

# GPSにおけるマルチパス誤差と 今後の動向

東京海洋大学  
久保信明

---

# 発表の内容

- GPSにおけるマルチパス誤差について
- 実際のマルチパス(観測データや統計値)
- 擬似距離とマルチパスの関係
- マルチパス誤差評価手法
- マルチパス誤差低減技術の紹介
- 高感度受信機と高精度用受信機の比較
- まとめ

## なぜマルチパスか？

- DGPSにおいて、数mから10mを超える誤差の要因は、ほとんどマルチパス(電波環境)の影響。
- RTKにおいて、できるだけ早く(できれば1エポックで)数cmの精度を得るには、どうしてもDGPSの測位精度が1~2m以内で安定していることが重要→実際は困難。

# GPSにおけるマルチパス

- 船舶、航空機や自動車などを対象とする移動体衛星通信の伝搬路では、それら地球局が移動することによって**伝搬路が遮蔽**されるなど、**伝搬特性が絶えず変化する**特徴がある。
- 移動地球局の周囲にある障害物、すなわち、海面、樹木、建物、陸橋、移動体自身の構造物からの**電波の反射、散乱、回折や遮蔽**などを考慮に入れなければならない。
- GPS測位では、特に周囲の障害物によるマルチパス波が問題になる事が多い。**衛星を見通せる状態での通信が前提**。見通しがない場所で測位可能な高感度受信機技術の開発が、近年活発に行われているが、数m程度の精度を期待することは現段階ではできない。

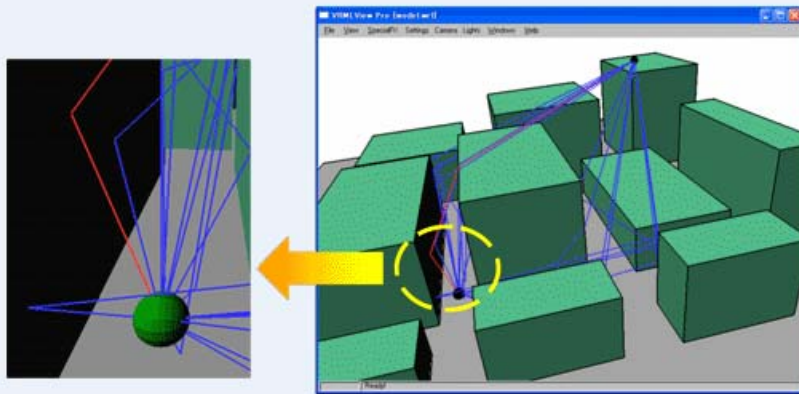
# 都市部ビル街でのシミュレーション (携帯等の伝搬とのとらえ方の違い)

## RapLabとは?

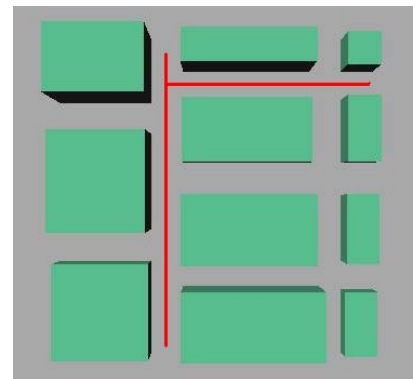
### - RapLabとは

建物や屋内のモデルにTx(送信機),Rx(受信機)を設置し、電波の経路をシミュレーションすることが出来ます。

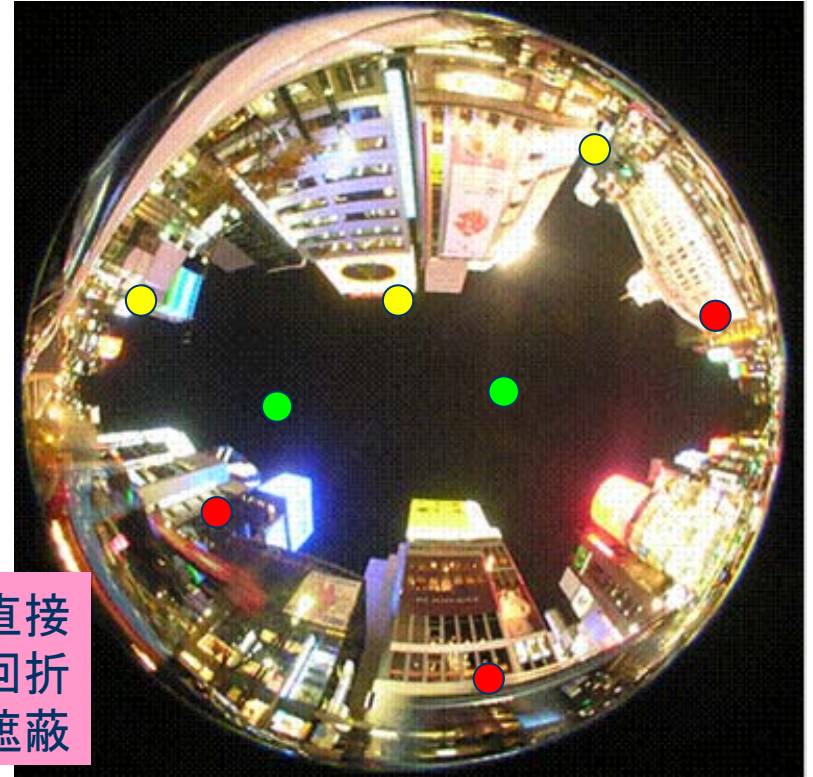
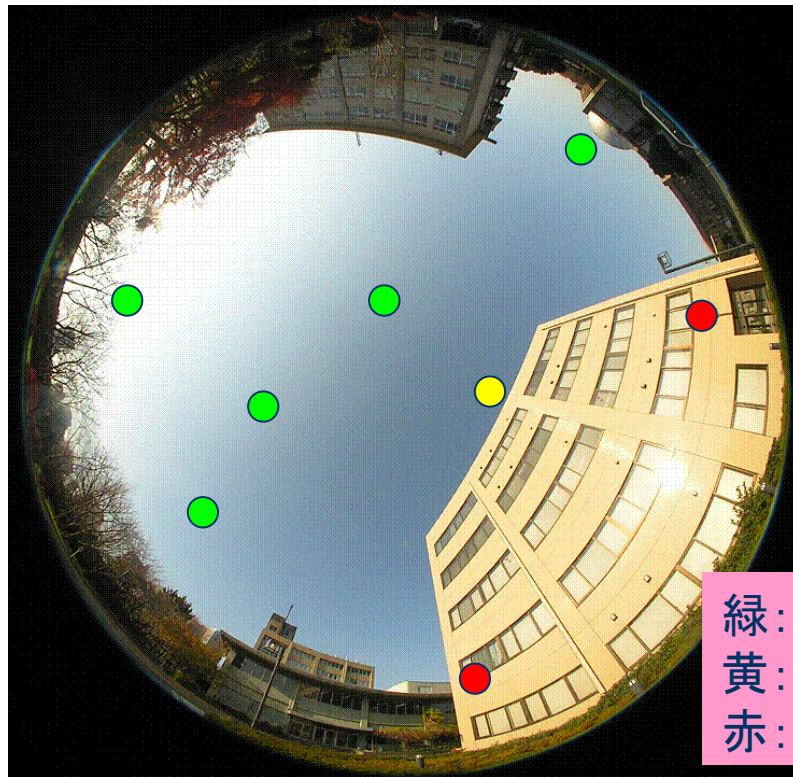
- ・電波を可視化してパスを見ることができます
- ・伝搬損失、受信レベルをグラフ化して見ることができます
- ・経路の詳細がわかります



GPS以外では、複数のマルチパス波の影響を総合的に分布としてとらえる傾向があるが、GPSの場合は、距離測定に用いている関係で直接波と1回程度の反射波や回折波を考慮すれば良い。



# 2つの地点の天空写真 (架空の同じ衛星配置)



緑: 直接  
黄: 回折  
赤: 遮蔽

海洋大構内

GPS/GNSSシンポジウム

銀座交差点

2006/11/15

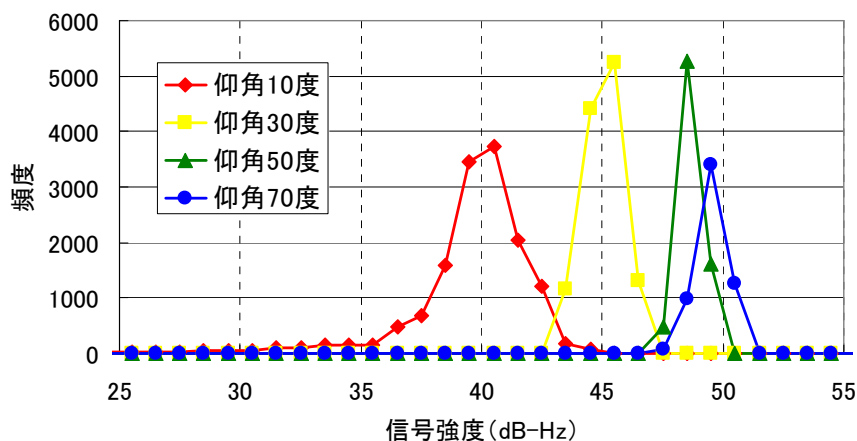
# 発表の内容

- GPSにおけるマルチパス誤差について
- **実際のマルチパス(観測データや統計値)**
- 擬似距離とマルチパスの関係
- マルチパス誤差評価手法
- マルチパス誤差低減技術の紹介
- 高感度受信機と高精度用受信機の比較
- まとめ

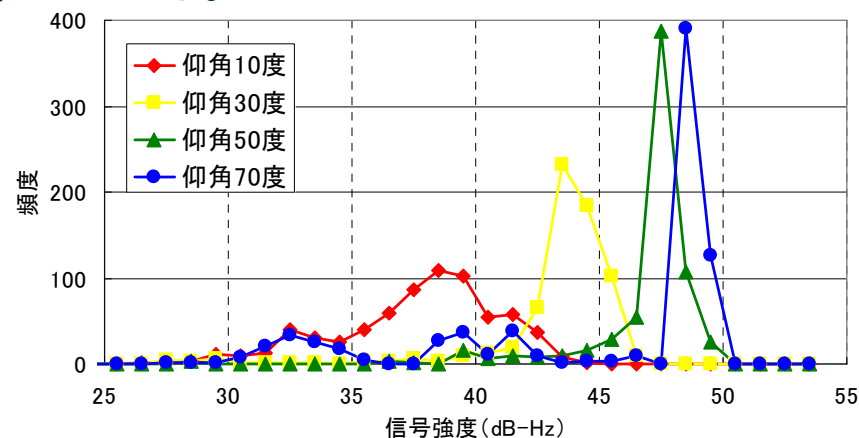


# 観測データ(信号強度)

仰角10度のラインは、9.5度から10.5度の観測データで1dBごとの区間の頻度を表わしている。



屋上データ(24時間)



