

GPS測位におけるマルチパスの 影響について

東京海洋大学
久保信明

はじめに

- マルチパス誤差は受信機の存在する周囲の環境からのローカルな反射によって生じる。
- マルチパス対策を施さない受信機だとC/Aコードで10mもしくはそれ以上の誤差を生じ、さらにアンビグイティ決定にも影響を与える。
- マルチパスは大きく2つに分けられる。StaticとDynamicsの場合である。これら2つに応じた技術が必要である。現在多くの研究はstaticアプリケーション用であり、比較的衛星対アンテナの幾何学的関係がゆるやかに変化する場合をターゲットにしている。

概要

- どのようにマルチパスが擬似距離もしくは搬送波位相測定誤差に影響を及ぼすか？
- マルチパス削減方法について
- マルチパス削減における理論的な限界値

どのように影響を及ぼすのか？

- C/Aコードのみを考え50-bpsの航法データはないものとする。
- ドップラーシフトは完全に取り除かれているものとする

マルチパスがない場合に受信すると

$$r(t) = ae^{j\phi} c(t - \tau) + n(t)$$

$c(t)$ はC/Aコードの波

τ は信号の伝搬遅延量

a は信号の振幅値

ϕ は搬送波位相

$n(t)$ はガウス分布に従う熱雑音

上記の τ を測定することは、擬似距離を測定すること同等である。
ではどのように ϕ を推定するのか？

- 最適な の推定方法は、以下の相互相関関数を解くことによって得られる。

$$R(\tau) = \int_{T_1}^{T_2} r(t)c_r(t - \tau)dt$$

$c_r(t)$: replica of the transmitted C / A - code

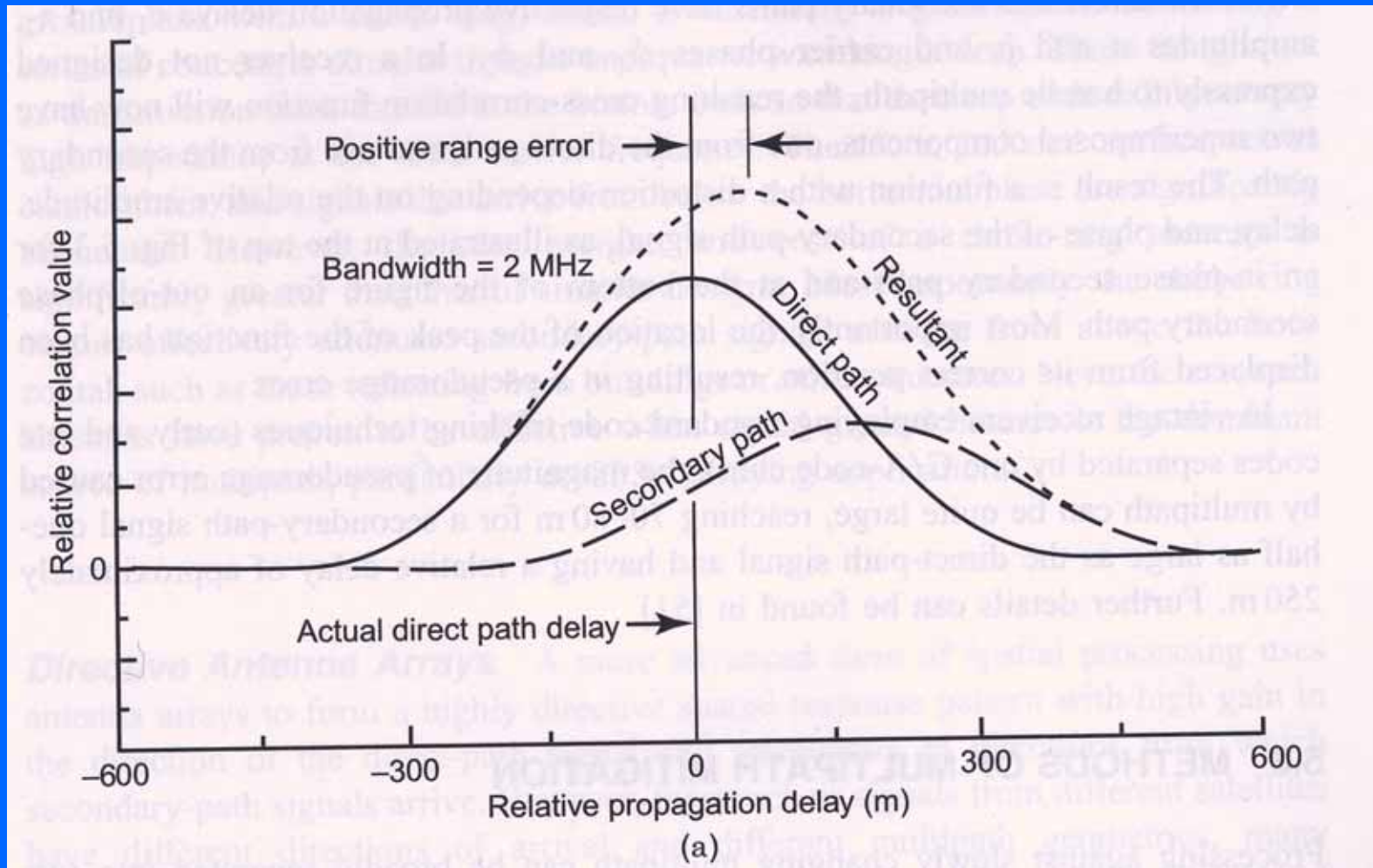
上記の相互相関関数値が最大になるときの を選ぶ。
受信機の熱雑音によるエラーがない限り受信したC/Aコードとレプリカはちょうど一致したときに起こる。

ではマルチパスがある場合の式はどうなるのか？

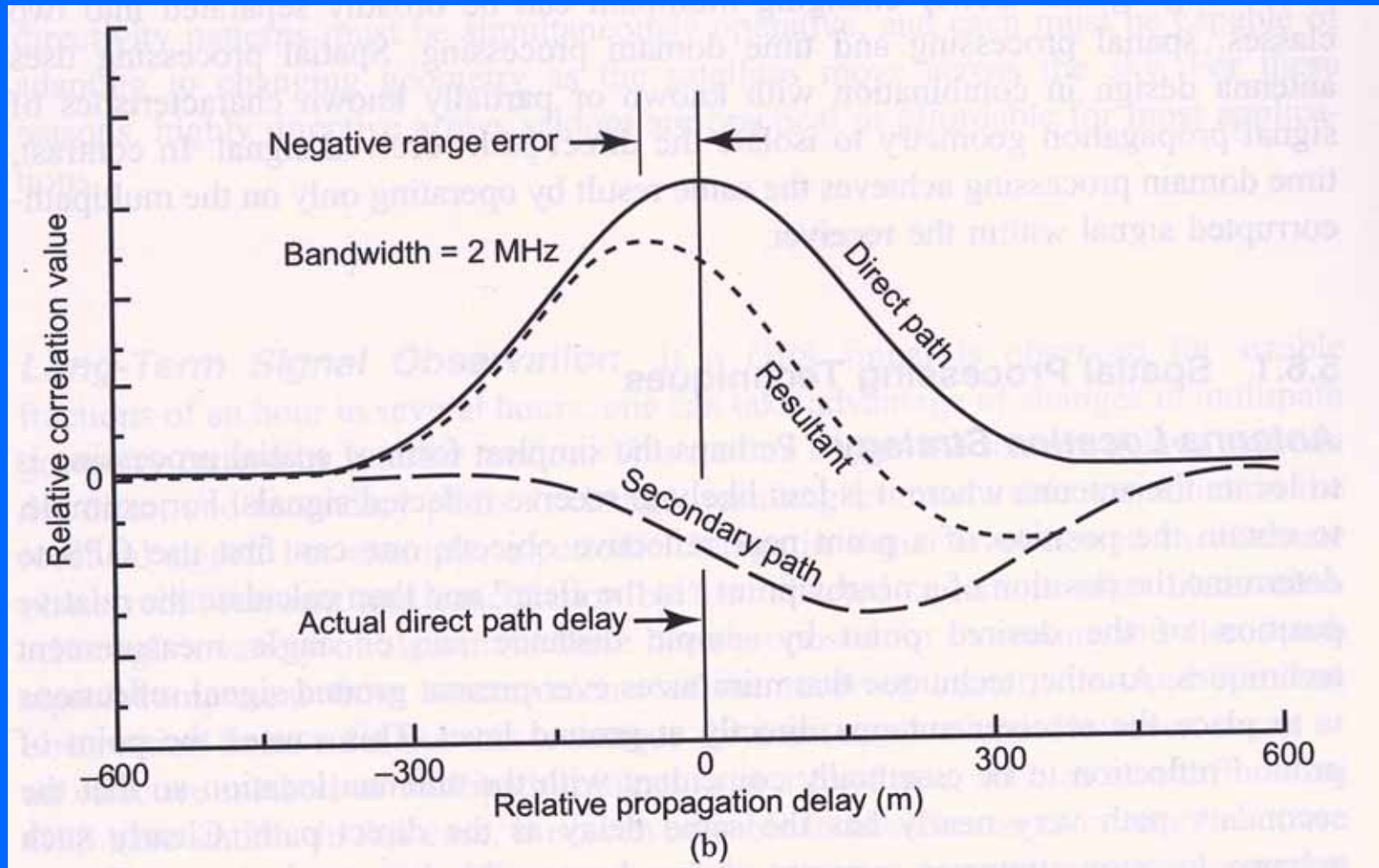
$$r(t) = ae^{j\phi_1}c(t - \tau_1) + be^{j\phi_2}c(t - \tau_2) + n(t)$$

この式は1つのマルチパスが存在する場合を示す。詳細省略

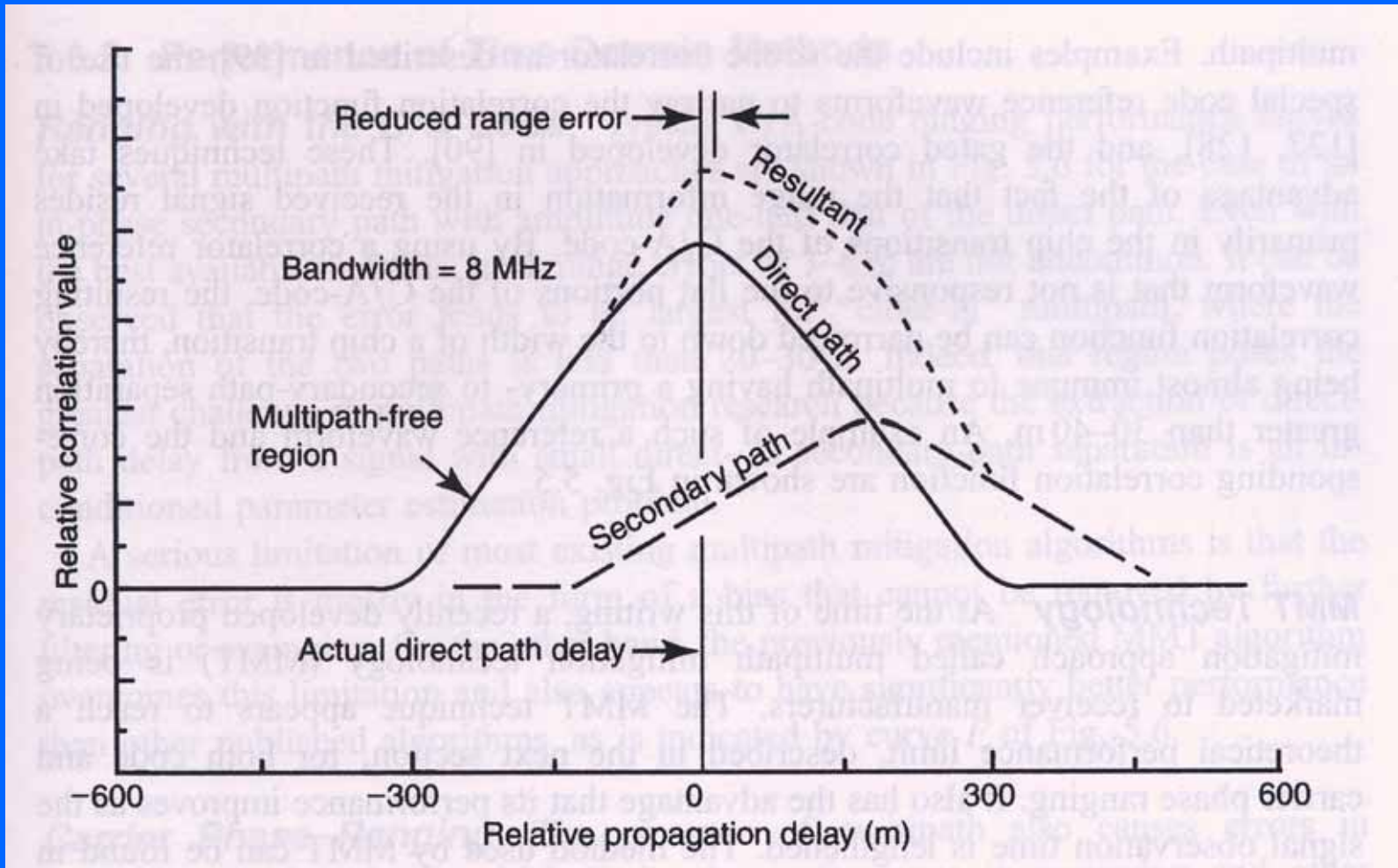
コードマルチパス誤差 (同相、bandwidth:2MHz)



コードマルチパス誤差 (逆相、bandwidth:2MHz)



コードマルチパス誤差 (同相、bandwidth:8MHz)

