

ワイヤレス情報伝送の物理限界を探る ～電波伝搬と通信システムとの攻防～

唐沢 好男

自己紹介; 信学会通ソマガジン B-plus

https://www.jstage.jst.go.jp/article/bplus/16/3/16_238/_pdf

講演の概要

電波伝搬と通信方式の接点部分に焦点を当て、情報伝送の物理限界(未来の通信においてどのように通信方式を工夫しても伝送を不可能にしてしまう伝搬条件)を探り、その上で、それを超えるにはどうしたら良いか、について考える。

移動通信のマルチパス伝搬には4つの劣化要因(熱雑音と伝搬遅延・ドップラー・到来角度のばらつき現象)があり、それぞれには、対策技術がある。しかし、遅延とドップラーのばらつきが同時に現れる二重選択性フェージングでは、対策(信号設計)が著しく難しくなり、近い将来におけるワイヤレス情報伝送の物理限界が危惧される。それでも、そこで止まることはないであろう未来像に言及する。

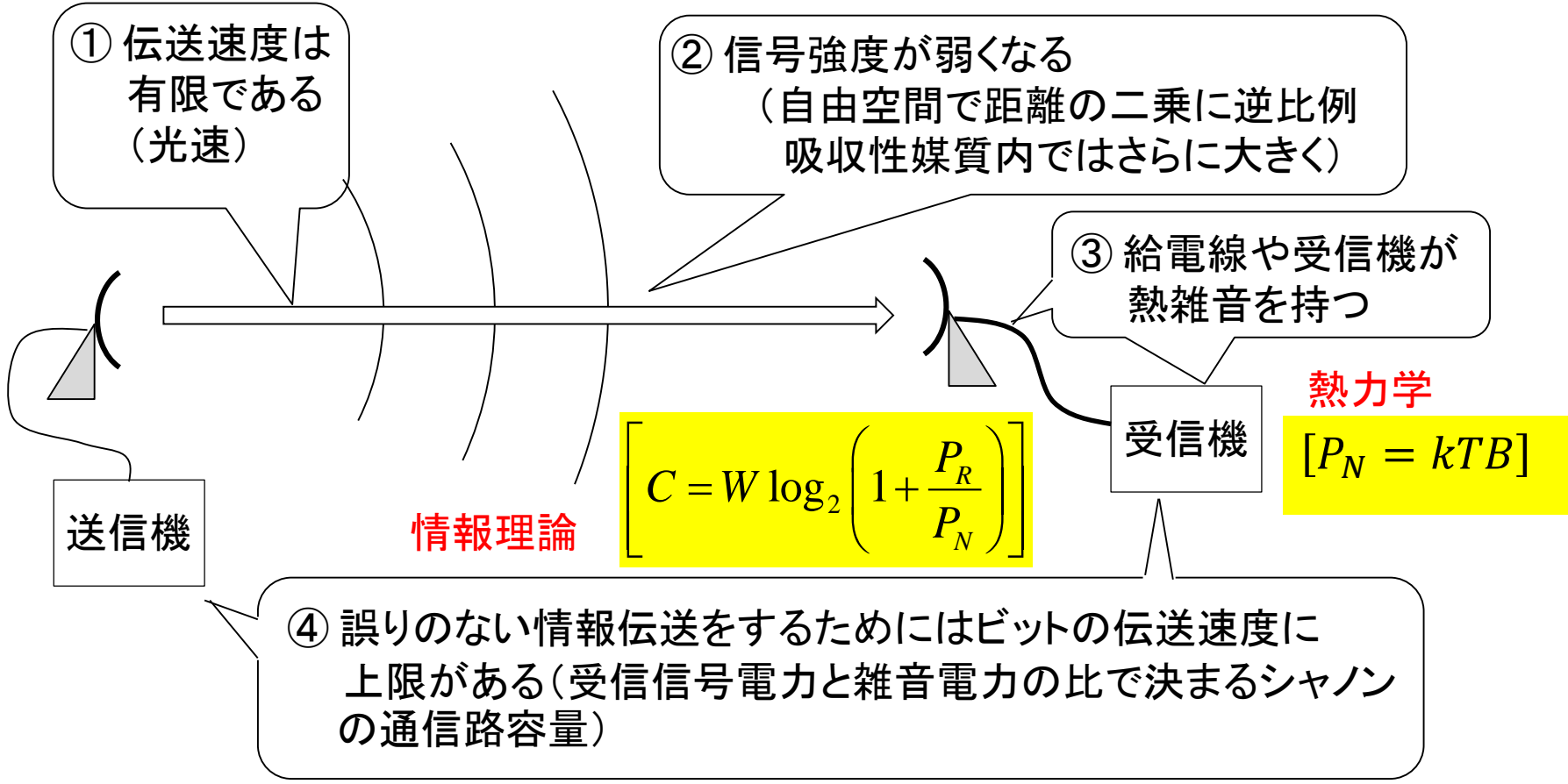
講演の内容

1. 真に超えられない無線通信の物理限界
2. 無線通信の電波伝搬: その四つの側面
 - (1) 信号レベルの低下(熱雑音問題)
 - (2) 信号強度の空間不均一性(到来角度広がりによる)
 - (3) 高速フェージング(ドップラー周波数のばらつきによる位相変動歪み)
 - (4) 周波数選択性フェージング(遅延のばらつきによる信号波形の歪み)
3. 二重選択性フェージングが作る情報伝送の壁
(フェージングに強いOFDMも万能ではない)
4. その限界を破るには
(時代と共にその限界に徐々に近づいている。でも、希望はある)

1. 無線伝送の真に越えられない壁

電磁気学
相対性理論 $[v = c]$

電磁気学 $[P_R \propto \frac{1}{r^2}]$

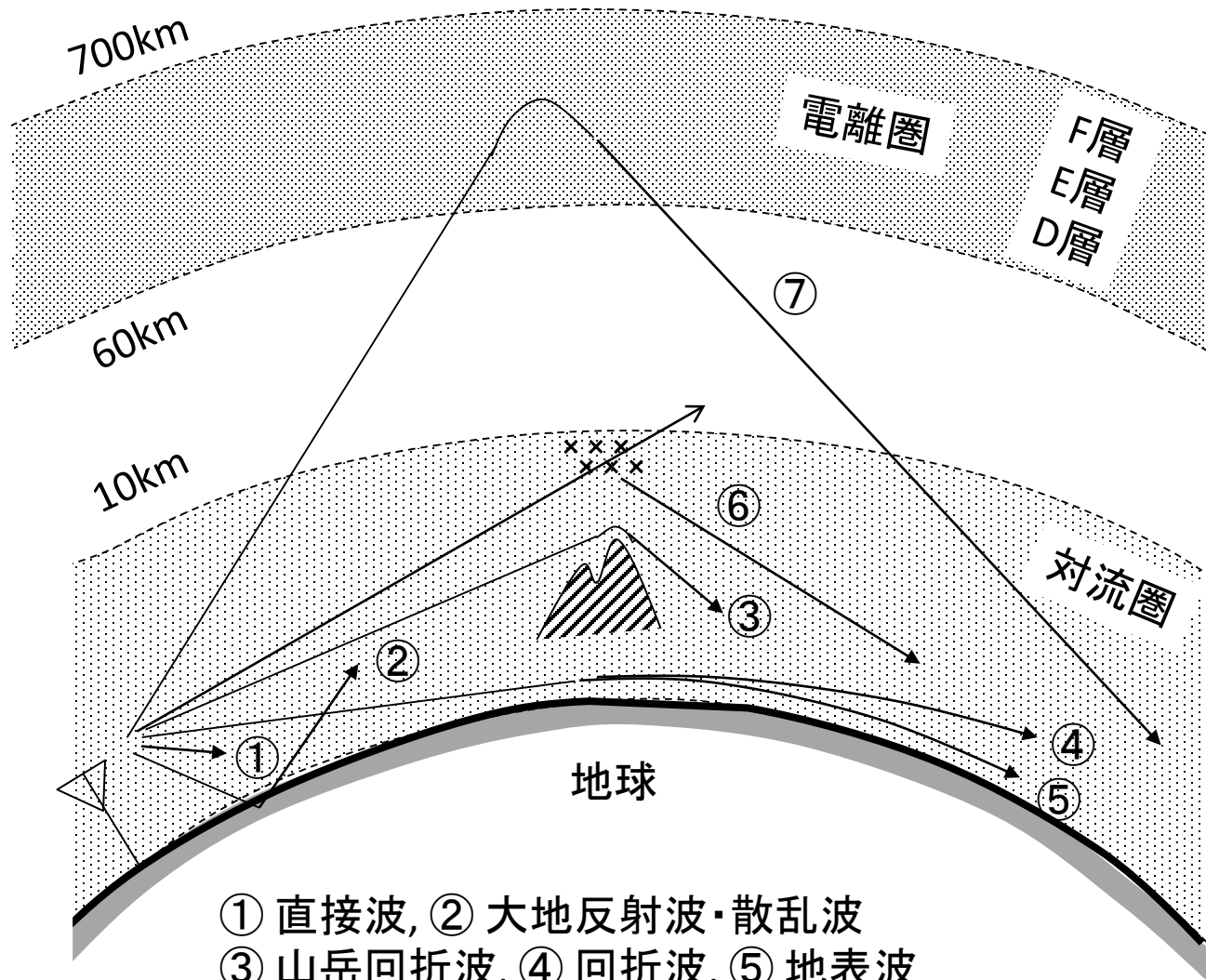


②によって弱くなる信号電力は、③による雑音の働きを受け、④のSN比で定まる限界を超えることができない。また、伝搬路が複数になると、①により、信号の到着時間がばらつき、波形ひずみ起きる。無線通信では、この壁を知り、これらを受け入れた上でのシステム設計がなされる。

2. 無線通信の電波伝搬

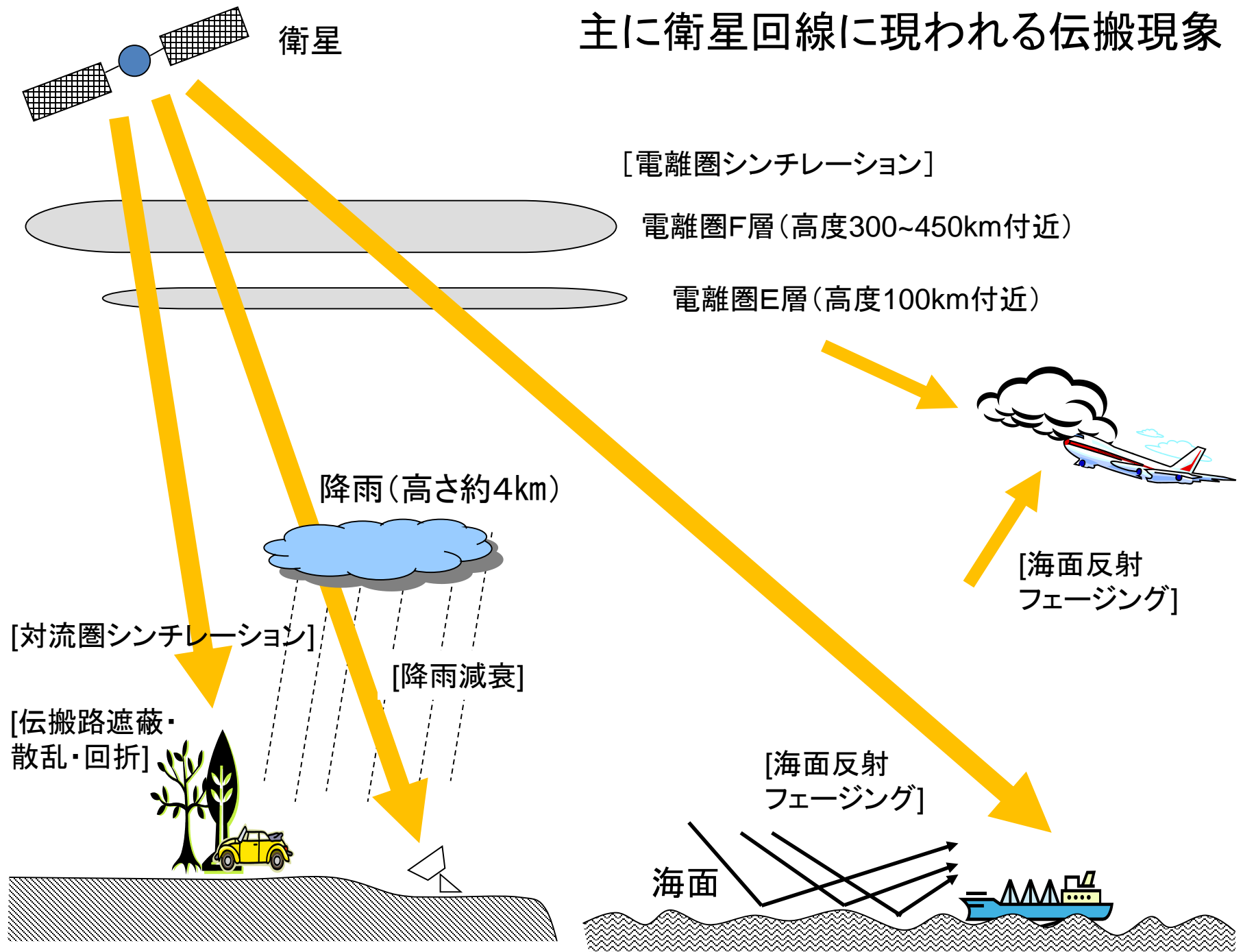
無線通信発展の歴史は電波伝搬との戦いの歴史

地上系無線回線に現われる伝搬現象



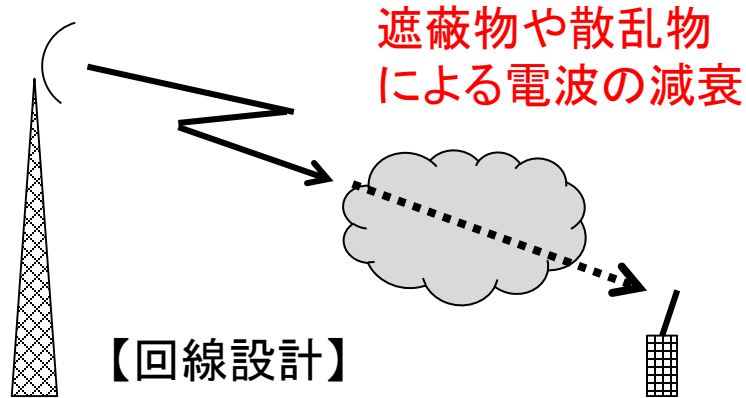
- ① 直接波, ② 大地反射波・散乱波
- ③ 山岳回折波, ④ 回折波, ⑤ 地表波
- ⑥ 対流圏散乱波, ⑦ 電離層(F, E, D層)反射波

