

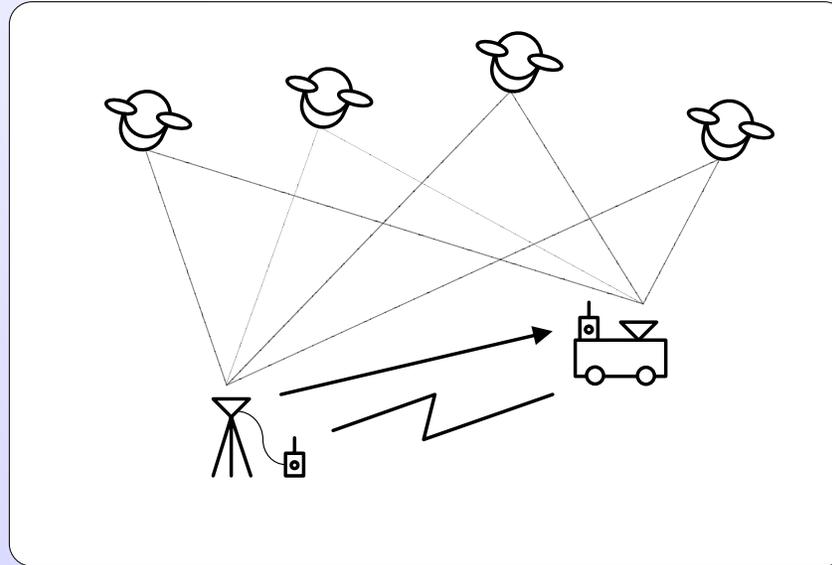
電離層影響下におけるGPS相対測位の Ambiguity決定性能評価

情報通信工学研究室 五味泰斗
指導教官 安田明生

本発表の要約

- RTK-GPS相対測位における
Ambiguity決定性能の改善を対象
 - 基準局ネットワークによる
補正方法について言及
 - 電離層遅延の推定精度による
Ambiguity決定性能の変化について定量的に評価
 - 上記に関する高精度推定の定式化、
及びその統計的な研究の必要性を述べる
-

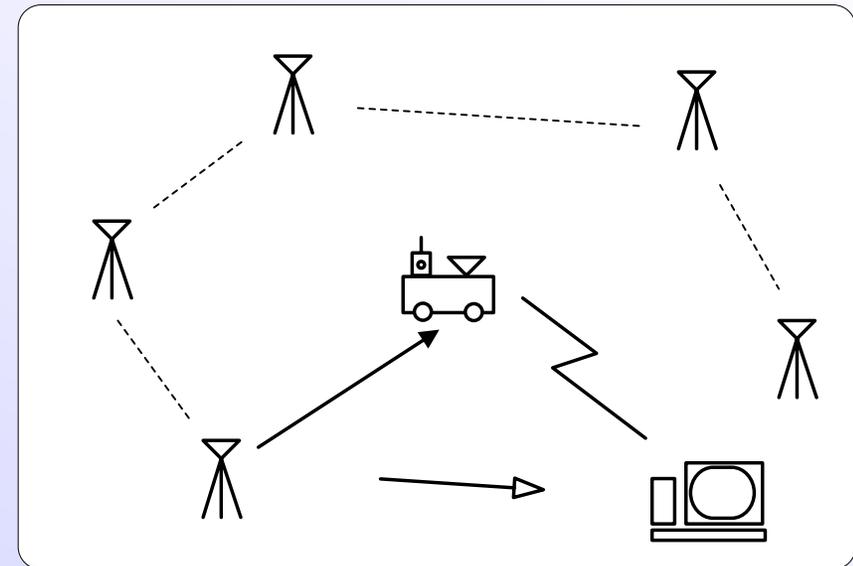
RTK-GPS(相対)測位



- 実時間で移動体の精密位置を基準局から相対的に求める方式
 - 搬送波位相測定値を使用、数cmの精度
- 移動局 + 基準局 の2台の受信機
- データ通信リンクの必要性
- Ambiguity決定(AR)

ネットワークRTK測位

- 現在RTK測位システムの主流
- 国土交通省が運用する
 - 電子基準点**の利用
 - 約20km間隔での基準局網
 - ほぼ日本全土でのRTKが可能
- 通信リンクに、**携帯電話**を使用
- RTKの問題点を解消
 - 基準局設置、データ通信リンク構築の必要性なし
 - Ambiguity決定性能の向上



※ 地図の測量、建設工事の施工管理、農業の機器制御などに用いられている

研究の背景

- 数cmの精度で位置を求める
RTK-GPS測位という技術
 - そのシステムとして
基準局ネットワークを利用したものが普及
 - 用途は主に
測量、工事の施工管理、機器制御
 - ネットワークによる
Ambiguity決定性能の向上
-

Ambiguity決定について ～搬送波位相測定値～

Ambiguityを決定できれば、精密測位が可能

$$\lambda \cdot \Phi = \rho + c(dt - dT) - I + T + \lambda \cdot N + \varepsilon_\phi$$

衛星-アンテナ間幾何学距離

電離層遅延

ノイズ(微小)

対流圏遅延

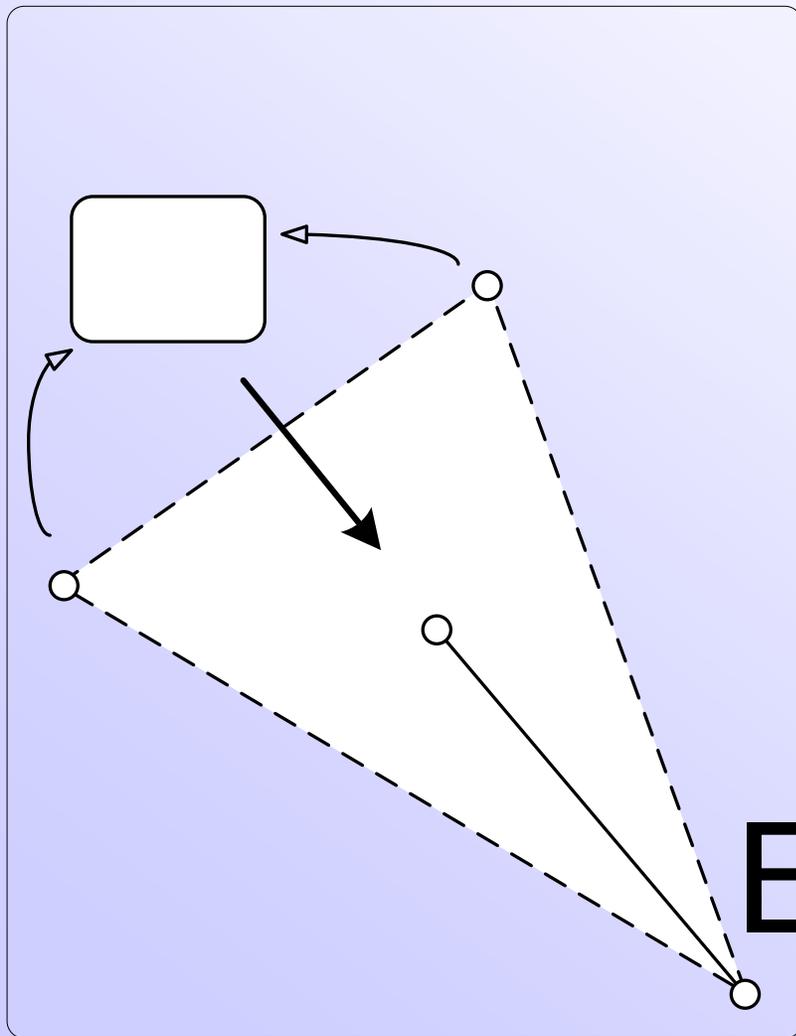
衛星 & 受信機時計誤差

2重差で消去

ネットワークによる補正
で残差軽減

ネットワークによる補正

~Ambiguity決定性能向上~



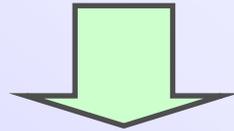
- 各基準局ごとの残差を計算
- 最終的には、係数
をかけた**線形補間**
- 観測点での補正值
を算出

Estimated Error

$$AD = \alpha$$

ネットワーク補正の問題点

- 電子基準点を利用するネットワーク方式では、搬送波に含まれる誤差を補正する必要
- 基準局間の線形補間によって補正し、Ambiguity決定性能の改善



- 線形補間では、電離層の誤差を高精度に推定できているのか??
 - 電離層は空間や時間に対し不規則であり、推定するには複雑な系統誤差
 - 電子基準点には、局間隔の長いところも存在する

