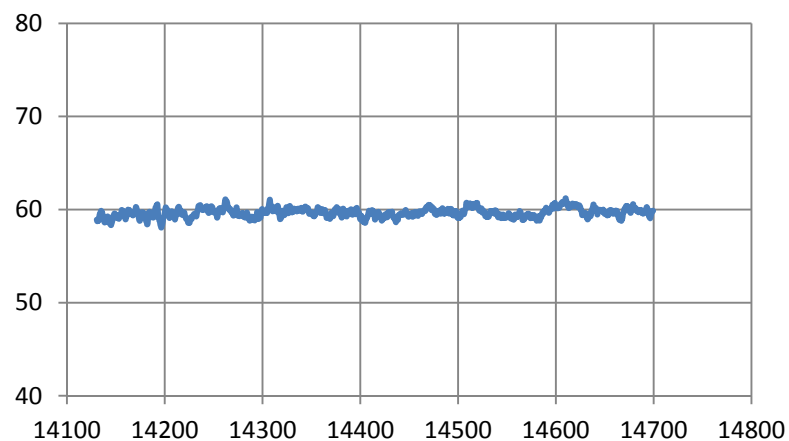
2.1m(1 σ)、0.12m(平均値ずれ)

搬送波スムージング10秒と50秒でのDGNSS

10秒

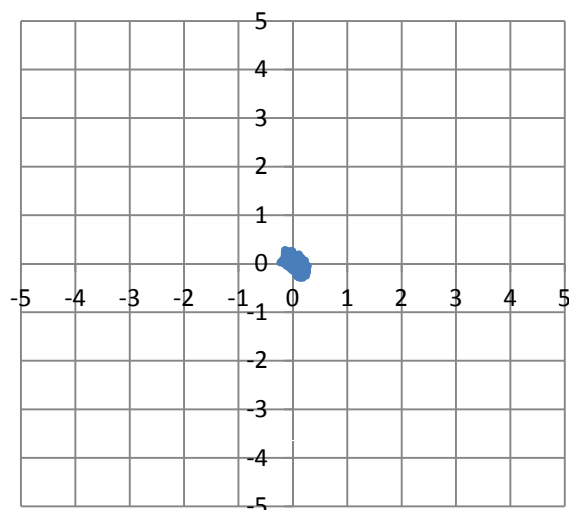


0.30m (1 σ)、0.03m (平均値ずれ)

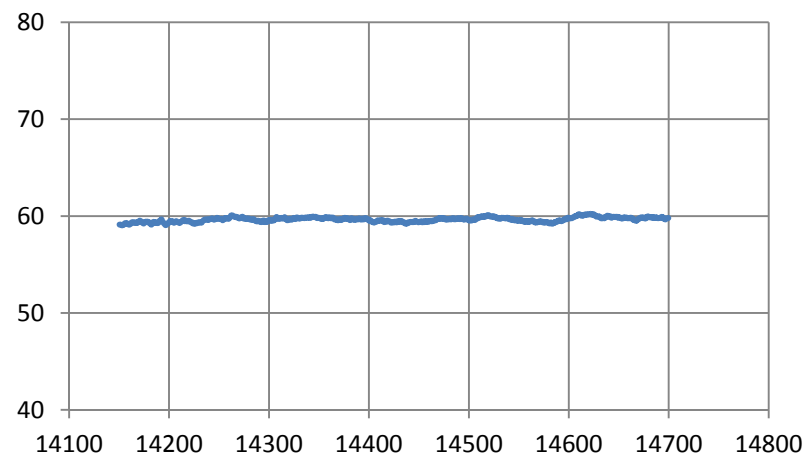


0.48m (1 σ)、0.12m (平均値ずれ)

50秒



0.15m (1 σ)、0.03m (平均値ずれ)