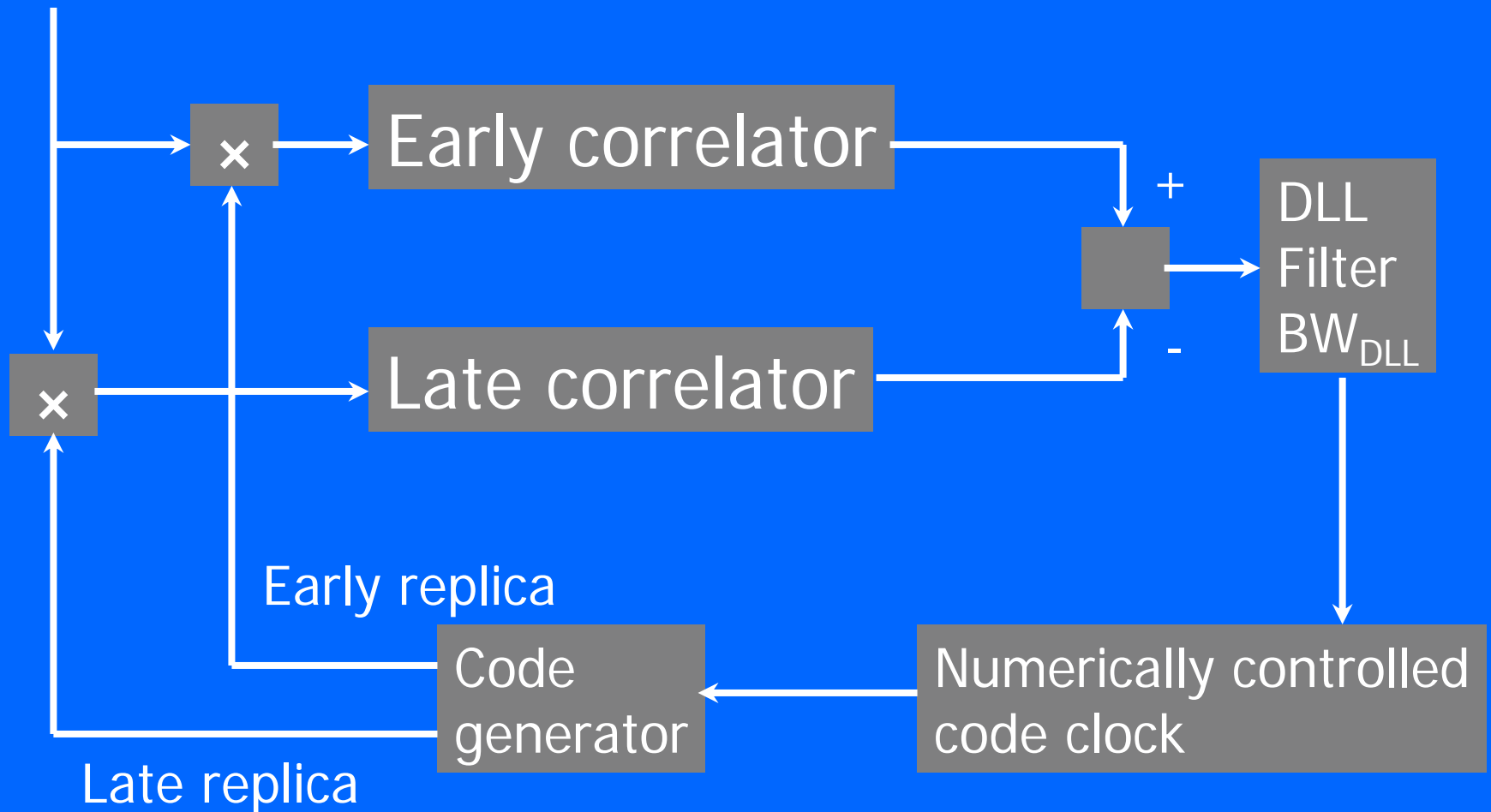


マルチパス削減手段

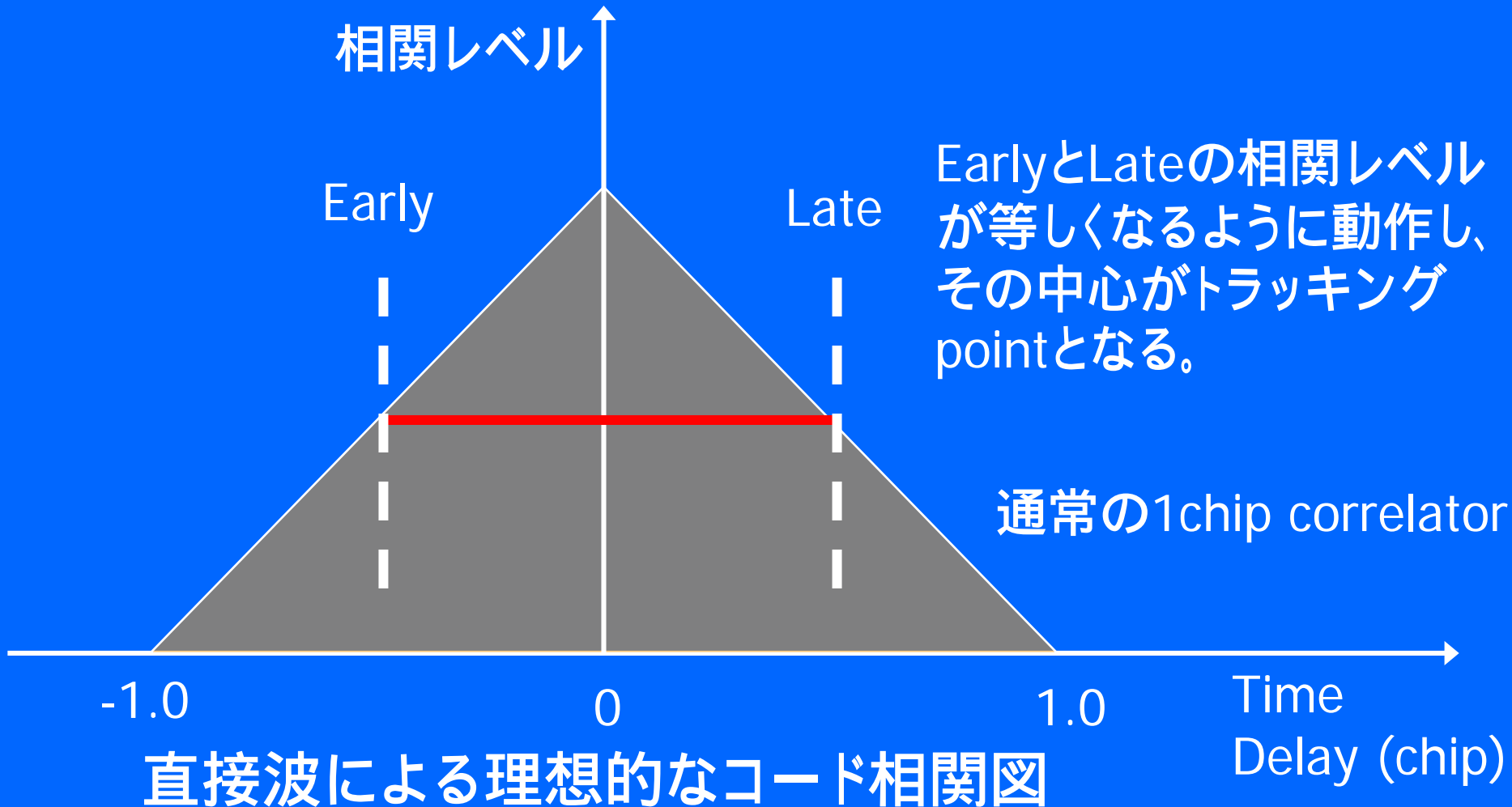
マルチパスを削減するには、良いアンテナの開発や設置場所の選定が重要であるが、ここでは受信機内部による処理で削減する手段について示す。

- Narrow-Correlator technology
- Leading-Edge Techniques
- Correlation Function Shape-Based Methods
- Modified Correlator Reference Waveforms
- MMT Technology

Delay Lock Loopについて (コード追尾)

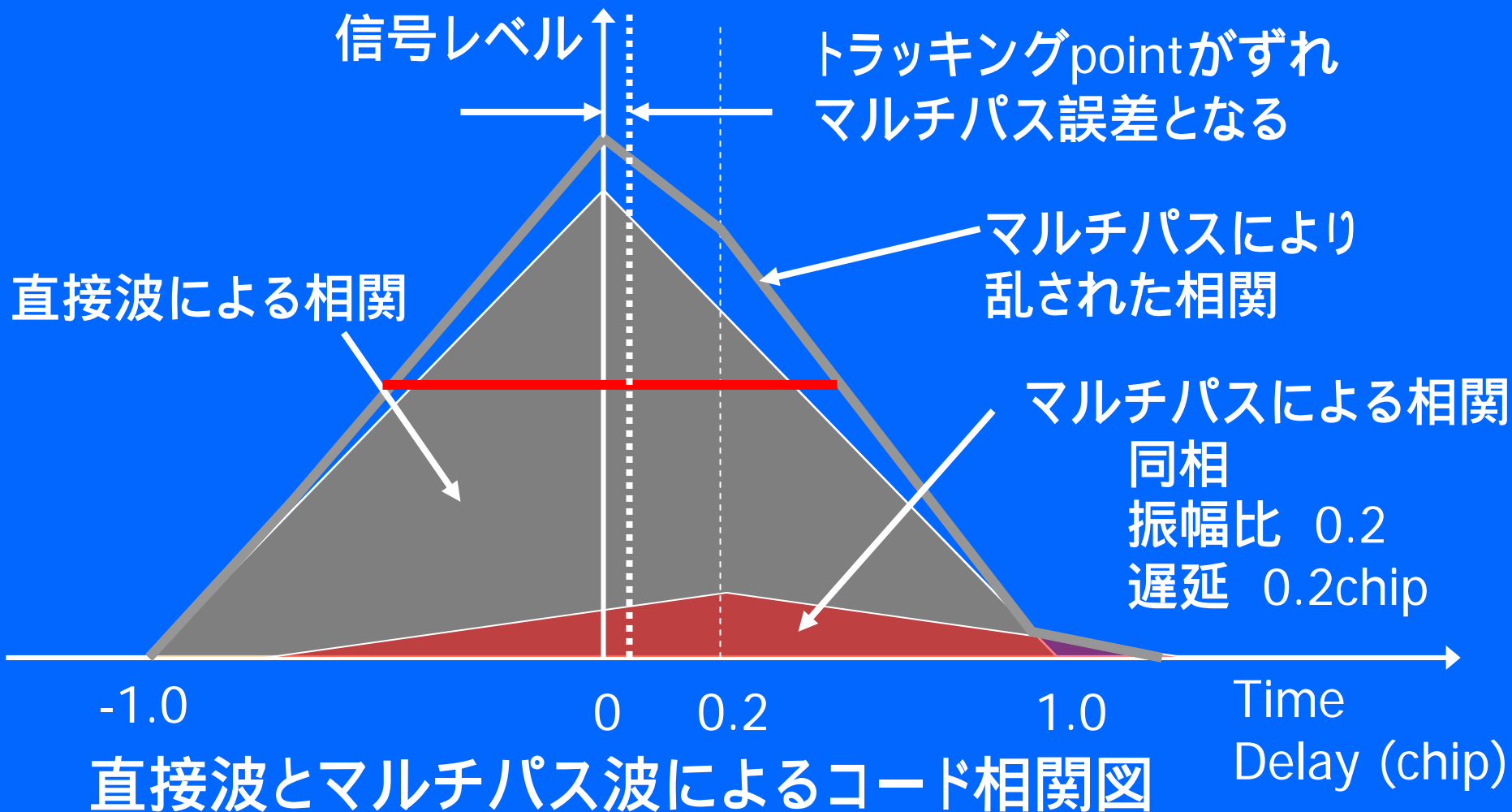


DLLによるコード相関について



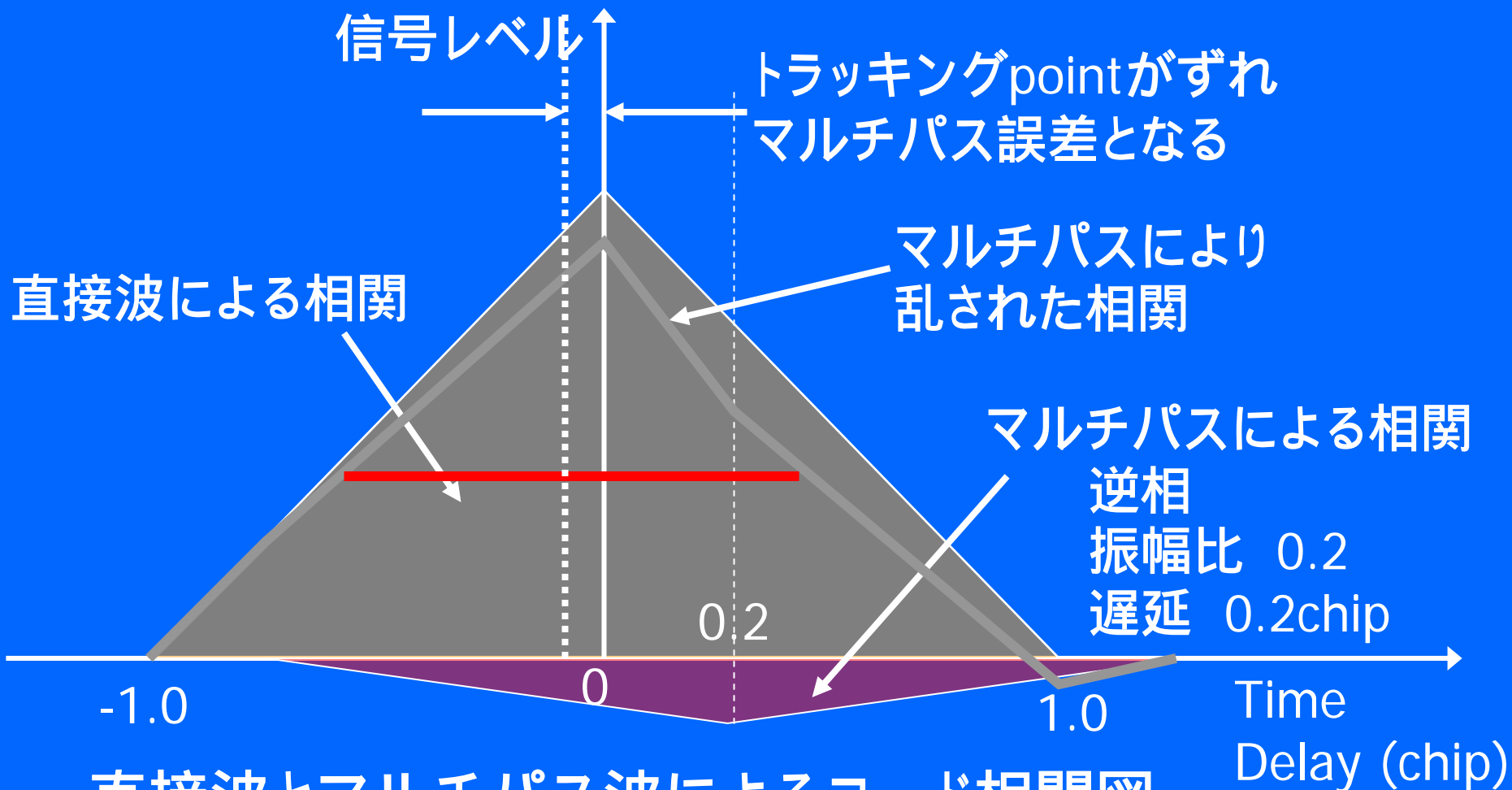
マルチパス存在時のDLL相関

(同相の場合)



