ETPモデル研究の歴史: その始まり

電通大唐沢研究室
室内資料(H21.06.29)

伝搬研究: 衛星通信伝搬 → 地上移動通信伝搬

⇓

広帯域マルチパス伝搬理論モデル構築にチャレンジ

⇓

再生クロックのサイクルスリップ問題

⇓

等価伝送路モデル(ETPモデル)

⇓

サイクルスリップ理論の確立

⇓

符号間干渉誤りの理論解析応用

(シングルキャリア伝送 → OFDM伝送)

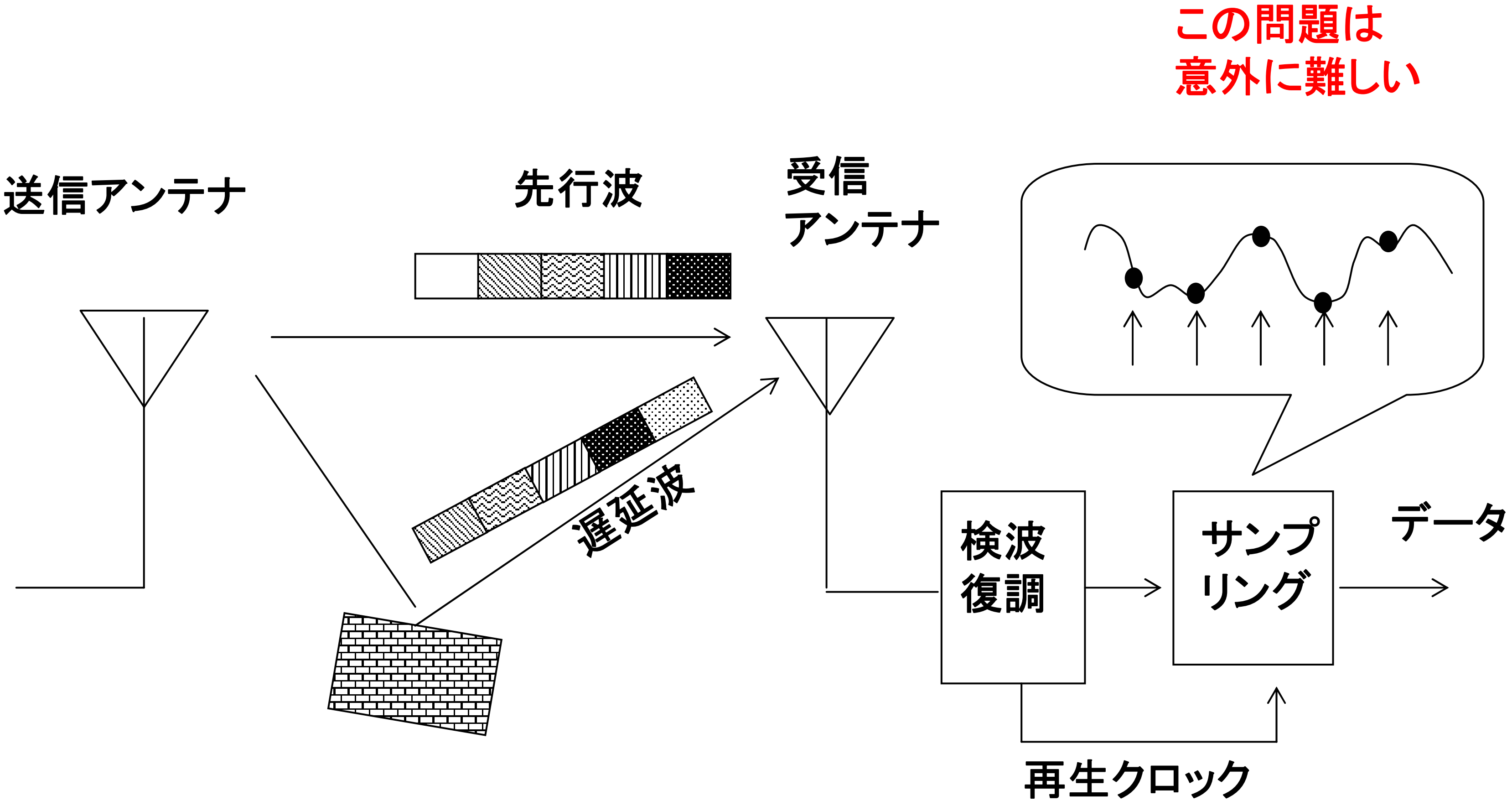
(SISO → SIMO, MIMO)