問題点に関する考察 & 研究の目的

- 基準局ネットワークによる電離層推定が、高精度に行われていない可能性がある
 - 線形補間という補正方式に限界？
 - 時間帯や基準局間の距離などの条件による影響？
- 電子基準点によっては、基準局間隔が長いことがあり
広いサービスエリアを確保するためには議論が必要
- 様々な条件で、データ解析・調査を行う
- ネットワークによる電離層推定精度が
Ambiguity決定に与える影響を定量的に示す

実験概要

- シミュレーション及び実際の電離層推定値によるAmbiguity決定性能の評価
 - ネットワークによる補正とAmbiguity決定処理の実装
 - 電離層推定値と真の電離層遅延との比較
 - 各推定値によるAmbiguity決定性能の比較
- 使用したデータの詳細
 - 2004年12月1日、12:00～15:00(JST)、全て1Hz
 - 受信機・アンテナはTrimble 4000SSE
 - 電子基準点GEONETの10局

実装された手法(1/2)

| | |
|-------|----------------------------|
| 観測量 | L1,L2の擬似距離、搬送波の2重差 |
| 推定手法 | 拡張カルマンフィルタ |
| 軌道 | 放送暦 |
| マスク角 | 15° |
| 測位モード | kinematic |
| 電離層補正 | ネットワークによる線形補間(LCM) |
| AR手法 | LAMBDA/MLAMBDA (Ratiotest) |

※ LCM : Linear Combination Model

実装された手法 (2/2)

- 推定パラメータ

$$\mathbf{x} = (\mathbf{r}_r^T, N1_{AB}^{12}, \dots, N1_{AB}^{1n}, N2_{AB}^{12}, \dots, N2_{AB}^{1n})^T$$

ネットワークで
誤差補正

- 観測量

$$\mathbf{z}_k = (\nabla\Delta\phi1_{AB}^{12}, \dots, \nabla\Delta\phi1_{AB}^{1n}, \nabla\Delta\phi2_{AB}^{12}, \dots, \nabla\Delta\phi2_{AB}^{1n}, \\ \nabla\Delta P1_{AB}^{12}, \dots, \nabla\Delta P1_{AB}^{1n}, \nabla\Delta P2_{AB}^{12}, \dots, \nabla\Delta P2_{AB}^{1n})^T$$

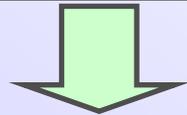
- 観測モデル

$$\mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}(-)) = \begin{pmatrix} \rho + N1 \\ \rho + N2 \\ \rho \\ \rho \end{pmatrix}, \mathbf{H} = \begin{pmatrix} \partial\rho / \partial\hat{\mathbf{r}}_r & \lambda1 & 0 \\ \partial\rho / \partial\hat{\mathbf{r}}_r & 0 & \lambda2 \\ \partial\rho / \partial\hat{\mathbf{r}}_r & 0 & 0 \\ \partial\rho / \partial\hat{\mathbf{r}}_r & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

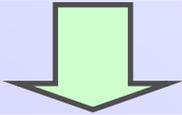
- カルマンフィルタによる更新則を適用

Ambiguity決定までの流れ

最小二乗実数解 (FLOAT解)



LAMBDA法で整数化



Ratio Testで検定 (threshold=2)



Ambiguity決定 (FIX解)

- FLOAT解が十分に収束すれば、一般的にFIXする
- FIXするまでの時間 (Time-to-fix) が早い程よい
- 電離層等の系統誤差の混入で、FIX時間が長くなったり不可能になったりする

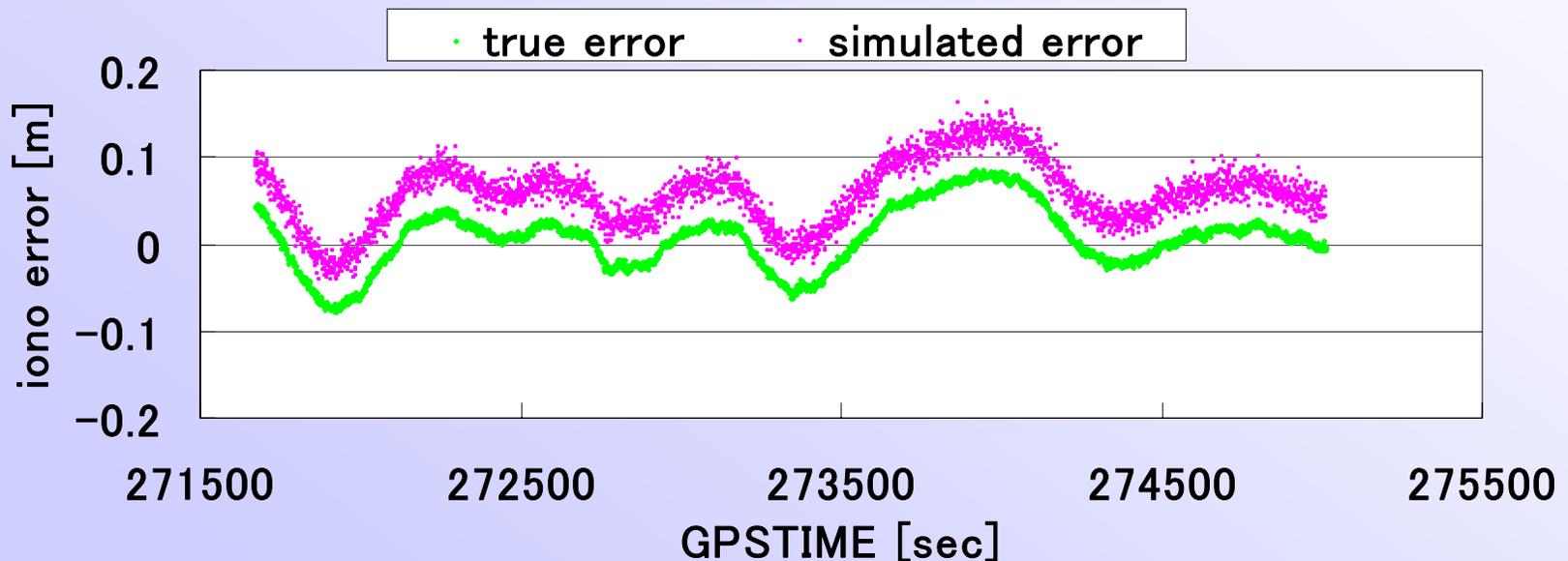
→ AmbiguityをFIXさせるまでの時間を短縮させることが求められる

電離層誤差のシミュレーション

- Gaussian-Noise or バイアス成分で構成
- 予め後処理で求められた電離層遅延に追加

$$\nabla \Delta I_{simulated} = \nabla \Delta I_{true} + \textit{Gaussian Noise}$$