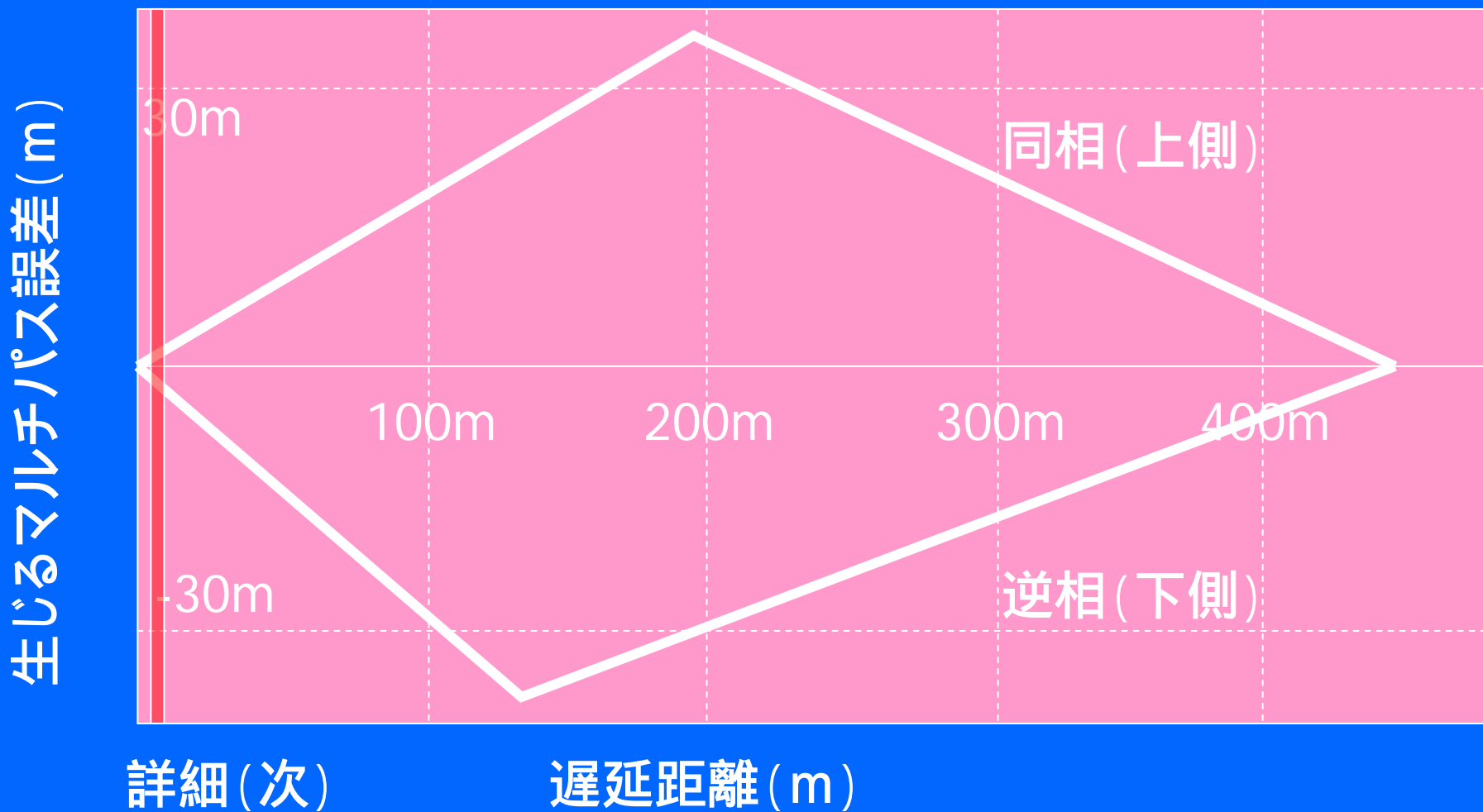
マルチパス存在時のDLL相関

(逆相の場合)

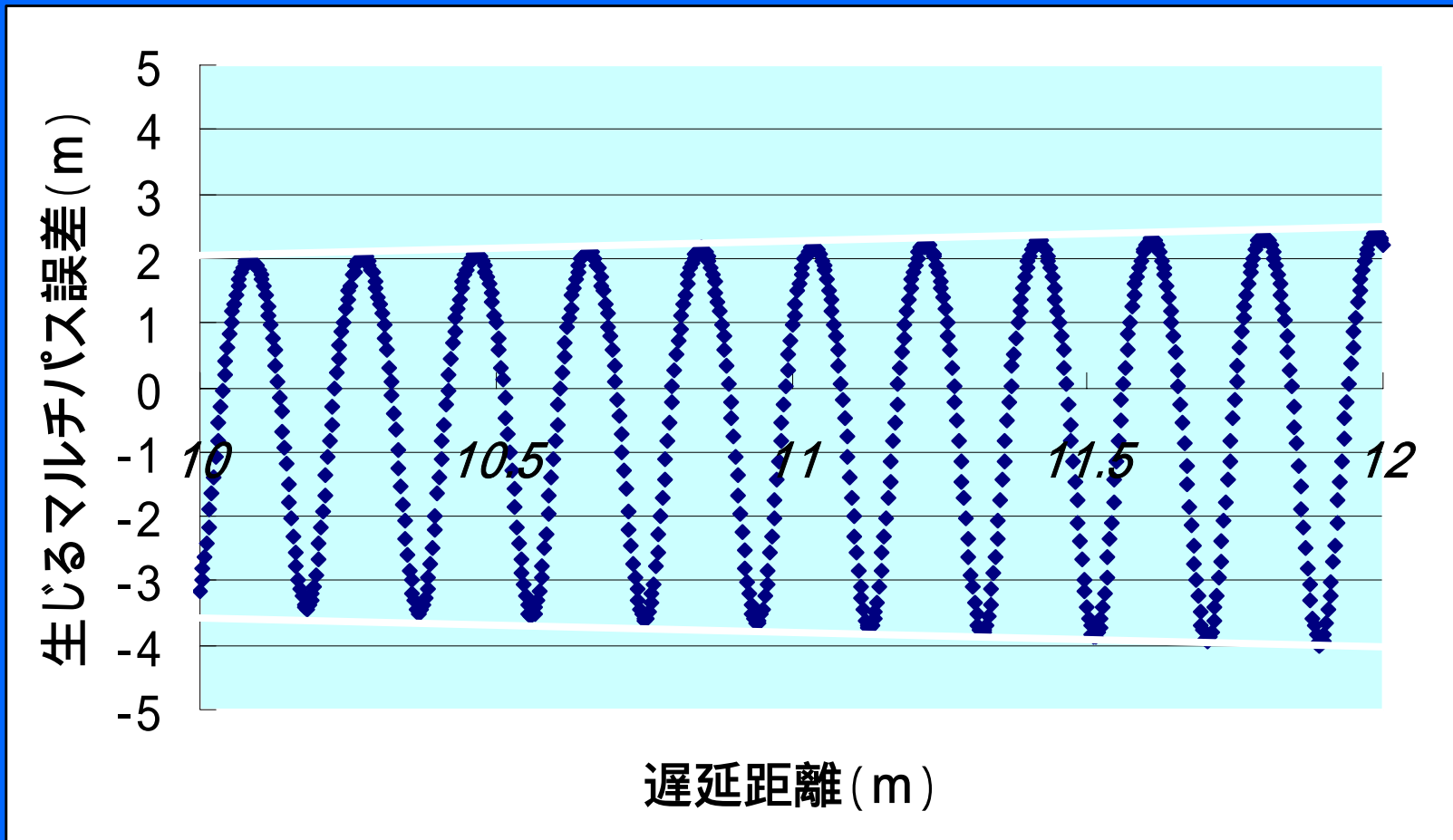


直接波とマルチパス波によるコード相関図

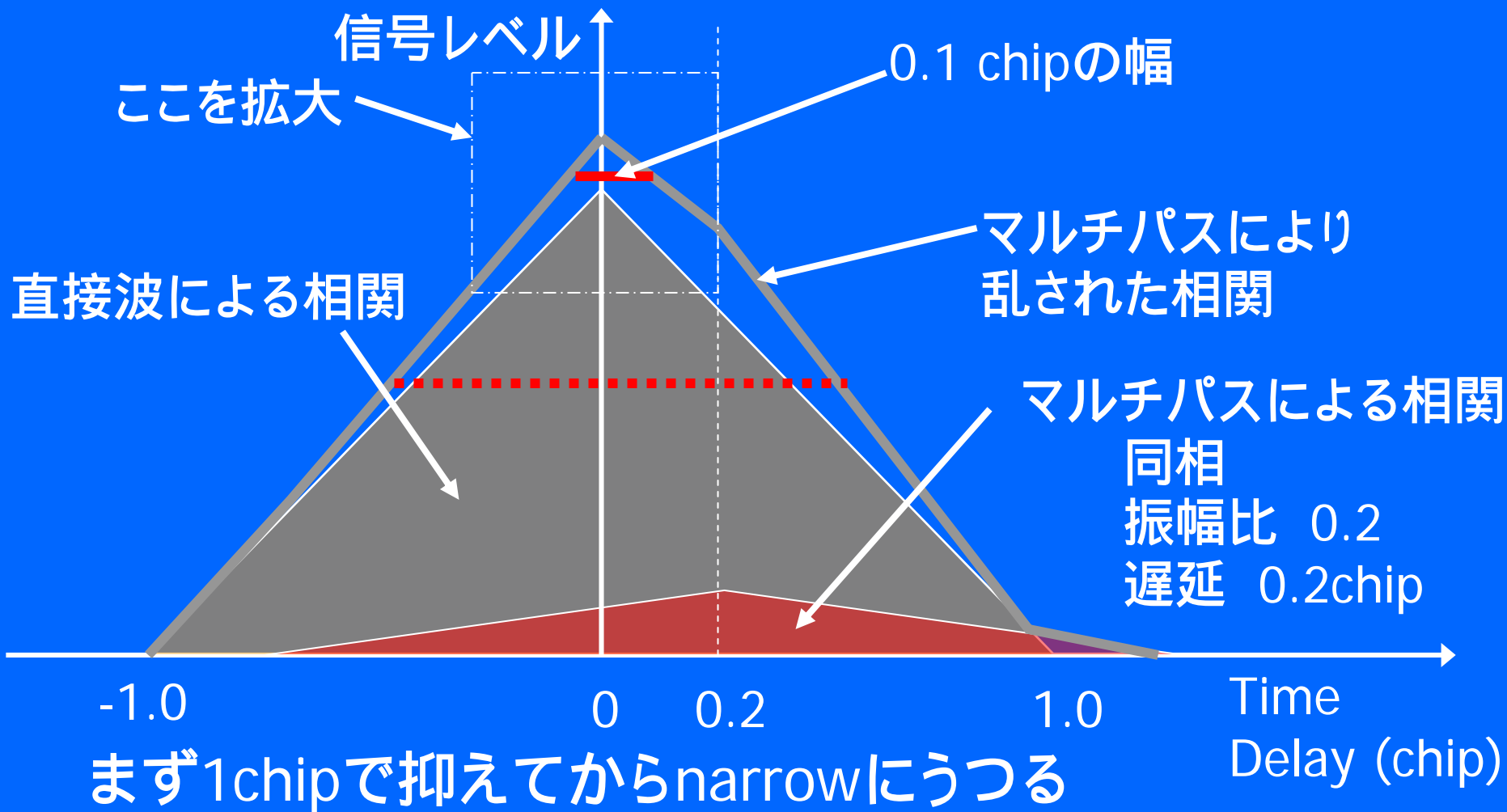
マルチパス誤差と遅延距離の関係 (振幅比0.25、1チップ)



詳細 (10mから12mの部分)

