URSI-JRSM 2015
(Sept. 03, 2015)

On Physical Limit of Wireless Data Transmission from Radiowave Propagation Viewpoint

電波伝搬的視点からの無線情報伝送の物理限界

Yoshio Karasawa

Univ. Electro-Communications (UEC Tokyo)
Advanced Wireless and Communication Research Center (AWCC)

講演内容 Contents of Presentation

- 電波伝搬とシステム （移動体通信を対象とした）

  Wave Propagation and Systems

- 情報伝送の物理限界とは？

  On Physical Limit of Radio Transmission

- 伝送劣化の電波伝搬的要因

  Propagation Degradation Factors

- OFDMは電波伝搬を克服したか？

  Does OFDM overcome the propagation issues?

Commission F : Wave Propagation and Remote Sensing

電波伝搬の研究の変遷
Past and present of radiowave propagation research

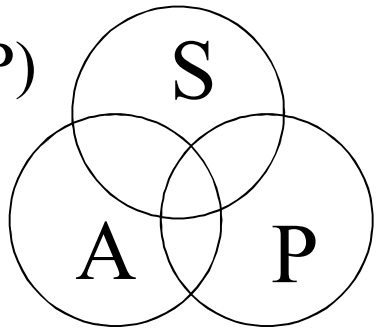
衛星通信・無線通信： Satellite communication, Radio-relay system,

Radio Science (Atmosphere, Rain, Terrain, Ocean waves, ・・・
＋ Radio Engineering (Attenuation, Scattering, Diffraction, ・・・)

広帯域ディジタル移動通信： Wideband Mobile Wireless System

Antennas (A)・Propagation (P)
・System (S)

A・P・S 三位一体 Trinity



Adaptive array
CDMA
OFDM, OFDMA
MIMO

ワイヤレス情報伝送の物理限界

On Physical Limit of Wireless Data Transmission

「伝搬はシステムを制す」
Radiowave propagation controls communication systems.

「無線システムの進化の歴史は
伝搬問題との戦いの歴史」
History of evolution of a radio system is
history of overcoming propagation problems.

「でも、戦える土俵の中での戦いである
では、戦えない土俵とは？」
They're only fighting in the sumo ring where it's possible to fight.

Shannon's Channel Capacity Theorem

シャノンの通信路容量定理:
それはまさに、情報伝送の物理限界を与えている

$$C = W \log_2 \left(1 + \frac{P_S}{P_N} \right) \qquad \text{(bps)}$$

C (bps): Upper limit of transmittable bit rate without transmission errors

W (Hz): Signal bandwidth

P_S: Average signal power

P_N: Average noise power

Shannon's channel capacity theorem

is giving the physical limit of the digital transmission.
シャノンの通信路容量定理は情報伝送の物理限界を定める

For this theorem to be satisfied, infinite time is needed for coding and signal processing.
(in order to utilize statistical multiplexing effect)
この式が満たされるためには無限の符号化時間や信号処理時間が必要
（統計多重効果の積極活用）

すなわち、時間的変動がない環境（ Time-invariant environment）を想定

しかし、ワイヤレス通信では時間的変動は常に存在する。
故に、実際には物理限界はさらに狭まる
In the case of mobile radio systems, temporal variations of EM field always exists. The physical limit becomes narrower.