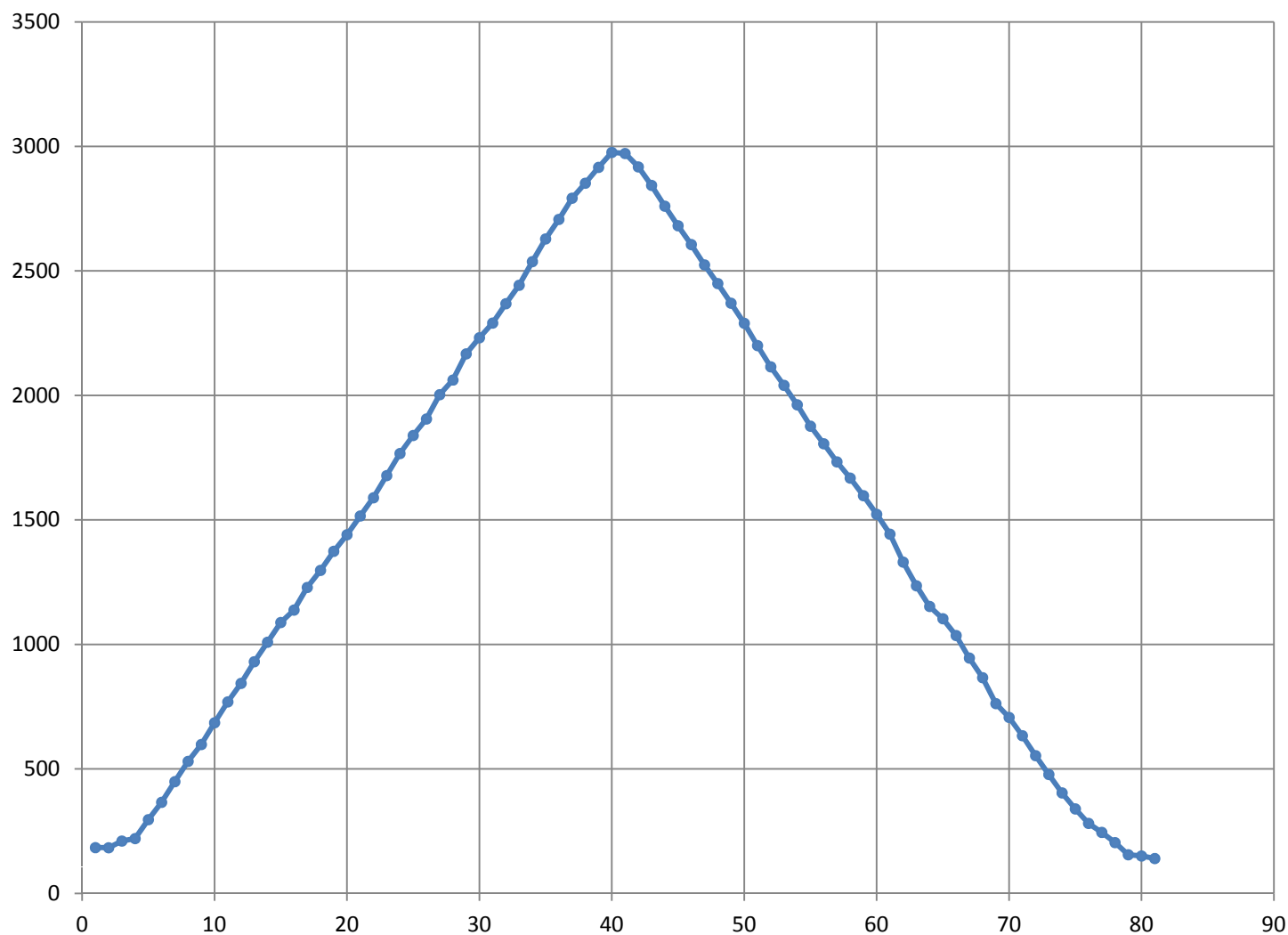


0.23m (1 σ)、0.13m (平均値ずれ)

最近の調査事項

- Fraunhofer社の帯域の広いFEを購入し、L5帯信号の解析を開始→残念ながら卒論では実装できず
- そのため、既存のL5帯の受信できるJAVAD受信機で耐マルチパス性能を調査
- L5帯の10倍のチップレート信号でマルチパスの対遅延距離性能はどこまで改善できるか？

Fraunhofer社のFEでのL1帯の相関波形 (SF=40MHz BW=13MHz)



実験(マルチパス特性)

