

二重選択性フェージング環境の通信路容量 [II]

～ 電波伝搬と通信性能の究極的な関係
について ～

唐沢 好男

概要

この発表は、前回（AP研1月）の続きである。

通信路が定常状態にあるときの雑音下での情報伝送の物理限界は、シャノンの通信路容量の式によって定められている。しかし、これには電波伝搬の要因が含まれていない。すなわち、究極の情報伝送は、統計多重効果によって、十分に長い時間（その極限は無限の時間）を使つての符号化や信号処理ができるという前提条件に立っている。これに対して、電波伝搬はその前提を妨げる働きをするため、シャノンの通路容量定理とは別の視点での情報伝送の物理限界がある。

この問題に対して、前回発表（AP研1月）では、周波数及び時間領域での選択性を有するレイリーフェージング環境において、従来のシャノンの通信路容量の式に、伝搬パラメータを組み入れた新たな通信路容量表現式を提示した。本発表では、従来手法である情報理論的アプローチと前稿提案の統計的アプローチの整合性を調べる。また、得られた結果に対して、二つのケースを想定し、通信路容量視点での電波伝搬と通信性能の関係を示す。

発表の内容

1) 対象とする電波伝搬環境とキーワード

2) 電波伝搬環境の通信限界を定める指標: 通信路容量

- 従来の取り組み(情報理論的アプローチ)
- 新たな取り組み: 統計的アプローチ(前回発表の概要)
- 電波伝搬と通信限界

2つのケースを想定した検討

- 従来手法と提案手法の整合性

3) まとめ

電波伝搬環境の情報伝送能力を**数値指標**で表したい。
指標として何が良いか？



通信路容量 (Channel capacity) が良い



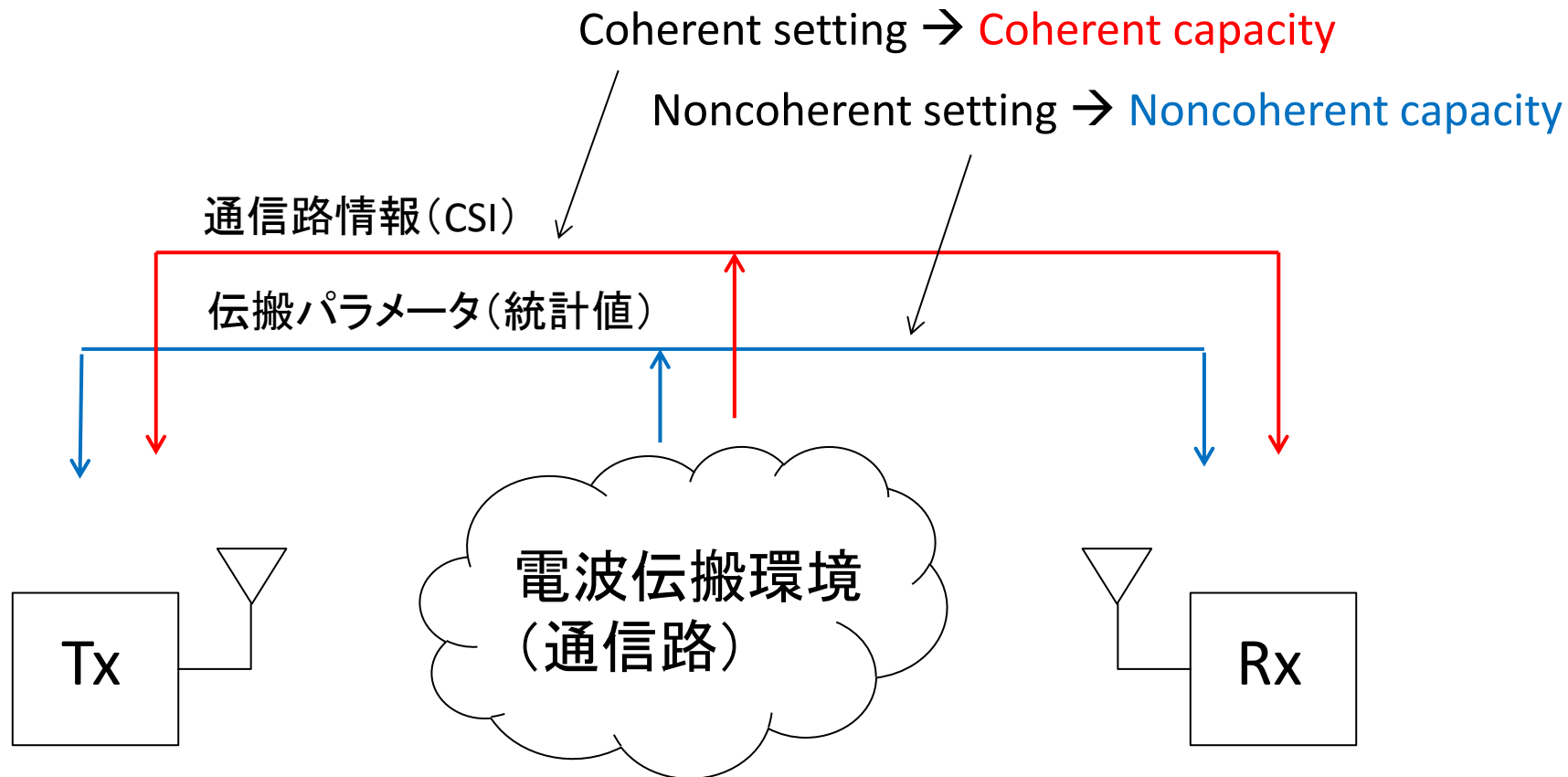
シャノンの情報理論から生み出された**最大相互情報量**
システムパラメータ (信号電力や帯域幅) で規定する条件のもと、
最適に設計された信号を無限の時間かけて伝送するときに得られる
誤りなく送ることができる伝送速度の上限 (単位: bps)



メリット: 通信方式 (変復調方式や誤り制御方式) に依存しない
汎用性のある数値

通信路容量

Coherent Capacity と Noncoherent Capacity



以降では、Noncoherent capacity を対象とする

こういう研究はどの分野で行われているか？ → 情報理論 (IEEE Trans. IT)

遅延広がり現象

$\tau_{\min}, \tau_{\max}$ The minimum and maximum delay

$$\tau_0 \equiv \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{2}$$

σ_{τ} Delay spread (遅延広がりの標準偏差)