By what is that decided?
それは、何によって決まるか？

物理限界劇場への3人の登場人物
3 main characters in the today's discussion

From the <u>system side</u>

- Symbol period T_s

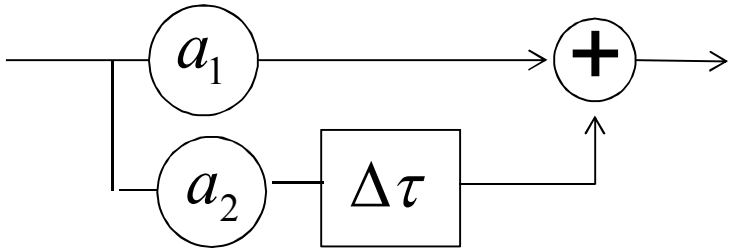
From the <u>propagation side</u>

- Doppler spread σ_f
- Delay spread σ_τ

Occurrence of bit errors due to multipath delay spread

遅延広がりによる伝送誤りの発生

符号間干渉による誤り発生のメカニズム



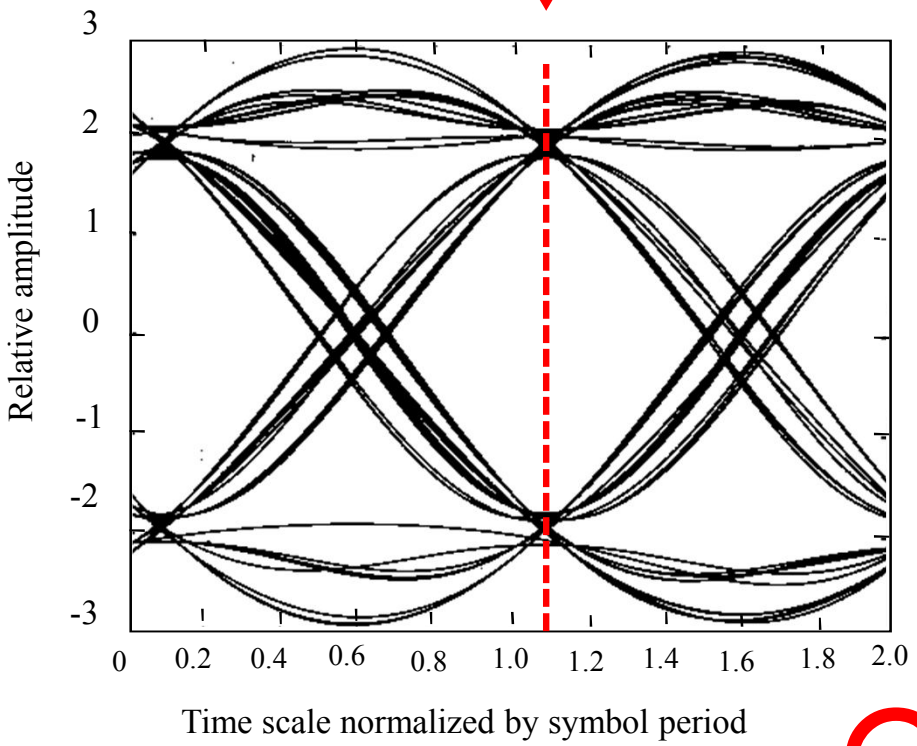
Parameter value setting

$$|a_1| = |a_2| = 1$$

$$\Delta\tau = 0.2T_s$$

Sample timing is just in the center of each symbol

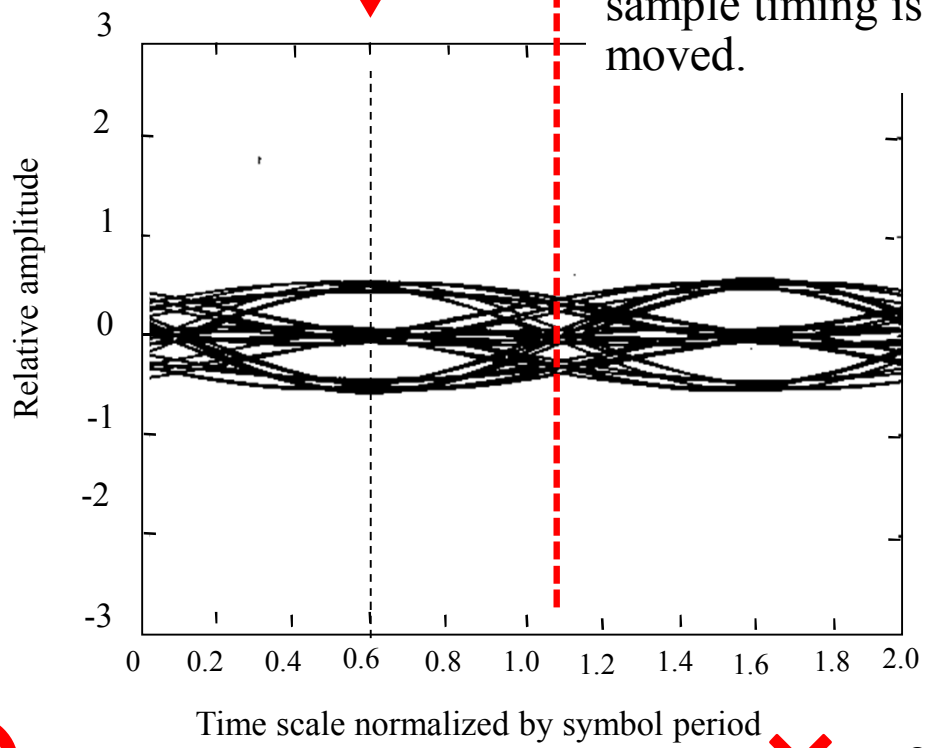
$\Delta\phi = 0$



○

$\Delta\phi = \pi$

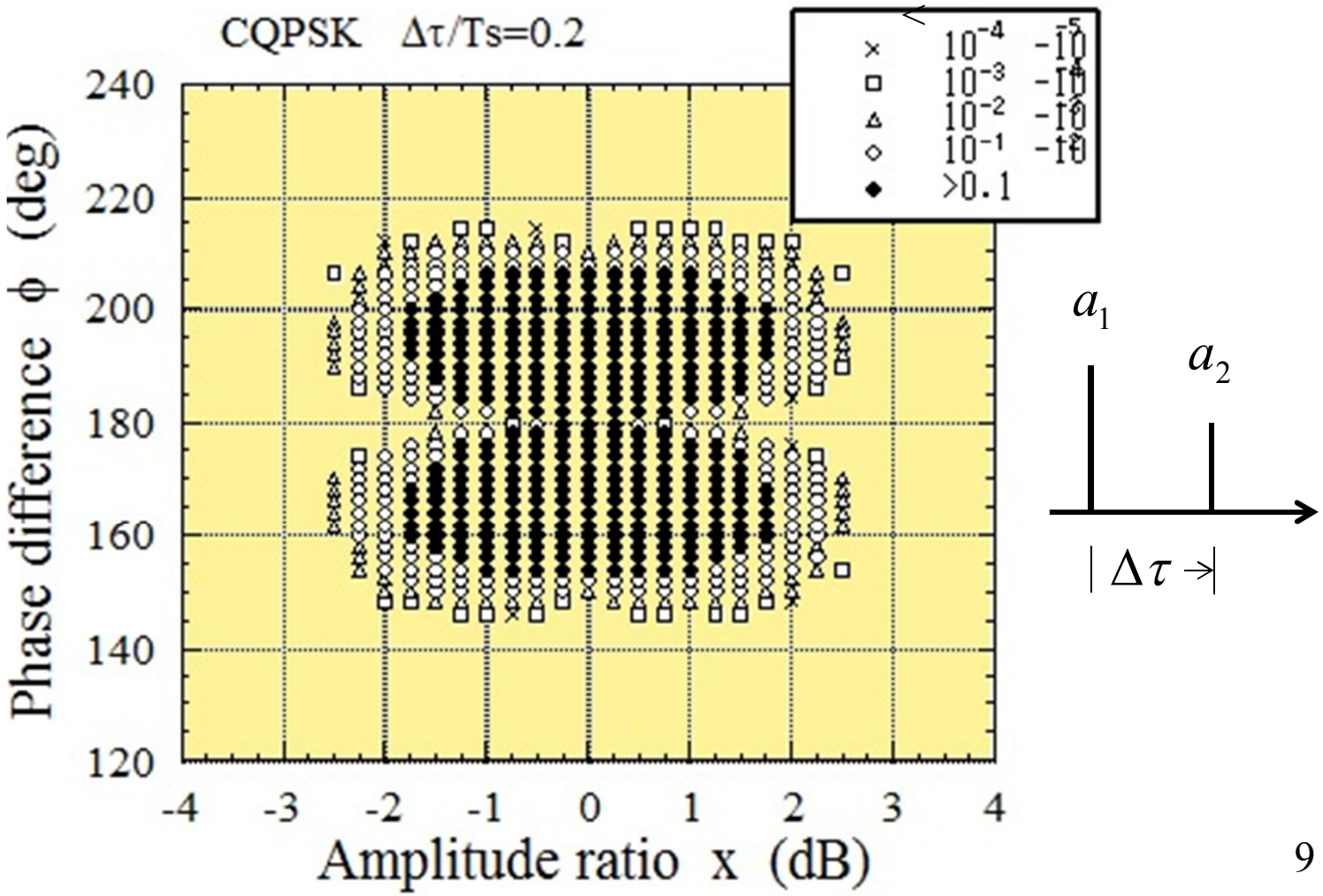
The eye pattern is distorted and sample timing is moved.



