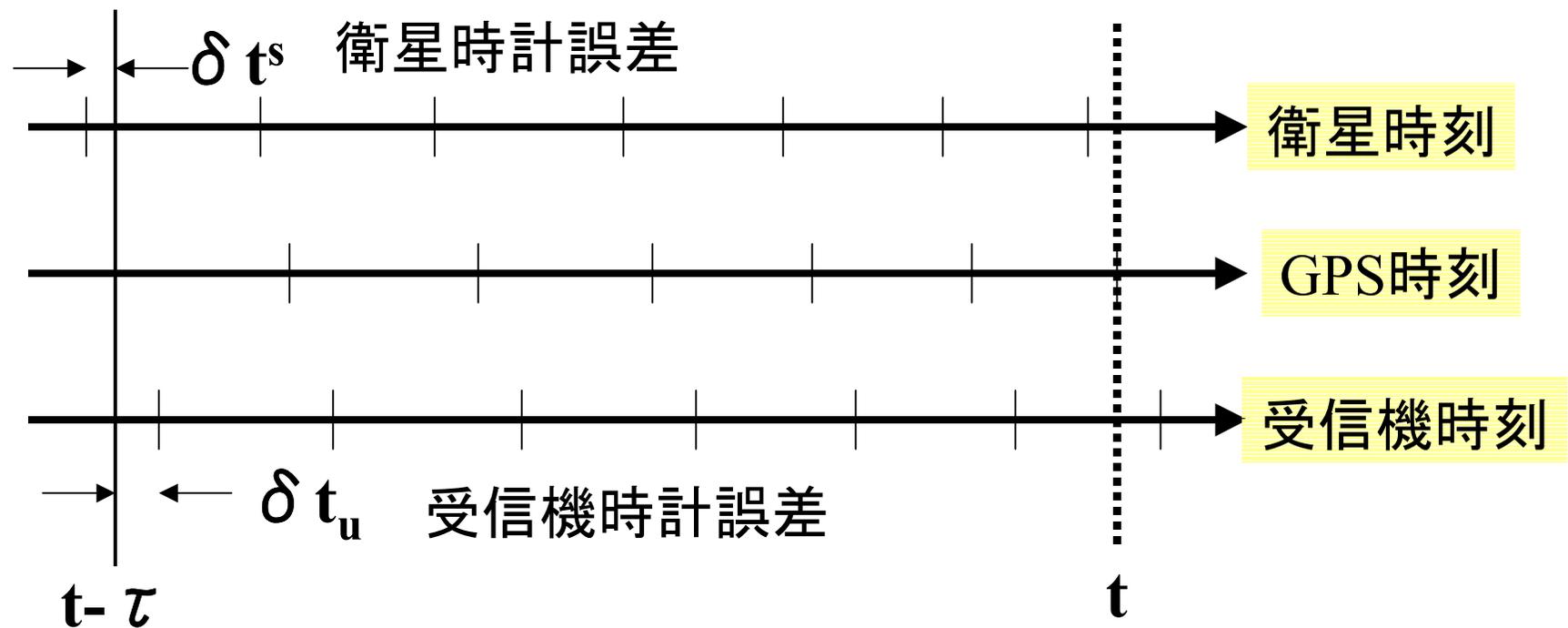


コードを用いた擬似距離測定

電波発射時刻

電波到達時刻



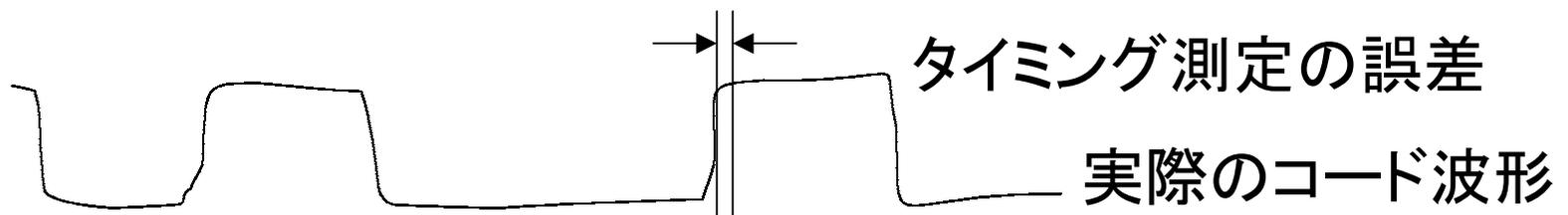
$$\text{擬似距離 } \rho(t) = c\tau + c[\delta t_u(t) - \delta t^s(t - \tau)] + \varepsilon_\rho(t)$$

$$\text{擬似距離 } \rho(t) = c\tau + c[\delta t_u(t) - \delta t^s(t - \tau)] + \varepsilon_\rho(t)$$

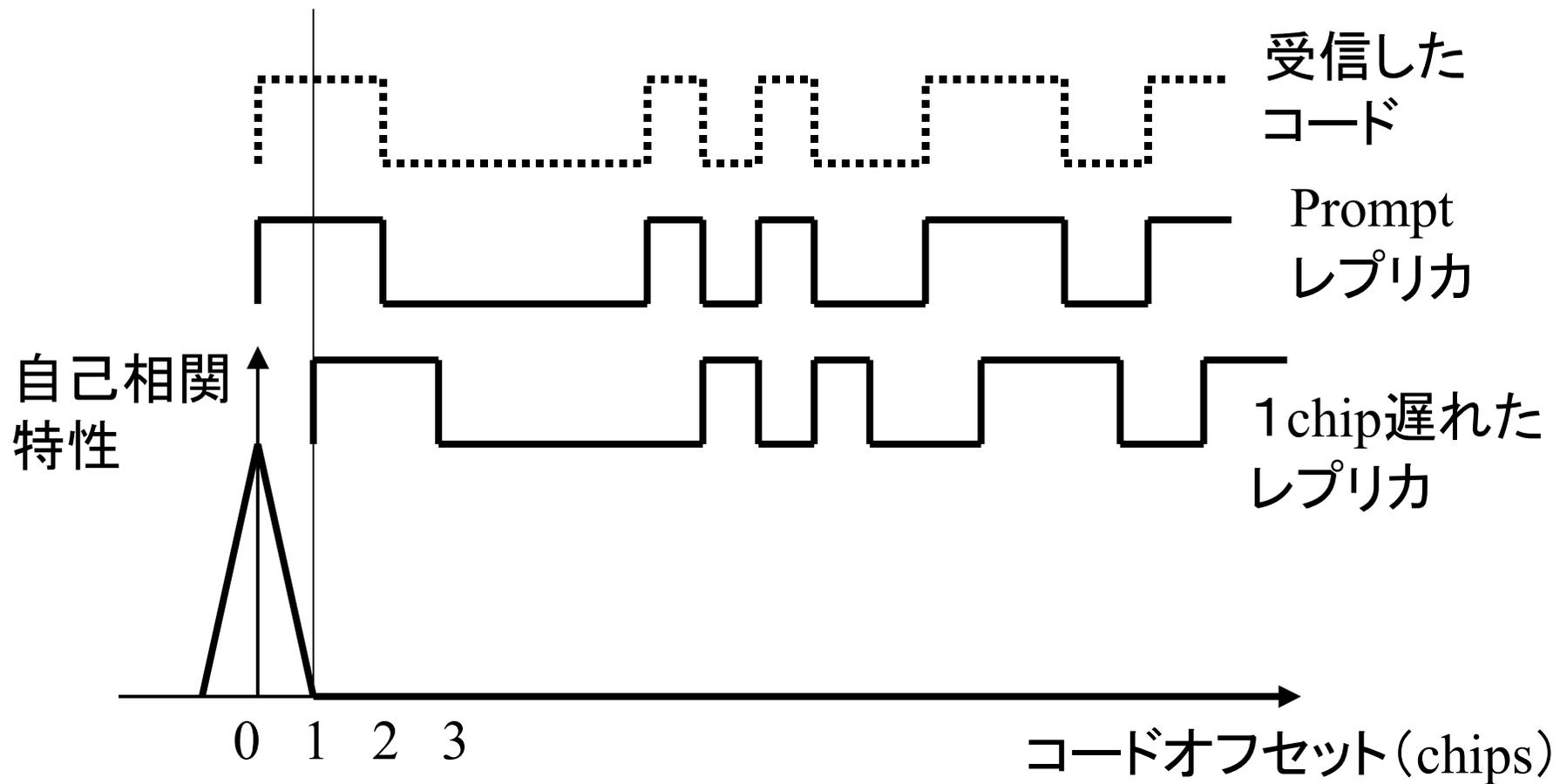
理想的には $c\tau$ のみを測定したいが、現実には時計の誤差、電離層、対流圏、マルチパス、受信機ノイズ等の誤差を生じる

衛星と受信機間の距離は約2万km~2万6千kmである。伝搬時間にすると約70ms~90msである。C/Aコードは1msごとに繰り返されており、コード相関処理において、**伝搬時間を1msで割った余りの時間**が算出される。1msで約300km進むので地上であいまいさの問題は起きない。

ここで**余りの時間の精度はチップ周期の1/100~1/300程度**である。チップ周期は $1\mu\text{s}$ 弱なので、3~10nsである。距離にすると1~3mとなる。Pコードでは単純に0.1m~0.3mとなる。1995年のテキスト参照



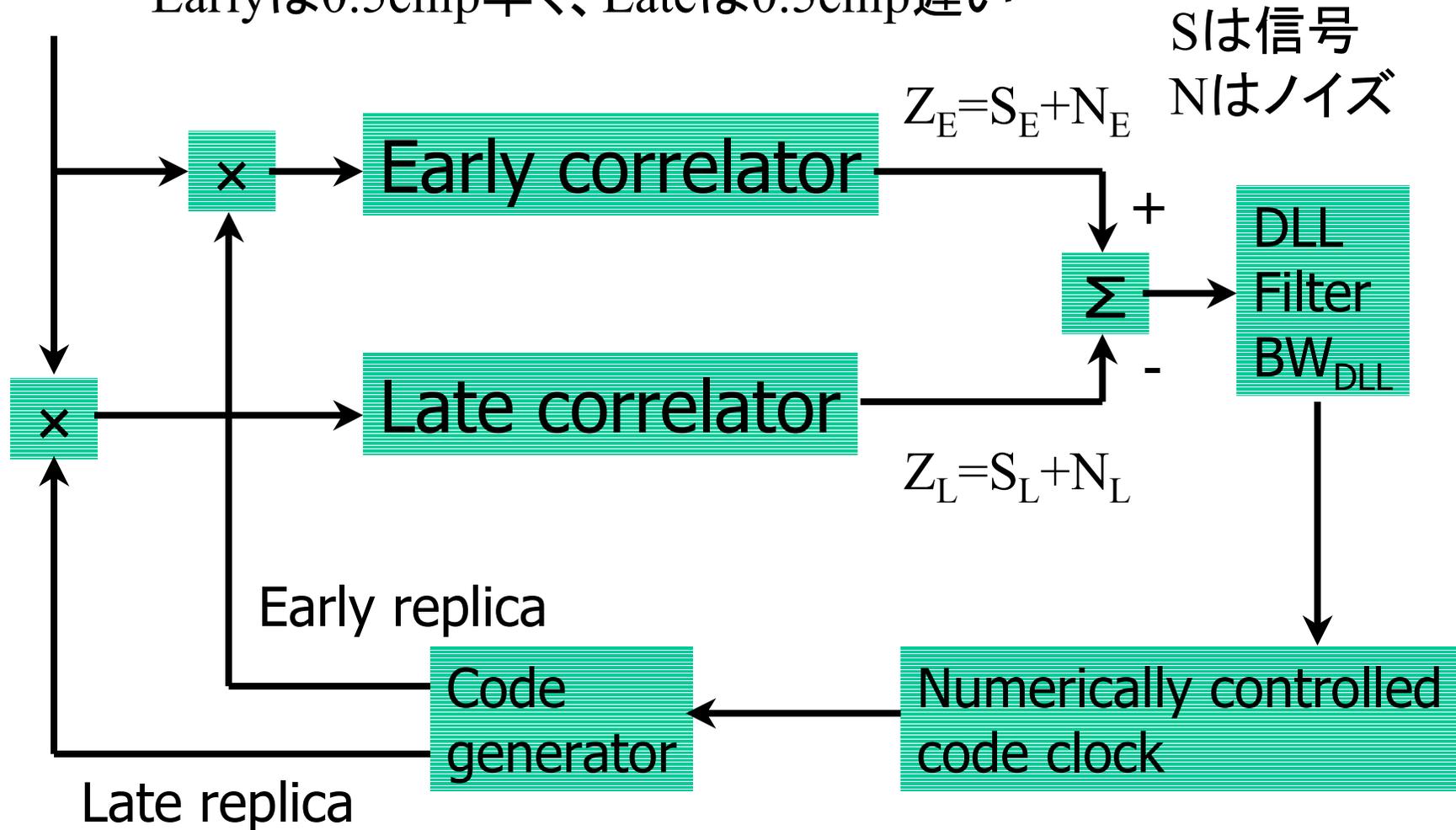
コード相関処理



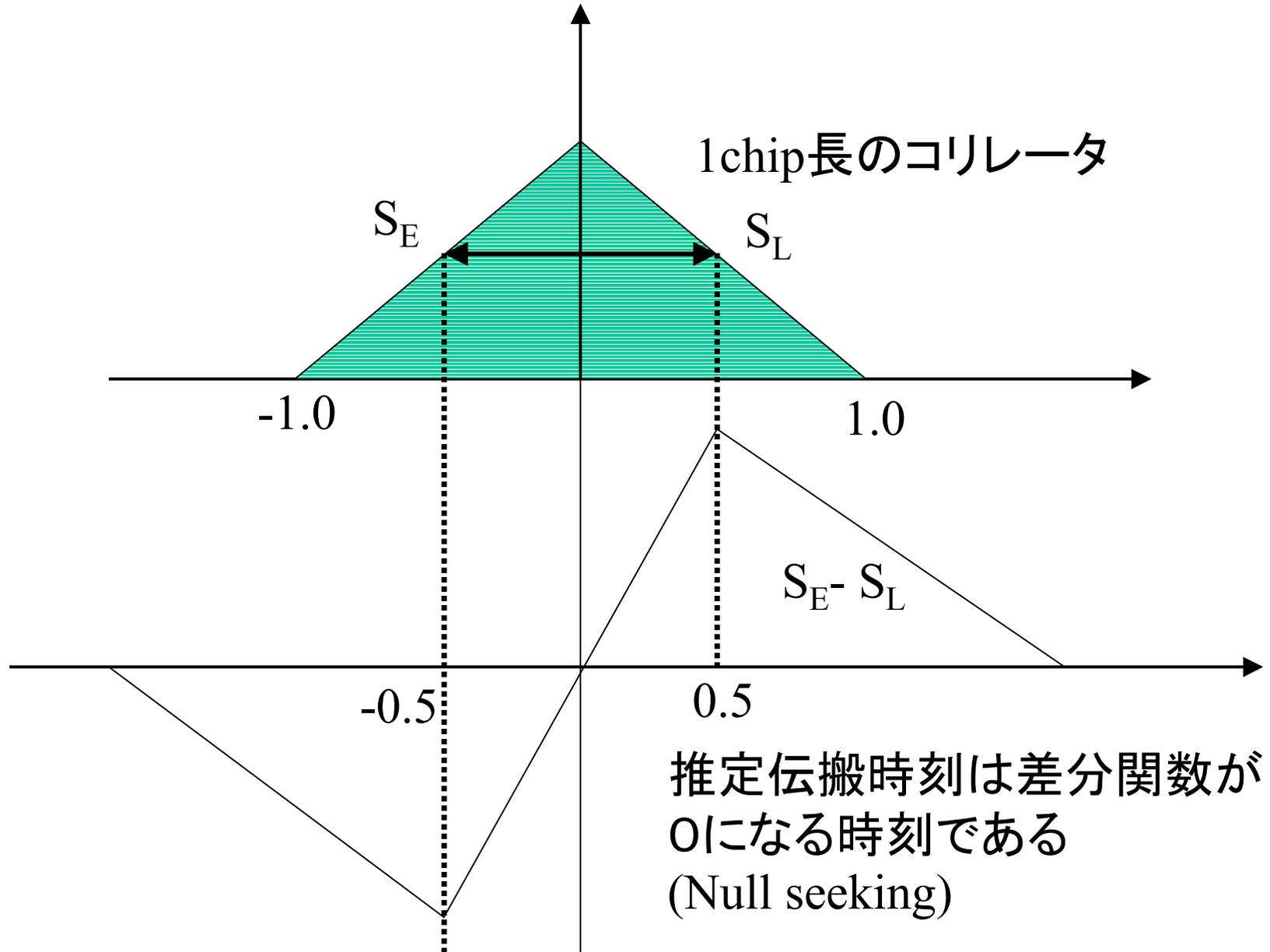
GPSコードの自己相関はきれいなピークをもち、2番目のピークは
かなり小さい。自己相関関数の傾きと測距精度の関係は？

