

二重選択性フェージング環境の通信路容量

～ ワイヤレス通信の基本問題：
電波伝搬環境の情報伝送能力を表す
数値指標を求めて ～

唐沢 好男

概要

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から導かれた式によって定められる。しかし、この式には、電波伝搬の要因が含まれていない。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式とは別の視点での情報伝送の物理限界がある。どんなにSN比がよくても、通信方式を工夫しても情報伝送を成立させない条件（電波伝搬環境条件）である。

究極の目的は、電波伝搬環境の情報伝送能力を表す数値指標（Benchmark）を求めることである。これは、ワイヤレス通信の基本問題でもある。

このテーマは、従来より、情報理論の世界（論文誌IEEE Trans. Information Theory）で展開されていて、今日まで膨大な数の論文が発表されている。ここでの数値指標は、「通信路容量（Channel Capacity）」である。通信路容量はシャノンの情報理論における相互情報量の上限值であり、フェージングチャネルにおいても、その定式化に高度な数学を駆使しての理論が構築されつつある。しかし電波伝搬環境の情報伝送能力を表す指標、すなわち、通信路容量に対して、見通しの良い形での式表現にはまだ至っていない。

筆者は、従来の情報理論的アプローチとは異なる視点、すなわち、統計的視点から、この問題に挑戦している。本発表は、1月AP研（今回）と2月AP研（来月）に分けて行うが、本スライドは、その前半部である。

発表の内容

1) ワイヤレス通信と電波伝搬

2) 電波伝搬環境の通信限界を定める指標: 通信路容量

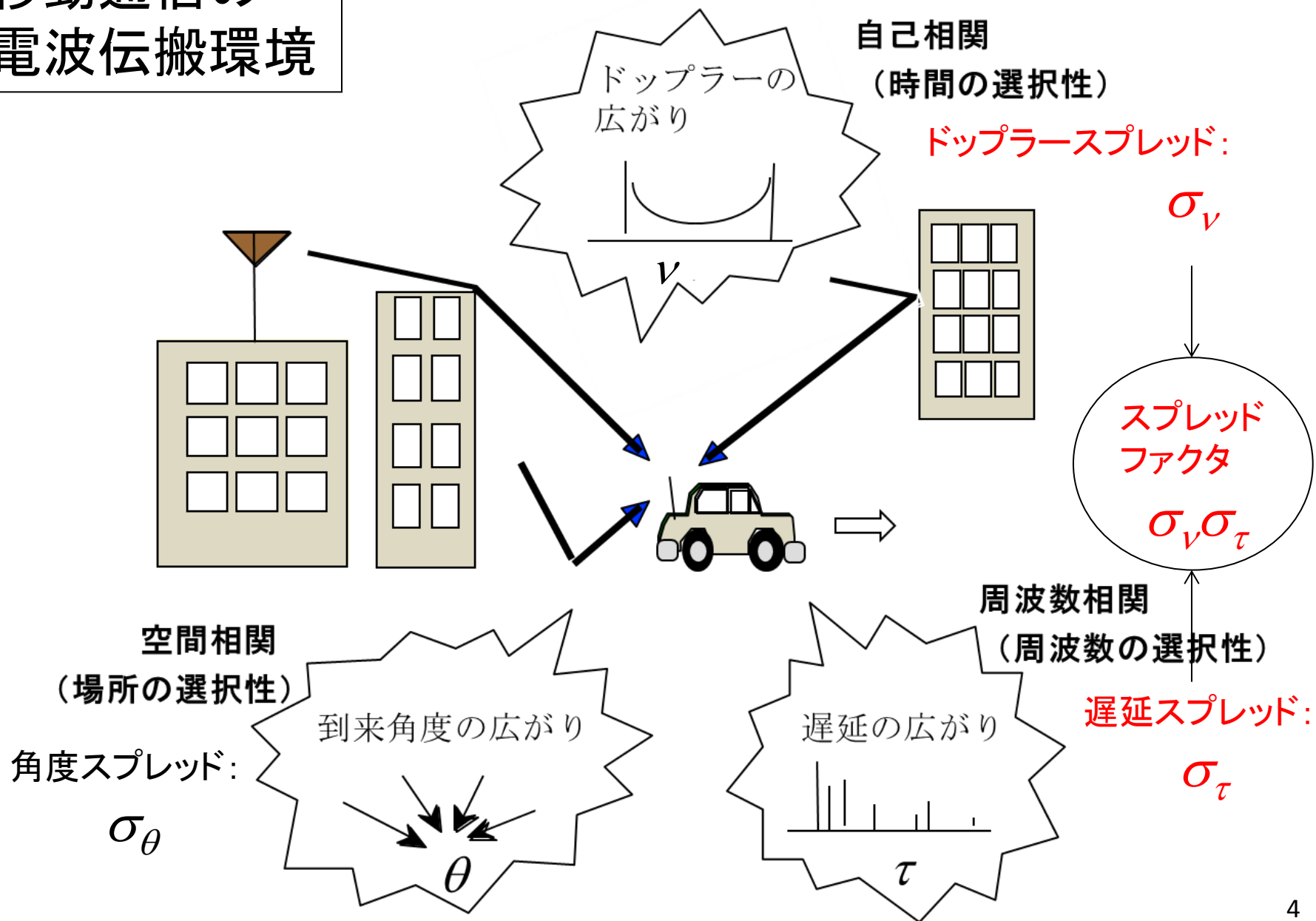
- 通信路容量とは
- 従来 of 取り組み (情報理論的アプローチ)
- 新たな取り組み: 統計的アプローチ