本スライドの内容

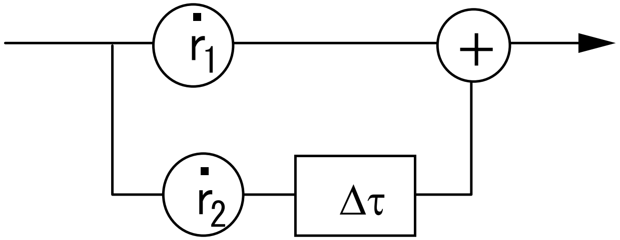
日立国際電気技報
No. 9, 2009.03.
「実験と理論」

現在、研究進行中

遅延差のある2波が入射した場合の受信機の反応は？



符号間干渉時のアイパターンとサンプルタイミング

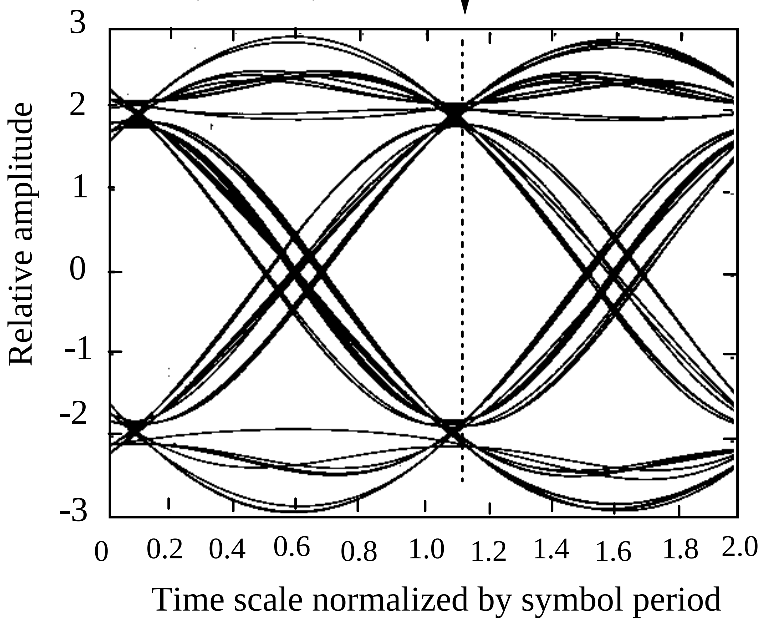


$$|\dot{r}_1| = |\dot{r}_2| = 1$$

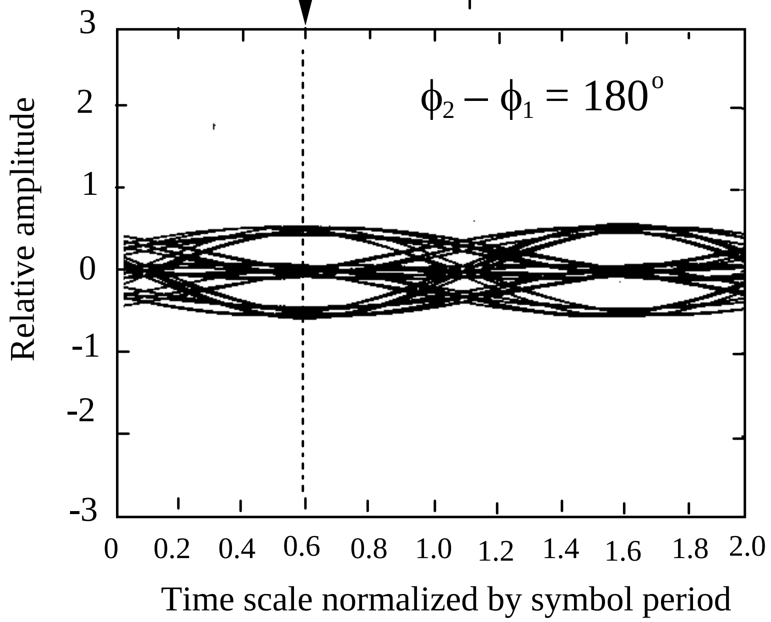
$$\Delta\tau = 0.2\ Ts$$

サンプルタイミングが
情報の中心と一致

$$\phi_1 \left(\equiv \angle\, \dot{r}_1\right) = \phi_2$$