×

BER floor characteristics in a two-wave model
2波モデルにおける誤りの発生エリア

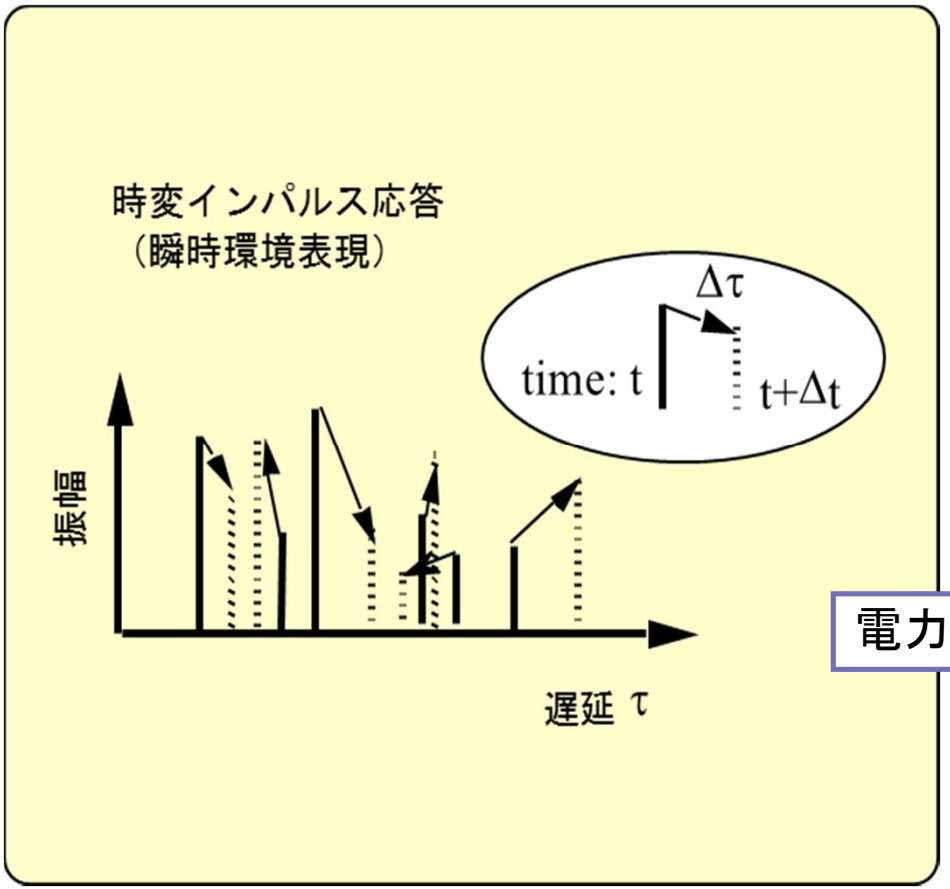
CQPSK $\Delta\tau = 0.2\ T_s$



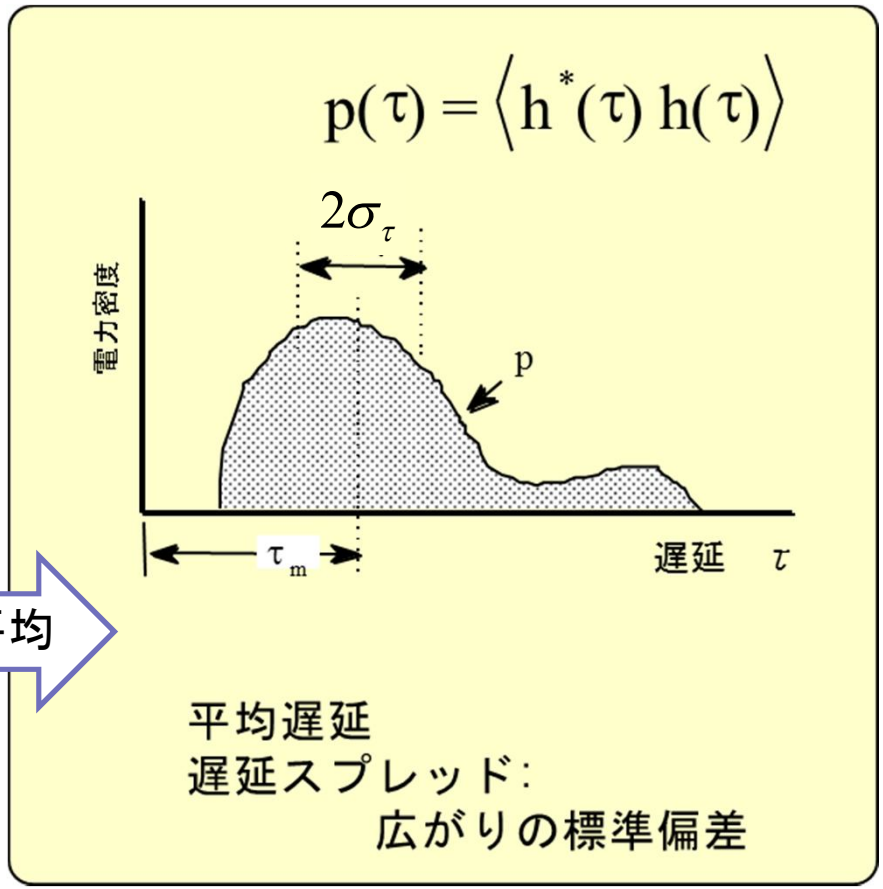
広帯域伝搬環境の表現：インパルス応答・遅延プロファイル・遅延スプレッド

【Instantaneous expression】
Impulse response

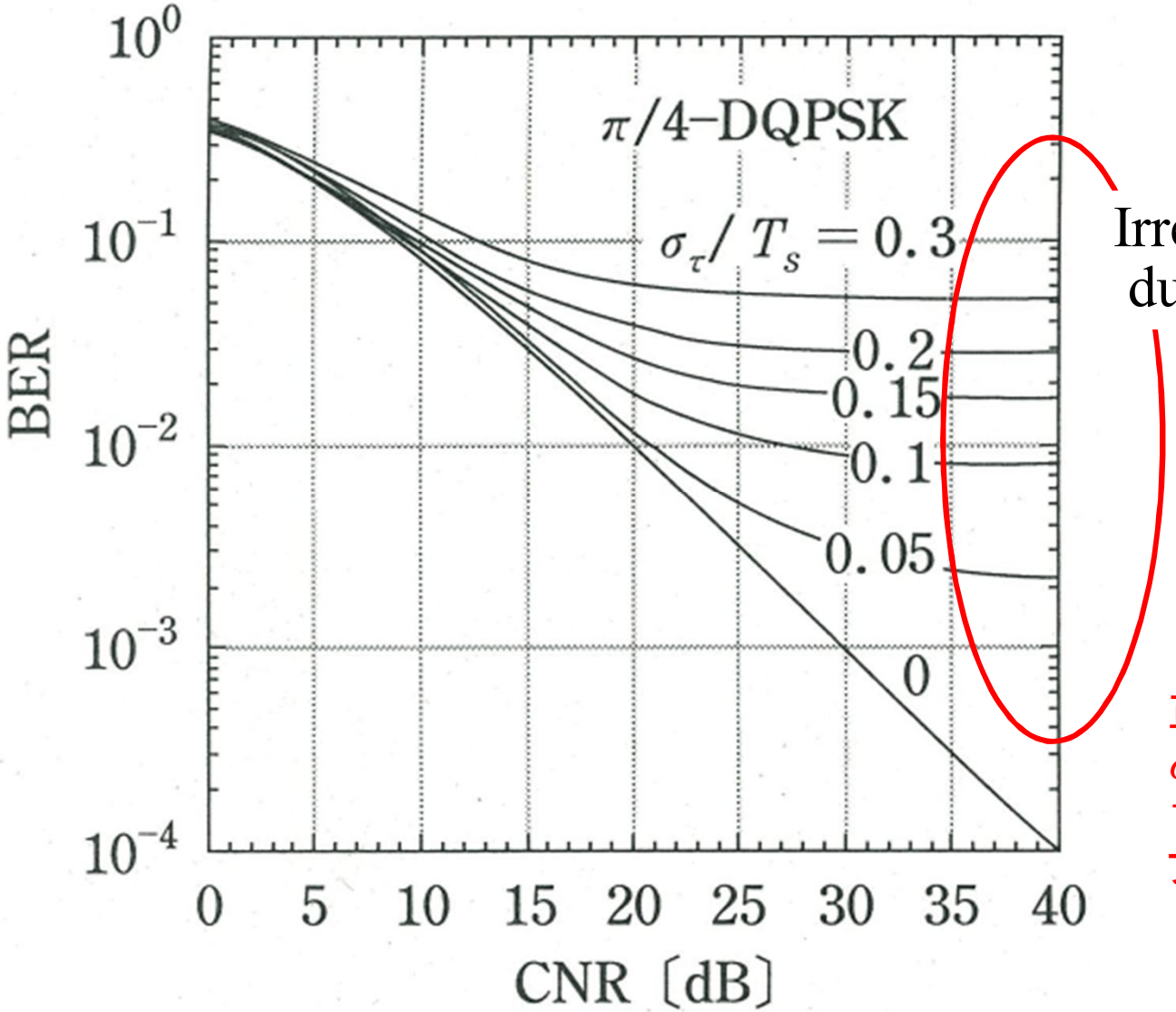
【Statistical expression】
Delay profile
Delay spread：σ_τ



電力平均



BER in multipath-rich environment
遅延広がりによるBERフロアの発生



Irreducible BER due to ISI

正規化遅延スプレッド
σ_τ/T_sの値が
1に近づくほど
フロア値が大きくなる

Is this the essential condition for realizing error-free transmission in multipath environment with delay spread?
以下の式が、良好な通信を実現するための究極的な条件か？

$$\sigma_\tau / T_s << 1$$

The answer is ***"No"***, because

<u>遅延広がりより、十分長い時間をかけた処理によって克服できる</u>
<u>It is possible to overcome this problem by using sufficiently long time in signal processing.</u>

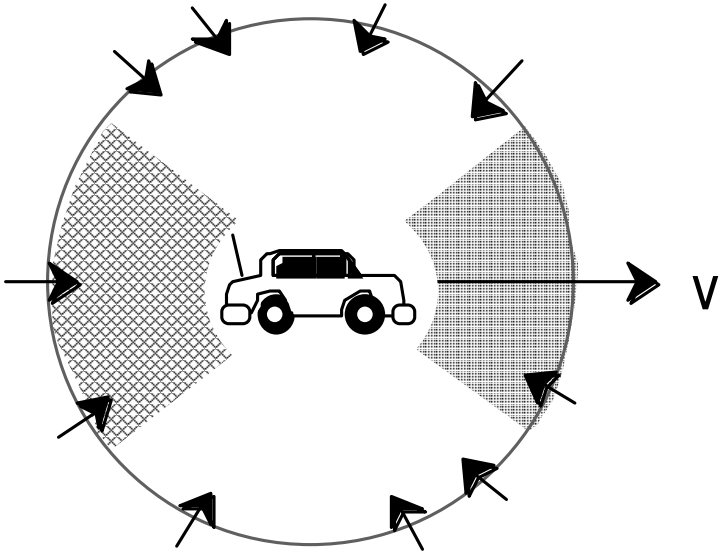
- **Equalizer**（using sufficiently long signal processing time at the receiver site. 受信側で、信号処理時間を十分長くする仕組み）
- **OFDM**（which lengthens the symbol period effectively at the transmission site. 送信側で、シンボル長を実効的に長くする仕組み）