主に衛星回線に現われる伝搬現象

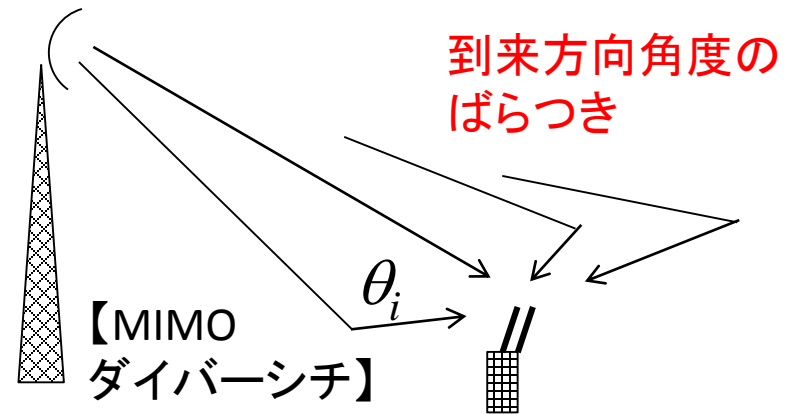


移動伝搬における四つの側面

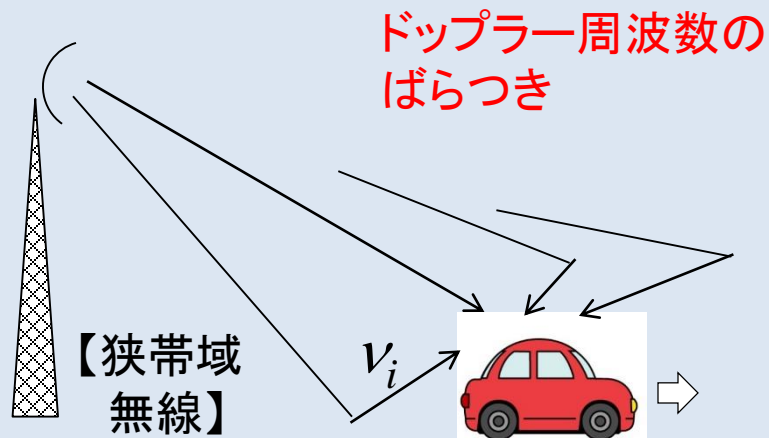
① 電波が弱くなる(雑音問題)



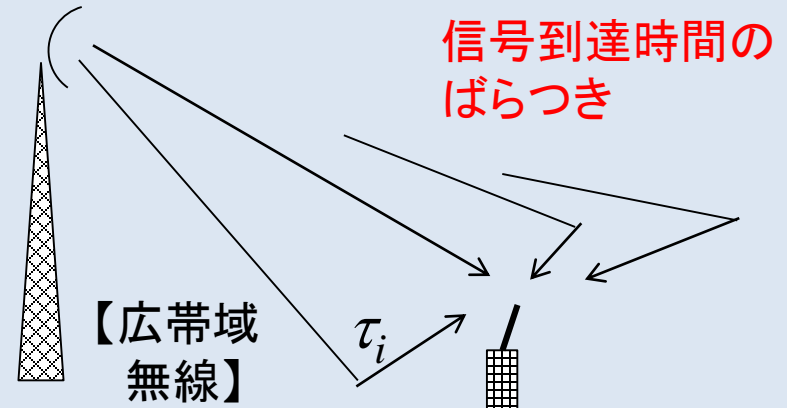
② 空間に信号の強弱ができる (到来角問題)



③ 信号が変動する(ドップラー問題)

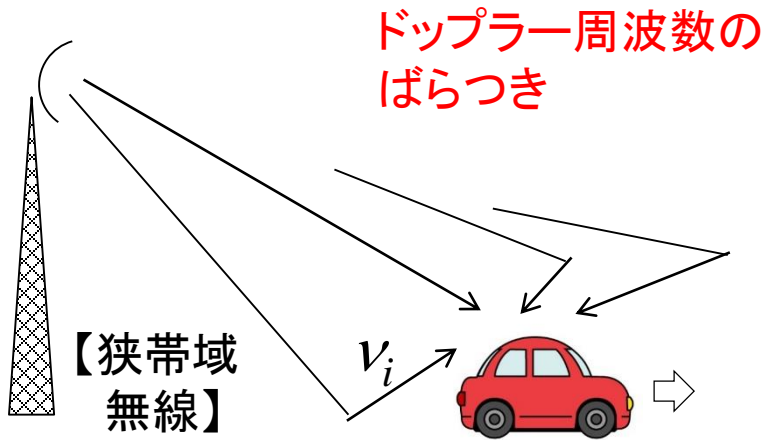


④ 波形が歪む(遅延問題)



高速フェージング (時間選択性フェージング)

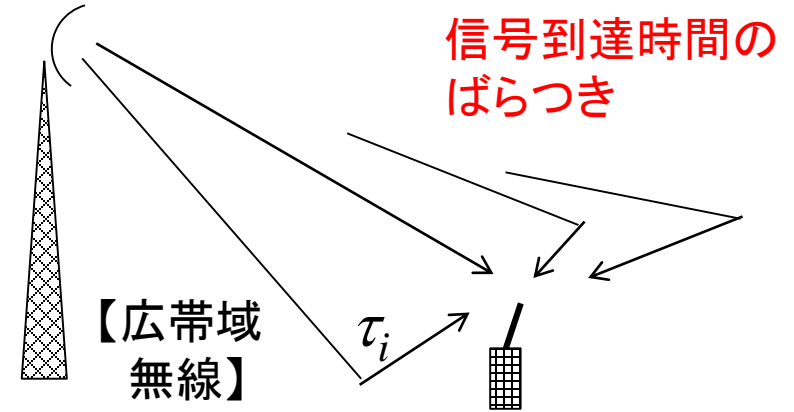
③ 信号が変動する(ドップラー問題)



v_i (ニュー): ドップラー周波数(単位:Hz)

周波数選択性フェージング

④ 波形が歪む(遅延問題)



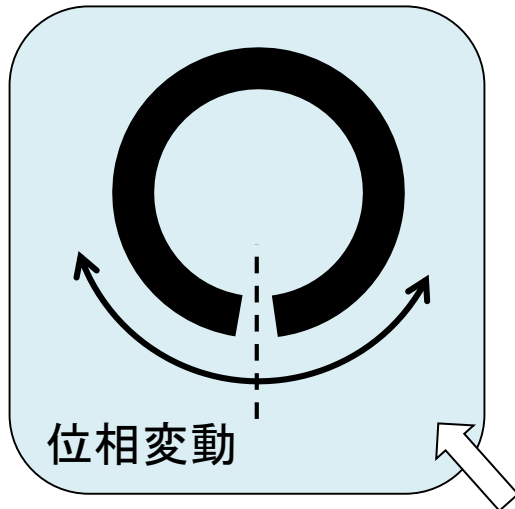
τ_i : 遅延時間(単位:sec)

この二つの原因によって発生する伝送誤りは、**波形の歪み**をもたらすものであり送信電力を上げて改善できない

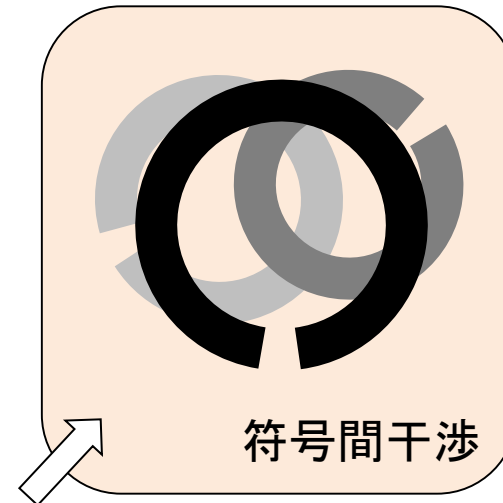
ゆえに、**軽減困難な誤り** (irreducible error) と呼ばれる

デジタル信号伝送： 誤り発生メカニズム

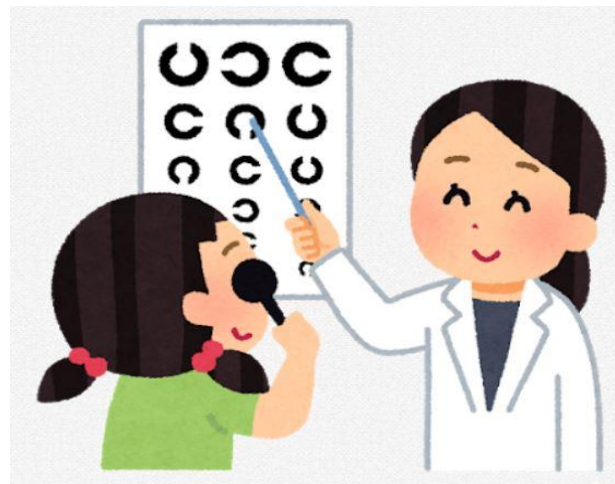
- ③ 1シンボル時間内に信号が時間変動し波形が歪む (ドップラー問題)



- ④ 遅延のばらつきにより前後のシンボル情報が重なり波形が歪む (遅延問題)



- ・高速フェージング
- ・時間選択性フェージング (特性が時間変動)
- ・狭帯域信号伝送に劣化が現れる



- ・周波数選択性フェージング (周波数領域で特性が変動)
- ・広帯域信号伝送に劣化が現れる

ドップラー周波数広がりによる高速フェージング (時間選択性フェージング)

ドップラースペクトル

到来方向 θ_i の素波に対して

$$v_i = f_D \cos \theta_i$$

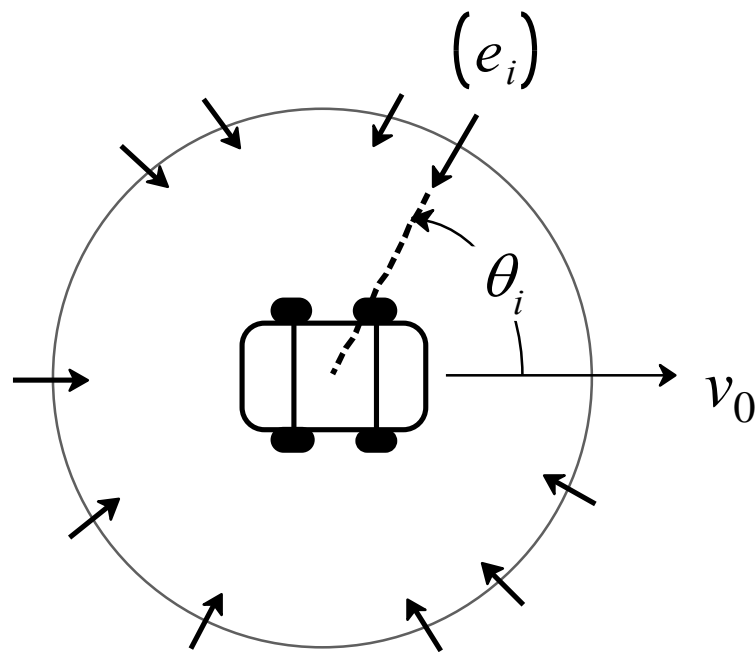
$$f_D = v_0 / \lambda$$

(最大ドップラー周波数)

のドップラーシフトを受ける

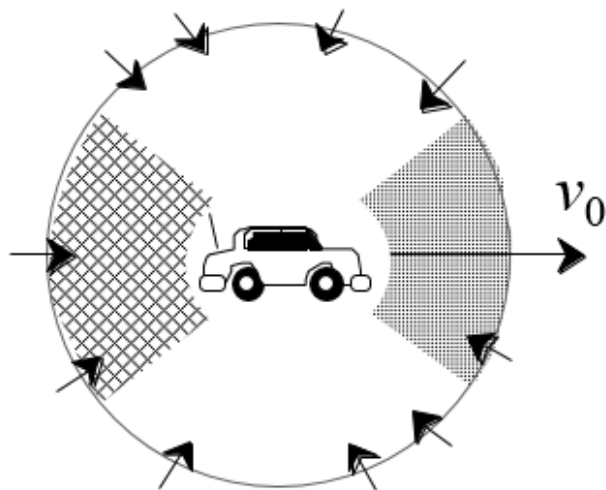
f_D の値

$f \backslash v_0$	4 km/h	80km/h
2GHz	7.4Hz	150Hz
60GHz	220Hz	4.4 kHz

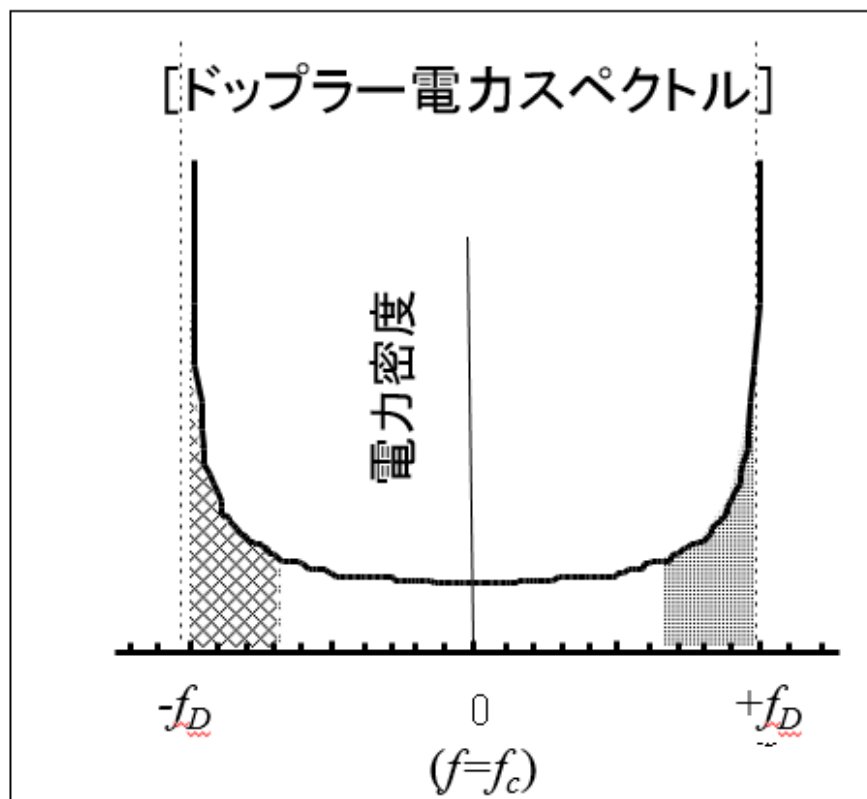


電波の到来角度とドップラー電カスペクトル

[水平面上の到来角度分布]



[ドップラー電カスペクトル]