$p(\tau)$ Delay profile

ドップラー周波数広がり現象

$\nu_{\min}, \nu_{\max}$ The minimum and maximum Doppler shift

$$\nu_0 \equiv \frac{\nu_{\max} - \nu_{\min}}{2}$$

σ_{ν} Doppler spread (ドップラー広がりの標準偏差)

$S(\nu)$ Power spectral density

電波伝搬環境の分類: Underspread と Overspread

スプレッドファクタ (**Spread factor**)

$$\Delta_H \equiv (\nu_{\max} - \nu_{\min})(\tau_{\max} - \tau_{\min}) = 4\nu_0\tau_0 \quad (\text{従来の定義})$$

$\sigma_\nu\sigma_\tau$ (我々の論文で用いている)

Overspread $\Delta_H > 1$ (通信が成立しない環境)

Underspread $\Delta_H < 1$

- ・通信不成立
- ・遅延とドップラーの同時測定不可
- ・UL/DLの可逆性(reciprocity)の破綻

Highly underspread $\Delta_H \ll 1$ or $\sigma_\nu\sigma_\tau \ll 1$

現実の電波伝搬環境は全て、これに分類される
($\Delta_H: 10^{-7} \sim 10^{-3}$)
以降の解析もこの環境 ($\sigma_\nu\sigma_\tau \leq 0.01$)

フェージング環境の通信路容量解析

情報理論的アプローチと統計モデル的アプローチ

通信路容量 解析

情報理論的アプローチ(従来手法)

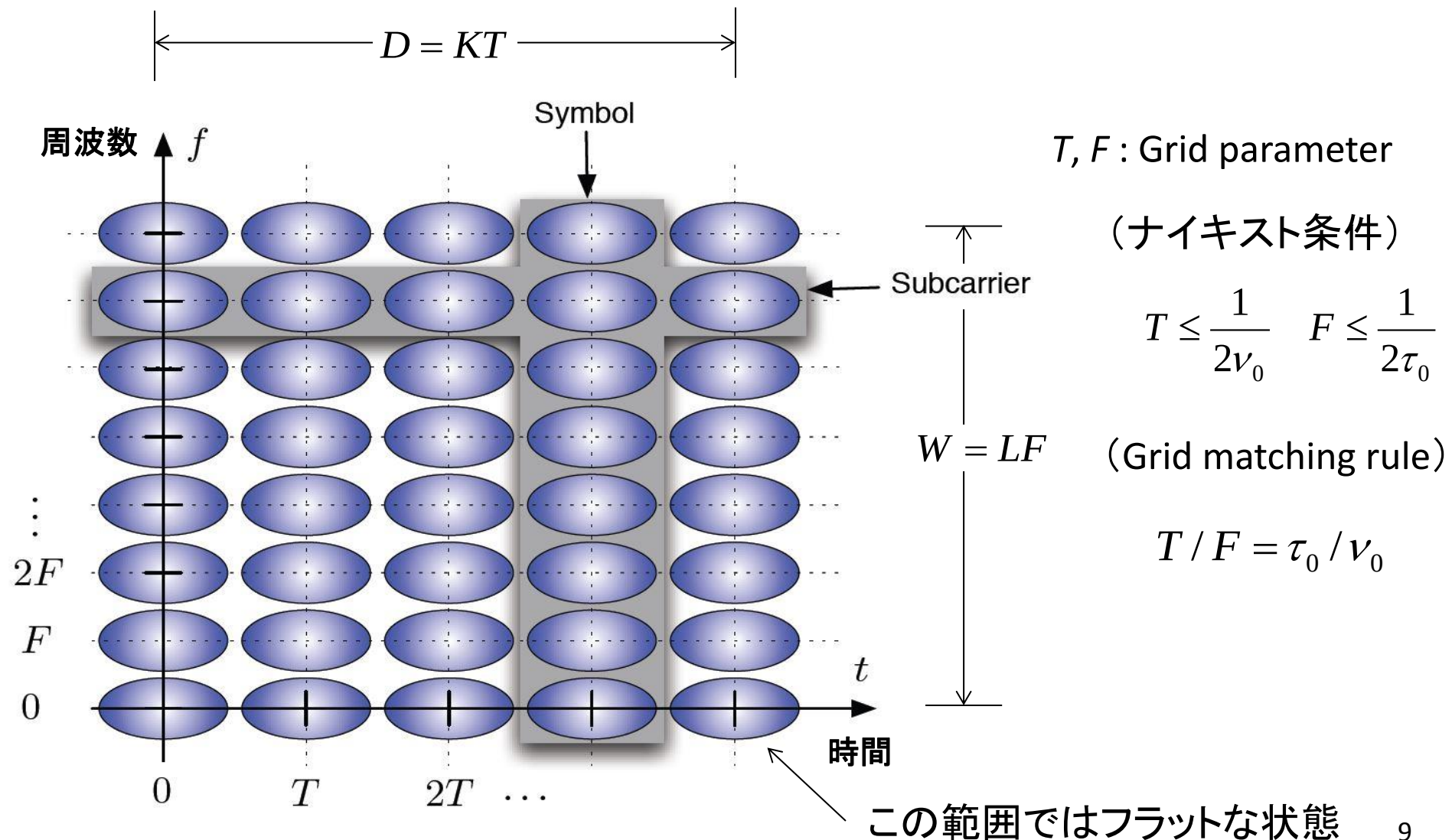
- 連続時変の入出力信号をWeyl-Heisenberg (WH) 直交系で離散化(グリッドパラメータ: T and F) [Durisi et al. 2010]
- 離散化を最適化し、相互情報量を求めてゆく緻密な手法
- 使いやすい、伝搬パラメータとの関係が見える閉形式の表現はまだ得られていない

統計モデル的アプローチ(提案手法)

- 直観的方法なので、厳密性を欠く
- 伝搬パラメータとの関係がきれいに見える閉形式の簡易な表現式が得られる

従来手法(情報理論的アプローチ: Durisi等の方法)の入力口

送信信号のWeyl-Heisenberg (WH) 系での離散化 [OFDMイメージ]



送受信信号のWeyl-Heisenberg (WH) 系での離散化

送信信号の離散化

$$s(t) = \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{l=0}^{L-1} s[k, l] u_{k,l}(t) \quad u_{k,l}(t) = u(t - kT) e^{j2\pi Ft}$$