DLLと測距精度

Correlator spacingが1チップの場合
Earlyは0.5chip早く、Lateは0.5chip遅い



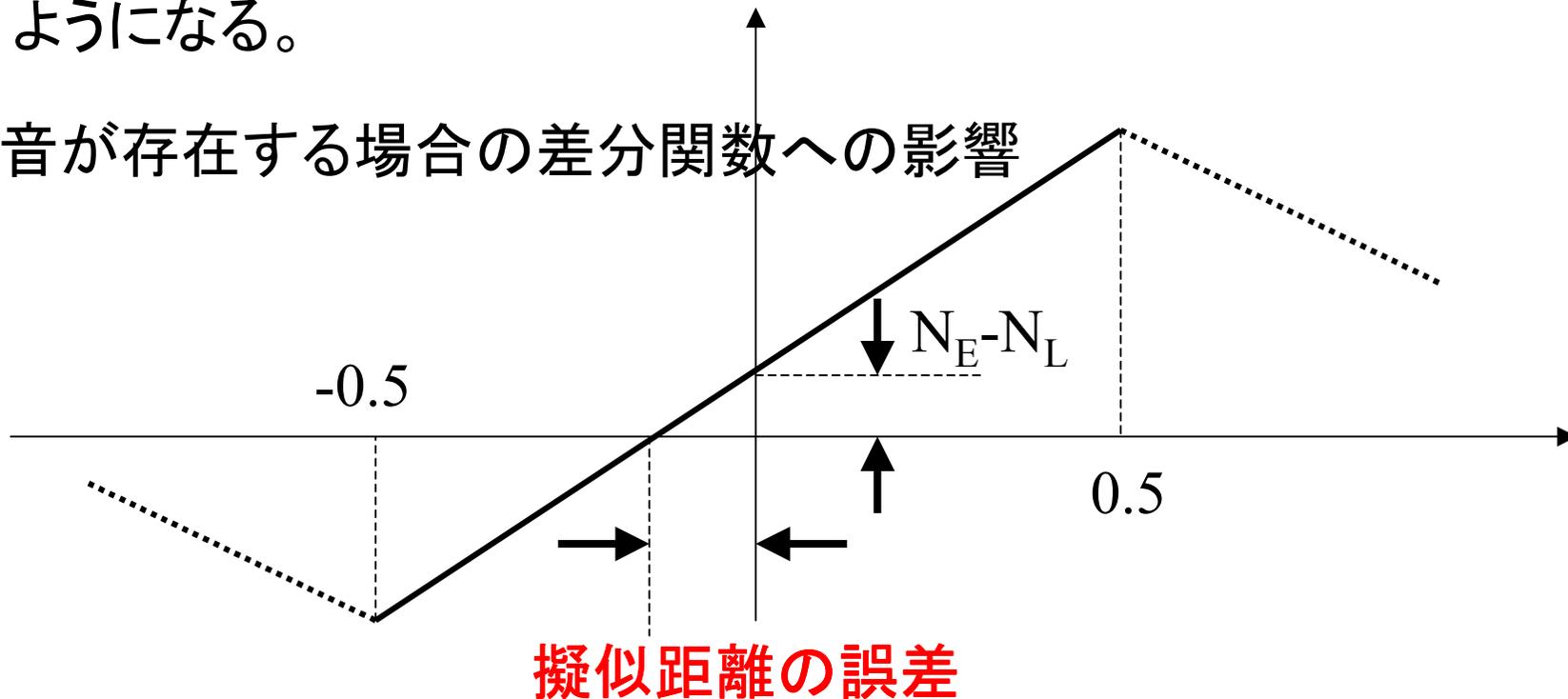
相関ピーク関 (雑音なし)



相関ピーク図(雑音あり)

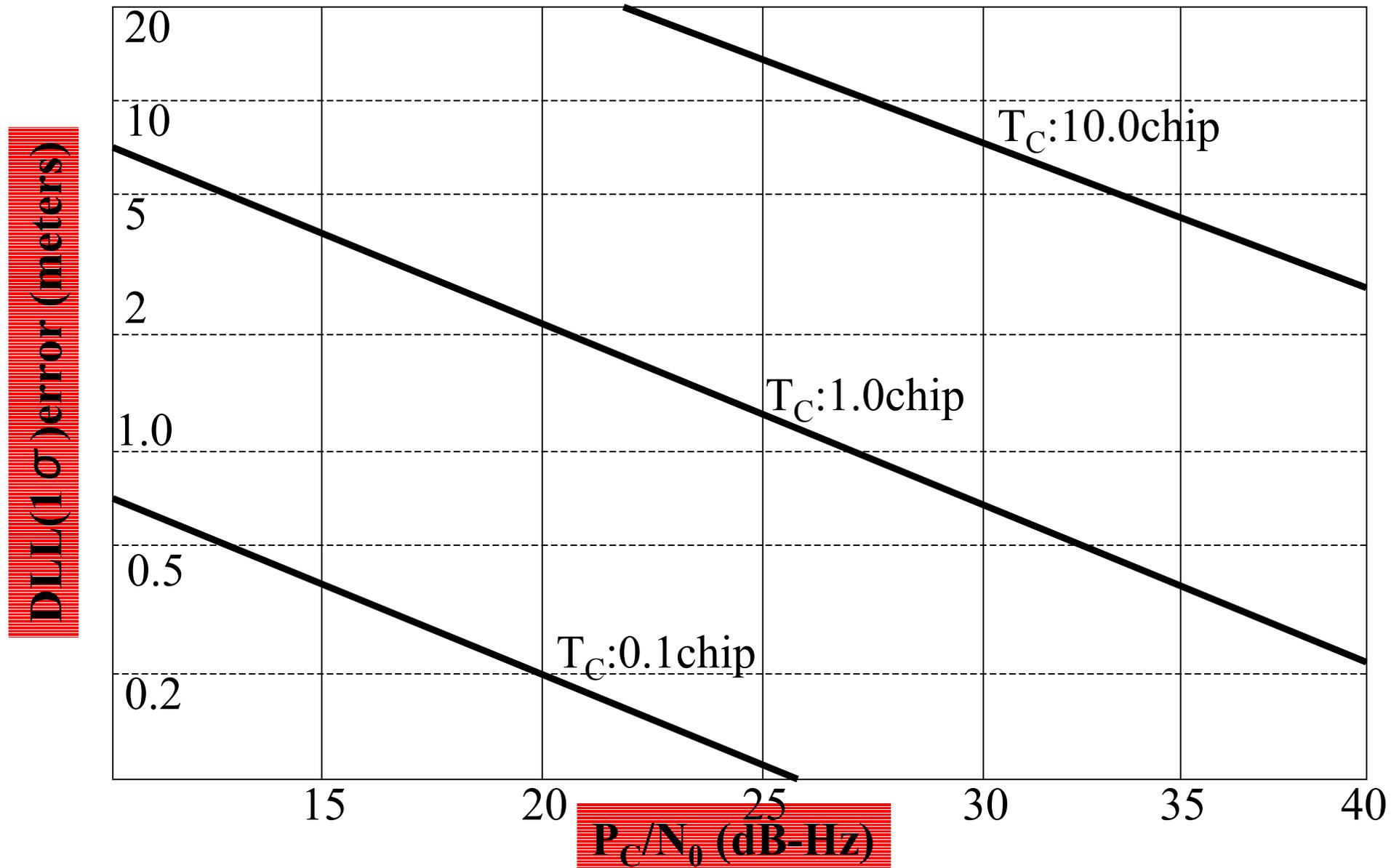
雑音は自然電波雑音、マルチパス波、他の衛星の電波、人工的な干渉波等。雑音を白色雑音と過程した場合相関図は次のようになる。

雑音が存在する場合の差分関数への影響



擬似距離誤差 = $(N_E - N_L) / \text{slope} = (N_E - N_L) / (2.0 * \text{sqrt}(P_C) / T_C)$
は T_C チップ長、 P_C は信号の電力である。

DLLの白色雑音に対する性能



GPS測位における誤差要因

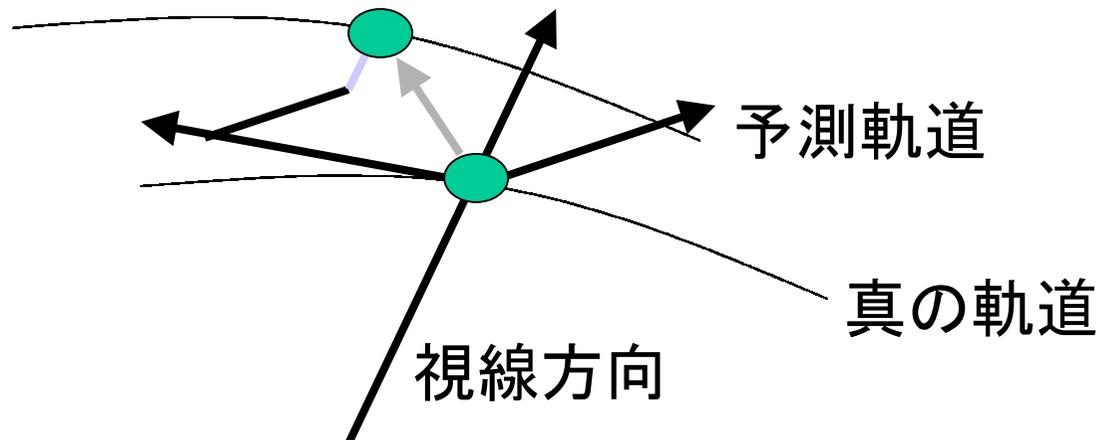
- 衛星時計誤差モデルの限界
- エフェメリスによる予測の限界
- 電離層遅延
- 対流圏遅延
- マルチパス
- 受信機ノイズ

衛星時計誤差モデルの限界

- 観測する衛星の時計は完全に同期していない。これは航法メッセージの中にある時計の補正係数(時計のゆるやかな変化を2次係数まで利用して補正)で2m以内まで補正される。
- DGPSでは完全に除去される。

エフェメリスによる予測の限界

- エフェメリスは約2時間ごとに更新されており、その誤差は最大で10m程度である。
- 注意すべき点は、測位に影響を与える誤差は視線方向の誤差のみであることである。またDGPSではほとんど除去される。



電離層遅延による誤差

- 電離層遅延はGPS電波が通過した全電子密度による。天頂方向で約2-10m。仰角に応じて係数をかける(30度で1.8、5度で3)。
- 電離層モデルで1-5m程度に削減。2周波のデータで1m程度に削減。DGPSでは100km離れても0.2m程度までだが、活発なときは1mを超える報告も。

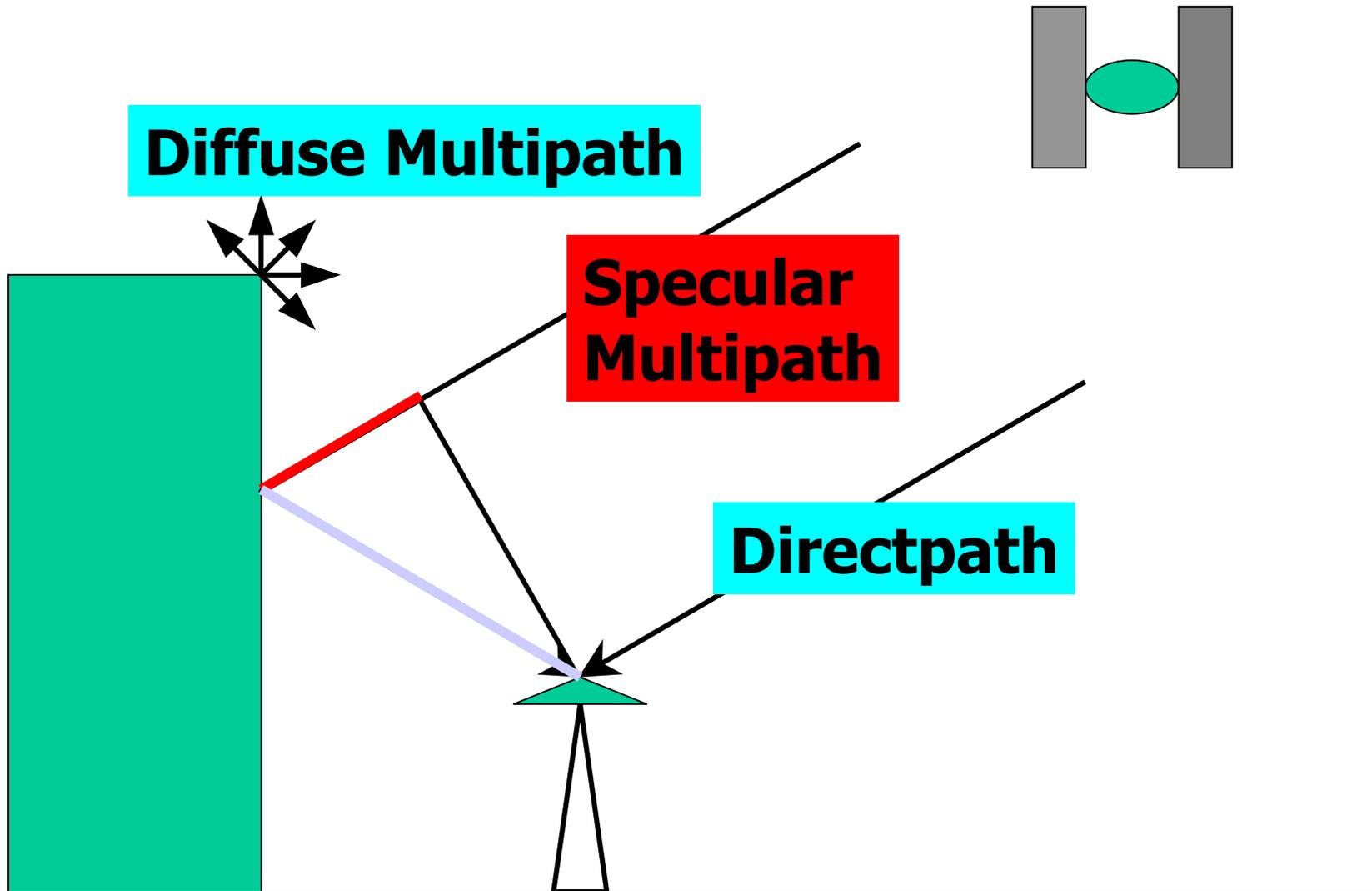
対流圏遅延による誤差

- 対流圏遅延はGPS電波が通過した乾燥空気及び水蒸気により起こる。海面レベルで天頂方向に約2.5m。電離層と同様仰角に応じて係数を掛ける(30度で2、15度で4、5度で10)。モデルで0.5m程度まで削減。
- DGPSでは0.2m程度まで削減されるが、2地点の気象条件(水蒸気量)や高度が大きく異なる場合はそれ以上になる。

マルチパスと受信機ノイズ による誤差

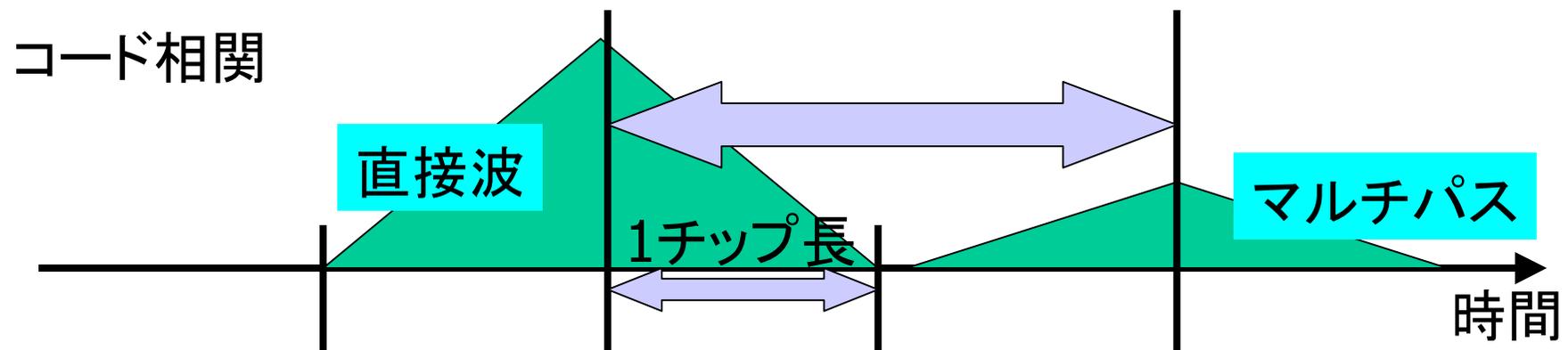
- これらの誤差はサイト固有に起こるものなのでDGPS等で削減不可能。ゆえに注意深いサイト選定とマルチパス除去機能をもつアンテナ及び受信機が求められる。
- マルチパスの誤差はコードで0.5-1.0m程度、搬送波で0.5-1cm程度。受信機ノイズはコードで0.25-0.5m程度、搬送波で1-2mm程度（アンテナ周囲が開けている環境で）。