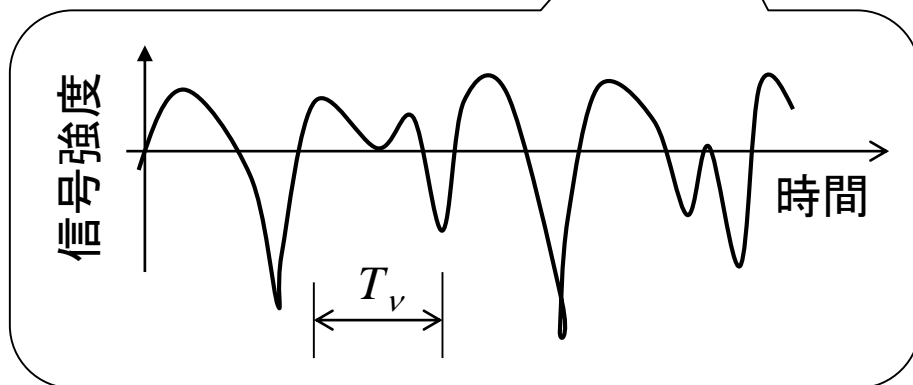
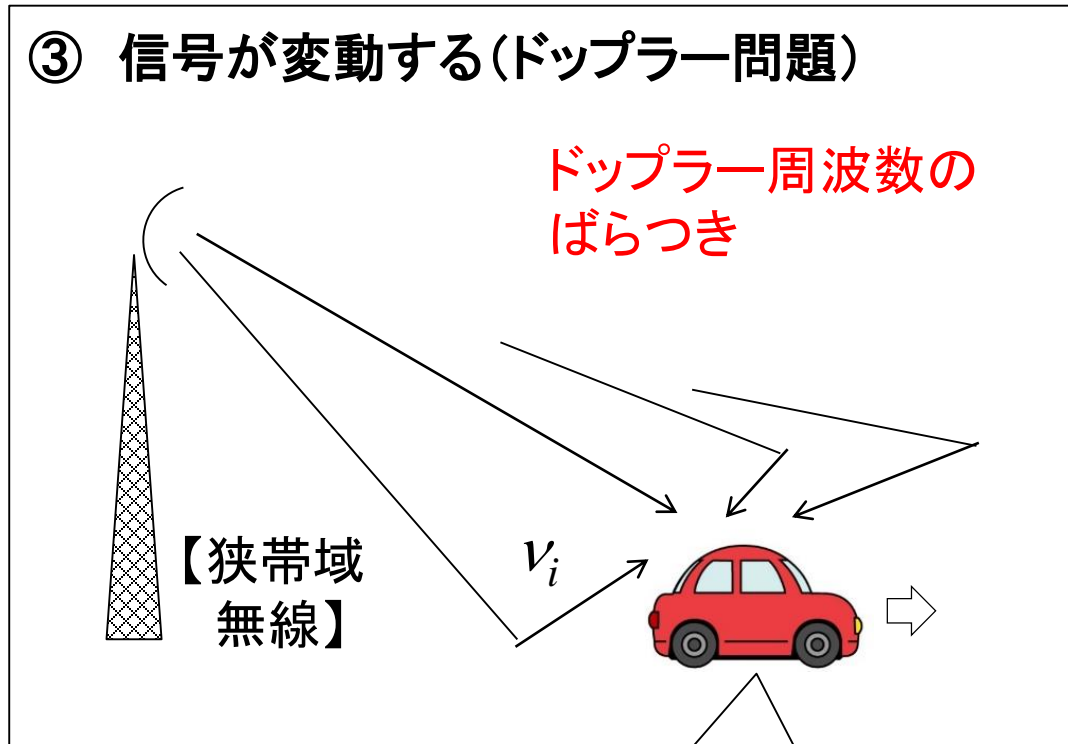


キーパラメータ

- ・ 最大ドップラー周波数 $f_D = v_0/\lambda$ 【一般的に使われる指標】
- ・ ドップラーズプレッド σ_v (ドップラー広がりの標準偏差)
【スペクトルが非対称な場合は、BER特性評価などにこちらが使われる】

高速フェージング（時間選択性フェージング）

③ 信号が変動する(ドップラー問題)



フェージングの時間変動の平均周期 T_v が短くなって、伝送信号のシンボル周期 T_s に近づいてくると、誤りが起きやすくなる。

v_i (ニュー)
ドップラー周波数 (単位: Hz)

σ_v : ドップラー周波数のばらつきの標準偏差 (Hz)

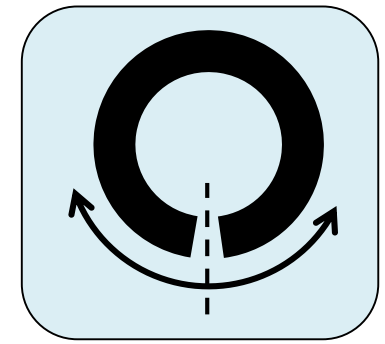
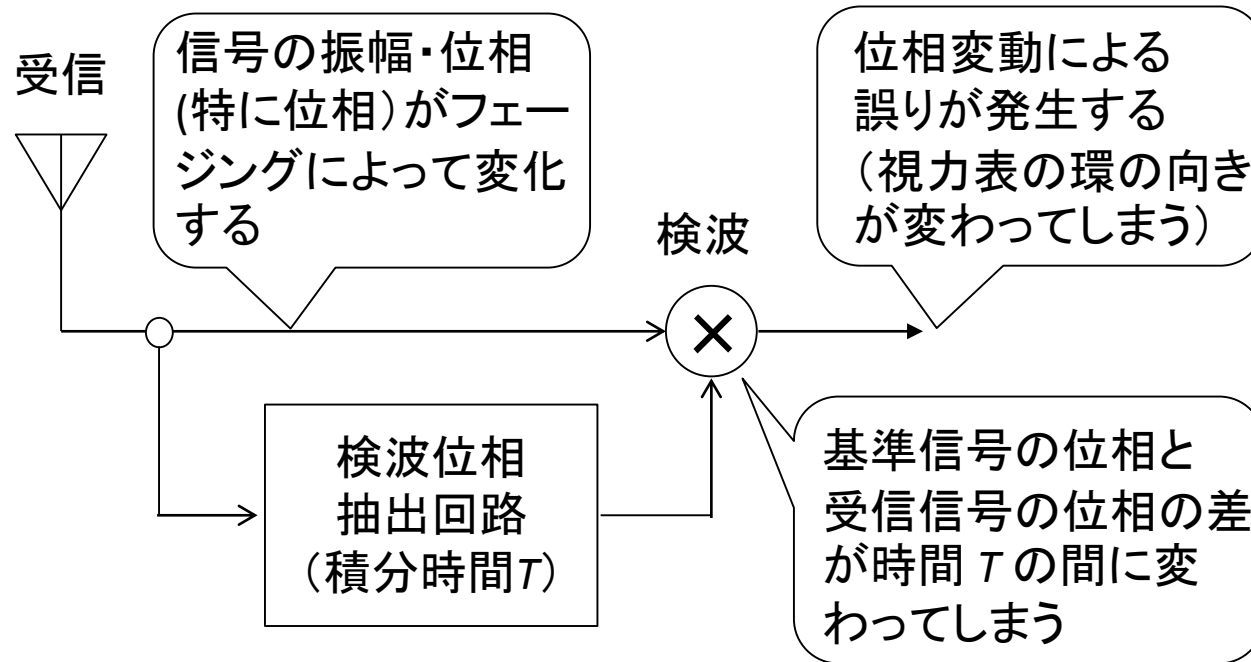
f_D : 最大ドップラー周波数
= 移動速度 / 電波の波長

良好な通信のための条件

$$T_v \gg T_s$$

$$\rightarrow f_D T_s \ll 1, \sigma_v T_s \ll 1$$

高速フェージングによる誤り



積分時間 T 内で変化する位相変化量 $\Delta\phi$ の大雑把な算定: $\Delta\phi = 2\pi f_D T$

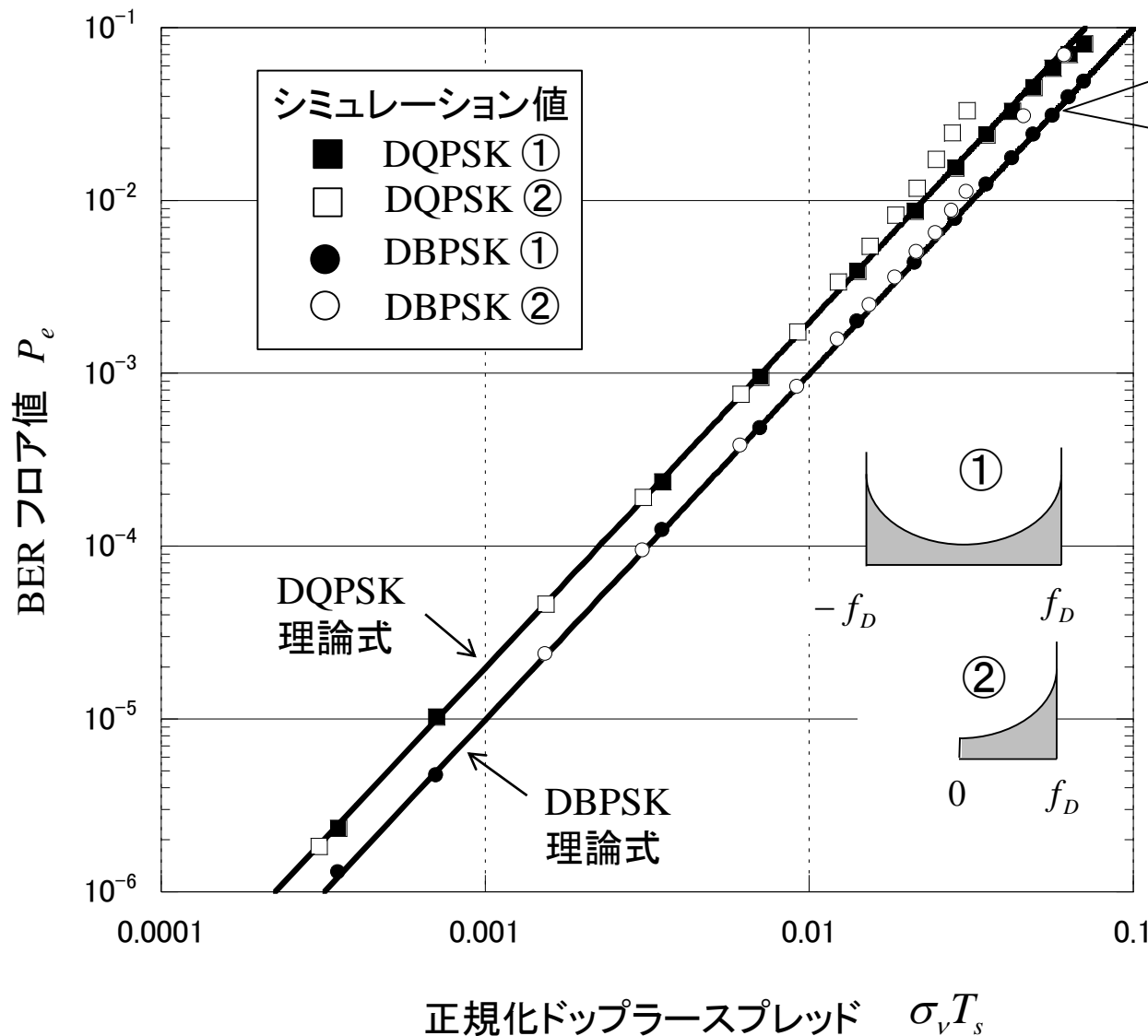
誤りが発生しない条件: $\Delta\phi \ll 2\pi \rightarrow f_D T \ll 1$ あるいは $\sigma_v T \ll 1$

ビット誤りの発生率は $(\sigma_f T)^2$ に比例する

遅延検波の場合は $T \rightarrow T_s$ (シンボル周期)

時間選択性フェージング(=高速フェージング)下でのBERフロア特性

(ドップラー広がりのみの場合)



BERは
 $(\sigma_v T_s)^2$ に比例

高速フェージング誤りの
伝搬キーパラメータは
ドップラーズプレッド
(ドップラー周波数の
ばらつきの標準偏差)
 σ_v [単位: Hz]

高速フェージングのまとめ

高速フェージングの伝搬キーパラメータは、ドップラーの標準偏差 σ_v

ビット誤り率(BER)のキーパラメータは $\sigma_v T_s$

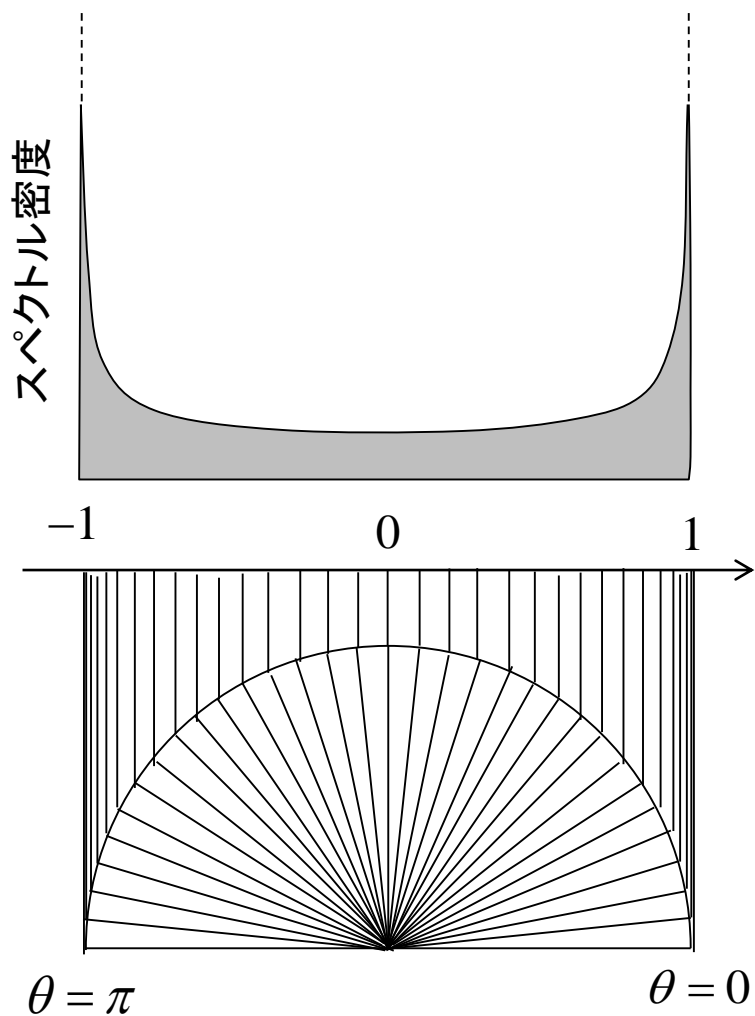
レイリーフェージング下のBERは $BER \propto (\sigma_v T_s)^2$
(比例係数は変調方式に依存)

高速フェージングはシンボル周期 T_s が大きいとき、すなわち、
狭帯域伝送で問題になる

近年、伝送は広帯域化の方向($\rightarrow T_s \ll T_v$)に進み、
高速フェージングの問題は、時代と共に、消えつつあった。
(広帯域信号にとっては、フェージングの時間変動は低速に見える)

しかし、その後、広帯域化に伴うマルチパス遅延対策として **OFDM** が
主流となり、この**高速フェージング問題**が再び顕在化してきた

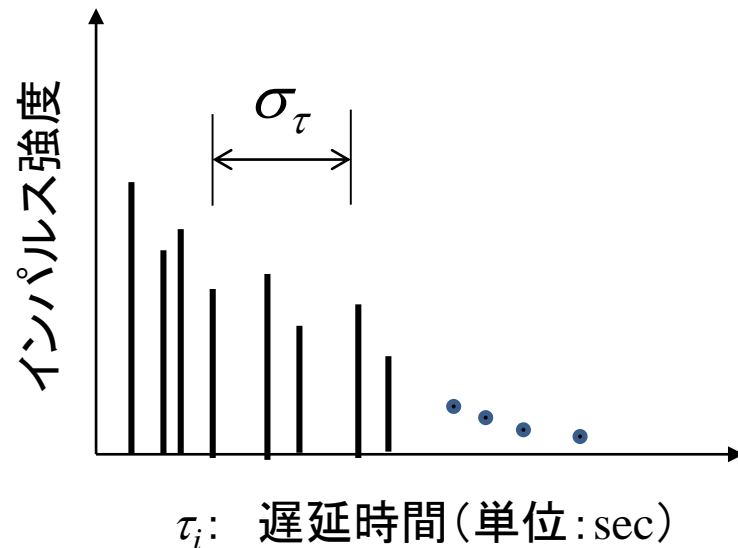
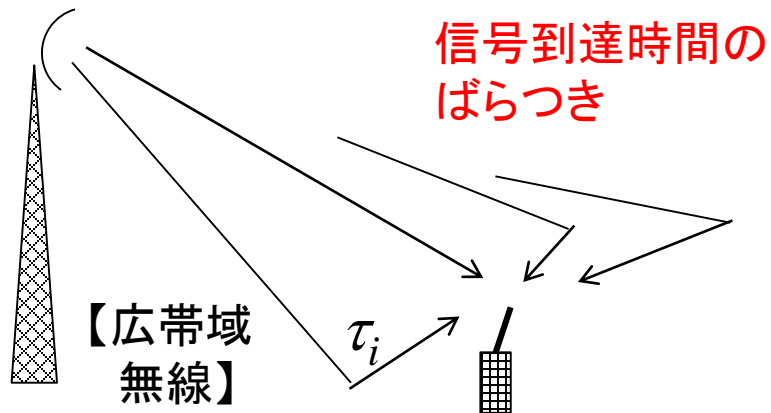
ドップラースペクトルの直感的イメージ



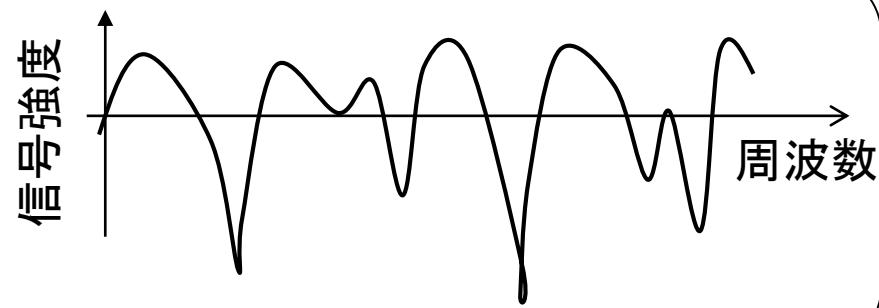
(扇風機の軸に固定した団扇
高速で回転させると・・・)

?