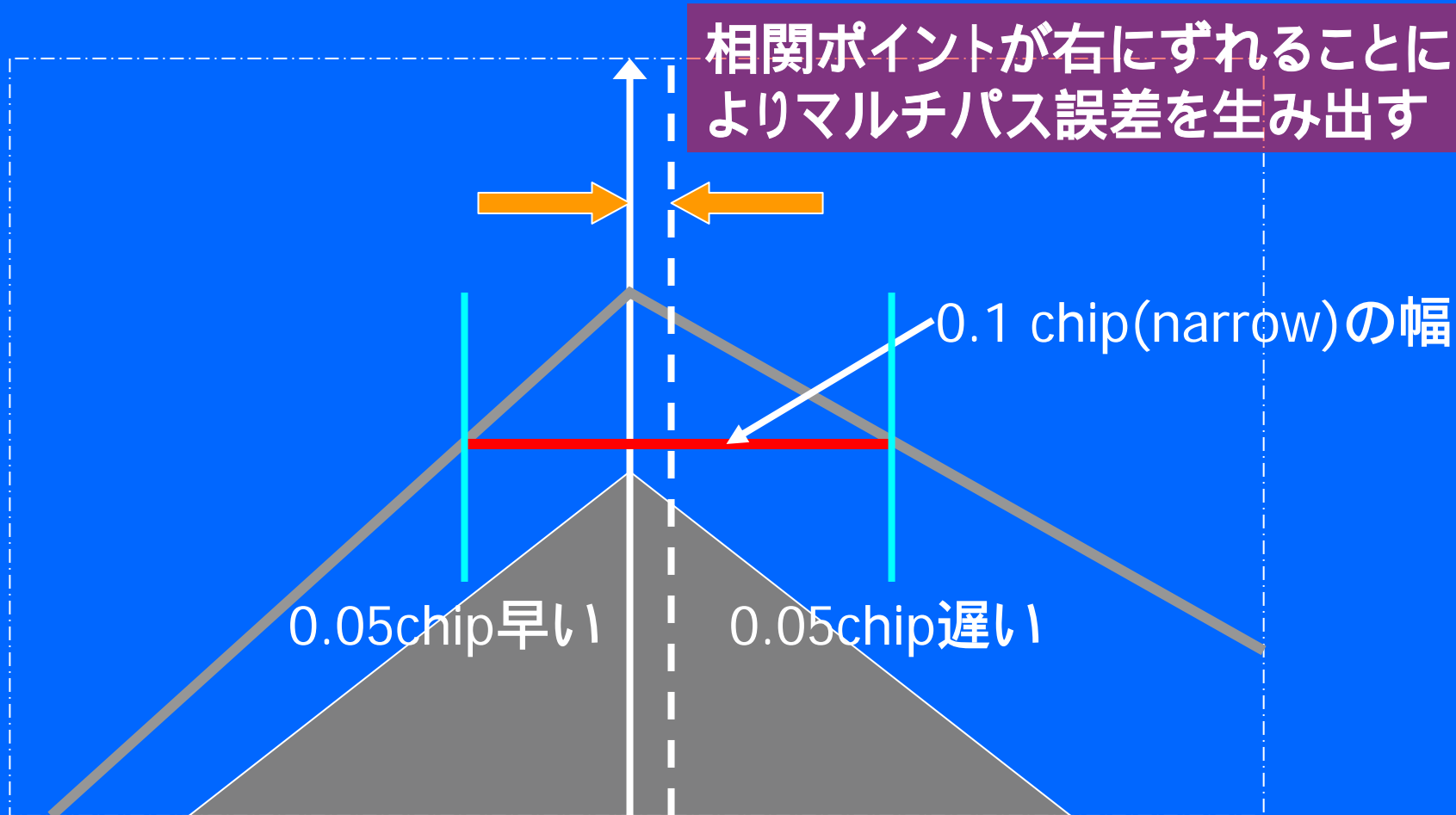


Narrow コリレータについて



相関部分の拡大図

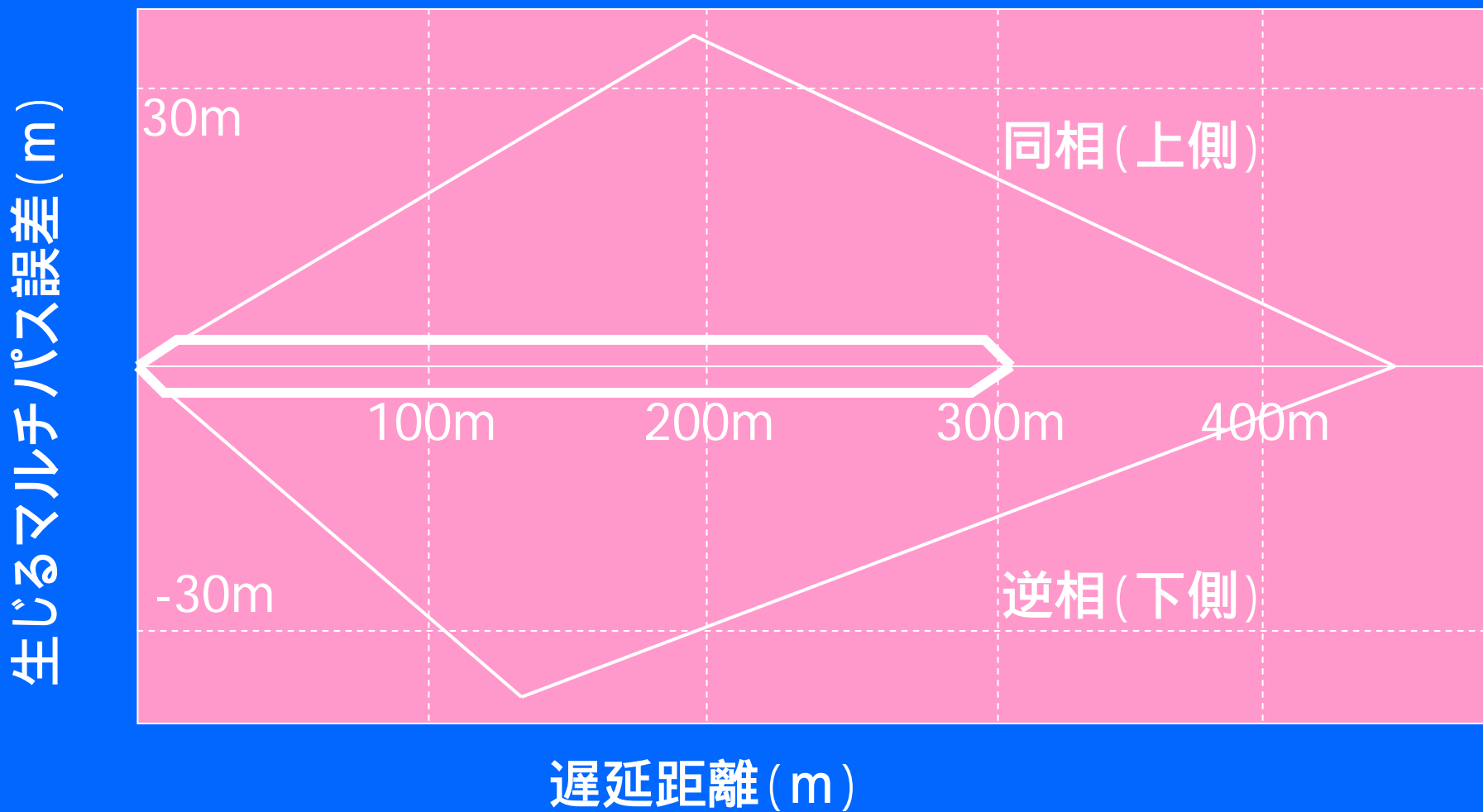
(コード追尾方法)



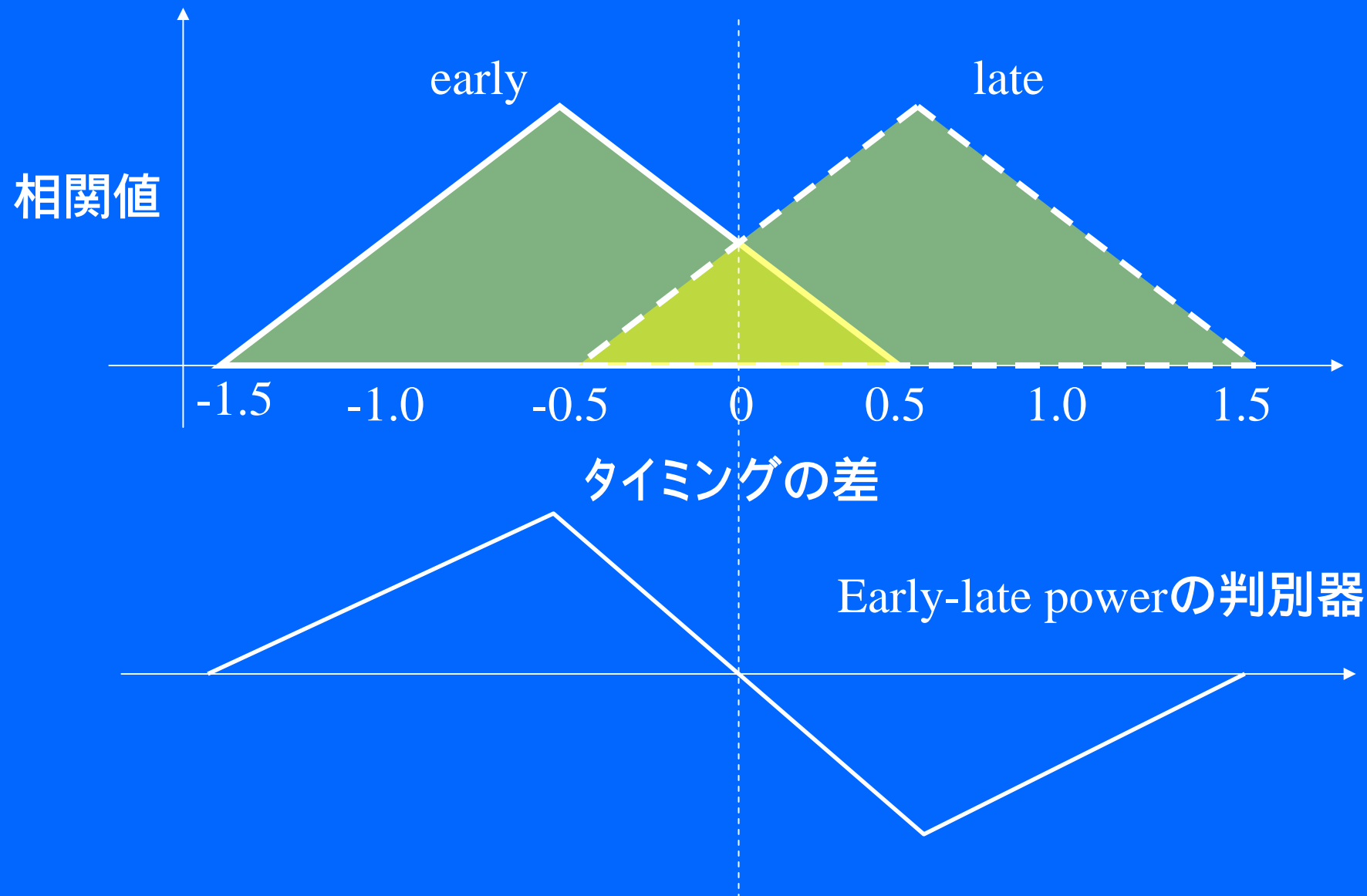
0.1chipしかないので遅延距離の長いマルチパスは無視できる

マルチパス誤差と遅延距離の関係

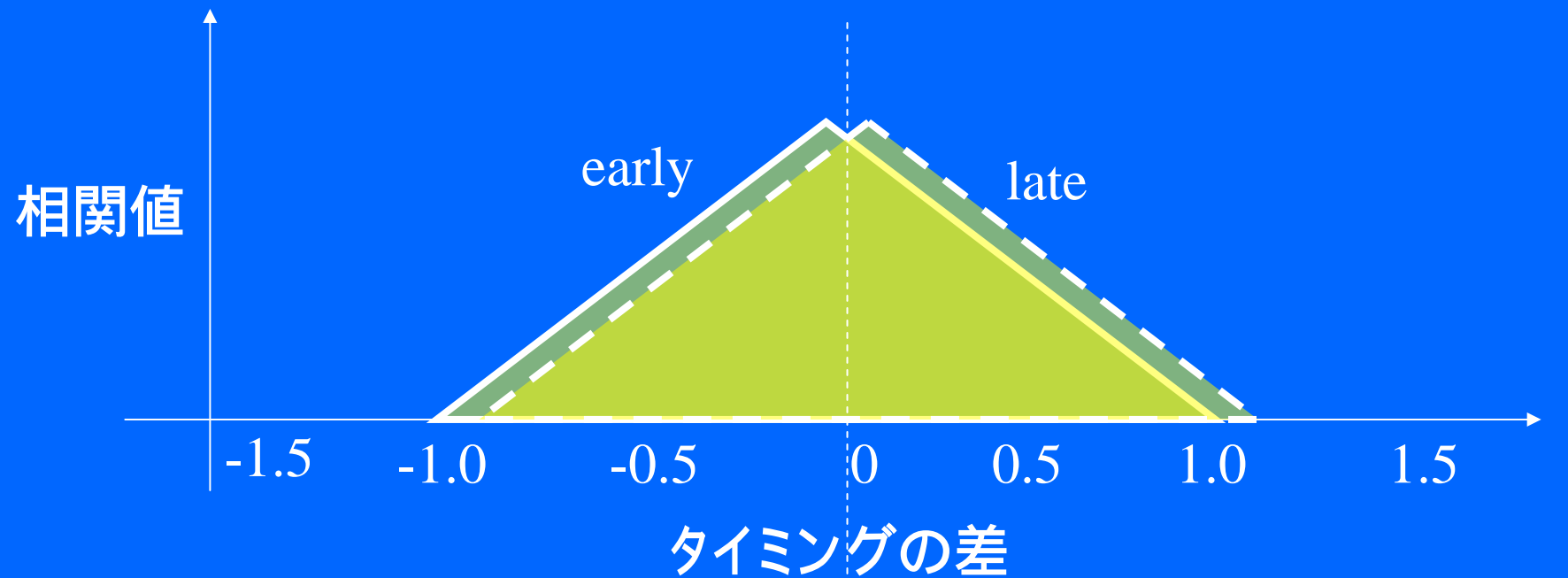
(振幅比0.25、0.1chipのNarrow)