Occurrence of bit errors due to Doppler frequency spread

ドップラー広がりによる伝送誤りの発生

Fast fading environment: 高速フェージング環境

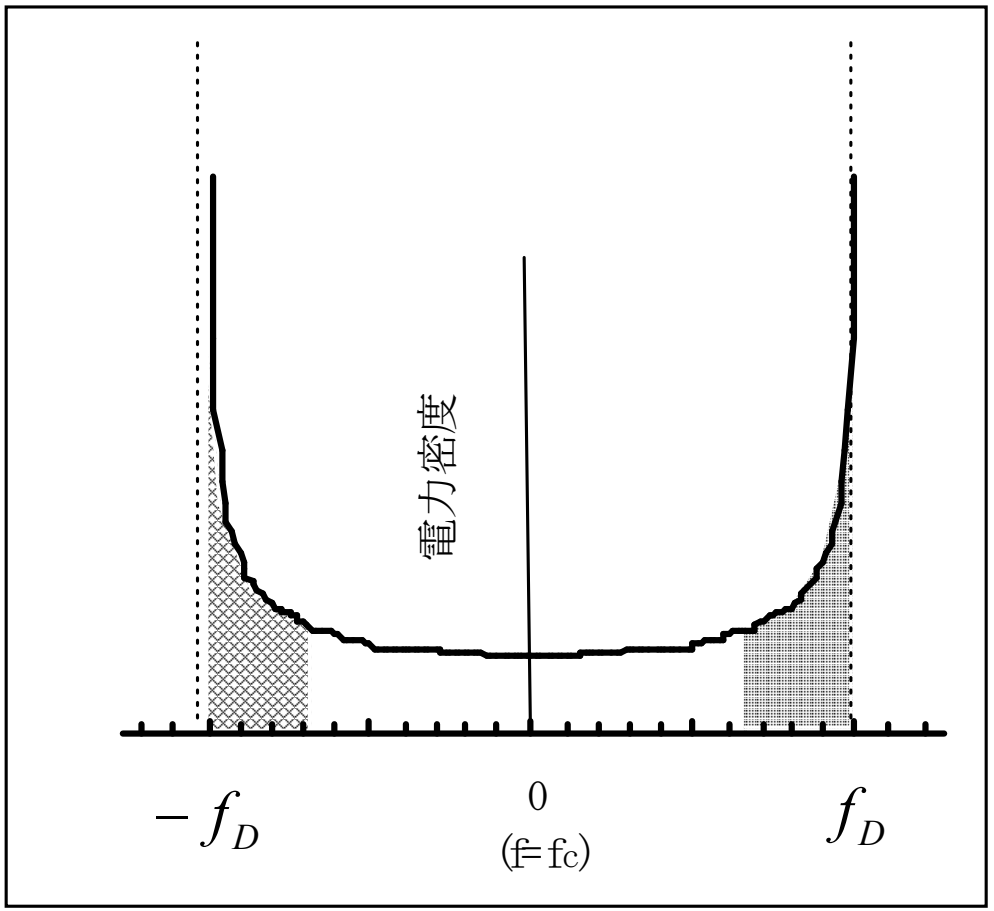
【Angular power profile】



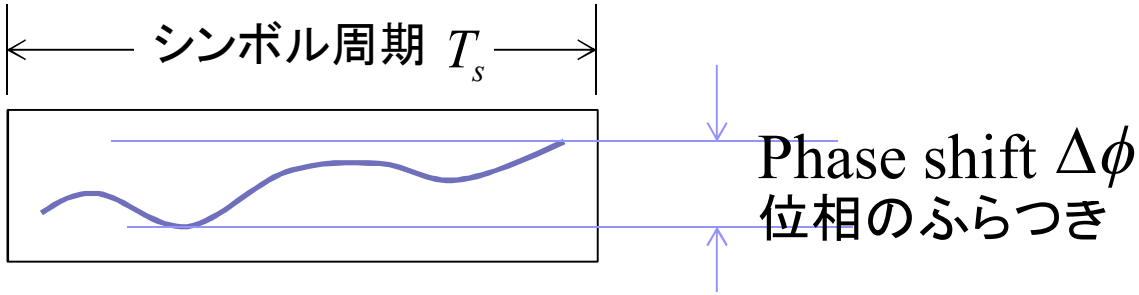
$$f_D = v / \lambda$$

Maximum Doppler frequency: f_D

【到来角度一様の場合のドップラースペクトル】



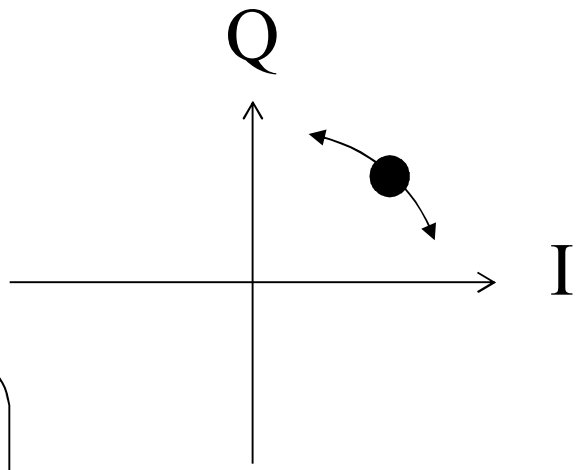
情報伝送がうまくゆくための条件： ドップラー広がりに対して
Error-free condition due to Doppler spread



$$\Delta\phi << 2\pi$$

$$f_D T_s << 1$$

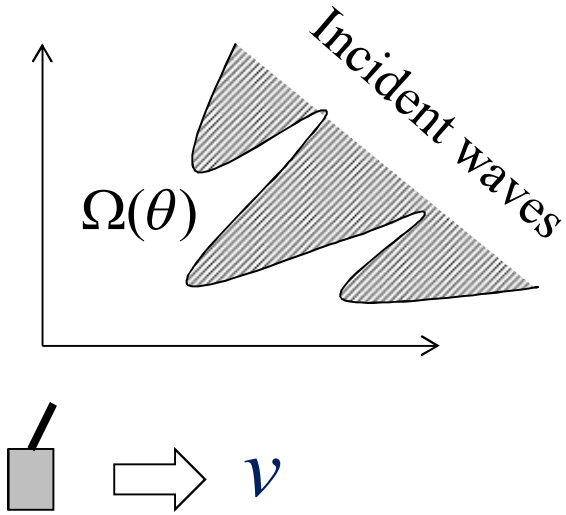
Condition for not occurring irreducible errors
高速フェージングでの良好通信条件



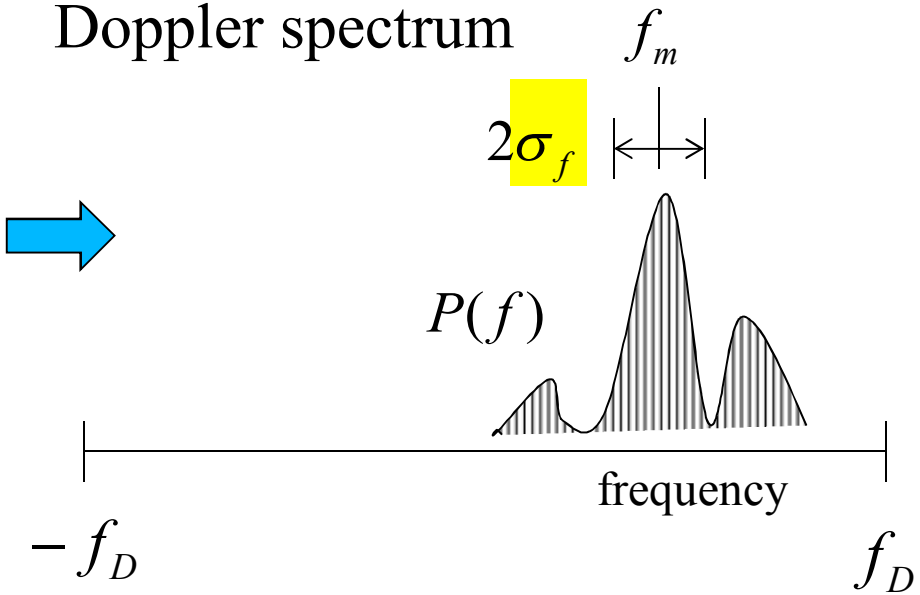
During each symbol period, propagation condition must be stable
シンボル時間の中では、シンボル点は、時間変動を受けず、じっとしていてほしい