④ 波形が歪む(遅延問題)



↑
フーリエ変換／逆変換
↓



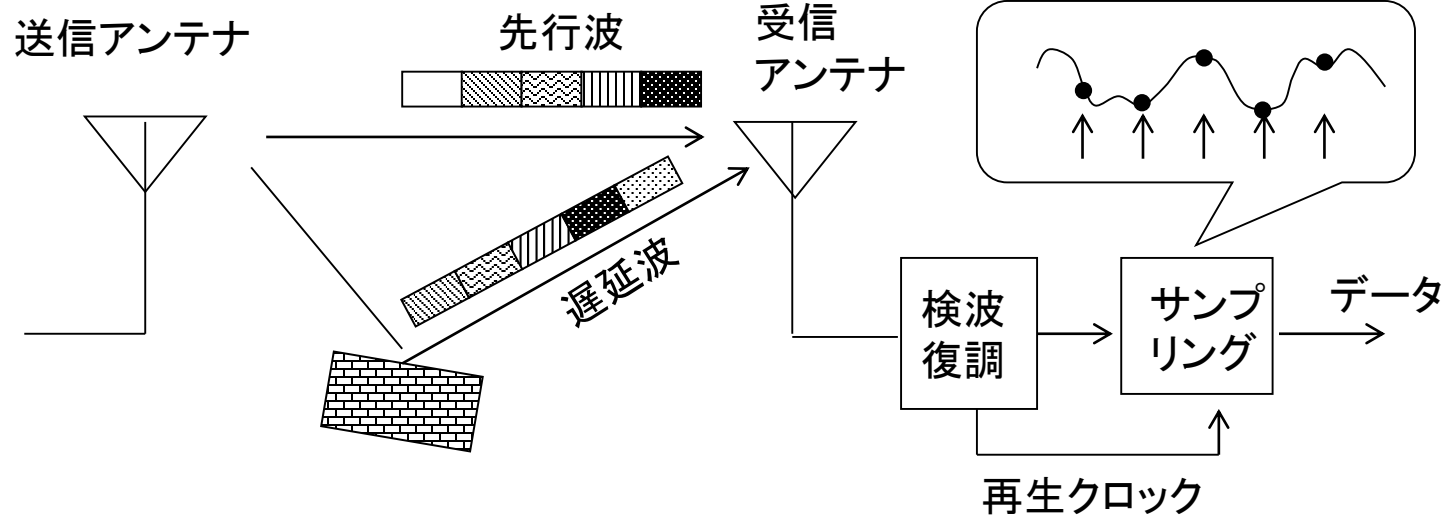
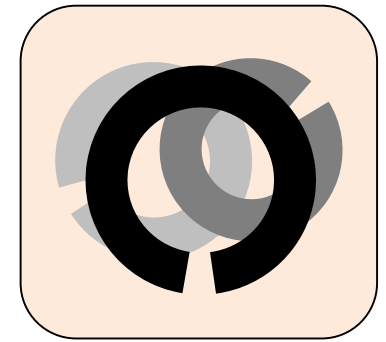
インパルス応答の電力平均
→ 遅延プロファイル

遅延プロファイルの広がり
→ 遅延スプレッド σ_τ

(伝送誤り推定のキーパラメータ)

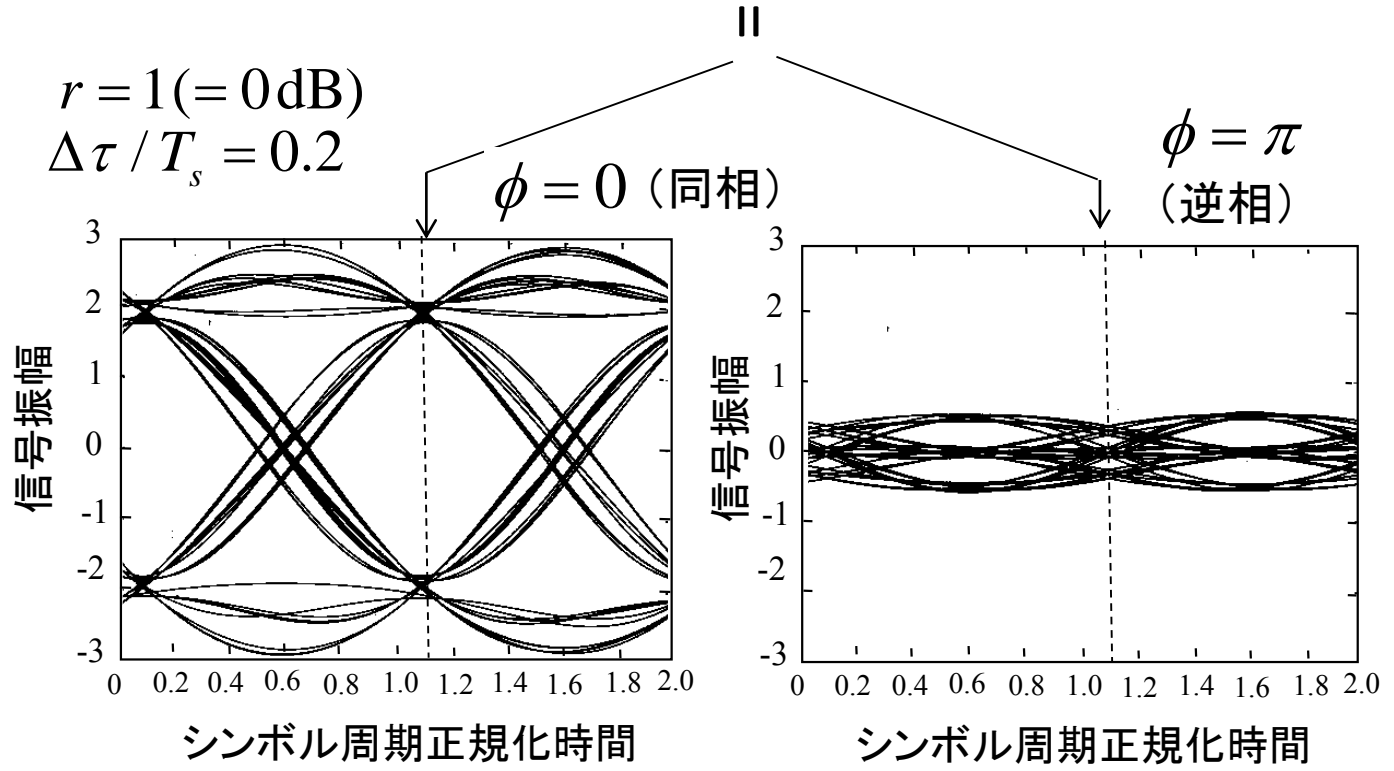
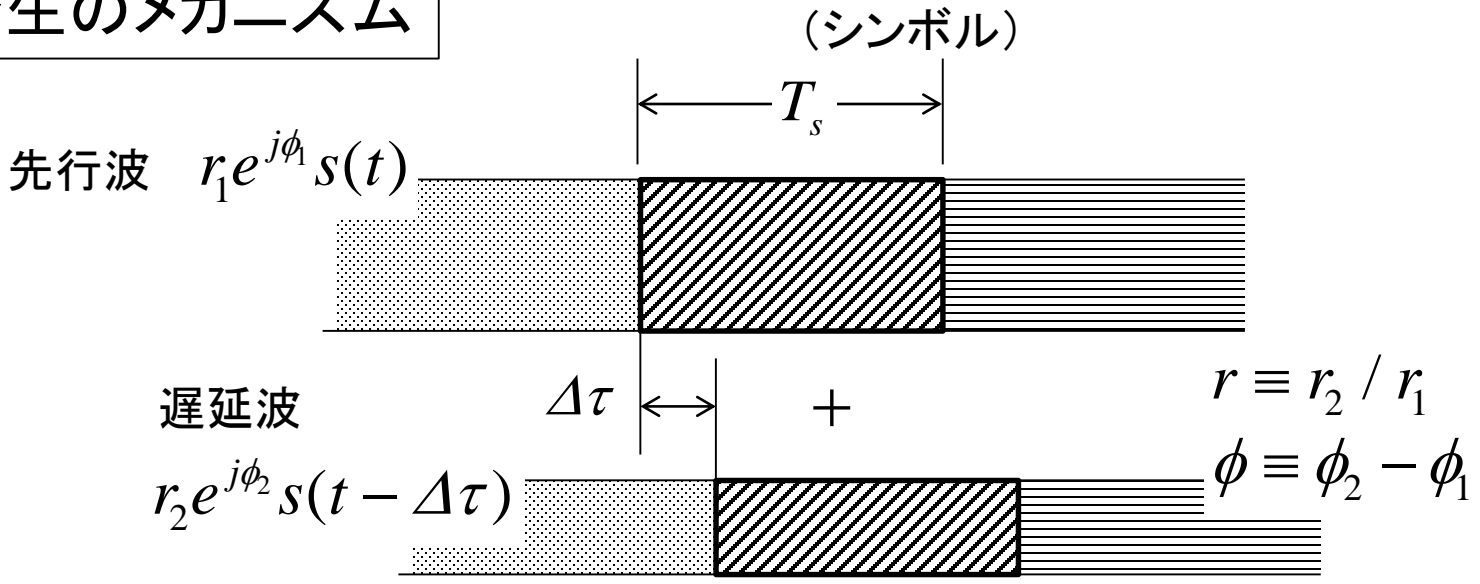
(周波数選択性フェージング)

周波数選択性フェージングによる 符号間干渉誤りの発生

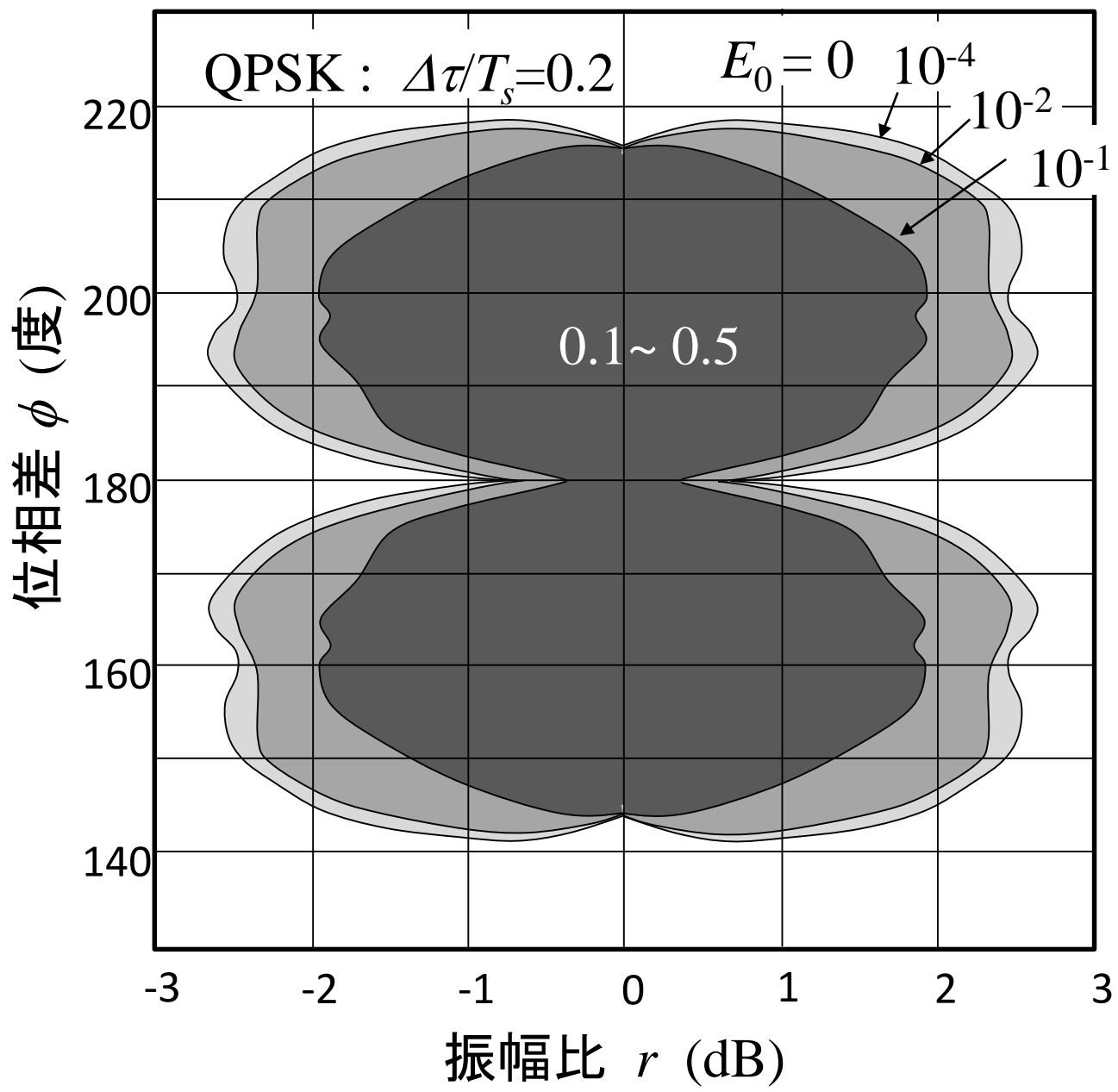


- ・ 先の符号と後の符号が重なって波形が歪む(符号間干渉誤り)
- ・ サンプリング点が定めにくくなったり、サンプリングのタイミングが変な動きをする(サイクルスリップ)

