

マルチパス低減技術の現状と動向

東京海洋大学
久保信明

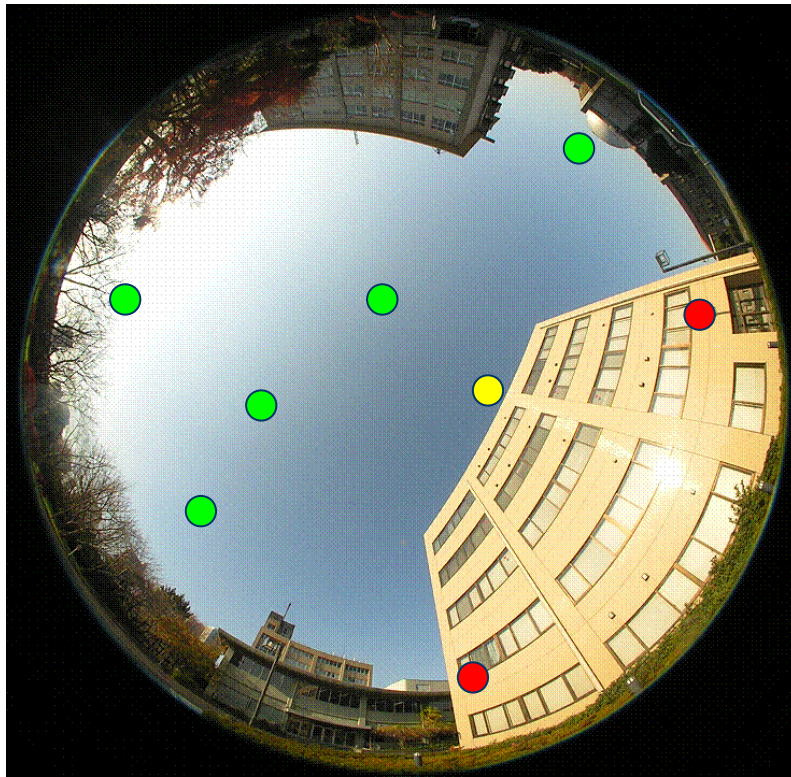
発表の内容

- GPSにおけるマルチパス誤差
- 実際のマルチパス(観測データや統計値)
- 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
- まとめ

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ドップラー周波数偏移が発生したり、**移動中に伝搬路が遮蔽**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**。見通しがい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。

2つの地点の天空写真(架空の衛星配置)



海洋大構内

GPSシンポジウム

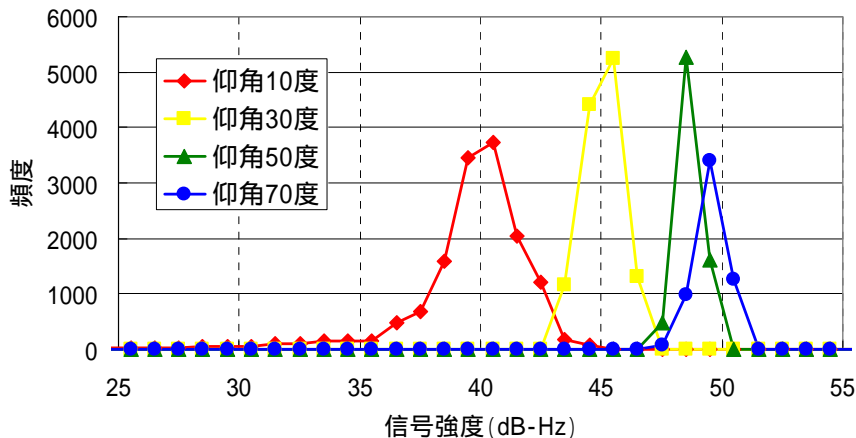


銀座交差点

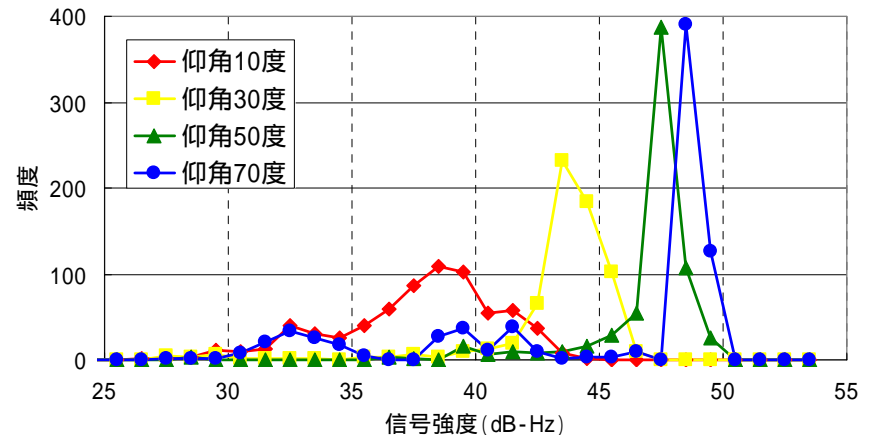
2005/11/18

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

高速道路と一般道路で測定した伝搬特性

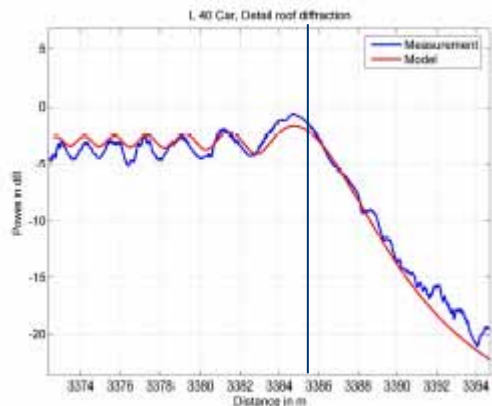
左からルート名、5dB減衰した距離率、10dB減衰した距離率そして走行距離である。測定に使用した電波は、ETS-V (技術試験衛星V型)からの1.5GHzの無変調波。ETS-Vは太平洋側に仰角45度付近に位置。

高速道路では、トンネルなどの影響を除いては、大方**80%以上**で、ETS-Vからの直接波を十分受信することができていることがわかる。しかし、千葉県内(都市部の一般道路)の結果を見ると、極端に衛星からの直接波を受信しづらい状況にあることがわかる。

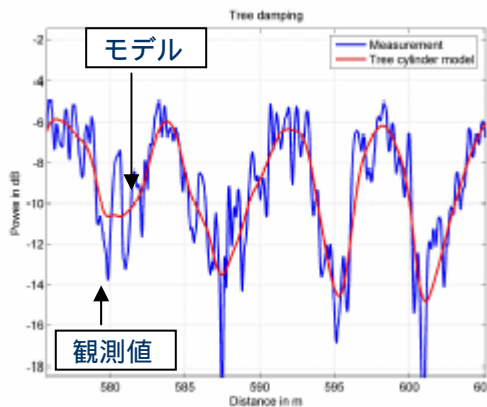
ルート名	5dB[%]	10dB[%]	走行距離
東北	2.9	2.8	671(km)
東名	3.6	3.3	401
北陸	12.6	12.5	495
関越	8.9	8.7	254
中央	8.0	7.5	292
名神	3.9	3.0	180
中国	9.0	7.8	566
九州	10.3	9.9	331
長崎	9.0	8.8	229
宮崎	3.8	3.6	84
R221	15.7	12.9	25
R10	1.1	0.5	76
茨城県	1.8	0.7	102
千葉県	21.5	17.3	26
R106	12.4	8.9	109
北海道	5.2	4.1	244