高速フェージング環境を規定する本質的パラメータ: σ_f

Angular profile
到来角度プロファイル



Doppler spectrum



Doppler spread
ドップラースプレッド

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{1}{P_R}\int_{-f_D}^{f_D} (f - f_m)^2 P(f)\, df}$$

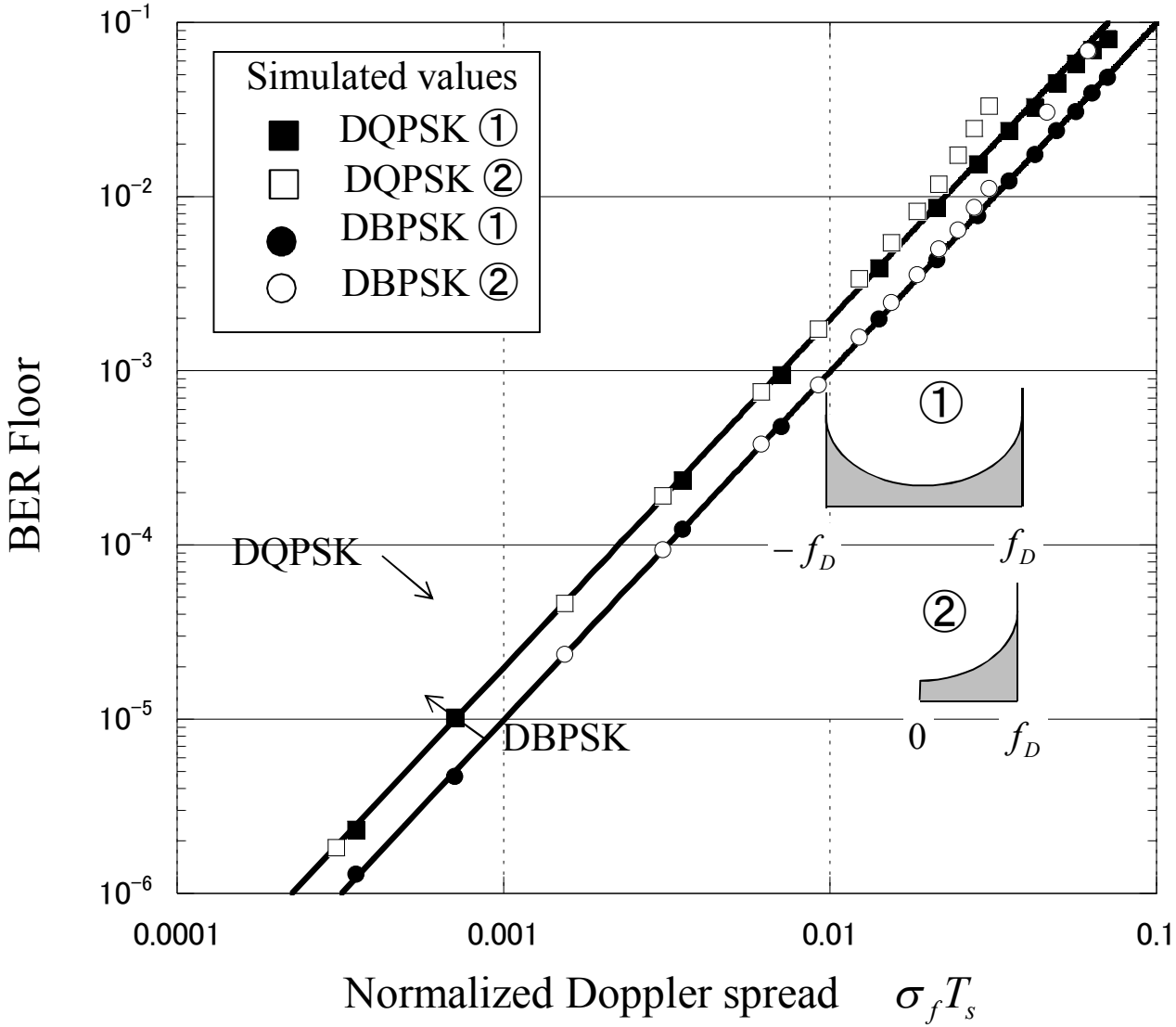
最大ドップラー周波数 f_D より、ドップラースプレッド σ_f の方が本質的なパラメータ

Irreducible BER
due to Doppler spread

$$P_{e,DBPSK} \approx \left(\pi \sigma_f T_s\right)^2$$

$$P_{e,DQPSK} \approx 2\left(\pi \sigma_f T_s\right)^2$$

高速フェージング環境におけるBERのフロア値
BER floor due to fast fading



BERのフロア値は、ドップラースペクトルの形状依存性が小さく、正規化ドップラースプレッド $\sigma_f T_s$ の値で定まる

正規化ドップラースプレッド $\sigma_f T_s$ の値が1に近づくほどフロア値が大きくなる

For realizing error-free communication,
Is the following condition truly necessary?
以下の式が、高速フェージング下において良好な通信を
実現するための究極的な条件か？

$$\sigma_f T_s << 1$$

The answer is ***"No"***.

例えば、シンボル周期を短くして伝送することで乗り越えられる

For example, shorter symbol transmission
such as spectrum spreading

（広帯域化、スペクトル拡散など）

Error-free condition against delay spread

$$\sigma_\tau / T_s << 1$$

However, this condition can be overcome
if the following condition is maintained.
上記の条件はいくらでも緩和できるが、ただし、以下の条件が必要

$$\sigma_f T_s << 1$$

（時間をかけて処理するので、その間、
環境に時間的変化があっては困る）

Error-free condition against Doppler spread

$$\sigma_f T_s << 1$$

However, this condition can be overcome
if the following condition is maintained.
上記の条件はいくらでも緩和できるが、ただし、以下の条件が必要