誤り発生メカニズム



ビット誤りはどこで発生するか？2波モデルの場合

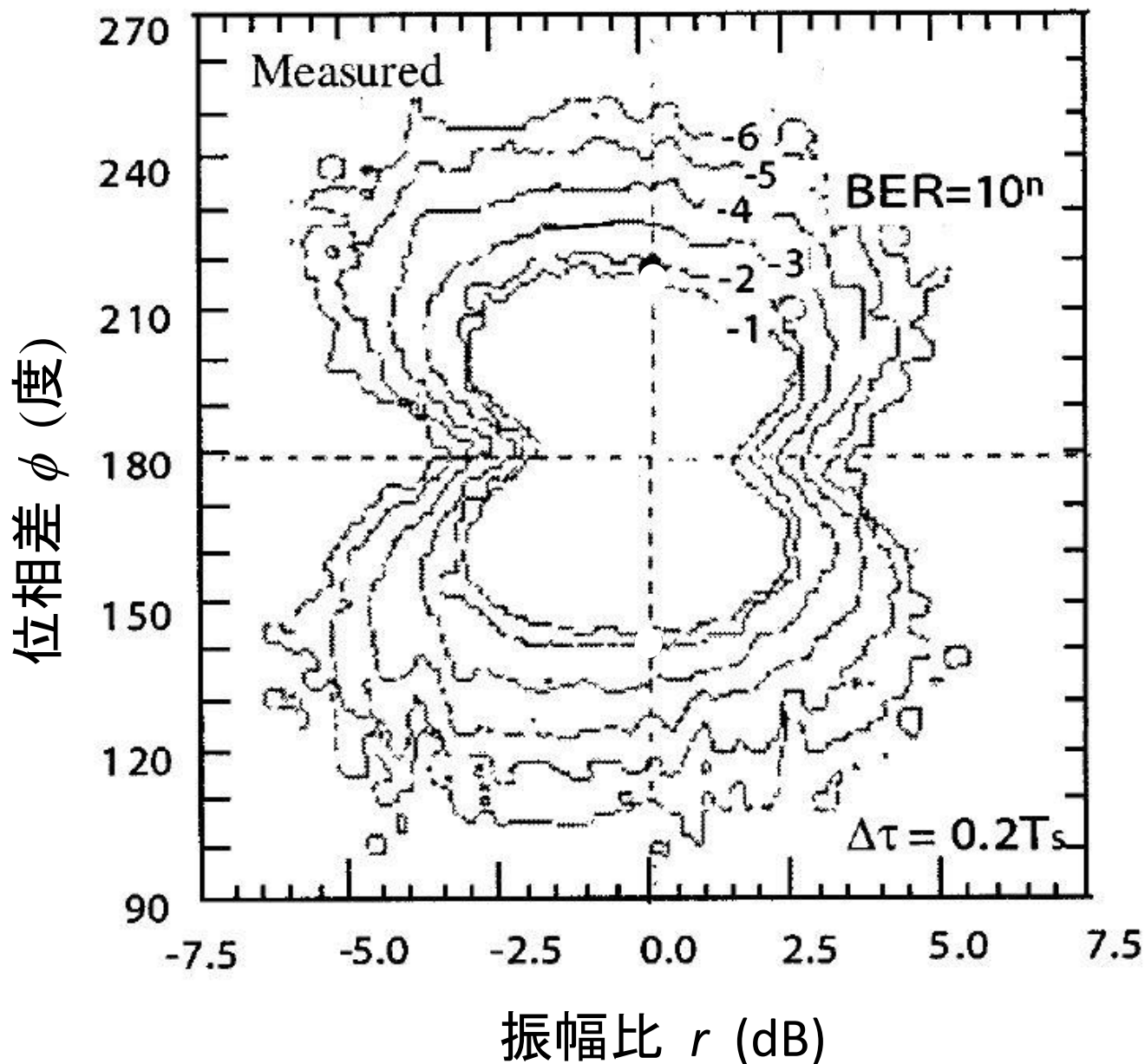


BERマップ

変復調方式によって異なる

遅延差によって異なる
(形状は相似形になる)

BERマップの実測値

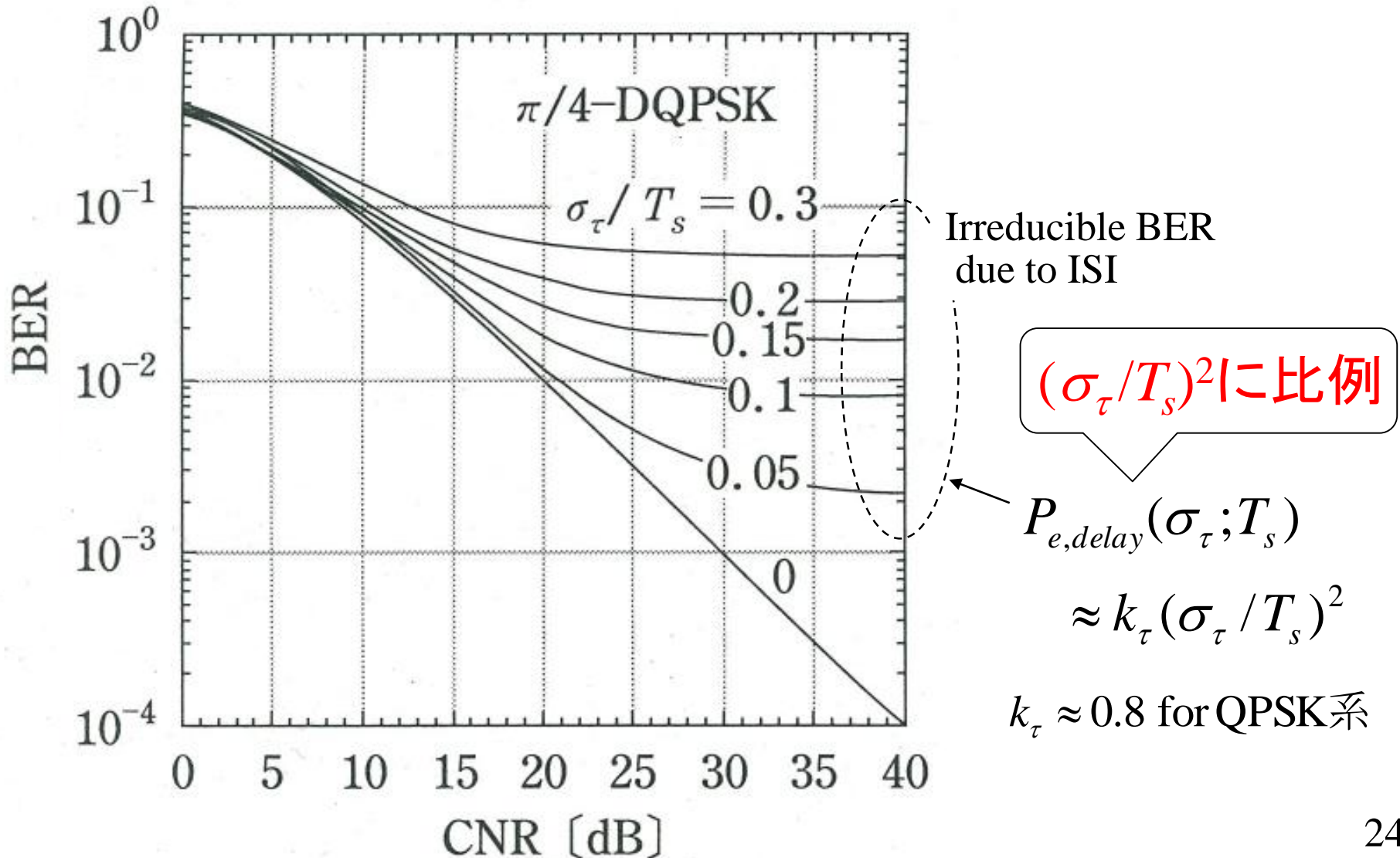


64kbps QPSKモデム
測定点数: 約6000点
(0.2dB, 2° 刻み)
一点の測定に約2分

誤り発生エリアは
シミュレーション値
よりは広いが、形状は
類似

周波数選択性フェージング環境(レイリーフェージング)でのBER特性

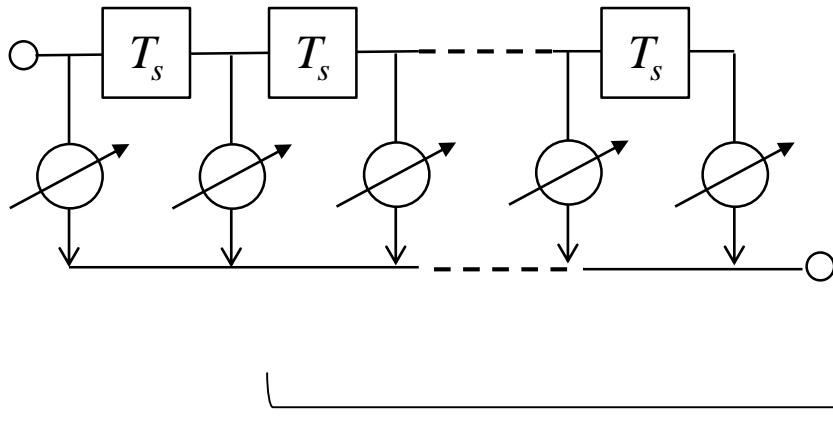
遅延の広がり(ISI) + 熱雑音



符号間干渉誤りの対策

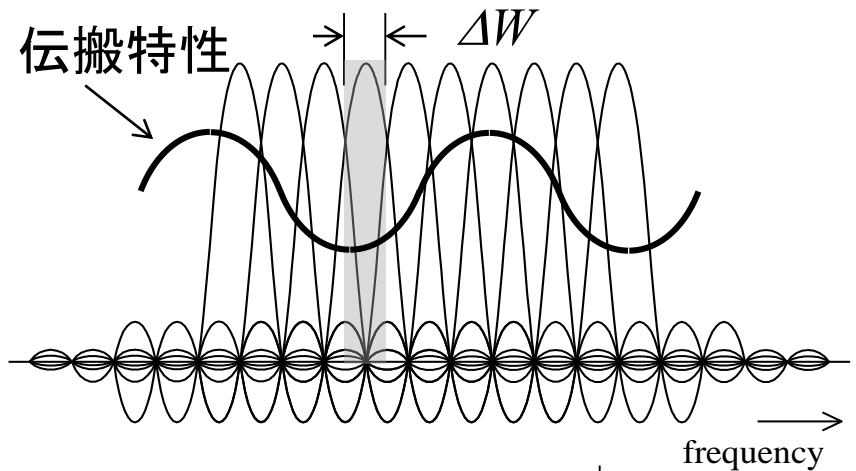
波形等化器(受信側)

デジタルフィルタで伝送路の周波数特性を平坦にして波形歪みをなくす



OFDM(伝送方式)

広帯域信号を狭帯域信号に分割して帯域毎の波形歪みをなくす

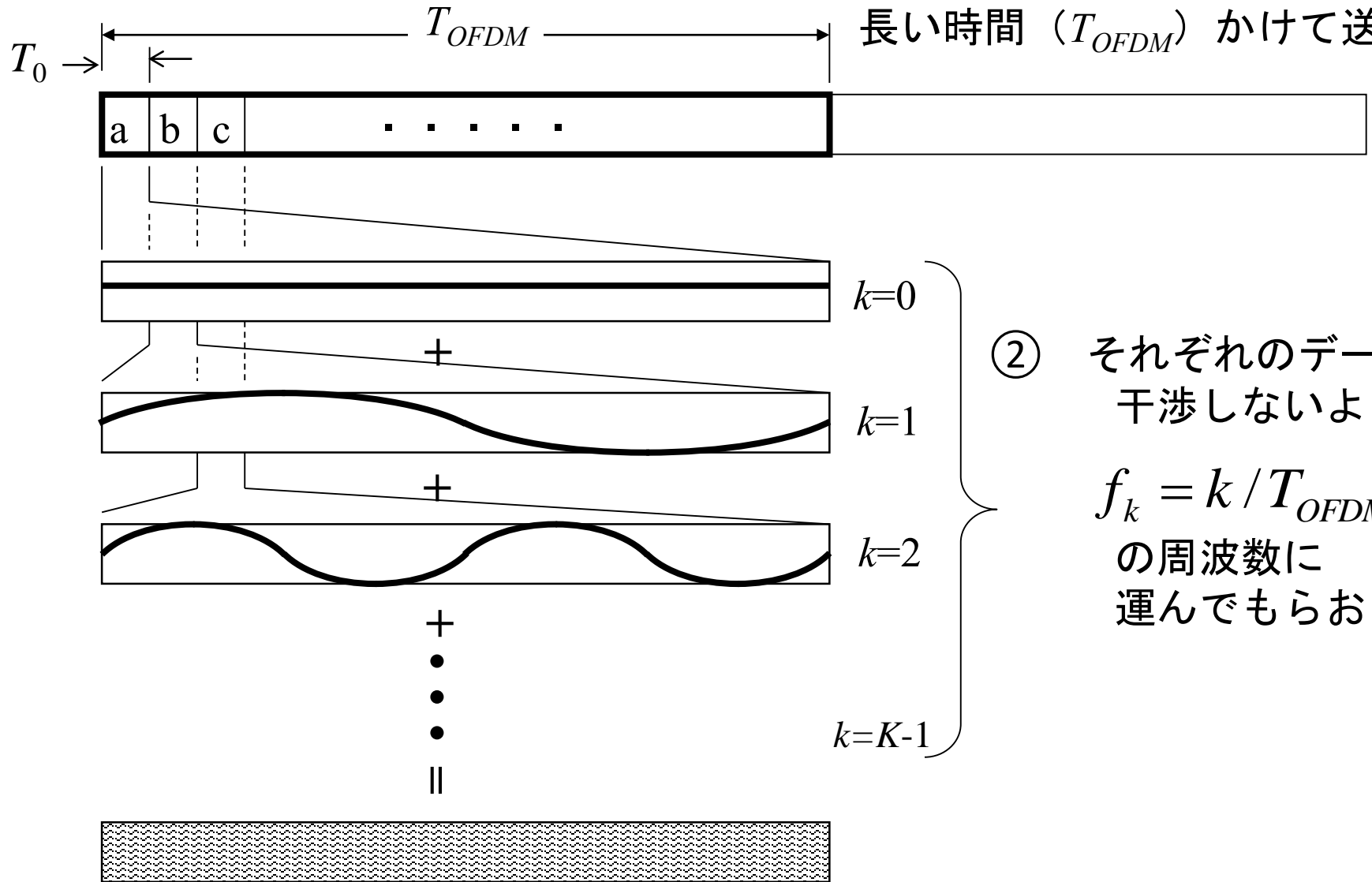


シンボル周期 T_s より長い時間をかけての信号処理が必要
(等化器の場合はタップ数、OFDMの場合は $1/\Delta W$ の時間)
その信号処理時間の中に、伝送路特性に時間変動があっては困る