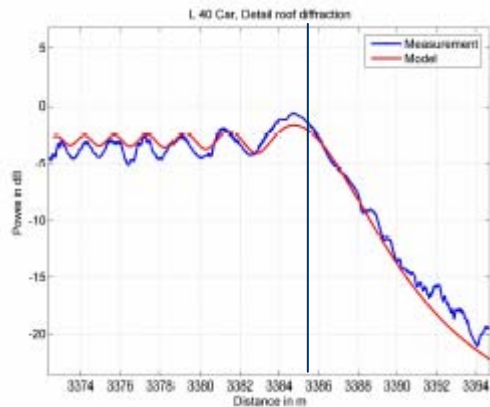
車走行データ(2時間弱)  
(晴海、構内、月島、佃島)

明らかに車走行データのほうが、信号強度が低いほうに分布の広がりが見られる→回折や反射の影響

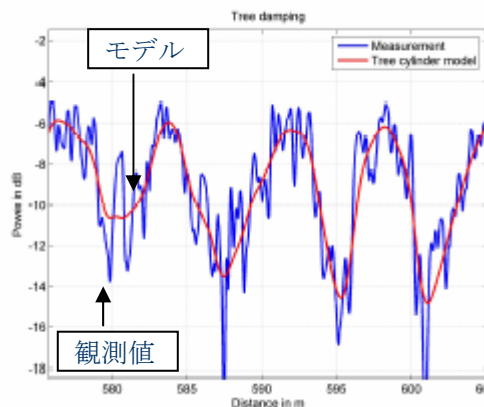


# 様々な伝搬環境での信号強度

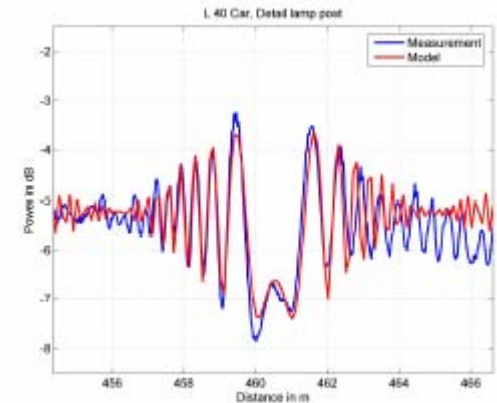
青が観測値で赤がモデルによる計算結果



建物エッジによる回折



複数の木による回折



電柱(20cm)による回折

	Open	Rural	Suburban	Urban
15度	27.0	11.0	15.5	4.5
30度	26.5	16.0	21.5	11.5
45度	29.0	18.5	22.0	17.5

様々な環境でのマルチパスの強さ  
SMR (Signal to Multipath Ratio)  
 $SMR = 20 \log(1/\alpha)$   $\alpha$  は振幅比  
0.5 → 6   0.2 → 14   0.1 → 20

# 市街地での問題点

- なによりも可視衛星数が足りない→**ガリレオ又は準天頂に期待**
- 可視衛星数が4～5個程度の時、衛星配置が悪くなることがよくある(特に壁付近だと片側の配置になりやすい)→**同様に、ガリレオや準天頂に期待**
- 電波の反射、散乱、回折や遮蔽の影響が起こりやすい→**信号強度である程度判別可能**

反射の影響については低減手法の部分で詳しく見ていく

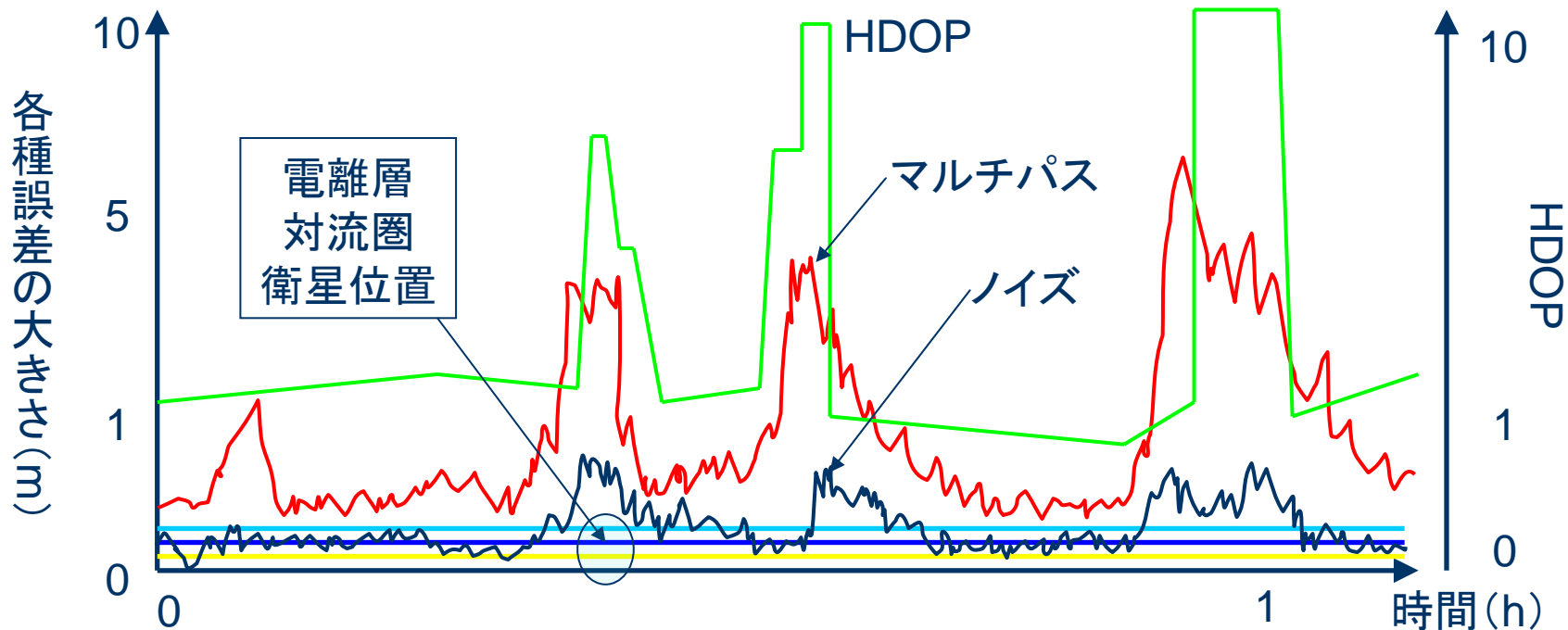
# 測位精度を決定する主要因 (コードを用いた場合)

誤差源	誤差の大きさ	誤差低減効果
衛星時計と軌道 予測値	時計と軌道は、ともに2m程度 (rms)	DGPSで双方ともに <b>0.1m 程度</b>
電離層遅延	天頂方向は2mから10m程度で、 仰角が低いとさらに増大	放送モデルで50%程度 低減。DGPSで <b>0.2m程度</b>
対流圏遅延	天頂は2m程度で、仰角が低いと さらに増大	モデル使用で1m以内。 DGPSで <b>0.2m程度</b>
マルチパス	<b>環境良で1m以内程度</b>	アンテナ固有なのでなし
受信機雑音	<b>10cmから50cm程度</b>	受信機固有なのでなし

測位誤差 = 衛星配置 (DOP) × 上記の誤差

都市部では、衛星配置とマルチパス誤差が問題になる事が多い

# 市街地での各種誤差の変動



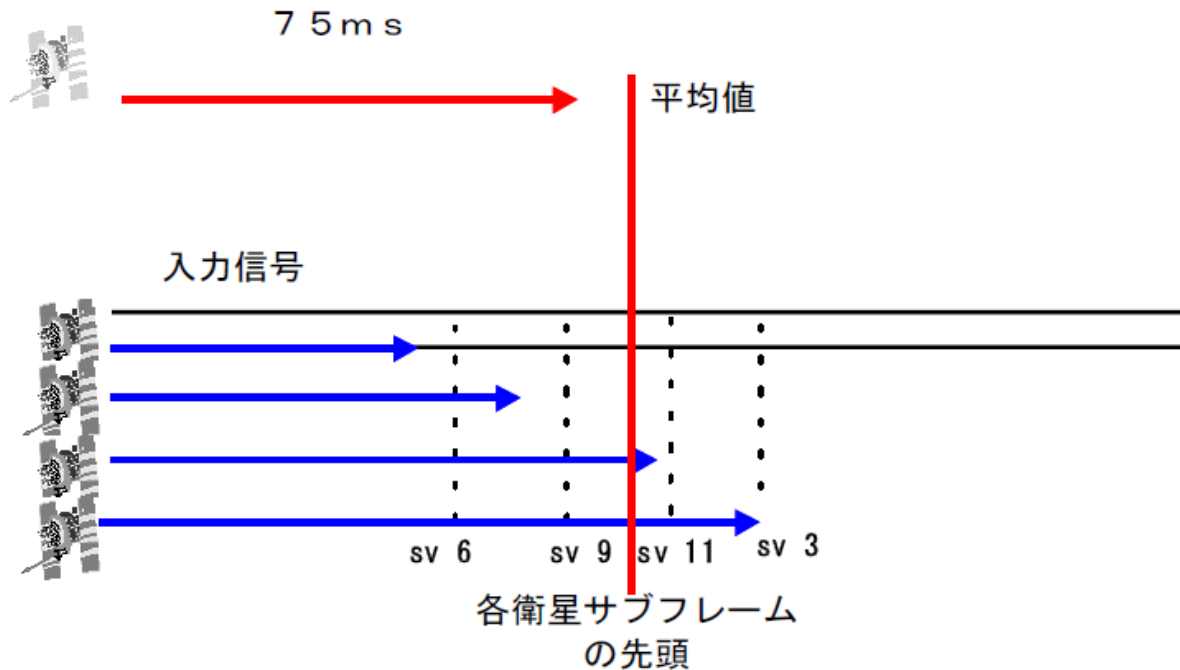
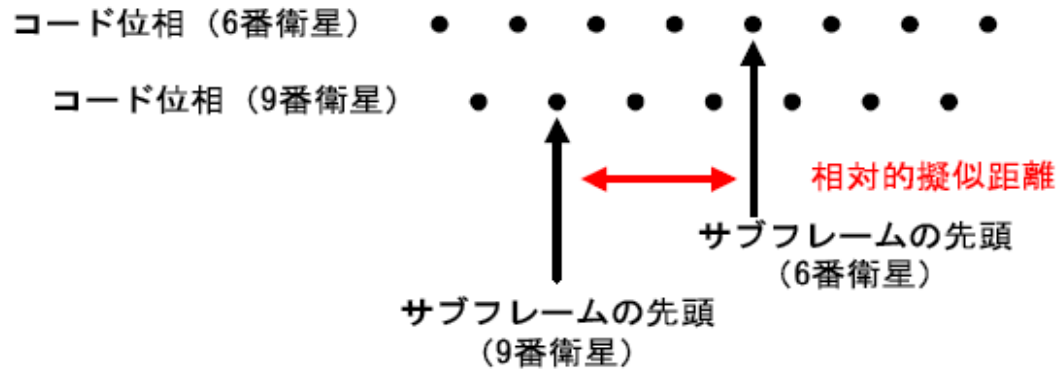
# 様々なマルチパス誤差低減手法