シミュレータ



JAXA様の3周波シミュレータ
を使用させて頂く

受信機

JAVAD



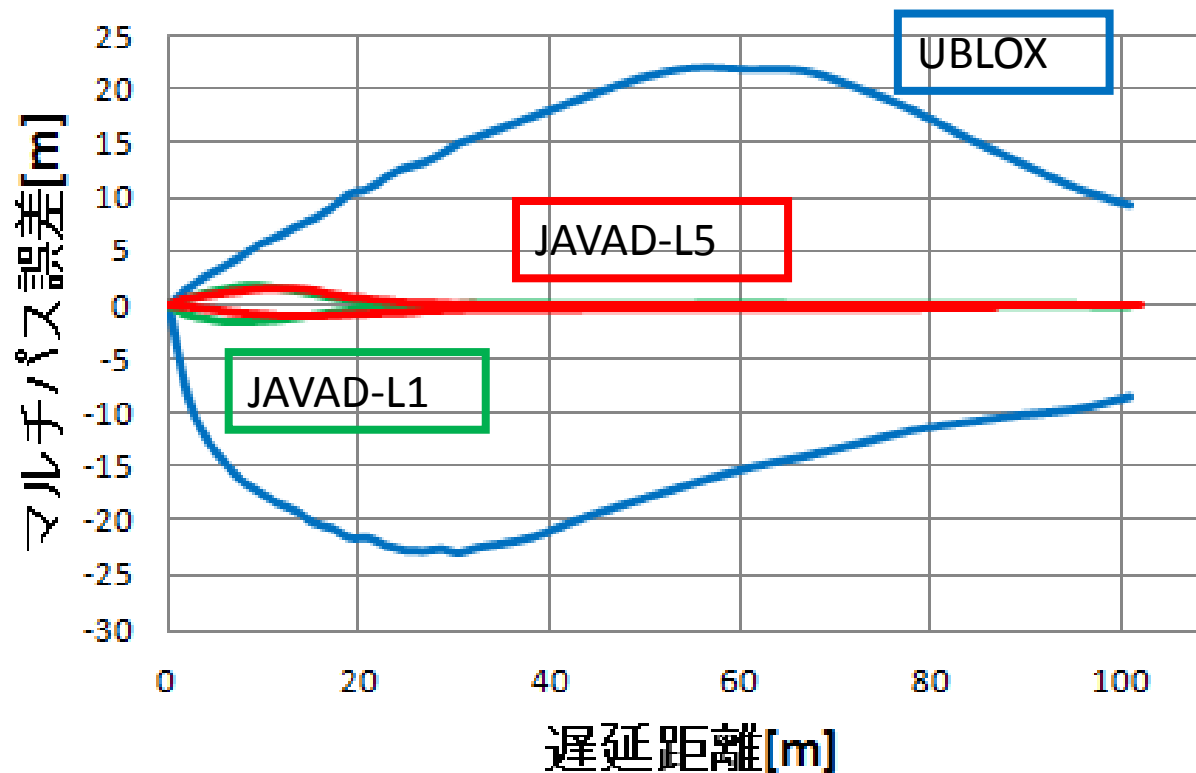
UBLOX 5T



2012/2/11

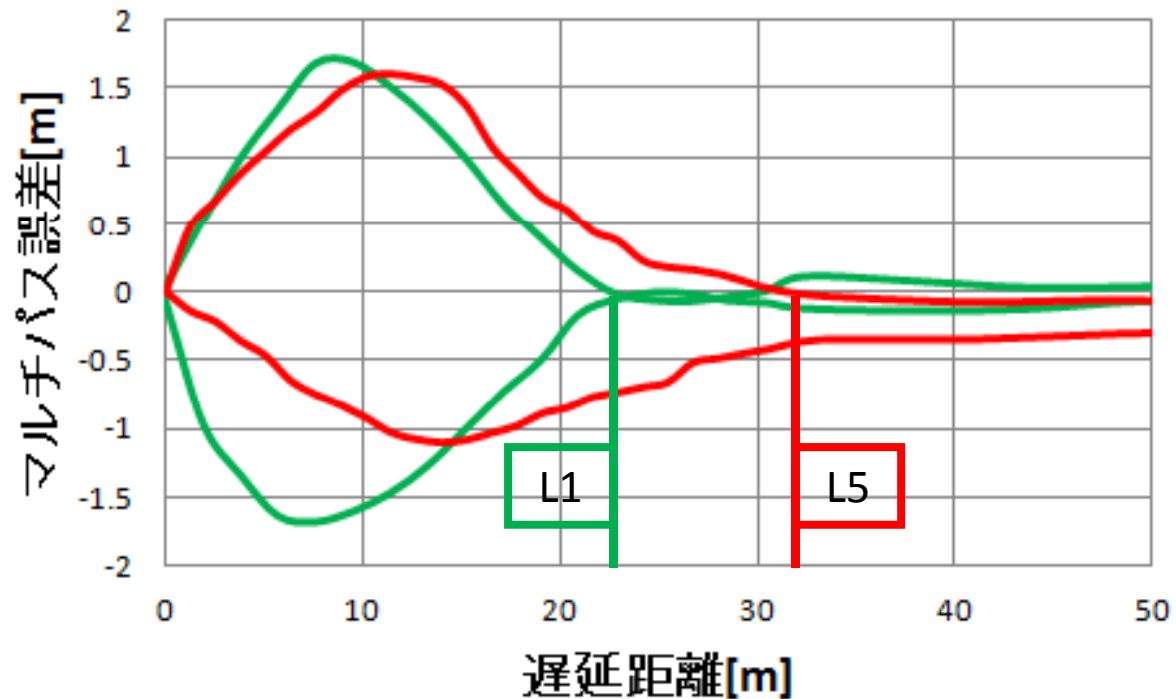
電波航法研究会

実験(マルチパス特性)



UBLOXは遅延距離100mでもマルチパス誤差が残存