サンプルタイミングが
情報の中心からずれる



サンプルタイミングの問題が誤り発生に大きな影響を与えていること、を最初に気づき、問題提起をした人： 京都大学池上研究室（池上先生、吉田先生）

疑問の原点

↓

BPSKはQPSK変調方式に比べて、符号間干渉誤りに強いはず（計算機シミュレーションによれば）

↓

しかし実際にフィールド実験をしてみると、BPSKもQPSKと同じように誤りが発生する。

↓

なぜか？

↓

受信機のクロック再生の動作が怪しい

↓

再生クロックのサイクルスリップと判明

理論的解明へのステップ（唐沢、岩井、黒田）→等価伝送路モデル

サンプルタイミング位置

受信機は、狭帯域信号が入力された場合に
最適位置にサンプリングが入るように設計されている

↓

アイパターンのアイの開きが平均的な意味で
最大になるところがサンプルタイミング位置

↓

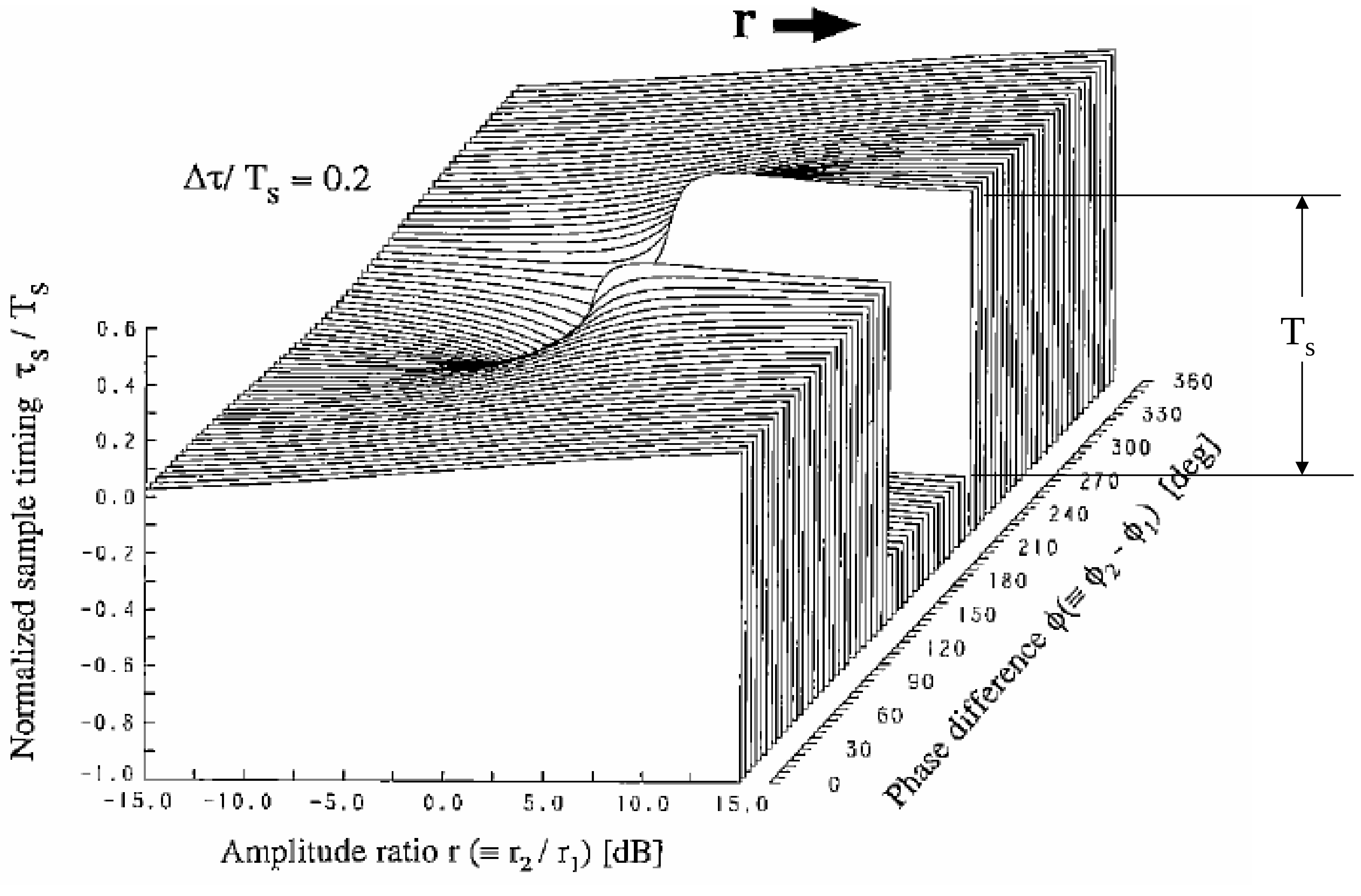
遅延差のある2波が入るとどうなるか？

↓

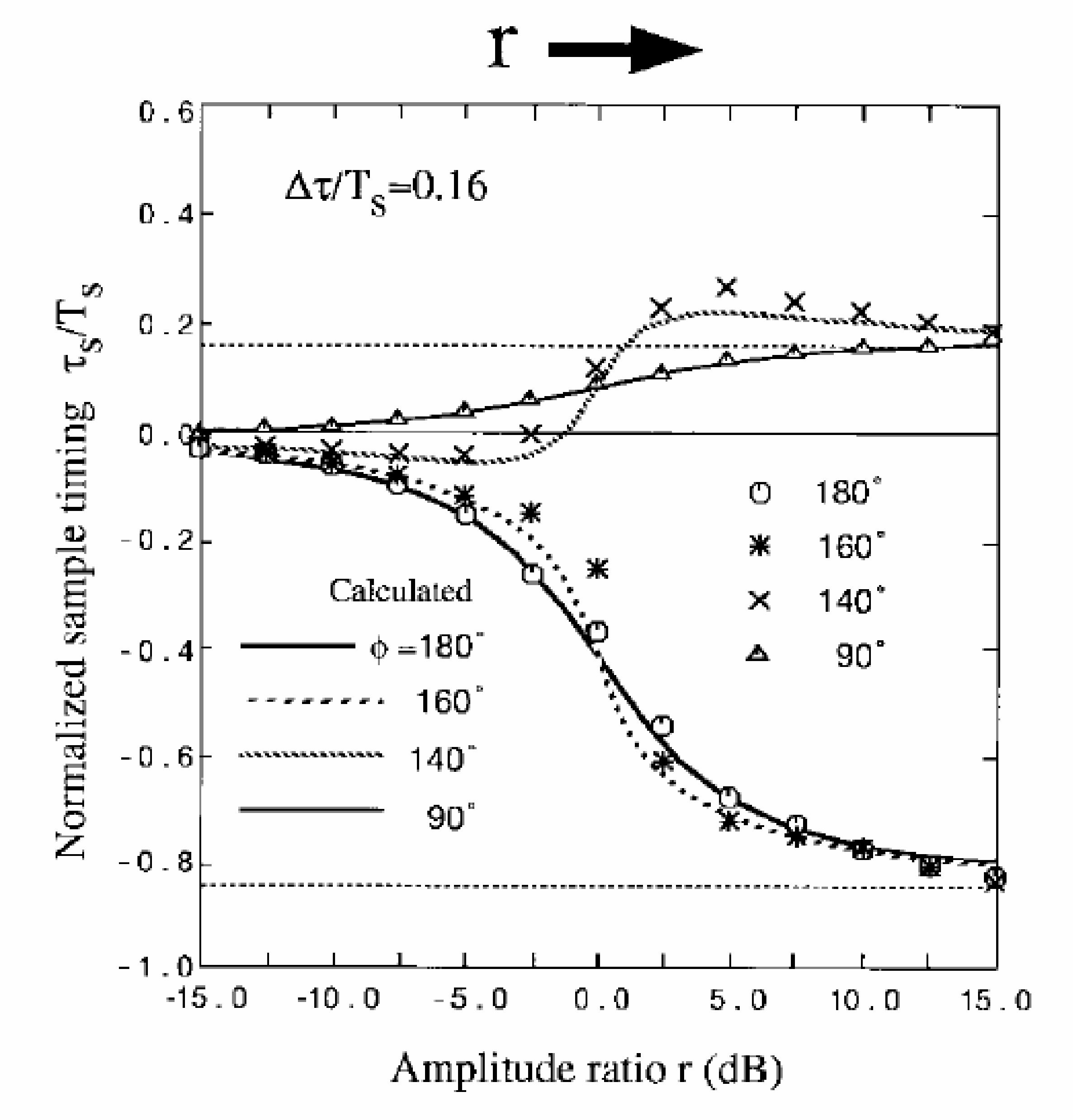
そのサンプリング位置は計算で求められる

（式省略）

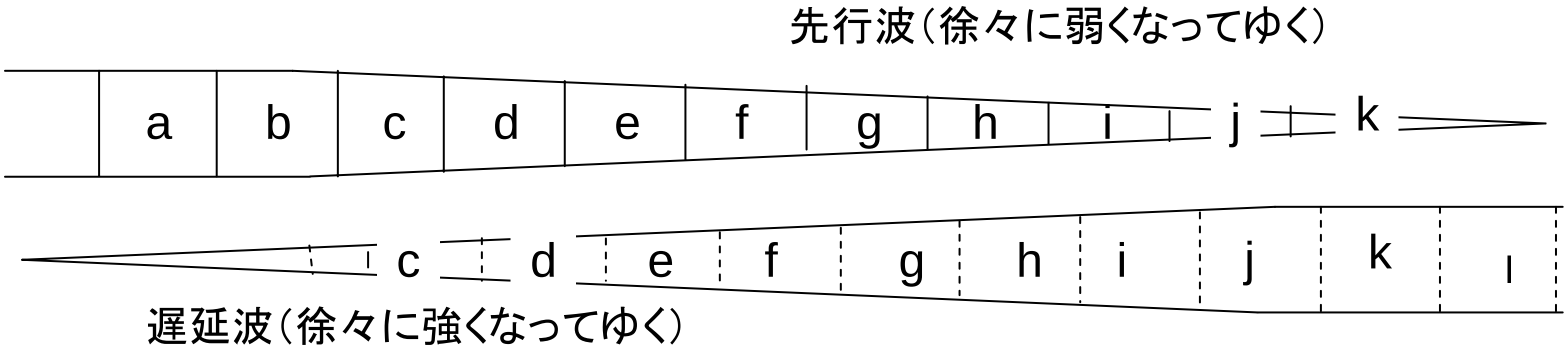
位相差 φ 一定下での振幅比 r の変化に対するサンプルタイミング



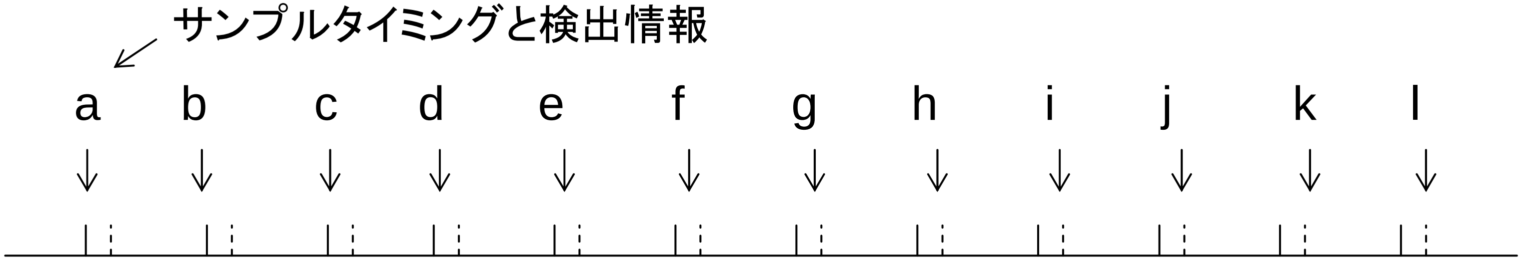
サンプルタイミング： 計算値と実測値の比較



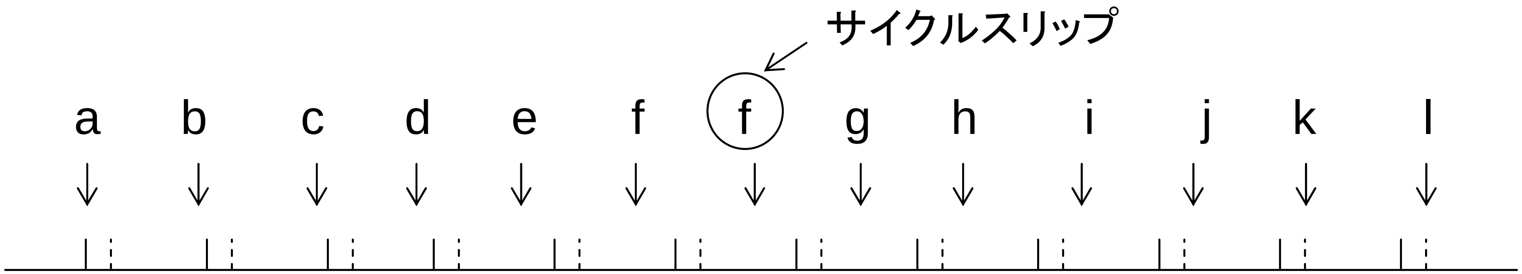