- アンテナによる低減→まずはアンテナで低減
- 空間的なdiversityを利用したもの
- 1日毎に同じ誤差を繰り返すことを利用(静止)
- 最尤推定法でマルチパスを推定
- 信号の品質でまずチェック→わりと重要
- コリレータによる低減技術
- センサーとの融合やデッドレコニング、フィルターで飛びを抑制

# 発表の内容

- GPSにおけるマルチパス誤差について
- 実際のマルチパス(観測データや統計値)
- 擬似距離とマルチパスの関係
- マルチパス誤差評価手法
- マルチパス誤差低減技術の紹介
- 高感度受信機と高精度用受信機の比較
- まとめ

# 擬似距離測定の方法

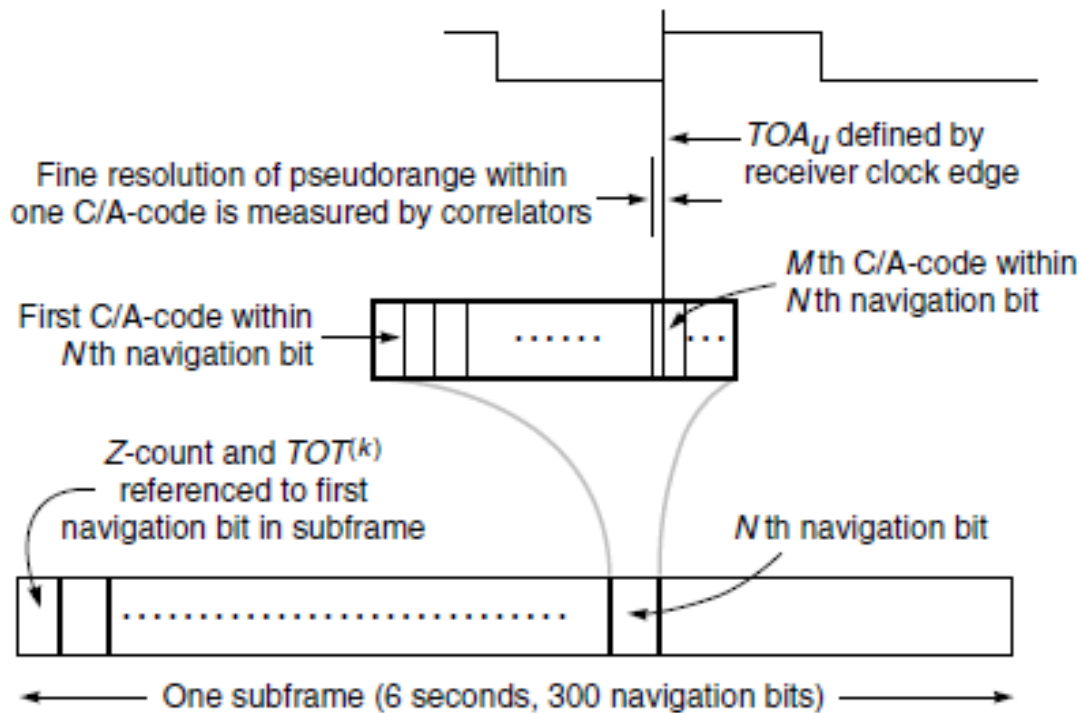




# 擬似距離測定

- 擬似距離 = 光速 × (受信時刻 - 衛星発射時刻)
- ここで受信時刻は自分の時計で測定。衛星発射時刻は自身が解読している情報から計算
- 衛星発射時刻 = Zカウント
  - + 航法ビット数
  - + C/Aコードの数
  - + C/Aコードチップの数
  - + C/Aコードチップの位相

# 擬似距離測定



1つのC/Aコードに  
1023チップ

20個のC/Aコード

6/300=20ms

航法ビット数、現在の航法ビットの先頭から数えたC/Aコードの数、  
現在のコードの先頭から数えたC/Aコードチップの数、現チップの位相

# DLLは前スライドの2つの要素を決定

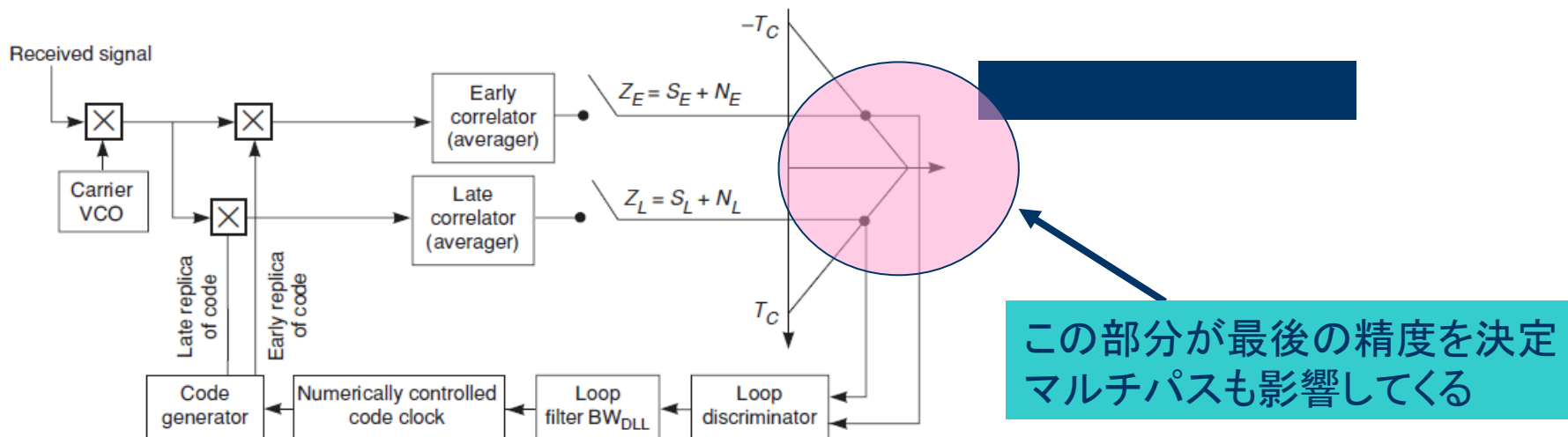
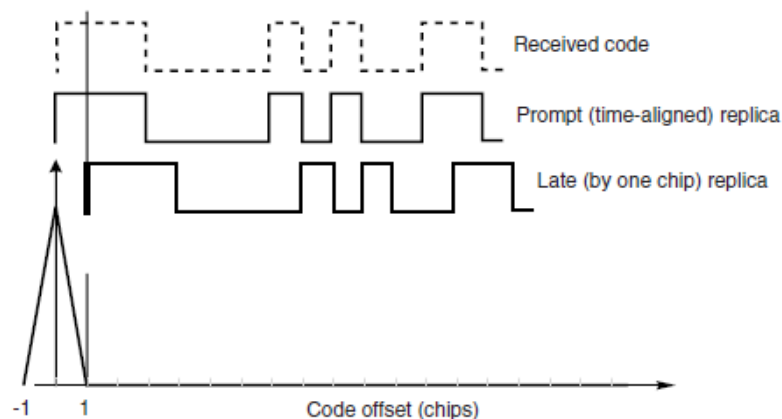
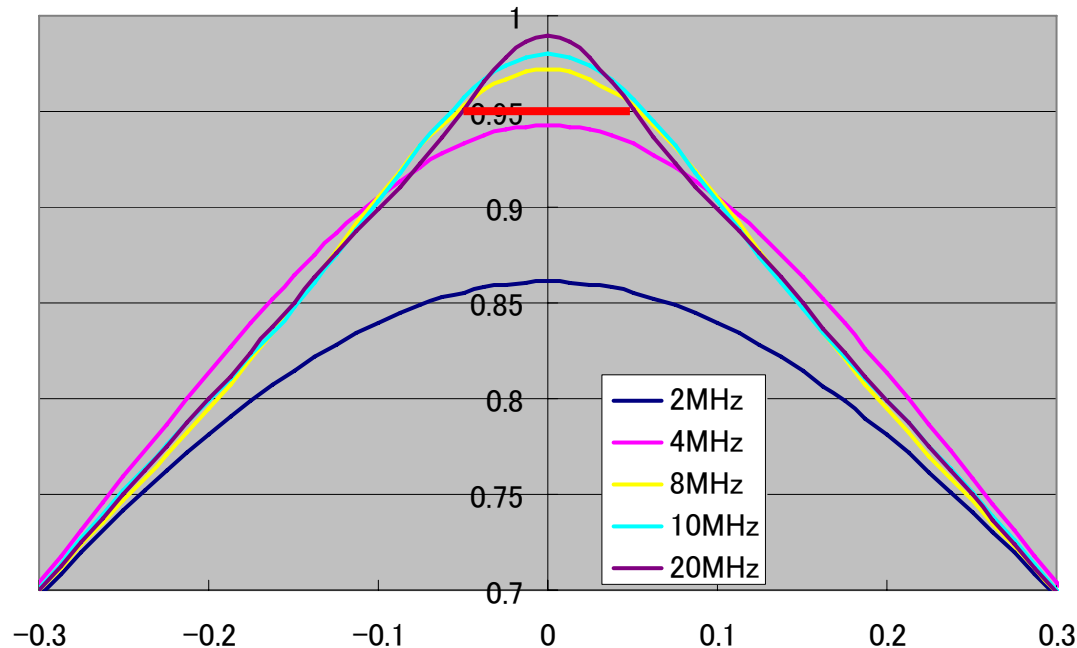


Figure 8.11 GPS delay lock loop to track code phase.