マルチパスについて

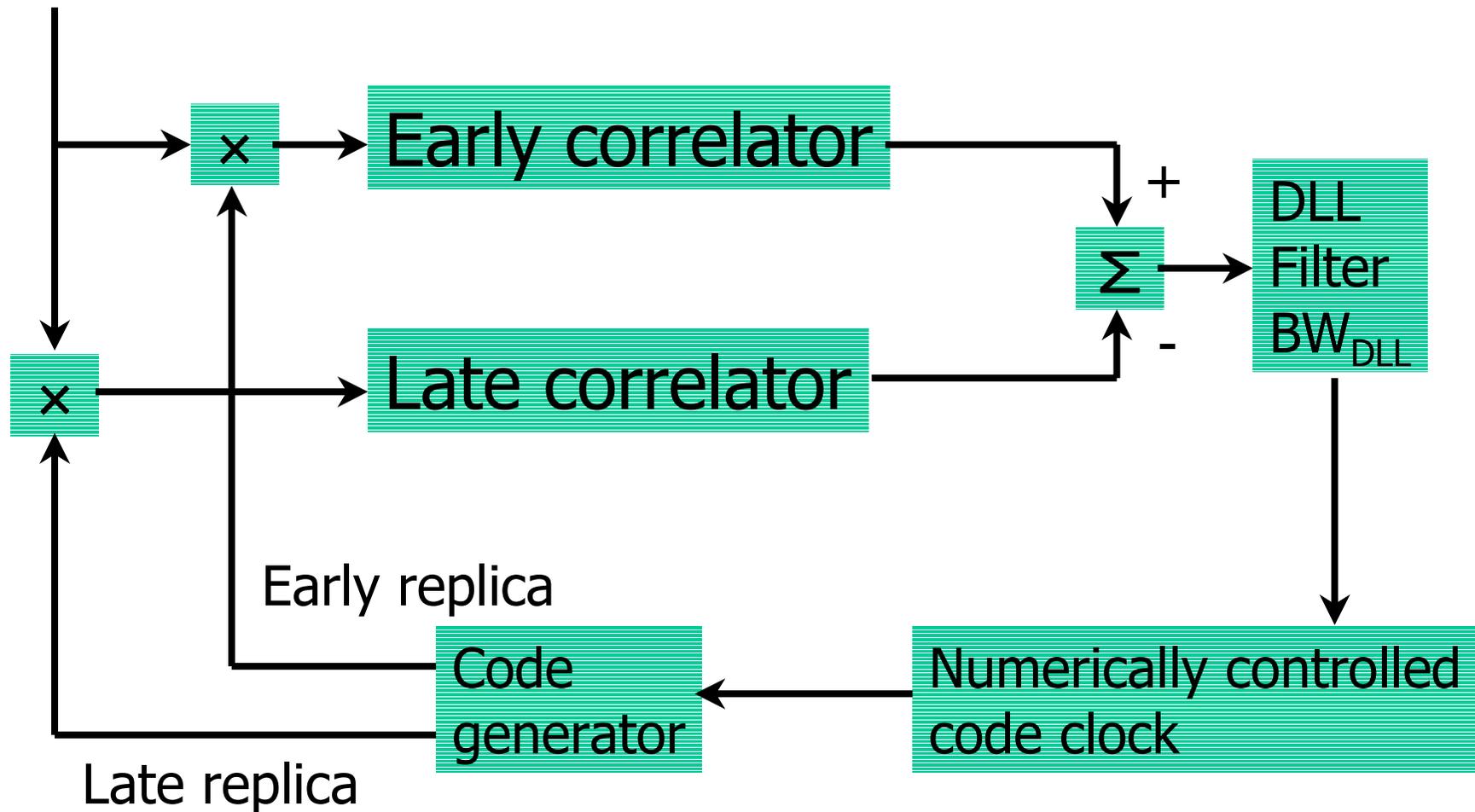


重要なマルチパスの特徴

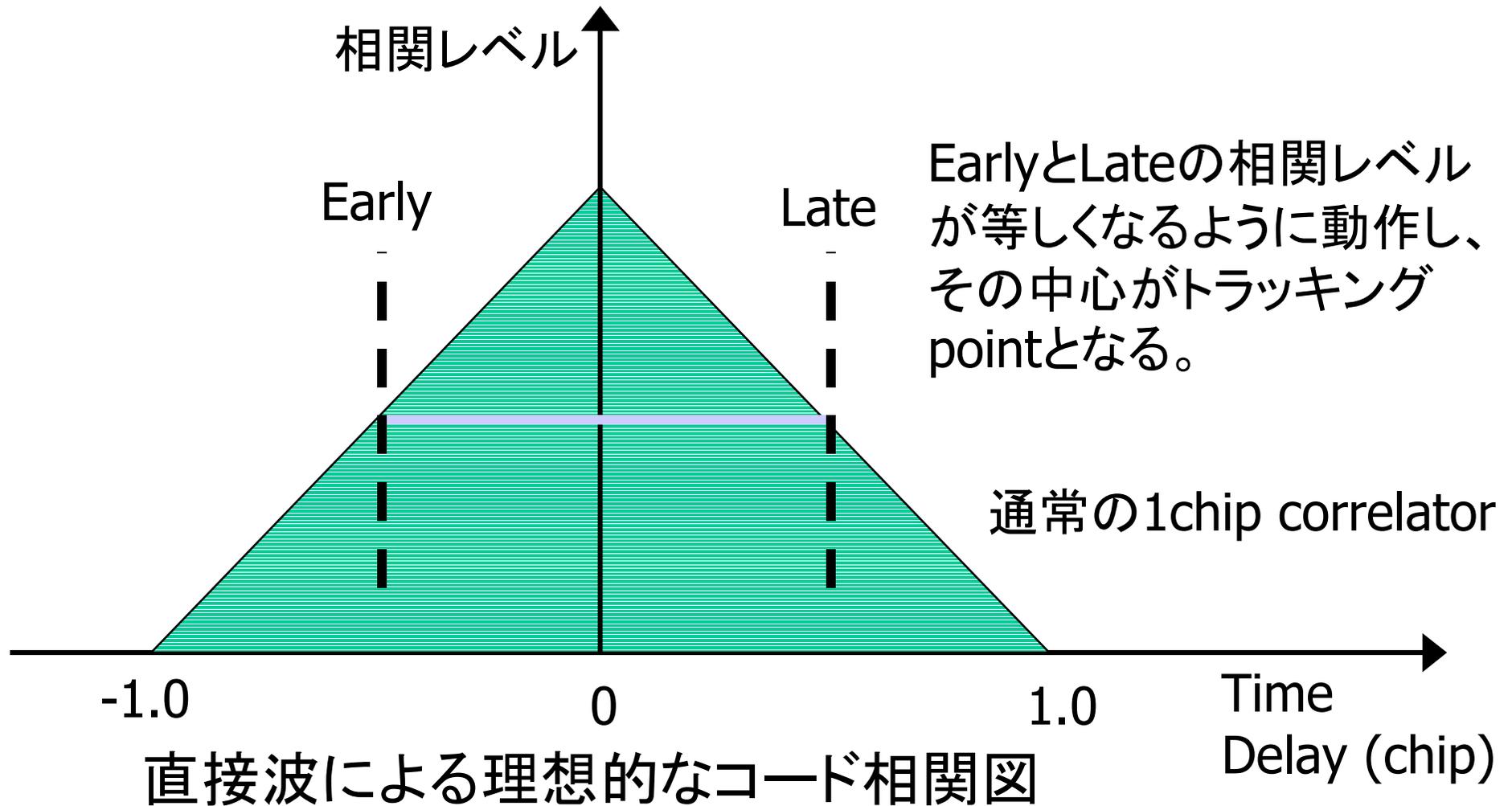
- マルチパス信号の強さは直接波より弱い。
- 直接波は必ずマルチパスよりも早く到達する。
- マルチパスの直接波に対する遅延距離がPRNコードの2チップ分(約600m)より長い場合は無視できる(初期の受信機で)。
- 信号強度と強い相関がある。



Delay Lock Loopについて (コード追尾)

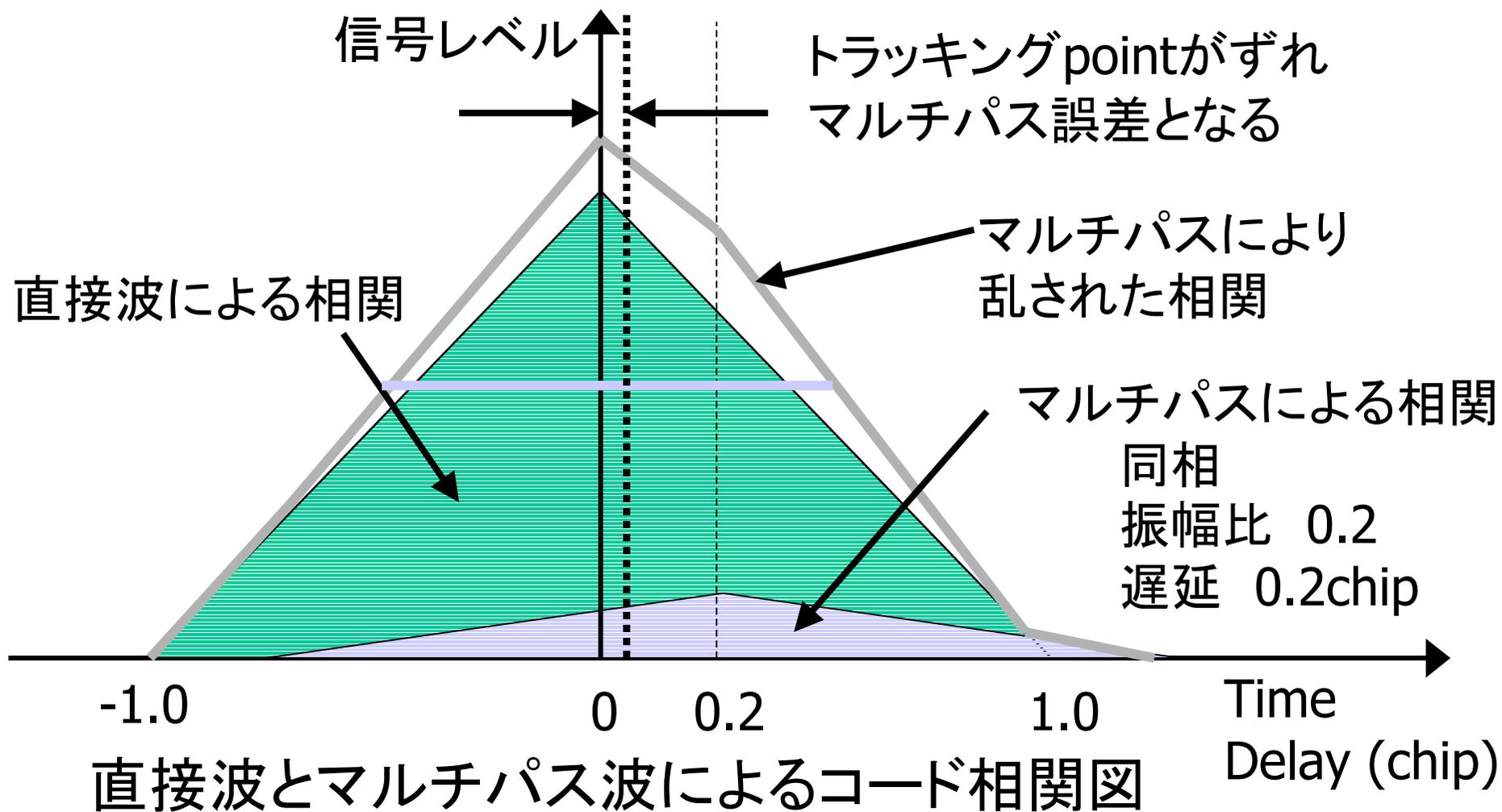


DLLによるコード相関について



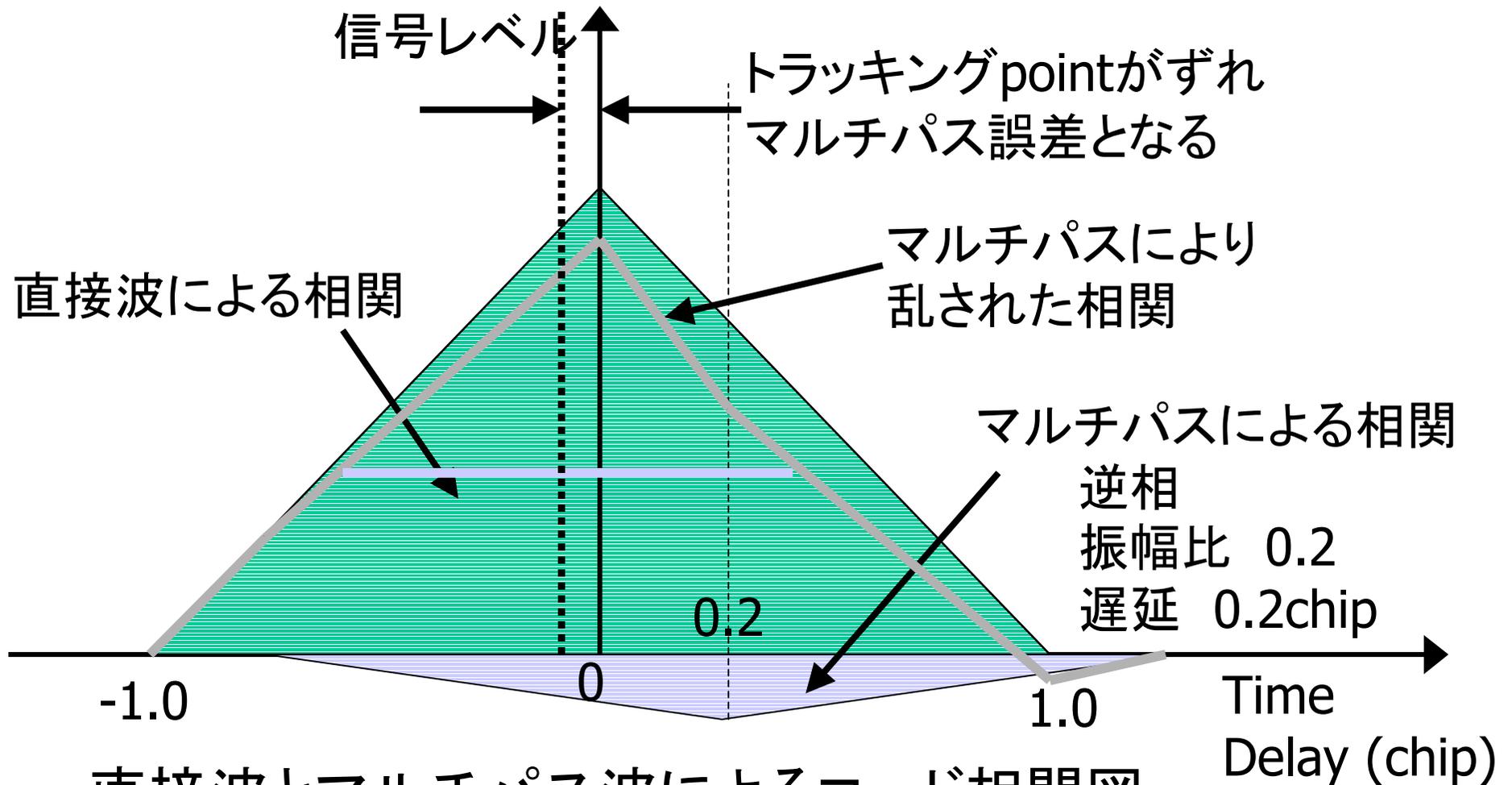
マルチパス存在時のDLL相関

(同相の場合)



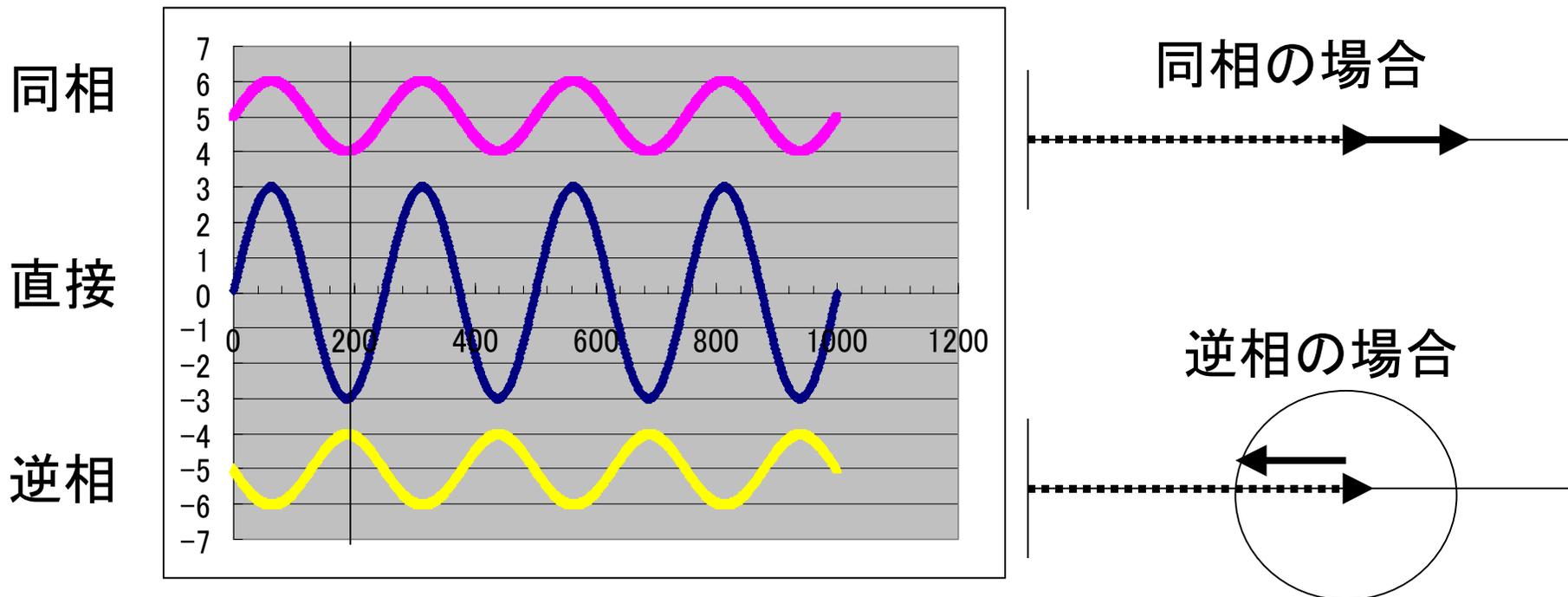
マルチパス存在時のDLL相関

(逆相の場合)