離散化された受信信号の $[k, l]$ 成分

$$r[k, l] = \underbrace{h[k, l] s[k, l]}_{\text{signal component}} + \underbrace{\sum_{\substack{k'=0 \\ (k', l') \neq (k, l)}}^{K-1} \sum_{l'=0}^{L-1} z[k', l', k, l] s[k', l']}_{\text{self-interference component (ISI+ICI)}} + \underbrace{n[k, l]}_{\text{noise component (AWGN)}}$$

Assumption of noise-like behavior

通信路容量

$$C \equiv \lim_{K \rightarrow \infty} \frac{1}{KT} \sup_{f(s)} I(\mathbf{r}, \mathbf{s})$$

電力制限条件下で、 u, T, F に対する最適化を行い、
上限や下限を求める式を導出(以下略)
導出は高度に数学的、得られた式は計算に不適

フェージング環境の通信路容量解析

情報理論的アプローチと統計モデル的アプローチ

通信路容量 解析

情報理論的アプローチ(従来手法)

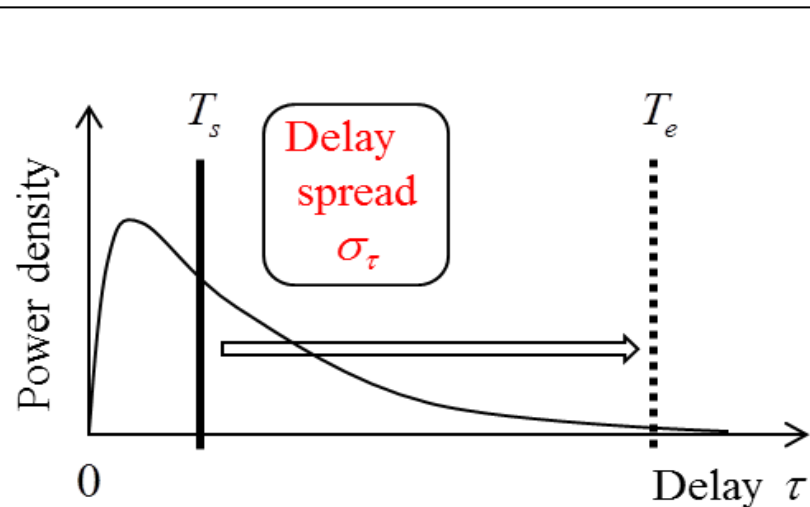
- 連続時変の入出力信号をWeyl-Heisenberg (WH) 直交系で離散化(グリッドパラメータ: T and F) [Durisi et al. 2010]
- 離散化を最適化し、相互情報量を求めてゆく緻密な手法
- 使いやすい、伝搬パラメータとの関係が見える閉形式の表現はまだ得られていない

統計モデル的アプローチ(提案手法)

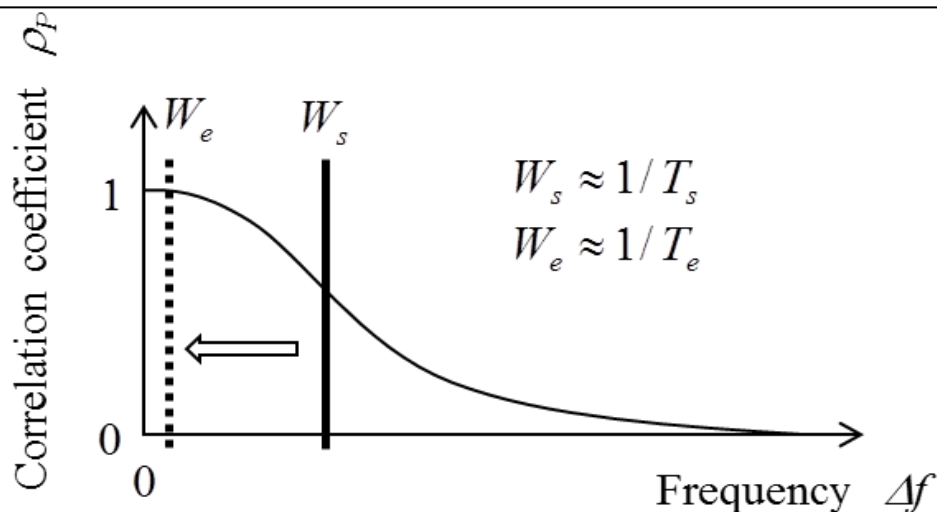
- 直観的方法なので、厳密性を欠く
- 伝搬パラメータとの関係がきれいに見える閉形式の簡易な表現式が得られる