$$\sigma_\tau / T_s << 1$$

（広帯域化して処理するので、その間、
環境に周波数歪があっては困る）

Summary

遅延のばらつきによる符号間干渉誤りが発生しない条件

$$\sigma_\tau / T_s << 1$$

ドップラーシフトの値のばらつき（位相変化のばらつき）による誤りが発生しない条件

$$\sigma_f T_s << 1$$

これらは何も対策をしないとこういうことになる、という意味で、まだ、限界ではない。二つを一つの式で結ぶと、

$$\sigma_\tau << T_s << \frac{1}{\sigma_f}$$

真の物理限界は、電波伝搬環境のみで決まり

左右の式をつないで得られる

$$\sigma_f \sigma_\tau << 1$$

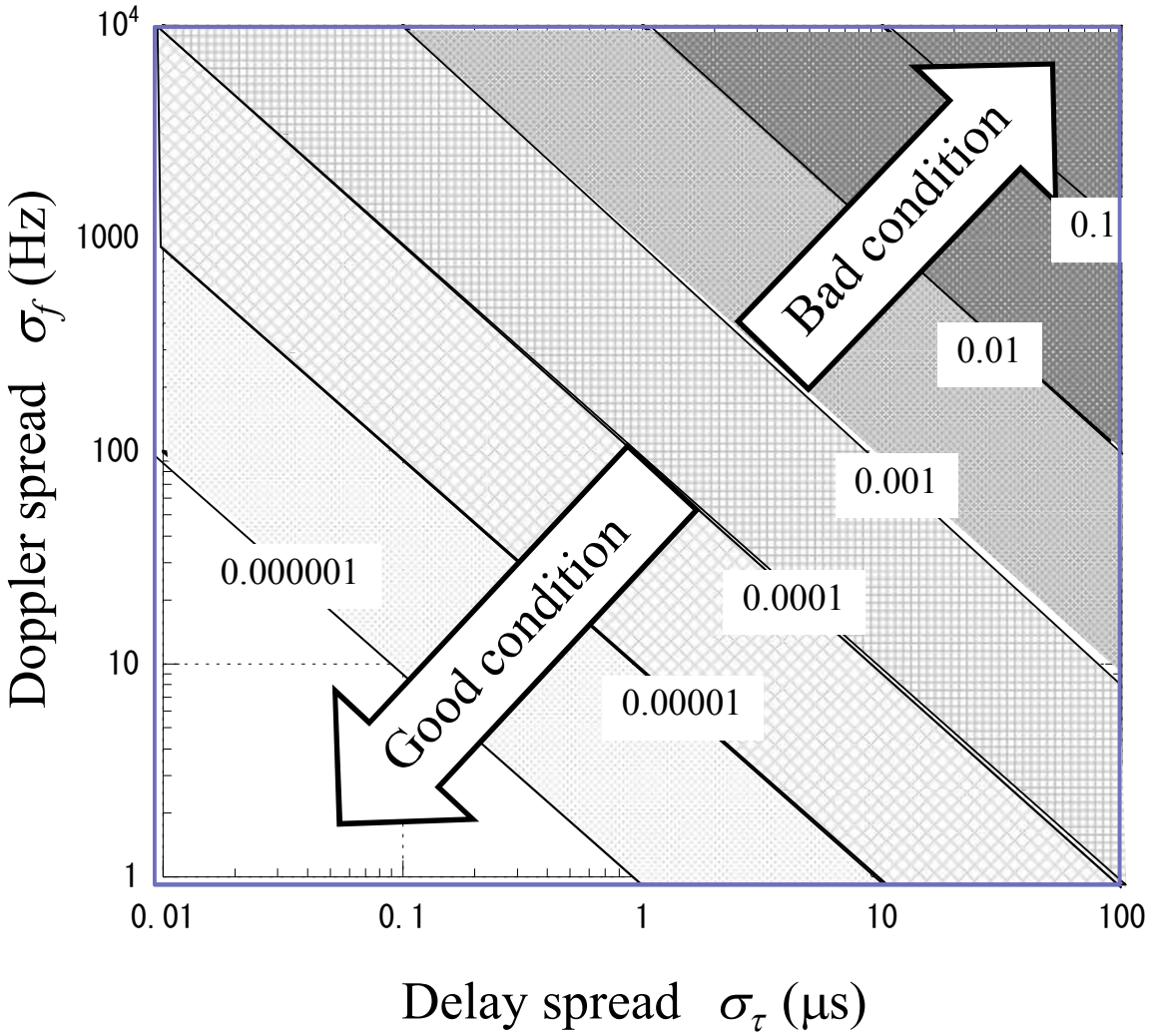
究極の通信可能条件？？

情報伝送の電波伝搬特性依存性

$\sigma_f T_s << 1$ ＼ $\sigma_\tau / T_s << 1$	満足	不満足
満足	未対策で 情報伝送可	周波数選択性フェージング 符号間干渉誤り発生 対策：等化器、OFDM （信号の狭帯域化）
不満足	ファーストフェージング 位相変動誤り発生 対策：スペクトル拡散等 （信号の広帯域化？）	$\sigma_f \sigma_\tau << 1$ 不満足領域 （良好な通信不能？ 対策：お手上げ？ 指向性アンテナ・ 空間信号処理（MIMO） など、別次元からの アプローチは可）

$\sigma_f \sigma_\tau = 0.0001 \sim 0.001$

（border area：良好通信の可否の境界エリア）



Example of extremely severe multipath environment
ボーダーエリアに近い電波伝搬環境とは？

$$\sigma_f \sigma_\tau = 0.001$$

for example

$$\sigma_f = 1\text{kHz}$$

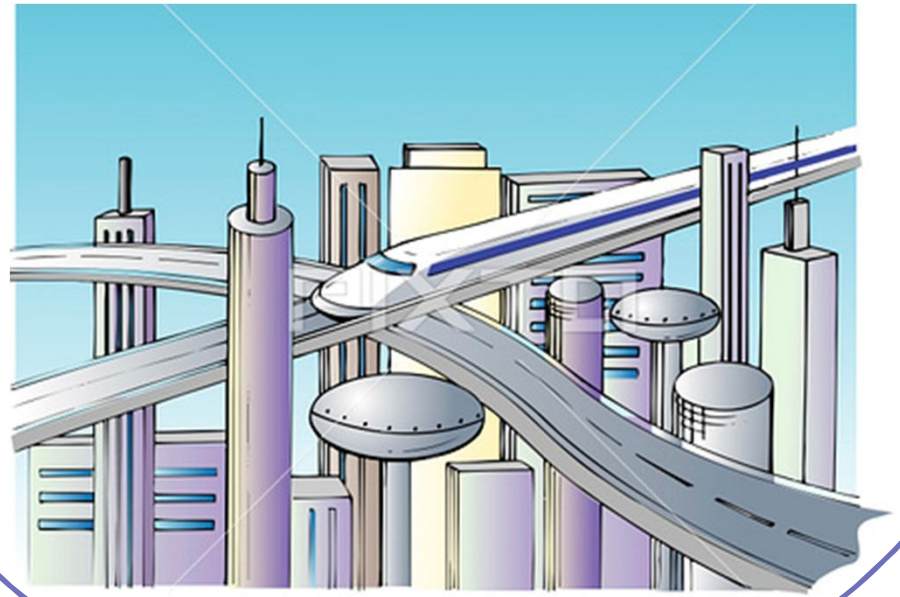
$$\times$$

$$\sigma_\tau = 1\mu\text{s}$$

f= 10 GHz , v=100km/h

f= 5GHz, v=100km/h for V2V comm.

f= 2 GHz , v=500km/h

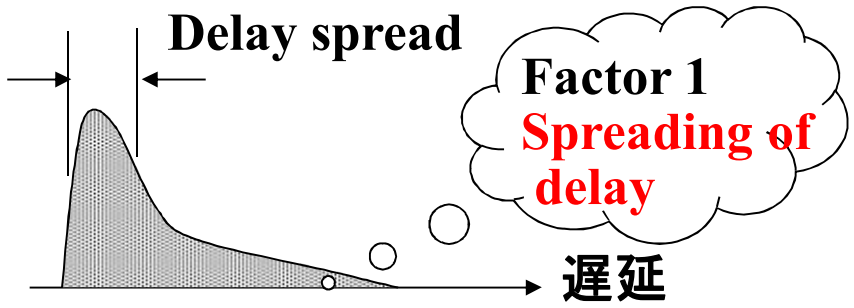


（インターネット画像より）

現実には、この辺りに
限界があるのではないだろうか？
Is the limit here?

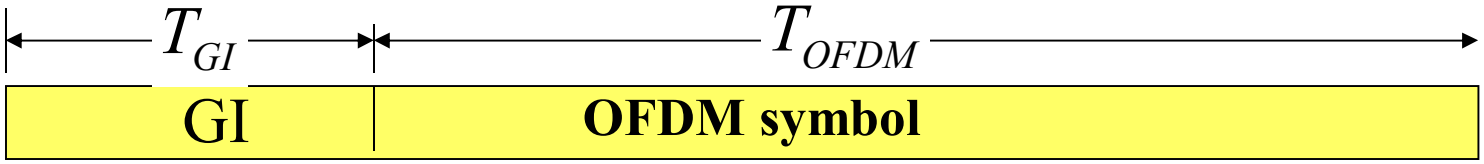
OFDMは電波伝搬を克服したか？
Does OFDM overcome propagation issue?