一方JAVADはL1・L5ともに30m程でマルチパス誤差がなくなる
→次のページでJAVADのデータを拡大

実験(マルチパス特性)

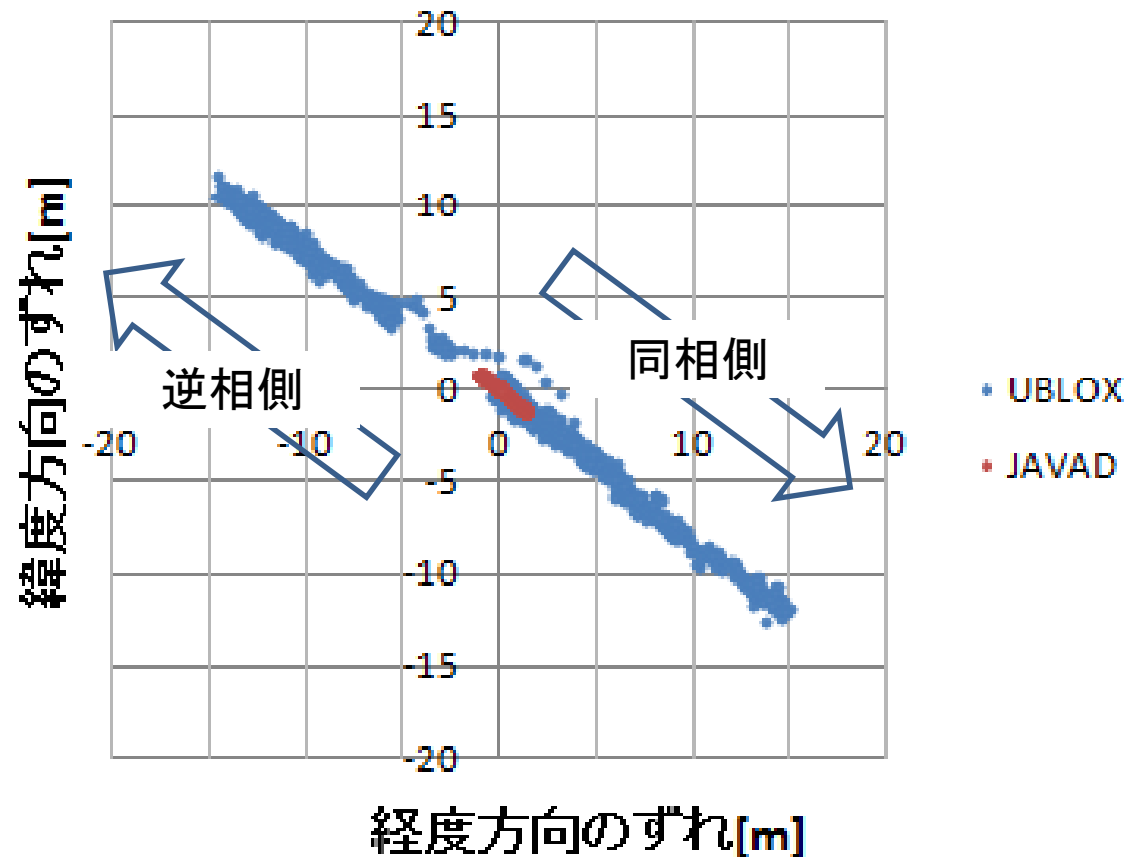


L5よりもL1の方が精度が良かった
→L1の精度を高める技術によるもの

L5帯のデータは若干観測データに難があり本当にこれで正しいかどうかの検証を行う必要あり

実験(測位結果)