提案法の基本的考え方

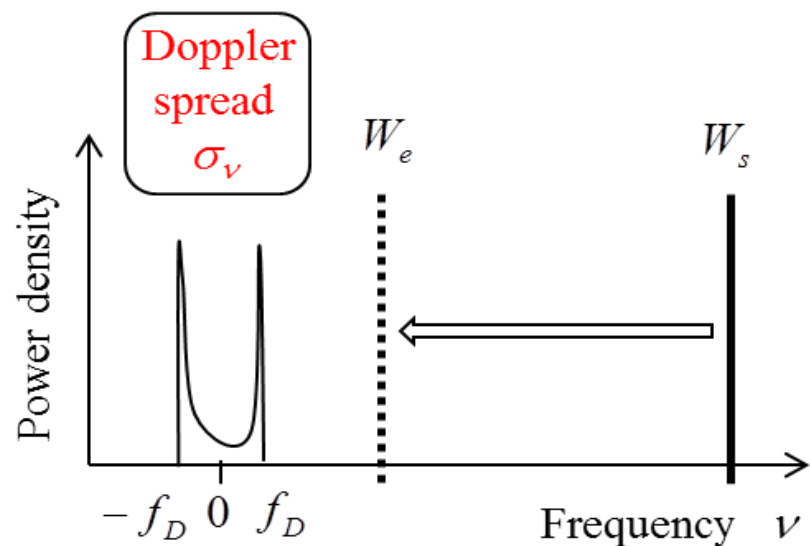
二重選択性フェージング環境の時間領域と周波数領域での統計的關係



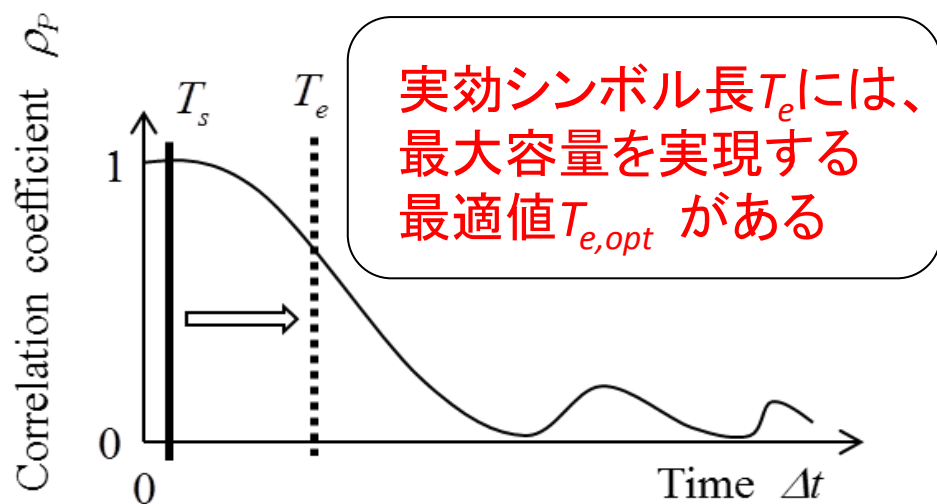
(a) 遅延プロファイル $p(\tau)$ 【遅延現象】



(b) 周波数相関 $\rho_P^{(\text{delay})}$



(c) ドップラースペクトル $S(\nu)$ 【ドップラー現象】



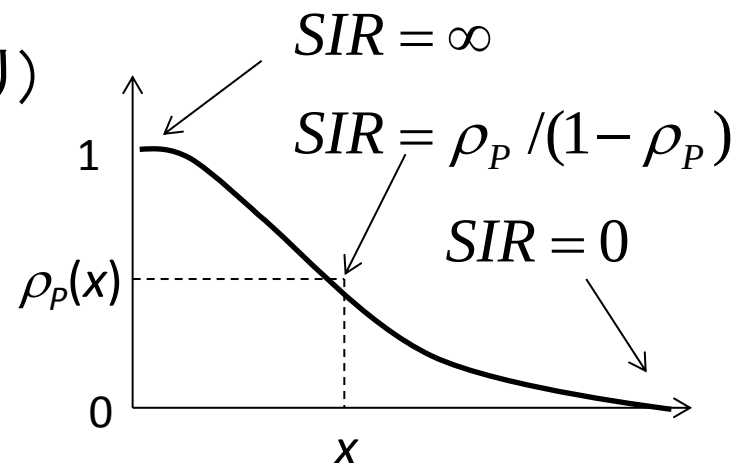
(d) 自己相関 $\rho_P^{(\text{Doppler})}$

2つの相関特性から各SIRを推定し、その和の最大値を求める

SIR算出の基本式

$$SIR = \frac{|\rho_a|^2}{1 - |\rho_a|^2} = \frac{\rho_P}{1 - \rho_P}$$

($\rho_P = |\rho_a|^2$ より)



遅延とドップラーのSIR成分

$$SIR_{delay}(T_e) = \frac{\rho_P^{(delay)}(\Delta f)}{1 - \rho_P^{(delay)}(\Delta f)} \Big|_{\Delta f = 1/T_e} \approx \frac{T_e^2}{(2\pi\sigma_\tau)^2}$$

$$SIR_{Doppler}(T_e) = \frac{\rho_P^{(Doppler)}(\Delta t)}{1 - \rho_P^{(Doppler)}(\Delta t)} \Big|_{\Delta t = T_e} \approx \frac{1}{(2\pi\sigma_v T_e)^2}$$

SIRの最大値は？

$$\frac{\partial SIR}{\partial T_e} \left\{ = \left(\frac{1}{SIR_{delay}} + \frac{1}{SIR_{Doppler}} \right)^{-1} \right\} = 0$$

より

$$\begin{cases} T_{e,opt} = \sqrt{\sigma_\tau / \sigma_v} \\ SIR_{max} = \frac{1}{8\pi^2 \sigma_v \sigma_\tau} \end{cases}$$

二重選択性フェーディング環境の通信路容量 (Noncoherent Capacity in Highly-Underspread WSSUS Channel)

システムパラメータの定め方に関して、二つのケースを考える

Case 1 SNRを一定に保った伝送
(信号電力が帯域幅に比例)

Case 2 送信電力を一定に保った伝送
(単位周波数あたりの情報量(情報密度)が帯域幅に反比例)

二重選択性フェージング環境の通信路容量 (Noncoherent Capacity in Highly-Underspread WSSUS Channel)

Case 1 SNRを一定に保った伝送(信号電力が帯域幅に比例)

$$C \approx W_s \log_2 \left(1 + \frac{1}{\Gamma_0^{-1} + S I R_{\max}^{-1}} \right)$$

$$\sigma_v \sigma_\tau \leq 0.01$$

$$= W_s \log_2 \left(1 + \frac{1}{\Gamma_0^{-1} + 8\pi^2 \sigma_v \sigma_\tau} \right) \equiv W_s C_0$$

C_0 : 正規化通信路容量
(bps/Hz)

通信路容量のフロア値

$$C_{0, \text{floor}} \equiv \lim_{\Gamma_0 \rightarrow \infty} C_0 = \log_2 \left(1 + \frac{1}{8\pi^2 \sigma_f \sigma_\tau} \right)$$