OFDMの原理

マルチパス遅延に強くするために

① ISIの影響を小さくするために
たくさんのデータをまとめて
長い時間 (T_{OFDM}) かけて送ろう

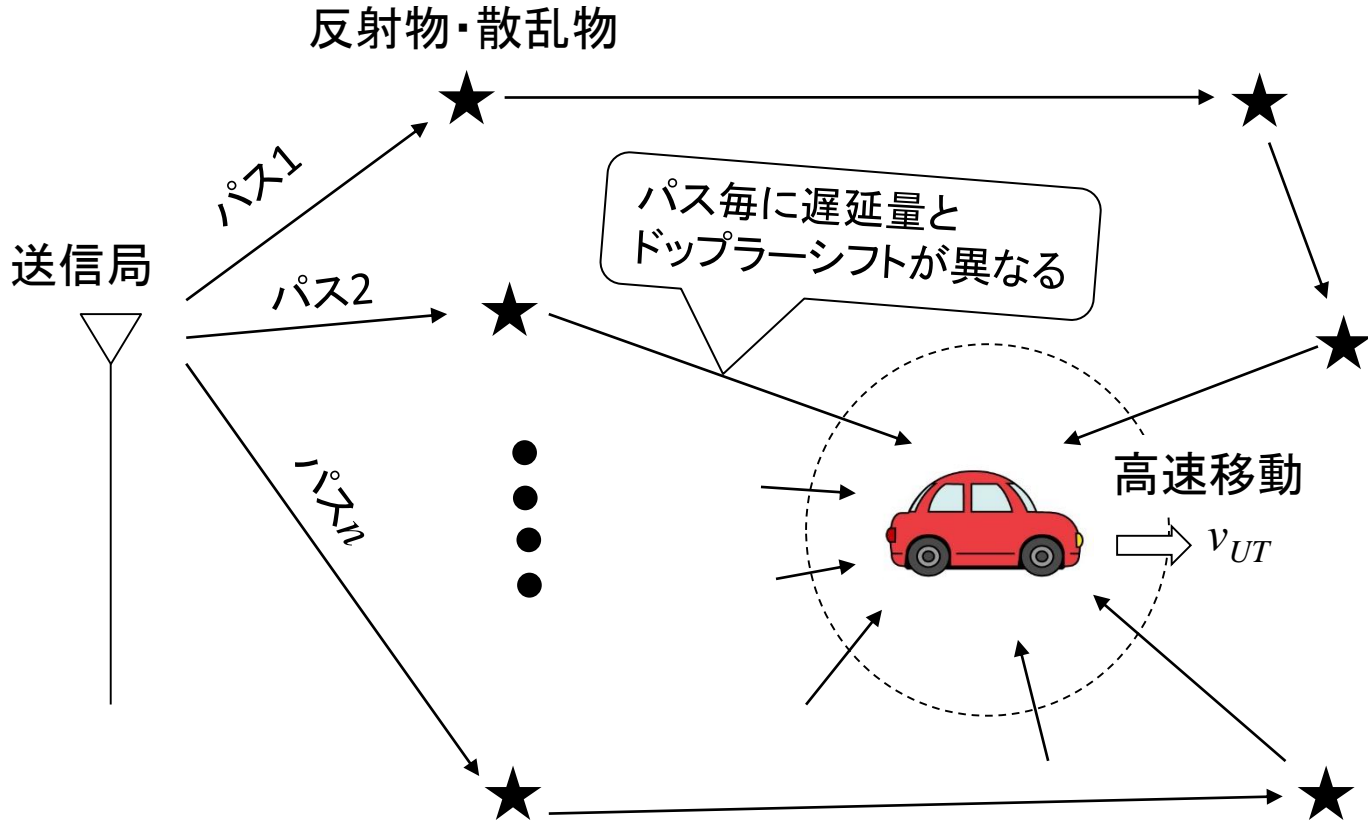
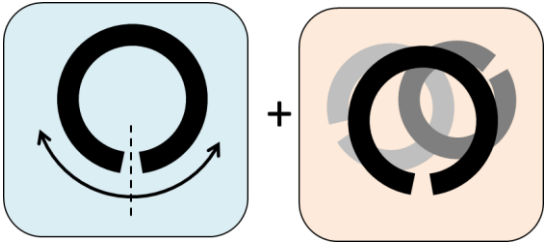


② それぞれのデータが
干渉しないように

$$f_k = k / T_{OFDM}$$

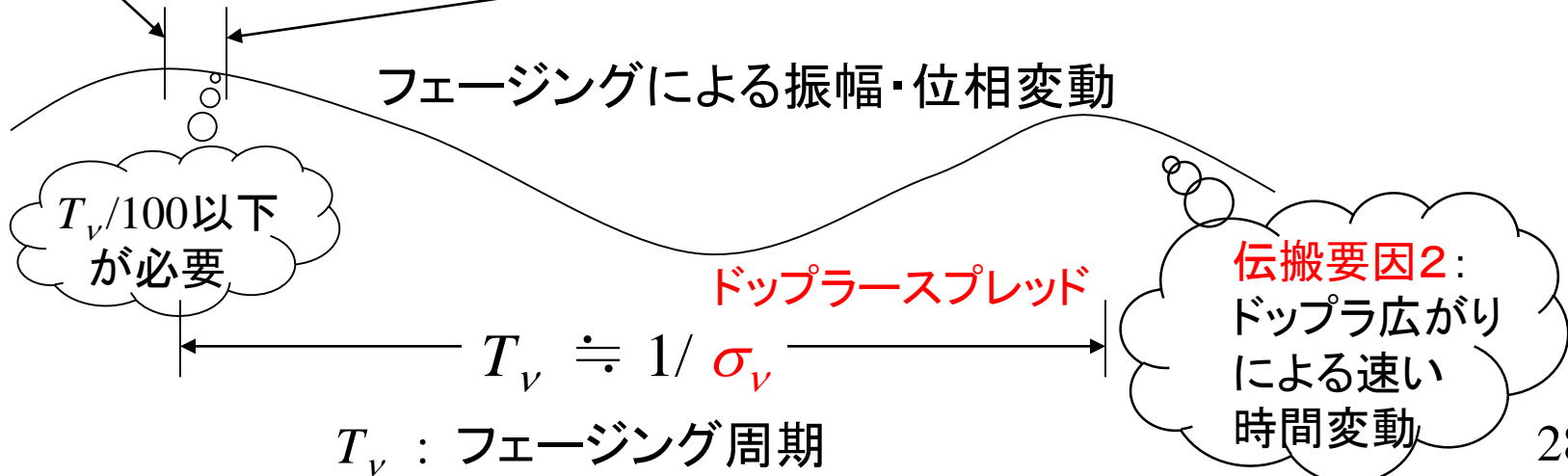
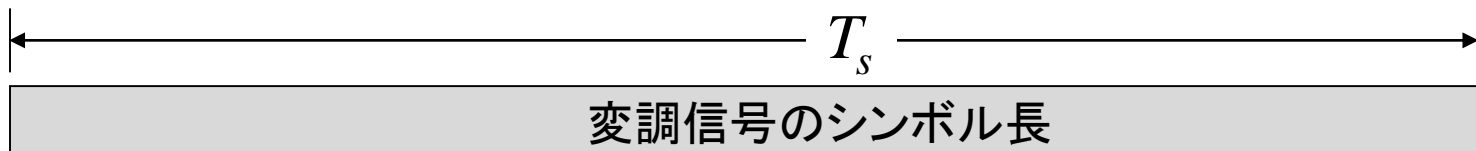
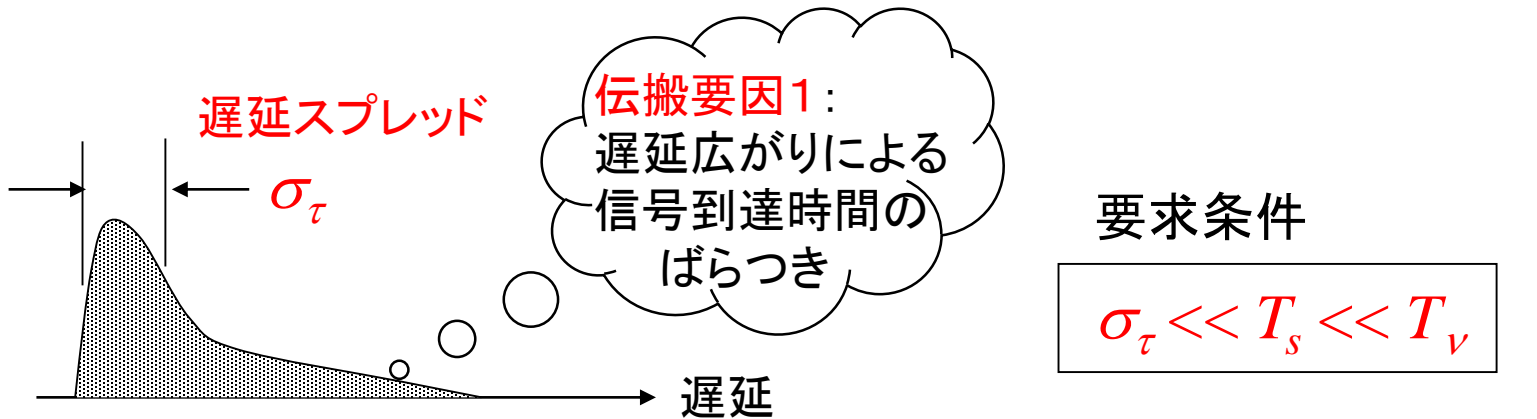
の周波数に
運んでもらおう

3. 二重選択性フェージング



- 伝搬キーパラメータ {
- ドップラースプレッド: σ_v (あるいは f_D) [Hz]
 - 遅延spreッド: σ_τ [sec]
 - スプレッドファクタ: $\alpha (= \sigma_v \sigma_\tau)$ [無次元]

余裕をもって信号設計が可能な伝搬条件



伝送誤りを少なくするための信号設計条件

- T_e : 変調信号の実効シンボル周期 (OFDMを含む)
- σ_v : ドップラー周波数のばらつき幅 (ドップラーズプレッド)
- σ_τ : 伝搬遅延のばらつき幅 (遅延ズプレッド)

波形歪誤りが起きない条件 $\sigma_\tau / T_e \ll 1$

位相変動誤りが起きない条件 $\sigma_v T_e \ll 1$



波形歪誤りが起きない条件

信号設計条件

$$\sigma_\tau \ll T_e \ll 1 / \sigma_v$$

位相変動誤りが起きない条件

伝搬環境に
求められる条件

$$\sigma_v \sigma_\tau \ll 1$$

最適に近い
シンボル長

$$T_e^{(opt)} \approx \sqrt{\frac{\sigma_\tau}{\sigma_v}} \quad (\text{相乗平均})$$

電波伝搬要因がもたらす信号設計に対するジレンマ

遅延のばらつきがあって波形が歪んでも良い

ただし、その波形ひずみを補正するための一定の時間がほしい

(例えば、OFDMにして実効シンボル周期を長くする)

ただし、その時間内ではフェージング特性は動かないでほしい

伝搬環境に
求められる条件

$$\sigma_v \sigma_\tau \ll 1$$

に対する厳しい環境

① 屋外

→ 遅延のばらつきが大きい

② 端末の移動速度が速い

③ 電波の周波数が高い

→ ドップラー周波数変動が大きい

上記三条件がそろったとき: ①+②+③

情報伝送の条件 $\sigma_v \sigma_\tau \ll 1 \rightarrow \sigma_v \sigma_\tau \approx 0.001$
限界の
目安値

(一例)

市街地 (パス長差 300mの遅延量) $\rightarrow \sigma_\tau \approx 1 \mu\text{s}$

周波数30GHzで、100km/hで移動 $\rightarrow \sigma_v \approx 2\text{kHz}$

$\sigma_v \sigma_\tau \approx 0.002$ ← 限界の目安値を超えている

これまでの無線通信では、何とかなってきたが、
だんだん信号設計が難しくなる時代に近づいている

(参考:

海中通信の音響伝搬では、スプレッドファクタの値がもっと1に近づいており、
信号設計がより難しくなっている)

通信路容量

雑音のある通信路において誤り無く伝送できるビットレートの上限

雑音のある通信路における通信路容量(シャノン限界)

$$C = W_s \log_2 (1 + \Gamma_0) \text{ [bps]} \quad (\text{伝送の限界は SN比 } \Gamma_0 \text{ で決まる})$$

2重選択性フェージング環境下での通信路容量(脚注)

$$C \approx W_s \log_2 \left(1 + \frac{1}{\frac{1}{\Gamma_0} + 8\pi^2 \sigma_v \sigma_\tau} \right) \quad (\text{伝送の限界は SN比とスプレッドファクタで決まる})$$

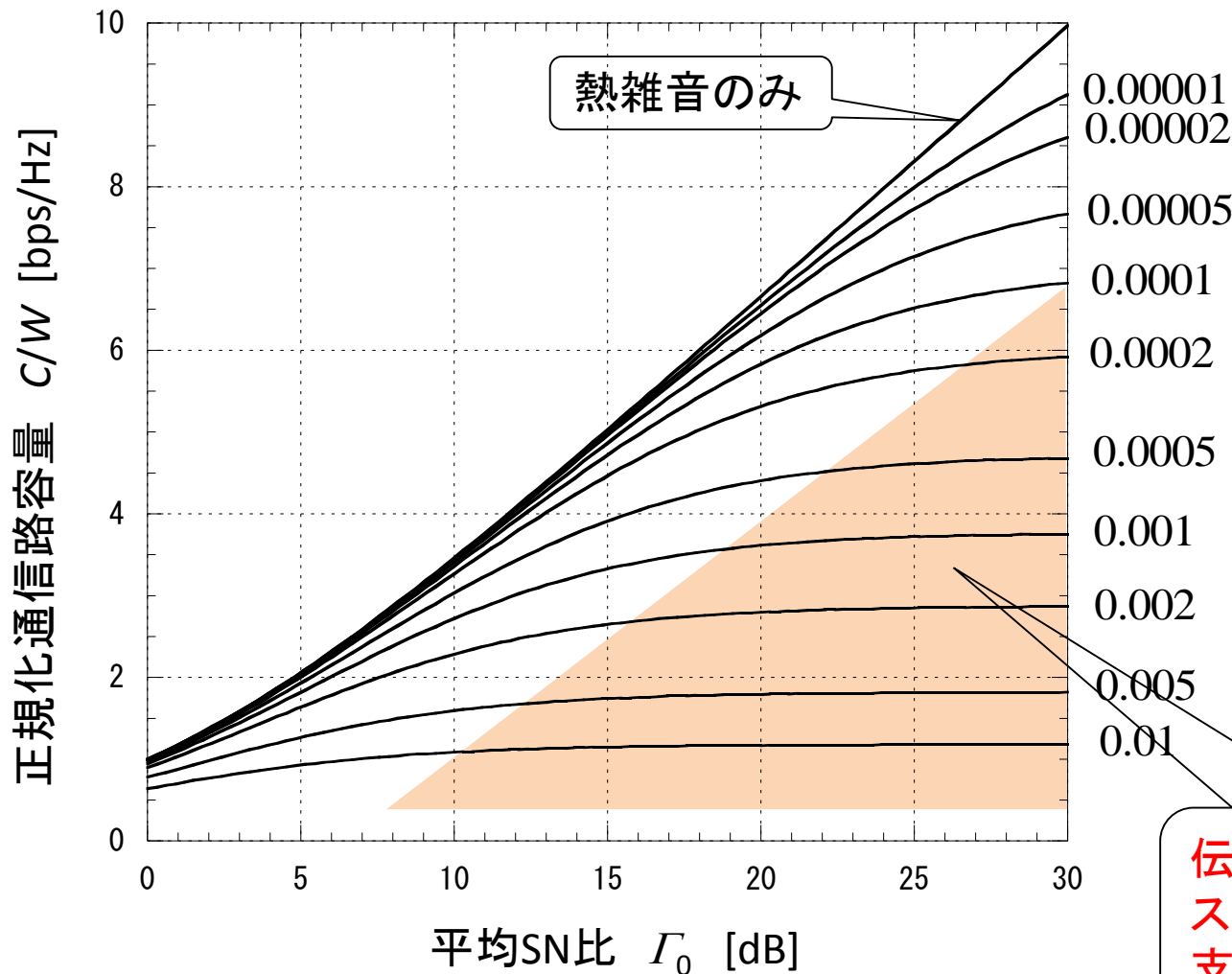
SN比が十分大きいときは

$$\lim_{\Gamma_0 \rightarrow \infty} C = W_s \log_2 \left(1 + \frac{1}{8\pi^2 \sigma_v \sigma_\tau} \right) \text{ [bps/Hz]} \quad (\text{スプレッドファクタに支配される})$$