サイクルスリップの発生イメージ



(a) 想定するフェージング環境

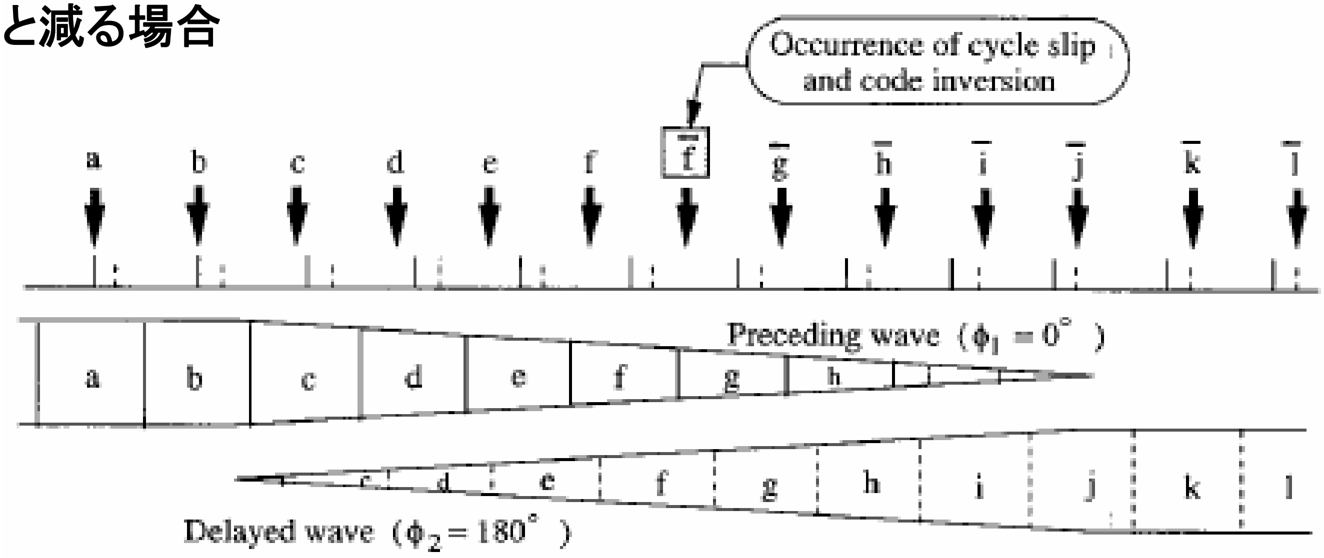


(b) 同位相 （ φ = 0° ）の場合

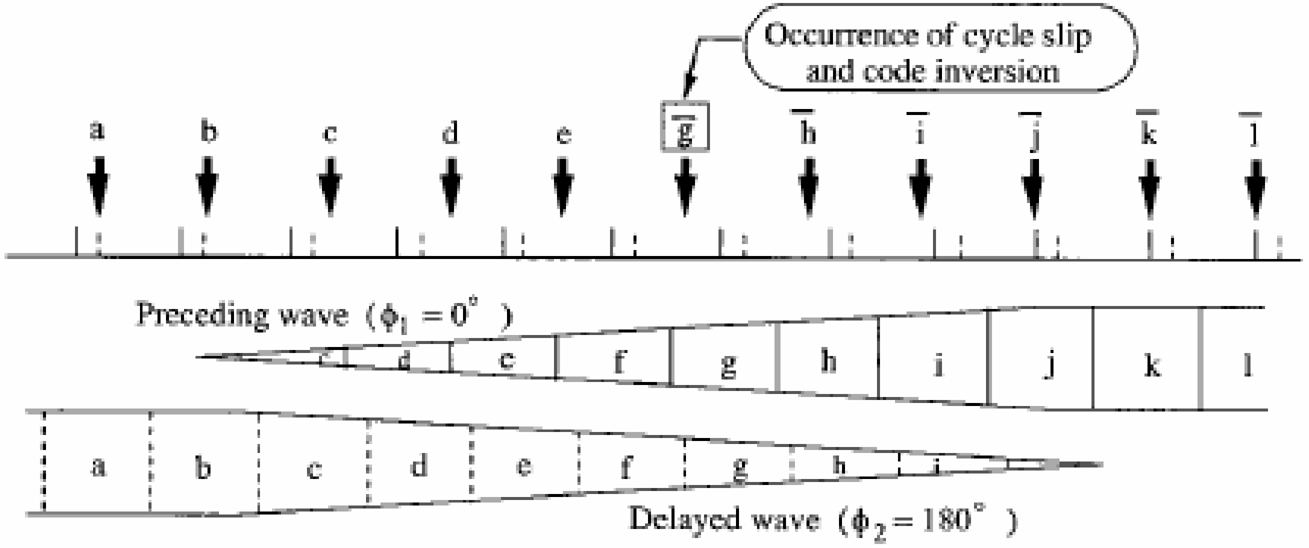


(c) 逆位相 （ φ = 180° ）の場合

増える場合と減る場合

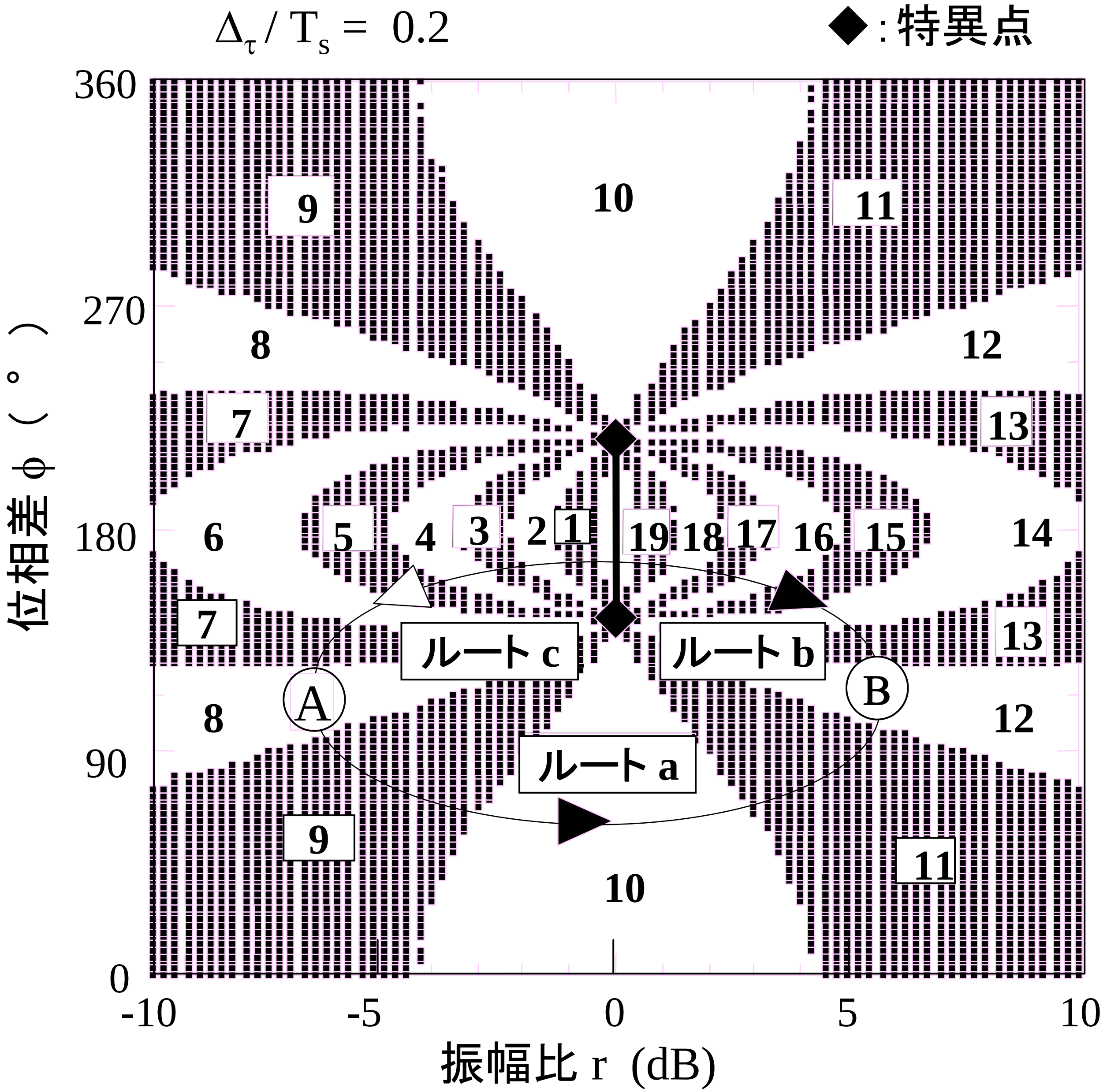


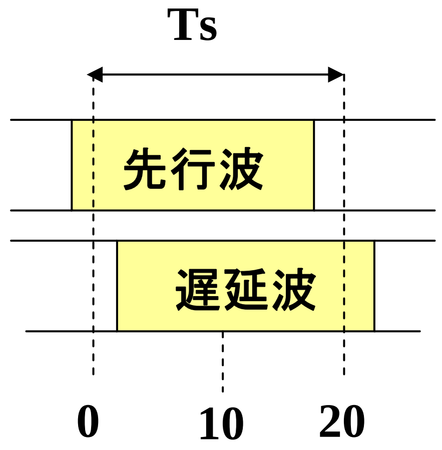
(b) Occurrence of a cycle slip due to double samplings in a symbol