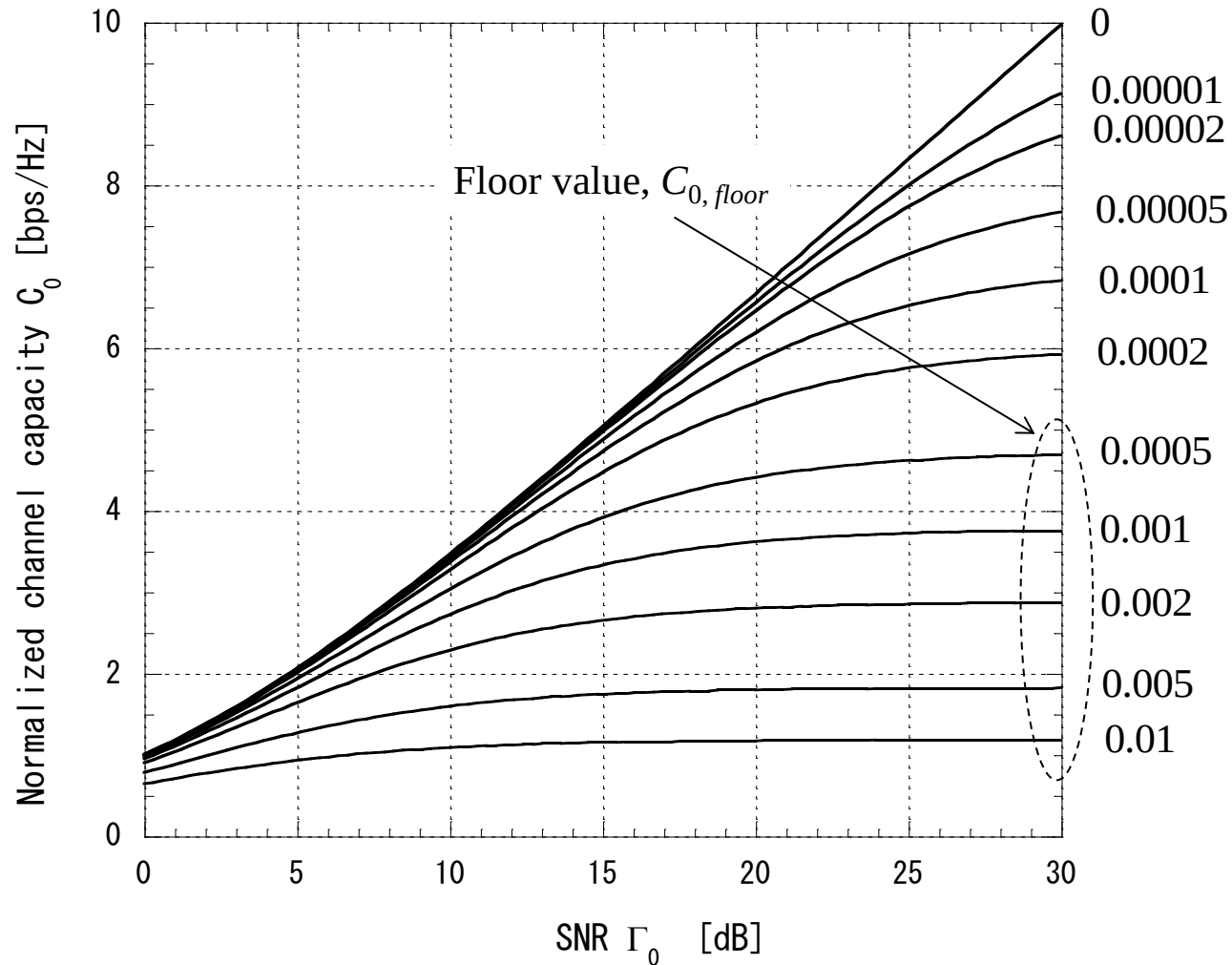
結論

情報伝送の限界を伝搬パラメータを用いて表すことができた。
SNRを一定とした伝送では、スプレッドファクタ $\sigma_v \sigma_\tau$ によって伝送限界が定まる(等価干渉波成分による通信路容量のフロア値が生じる)

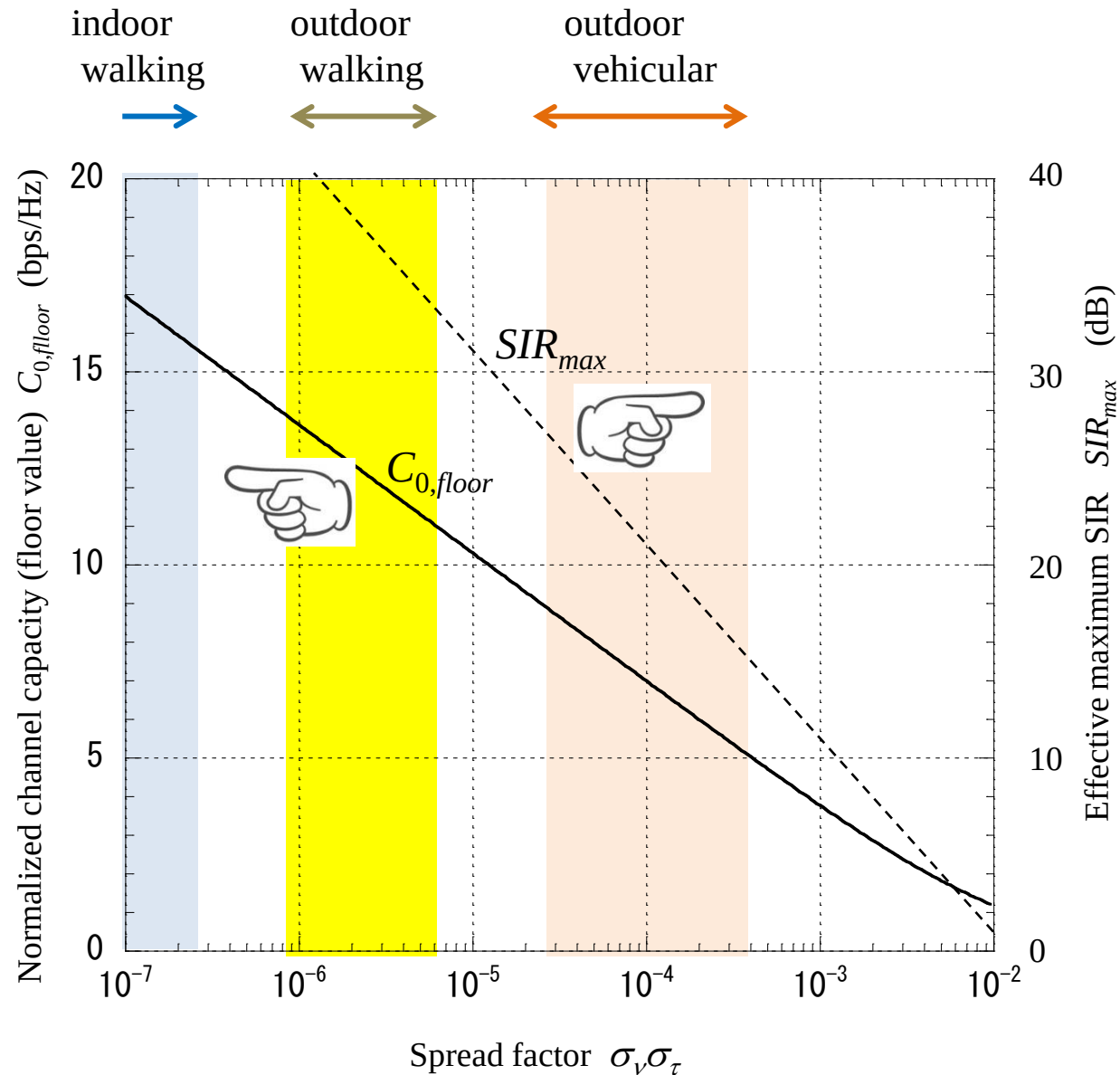
正規化通信路容量 C_0 のSNR特性

スプレッドファクタ

$$\sigma_v \sigma_\tau =$$



スプレッドファクタ vs 正規化通信路容量フロア値と最大SIR



伝搬環境の通信路容量: もう一つの見方

Case 2 送信電力を一定にし、帯域幅を広げてゆくと

$$C_2 \approx W_s \log_2 \left(1 + \frac{1}{W_s P_{N0} / P_S + 8\pi^2 \sigma_v \sigma_\tau} \right)$$