# ピーク付近の相関波形の鋭さが が必要な理由について



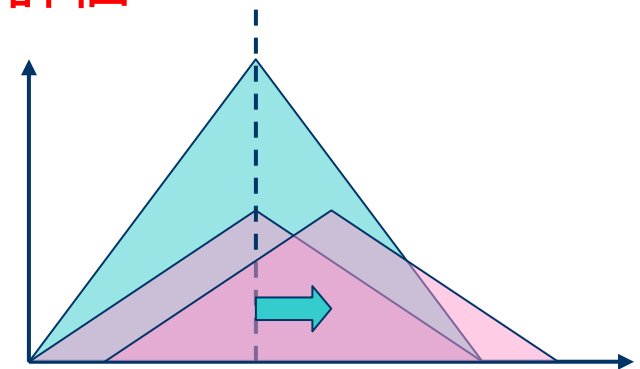
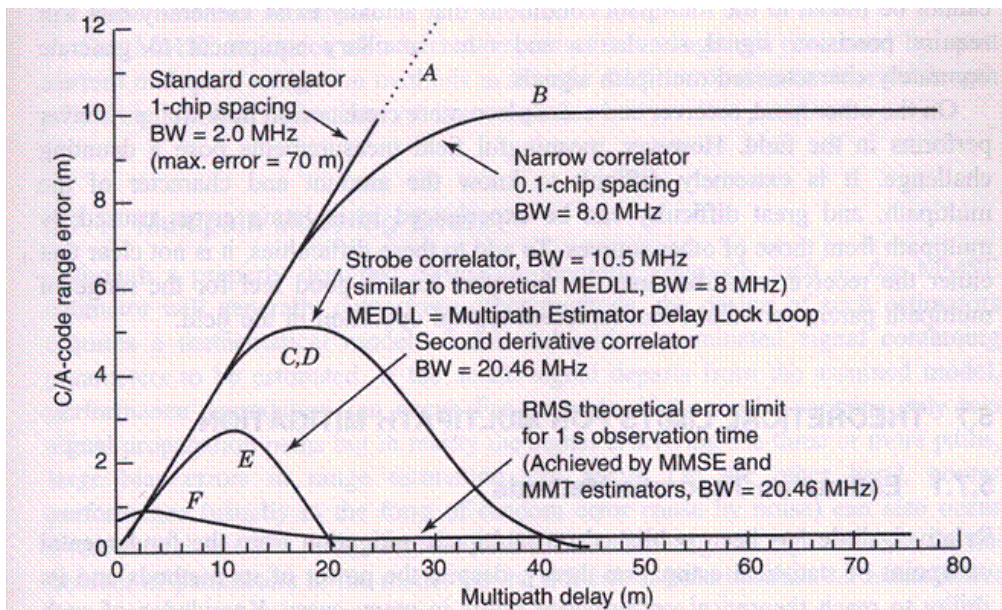
相関波形は、受信機内部の帯域幅によって異なることが知られており、例えば、0.1chipのナローコリレータを有効に動作させるには、8MHz程度の帯域が必要。

# 発表の内容

- GPSにおけるマルチパス誤差について
- 実際のマルチパス(観測データや統計値)
- 擬似距離とマルチパスの関係
- **マルチパス誤差評価手法**
- マルチパス誤差低減技術の紹介
- 高感度受信機と高精度用受信機の比較
- まとめ

# マルチパス低減効果の評価方法

- 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



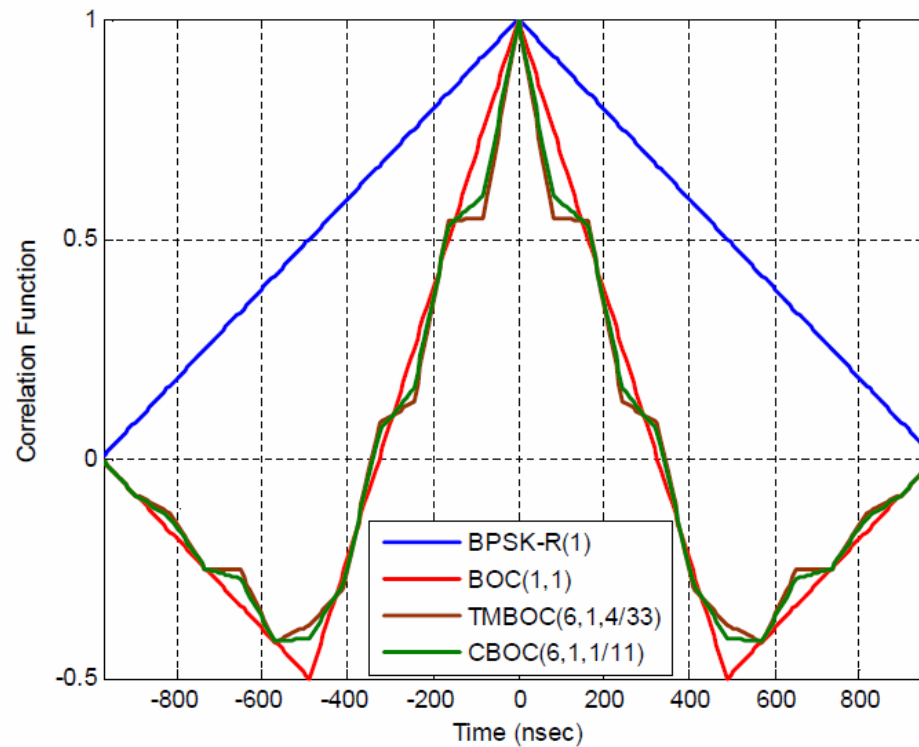
振幅比0.5のマルチパス波が遅延距離で0~80m付近まで存在したと仮定した場合のマルチパス誤差を左に示した。

# 先の評価方法の弱点

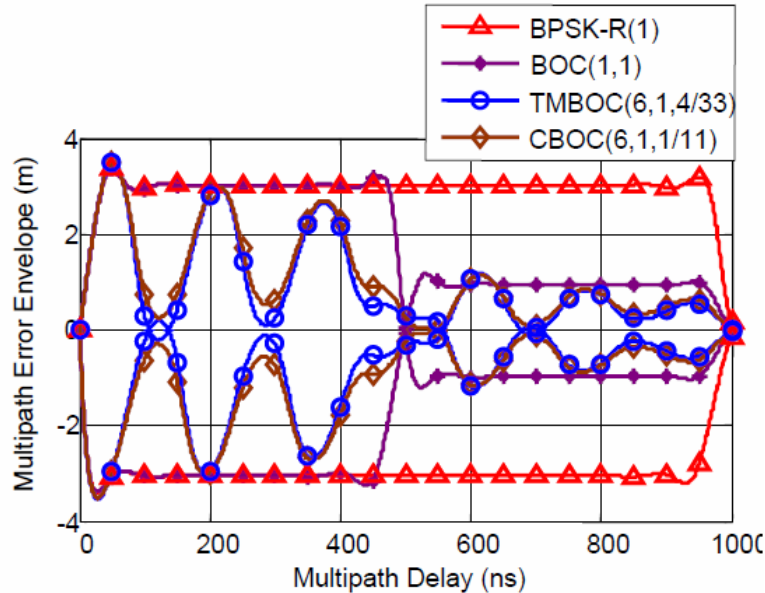
- **あくまでも最大誤差**であり、実際のマルチパス誤差の値は、その範囲内で生じる。
- 直接波に対して、1つのマルチパス波が混入した場合の結果であって、**複数のマルチパス波が混入した場合の結果は示されていない**。
- **直接波が存在することが前提条件**となっており、反射波が支配的な場合の効果を示すことができない。
- 先のスライドで示したような、**実際のマルチパス環境を十分に反映した結果ではない**（例えば、回折効果は考慮されていない）。



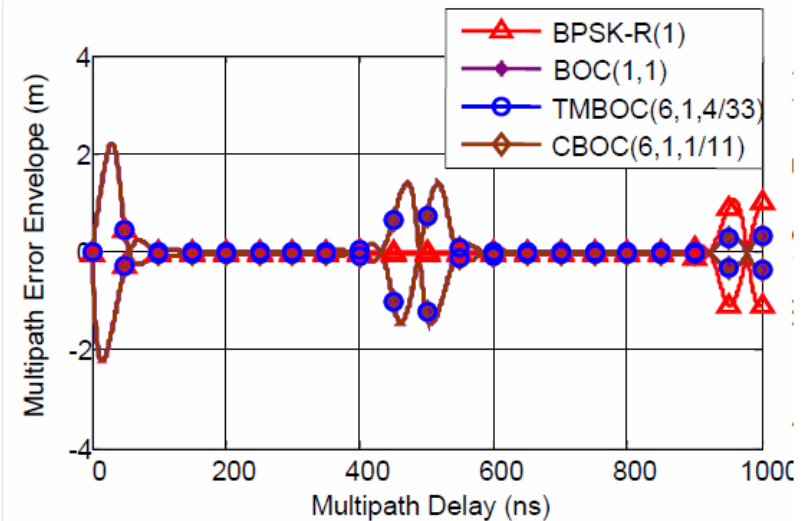
# 自己相関関数の比較 (+GNSS近代化)



# ナロー及びダブルデルタコリレータでの 対マルチパス性能比較



ナローコリレータ使用



ダブルデルタコリレータ使用

# 発表の内容

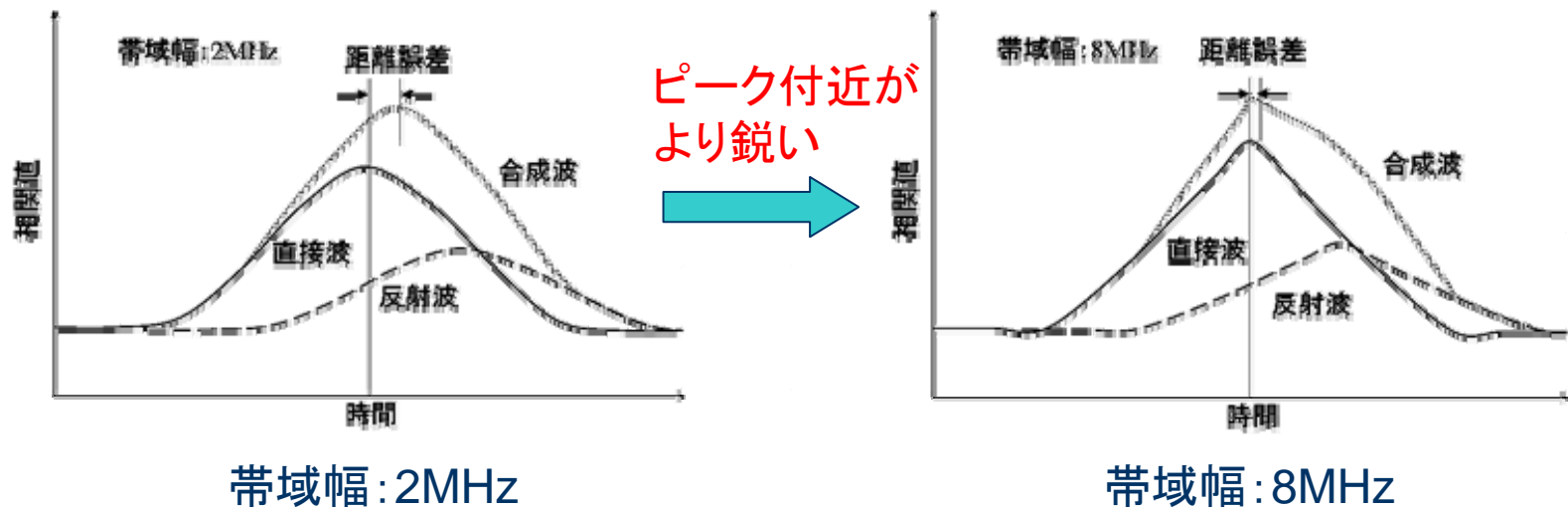
- GPSにおけるマルチパス誤差について
- 実際のマルチパス(観測データや統計値)
- 擬似距離とマルチパスの関係
- マルチパス誤差評価手法
- **マルチパス誤差低減技術の紹介**
- 高感度受信機と高精度用受信機の比較
- まとめ