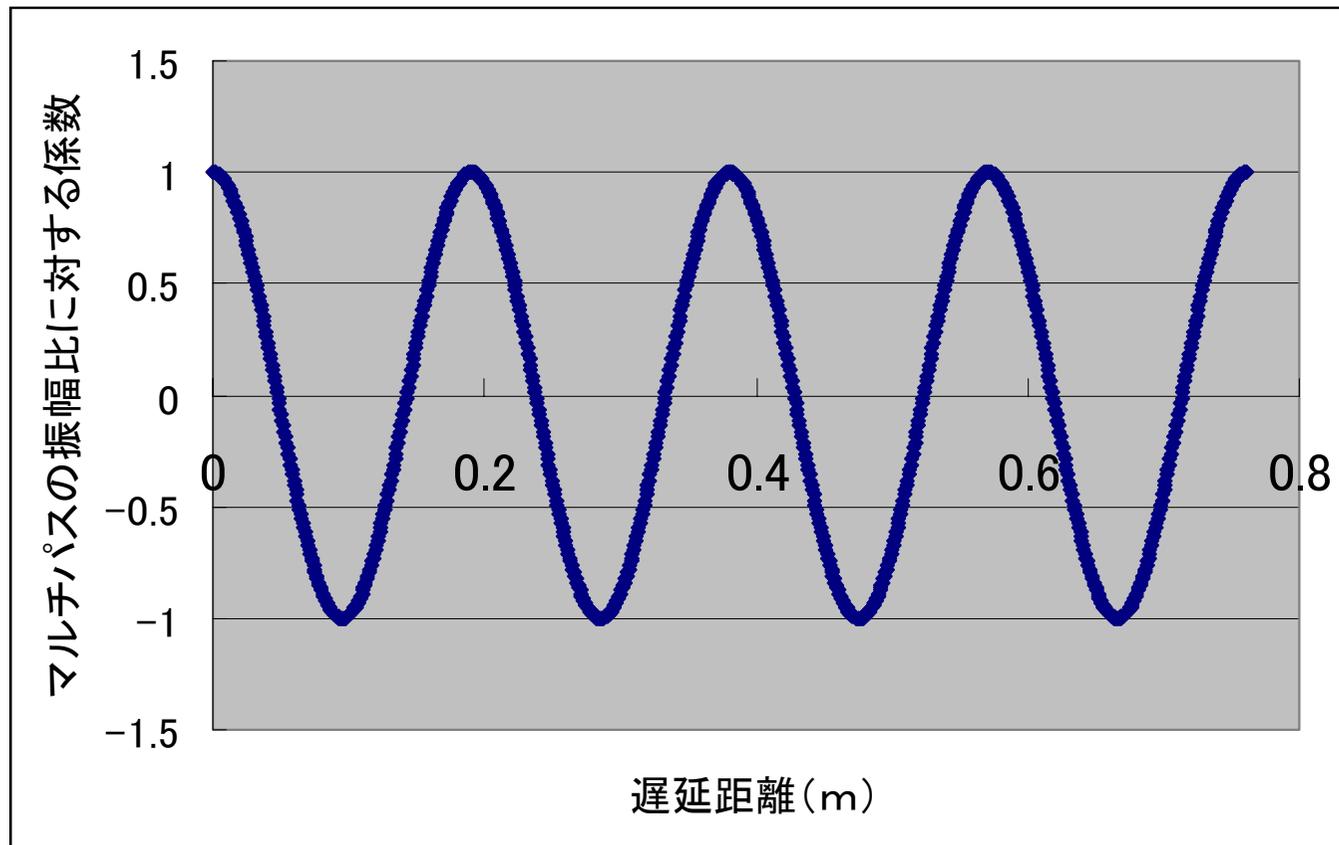
直接波とマルチパス波によるコード相関図

直接波とマルチパスの位相差



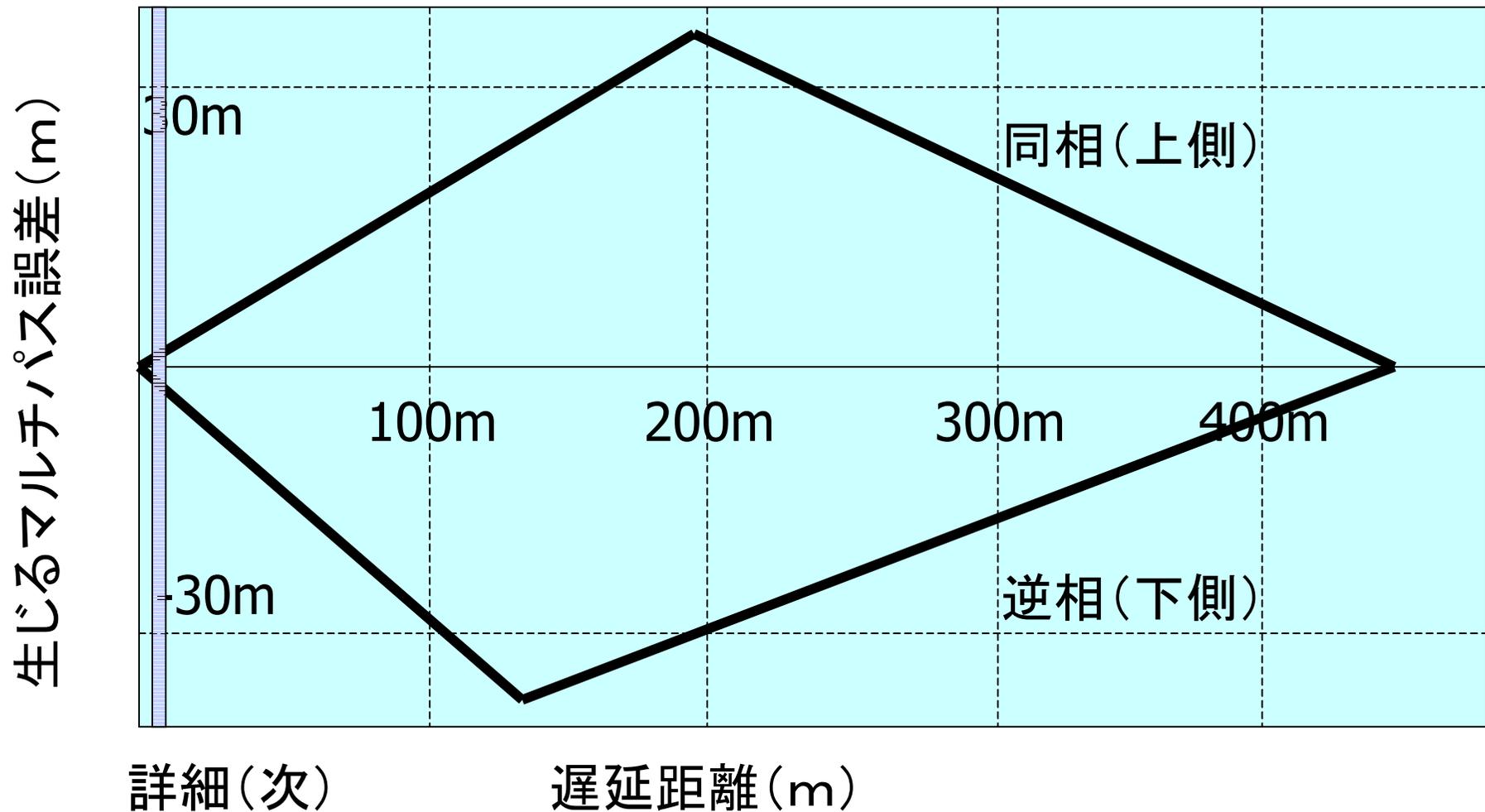
遅延距離とマルチパスの振幅の関係

(反射により位相が乱れない場合)

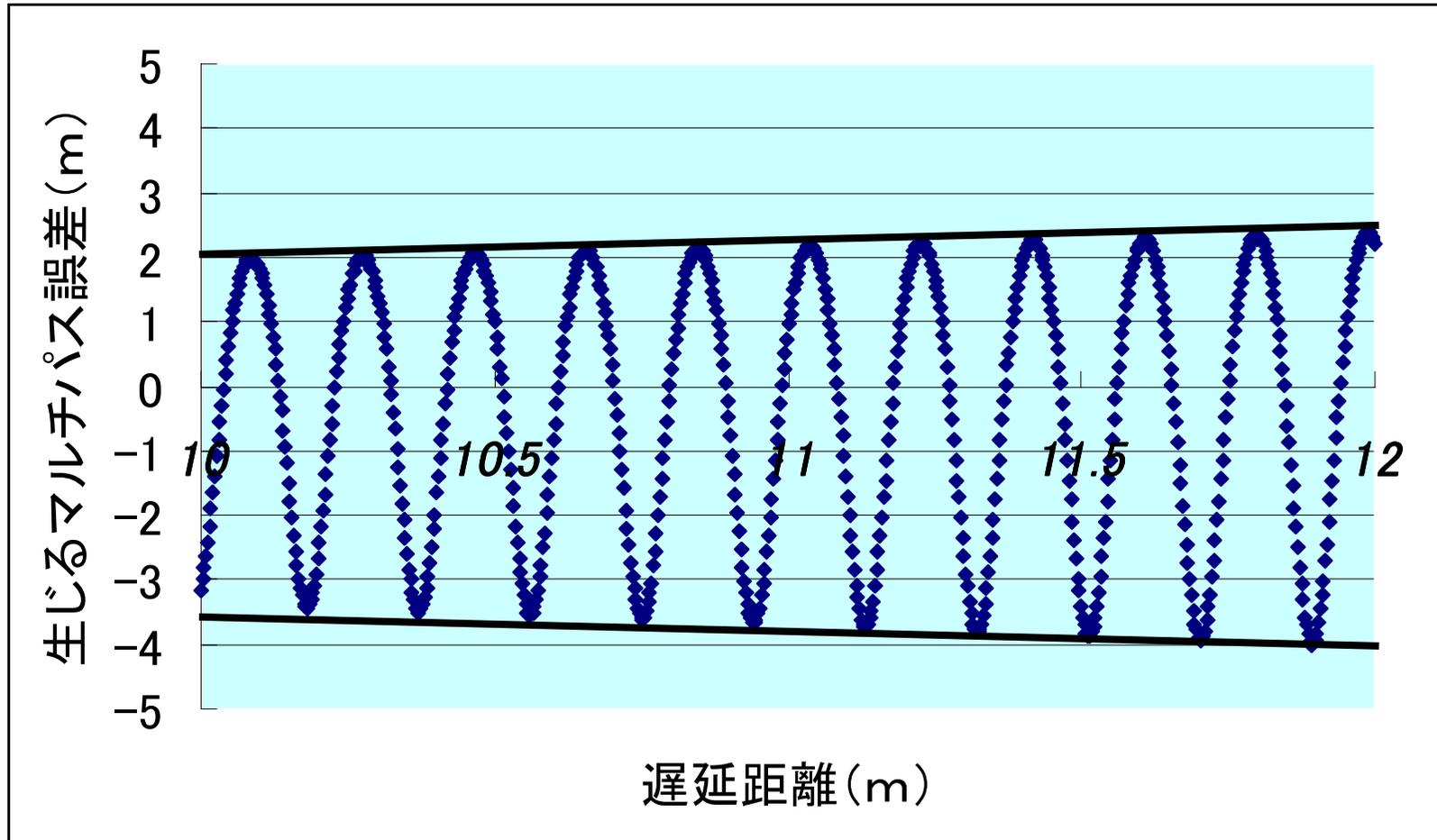


遅延距離はそのまま位相差につながる。360度で1波長0.19...m

マルチパス誤差と遅延距離の関係 (振幅比0.25、1チップ)



詳細(10mから12mの部分)

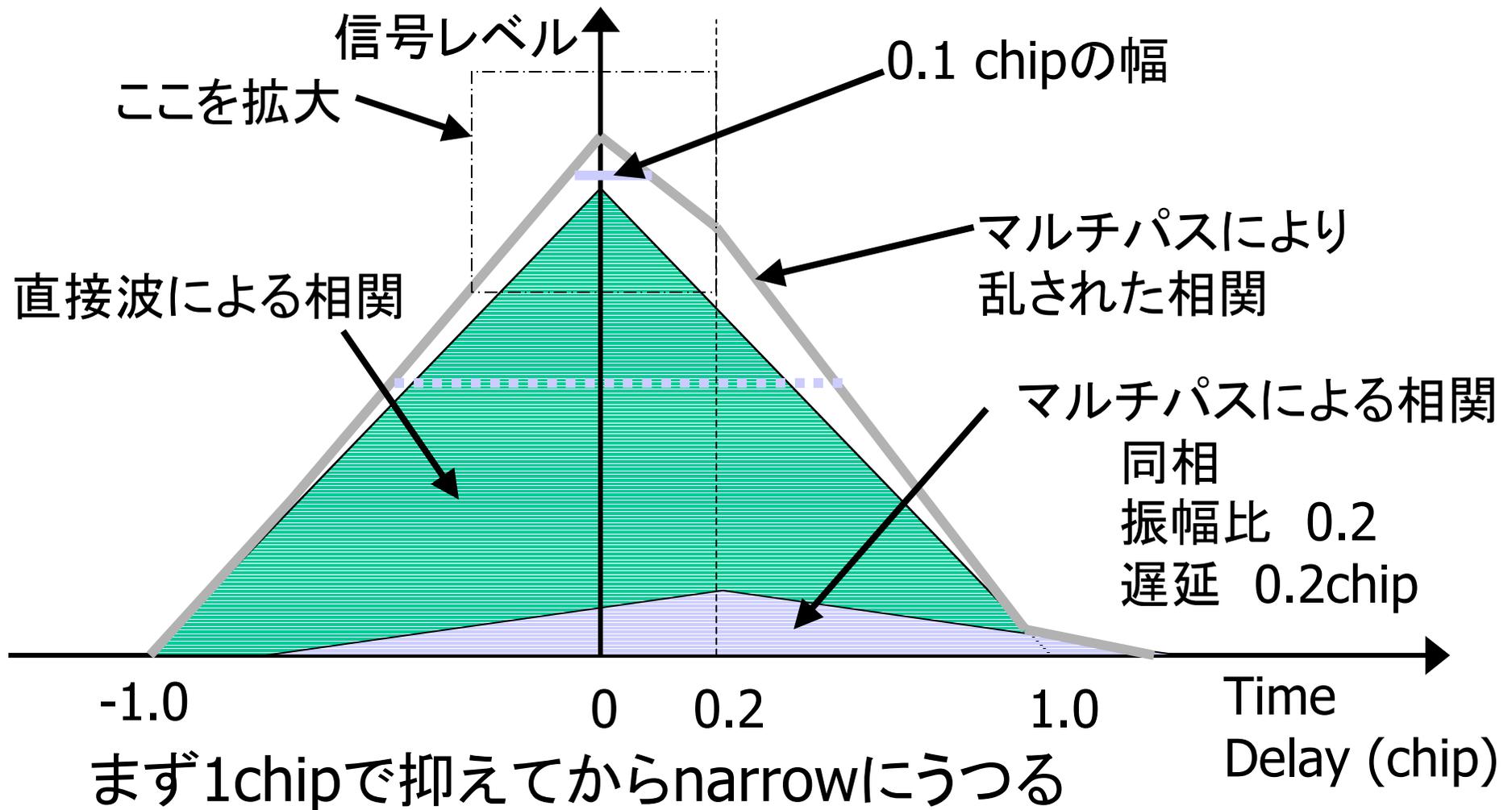


受信機によるマルチパス抑制技術

- Narrowコリレータ (NovAtel社、1992)
- MEDLL (NovAtel社、1995)