基本的考え方とモデリング

- 通信路容量 (通信限界) と伝搬パラメータ

3) まとめと課題

移動通信の 電波伝搬環境



電波伝搬の基本問題

マルチパス伝搬環境での

- ・遅延・ドップラー同時測定限界
- ・信号伝送限界
- ・相反定理成立条件

スプレッド
ファクタ

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

古くて 新しい問題

先人たちにより
多くの取り組みが
なされている

- ・このことを無視できない
時代になってきた
- ・未解決問題がある

電波伝搬環境の通信に対する影響の大きさを**数値指標**で表したい。
指標として何が良いか？

伝搬パラメータ(例えば**遅延スプレッド**)では、通信パラメータとの関係が含まれないので指標としては不満

指標として**通信路容量**(Channel capacity)が良い

シャノンの情報理論によって定義(**最大相互情報量**)

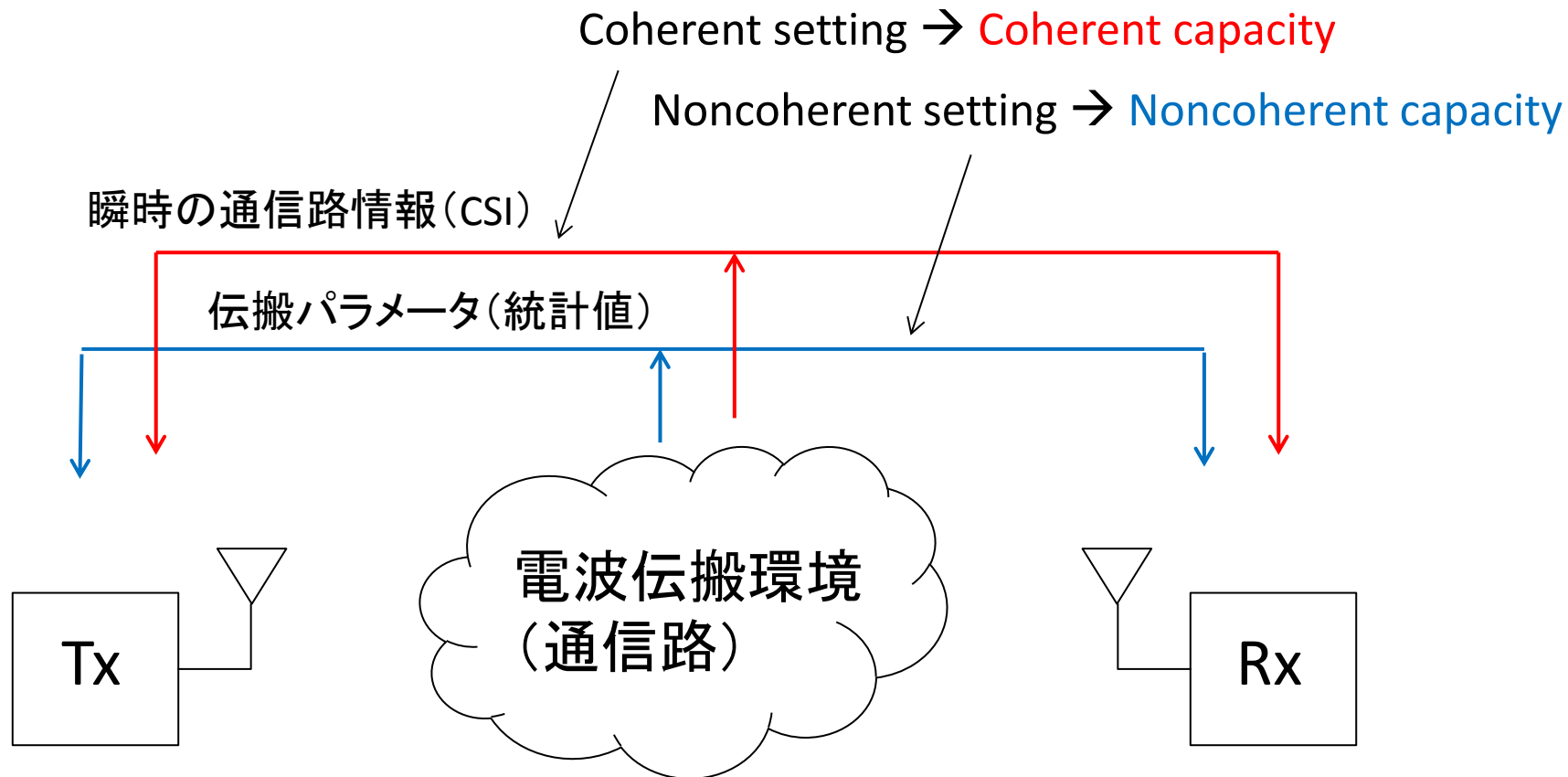
$$C = \lim_{T \rightarrow \infty} \max_{p(x)} \frac{1}{T} \iint p(x, y) \log_2 \frac{p(x, y)}{p(x) p(y)} dx dy$$