(c) Occurrence of a cycle slip due to missing a sampling in a symbol

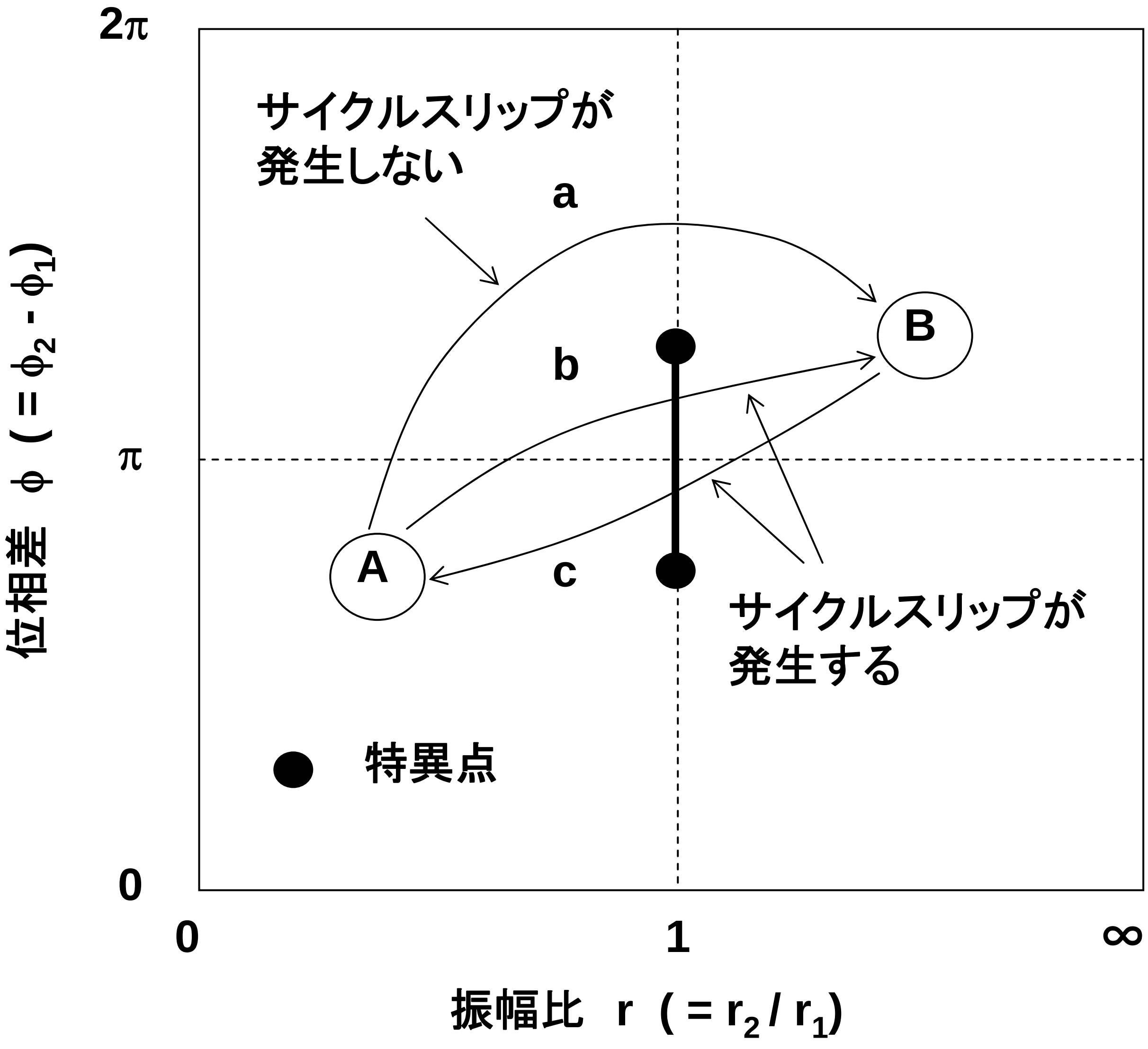
サンプリングが行われるタイミング位置



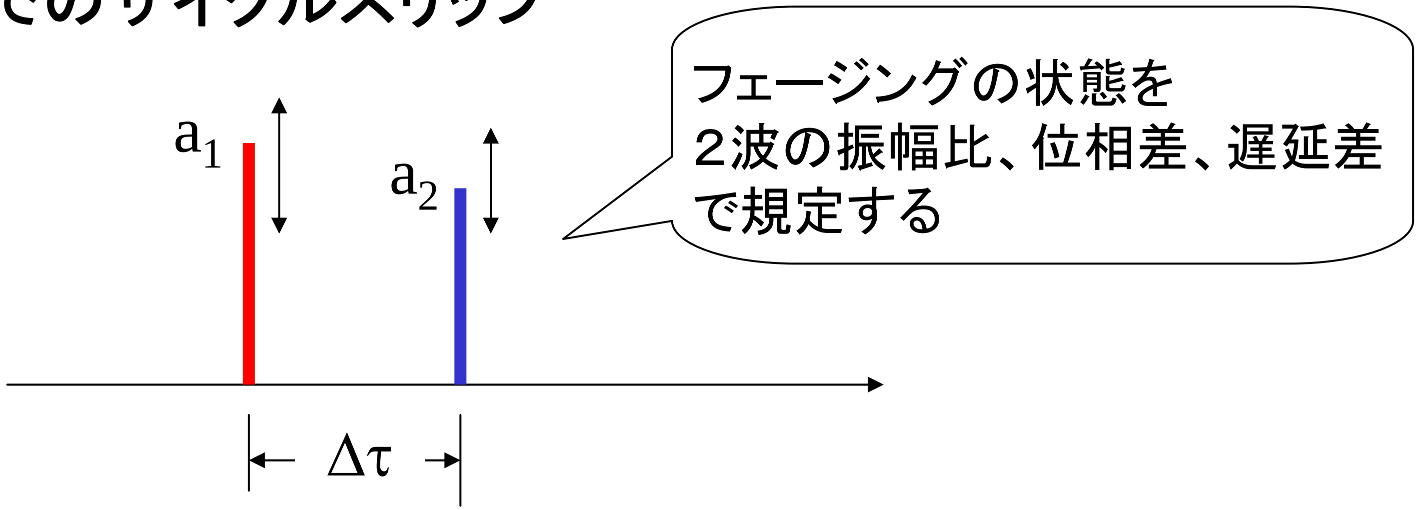


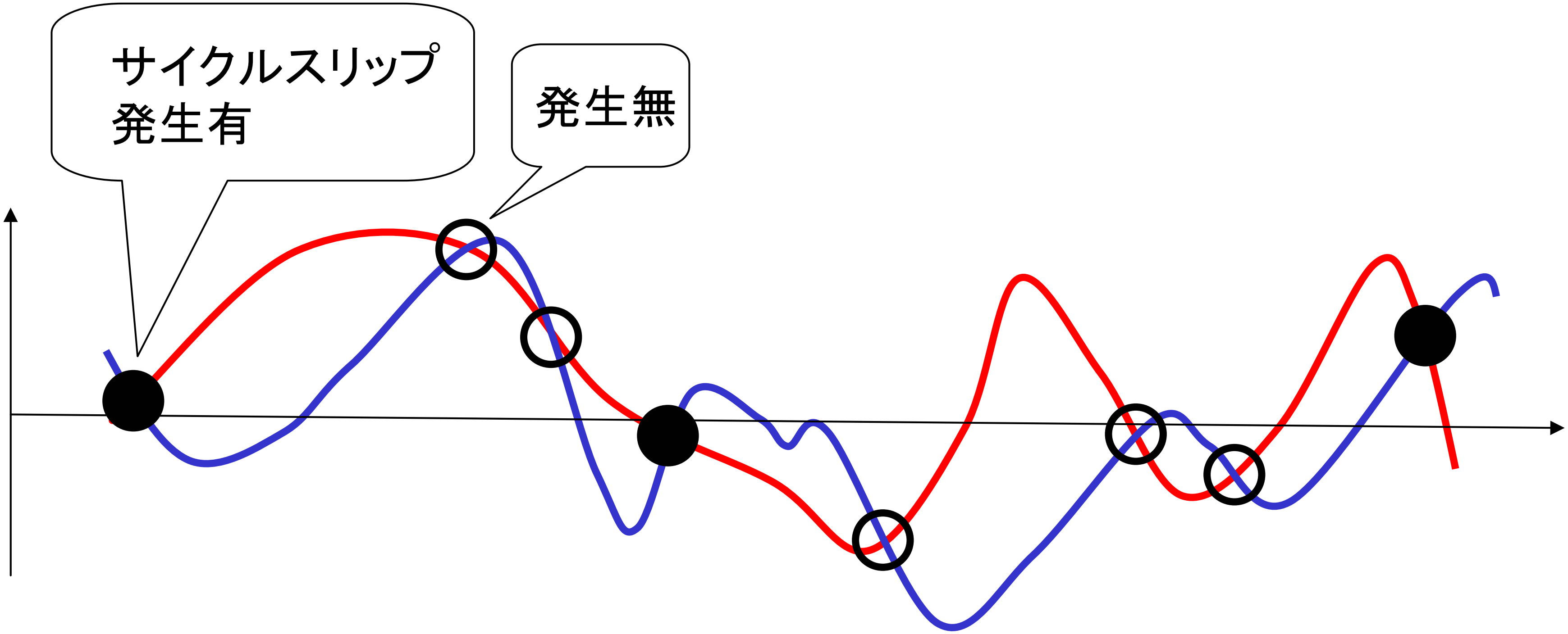
(1シンボル周期を
20分割し、
タイミング位置の
番号付け)

フェージングダイヤグラムとサイクルスリップ発生条件



２波モデルでのサイクルスリップ





レベル交差問題の解析には、Rice の理論が適用できる

$$N_{r=1} = 2\int_0^{\infty} x' p(x = x_0, x')dx'$$

２波モデルでの厳密な理論式

$$N_s = \sqrt{2}\pi f_D \frac{1}{T_s} \frac{\sqrt{P_1 P_2}}{P_1 + P_2}\Delta\tau \quad \left(\frac{\Delta\tau}{T_s} < 1\right)$$

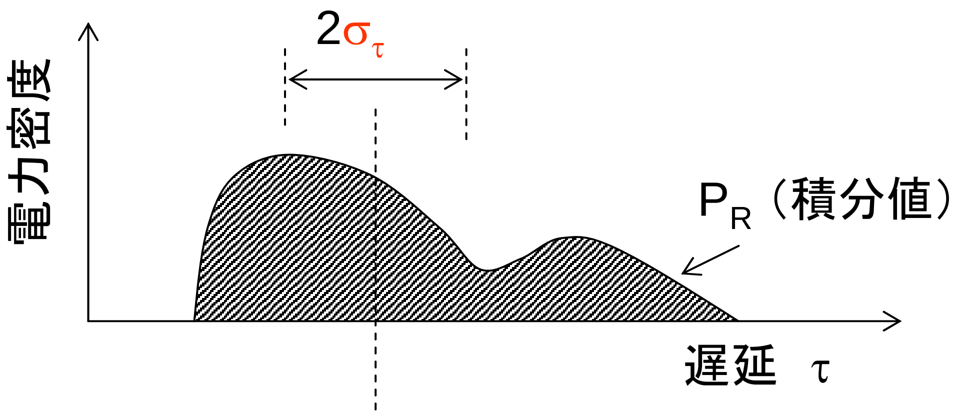
＝ 遅延スプレッド: σ_τ

?