P_{N0} : 雑音電力密度
(1Hz当たりの雑音電力)

$$\lim_{W_s \rightarrow \infty} C_2 \approx \frac{1}{\log_e(2)} \frac{P_S}{P_{N0}} = C_{AWGN}$$

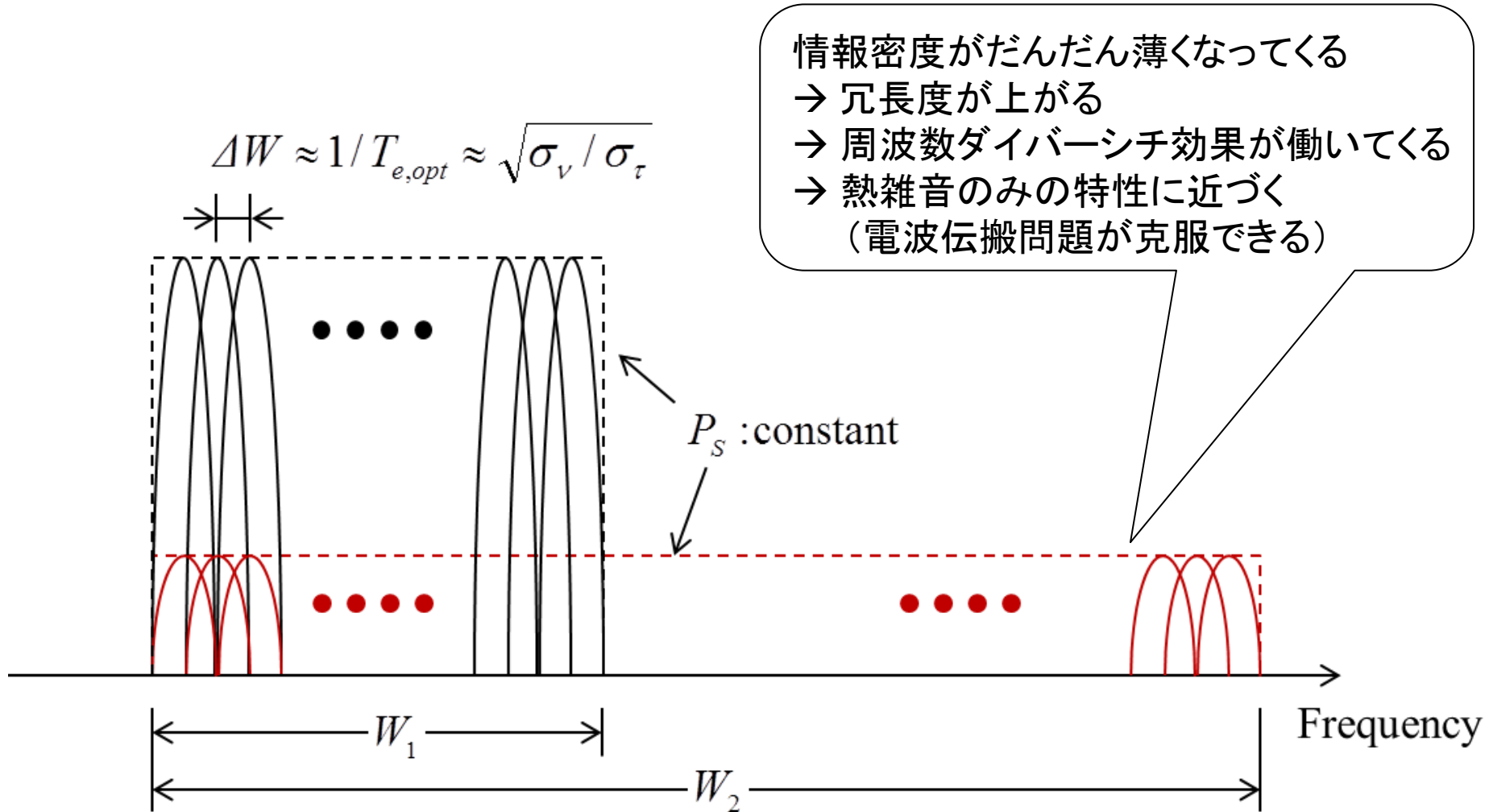
熱雑音のみのときの
通信路容量

結論

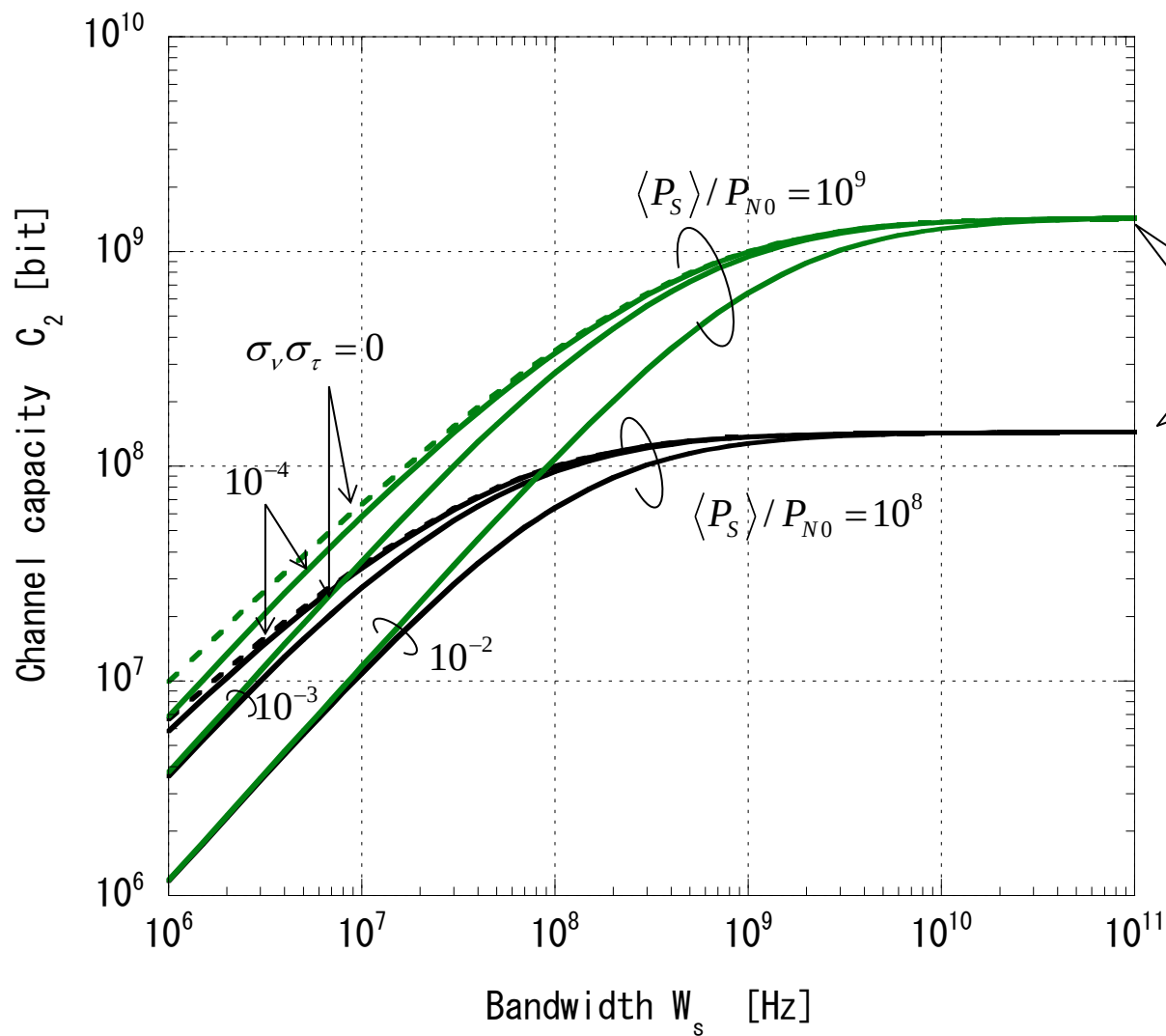