# マルチパス誤差低減技術の紹介

- **Narrow-Correlator**
- Double-Delta(Strobe) Correlator
- Multipath Estimation

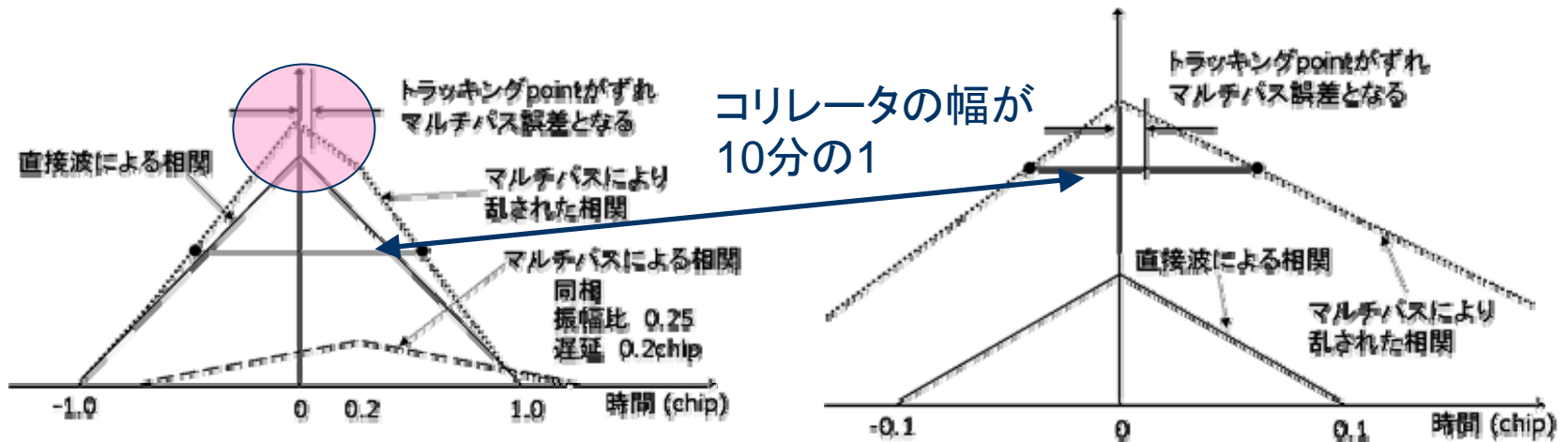
# Narrow-Correlator (帯域幅について)

帯域幅とは、受信機の帯域特性を支配している中間周波フィルターにおける帯域幅のことである→RFの性能による



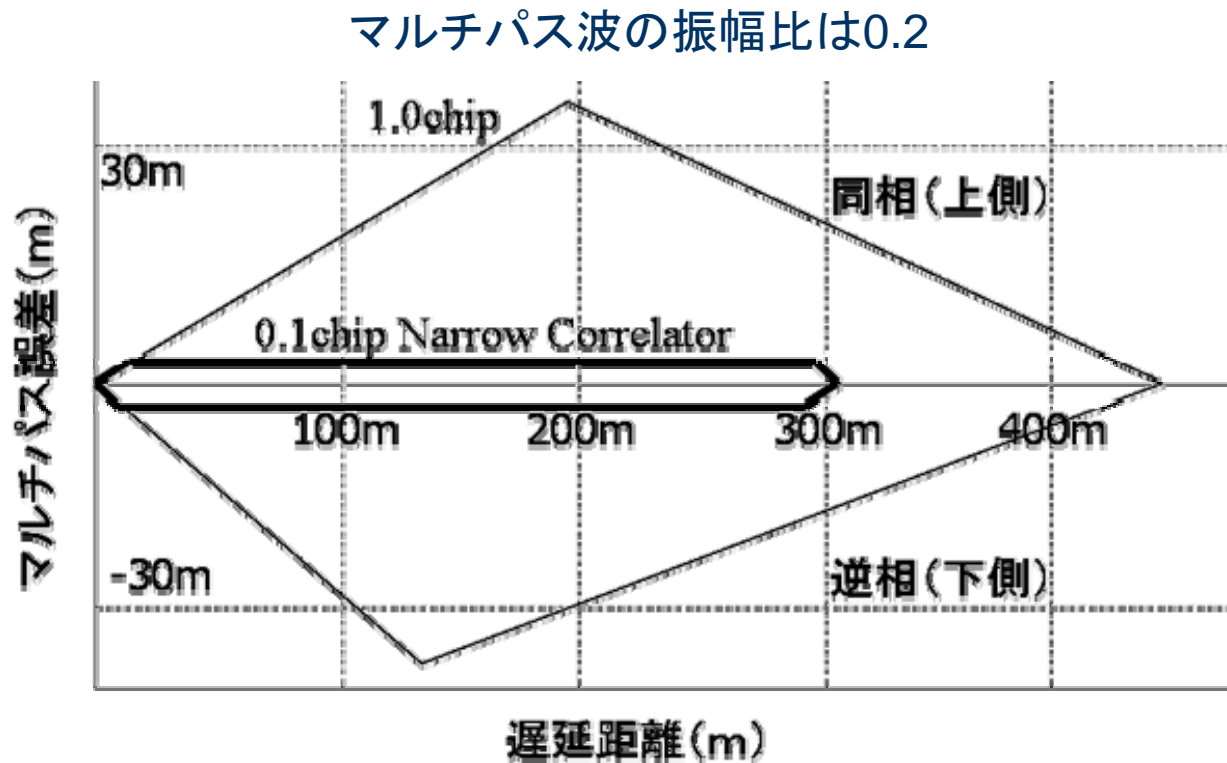
同じ条件のマルチパスが混入し、同じ受信機を用いているにも関わらず、帯域幅の違いだけで、生じるマルチパス誤差に違いがある。