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**誤りのない伝送速度の上限**(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(伝搬環境の伝送能力比較に使える)

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)

Epoch-making papers on channel capacity under fading environments

① 【通信路容量の概念確立とAWGN下での定式化】

Shannon, “A mathematical theory of communication,” *BSTJ*, 1948.

② 【マルチパス通信路のシステムモデル化】

Bello, “Characterization of randomly time-variant linear channels,” *IEEE Trans. Commun.*, 1963.

③ 【伝送の基本性質「ビット当たりのエネルギーが一定のとき、どんな劣悪伝搬環境でも、帯域を十分広くとれば、伝搬劣化の無い熱雑音特性に収束する」を示す】

Pierce, “Ultimate performance of M-ary transmission on fading channels,” *IEEE Trans. IT*, 1966.

④ 【1997年時点でのフェージングチャネルに関する情報理論的視点でのレビュー 74ページ、引用文献549の超大作】

Biglieri et al., “Fading channels: Information-theoretic and communications aspects,” *IEEE Trans. IT*, 1998.

⑤ 【Underspread WSSUSチャネルでの通信路容量解析の道筋を示す】

Durisi, et al., “Noncoherent capacity of underspread fading channels,” *IEEE Trans. IT*, 2010.

(解説書:http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/local_139143.pdf.)

⑥ 【現時点での研究レビューとミリ波通信への応用】

Ferrante, et al., “Revisiting the capacity of noncoherent fading channels in mmWave system,” (to be published in *IEEE Trans. Commun.*, DOI 10.1109/TCOMM.2016.2565586.)

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的アプローチ

通信路容量 解析

情報理論的アプローチ

- 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

統計的アプローチ (今回提案手法)

- 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

シャノンの通信路容量

基本式

$$C = \lim_{T \rightarrow \infty} \max_{p(x)} \frac{1}{T} \iint p(x, y) \log_2 \frac{p(x, y)}{p(x) p(y)} dx dy \quad [\text{bps}]$$

熱雑音 (AWGN) のみの通信路

$$C = W \log_2 \left(1 + \frac{P_s}{P_N} \right)$$



SN比 (P_s/P_N) を一定に保った
伝送では、上限速度は
帯域幅に比例

信号電力一定のまま、帯域幅のみを広げてゆくと

$$C = W \log_2 \left(1 + \frac{P_s}{W P_{N0}} \right)$$

(P_{N0} : 1Hz 当たりの雑音電力)