or Bias

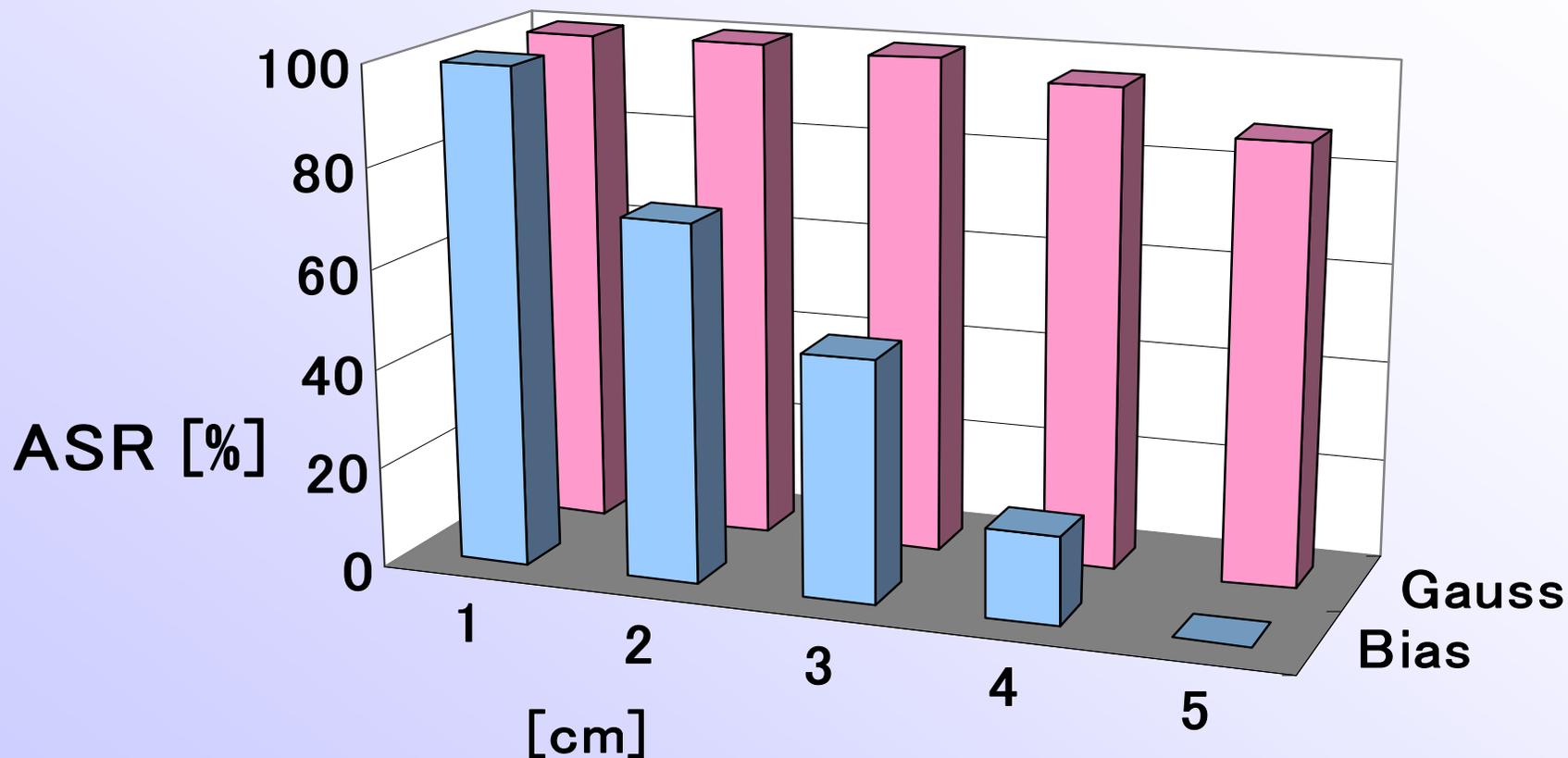


Bias 5cm + Gaussian 1cm の例

Ambiguity決定性能評価(1/2)～シミュレーション～

- 基線長 : 40km
 - (基準局 3067横須賀-移動局0227丸山)
 - 後処理で電離層及びその他の誤差を除去
 - 電離層遅延にそれぞれ次の誤差を加え、補正值とする
 - Gaussian-Noiseのみ : 1 ~ 5 (cm)
 - Bias 成分のみ : 1 ~ 5 (cm) → 計10通り
 - Ambiguity決定処理
 - 30秒ごとにカルマンフィルタ初期化
 - $10800\text{秒}/30\text{秒} = 360$ 回試行
 - 成功回数をカウント
- 30秒以内にAmbiguityがfixする確率を算出

Ambiguity決定性能評価(2/2) ~シミュレーション~



| Type | 1(cm) | 2(cm) | 3(cm) | 4(cm) | 5(cm) | |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| ASR (%) | Gauss | 100 | 100 | 99.4 | 96.1 | 87.8 |
| | Bias | 99.4 | 71.7 | 48.3 | 17.5 | 0.28 |

シミュレーションにおける考察

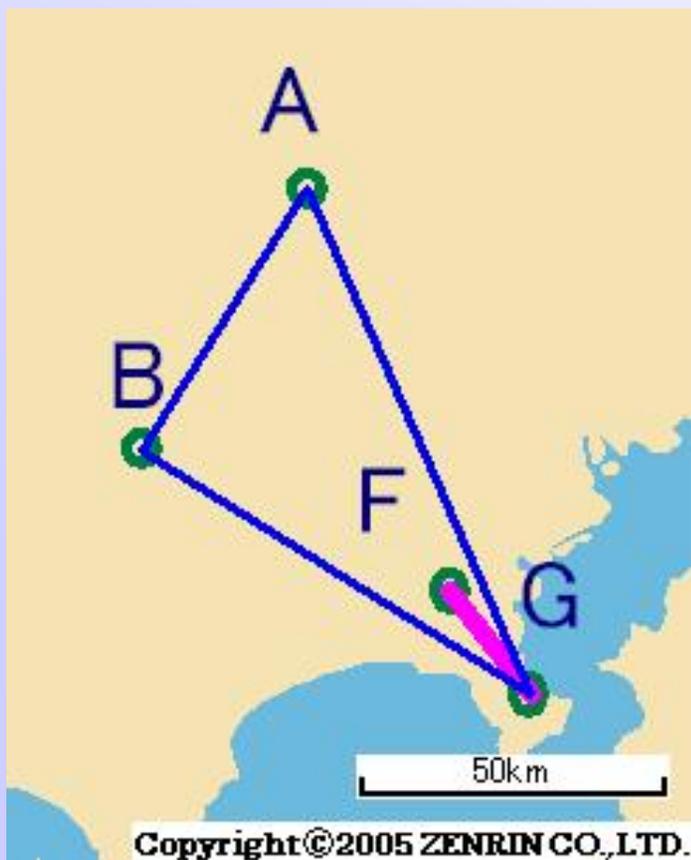
- Gaussian-NoiseよりもBias成分の方が、Ambiguity決定に影響を与える
 - ARが誤差をGaussianと仮定した整数最小二乗理論で成立
- 30秒以内に70%以上の確率でAmbiguityを決定するには
 - 電離層推定誤差を2cm以内に抑える必要性
 - 但し、電離層以外の誤差を十分な精度で補正する前提条件
- 実際にネットワークによる電離層推定精度を確認
 - いくつかの場合に分ける

ネットワークによる電離層推定精度(1/7)

- 3つのネットワークを使用
 - ① 基準局間隔を長くとしたもの
 - ② 多くの基準局を使用したもの
 - ③ 隣局一つのみを用いたもの
- 真の電離層誤差と推定された電離層誤差で比較し、RMS誤差を算出
- これらを調査することで、定性的ではあるが基準局選定の目安を示すことができる

ネットワークによる電離層推定精度(2/7)