様々な伝搬環境での信号強度

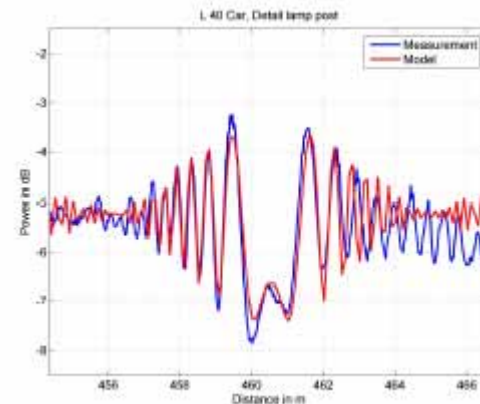
青が観測値で赤がモデルによる計算結果



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 = 20log(1/) 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のがよくある(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 **散乱や回折は信号強度で判別可能。以降のスライドでは特に反射の影響について紹介。**

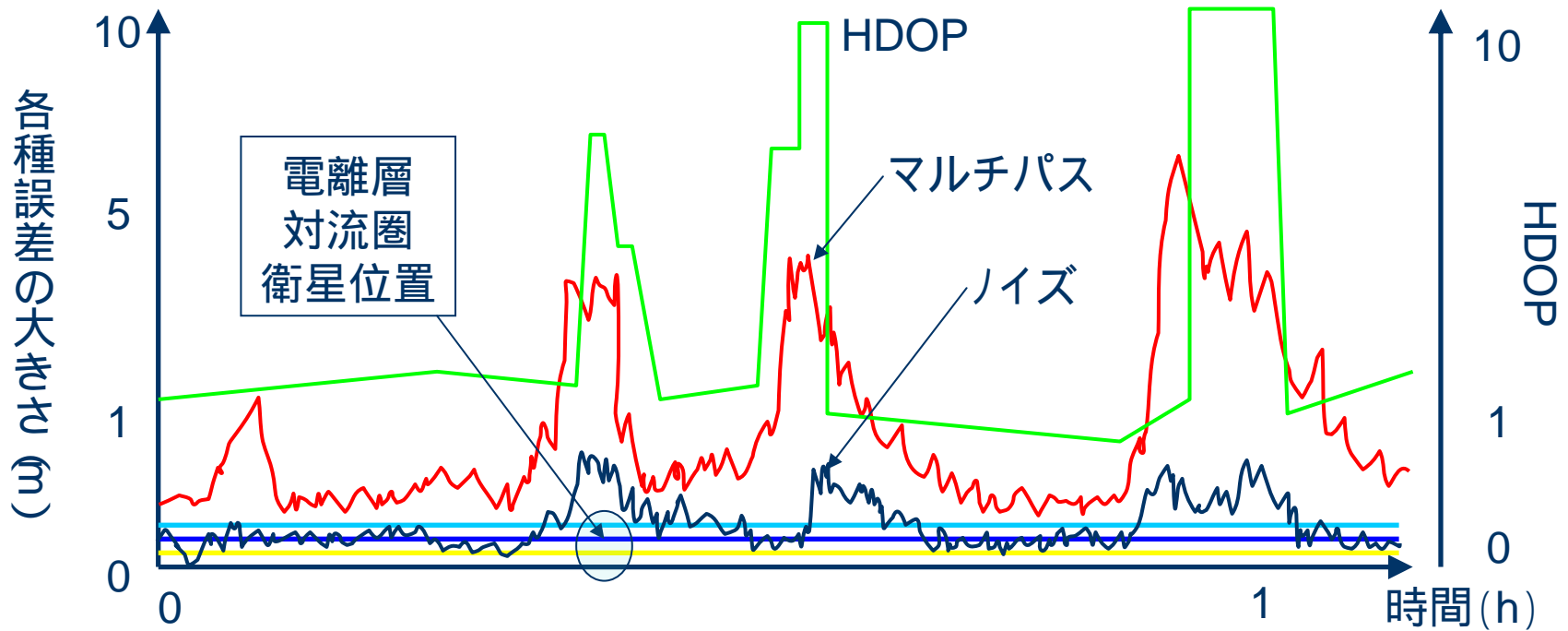
測位精度を決定する主な要因 (コードを用いた場合)

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 0.1m程度
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 0.2m程度
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 0.2m程度
マルチパス	環境良で1m以内程度	アンテナ固有なのでなし
受信機雑音	10cmから50cm程度	受信機固有なのでなし

測位誤差 = 衛星配置 (DOP) × 上記の誤差

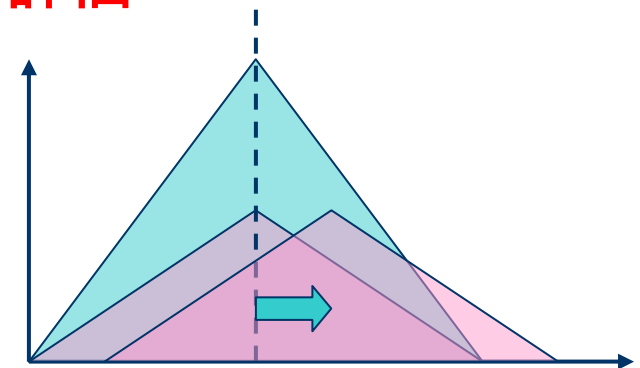
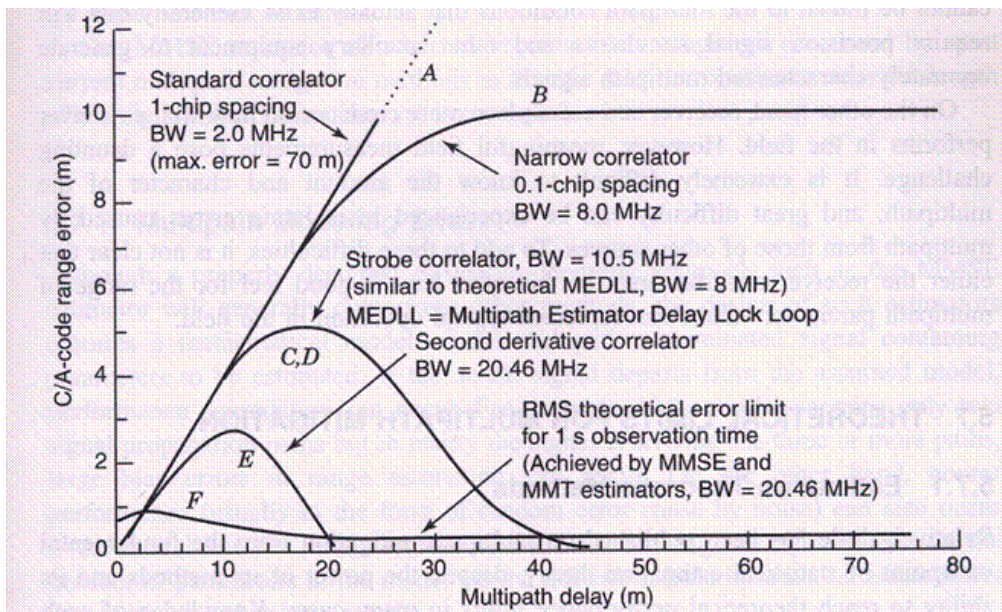
都市部では、衛星配置とマルチパス誤差が問題になる事が多い！