タイミング差が1チップの相関



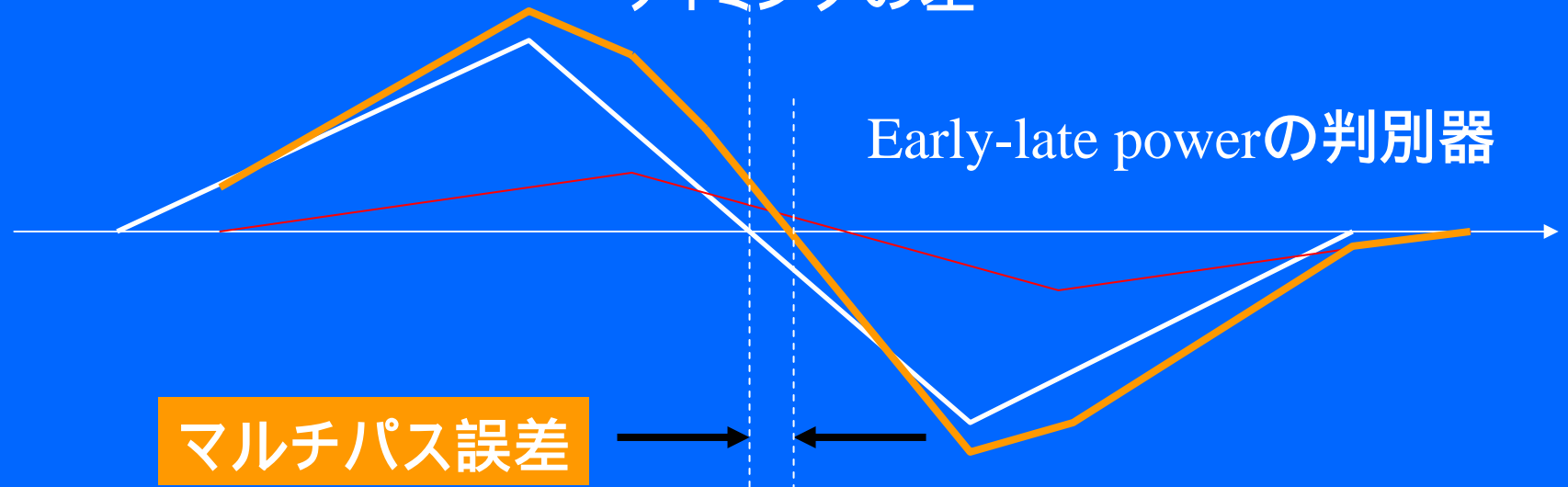
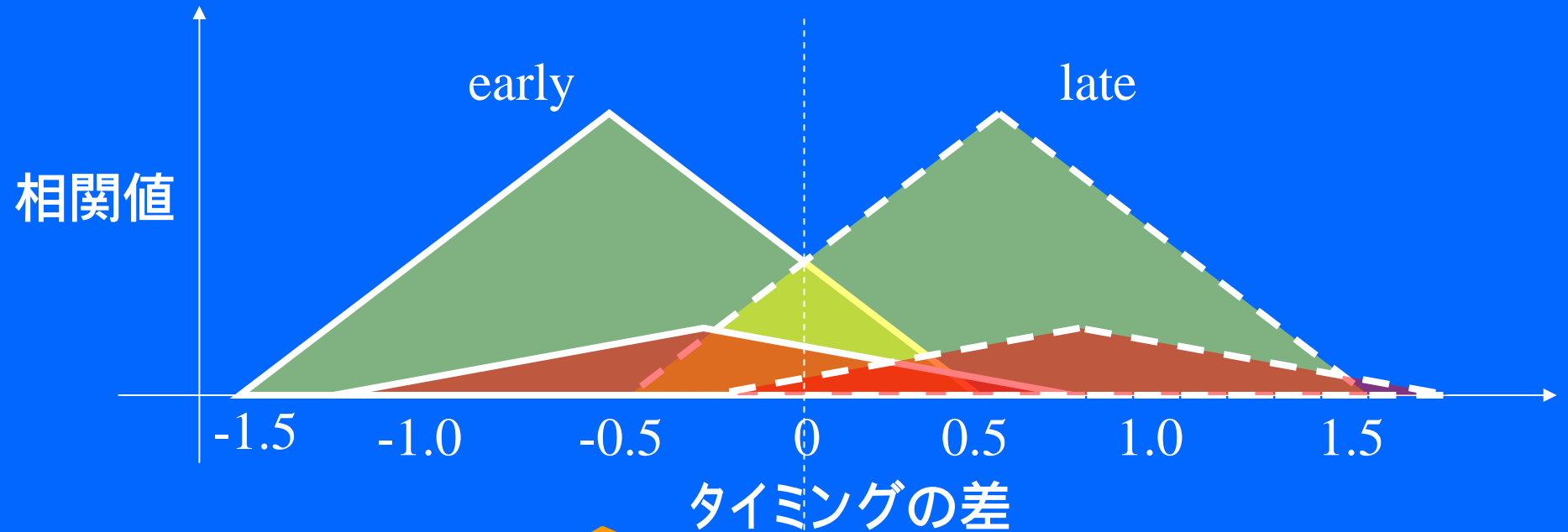
タイミング差が0.1チップの相関



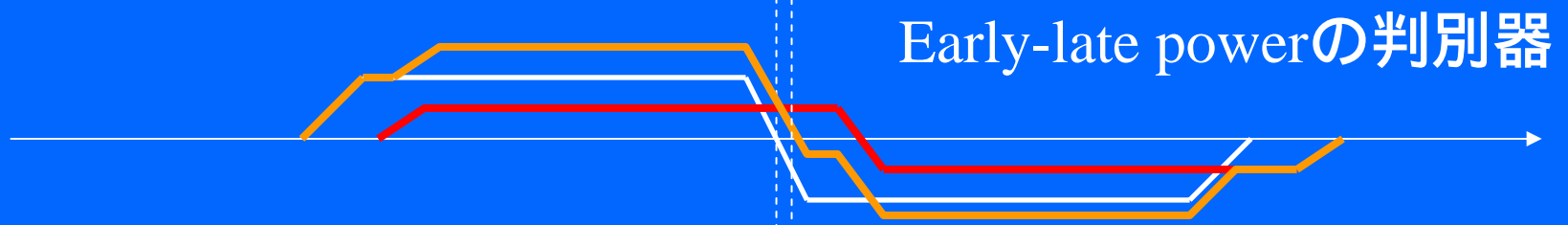
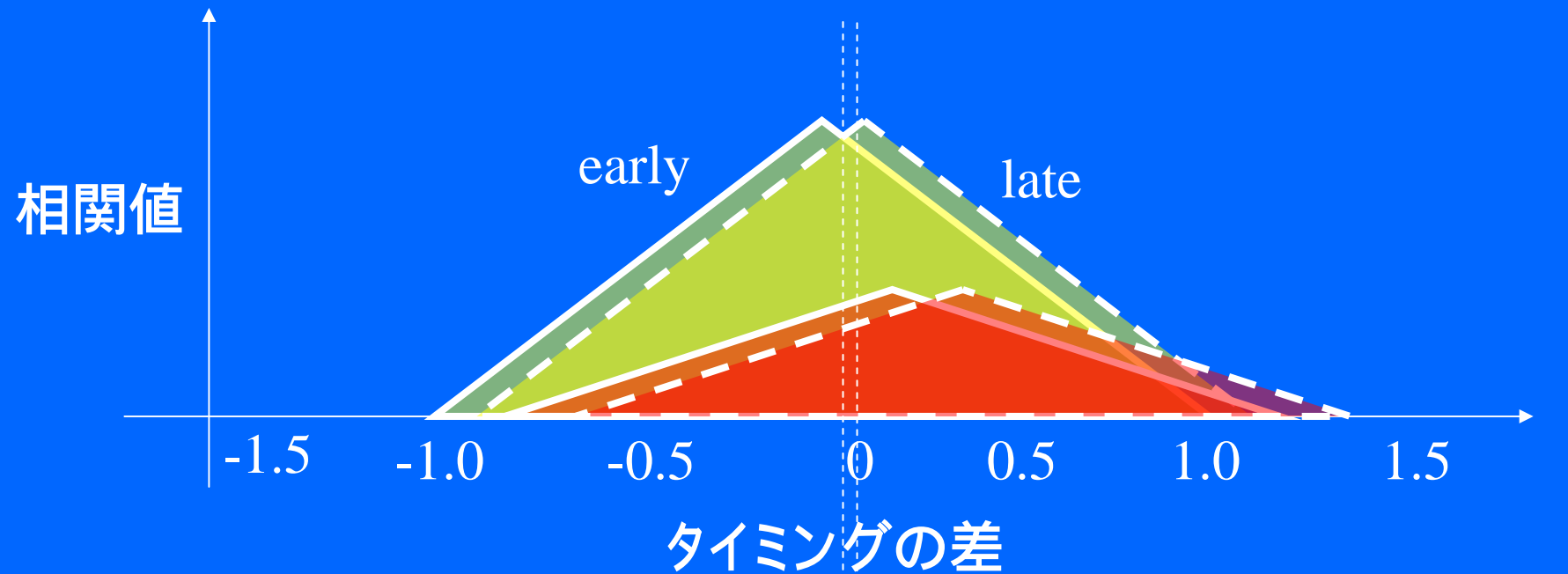
Early-late powerの判別器



マルチパスが存在する場合 (1.0チップ)



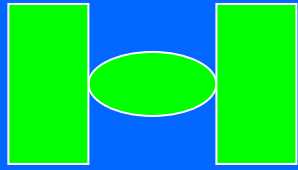
マルチパスが存在する場合 (0.1チップ)



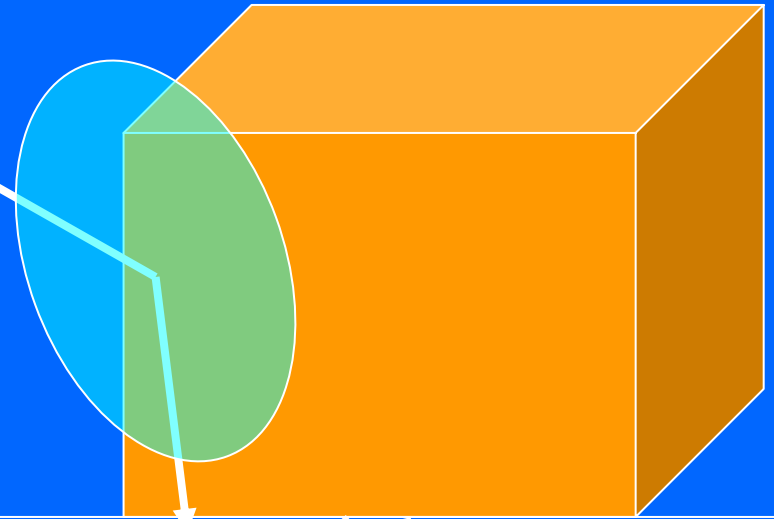
マルチパス誤差



チップ長の違いによる DGPS測位結果の違い

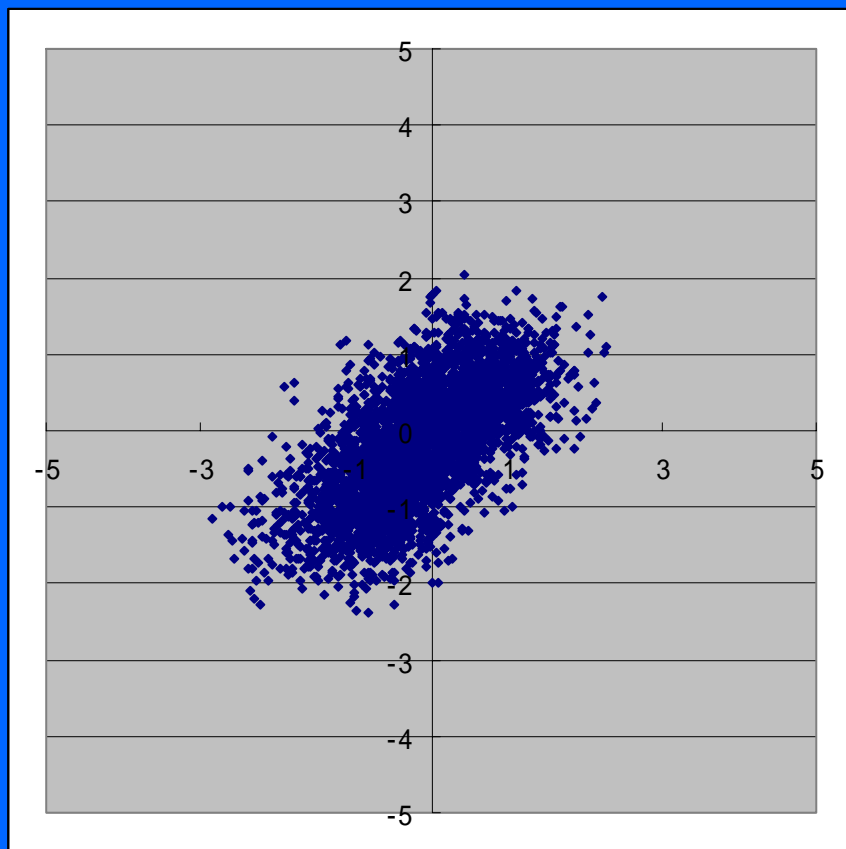


アンテナを右のように設置する。
条件は、方位角で90度、仰角で45度
相当の部分が遮られること。
よって、アンテナ障害物間の距離に
応じて障害物の大きさを変化させる。
なお、反射によるエネルギーは十分に
障害物より受けるものとする。