# 実際の低減効果



理想的な相関波形(帯域無制限)を想定した場合でも、コリレータの幅を狭めるだけで上記のような差が生じた。

# 遅延距離とマルチパス誤差の関係





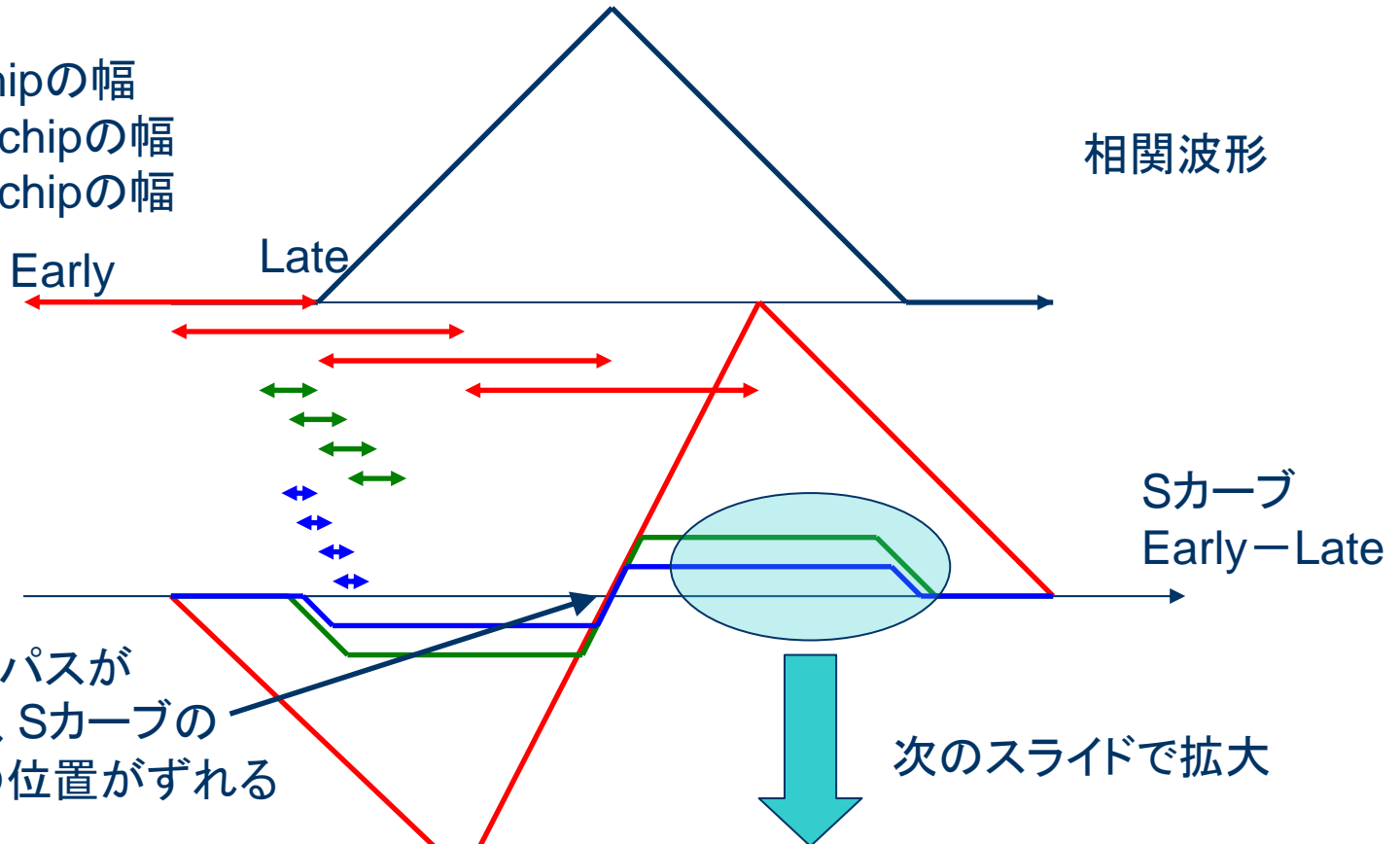
# マルチパス誤差低減技術の紹介

- Narrow-Correlator
- Double-Delta(Strobe) Correlator
- マルチパス波を推定する手法

# Double-Delta-Correlator

赤: 1chipの幅  
緑: 0.2chipの幅  
青: 0.1chipの幅

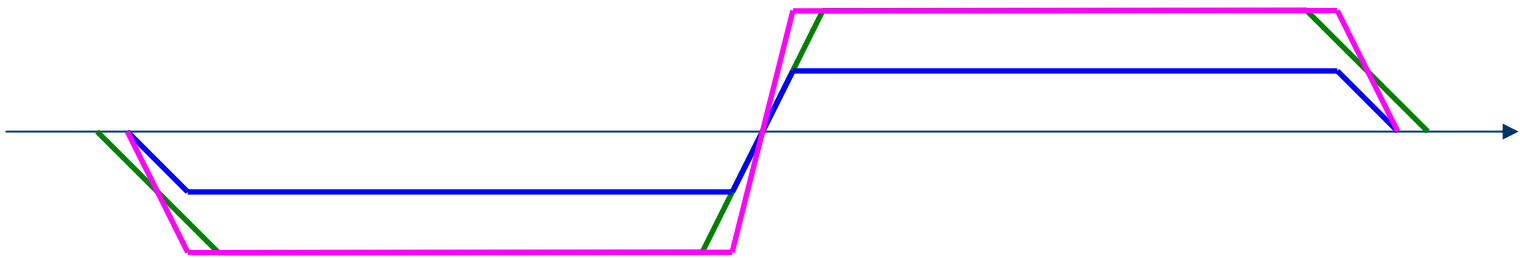
相関波形



マルチパスがあると、Sカーブの交点の位置がずれる

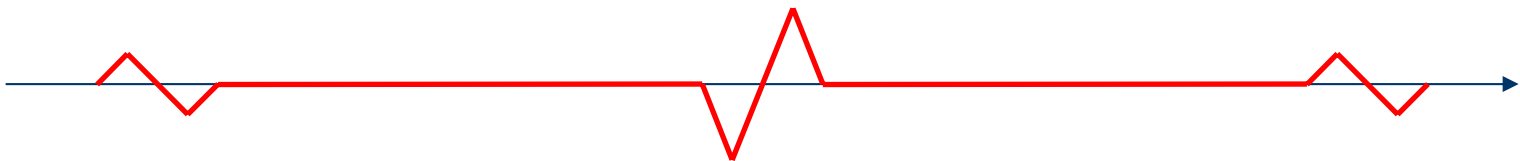
次のスライドで拡大

# つづき



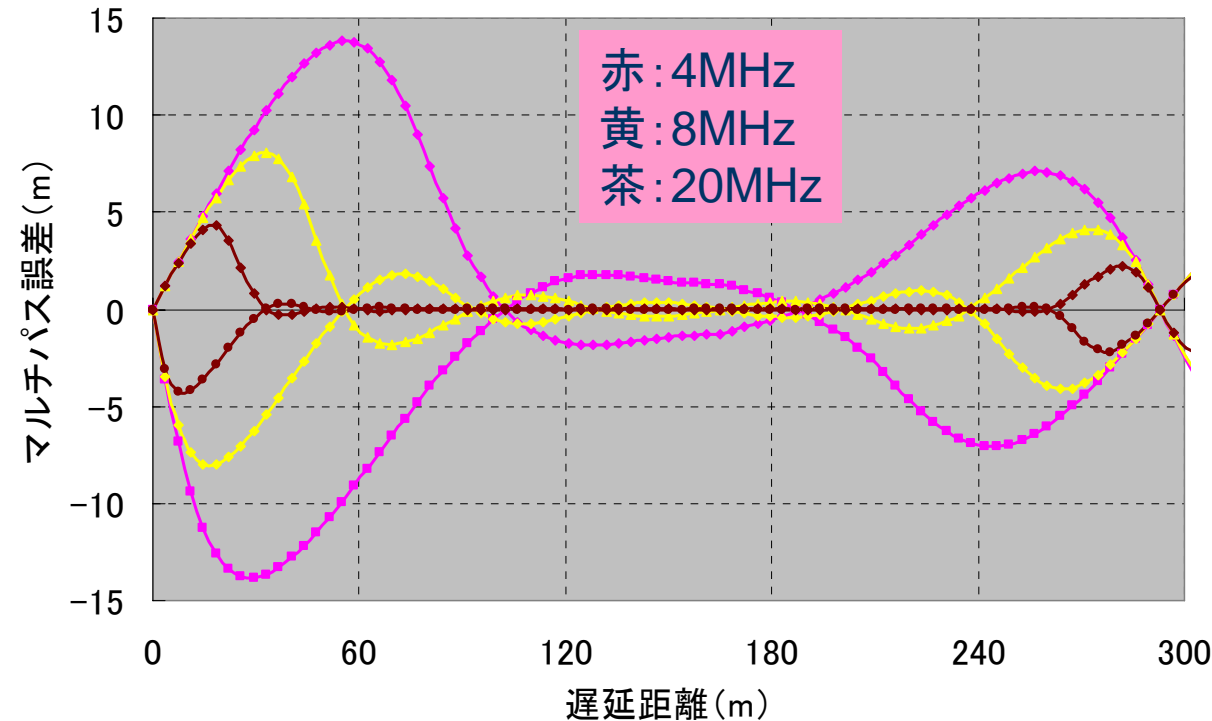
0.1chipの出力を2倍して0.2chipのほうの値を引くと

$$2 \times \text{*narrow}(d/2) - \text{*narrow}(d)**$$



これがStrobe-Correlatorの相関パターン  
大部分でマルチパスの影響を受けない

# 遅延距離とマルチパス誤差の関係



- ・大幅にマルチパスの影響を低減。
- ・遅延距離が短い領域だけ残る(帯域20Mの場合)。
- ・多数のコリレータを必要としない。

- ・信号強度の低下
- ・トラッキングロス

# マルチパス誤差低減技術の紹介

- Narrow-Correlator
- Double-Delta(Strobe) Correlator
- **マルチパス波を推定する手法**

# マルチパス波を推定することによるメリット

$$r(t) = \sum_{m=0}^{M-1} a_m p(t - \tau_m) \cos(\omega t + \theta_m) + n(t) \quad \text{実際の受信信号}$$

$$s(t) = \sum_{m=0}^{M-1} \hat{a}_m p(t - \hat{\tau}_m) \cos(\omega t + \hat{\theta}_m) \quad \text{推定されるモデル化された信号}$$

$$L(\hat{a}_m, \hat{\tau}_m, \hat{\theta}_m) = \int_{t-T}^t [r(t) - s(t)]^2 dt \quad \text{Lが最小になるように推定}$$

$M$ : 信号の数

$t$ : 時刻

$p(t)$ : コード

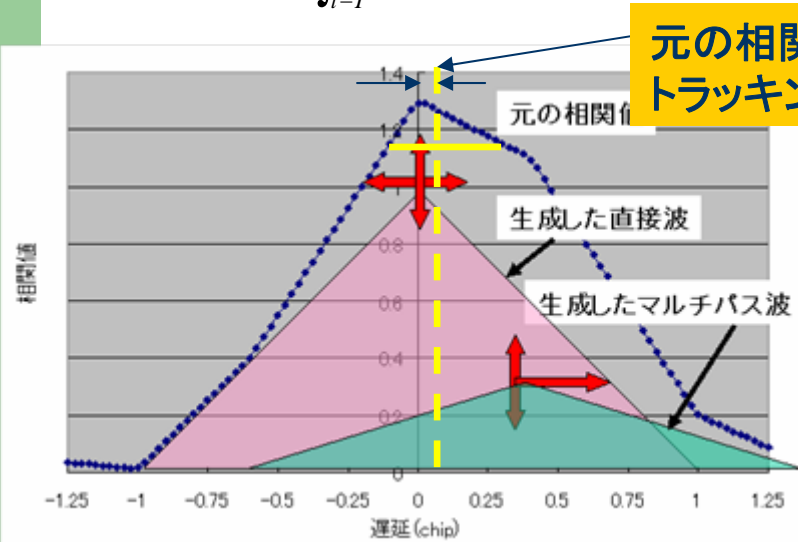
$n(t)$ : 白色雑音

$a_m$ : 信号の振幅成分

$\tau_m$ : 信号の遅延成分

$\theta_m$ : 信号の位相成分

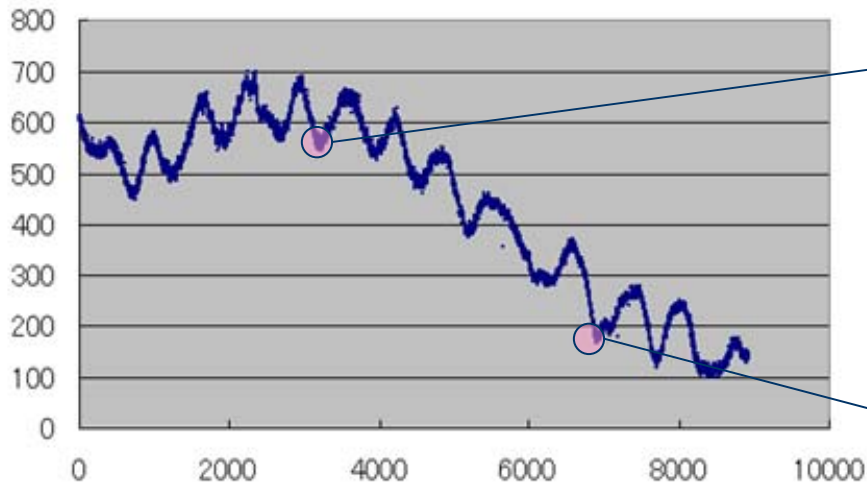
$T$ : 積分時間



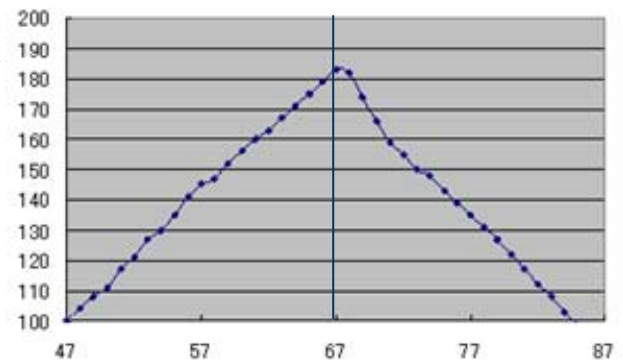
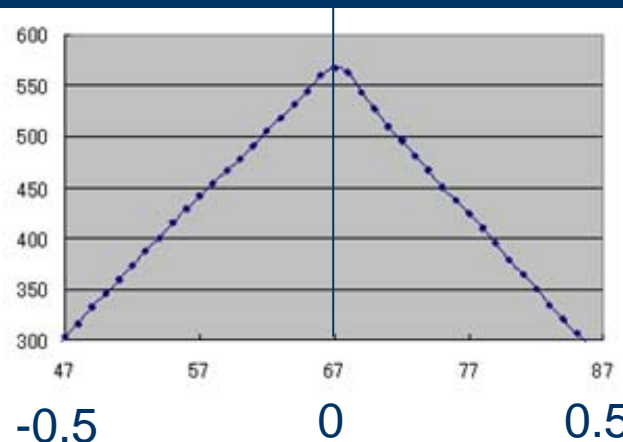
元の相関値による誤った  
トラッキングポイント