市街地での各種誤差の変動



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

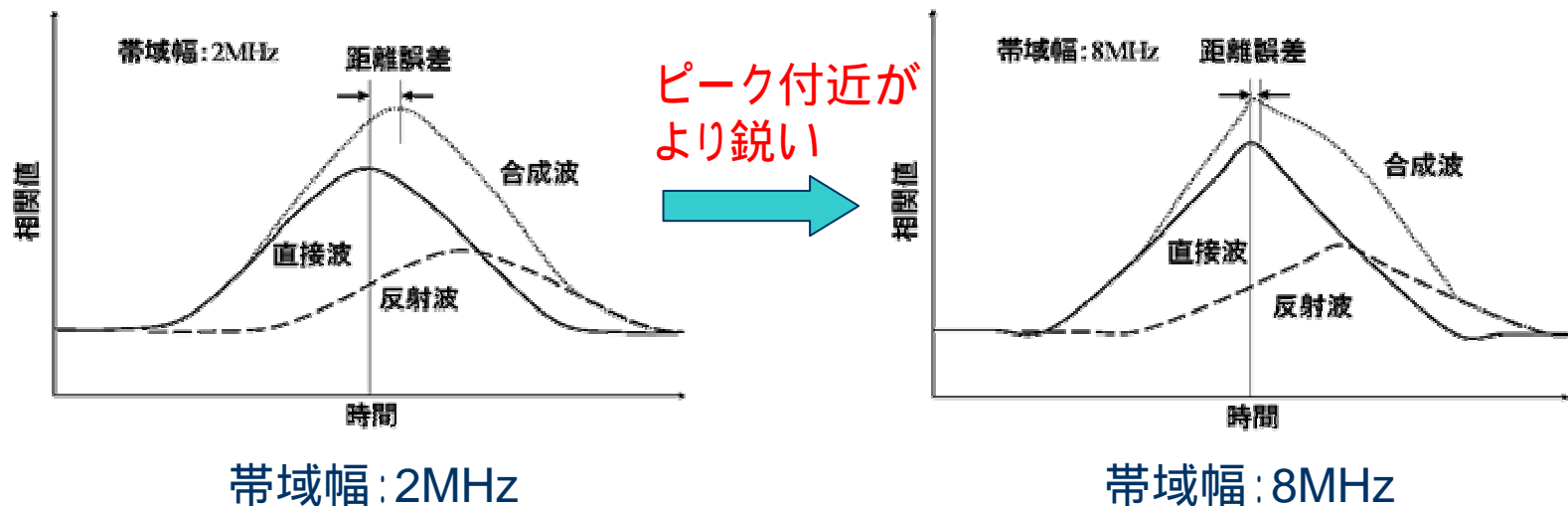
- **あくまでも最大誤差**であり、実際のマルチパス誤差の値は、その範囲内で生じる。
- 直接波に対して、1つのマルチパス波が混入した場合の結果であって、**複数のマルチパス波が混入した場合の結果は示されていない**。
- **直接波が存在することが前提条件**となっており、反射波が支配的な場合の効果を示すことができない。
- 先のスライドで示したような、**実際のマルチパス環境を十分に反映した結果ではない**(例えば、回折効果は考慮されていない)。

マルチパス誤差低減技術の紹介

- **Narrow-Correlator**
- Early-Late Slope
- Strobe-Correlator
- マルチパス波を推定する手法

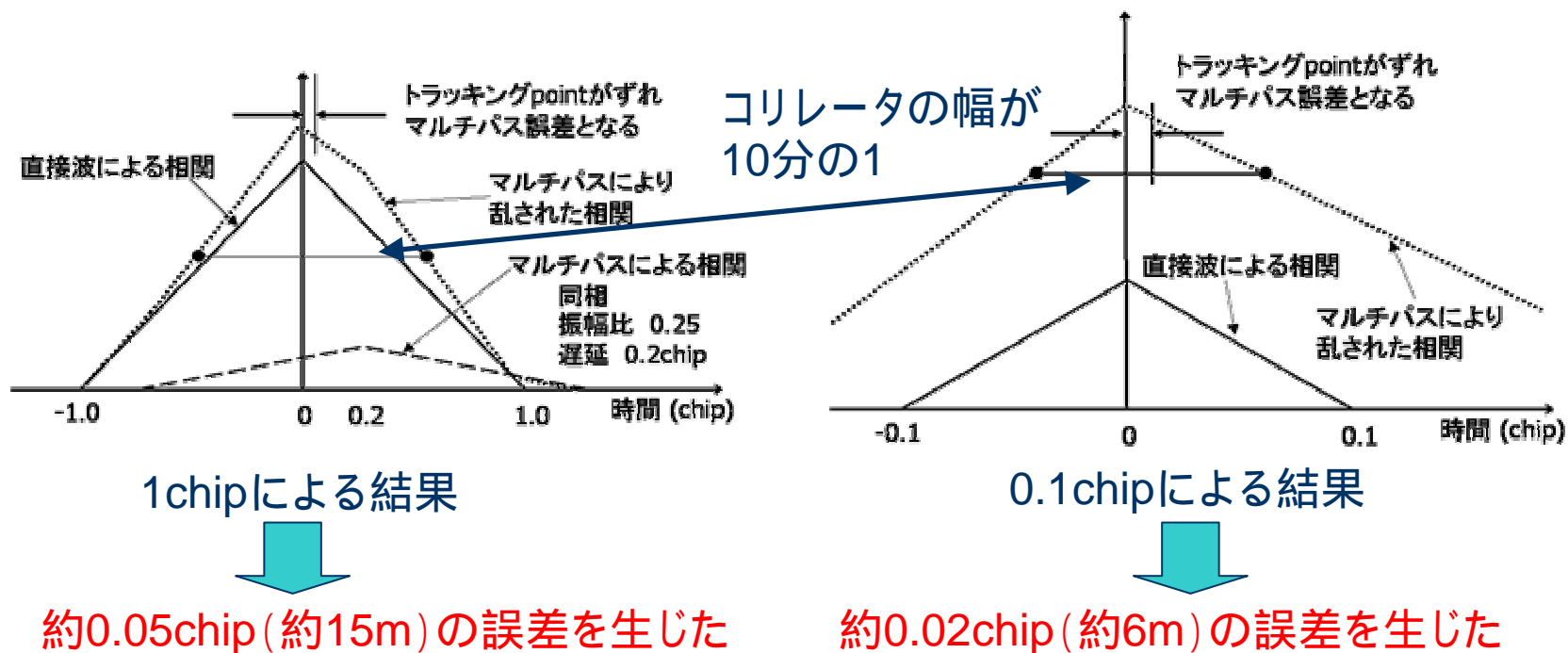
Narrow-Correlator (帯域幅について)