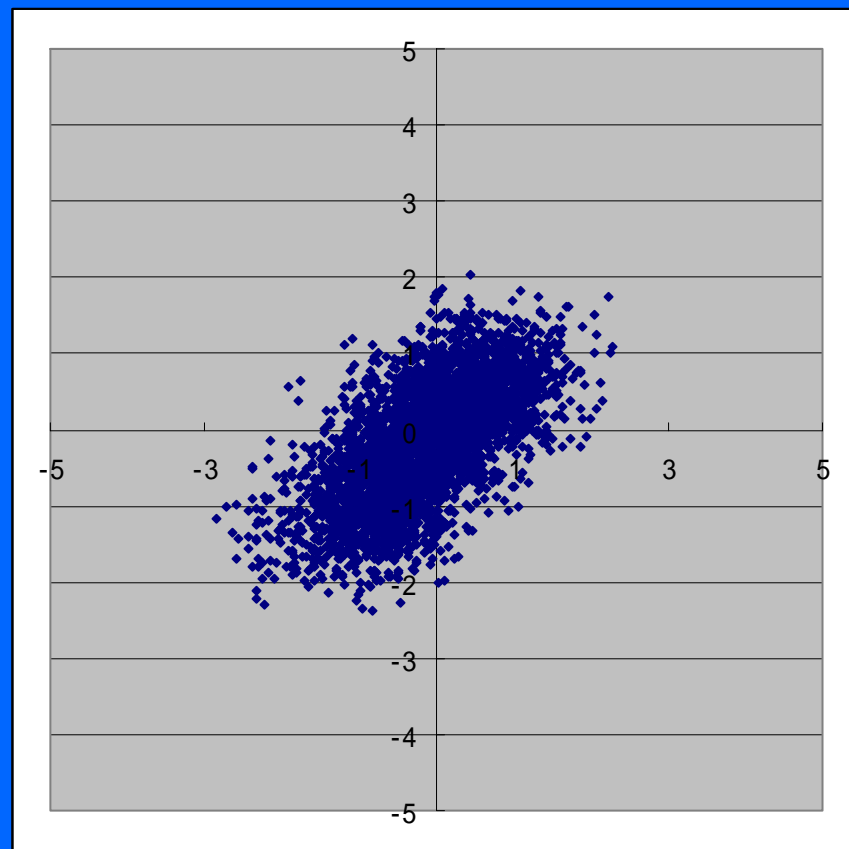


5m
15m
30m

距離が5mの場合(水平)

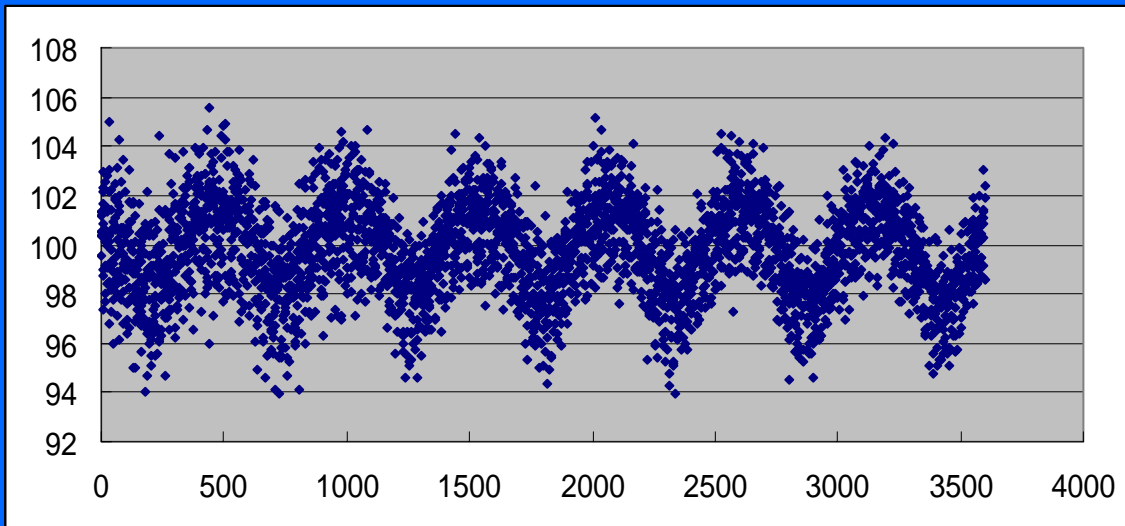


1.0チップコリレータ
2drms:2.2m

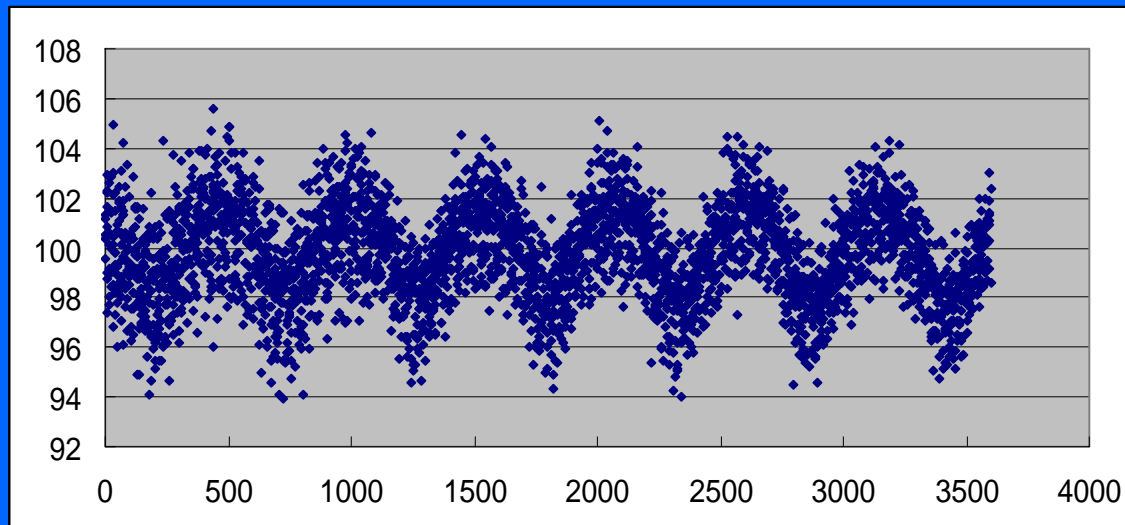


0.1チップコリレータ
2drms: 2.2m

距離が5mの場合(高さ)

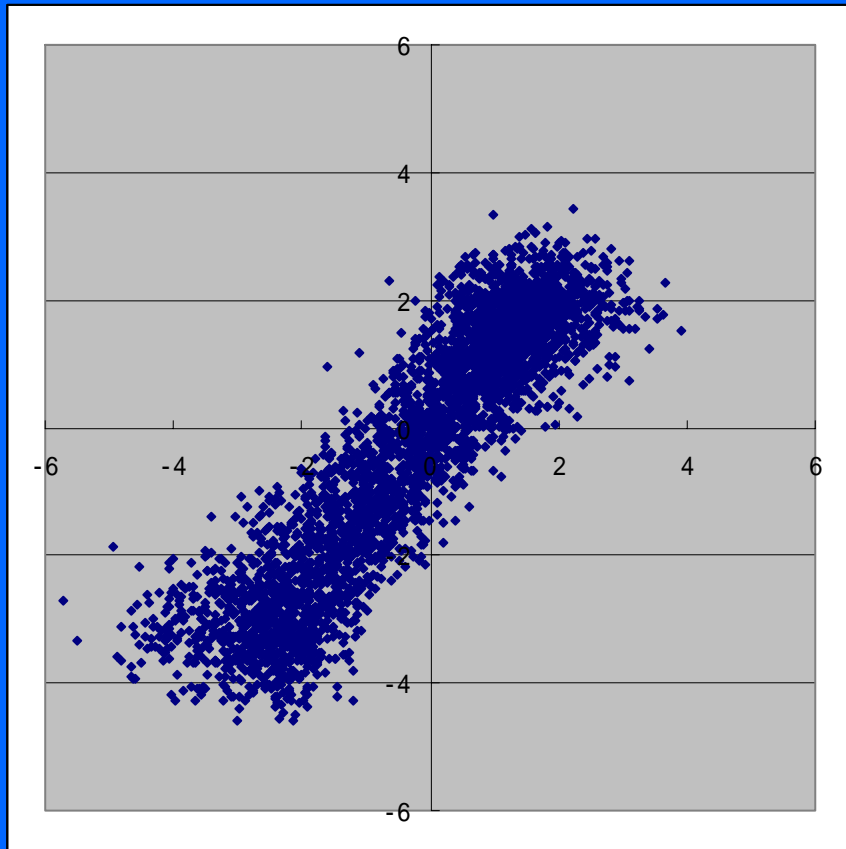


1.0チップコリレータ
2drms: 3.8m

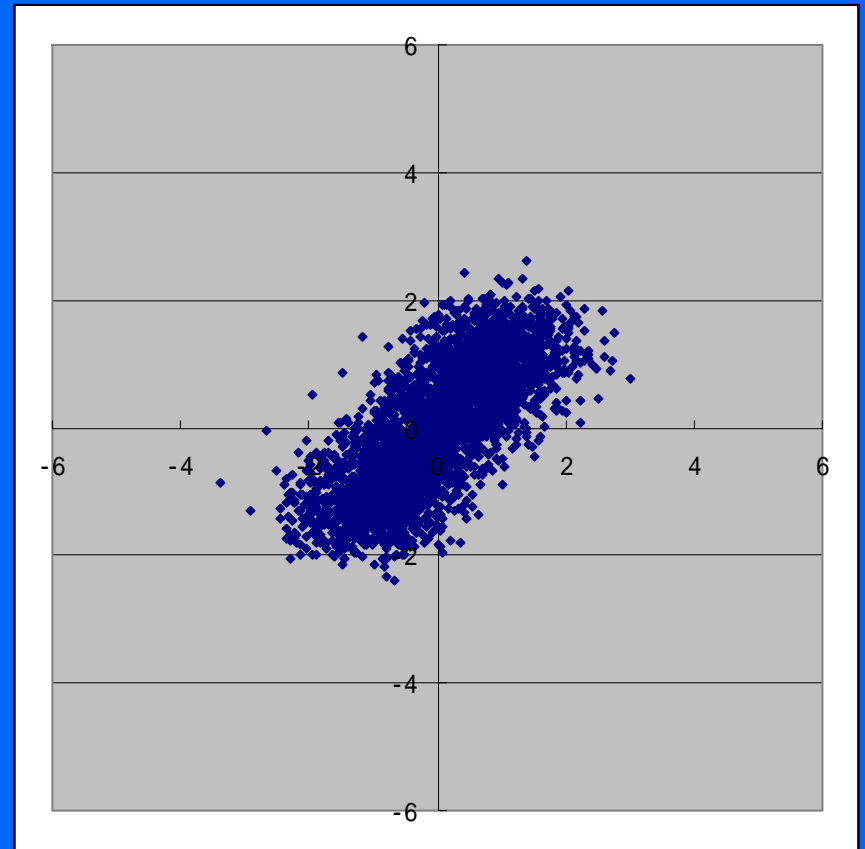


0.1チップコリレータ
2drms: 3.8m

距離が15mの場合(水平)

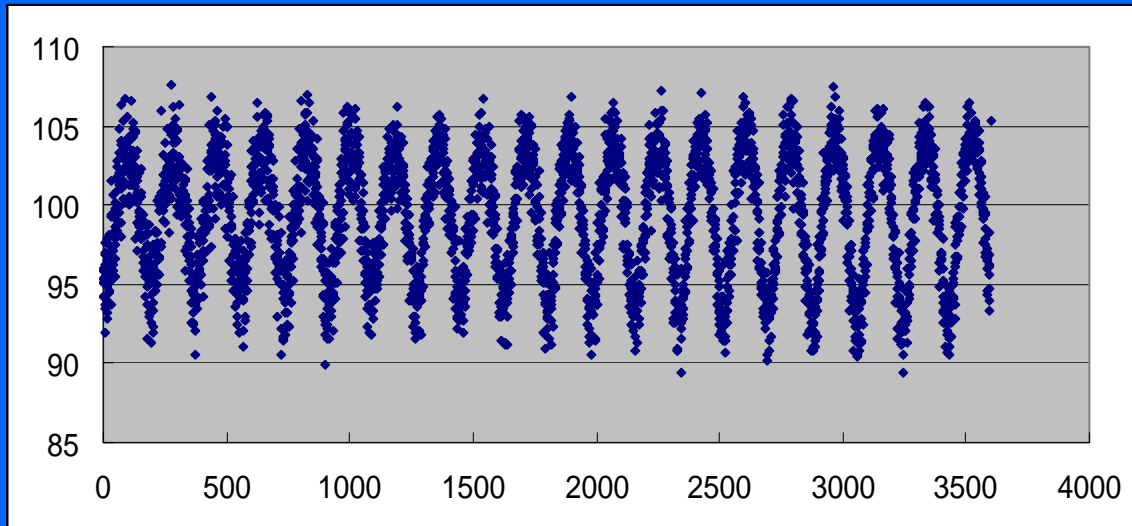


1.0チップコリレータ
2drms:5.3m

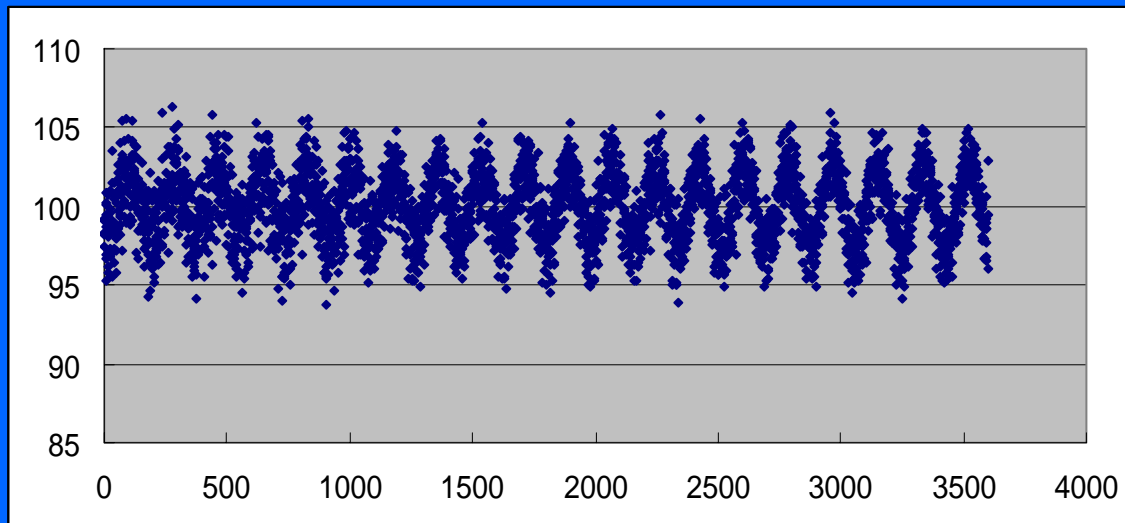


0.1チップコリレータ
2drms:2.7m

距離が15mの場合(高さ)