その極限では

$$\lim_{W_s \rightarrow \infty} C_2 = \frac{1}{\log_e(2)} \frac{P_s}{P_{N0}}$$



伝送上限速度は
信号電力に比例

時間変動が緩やかな周波数フラットフェージング環境での通信路容量
Capacity under quasi-static fading condition (slow fading)

$$C \approx W \int_0^{\infty} p_{SNR}(\gamma; \Gamma_0) \log_2(1 + \gamma) d\gamma$$

$$\leq W \log_2(1 + \Gamma_0) \quad (\text{Jensen's inequality})$$

$$\Gamma_0 \equiv \langle \gamma \rangle, \quad \gamma(t) \equiv P_S(t) / P_N$$

$$p_{SNR}(\gamma; \Gamma_0) \quad \text{PDF of } \gamma \text{ with a parameter of } \Gamma_0$$

With a rough approximation,

$$C \approx W \log_2(1 + \Gamma_0)$$

遅延広がり現象

$p(\tau)$ **遅延プロファイル**

$\tau_{\min}, \tau_{\max}$ 遅延の最小値と最大値

$\tau_0 \equiv \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{2}$ 平均値からの最大ずれ幅

σ_{τ} **遅延スプレッド** (遅延広がりの標準偏差)

ドップラー周波数広がり現象

$S(\nu)$ **パワースペクトル密度**

$\nu_{\min}, \nu_{\max}$ ドップラーシフトの最小値と最大値 ($\pm f_D$)

$\nu_0 \equiv \frac{\nu_{\max} - \nu_{\min}}{2}$ 平均値からの最大ずれ幅

σ_{ν} **ドップラーズプレッド** (ドップラー広がりの標準偏差)

電波伝搬環境の分類: Underspread と Overspread

スプレッドファクタ (Spread factor)

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

$$\sigma_\nu\sigma_\tau \quad (\text{我々の論文で用いている})$$

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 ($\sigma_\nu\sigma_\tau \leq 0.01$)

統計的アプローチのためのチャネルモデル (Bello, 1963)

$$r(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t, \tau) s(t - \tau) d\tau + n(t) \quad [\text{入出力関係}]$$

$h(t, \tau)$ 時変インパルス応答

前提: Gaussian random process (WSSUS)

$$g(\nu, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t, \tau) \exp(-j2\pi\nu t) dt \quad (t \rightarrow \nu \text{ へのフーリエ変換})$$

$g(\nu, \tau)$ 遅延・ドップラースプレッディング関数

$$G(\nu, \tau) \equiv \left\langle |g(\nu, \tau)|^2 \right\rangle \approx S(\nu) p(\tau) \quad \begin{array}{l} \text{チャンネル散乱関数} \\ \text{Channel scattering function} \end{array}$$

↑

(ドップラー変動と遅延広がりの現象の
独立性を仮定)

$p(\tau)$ Delay profile with **delay spread** σ_τ

$S(\nu)$ Doppler power spectrum with **Doppler spread** σ_ν

相関関数: Correlation function

周波数相関関数 (WSSUS仮定より)

$$\rho_a^{(\text{delay})}(\Delta f) = \frac{1}{P_R} \int_{\tau_{\min}}^{\tau_{\max}} p(\tau) \exp(-j2\pi \Delta f \tau) d\tau$$

自己相関関数 (Wiener-Khinchin theorem より)

$$\rho_a^{(\text{Doppler})}(\Delta t) = \frac{1}{P_R} \int_{-f_D}^{f_D} S(f) \exp(j2\pi f \Delta t) df$$

複素振幅変動相関と電力変動相関の関係
(レイリーフェージングの場合)

$$\rho_P = |\rho_a|^2 \quad (P \equiv |a|^2)$$

$\Delta f=0$ 付近、 $\Delta t=0$ 付近での ρ_P の近似式 (テーラー展開)

$$\begin{aligned} \rho_P^{(\text{delay})}(\Delta f) &\approx 1 - (2\pi \Delta f \sigma_\tau)^2 \\ \rho_P^{(\text{Doppler})}(\Delta t) &\approx 1 - (2\pi \Delta t \sigma_\nu)^2 \end{aligned}$$