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



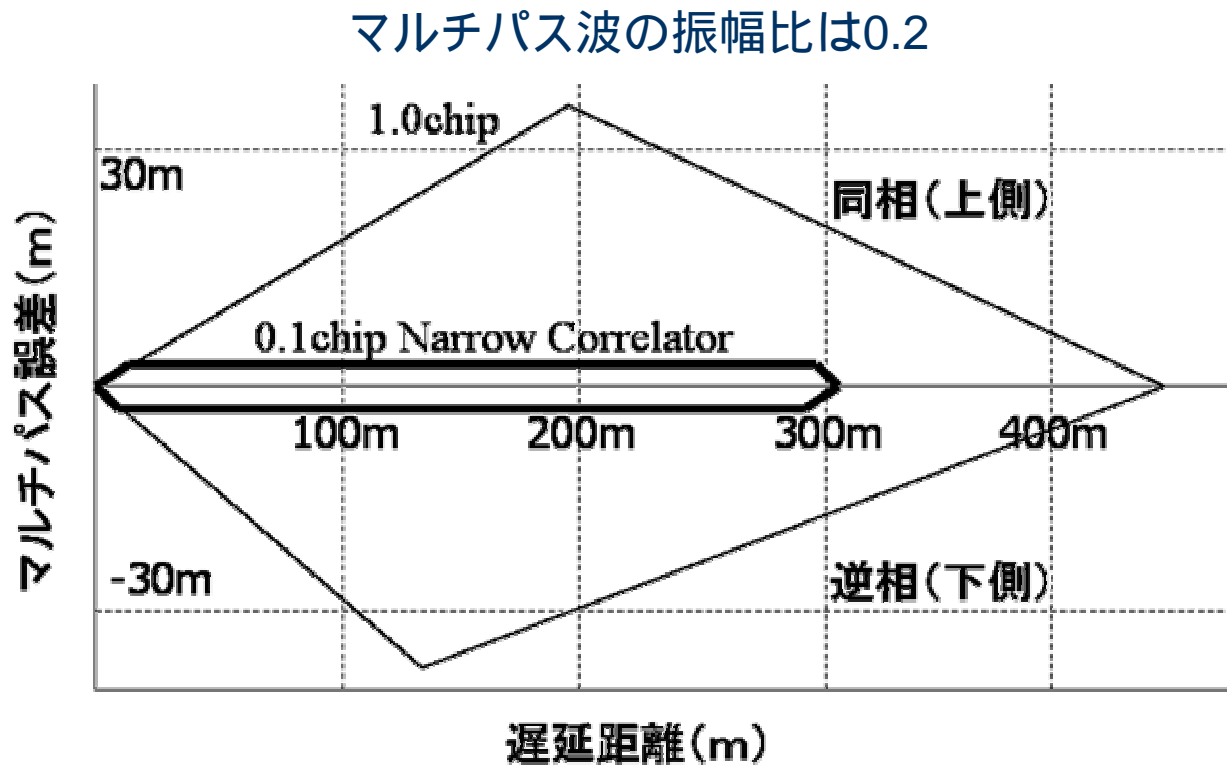
同じ条件のマルチパスが混入し、同じ受信機を用いているにも関わらず、帯域幅の違いだけで、生じるマルチパス誤差に違いがある。

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。

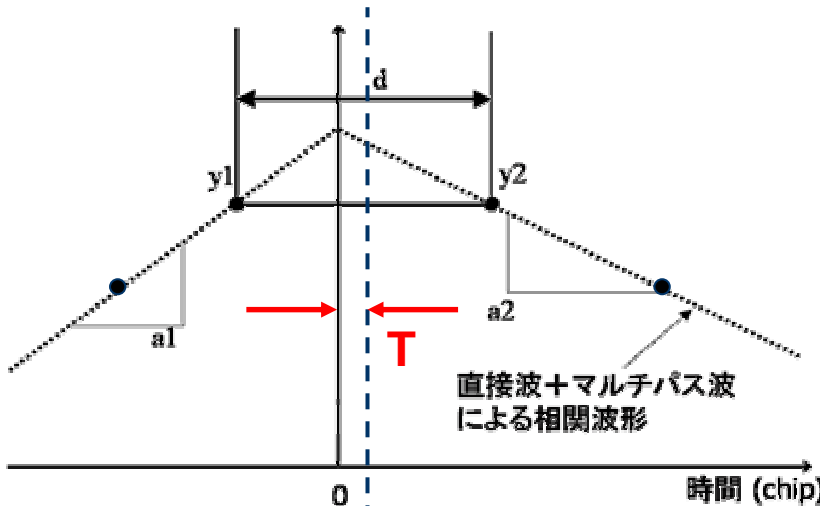
遅延距離とマルチパス誤差の関係



マルチパス誤差低減技術の紹介

- Narrow-Correlator
- Early-Late Slope
- Strobe-Correlator
- マルチパス波を推定する手法

Early-Late Slope



$$T = \frac{[(y_1 - y_2) + d/2(a_1 + a_2)]}{(a_1 - a_2)}$$

左図の理想的な状態では、上記の式より通常のコリレータによって生じる誤差Tを正確に計算することができる。しかし、**実際は正確に推定することが困難(下に理由)**。

相関波形のピークが正しいトラッキングポイントとは限らない

コリレータの幅に限界がある

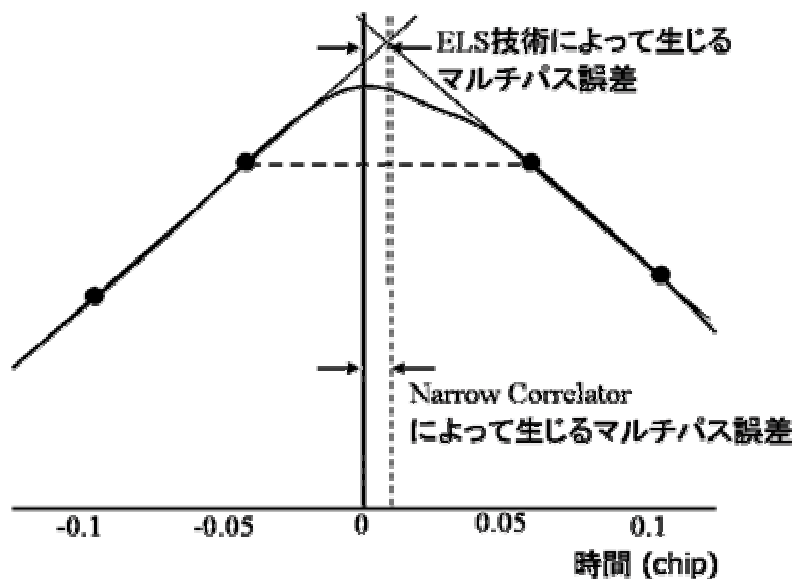
GPSシンポジウム

0

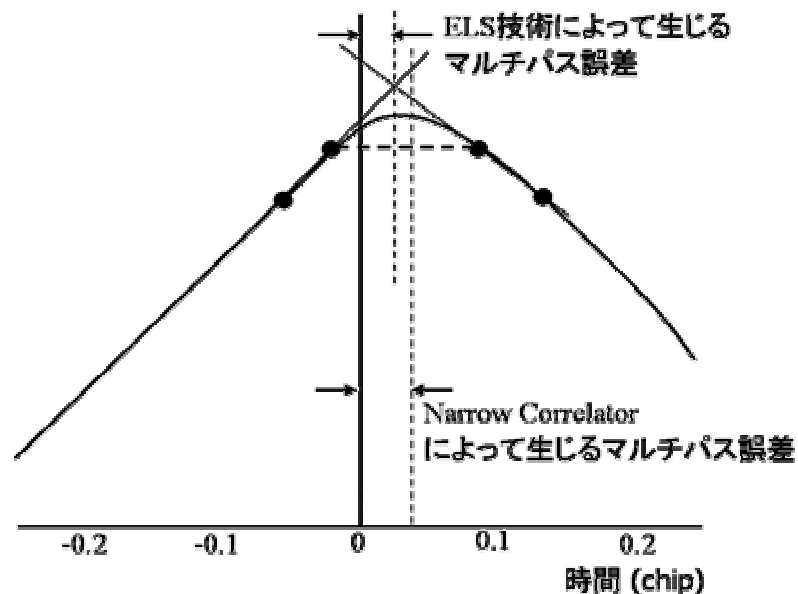
2005/11/18

0

ELSによる実際の低減効果 (Narrow-Correlatorとの比較)