① 基準局間隔を長くとしたネットワーク

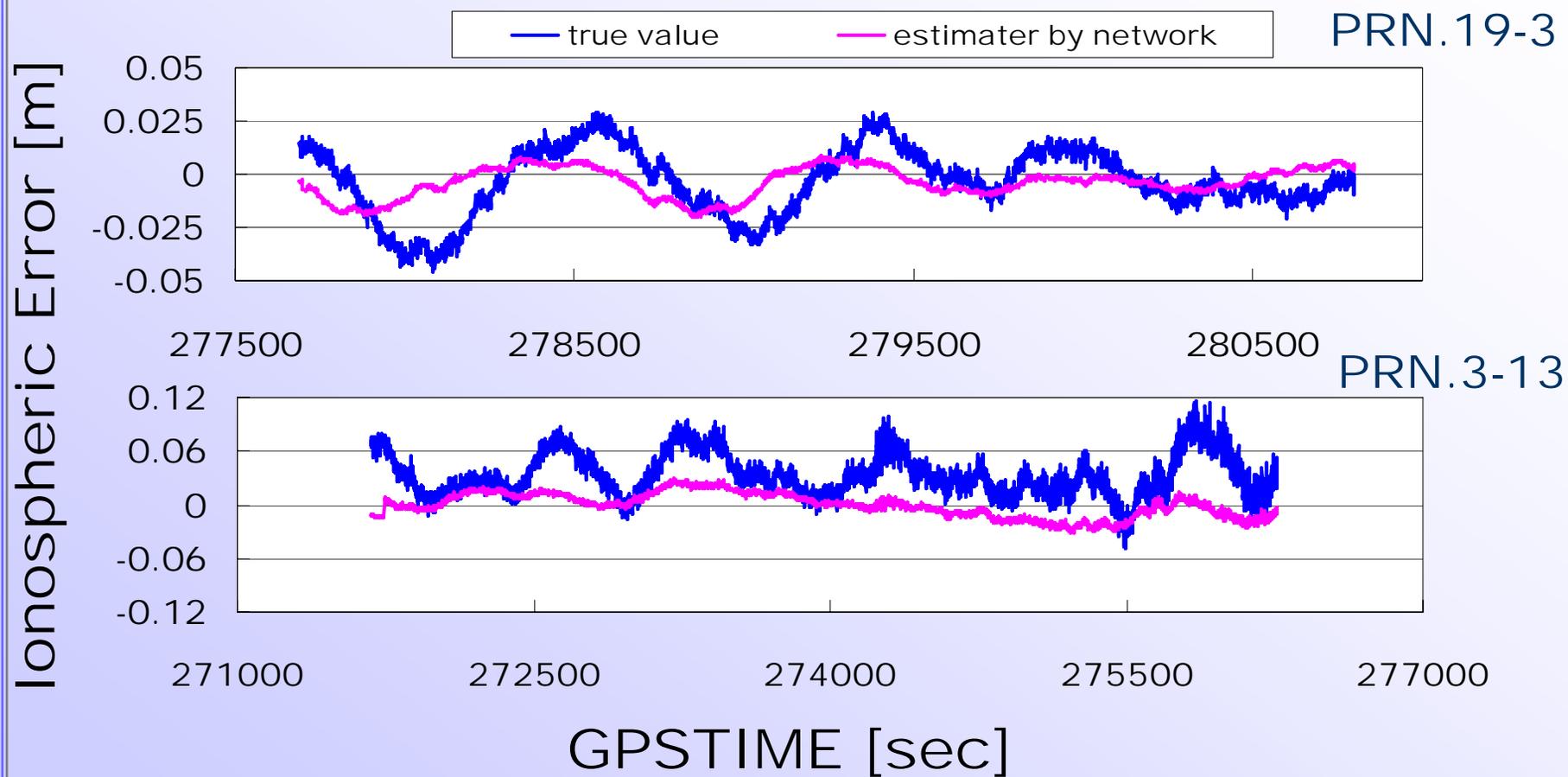


- 基準局間(GAやGB)が長くなると、移動局間(GF)との差が大きくなり推定が困難になるのでは??
- GF間 - 21km
- GA,GB間 - 約50km

線形補間でかかる係数

| ID | GA | GB |
|-------------|------|------|
| Coefficient | 0.14 | 0.12 |

ネットワークによる電離層推定精度 (3/7)

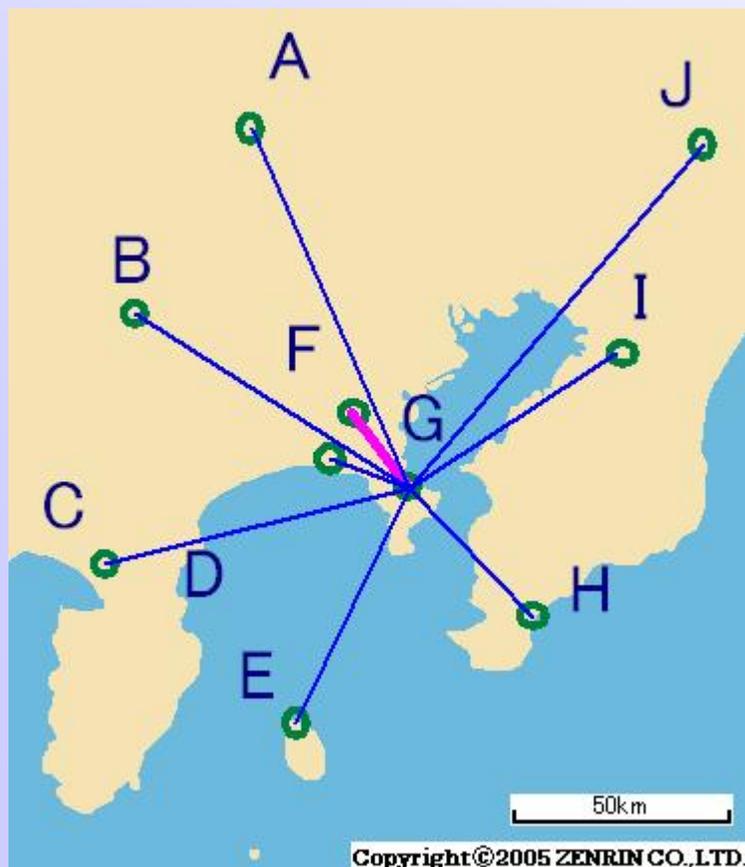


①による電離層推定値のRMS: 4.00 [cm]

ネットワークによる電離層推定精度(4/7)

② 多くの基準局を使用したネットワーク

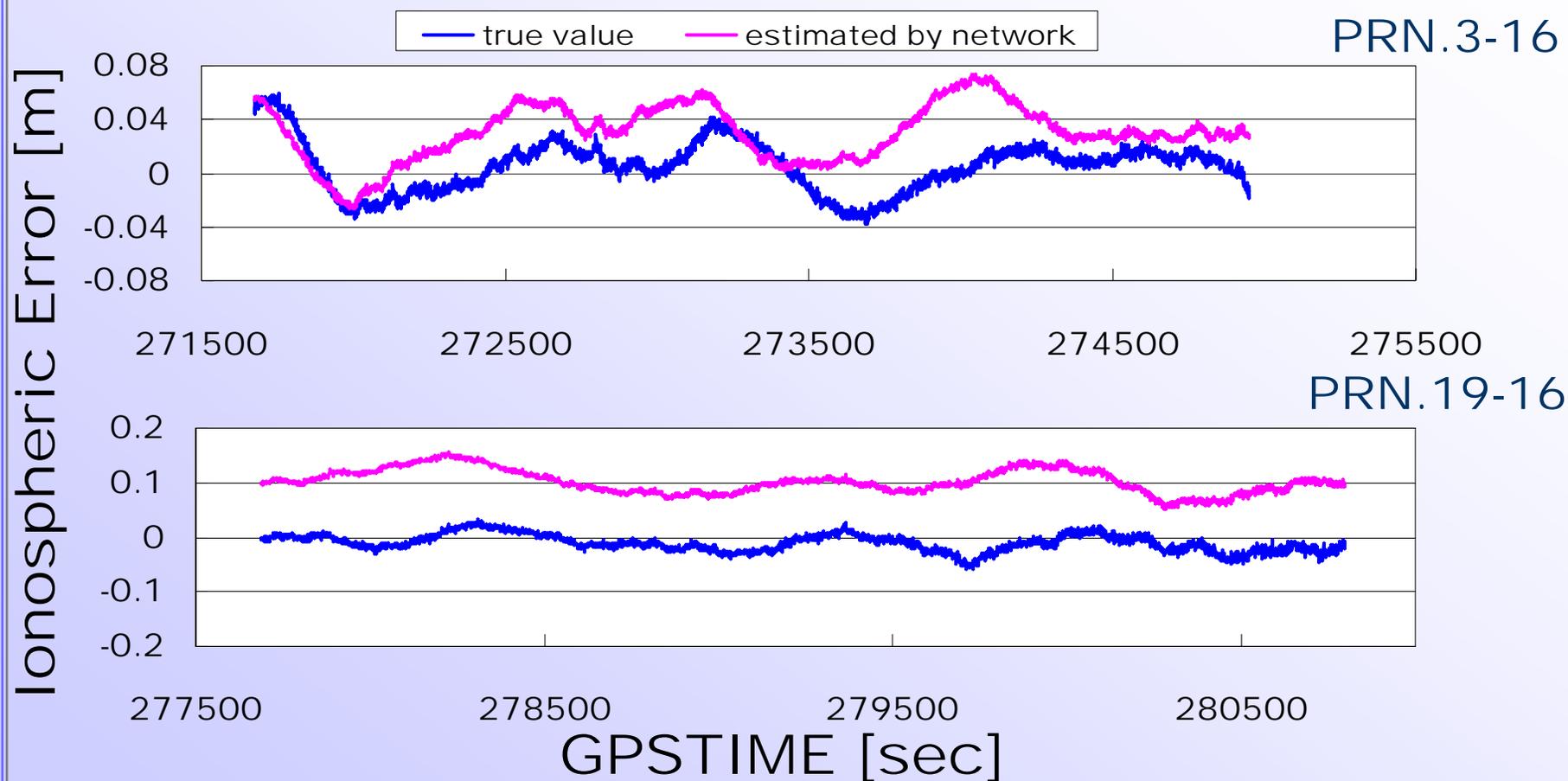
- 基準局を多く増やすことで、推定精度が上がるのではないか？
- 基準局間が長いことが難点