遅延プロフィルや
ドップラースペクトル
の形状に依存しない

二重選択性フェーリング環境での信号最適設計問題

1) 広帯域信号の伝送【ここを出発点に】

周波数選択性フェーリングだが、ファーストフェーリングではない

2) 周波数選択性フェーリング対策

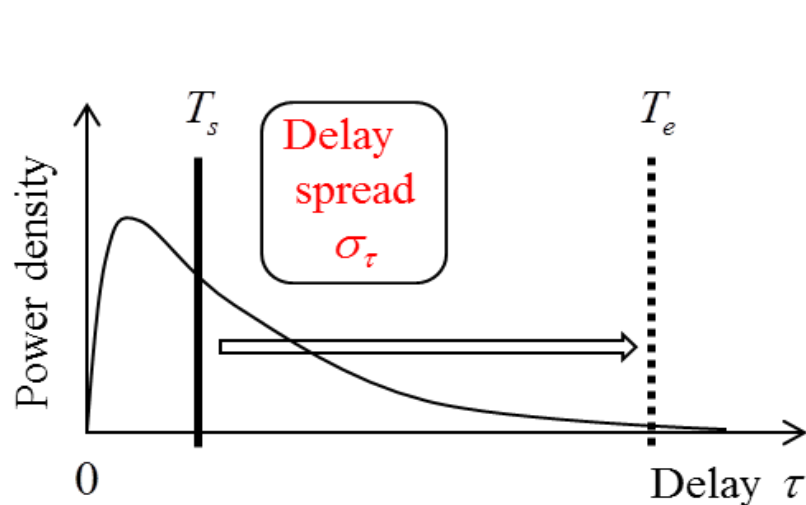
実効シンボル長 T_e ($\gg T_s$) に信号変換 (OFDM イメージ)

3) この変換によって、ファーストフェーリングにならないか？

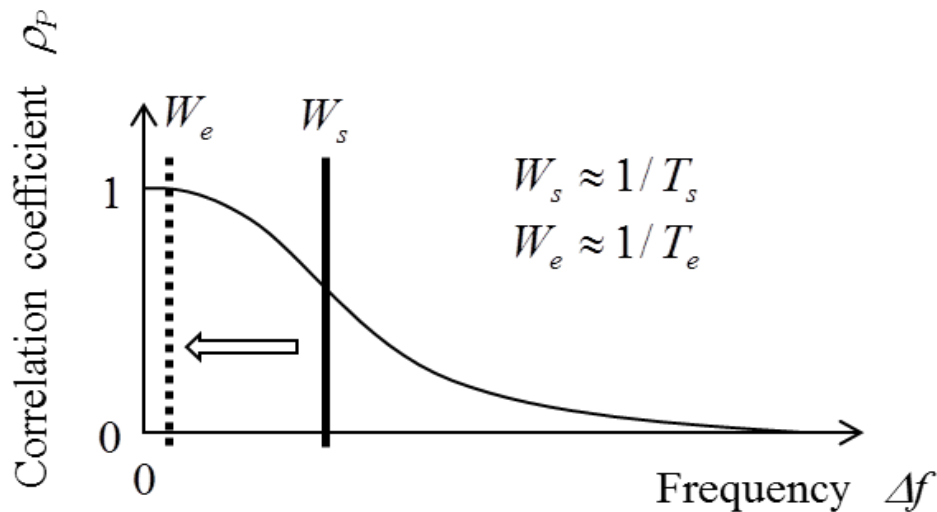
4) その場合の T_e の最適値は？

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_\tau \approx T_s (\approx 1/W_s) \\ \sigma_v \ll 1/T_s \end{array} \right\} \Rightarrow T_s \rightarrow T_e (\gg T_s) \Rightarrow \left. \begin{array}{l} \sigma_\tau \approx T_e (\approx 1/W_e) \\ \sigma_v \ll 1/T_e \end{array} \right\} ?$$