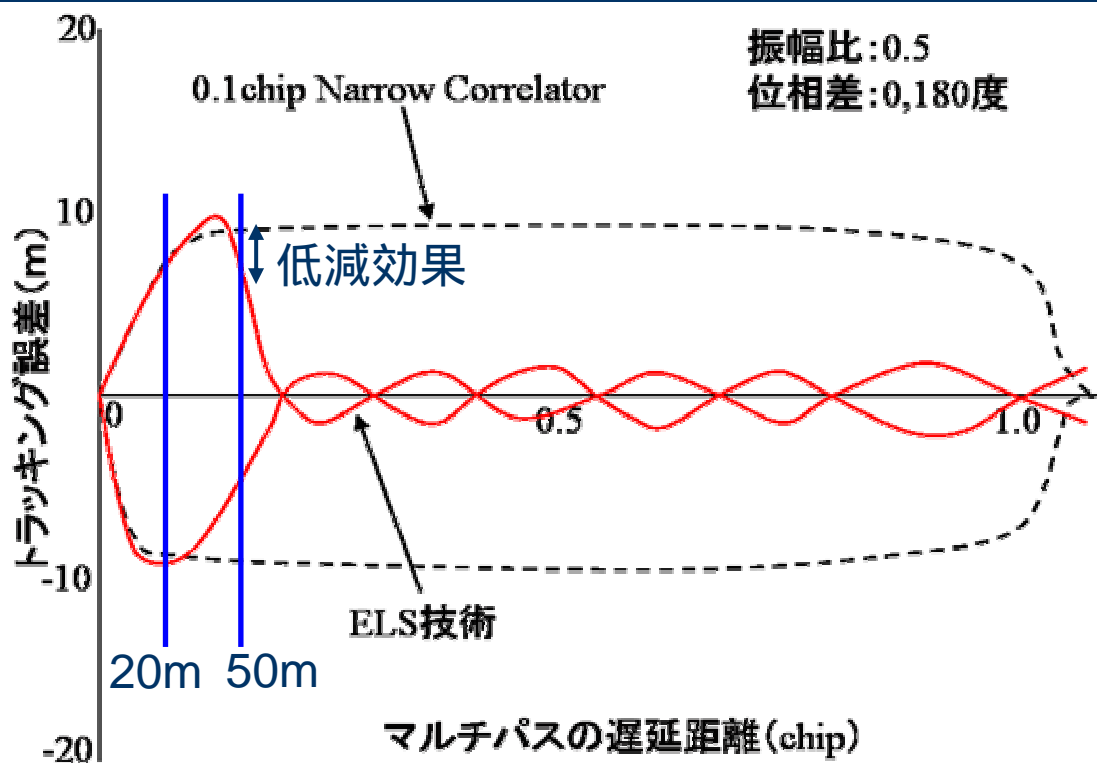
マルチパス波の遅延距離が
20m程度の時



マルチパス波の遅延距離が
50m程度の時

遅延距離が短いときは、Narrow-Correlatorと変わらないが、長くなると低減効果が出てくる。

遅延距離とマルチパス誤差の関係

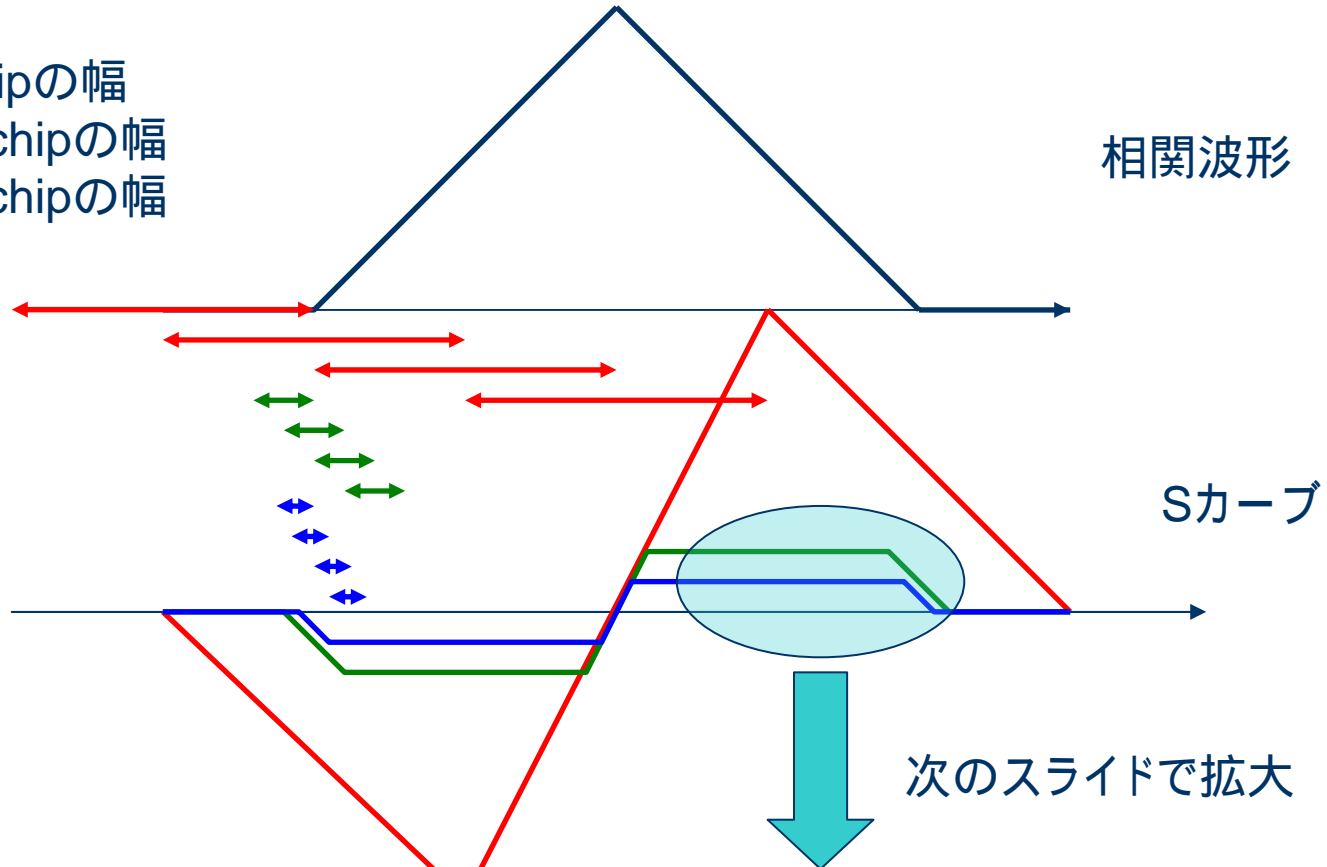


マルチパス誤差低減技術の紹介

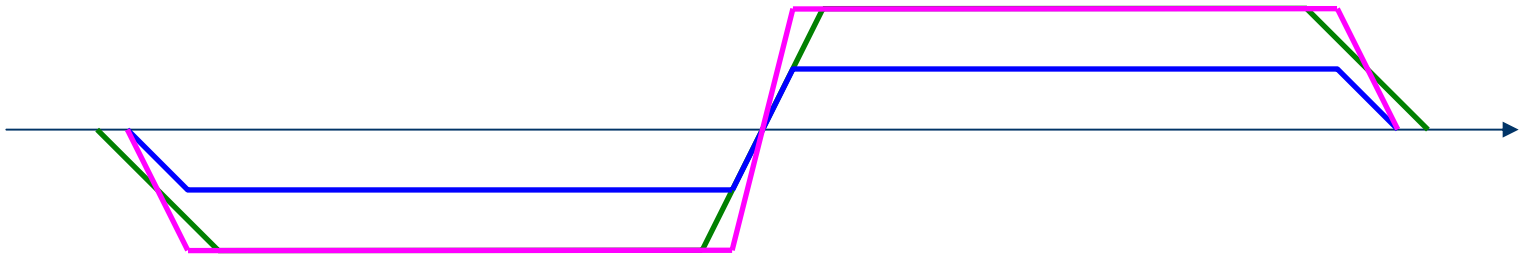
- Narrow-Correlator
- Early-Late Slope
- Strobe-Correlator
- マルチパス波を推定する手法

Strobe-Correlator

赤: 1chipの幅
緑: 0.2chipの幅
青: 0.1chipの幅

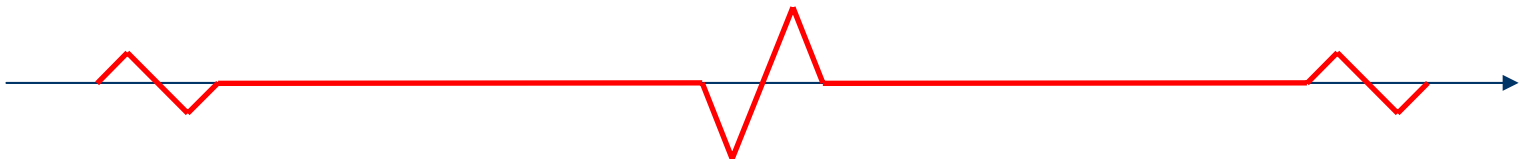


つづき



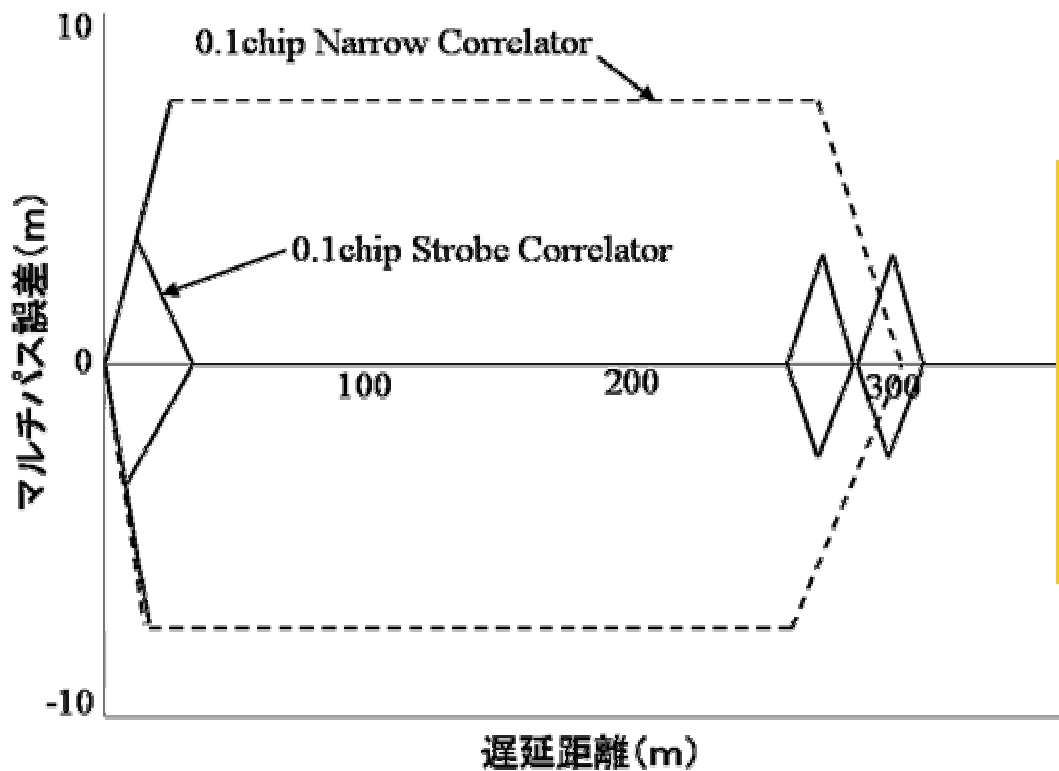
0.1chipの出力を2倍して0.2chipのほうの値を引くと

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



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
多数のコリレータを必要としない

ELSに似ている 実は、ELSで
帯域を広げた場合の結果は、
この結果と同様になる PAC

マルチパス誤差低減技術の紹介

- Narrow-Correlator
- Early-Late Slope
- 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手法

マルチパス存在下において、GPS受信機が受信した信号は以下のように表される。

$$r(t) = \sum_{i=0}^M a_i p(t - \tau_i) \cos(\omega t + \theta_i) + n(t)$$

ここで、 M は到来信号の数、 t は時刻、 $n(t)$ は白色雑音、 a_i は信号の振幅、 τ_i は信号の遅延、 θ_i は信号の位相を表す。

GPSの場合において重要なパラメータは直接波の**振幅、遅延、位相**である。

最尤推定法に従って、以下の式にある平均二乗誤差が最小になるように、マルチパス信号のパラメータを推定する。

$$L(\hat{a}, \hat{\tau}, \hat{\theta}) = \int_{t-\tau}^t [r(t) - s(t)]^2 dt$$
$$s(t) = \sum_{i=0}^M \hat{a}_i p(t - \hat{\tau}_i) \cos(\omega t + \hat{\theta}_i)$$