信号電力を一定とした伝送 (Case 2) では、帯域幅を十分大きくとることによって、熱雑音で決まる通信路容量に収束し、伝搬問題が克服できる。

(この性質については、[Pierce, 1966. IEEE Trans. IT]で示されている)

電力一定のまま、帯域幅を広げてゆくと

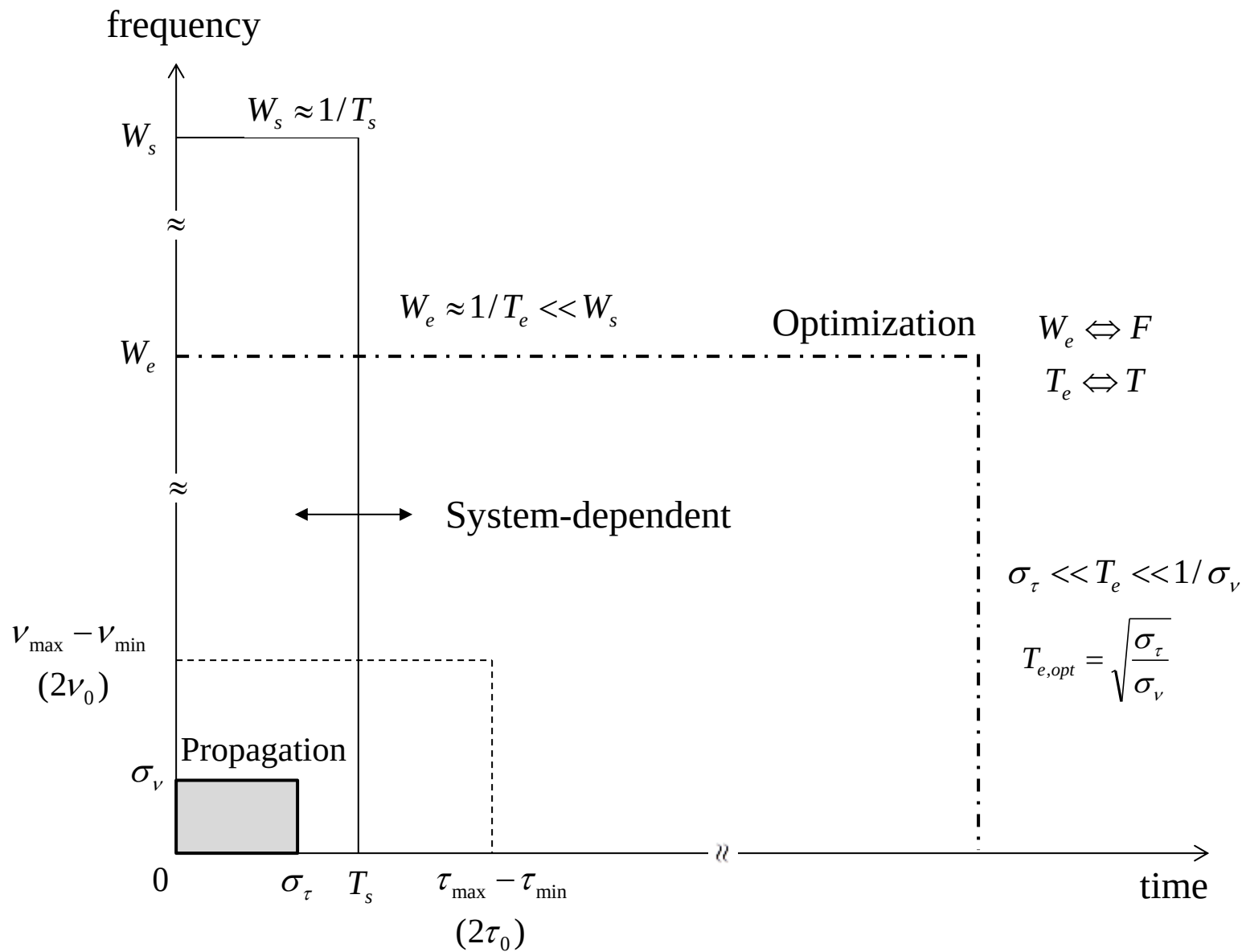


電力一定条件(Case 2)での通信路容量と帯域幅の関係



熱雑音特性に収束し
電波伝搬劣化が
克服されている!