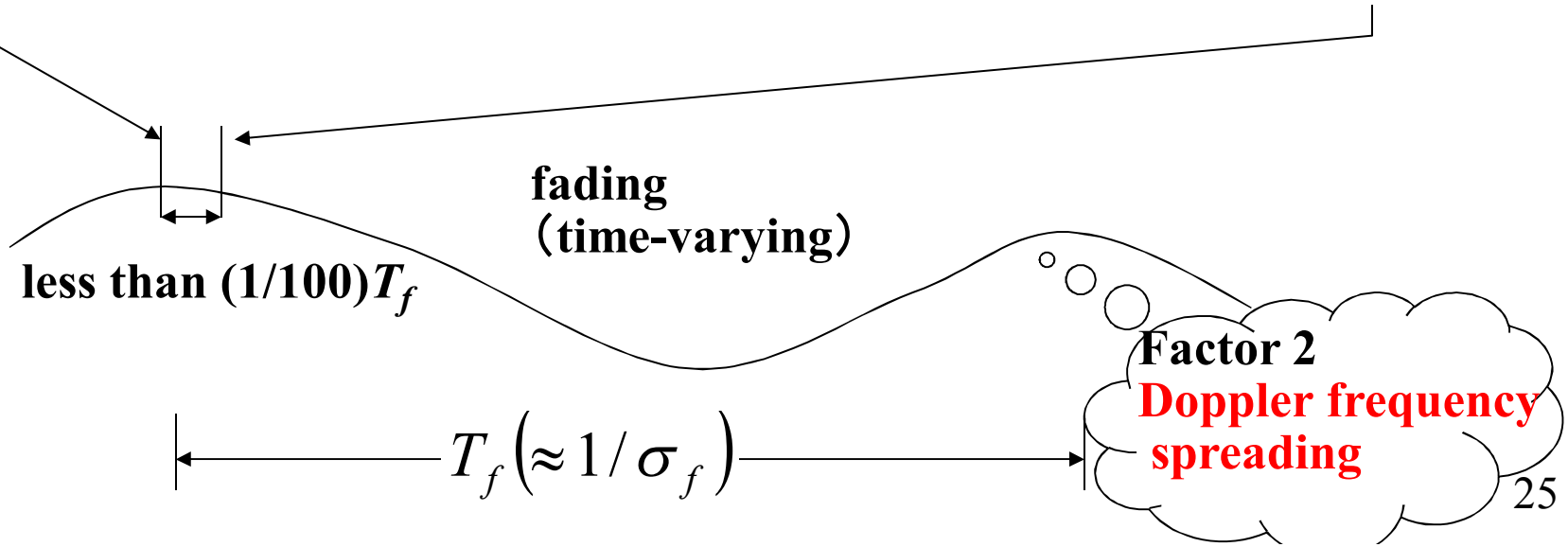
Relation between propagation parameters and system ones
OFDMが良好に動作する伝搬環境条件



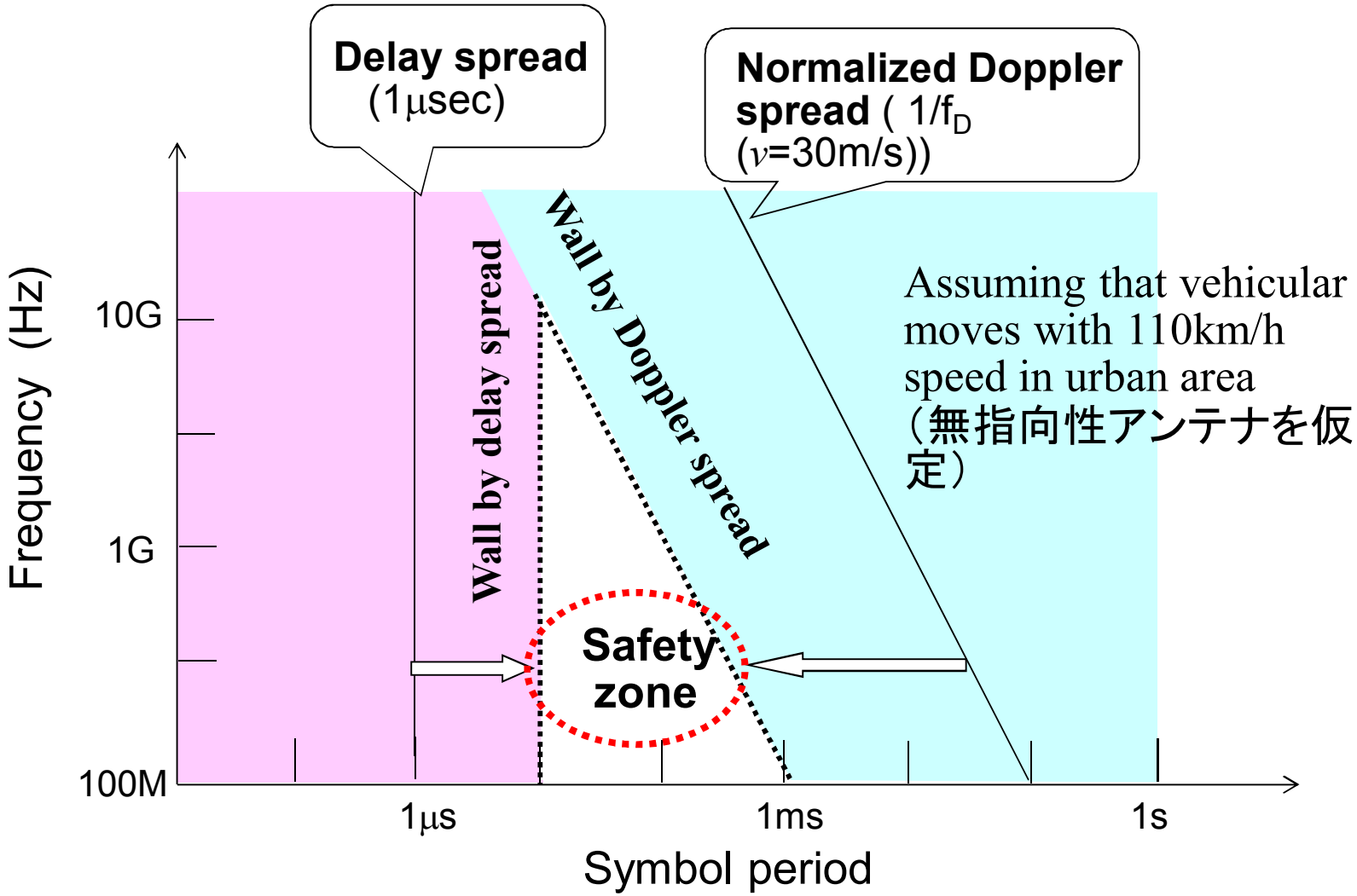
Necessary Condition for OFDM

$$\sigma_\tau << T_{GI} < T_{OFDM\,s} << \frac{1}{\sigma_f}$$





OFDM伝送における伝搬制約条件（遅延広がりの壁とドップラー広がりの壁の狭間）



OFDM恐るべし

$$\sigma_\tau << \underbrace{T_{OFDM}} << \frac{1}{\sigma_f}$$

If this condition is satisfied, then …

$$\Downarrow$$

$$NT_0$$

$$B \approx 1/T_0$$

$$\Downarrow$$

$$N/B$$

$$\Downarrow$$

$$\underbrace{B\sigma_\tau << N << \frac{B}{\sigma_f}}$$

$$\Downarrow$$

$$N \propto B$$

By controlling the value of N appropriately, any wideband signal transmission without limit can be done
帯域制限の壁がなくなっている

OFDMは電波伝搬（マルチパスフェージング）を克服したか？
Did OFDM conquer wave the propagation problem?

Yes Under the condition of $\sigma_f \sigma_\tau << 1$

any wideband signal transmission without limit can be done

No However, the physical limit condition itself

$$\sigma_f \sigma_\tau << 1$$

cannot be overcome.

Use of a directivity antenna and/or use of array antenna can ease the physical limit of the data transmission.