誤差評価式

$r(t)$ が実際に観測した波形。
 $s(t)$ は反射波を含んだ観測波形をパラメトリック表現したもの。

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

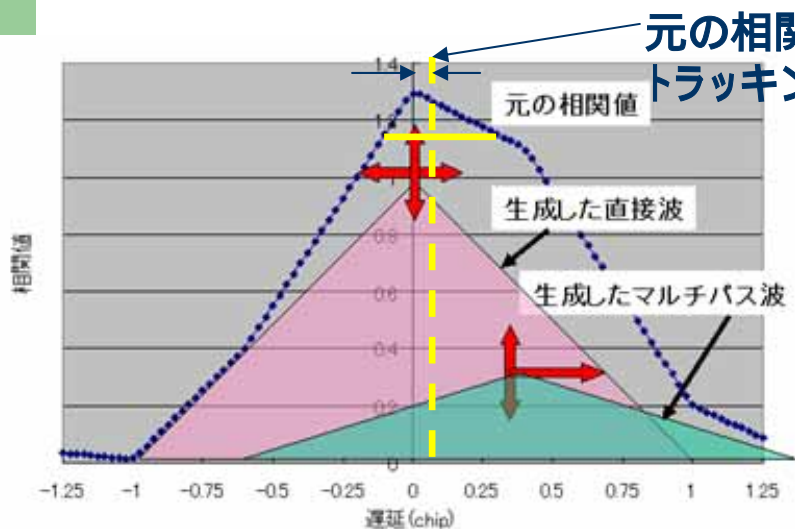
$n(t)$: 白色雑音

a_m : 信号の振幅成分

τ_m : 信号の遅延成分

θ_m : 信号の位相成分

T : 積分時間



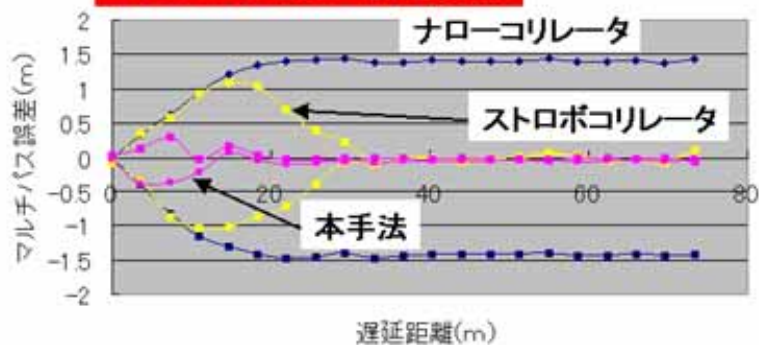
元の相関値による誤った
トラッキングポイント

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。

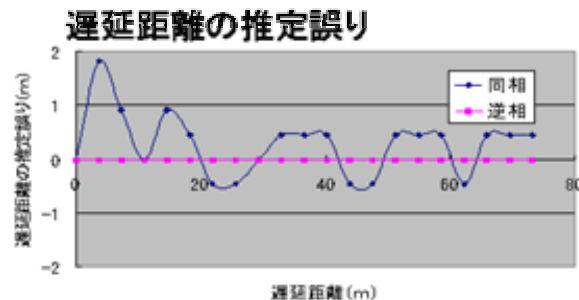
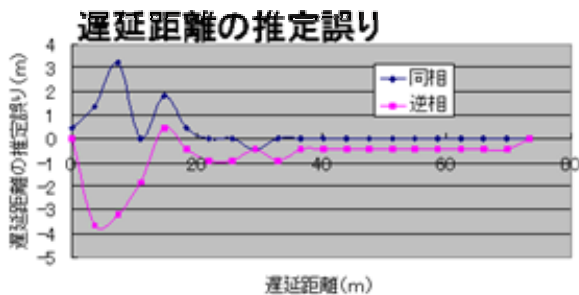
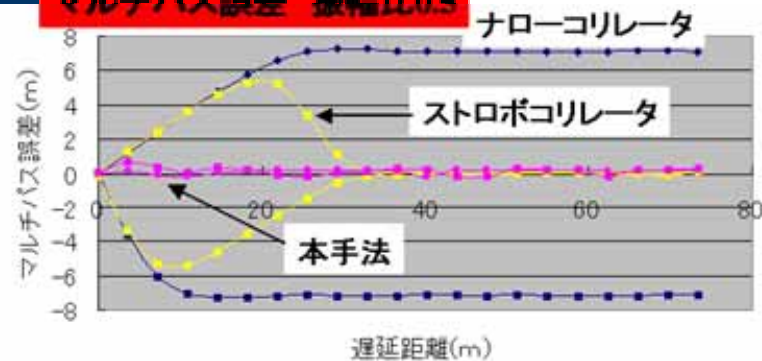
ここで、マルチパス波の振幅比と遅延距離をすべてにわたって探索するのではなく、より正しい初期値を与えて探索範囲を狭めることが重要なポイントである。

本手法を用いた場合の性能 シミュレーション(遅延距離を変動)

マルチパス誤差 振幅比0.1



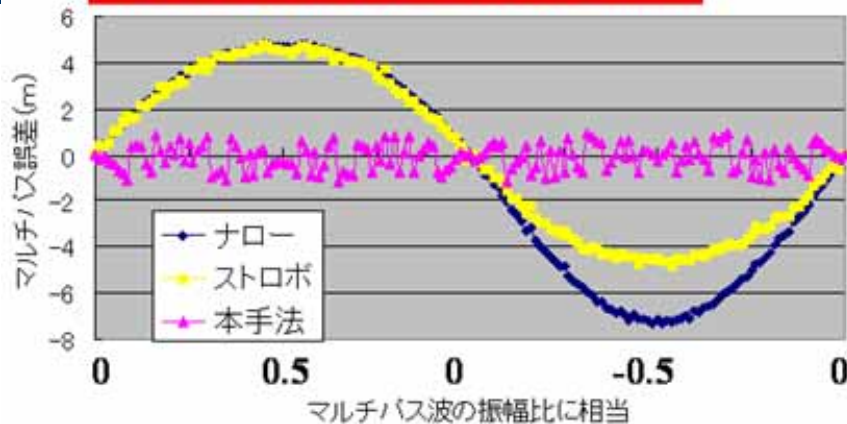
マルチパス誤差 振幅比0.5



1つのマルチパス波を想定したシミュレーションで、マルチパス誤差を1m以内に低減。遅延距離の推定精度は数mであるが、実際のマルチパス誤差推定に重要な直接波の推定精度は1m以内である。

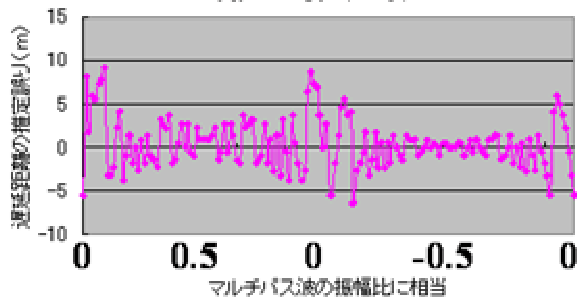
本手法を用いた場合の性能 シミュレーション(振幅比を変動)