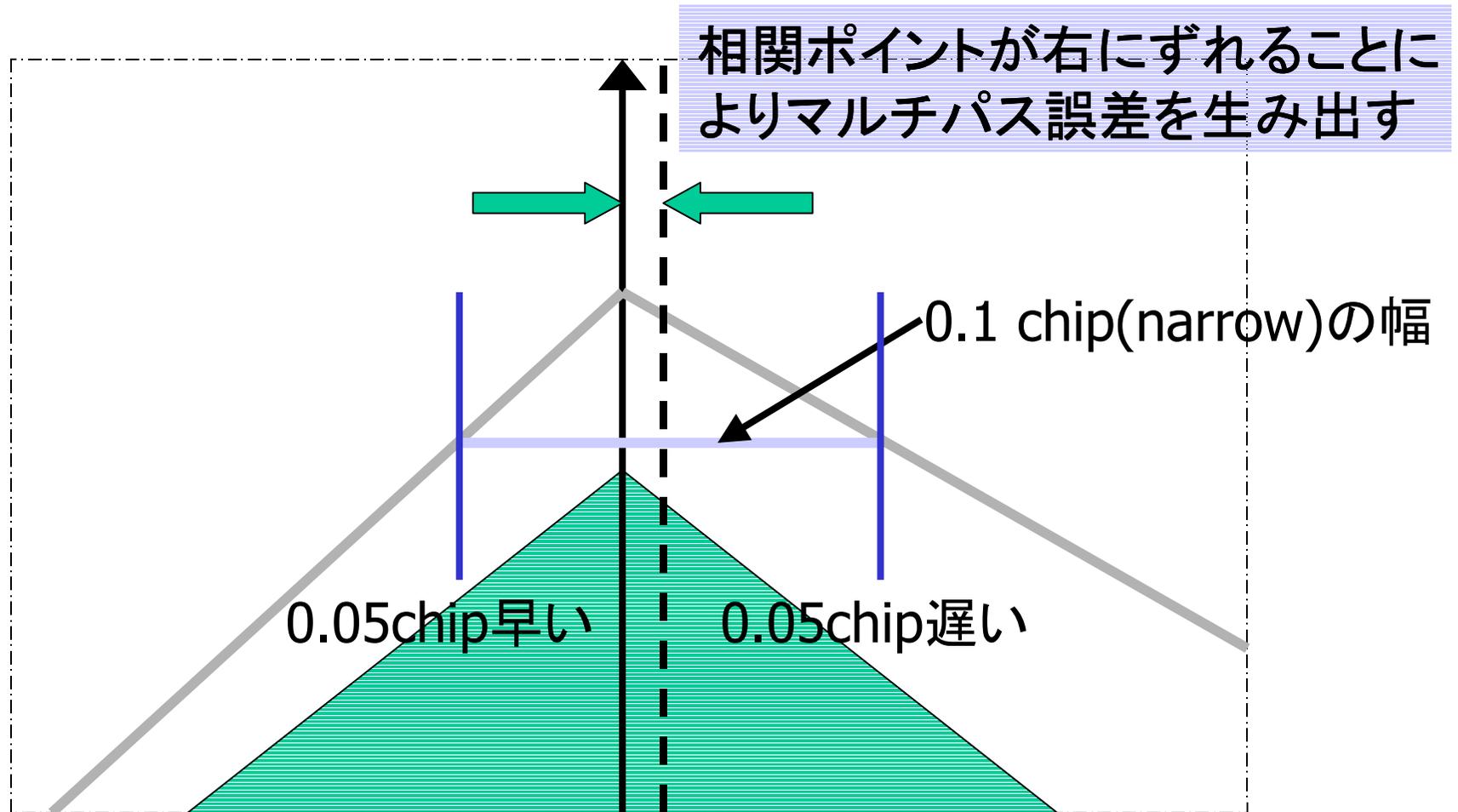
いずれも前述のDLLの相関処理部分を工夫した技術である。

Narrowコリレータについて



相関部分の拡大図

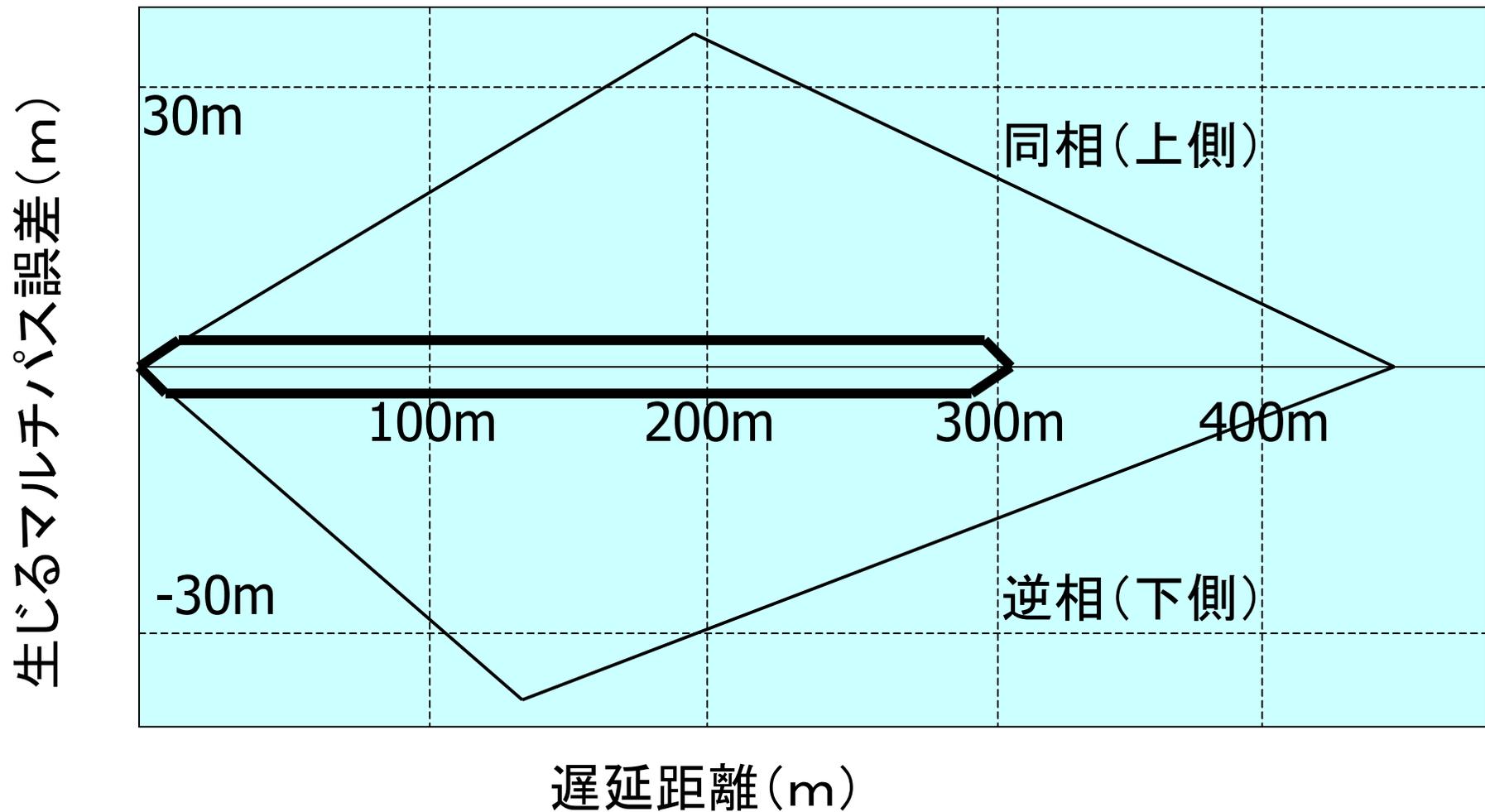
(コード追尾方法)



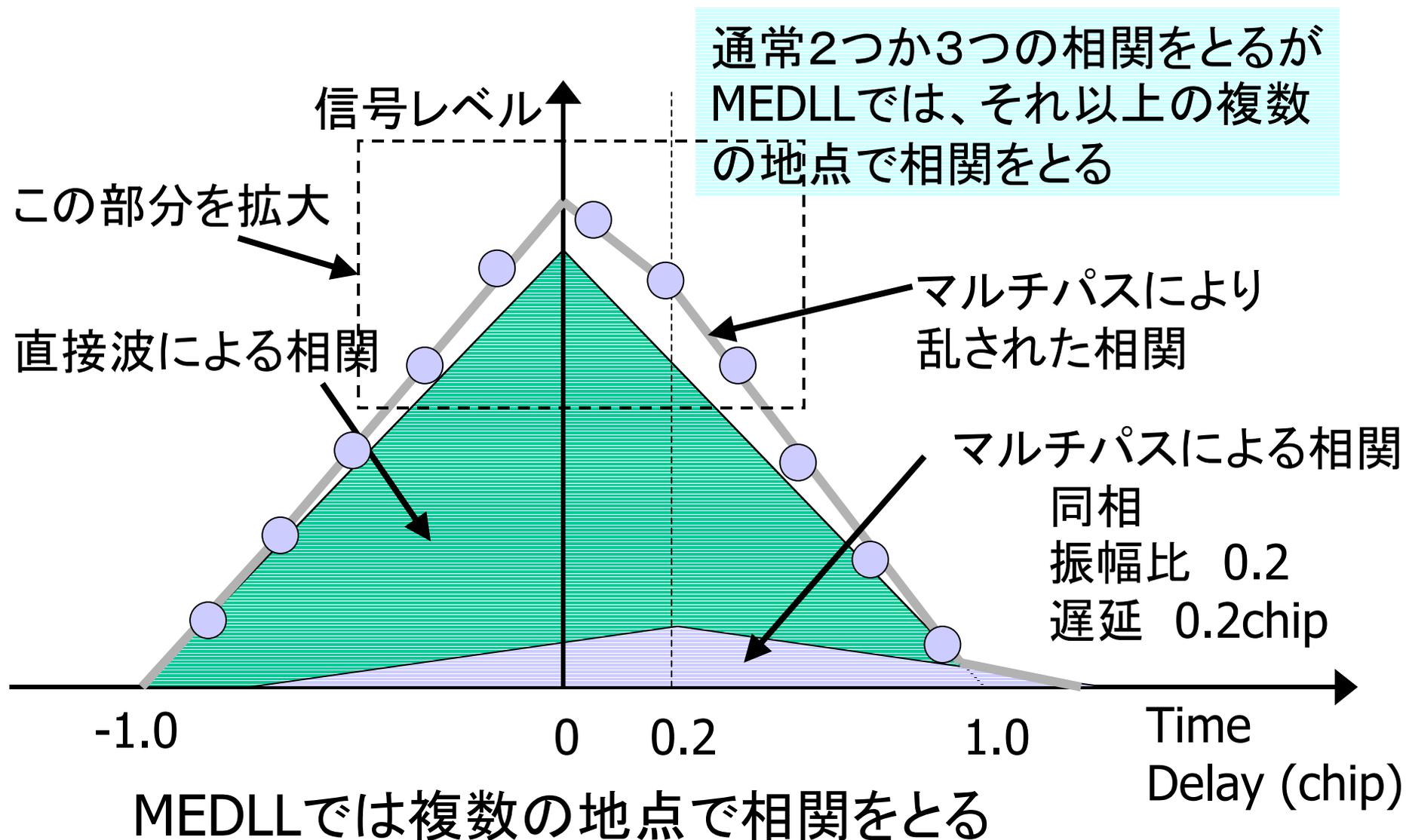
0.1chipしかないので遅延距離の長いマルチパスは無視できる

マルチパス誤差と遅延距離の関係

(振幅比0.25、0.1chipのNarrow)

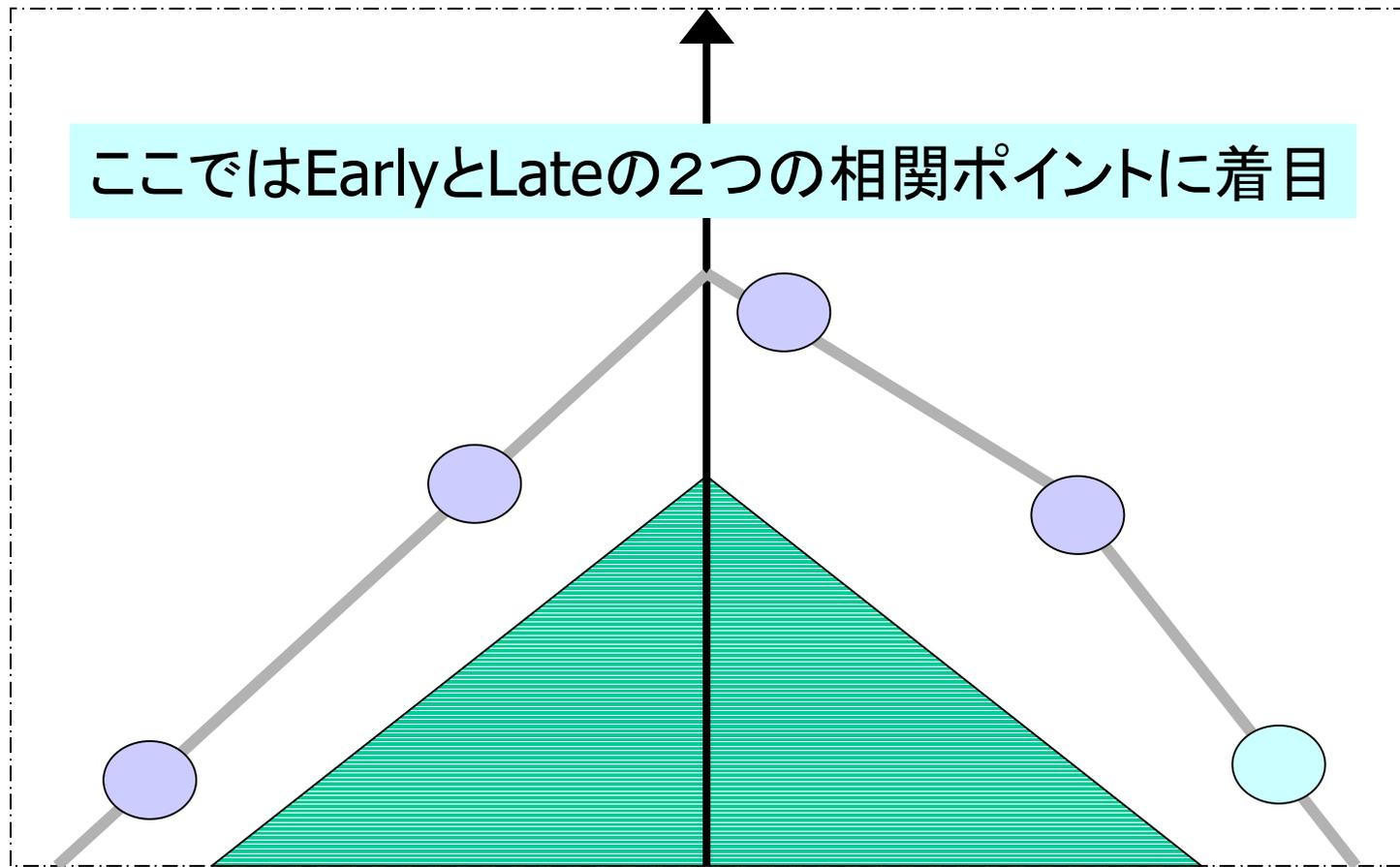


MEDLLについて



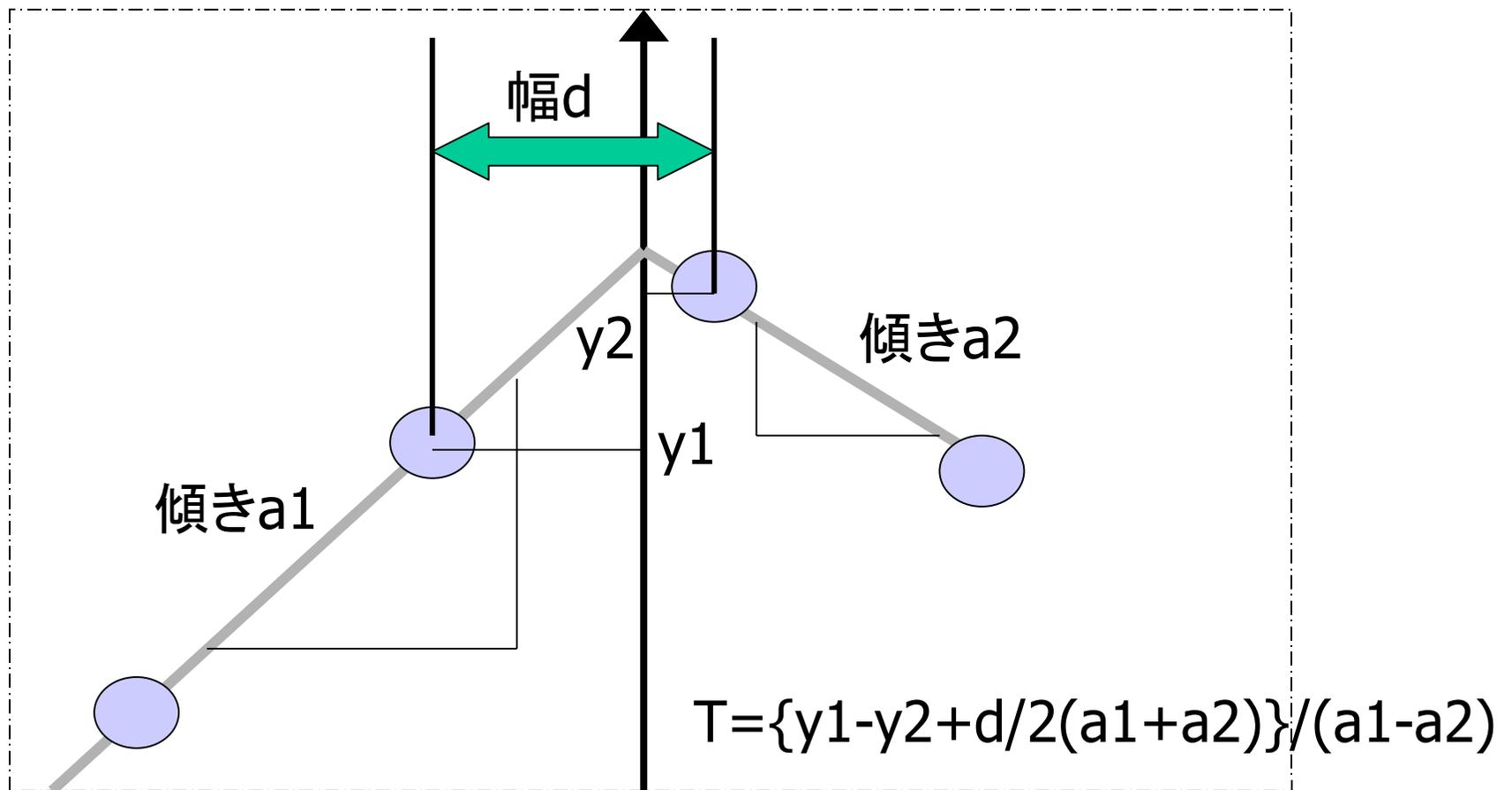
Early-Late slope 技術

(ピーク近辺の傾きに着目)