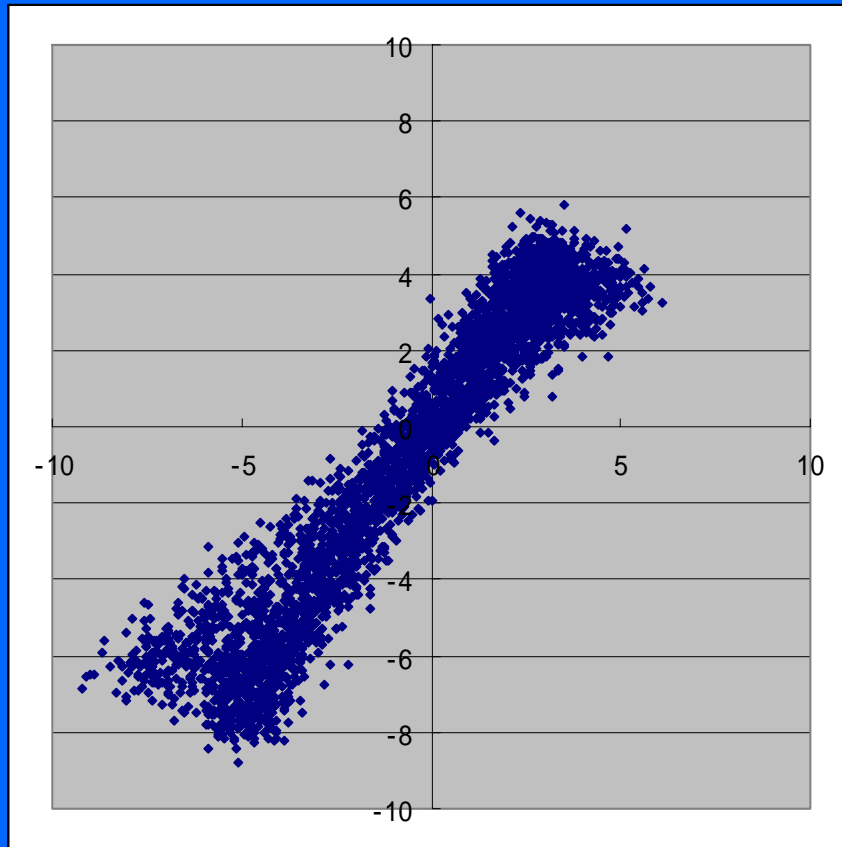


1.0チップコリレータ
2drms: 7.9m

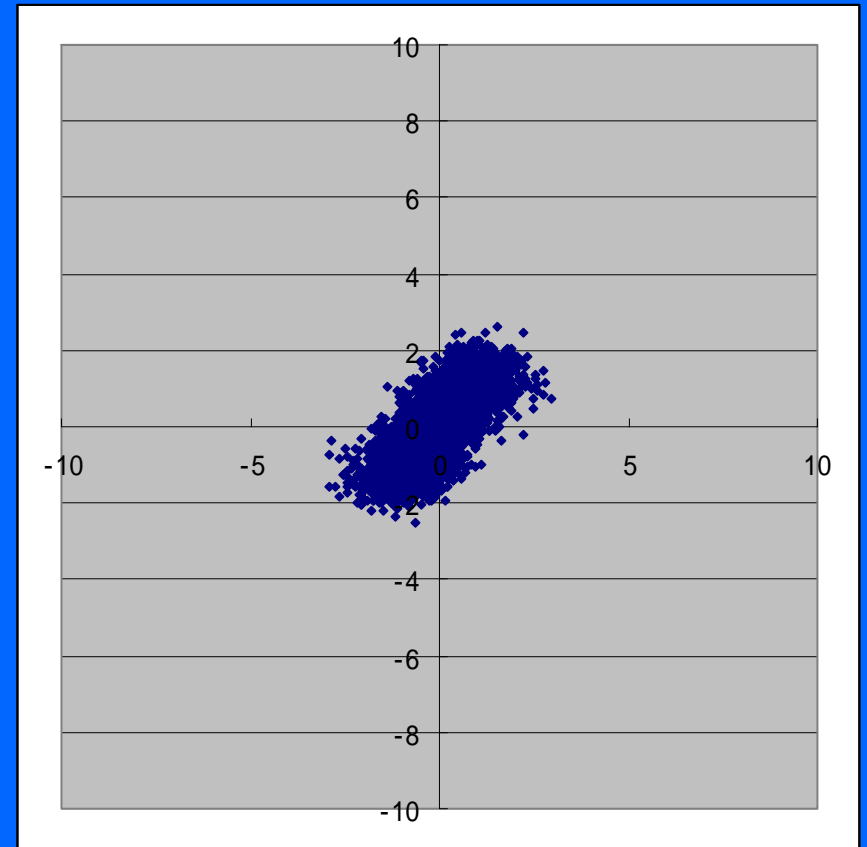


0.1チップコリレータ
2drms: 4.4m

距離が30mの場合(水平)

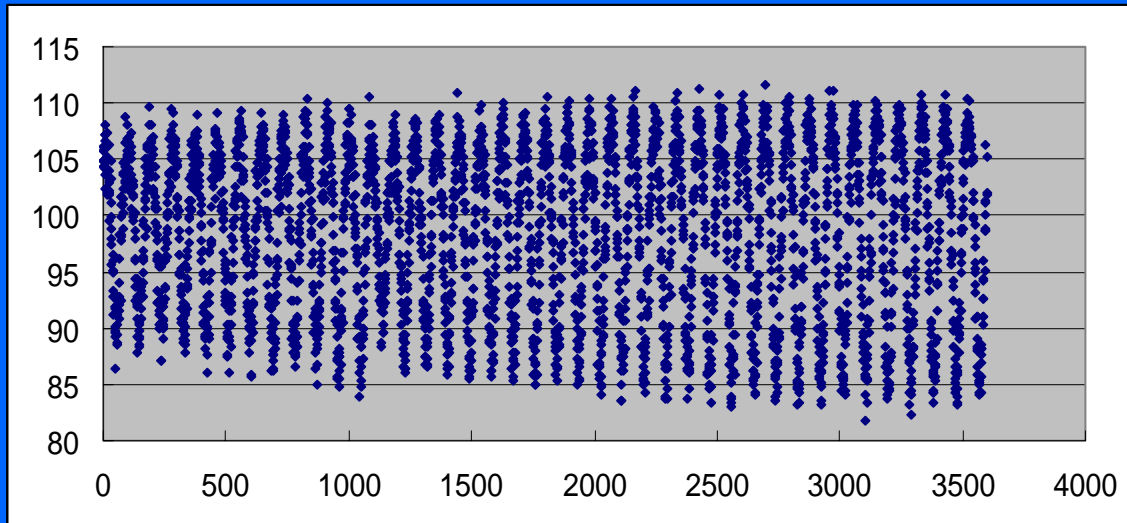


1.0チップコリレータ
2drms:10.2m

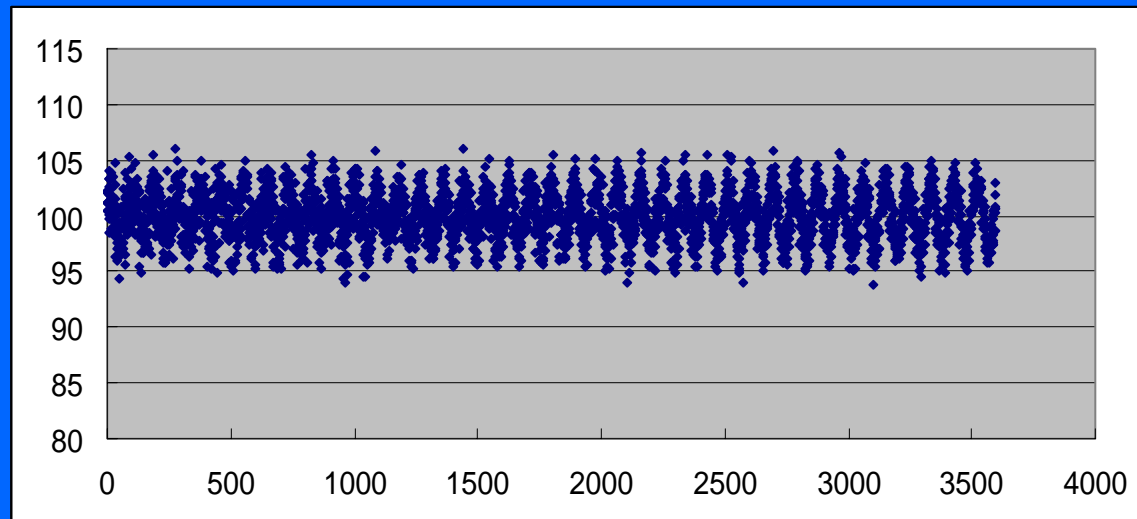


1.0チップコリレータ
2drms:2.7m

距離が30mの場合(高さ)



1.0チップコリレータ
2drms: 14.9m



0.1チップコリレータ
2drms: 4.4m

Leading-Edge Techniques

前の図を参照しながら

- 直接波はマルチパス波よりも早く届くため(マルチパス波だけ届くこともある)相関関数の左側端部分はマルチパスによって影響を受けていない。ゆえに、もし相関関数値の左側立ち上がりポイントを測定することができれば、直接波をマルチパスによる誤差を含めずに測定することができることを利用したもの。
- しかしながらこの技術の実用化は厳しい。その理由は、直接波とマルチパスの時間差が非常に小さい場合、マルチパスに乱されていない部分はわずかである。この領域だけで、最低限の信号強度を得ることは困難であり、カーブの傾きは極めて小さくなる。よって正確な を推定することは厳しいのが現状である。

Correlation Function Shape-Based Methods

- この技術は、相関関数値の形からマルチパスのパラメータを決定しようとするものである。アイデアは良いが、少しずつレプリカの遅延時間をずらした相関波形のサンプルが多大に必要である。例えば、直接波と1つのマルチパス波のみの場合でも、6つのパラメータを推定する必要があり、かなりの相関波形を取り扱う必要が出てくる。
- この技術を利用した受信機としては、ELS-methodと呼ばれるものやMEDLLと呼ばれるものがある。MEDLLは最尤推定法に基づいた手法でもある。

ELS (early-late slope) 技術

- 最初のほうの結果には2つの重要な共通の特徴がある。
- 1つ目は、波形は歪まされているものの、望まれる正確なトラッキングポイントが双方のケースで最大ピークの部分であること。
- 2つ目は、ピークの両側における相関波形の傾きが等しくないという点である。

ELSについて

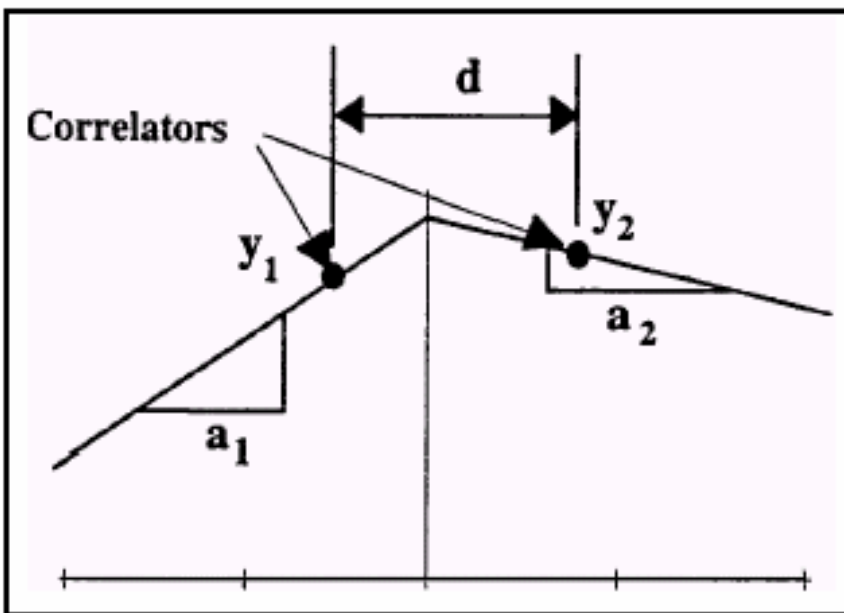


Figure 7: Early Late Slope Technique – Ideal Case

左に2つのコリレータをもつ相関波形のピーク付近を拡大したものを示す。 y_1, y_2 はearly及びlateの相関値
 a_1 はearly側の傾き
 a_2 はlate側の傾き
 d はコリレータ間の幅
傾きの情報を利用することにより、DLLの判別器は、より正確に相関波形のピークを探ることができるようになる。理想的な状態でのトラッキング誤差を計算すると以下のようなになる。