一般的な環境における推定理論式

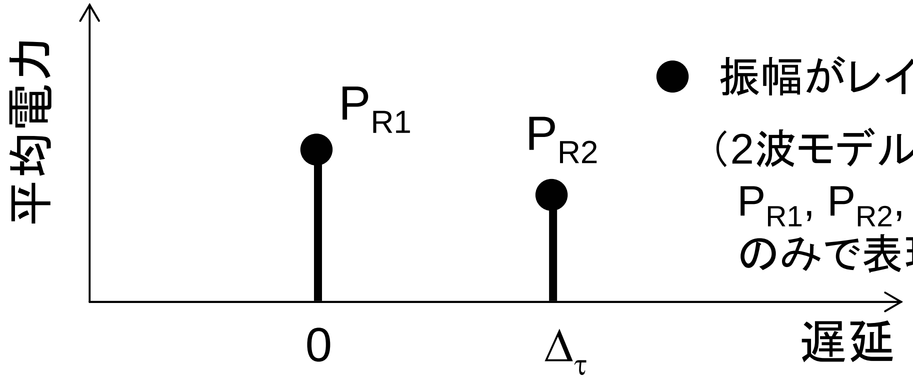
$$N_s = \sqrt{2}\pi f_D \frac{\sigma_\tau}{T_s}$$

レイリーフェージング環境を表す等価伝送路モデル



(a) 遅延プロファイルとキーパラメータ

キーパラメータの値を
保った等価変換

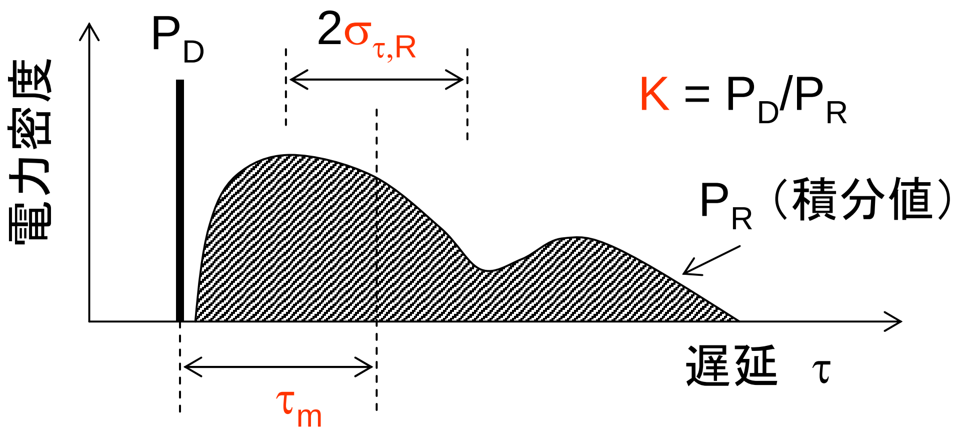


● 振幅がレイリー分布

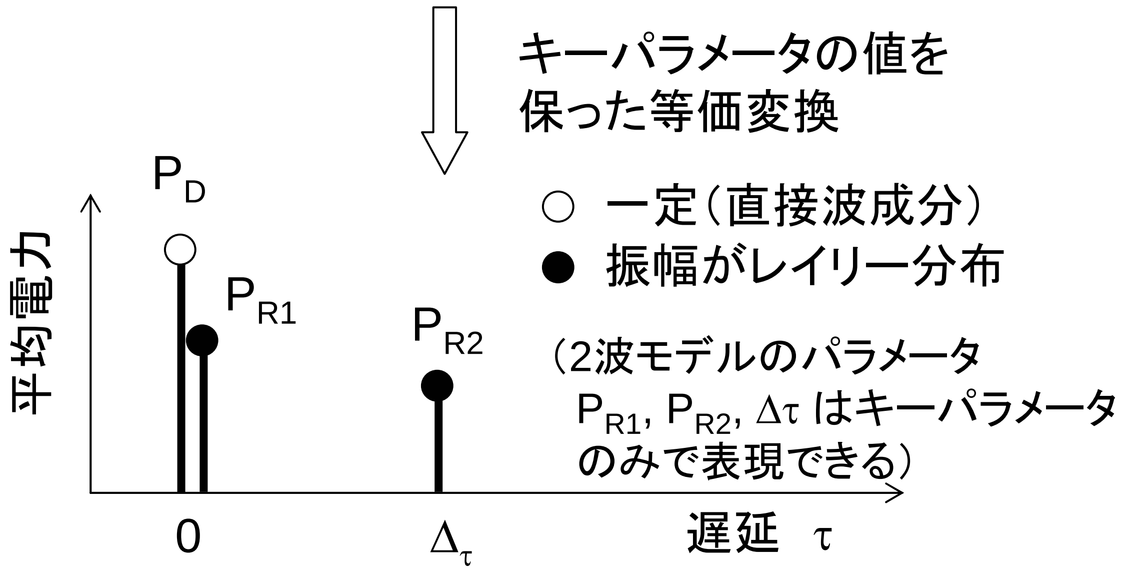
（2波モデルのパラメータ
P_{R1}, P_{R2}, $\Delta\tau$ はキーパラメータ
のみで表現できる）

(b) 等価伝送路モデル（統計的環境表現）

仲上・ライスフェージング環境を表す等価伝送路モデル



(a) 遅延プロファイルとキーパラメータ



(b) 等価伝送路モデル（統計的環境表現）

仲上･ライスフェージング環境下ではサイクルスリップの発生頻度は、4つのキーパラメータで決定される（計算機シミュレーションで確認）

1) ライスファクタ: K
2) マルチパス波の平均遅延: τ_m
3) マルチパス波の遅延スプレッド: $\sigma_{\tau,R}$
4) 最大ドップラ周波数: f_D