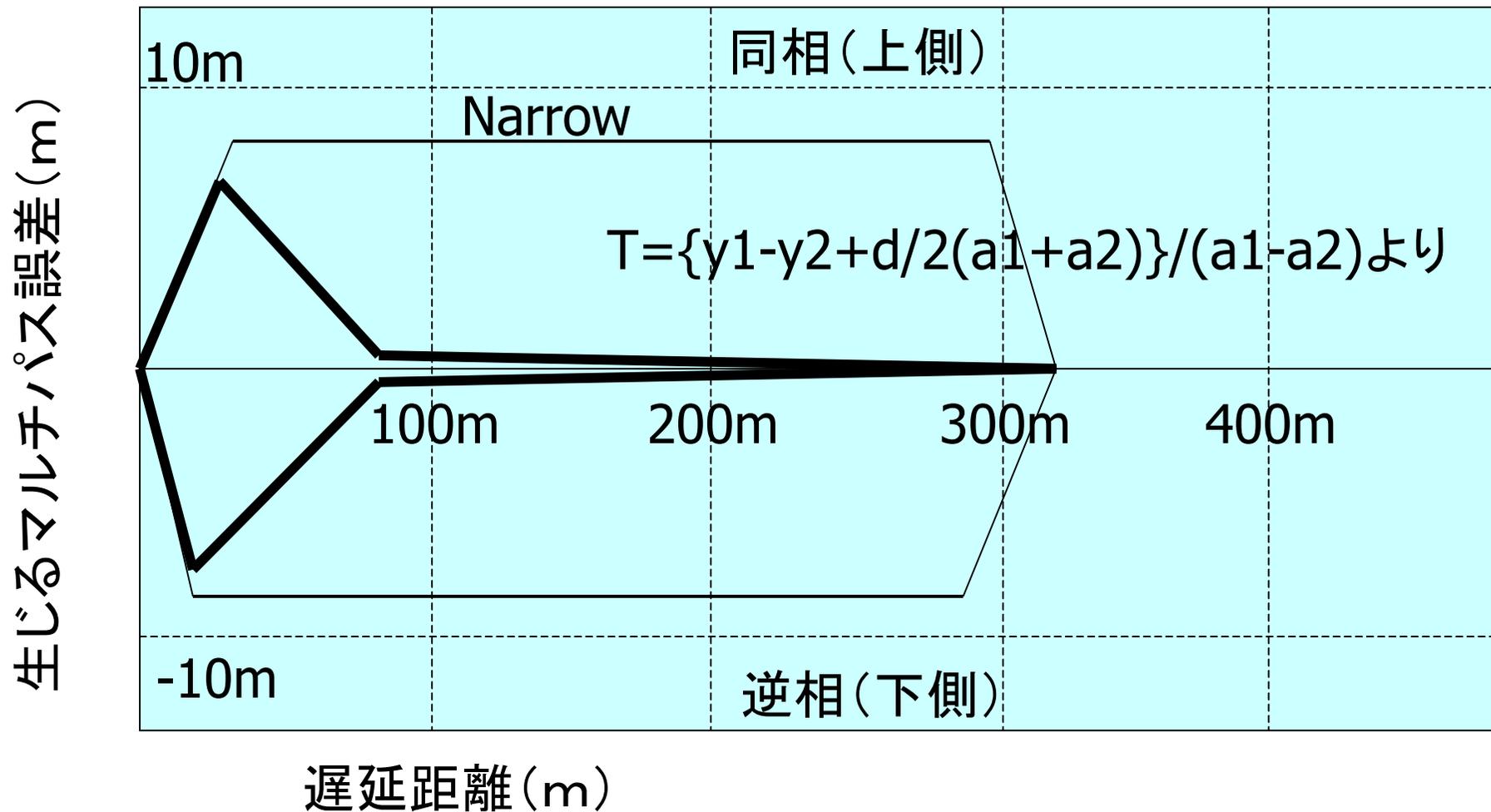
相関ポイントからEarlyとLateの傾きを求めピークを探す

Early-Late slope 技術



これらの5つの情報からマルチパス誤差 T を求めると

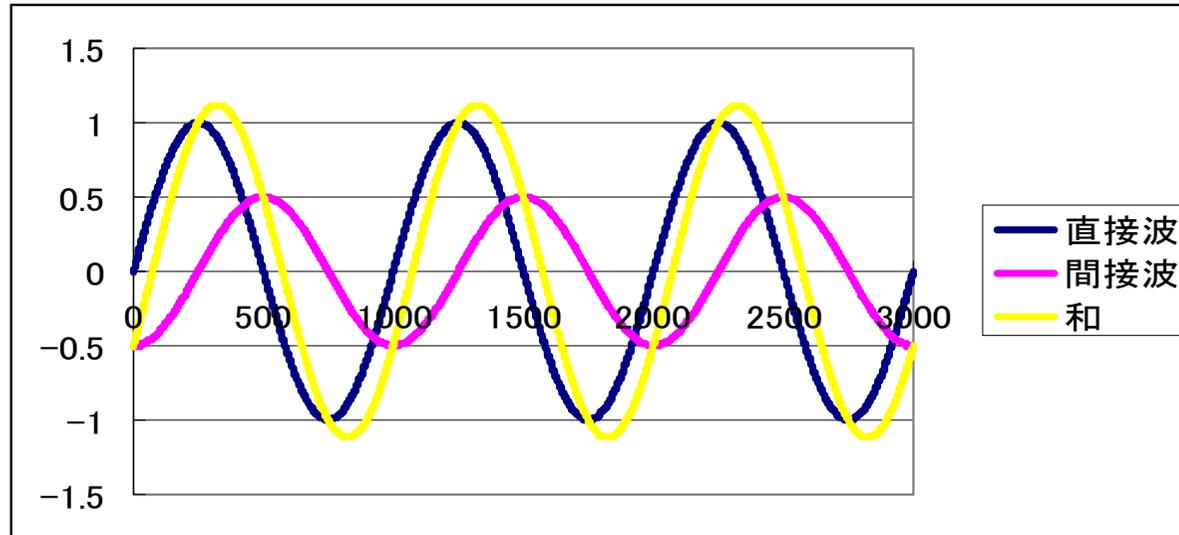
マルチパス誤差と遅延距離の関係 (振幅比0.5、MEDLL)



受信機によるマルチパス抑制技術のまとめ

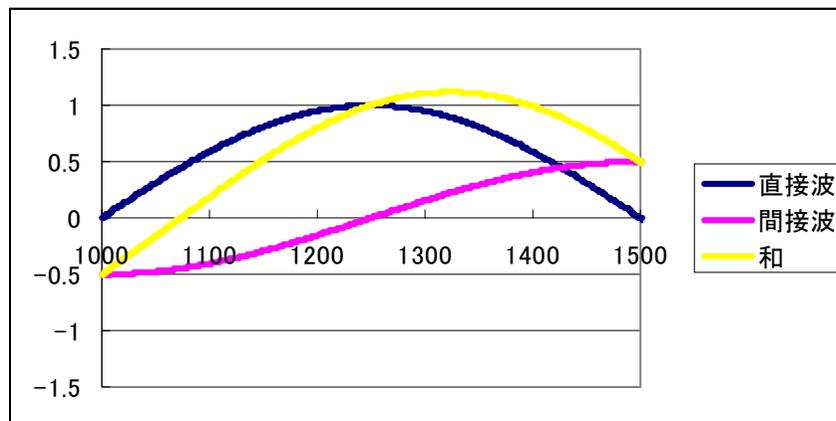
- 遅延距離の長いマルチパスが大幅に削減されるようになった(1990年台後半)。
- 遅延距離の短いマルチパスはまだ問題。
(30m以内程度)
- 2000年に入って搬送波マルチパスを削減する技術が発表されるようになった。
(RTKやVRSの実用化へ向けて)

搬送波位相におけるマルチパスの影響



間接波は
 $\pi/2$ 遅れ
振幅は0.5

拡大



黄色の線の縦軸0との交点
における値がずれとなる。

つづき(定式化)

Received signal = $A \cos \phi + \alpha A \cos(\phi + \Delta \phi)$

$\Delta \phi$ は間接波の位相遅れ

α は振幅比

搬送波位相におけるマルチパス誤差は次のような式で表せる

$$\delta \phi = \arctan \{ \sin \Delta \phi / (1/\alpha + \cos \Delta \phi) \}$$

間接波の振幅が必ず直接波より小さい場合、搬送波位相における最大誤差は $\delta \phi$ が90度のとき ($\Delta \phi$ が90度のときではないことに注意!)、すなわち1波長の4分の1を超えることはない。1波長の4分の1はL1の場合約4.8cmである。コード位相を比較すると極端にマルチパスの影響を受けにくい。

搬送波位相におけるマルチパス 誤差の算出 (2-path model)

$$(1) \quad S_{LOS} = A \sin(\omega_0 t)$$

$$(2) \quad S_{M1}(t) = \alpha_1 A \sin(\omega_0 t + \Delta_1)$$

$$(3) \quad S_{total}(t) = A \sin(\omega_0 t) + \alpha_1 A \sin(\omega_0 t + \Delta_1)$$

$$(4) \quad S_{total}(t) = A \sin(\omega_0 t) + \alpha_1 A \sin(\omega_0 t) \cos \Delta_1 + \alpha_1 A \cos(\omega_0 t) \sin \Delta_1$$

$$(5) \quad S_{total}(t) = (1 + \alpha_1 \cos \Delta_1) A \sin(\omega_0 t) + \alpha_1 \sin \Delta_1 A \cos(\omega_0 t)$$

$$(6) \quad S_{total}(t) = \alpha_c A \sin(\omega_0 t + \Delta_c)$$

つづき

$$(7) \quad S_{total}(t) = \alpha_c \cos \Delta_c A \sin(\omega_0 t) + \alpha_c \sin \Delta_c A \cos(\omega_0 t)$$

$$(8) \quad 1 + \alpha_1 \cos \Delta_1 = \alpha_c \cos \Delta_c$$

$$(9) \quad \alpha_1 \sin \Delta_1 = \alpha_c \sin \Delta_c$$

$$(10) \quad \Delta_c = \arctan\left(\frac{\alpha_1 \sin \Delta_1}{1 + \alpha_1 \cos \Delta_1}\right)$$

$$(11) \quad \alpha_c = \sqrt{1 + 2\alpha_1 \cos \Delta_1 + \alpha_1^2}$$

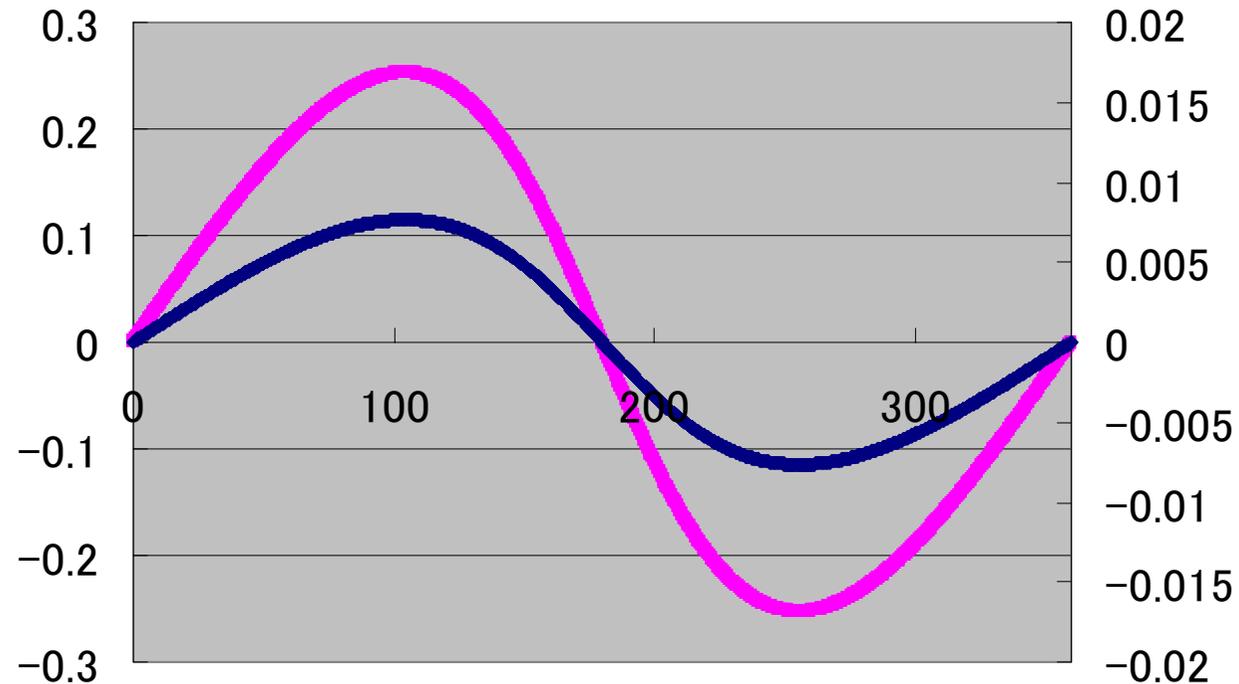
式の説明(1)

- 2パスモデルなので、直接波と1回目の反射波が含まれます。(1)は直接波。(2)は反射波です。(3)は直接波と反射波を合成したものです。
- (4)は三角関数の加法定理。(5)は式変形。(6)は反射係数や相対位相遅延を合成したものとして表した式。

式の説明(2)

- (7)は(6)を展開したもの。(8)と(9)は(5)と(7)の係数部分を比較して導いた式。
- (10)と(11)式は、(8)と(9)式を同時に解くと導き出される。 Δ_c が90度(値でいうと $\pi/4$)のときに、最大誤差となる。ただし90度付近にせまるのは反射係数が1に近いときである。次のページに振幅比ごとの結果を示す。

簡単な結果(振幅0.25)

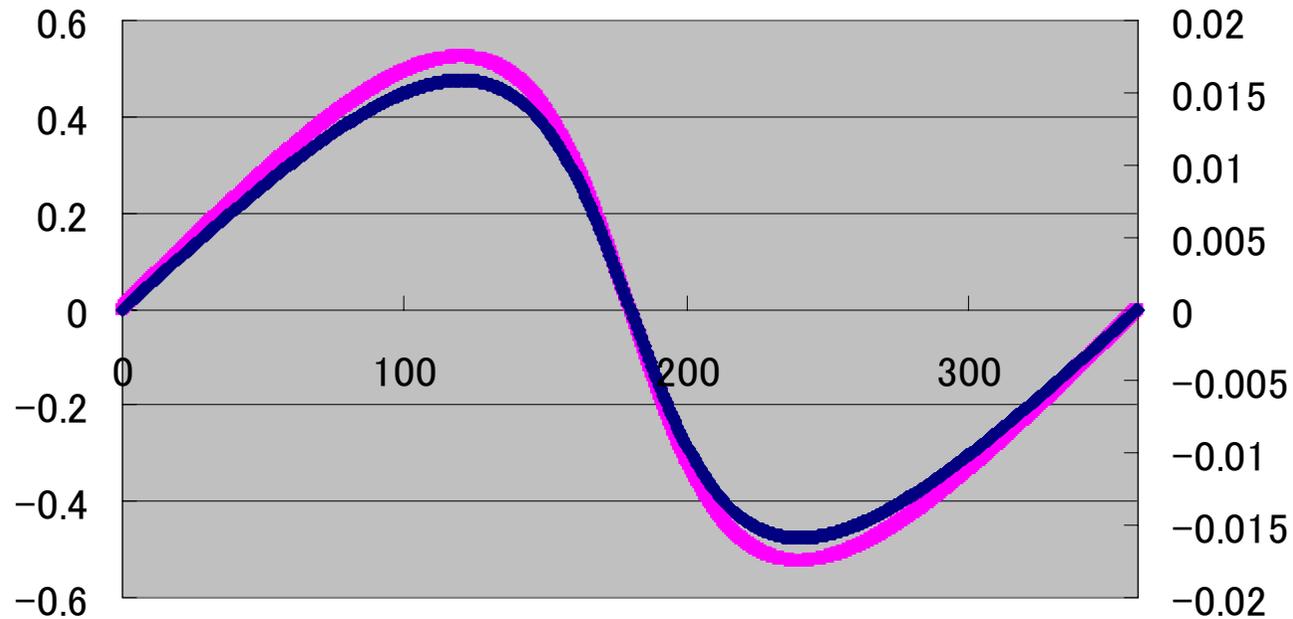


横軸: 反射波の位相遅れ(度)

縦軸左(赤線): Δ_c (ラジアン)

縦軸右(青線): 実際のマルチパス誤差(m)

簡単な結果(振幅0.5)

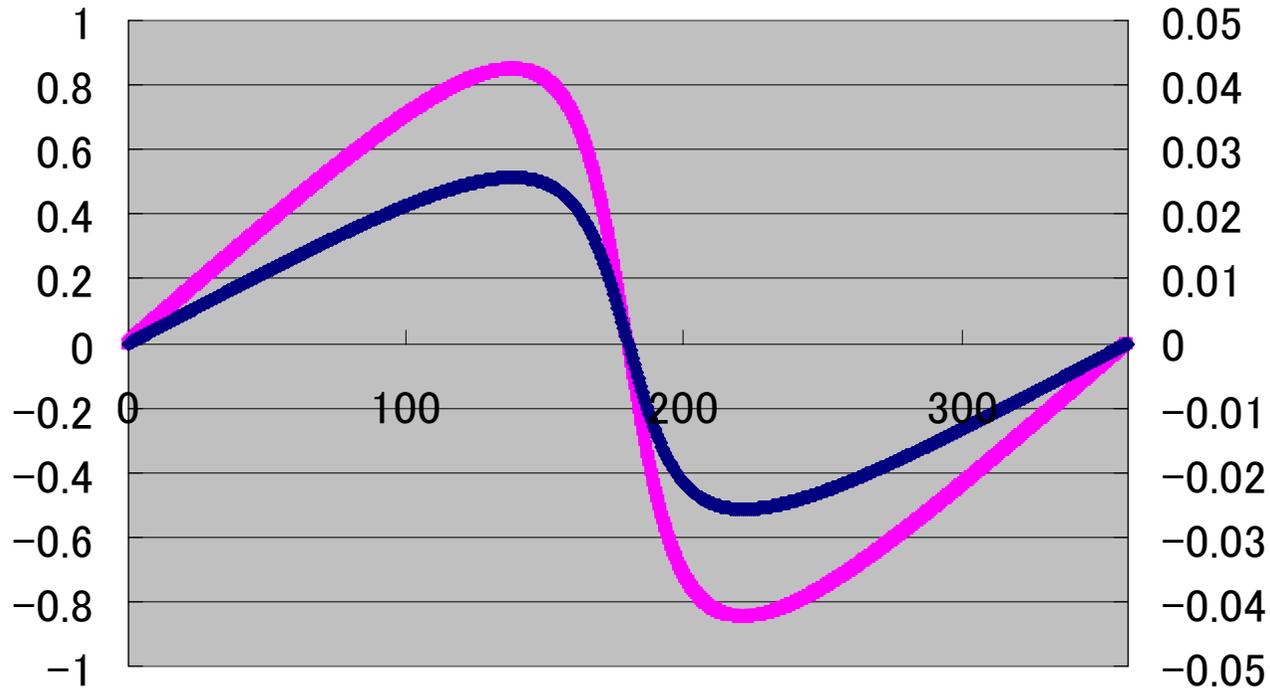


横軸: 反射波の位相遅れ(度)

縦軸左(赤線): Δ_c (ラジアン)

縦軸右(青線): 実際のマルチパス誤差(m)

簡単な結果(振幅0.75)

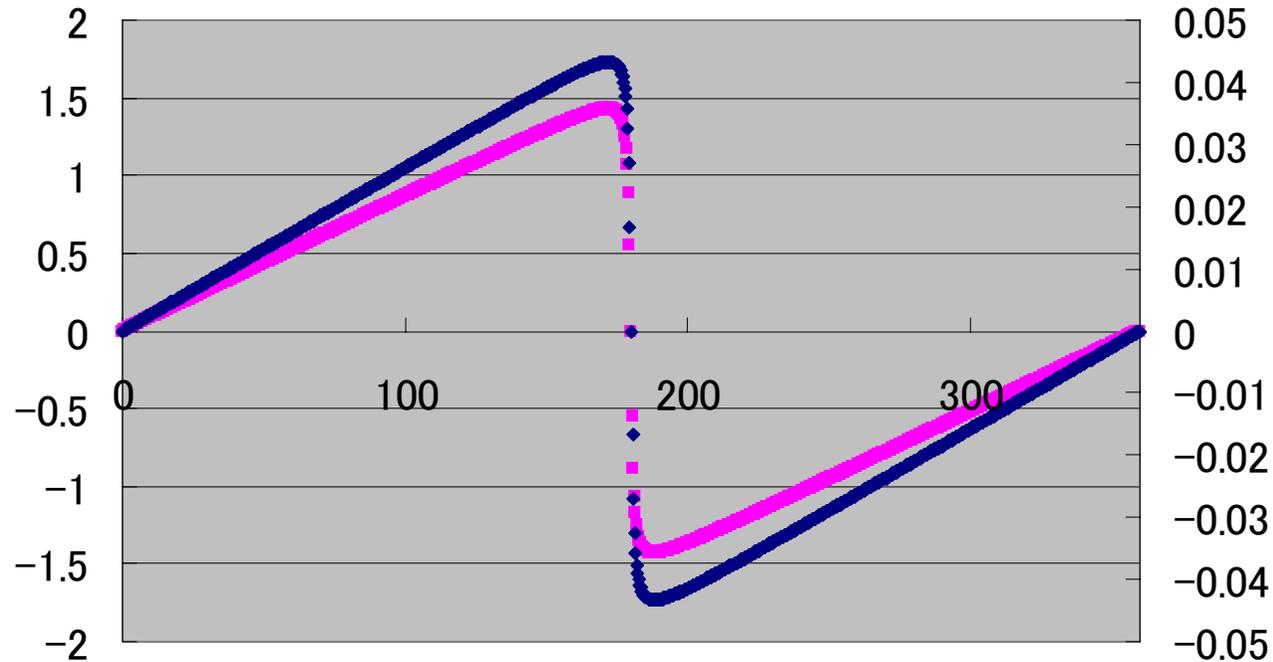


横軸: 反射波の位相遅れ(度)