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

ELSについて

ここで2つのコリレータがピークから同じ距離にあるとき、上記のTは0となる。Tが0でないとき、earlyとlateのコリレータのちょうど真ん中にピークがくるように調整されるようになっている。理想的なDLLにおいては、この調整量を正確に推定することが可能である。ではこのDLLを実際の帯域制限のある場合に適用するとどうなるか見ていく。下に実際の概念図を示す。Earlyとlateの傾きを計算するために、ワイドspacingで両側に2つのコリレータがそれぞれ付加されている。内側の2つのコリレータは相関波形のピー

ク付近でのフラットな部分の影響を受けないようにやや広めの間隔で配置されている。

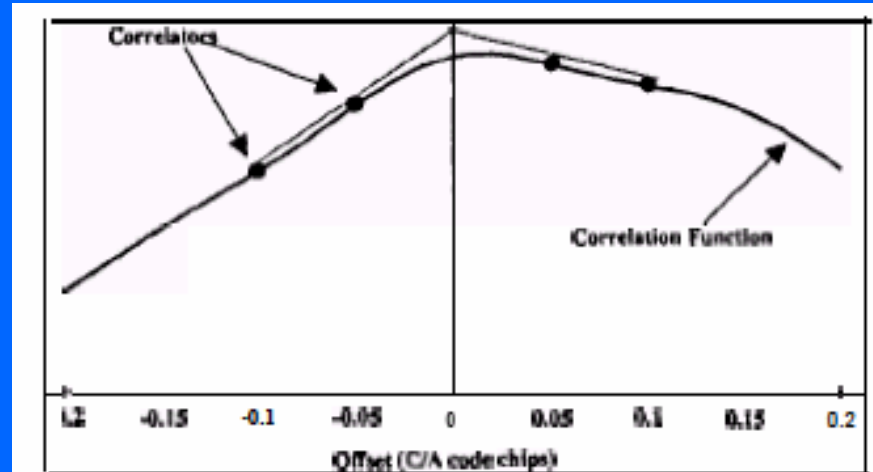


Figure 8: Early Late Slope Technique -- Band Limited Case

ELSについて

- ではELS技術を利用したDLLは従来の8MHz（帯域幅）のナローコリレータに対してどの程度精度が改善しているのかを下に示す。
- 8MHzの帯域幅をもつ相関波形を使用
- ナローコリレータの場合とELS技術の場合のマルチパス誤差と遅延距離の包絡線を描いた
- マルチパスの振幅比が0.5、遅延距離が0から1.5チップまで変化
- 誤差はマルチパス誤差が最大になる同相のときと逆相
- この図より、ELS技術を用いたほうが0.1チップのナローコリレータよりも約30%から70%の改善が見られ

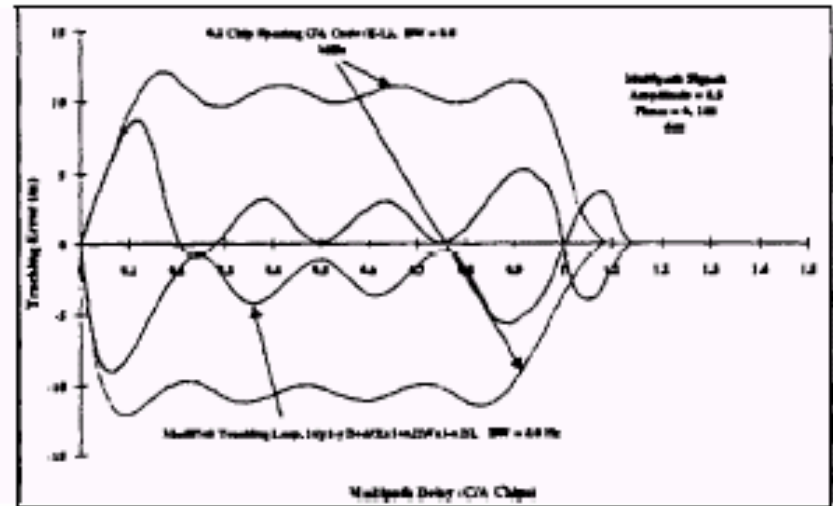


Figure 9: Multipath Error Envelopes For Narrow Correlator and Early Late Slope Technique

Modified Correlator Reference Waveforms

- この技術では、マルチパスによって生じる誤差をできるだけ無視するために、レプリカそのものの波形を操作している。具体的には、C/Aコードのフラットな部分を除いたレプリカを使用することによって、相関波形の結果がレプリカで操作したチップ幅まで狭められる。結果として30m程度以上遅れてくるマルチパス波は無視することになる。この技術を利用した受信機としては
- strobe correlatorやgated correlatorの名前で知られている。strobe correlatorについて次に示す。

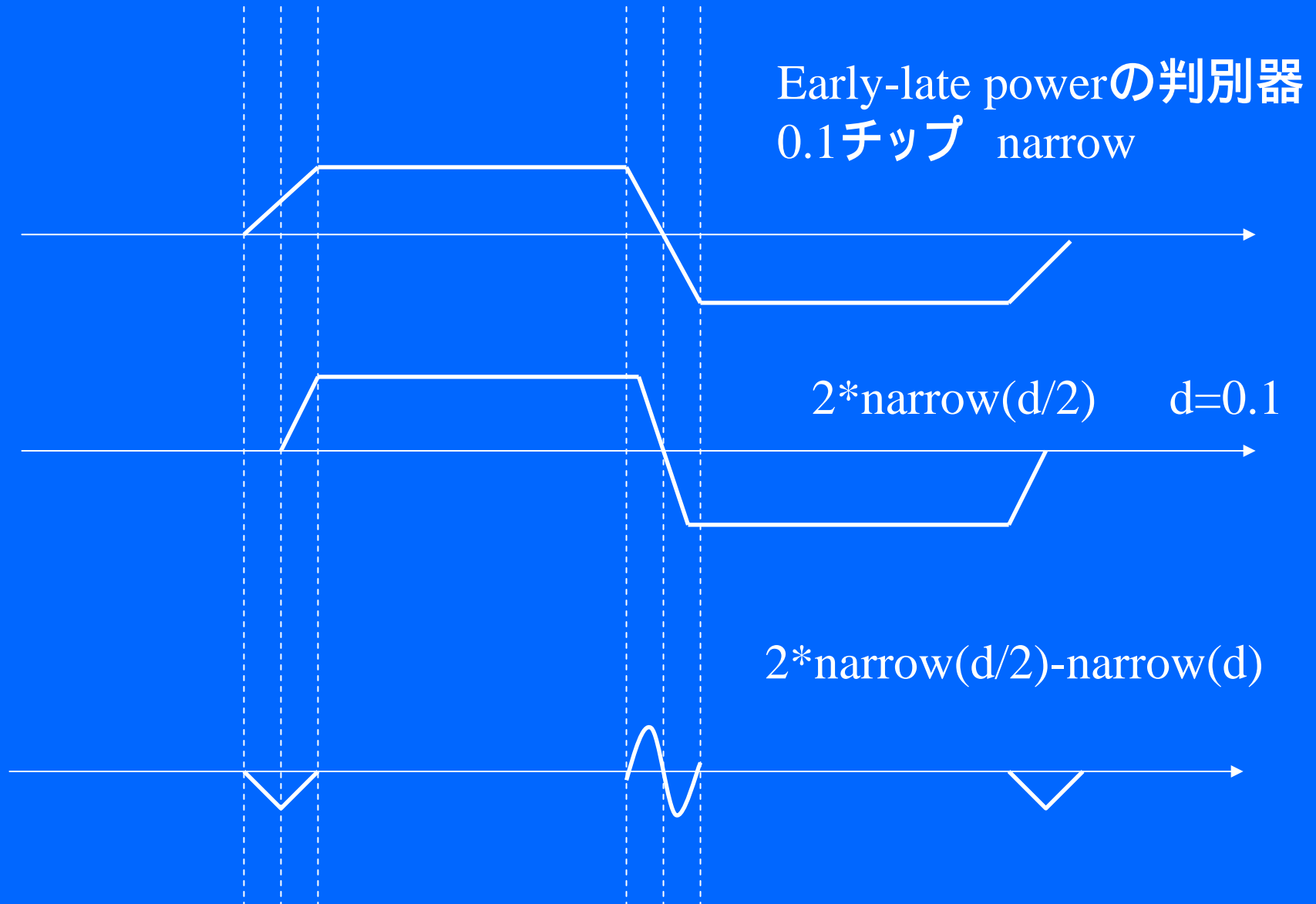
Strobe Correlator

- ナローコリレータはマルチパスの遅延距離がおよそ1.0チップまで影響している。実際の使用環境においてはより遅延距離が短いマルチパス波を削減することが重要である。GPS信号は近くに存在する建物や金属物に反射される可能性が非常に高い。より遅延距離の短いマルチパス波に対して有効なコリレータを作る1つの手段は、相関をとる部分のパターンを短くすることである。それは、今まで使われてきていないナローコリレータの特徴を利用することによって可能である。
- ナローコリレータの相関波形における最初の傾きの部分は、コリレータの幅とは独立している。
- 平坦な部分の最大の相関値はナローコリレータのチップ幅に比例している。
- 上記のような特徴から、2つのナローコリレータの線形的な結合を実装してみると次のようになる。

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

ここで*narrow*(d)は、チップ幅がd (C/Aコード) に相当する相関波形

Strobe Correlator



Strobe correlatorの特徴

- この技術はspecularもしくはdiffuseそしてマルチパスの数に関係なく、様々なマルチパス環境においてその性能を発揮する。
- トラッキング能力は、低い信号強度の環境でもそれほど影響を受けない。
- ノイズに対する耐性といった受信機の他の性能を落とすことはない。
- 現在のところ、基準局や低いダイナミクスの移動体におけるアプリケーションへの適用が強調されているが、それらとは異なるタイプのアプリケーションにも対応できるような技術である。
- リアルタイムでマルチパスの度合いを見積もるための能力を持っている。このマルチパスによる影響の指数のようなものがチャンネルごとに得られるので、その指数に応じて計算に使用する衛星の重み付け等を考慮することが可能である。

実際の性能

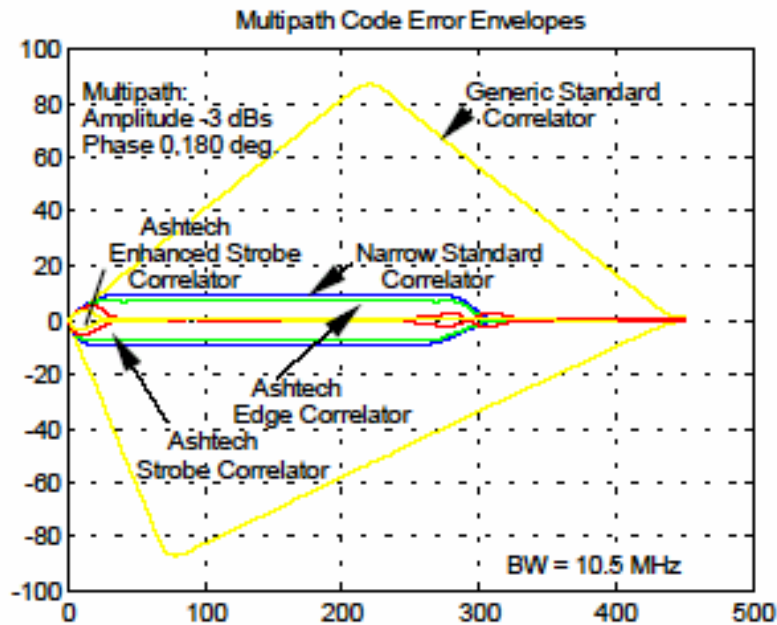


Figure 4 - Code Multipath Tracking Errors Envelopes

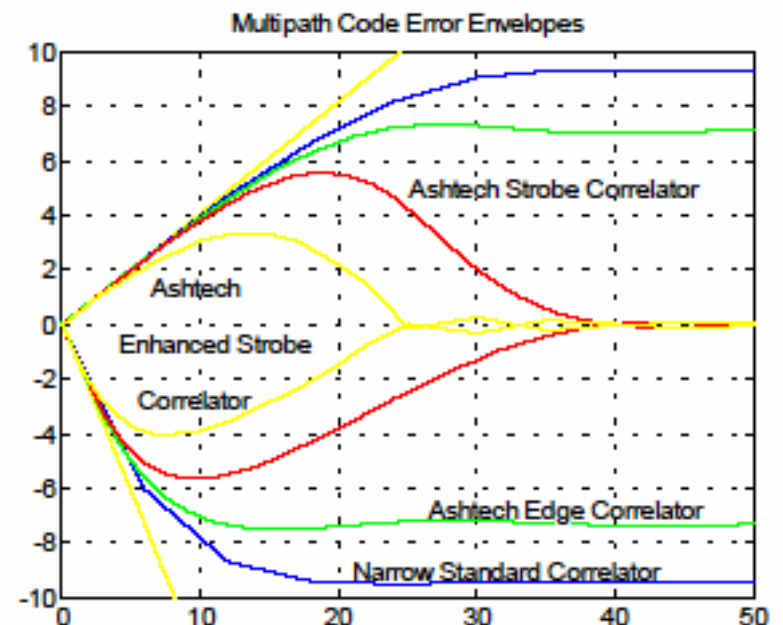


Figure 5: Short Delay Code Tracking Error Envelopes.

コードマルチパスによるトラッキング誤差の包絡線
マルチパスの直接波に対する振幅比は0.5としている。これらの
結果はGPSシミュレータを利用して検証されている。

MMT Technology

- 最近になってMMT(multipath mitigation technology)と呼ばれる手法が開発されており、実用化に入っている。この手法では理論的な限界値に達すると言われている。

L.Weill and B.Fisher, “Method for Mitigating Multipath Effects in Radio Ranging Systems,” U.S. Patent No. 6,031,881, February 29, 2000.

Performance of various multipath