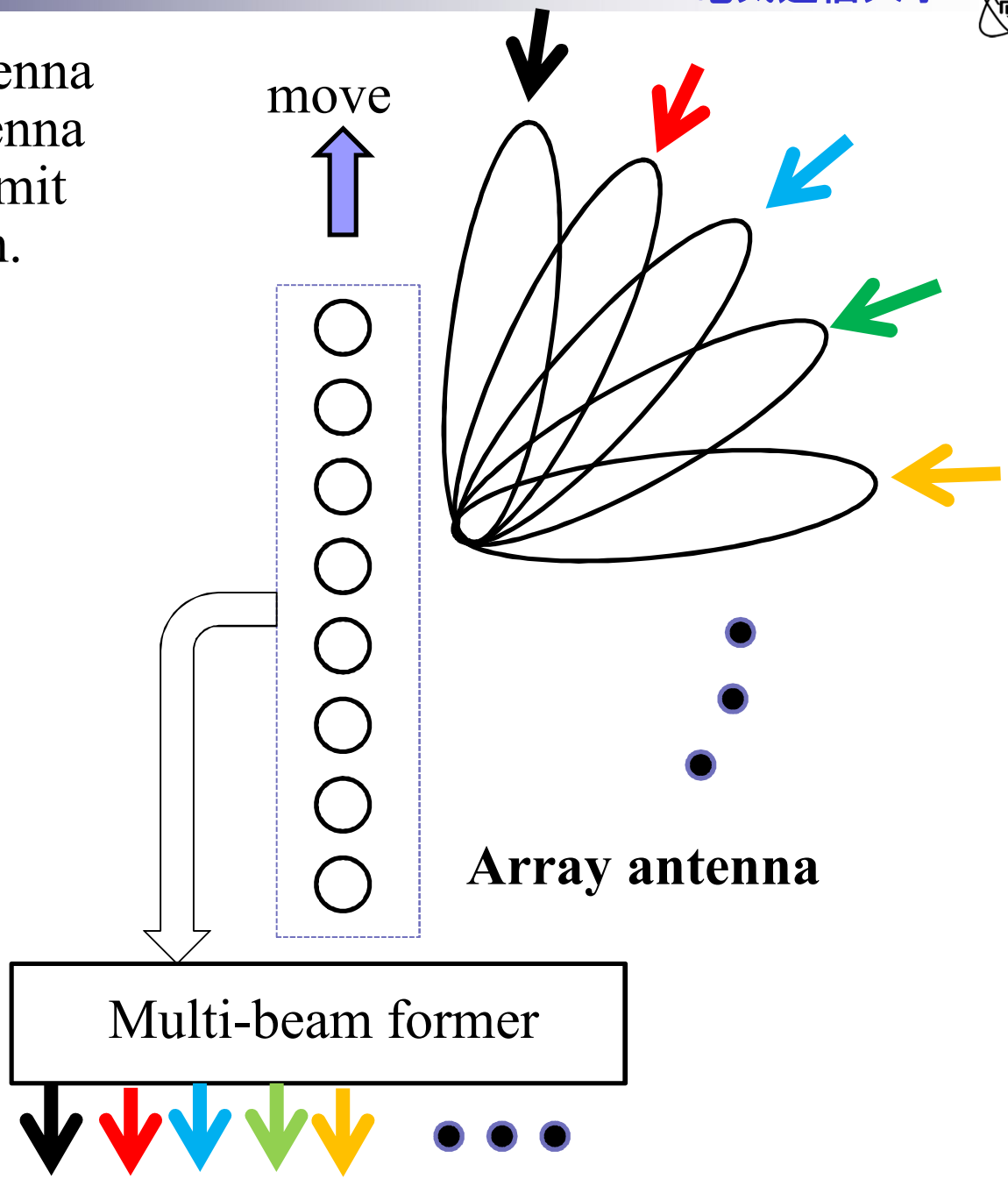
For example

Multibeam reception can reduece each Doppler spread.

↓

The physical limit can be loosened.

$$\sigma_f \Rightarrow \sigma_f / N$$



情報伝送の物理限界条件
Absolute condition for error-free data transmission

$$\sigma_f \sigma_\tau << 1$$

←Error free transmission condition
【System matter】

Propagation parameters

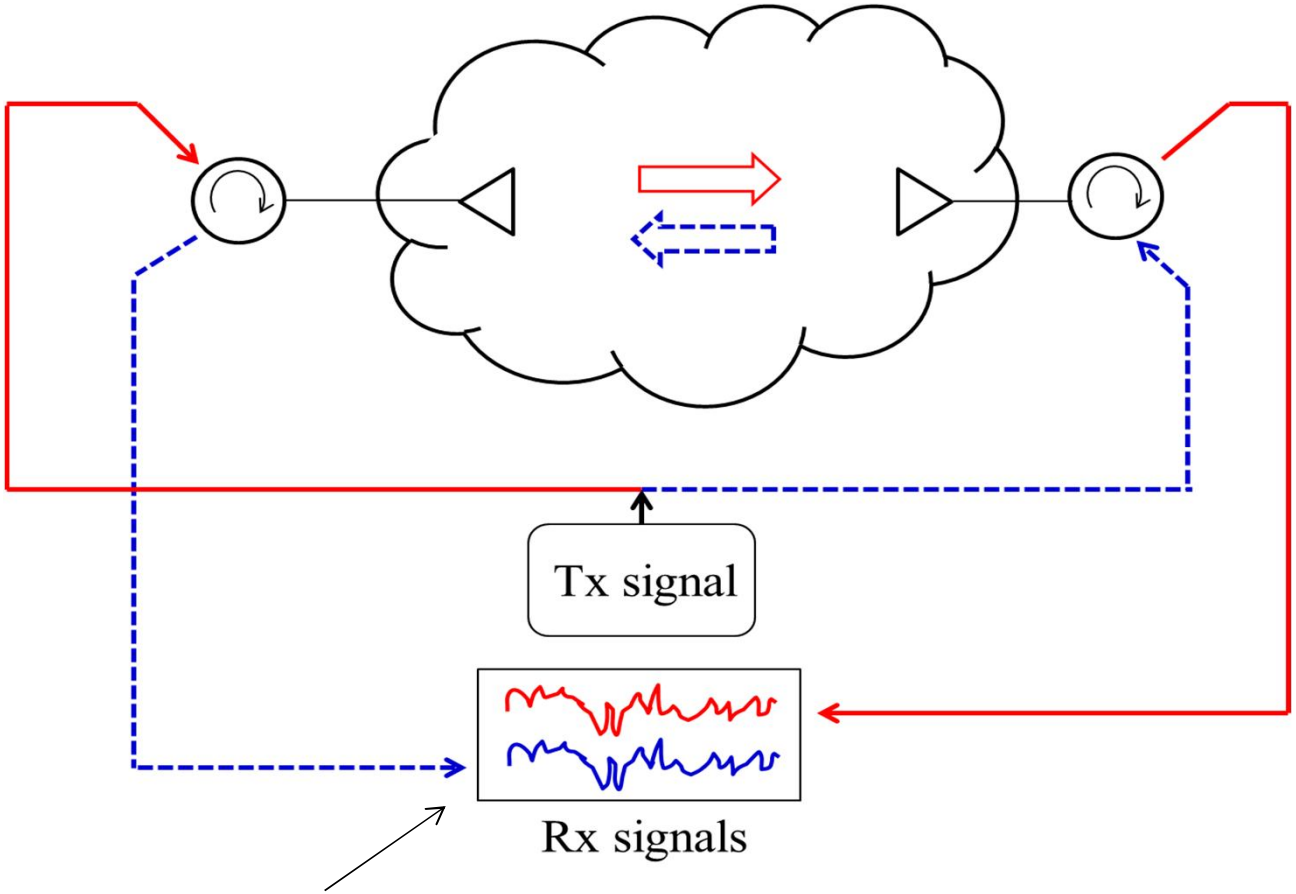
↑

Antenna characteristics dependent

A・P・S 三位一体の研究が必要
Trinity research concerning A・P・S

この条件に縛られる問題は、
ここでは議論しなかった別のところにも現れている
There is another case for appearing the same condition.

双方向通信における伝送特性の可逆性（Reciprocity）問題



両リンクで同じ変動になるか？

→ 遅延広がりとドップラー広がりが共に存在するマルチパス環境では可逆性は成立しない

→ 近似的に成立するための条件 $\sigma_f \sigma_\tau << 1$

Thank you very much for your kind attention
KAPASAYA