スプレッドファクタと平均SN比に対する正規化通信路容量

スプレッドファクタ

$$\alpha = \sigma_v \sigma_\tau =$$



$\alpha=0.002$ の例
 $f=30$ GHz
 $v_{UT}=100$ km/h
 $\sigma_\tau=1$ μ s

伝搬特性
 スプレッドファクタが
 支配的になるエリア

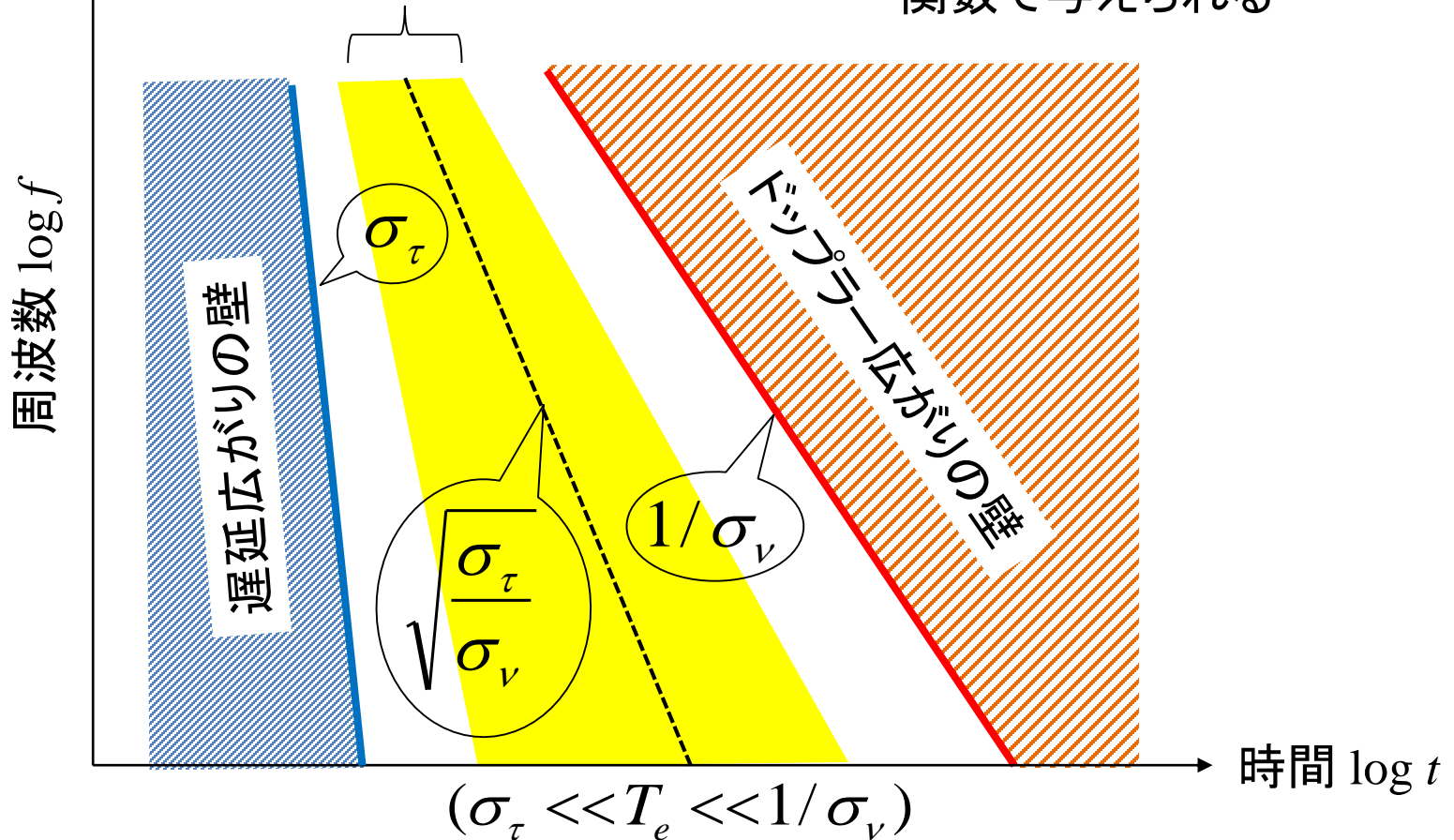
情報伝送に立ちふさがる電波伝搬の二つの壁(屋外環境をイメージ)

シンボル設計に開かれた窓

実効シンボル長 T_e に関する
最適設計エリア

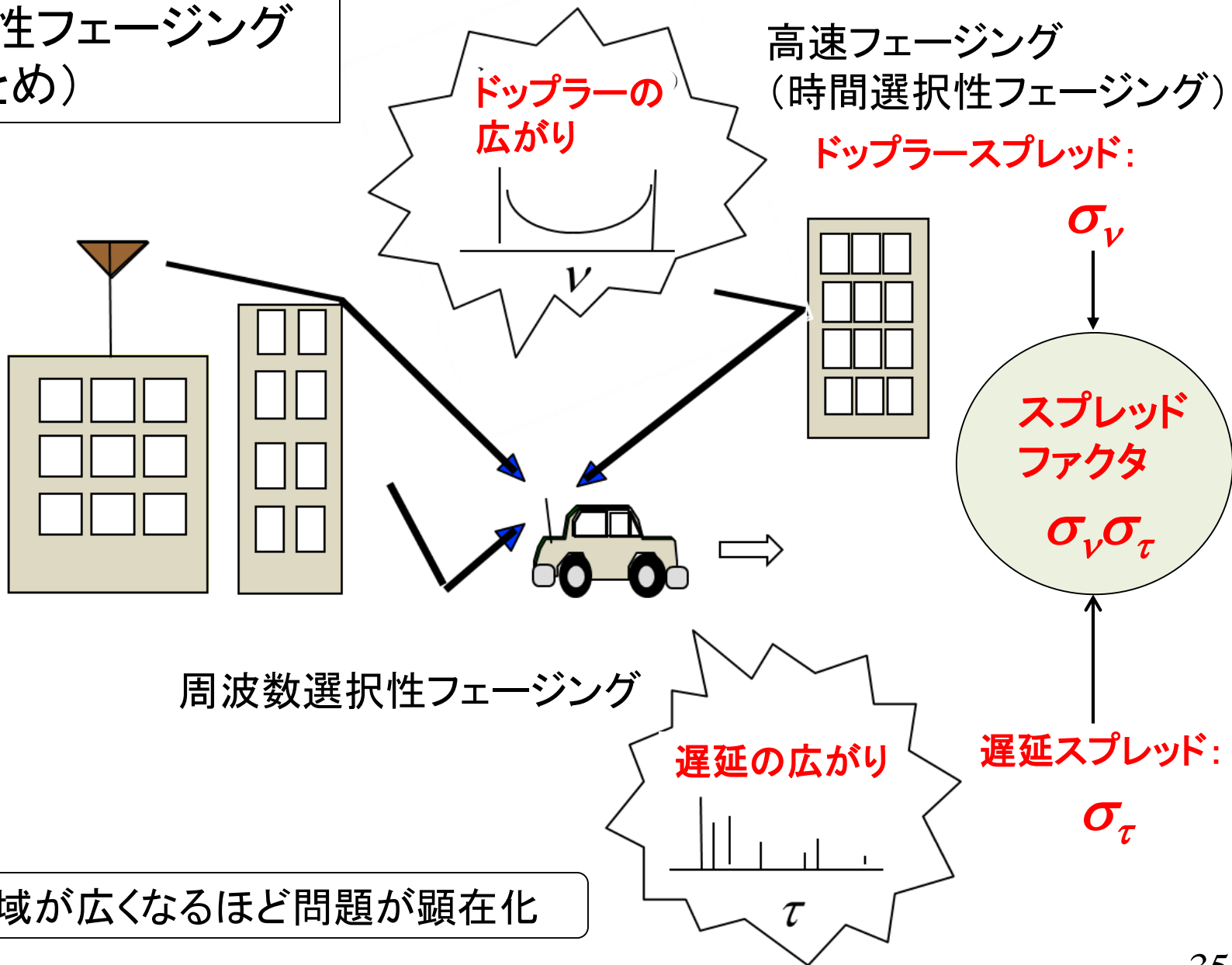


BER フロア最小値も
通信路容量(最大通信量)も
スプレッドファクタ $\sigma_v \sigma_\tau$ の
関数で与えられる



移動通信の
2重選択性フェージング
環境(まとめ)

通信周波数が高くなるほど問題が顕在化



未来の通信(より高い周波数帯電波の利用、より高速スピードで移動する端末に対する通信)においては、電波伝搬に支配されて、情報伝送の物理限界に近づく

その物理限界を逃れるためには

① アレーアンテナの利用

(空間信号処理(=アンテナ指向性の制御)によって、実効的な意味で、遅延スプレッドやドップラースプレッドを小さく抑えることができる)

SN比を高めるスペースダイバーシチ最大比合成は、結果として、スプレッドファクタを小さくする動作を行う

② 超広帯域・超低電力密度信号の利用

(送信電力を増やさず、帯域幅だけ広くする。信号は帯域あたり低電力密度になるが、伝搬劣化は抑えられる。)