線形補間でかかる係数

| ID | GA | GB | GC | GD |
|-------------|------|------|------|------|
| Coefficient | 0.12 | 0.17 | 0.13 | 0.08 |
| ID | GE | GH | GI | GJ |
| Coefficient | 0.12 | 0.07 | 0.11 | 0.17 |

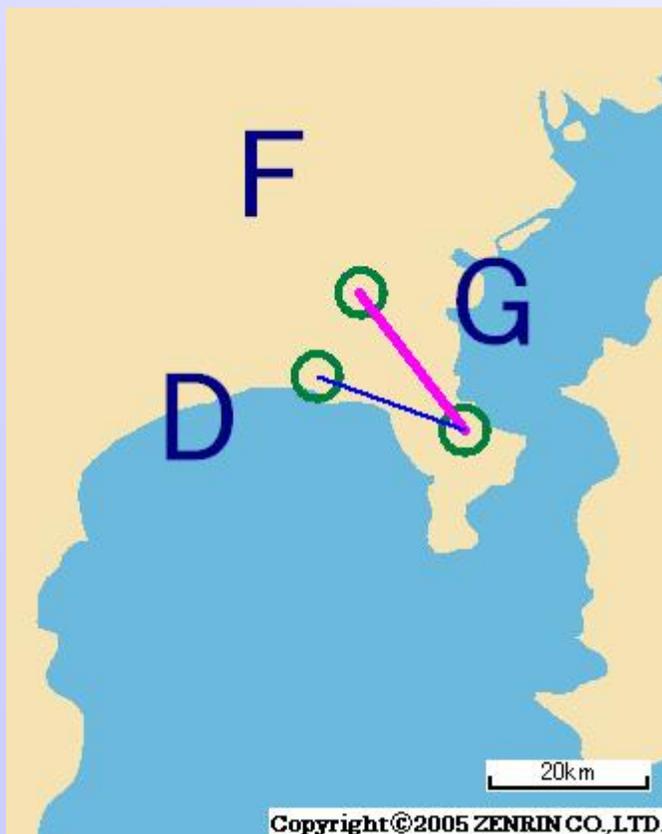
ネットワークによる電離層推定精度 (5/7)



②による電離層推定値のRMS: 6.92 [cm]

ネットワークによる電離層推定精度(6/7)

③ 隣局一つのみを用いたネットワーク

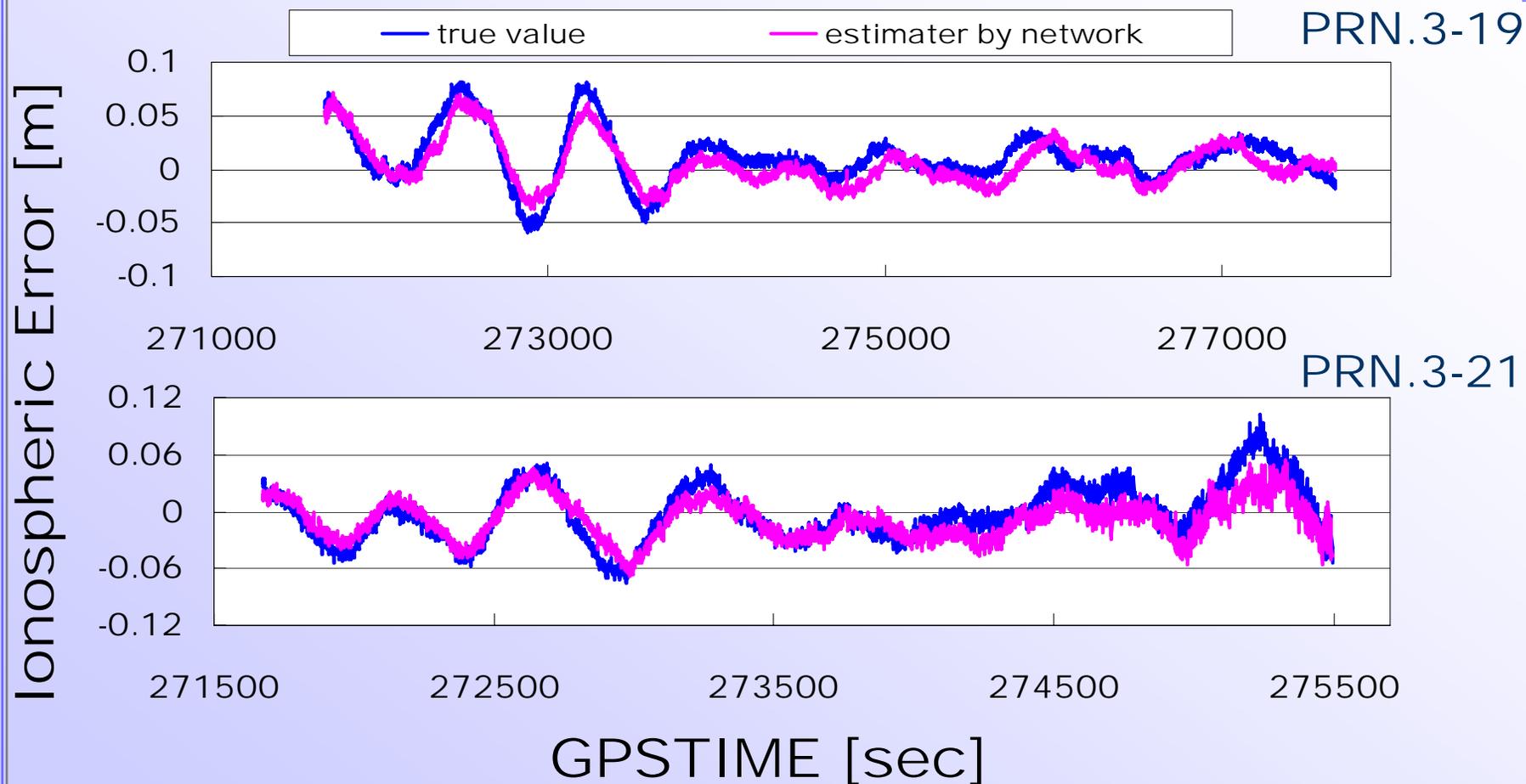


- 単純に移動局に一番近い基準点のみを選択
- GD間の電離層遅延をそのまま推定値として補間する
- GF間 - 21km
- GD間 - 19km

線形補間でかかる係数

| ID | GD |
|-------------|------|
| Coefficient | 1.00 |

ネットワークによる電離層推定精度(7/7)



③による電離層推定値のRMS: 1.84 [cm]

電離層推定における考察 ～ネットワーク～

- 基準局間の距離と移動局までの距離との差が大きいと電離層推定はうまくいかない(①より)
- 基準局が多ければ、良いというわけではない(②より)
 - 電離層変動をとらえることはできたが、バイアス成分の残留
- 単純に隣局の電離層遅延を用いた場合の精度が一番良かった(③より)

- 線形補間の限界を示すことができた
- なるべく移動局に近いところで基準局を選定すべき
 - しかし電子基準点によっては、局間隔の広い所がある
- シミュレーション結果より、③であれば30秒以内に70%以上の確率でAmbiguityを決定できる
 - 各ネットワークによる電離層推定値で、Ambiguity決定性能の評価

Ambiguity決定性能評価 ～ネットワーク～

- ①,②,③の電離層補正值を用いて、AR処理
- 電離層以外の誤差は十分な精度で補正できると仮定
- 基線長:21km
- Ambiguity決定処理
 - 30秒ごとにカルマンフィルタ初期化
 - 360回試行し、成功回数をカウント

| | ① | ② | ③ |
|---------|------|-----|------|
| ASR [%] | 11.4 | 0.8 | 67.5 |

30秒以内に十分な確率でAmbiguityを決定することはできなかった

Ambiguity決定性能における考察 ~ネットワーク~

- ①,②では推定精度が悪いためAmbiguityをfixできなかった
- ③ではRMS誤差1.8cmの推定精度で30秒以内にfixする確率は67.5%

- シミュレーションとほぼ同じ結果
- 2cm以内の精度がないと、長時間でもfixしなくなってしまう
- 市販製品ではもう少しASRが上がるが、大きな性能向上は見込めないのではないか

本発表のまとめ

- シミュレーションにおいて、電離層推定精度とASRの関係を調査した
 - 2cm以内の電離層推定精度で30秒以内のfix率70%
- 3つのネットワークで電離層推定精度を調査した
 - バイアス成分が多く、ARに影響してしまうような精度
 - なるべく移動局に近いところに基準局選定の必要
- 各ネットワークでのAmbiguity決定率を算出した
 - ほぼシミュレーション通りの結果となった
 - RMS**1.84cm**の電離層推定精度で30秒以内のfix率**67.5%**
- 結論
 - 実用上電離層の推定精度を2cm以内に抑える必要がある
 - ネットワークによる線形補間で2cmの推定精度を得ることは、条件によっては不可能であることを示した

今後の課題

- 電離層遅延の高精度推定の必要性
 - Ambiguity決定のため
- 2cm以内で電離層を推定できる条件を調査
 - 電子基準点間隔が、場所によっては40kmを超える
 - 統計的に基準局間距離を変化させ推定精度の研究
- 電離層推定がうまくいかない場合、残留誤差を別途推定する必要がある
 - 残留誤差推定の定式化

Thank you ...