伝搬パラメータとシステムパラメータとの関連



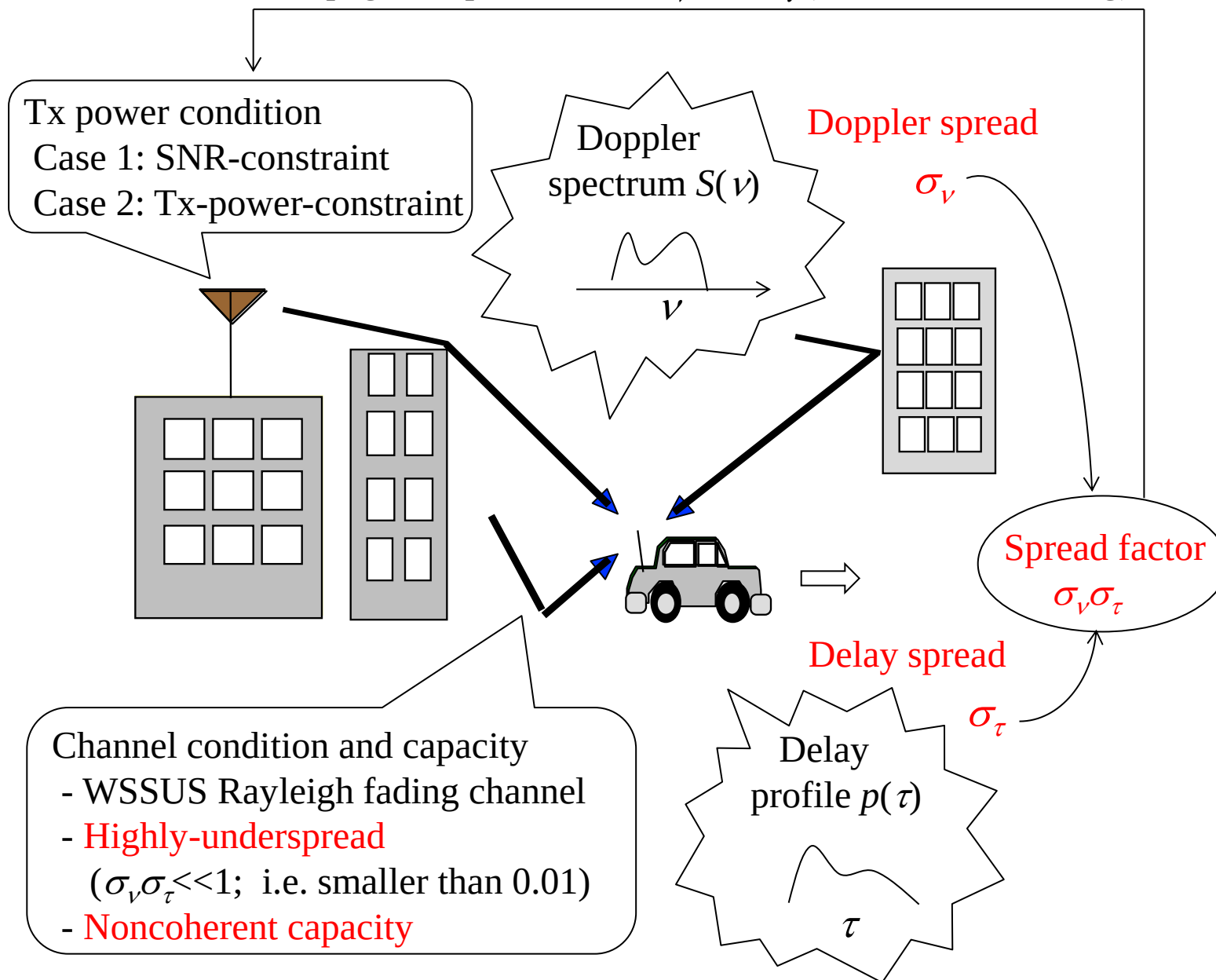
情報理論的アプローチと統計モデルアプローチの基本部分の整合性

	情報理論的アプローチ	統計モデル的アプローチ
伝搬パラメータ	最大変化幅 $2\tau_0, 2\nu_0$	標準偏差 σ_τ, σ_ν
スプレッドファクタ	$4\nu_0\tau_0 (\equiv \Delta_H)$	$\sigma_\nu\sigma_\tau$
システム条件	平均電力一定、ピーク電力制限	
最適化	WH直交系での離散化 grid parameter: T, F $T \leq 1/(2\nu_0), F \leq 1/(2\tau_0)$ (ナイキスト条件) $TF \geq 1$ (信号設計条件) $T/F = \tau_0/\nu_0$ (grid matching rule)	SIR最大化実効シンボル長 $T_{e,opt} = \sqrt{\sigma_\tau / \sigma_\nu}$ ↓ $T_e \rightarrow T, W_e \rightarrow F$ に対応 ↓ $W_e \approx 1/T_e$ より $T_{e,opt} / W_{e,opt} \approx \sigma_\tau / \sigma_\nu$

整合

本議論に登場したキーワードとそれらの関係

Propagation parameters: σ_v and σ_τ (Noncoherent setting)



まとめ

- 1) 伝搬環境の情報伝送能力を表す数値指標 → 通信路容量
- 2) 堅牢の城を真正面から攻める「情報理論的アプローチ(従来手法)」に対して搦め手から攻める「統計的アプローチ」により、電波伝搬環境の情報伝送能力を表す簡易な式を得た。【ここまで、前回発表】
- 3) 得られた式を用いて、2つのケースで評価した
 - Case 1: SN比を一定とした情報伝送
→ 限界は、スプレッドファクタ $\sigma_v \sigma_\tau$ によって定まる
 - Case 2: 送信電力を一定とした情報伝送
→ 帯域幅を十分広くとることによって、伝搬問題が克服できる
- 4) 従来手法とは、アプローチの仕方は異なるが、基本概念に共通性がある
- 5) 課題: アレーアンテナシステム(ダイバーシチやMIMO)での空間信号処理を含めたモデル化