伝送の物理限界は
指向性アンテナの利用や
アレーアンテナの利用
によって緩和できる

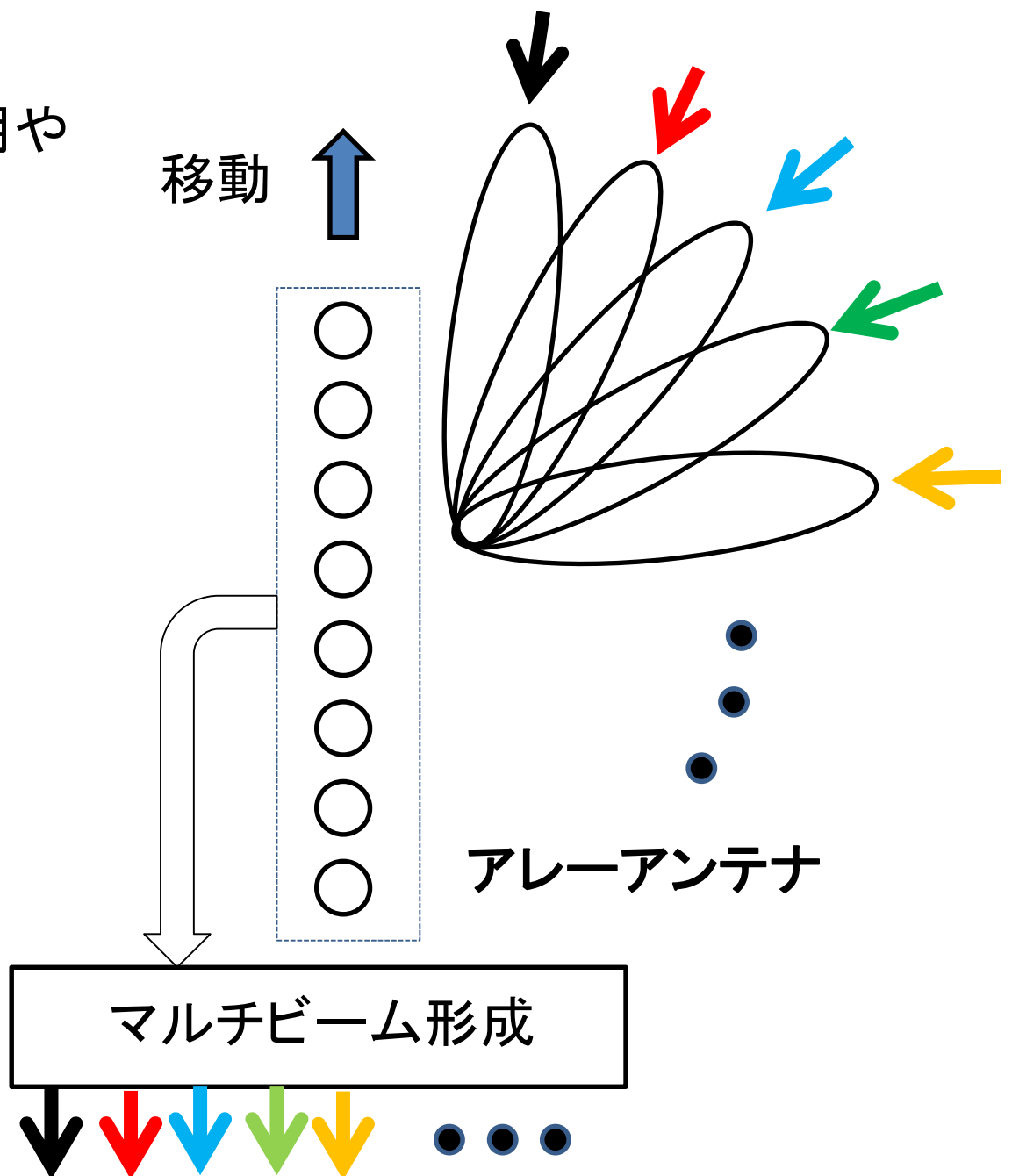
例えば、

マルチビームにより
ドップラー広がり
の小さい信号に分割
される

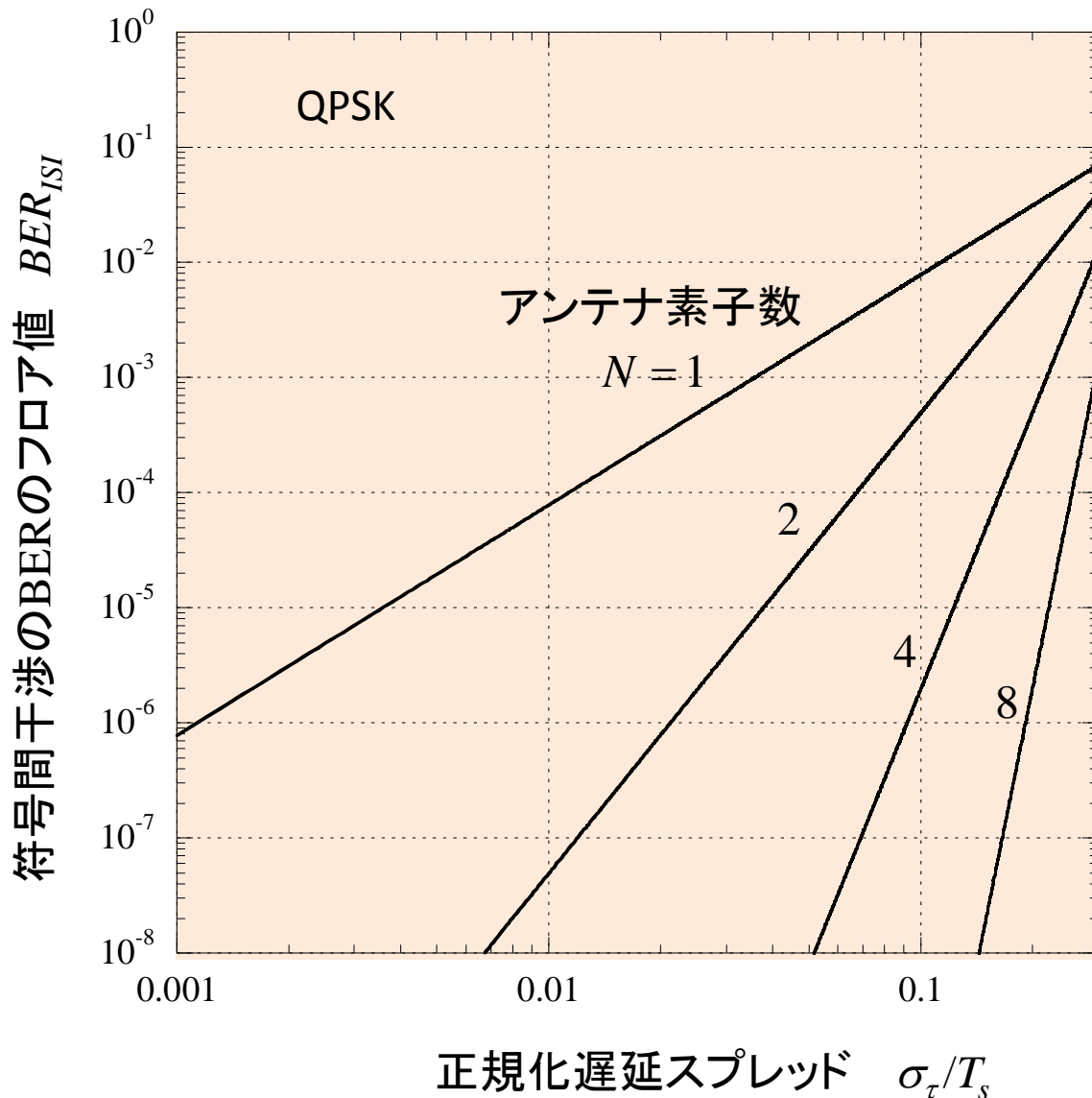


伝搬制約条件が
緩和される

$$f_D \Rightarrow f_D / N$$



スペースダイバーシチ(MRC)は、符号間干渉誤りにも有効に働く



MRC(最大比合成)は信号レベルの低下(すなわちSN比の低下)を最小にするダイバーシチ合成法



その規範は、同時に、符号間干渉誤りを小さくする

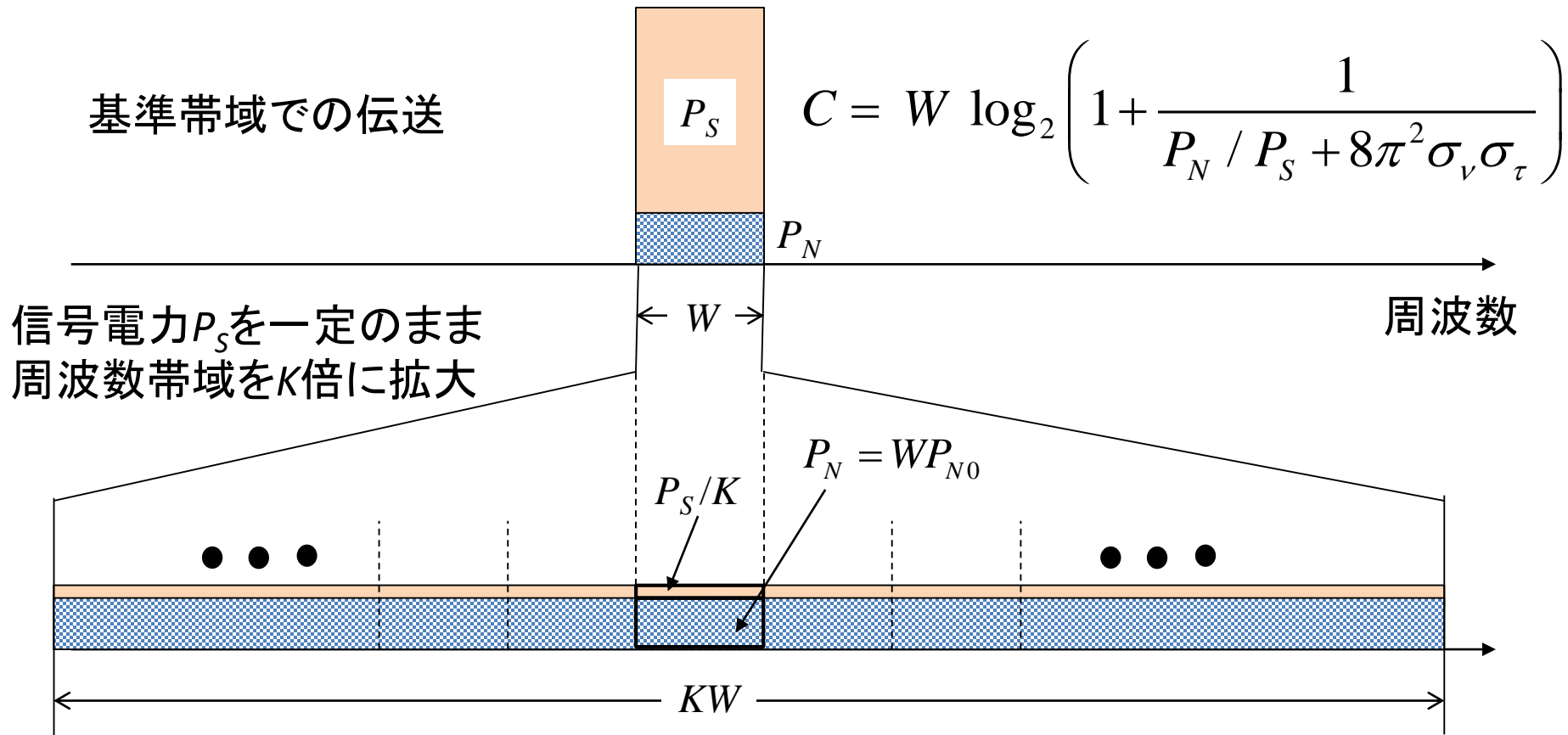


実効的な意味で、遅延スプレッドを小さくする働き



同様の効果は、位相変動誤りにも現れ、結果として、スプレッドファクタを小さくする働き

送信電力一定の下、帯域幅だけ広げてゆくと通信路容量は？



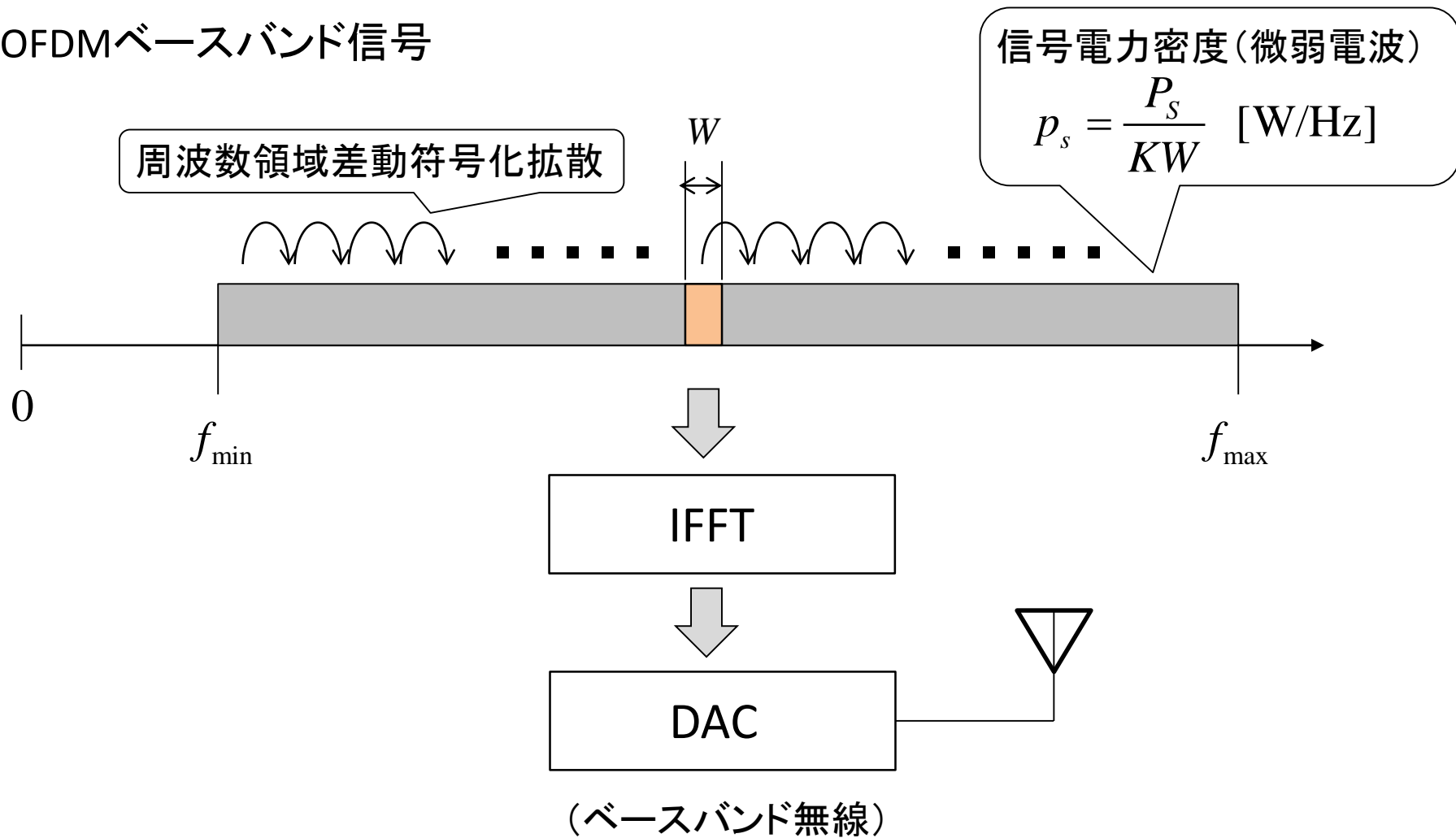
帯域幅を無限に拡大してゆくと

$$C(K) = KW \log_2 \left(1 + \frac{1}{KWP_{N0} / P_S + 8\pi^2 \sigma_v \sigma_\tau} \right) \Rightarrow \lim_{K \rightarrow \infty} C(K) = 1.44 \frac{P_S}{P_{N0}}$$

伝搬問題が克服されて、熱雑音のみの究極の容量が得られる

信号設計の一例

OFDMベースバンド信号



未来の通信の一つのイメージ

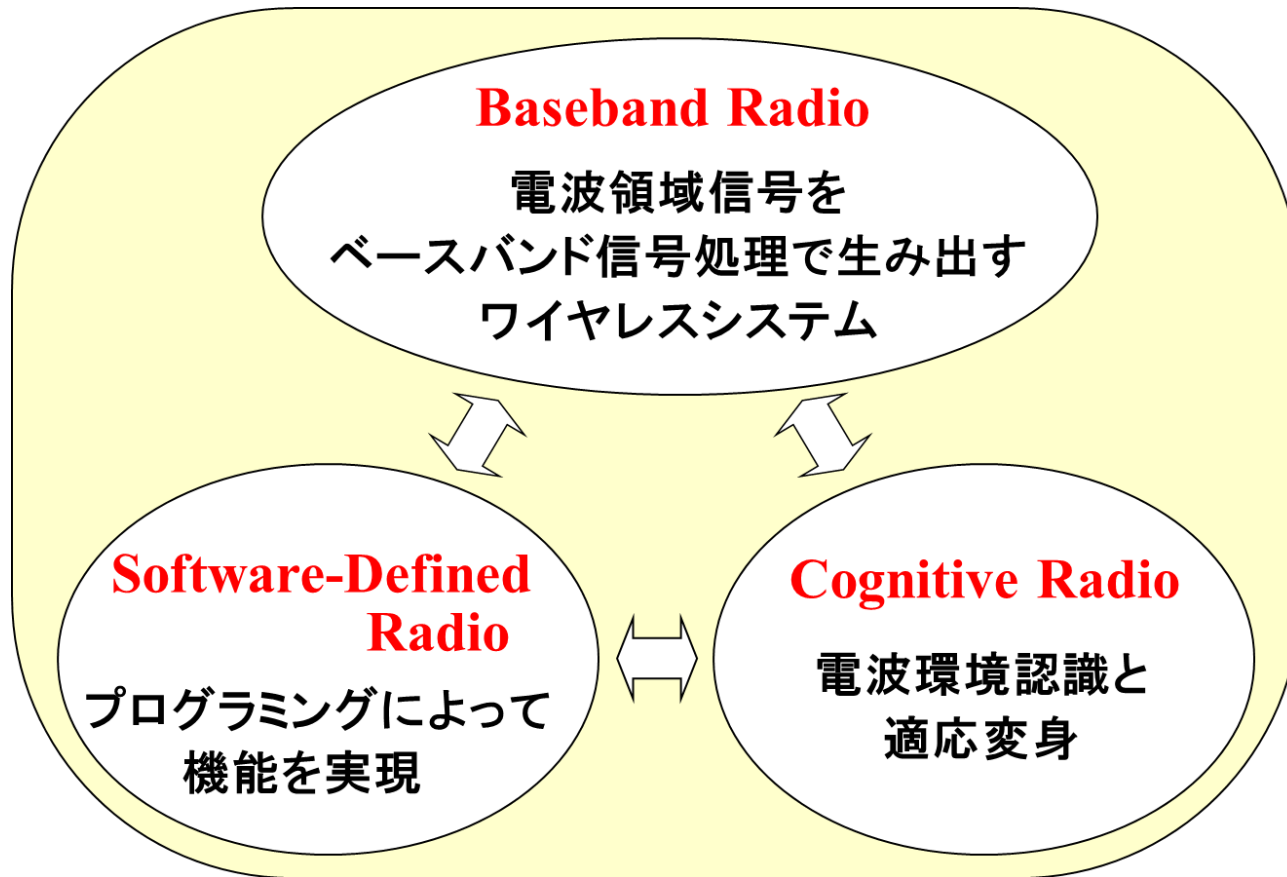
劣悪な電波環境に強い環境適応通信システム

- ・超広帯域な周波数を一括利用(超広帯域周波数拡散)
- ・超低電力密度(帯域あたりは微弱電波)伝送(電波干渉に耐性)
- ・電波周波数信号の一括デジタル信号処理(ベースバンド無線)
- ・アレーアンテナ利用による伝搬劣化の軽減

克服すべき課題は山ほどある(低電力密度信号の検知、超高速デジタル信号処理、超広比帯域アンテナなど)が、未来を夢として語るのは許されると思う

環境適応型ベースバンド無線

三つの無線(3 Radios)を統合した環境適応通信



本日の講義に関連する参考資料情報

スライドを使った講義は、図がベースであり、分かった気分になるかもしれないが、浅い理解で終わってしまうことが多いし、復習しようとしてもスライド資料だけでは不十分である。さらに理解を深めるためには、文章や式でまとめられた専門書などで復習をしてほしい。

今回の講義は、以下の内容をベースにしています

全体の概要

唐沢、電波研究の玉手箱、電波技術協会報FORN（全10講の内の第5, 6, 7講）

http://www.radio3.ee.uec.ac.jp/ronbun/TR_YK_069_FORN_Lectures.pdf

伝搬とシステムの接点（フェージング環境での伝送誤り特性）

唐沢、[無線通信物理層技術へのアプローチ](#)、コロナ社、2021。（第8章～12章）

伝搬モデルに現れる確率分布

唐沢、電波伝搬モデルの確率分布、私製本

http://www.radio3.ee.uec.ac.jp/ronbun/TR-YK-078_Probability_Distributions.pdf

本講義に関するご質問・ご意見は E-mail: karasawa@mail.uec.jp まで