- Give me a comment & question ...
 - Give me a comment & question ...
-

従来の研究と本研究の位置づけ

- D.Odijk、「Fast precise GPS positioning in the presence of ionospheric delays」、2002
 - K.Kondo、「GPS/GNSS高精度測位に対する電離圏全電子数分布による影響」、2003
 - T.Tominaga、「GPS測位における電離圏の影響」、2005

 - 新規性はないが、必要とされる電離層推定精度について、統計的及び定量的に示すような研究は少ない
-

本研究とは...

VRSやFKPなどのネットワークRTK測位システム

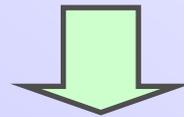


←電子基準点の利用

電子基準点での局間隔の長い場所に着目

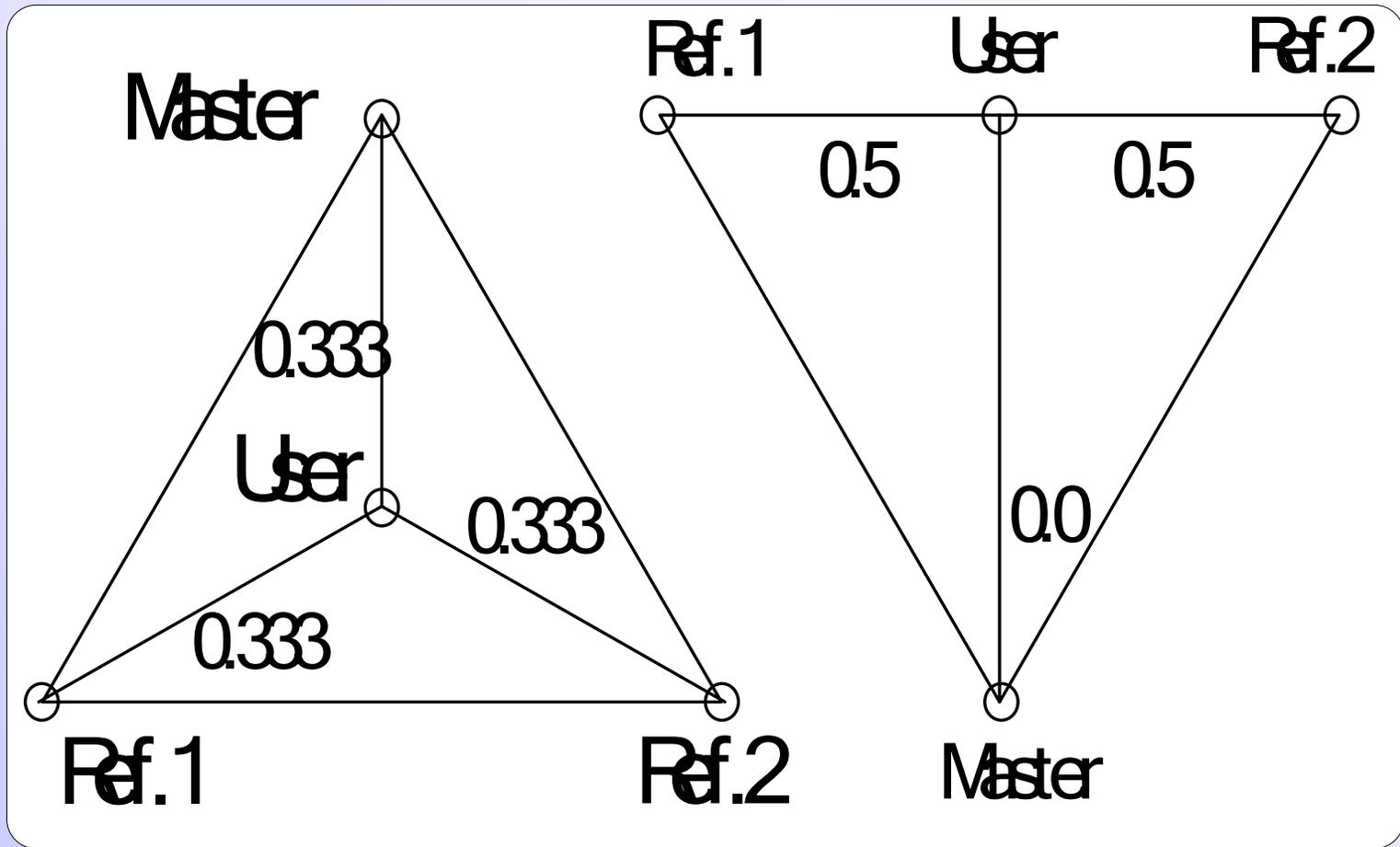


電離層誤差を線形補間で十分推定できているか？
推定誤差がAmbiguity決定にどんな影響を与えるのか？



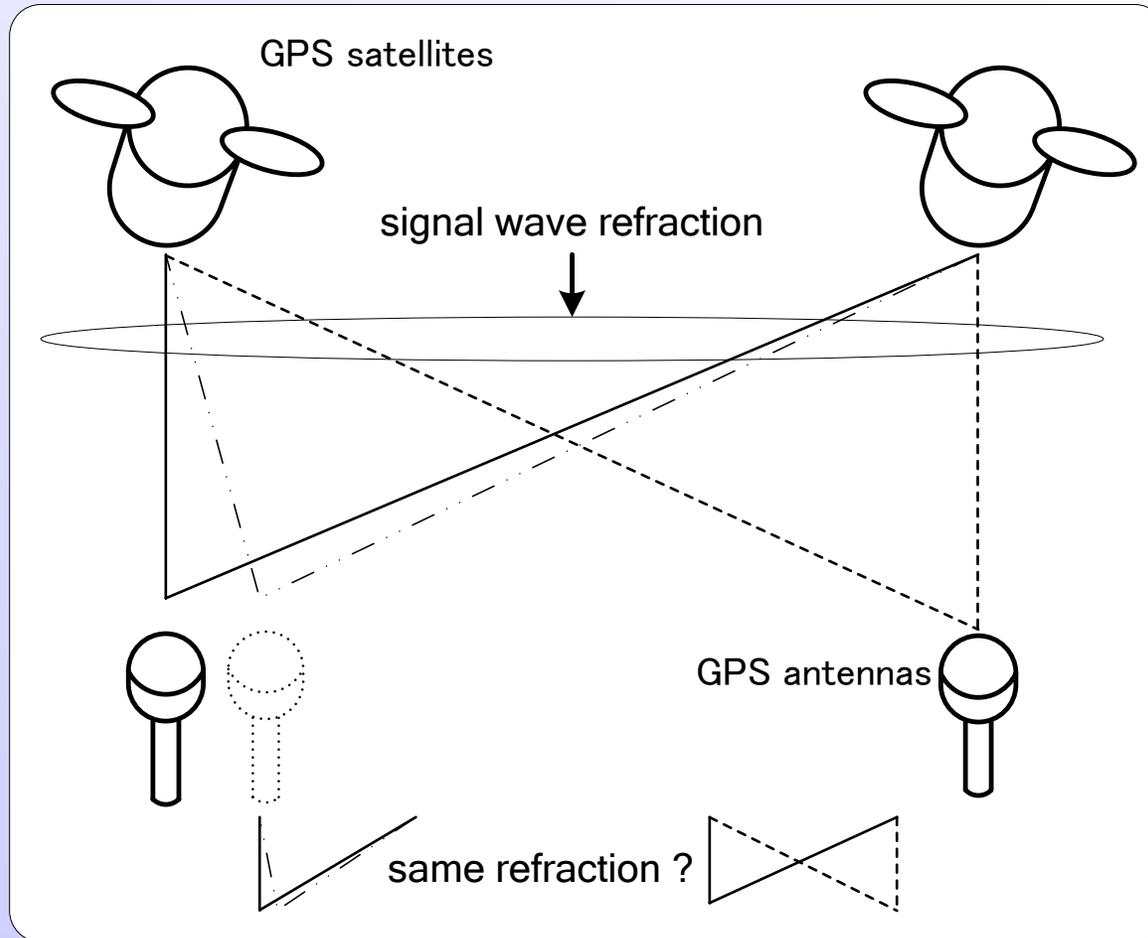
定量的に示す

線形補間方法 ~重み係数のつけ方~



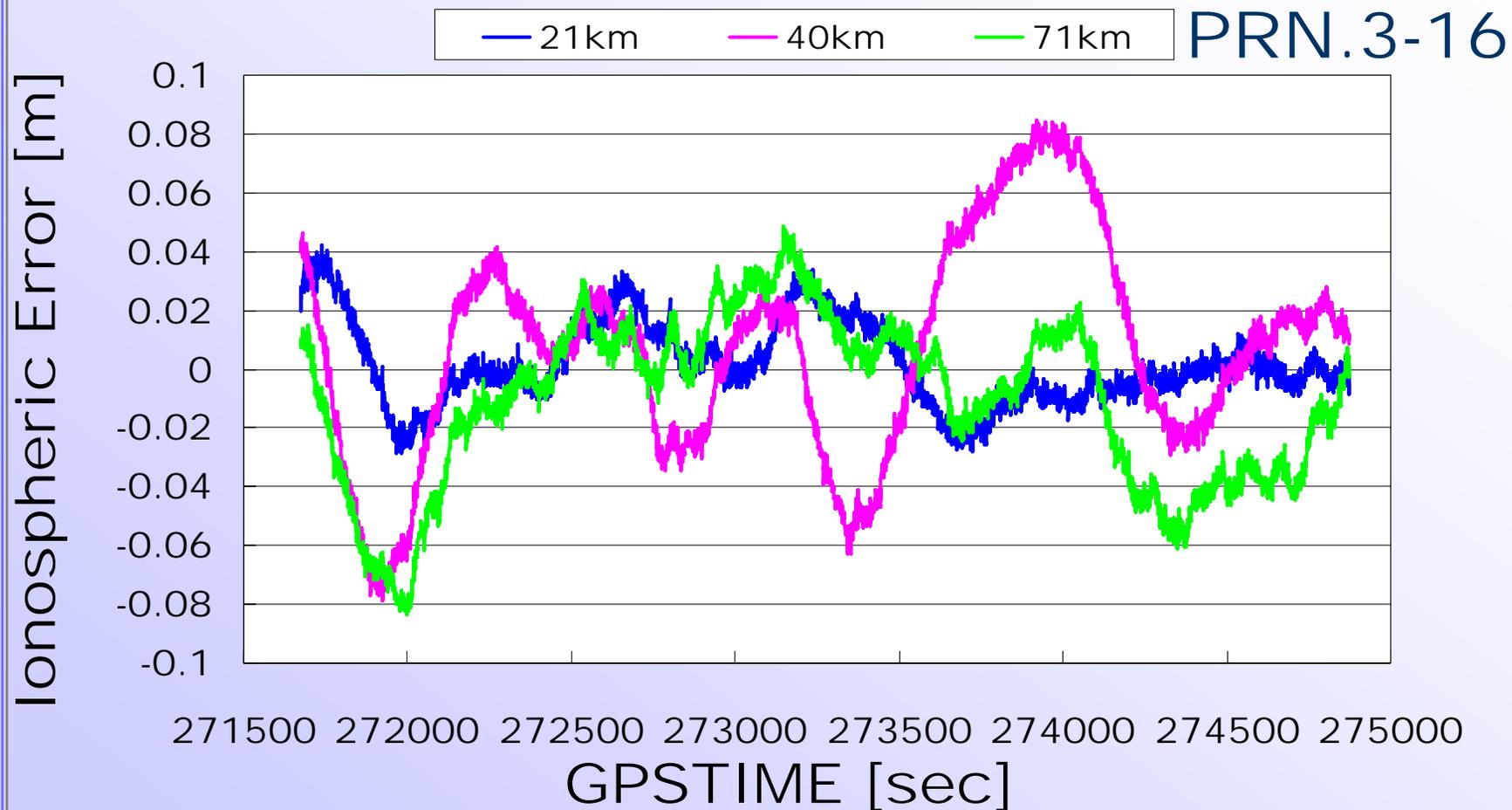
係数の和が1、係数×移動局-基準局間ベクトルの和が0

二重差と基線長について



アンテナ間距離が離れると、伝搬経路の違いから誤差の消去が不可能になる