マルチパス誤差 遅延距離: 15m

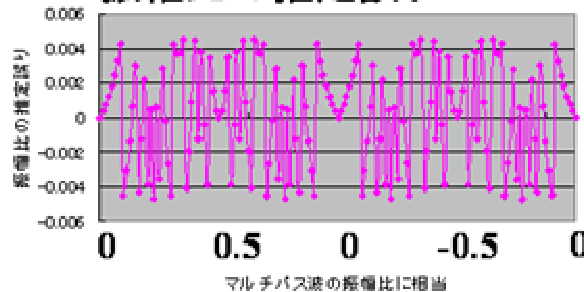


- 実際に近接に大きな壁が存在する場合を想定したケース(振幅が位相に応じて1周期分変動している)。
- 既存の手法で低減できない遅延距離の短い領域のマルチパス誤差を1m程度まで低減。
- 遅延距離と振幅比の推定誤りも同時に示した。

遅延距離の推定誤り



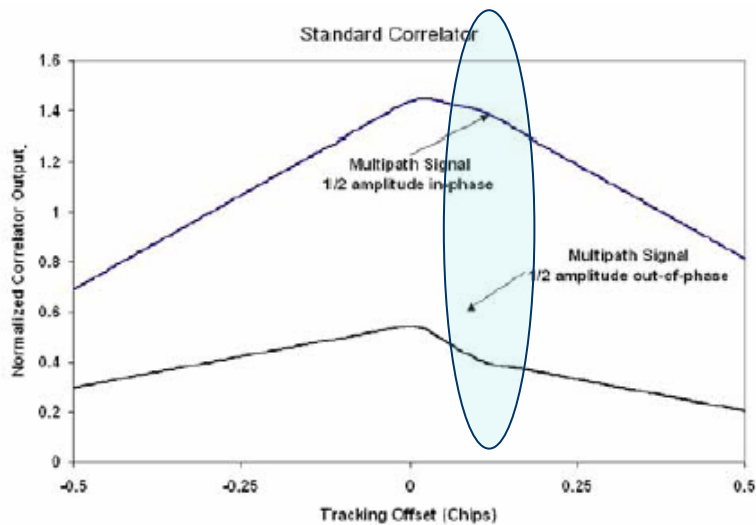
振幅比の推定誤り



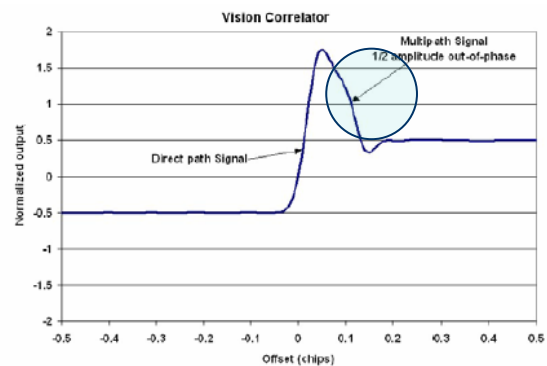
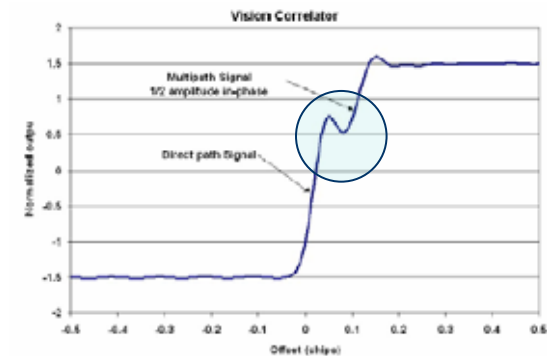
最近発表された技術のポイント (Vision Correlator by NovAtel)

- マルチパス波を推定する際の最尤推定法で、**その時間を短縮する技術を導入した**。具体的には、既存のMMT (Multipath Mitigation Technology) という技術を用いた (Dr. Ben Fisher, Dr. Larry Weill)。
- マルチパス波を推定する際に、**従来の相関波形を使用せずに、直接コード波形を観測し**、そのコード波形の積分値を利用している。従来の相関器による方式はコード波形をコードのタイミングに関して積分した結果であり、マルチパスによる変化が鈍ってしまう。そのため、マルチパスの影響が**傾きの変化**として現れるので、マルチパスの影響を正確に把握し難いという課題があった。コード波形を直接観測すると、マルチパスの影響をより正確に推定することが可能となる。

相関波形と直接観測の違い



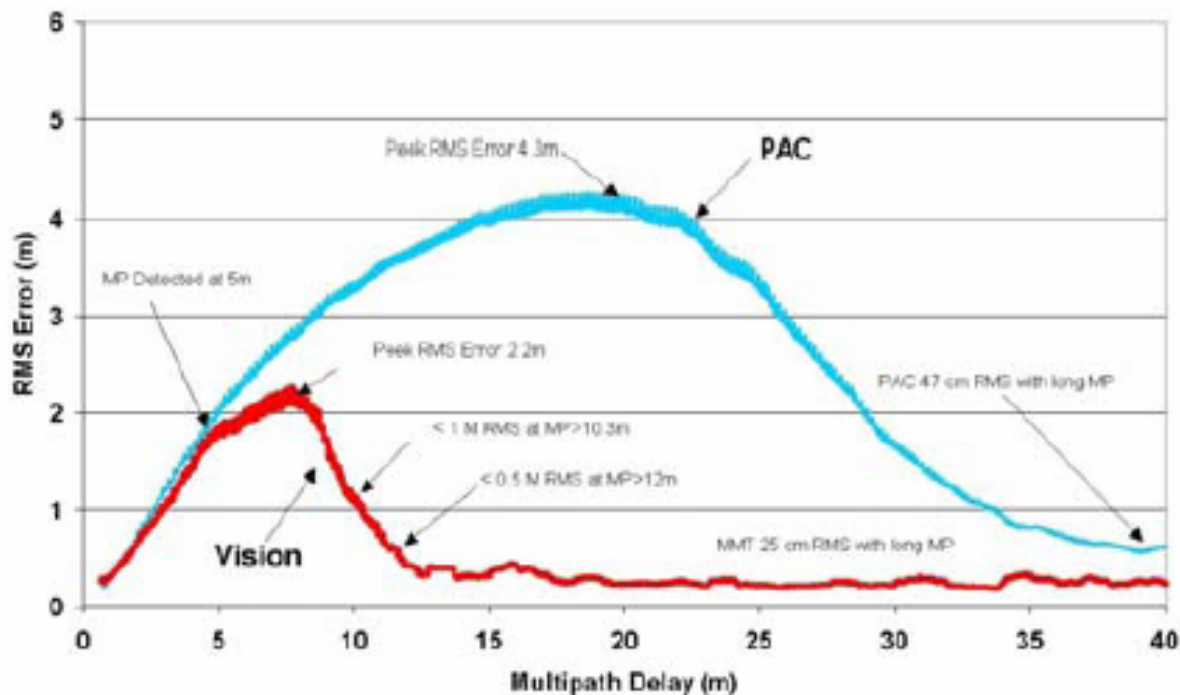
通常 of 相関波形



直接観測方式

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



まとめ

- 図において、文字や数値等見づらい部分は、全て参考文献に挙げている論文のコピーを使用していることが原因なので、詳細は参考文献を見て頂ければと思います(詳細な数式も同様)。
- 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。この他にも信号強度を利用する技術なども見られるが、効果はほぼ同じ。
- 後処理では、全く別の手法も考えられる。搬送波位相のマルチパス誤差の影響について述べていないが、GPSの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、本稿では述べていないが、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。受信機内部の信号処理だけでなく、アンテナによる低減効果も探る。