マルチパス波の影響を相関波形から一部でも排除し、直接波を復元すれば、より正しい擬似距離を得ることができる。探索範囲を狭めることも重要なポイントである。

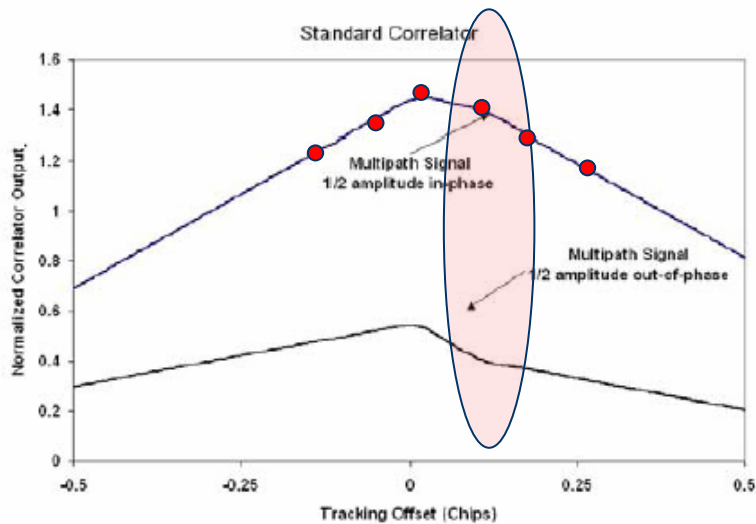
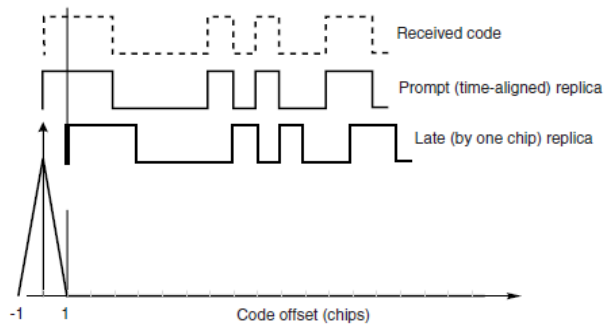
# 実際の相関波形(近傍に大きな壁が存在) 縦軸は全て相関値



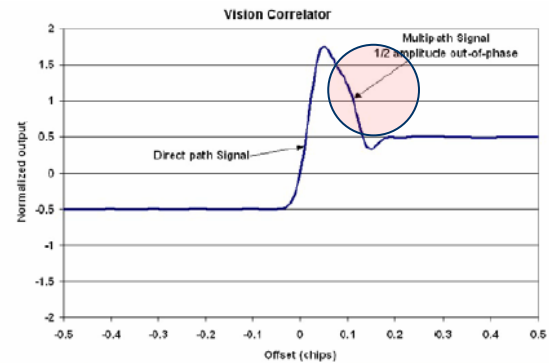
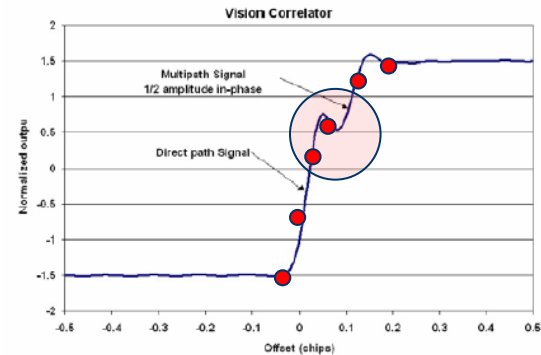
ピークのみの時系列変化



# 最近発表された技術のポイント (Vision Correlator)



通常の相関波形  
GPS/GNSSシンポジウム



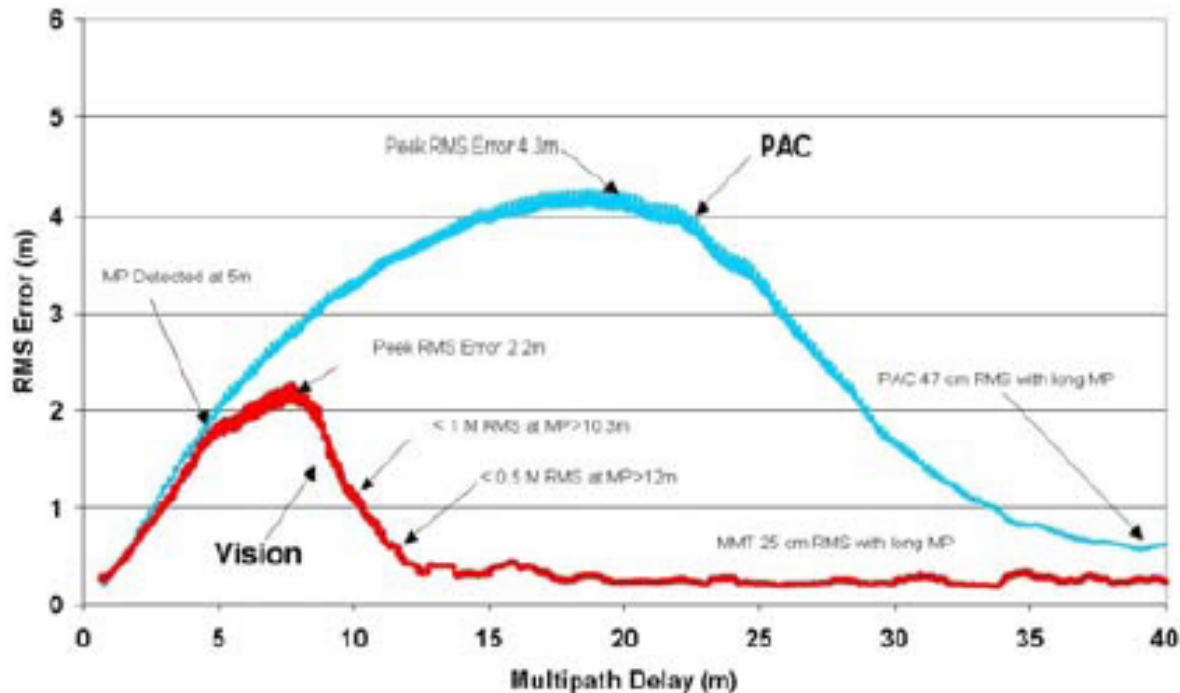
直接観測方式

2006/11/15



# 遅延距離とマルチパス誤差の関係

Vision vs. PAC From Proto FPGA and Signal Generator  
Multipath 6dB less power than Signal



# 発表の内容

- GPSにおけるマルチパス誤差について
- 実際のマルチパス(観測データや統計値)
- 擬似距離とマルチパスの関係
- マルチパス誤差評価手法
- マルチパス誤差低減技術の紹介
- 高感度受信機と高精度用受信機の比較
- まとめ

# 高感度受信機の特徴

- -160dBm程度まで衛星信号をトラッキングする→**測量用受信機で可視衛星数が1, 2個の場所でも4個以上**
- 基本的に1周波→電離層等のオフセットは容易に低減可能
- 低い信号強度の衛星を利用するため、雑音やマルチパスの影響は大きくなる。
- RFの帯域は**消費電力の負荷**等の問題もあり、一般的に狭い→これまでに説明したような低減技術は利用できない→ただし、**その種の技術は直接波が存在することが前提なので、都市部の環境では組み込んで意味がないケースがある。**
- 上記の雑音やマルチパスの問題を、デッドレコニングやフィルター、センサー融合等の**独自のノウハウでカバー**している。しかし大きな誤差の影響は避けられない→**道幅の数倍は容易にずれる**

# 信号強度と雑音の関係

- 信号強度と擬似距離の雑音による精度 (1σ:単位はm)との関係
  - dBm dB-Hz 0.5chip 0.1chip
- |         |       |         |       |
|---------|-------|---------|-------|
| -124.0, | 50.0, | 0.464,  | 0.124 |
| -129.0, | 45.0, | 0.825,  | 0.221 |
| -134.0, | 40.0, | 1.473,  | 0.393 |
| -139.0, | 35.0, | 2.647,  | 0.700 |
| -144.0, | 30.0, | 4.860,  | 1.250 |
| -149.0, | 25.0, | 9.453,  | 2.249 |
| -154.0, | 20.0, | 20.722, | 4.144 |
| -159.0, | 15.0, | 53.159, | 8.128 |

$$\sigma_{DLL} = \sqrt{\frac{\alpha B_L}{c/n_0} \left[ 1 + \frac{2}{Tc/n_0} \right]} \lambda_c$$