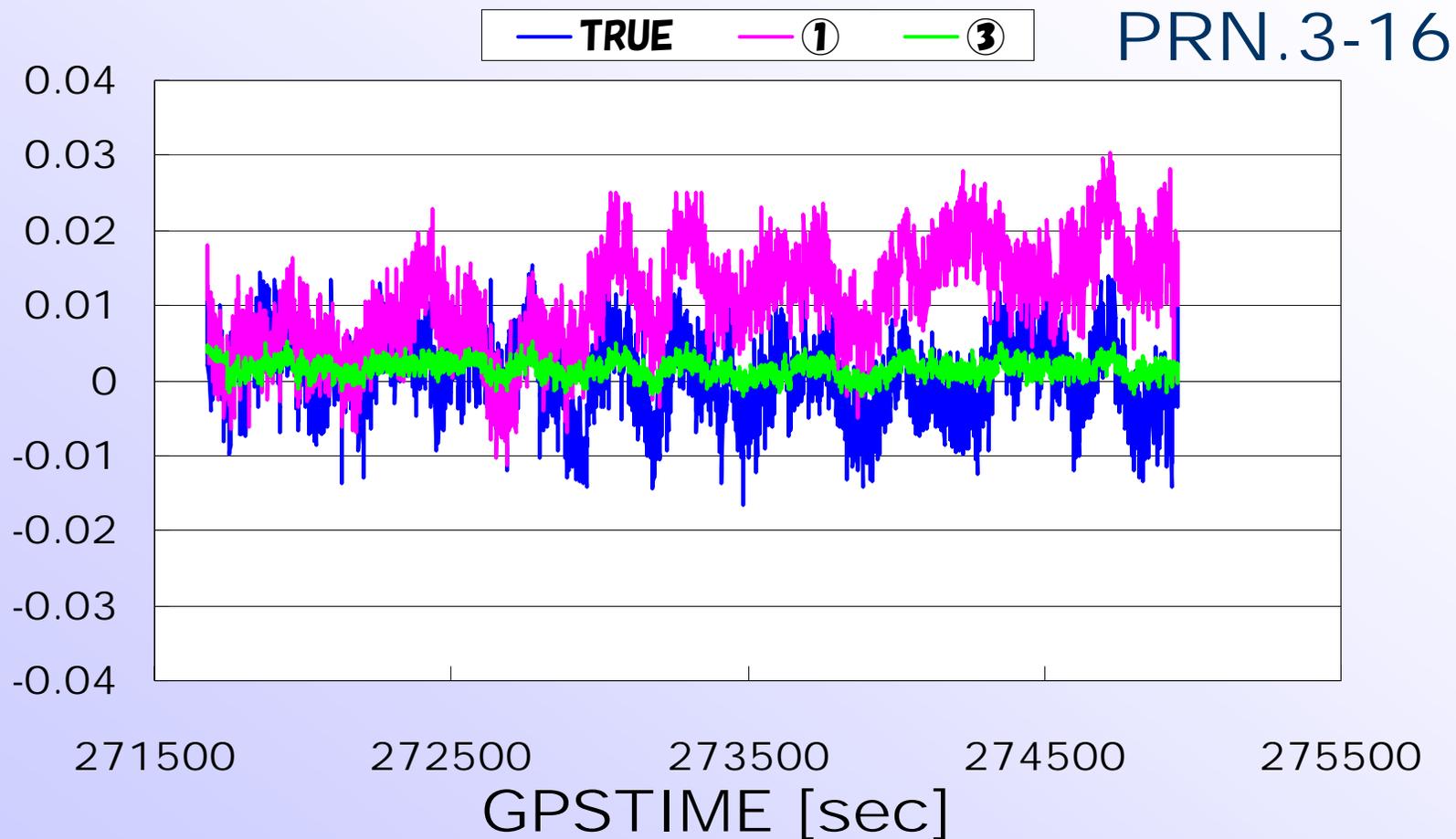
基線長に対する電離層誤差例



基準局3067横須賀、移動局3034藤沢、0227丸山、3043清水

電離層以外の誤差の線形補間について

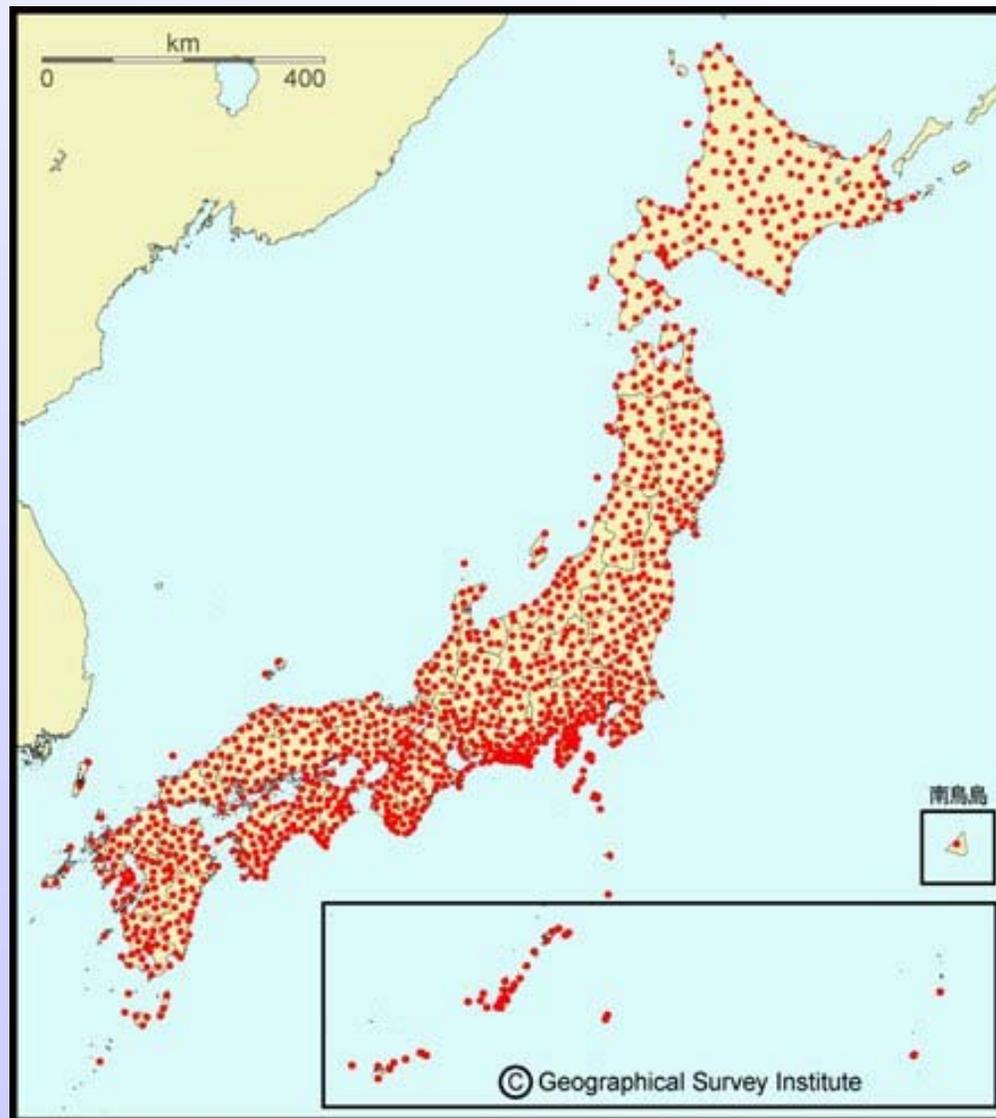
Non-dispersive Error [m]



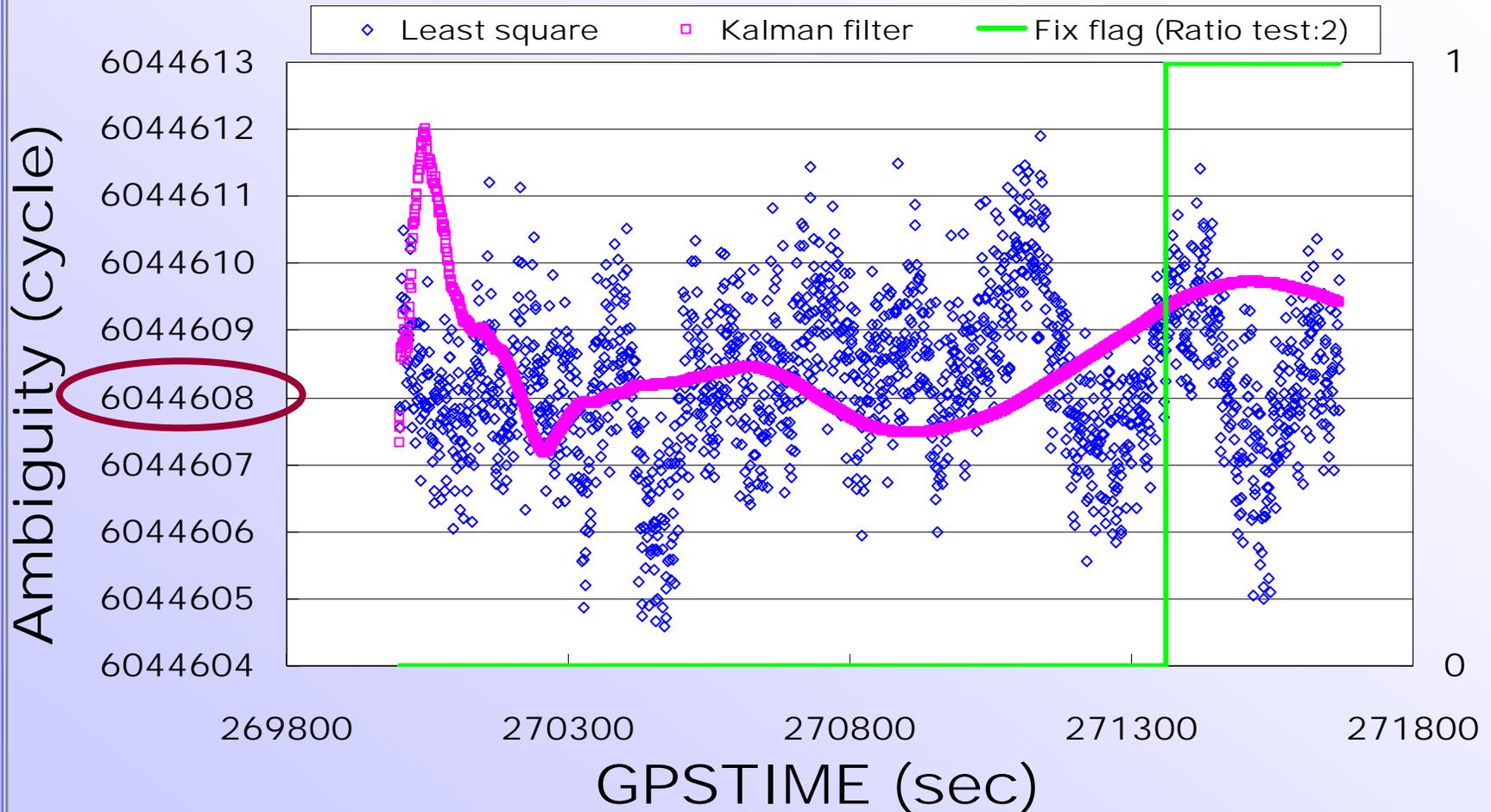
電離層以外の誤差推定値RMS:

① 4.00 [cm] ② 9.89 [cm] ③ 4.19 [cm]

ネットワーク補正の問題点 ~補足~



Ambiguity決定までの流れ ~補足~



基準局3034藤沢-移動局3067横須賀、基線長19km、
FIXするまで約20分