縦軸左(赤線): Δ_c (ラジアン)

縦軸右(青線): 実際のマルチパス誤差(m)

簡単な結果(振幅0.99)



横軸: 反射波の位相遅れ(度)

縦軸左(赤線): Δ_c (ラジアン)

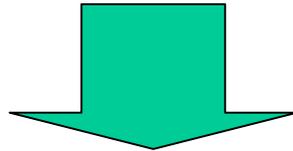
縦軸右(青線): 実際のマルチパス誤差(m)

振幅が0.99になると、 Δ_c の値も90度に近づいていることがわかる

ソフト的なマルチパス誤差観測

コード位相のマルチパス誤差：数cmから数10m

搬送波位相のマルチパス誤差：最大4.8cm
通常は1cm以内(振幅比0.25以内)と考えられる。



単純にコード位相から搬送波位相を引くとマルチパス誤差を観測することが可能ではないか？

(コード)ー(搬送波)技術

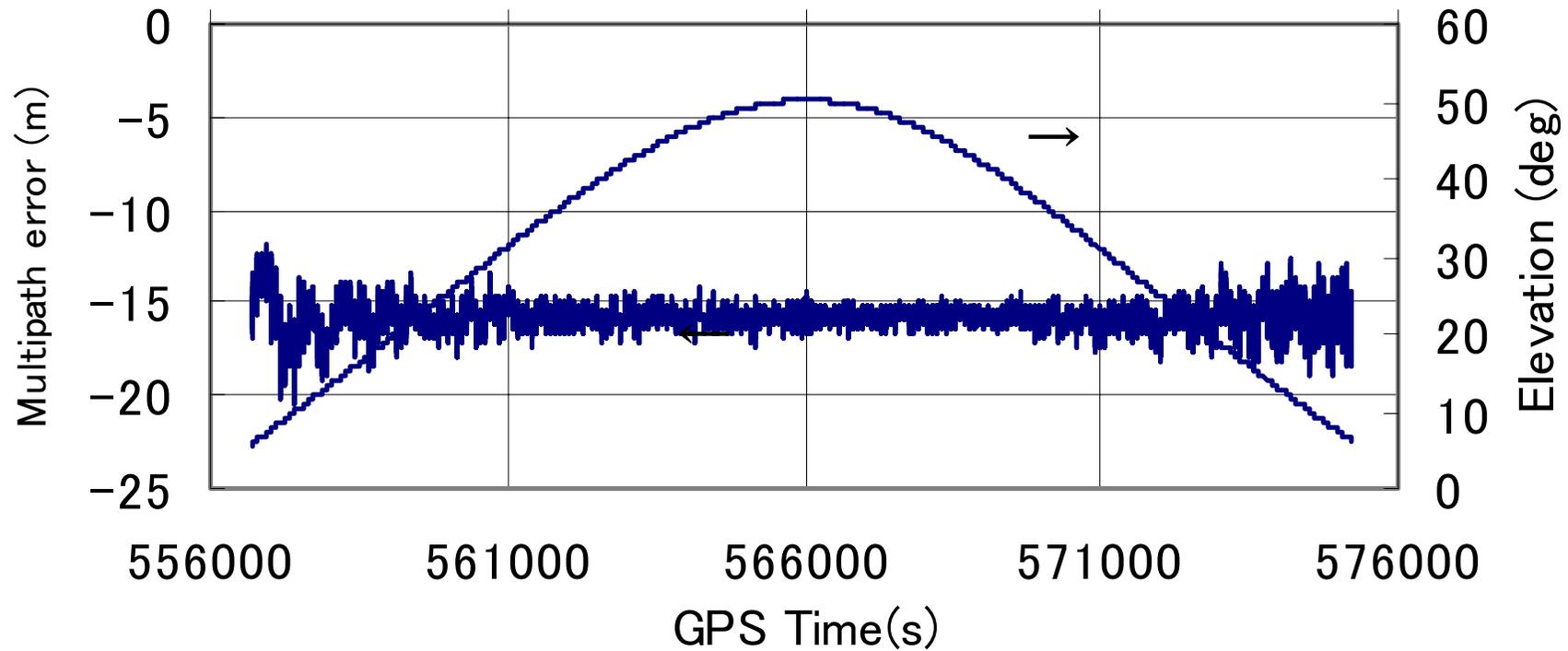
コード位相から搬送波位相を引くと、大部分の共通誤差は差し引かれる。搬送波位相のマルチパス誤差やノイズを無視すると残る誤差は、

- 1) コードのマルチパス誤差 + ノイズ
- 2) 搬送波位相のバイアス
- 3) 電離層遅延分 (L2の情報があると除去可能)

電離層分を除去後、下記のようになる。

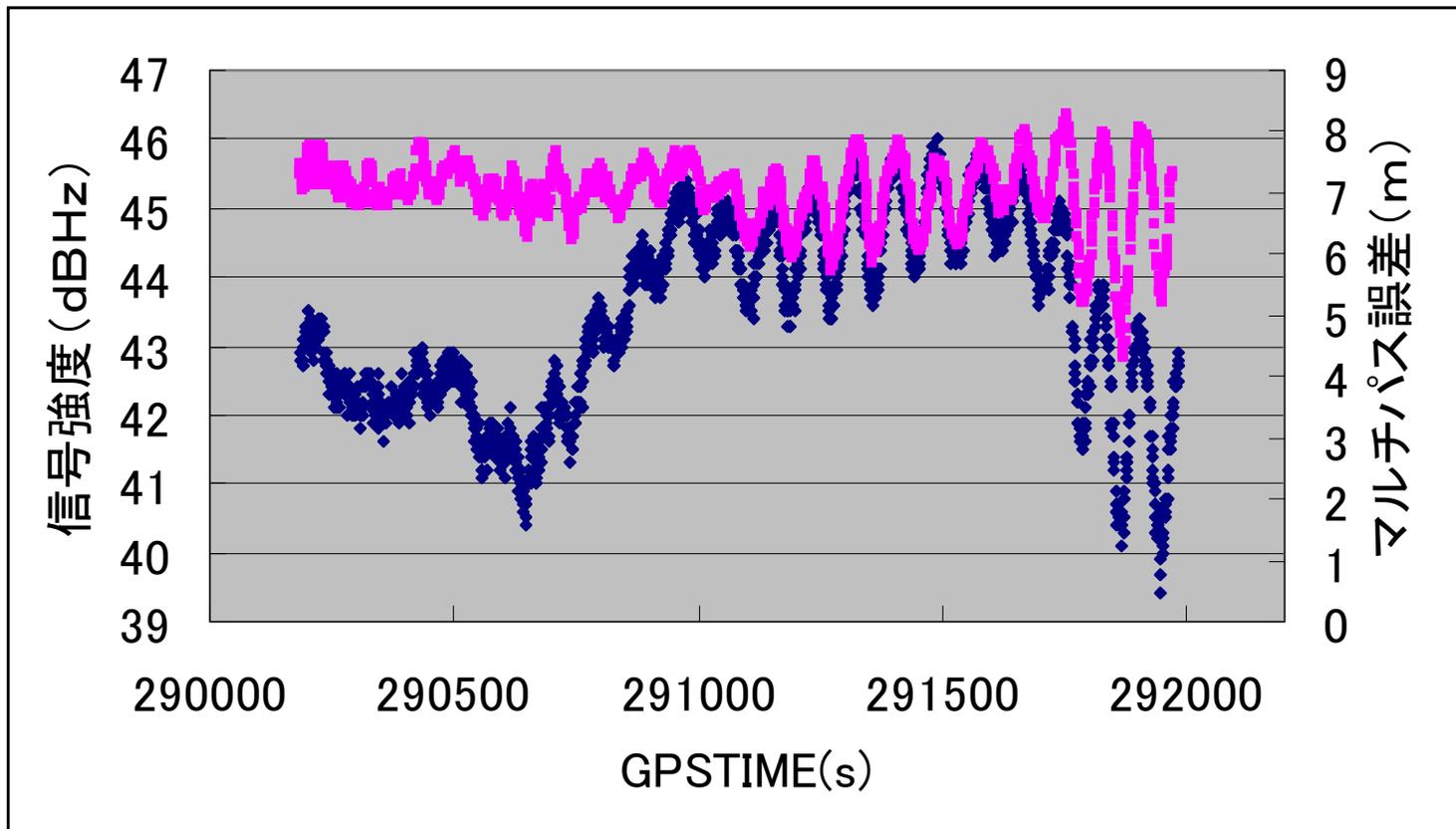
$$\begin{aligned} \text{コードマルチパス} + \text{バイアス} &= L1_code - 4.0915 \times L1_carrier \\ &+ 3.0915 \times L2_carrier \end{aligned}$$

ソフト的に見たマルチパス 誤差変動



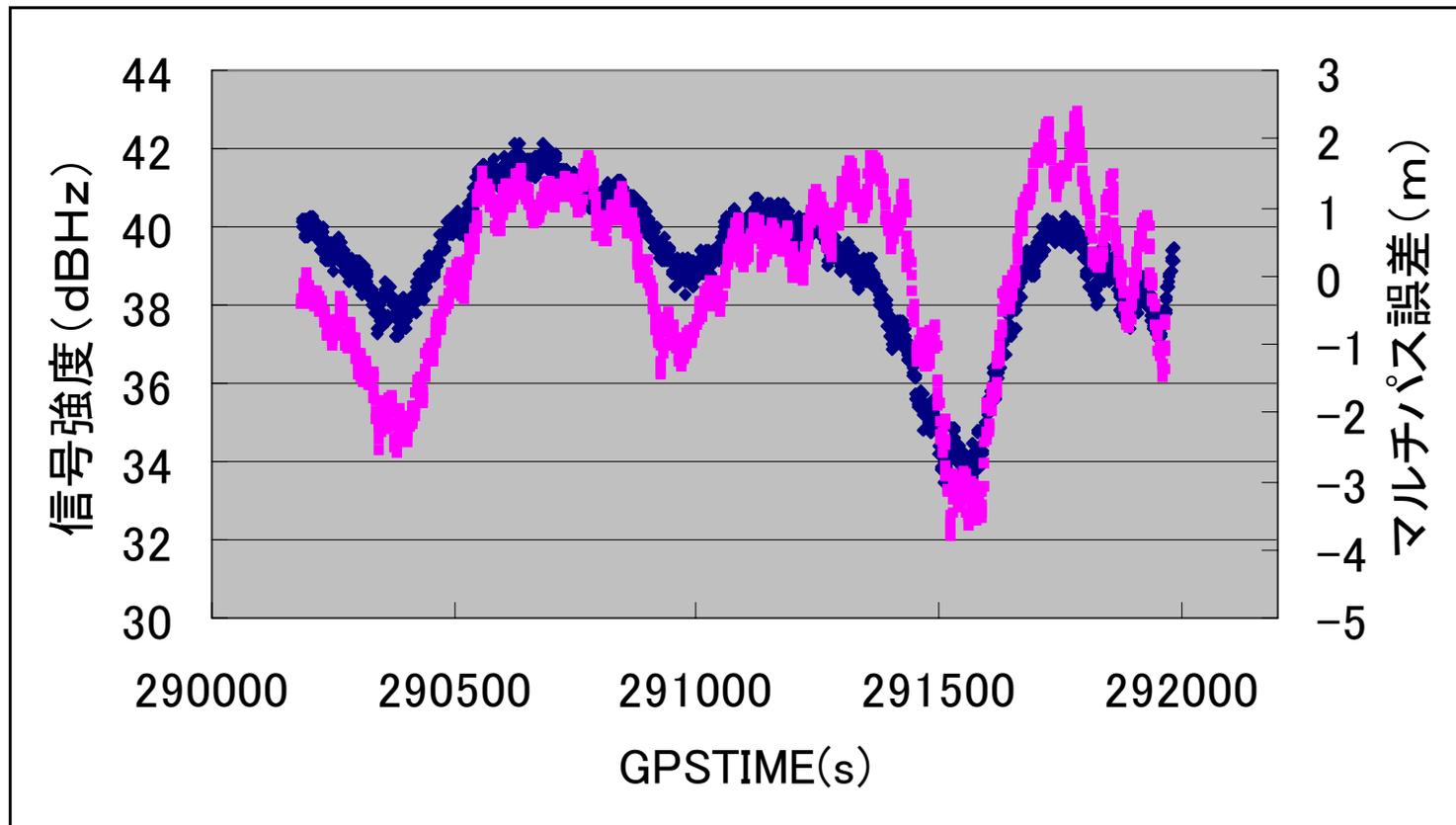
Relationship between multipath error and elevation