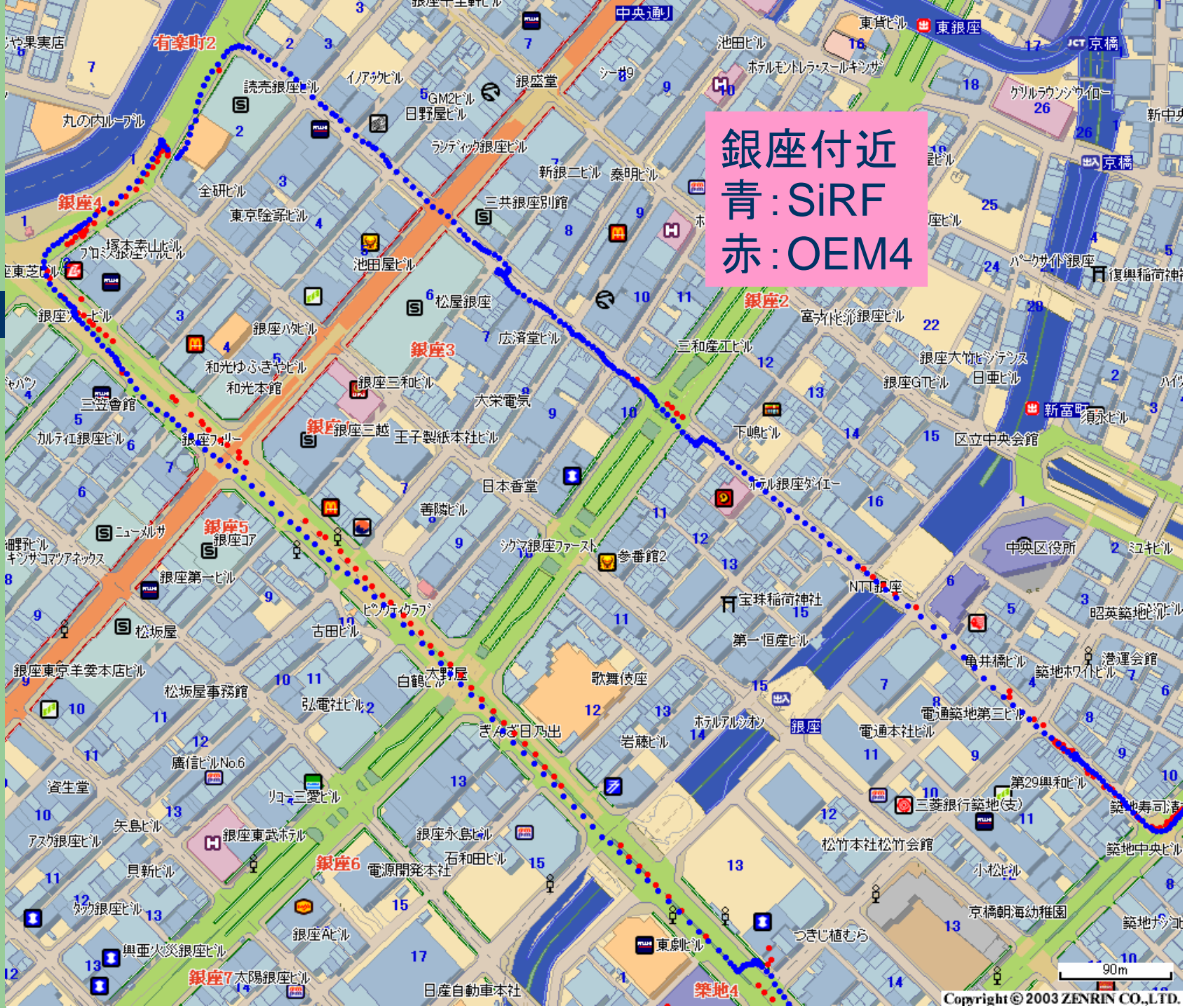
# 実際の都市部での比較



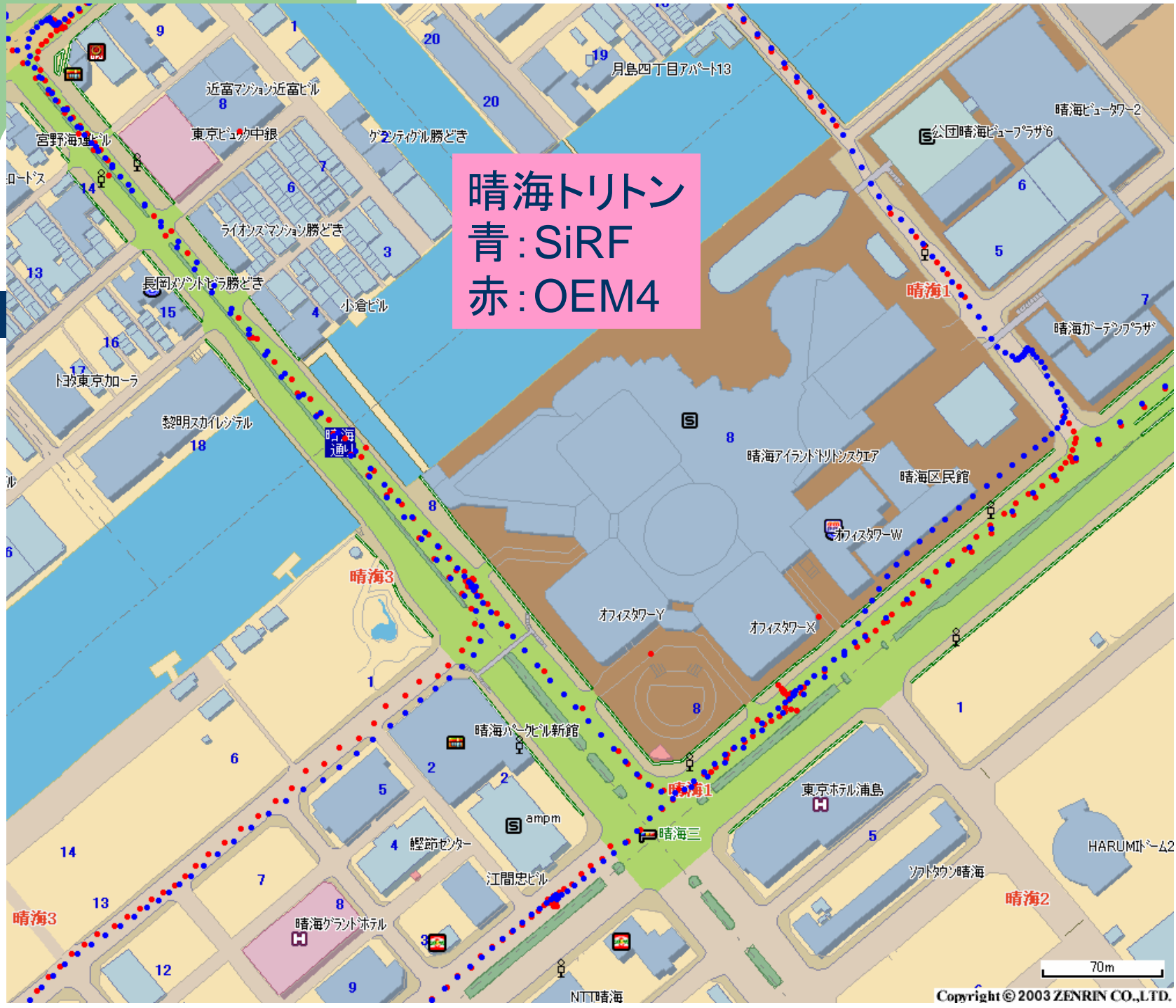
- ノバテルのOEM4とSiRF star3を使用
- 約45分ほど、江東区と中央区を車で走行(一方通行1車線から片側3車線まで)
- 1Hzで取得(06/11/10)
- 可視衛星4個以上の取得率  
OEM4→90% SiRF→100%  
ただし、OEM4はさらにHDOPと信号強度でチェックし、最終的に80%
- ゼンリンの地図にプロット



銀座付近  
青: SiRF  
赤: OEM4



晴海トリトン  
青: SiRF  
赤: OEM4



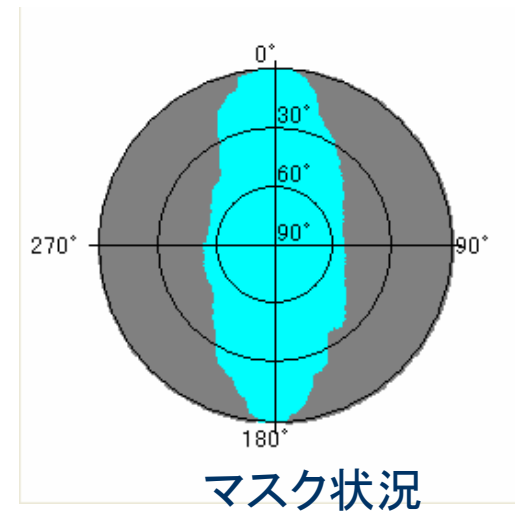
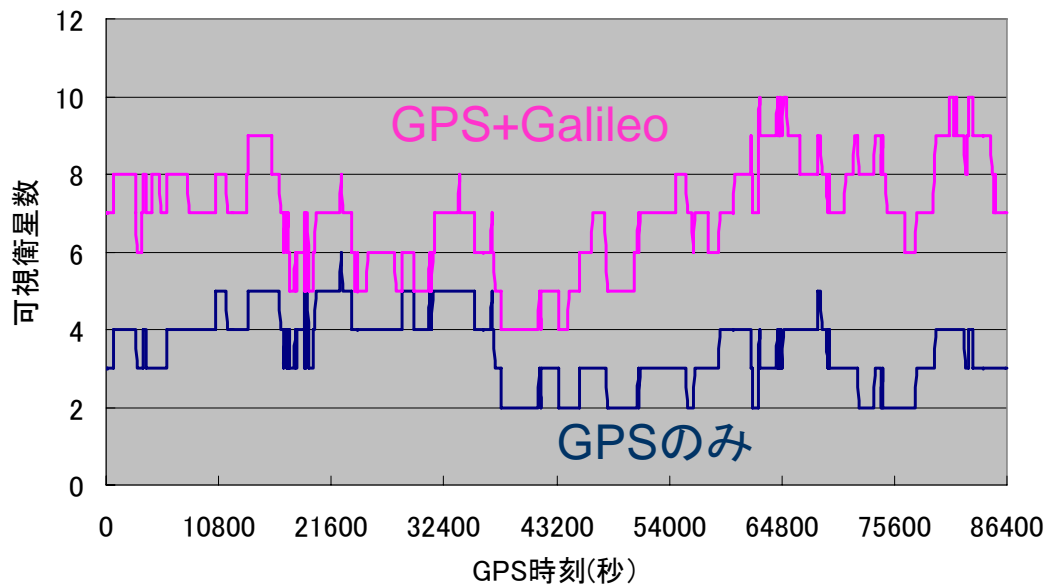


越中島付近  
黒: U-blox  
赤: 実際に歩いた場所



# GPS(29機)+Galileo(27機)による 1日の可視衛星変化

- 両側を囲まれた道路の状況での改善は？



GPS+Galileo: 平均HDOP 2.7 最大 11.3  
GPSのみ→1日のうち半分以上4衛星未滿

# まとめ

- 本稿で示したマルチパス誤差低減手法は、全ての低減技術を網羅しているわけではないが、**代表的な技術について紹介してきた。**
- GPS/GNSS近代化に伴い精密測位のサービスが拡大すると、**搬送波位相のマルチパス誤差低減も重要。**
- GPS/GNSS近代化に伴う、チップレートの増加や変調方式による効果も重要。例えば、L5帯は現在のC/Aコードのチップレートの10倍になることが予定されているので、**現状のStrobe-Correlatorと同等の効果**があると予想される。

# 課題

- 東京などの大都市部においても、**直接波の届いている信号に対しては**、マルチパス誤差を屋上で受信するのと同じレベルまで低減させていくこと。
- 将来、可視衛星数が倍増することを見込んで、**より品質の良い電波を取捨選択する**アルゴリズムを設けて、品質の悪い電波の衛星は測位計算に使用しない。
- 遅延距離の短い領域のマルチパス波を、ロバスト性も確保しつつ低減する。一方、高感度用では、帯域を広げなくても雑音やマルチパスを低減する独自の手法をあみだす。アンテナによる低減効果も探る。