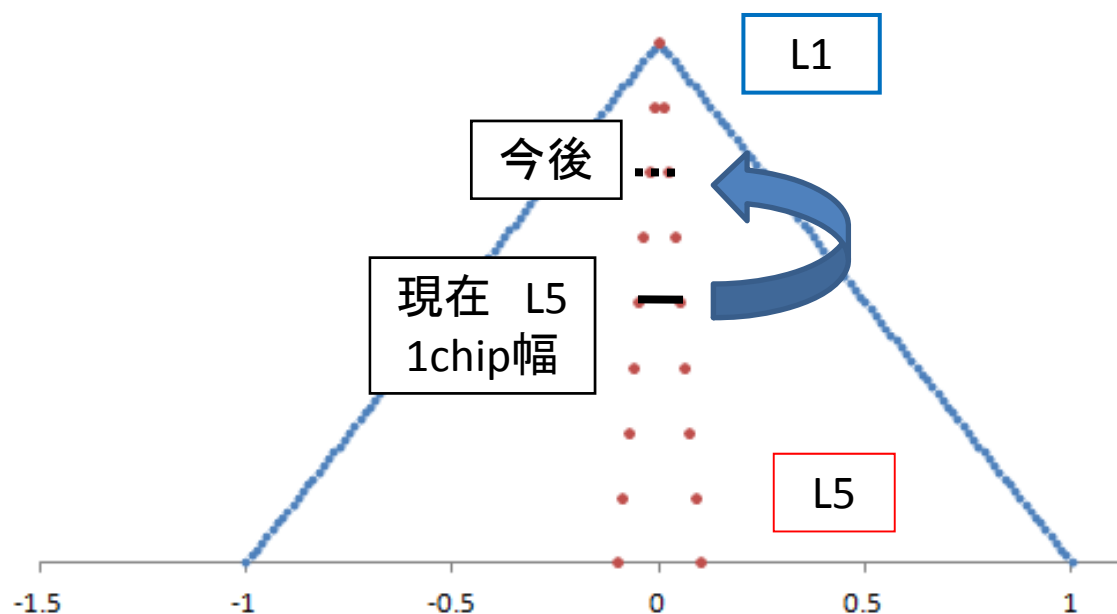
マルチパスを含んだ擬似距離を利用した単独測位



→マルチパス特性がそのまま測位に反映

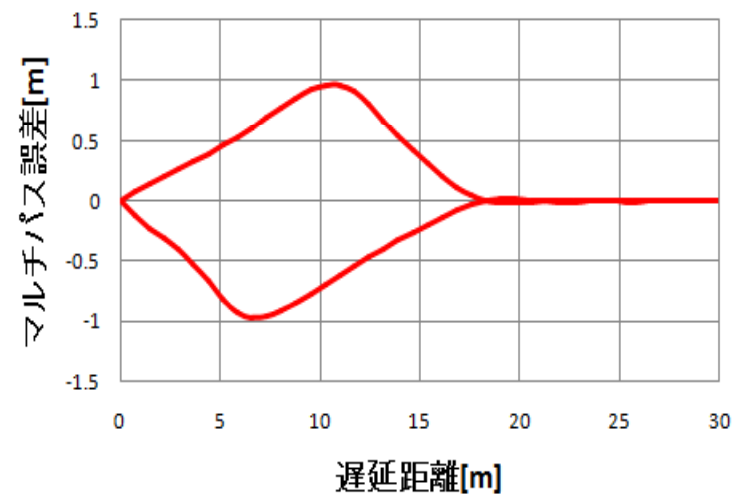
考察(L5の課題)

80Mサンプリングの時のL1とL5の相関波形の点数の例



サンプリング点数の少なさや帯域の制限により
L5のコリレータに工夫ができない?

もし現在の1/2(0.5chip幅)で
できたら...



まとめ

- ソフトウェアGNSSは一般の研究者に利用できる段階に数年前からなっている
- **最大の利点は、受信機の性能を大きく左右する信号捕捉・追尾部を自由に設計試作できる！**
- 大学や国の研究機関だけでなく、新しくGNSSに参入または評価の必要がある企業においても有用
- 研究用途以上にはならないと予想されるが、現在の市販受信機にとってかわるアプリケーションが出る可能性も否定できない