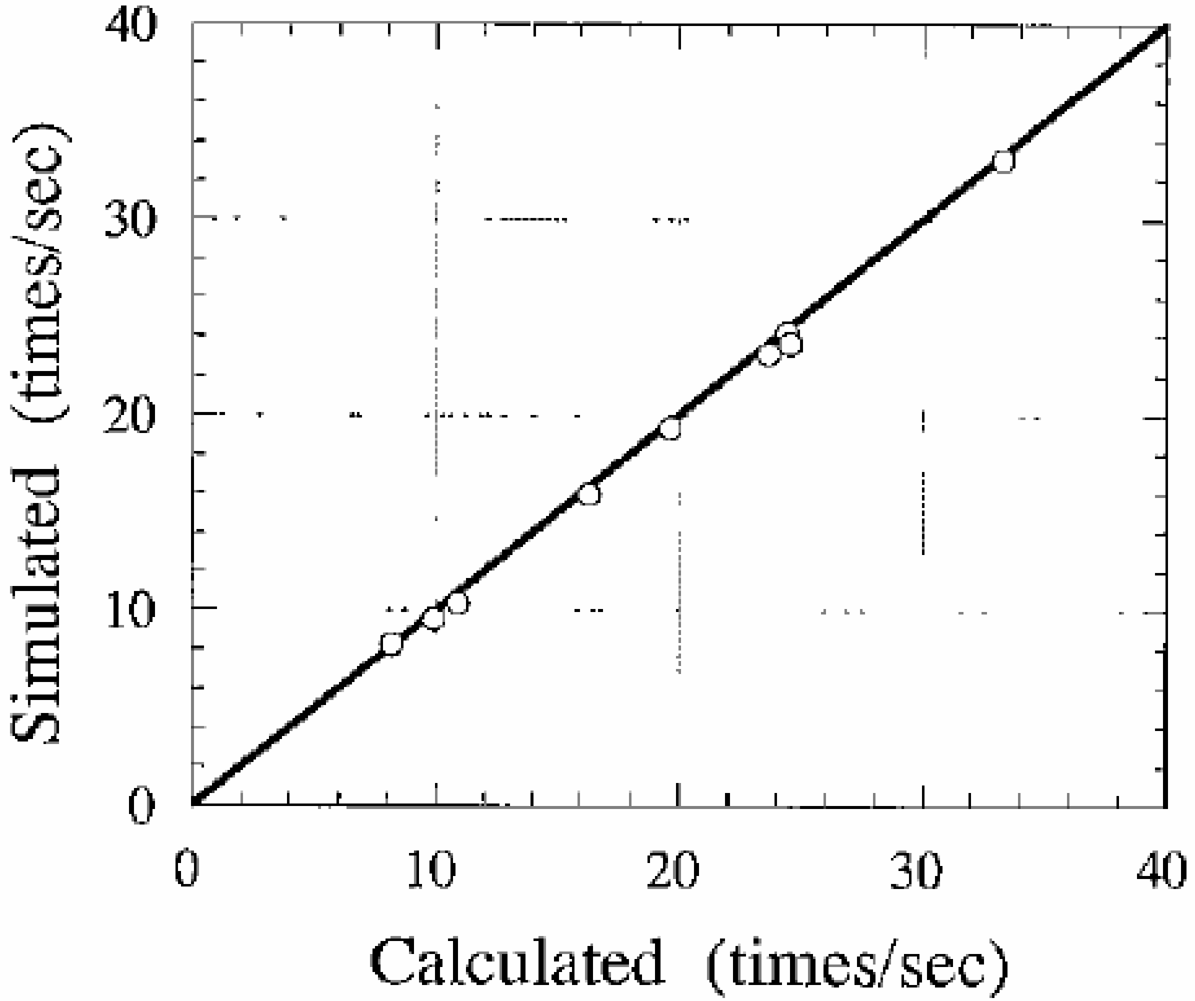
もし、この仮説が正しければこのキーパラメータの値を満たす2波モデルを作ることができ、その場合には、理論式が求まり、それを一般化すると以下の式に

$$N_s = \sqrt{2}\pi f_D \sigma_{\tau,R} \exp\left(-\frac{\sigma_{\tau,R}^2 + \tau_m^2}{\sigma_{\tau,R}^2} K\right) {}_1F_1\left[1.5, 1 : K\left(\frac{\tau_m}{\sigma_{\tau,R}}\right)^2\right] \frac{1}{T_s}$$

電波伝搬の性質

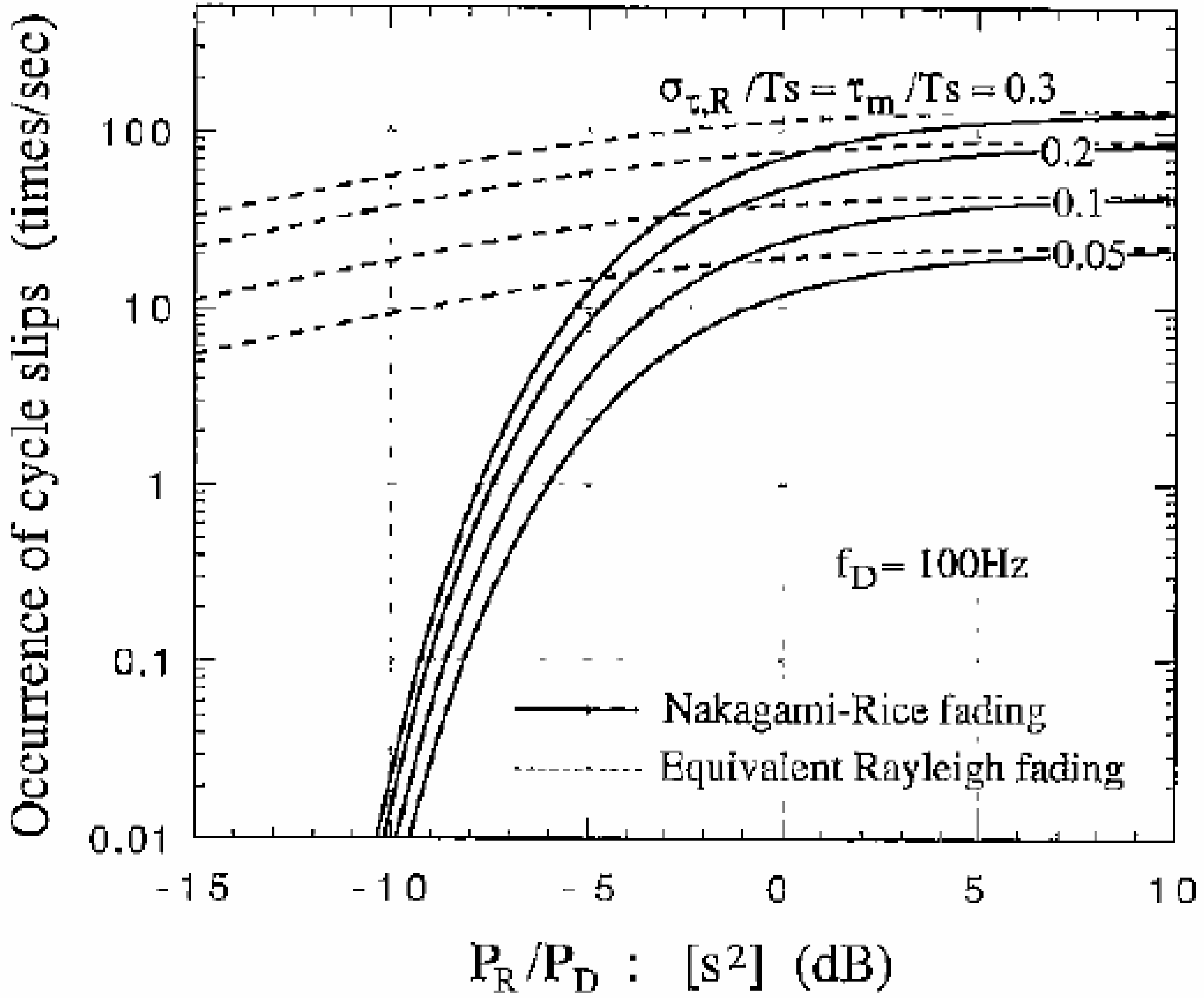
通信システムの性質

理論計算値とシミュレーション値の比較



仮説の正しさが実証された → 精度のよい計算式が導かれた

サイクルスリップの発生頻度（理論計算値）



教訓

簡単なモデル（機能を具備する必要最小限のモデル）で
理論式を導いてみる

その理論式の中に見え隠れする一般性に気づく

一般化は大胆に、（砂上でもよいから、楼閣を建ててみよう）