壁近傍にアンテナを設置した場合 の信号強度とマルチパス誤差



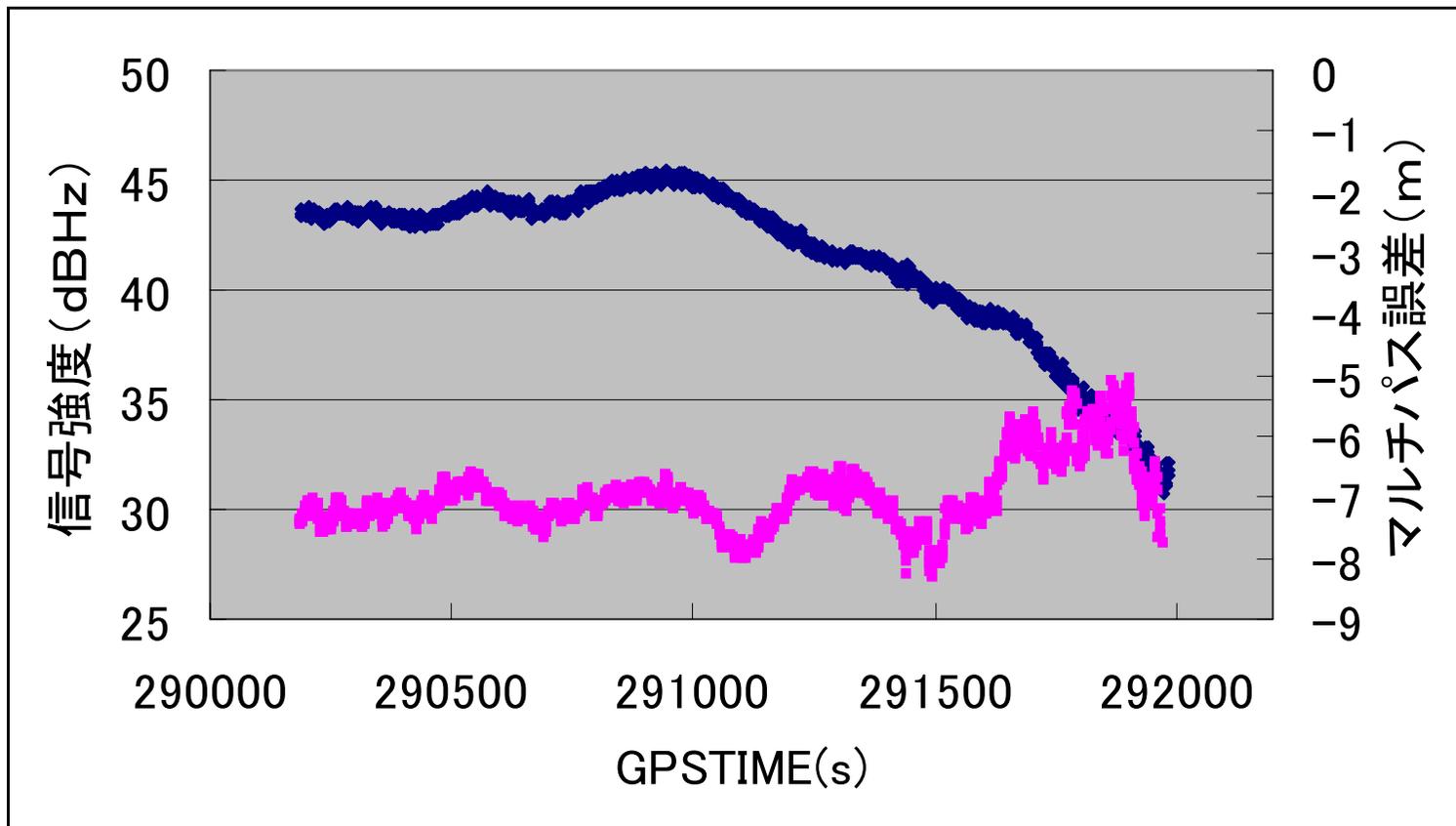
青: 信号強度 赤: マルチパス誤差 SV8

続き



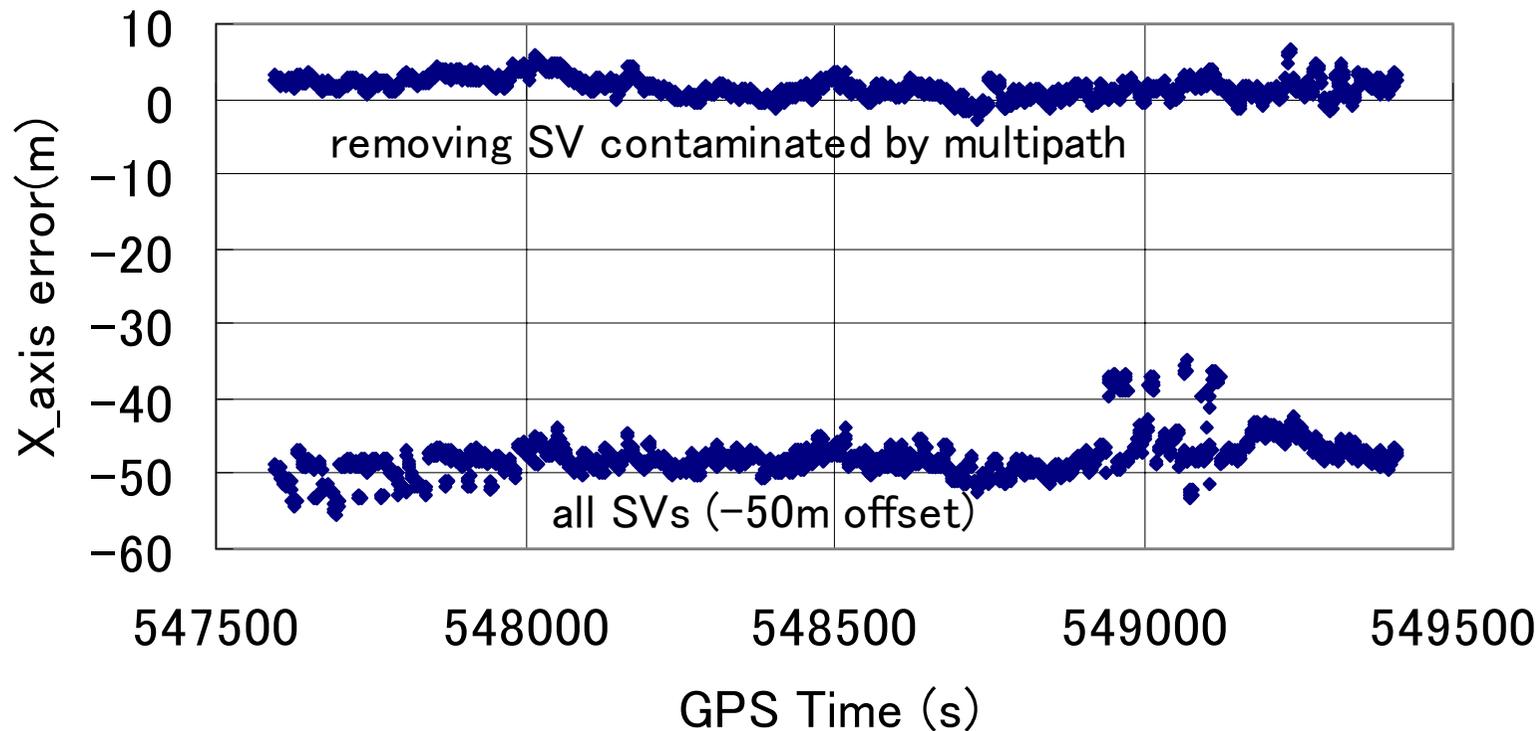
青:信号強度 赤:マルチパス誤差 SV27

続き



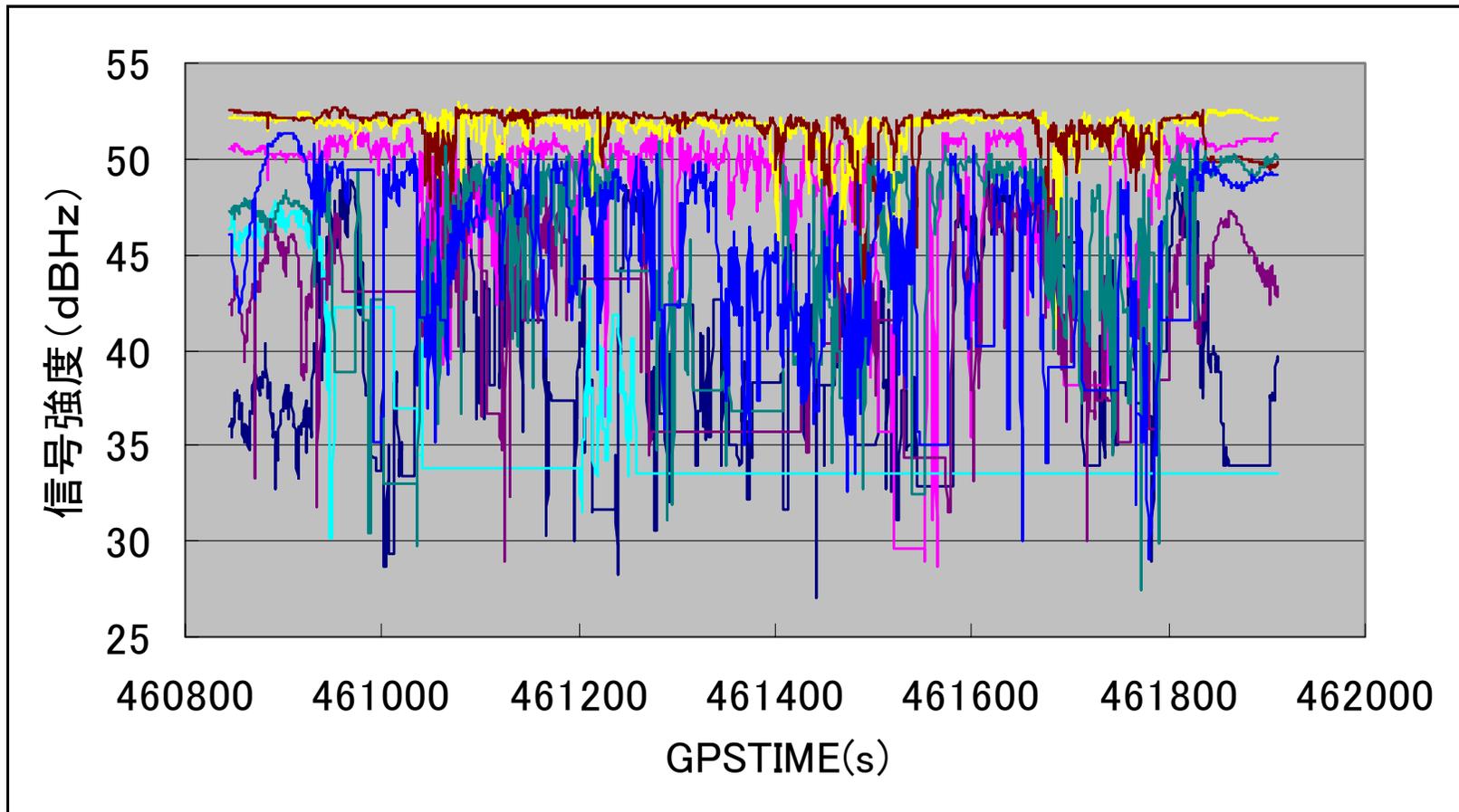
青:信号強度 赤:マルチパス誤差 SV22

マルチパス誤差変動の大きい衛星を省いた場合の測位結果

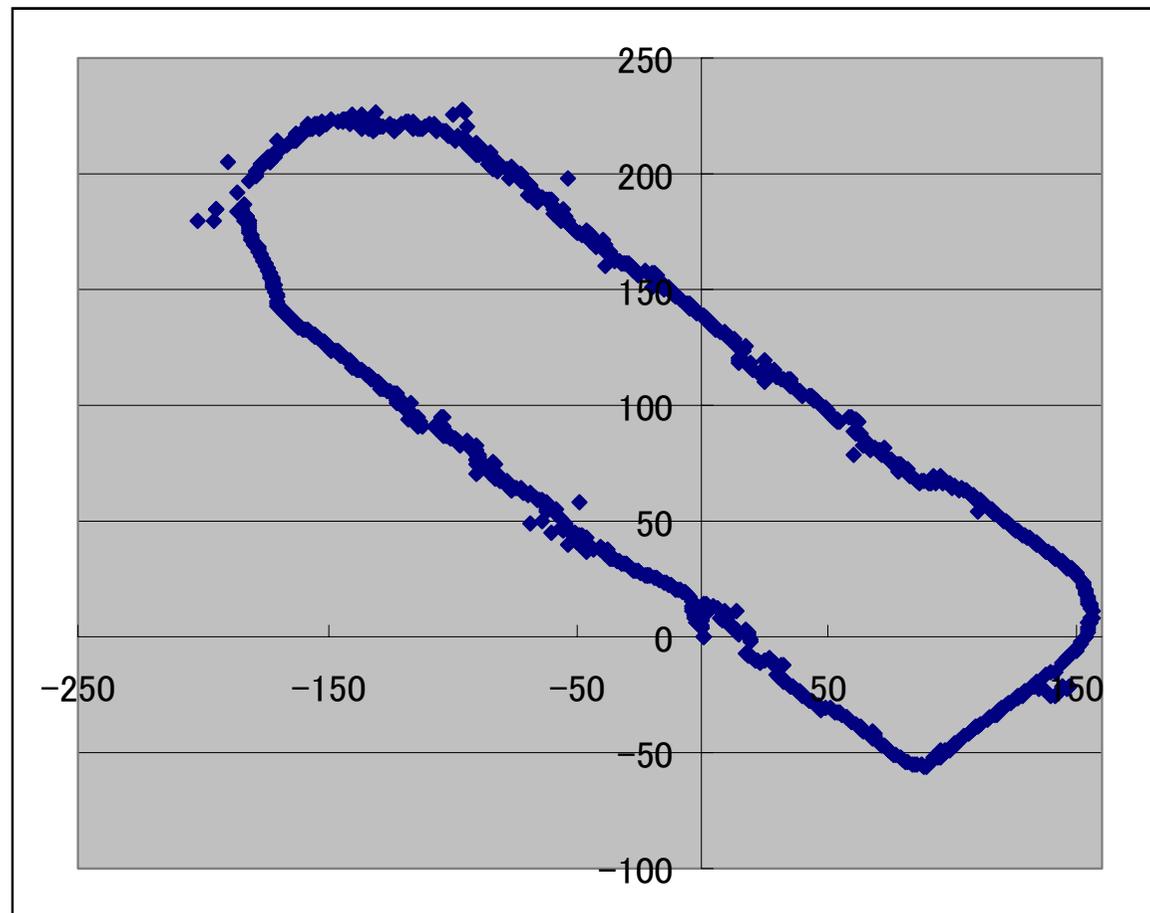


マルチパス誤差の大きい衛星排除時の測位誤差

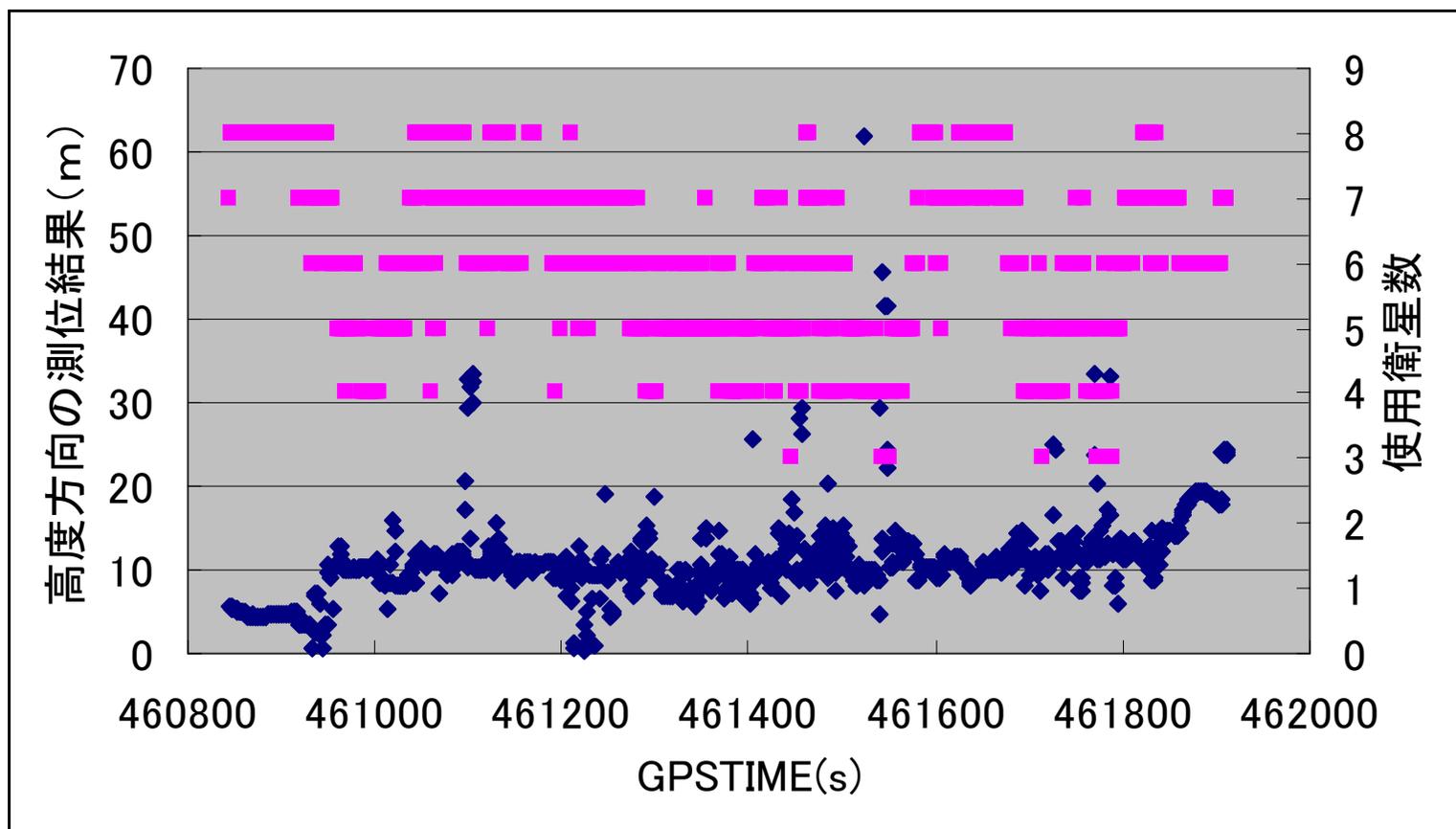
構内1周データ (マルチパス環境悪)



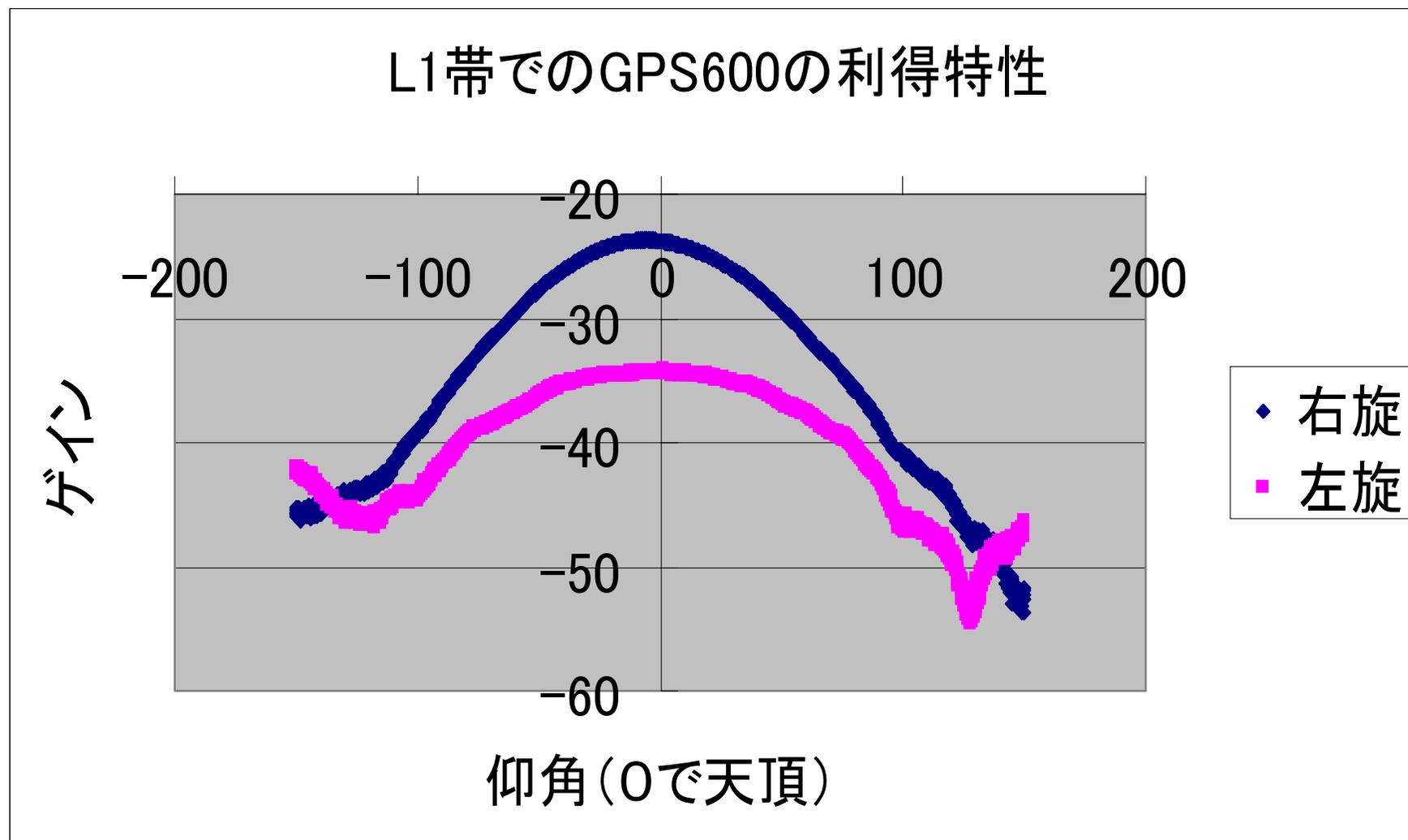
続き(平面の測位結果)



続き (高度方向と使用衛星数)



アンテナのパターン特性



アンテナのパターン特性