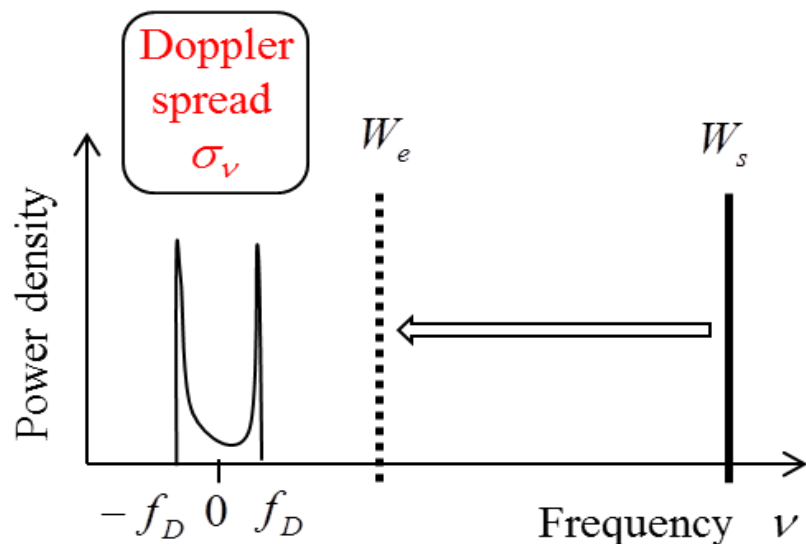
二重選択性フェージング環境の時間領域と周波数領域での統計的關係



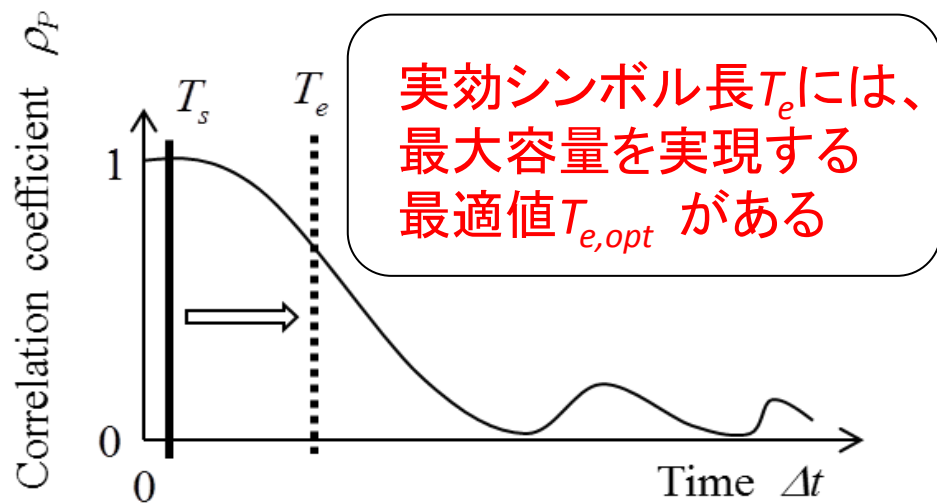
(a) 遅延プロファイル $p(\tau)$ **【遅延現象】**



(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】**

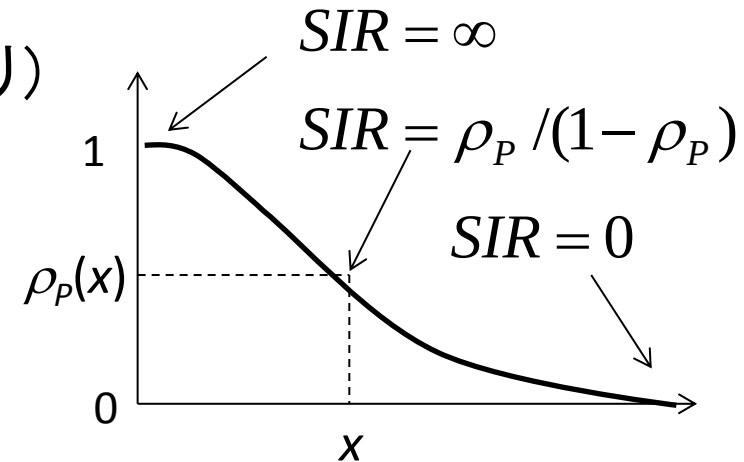


(d) 自己相関 $\rho_P^{(\text{Doppler})}$

相関特性からSIRを推定し、その最大値を求める

SIR算出の基本式

$$SIR = \frac{|\rho_a|^2}{1 - |\rho_a|^2} = \frac{\rho_P}{1 - \rho_P} \quad (\rho_P = |\rho_a|^2 \text{ より})$$



遅延とドップラーのSIR成分

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

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

SIRの最大値は？

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

より

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

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)

AWGNチャネル

$$C \approx W_s \log_2(1 + \Gamma_0) \quad \rightarrow$$

干渉波成分を含むチャネル

$$C \approx W_s \log_2(1 + \Gamma_e)$$

Highly-Underspread WSSUS Channel

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

Case 1:

SNRを一定に保った伝送
(信号電力が帯域幅に比例)

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

C_0 : 正規化通信路容量
(bps/Hz)

通信路容量のフロア値

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

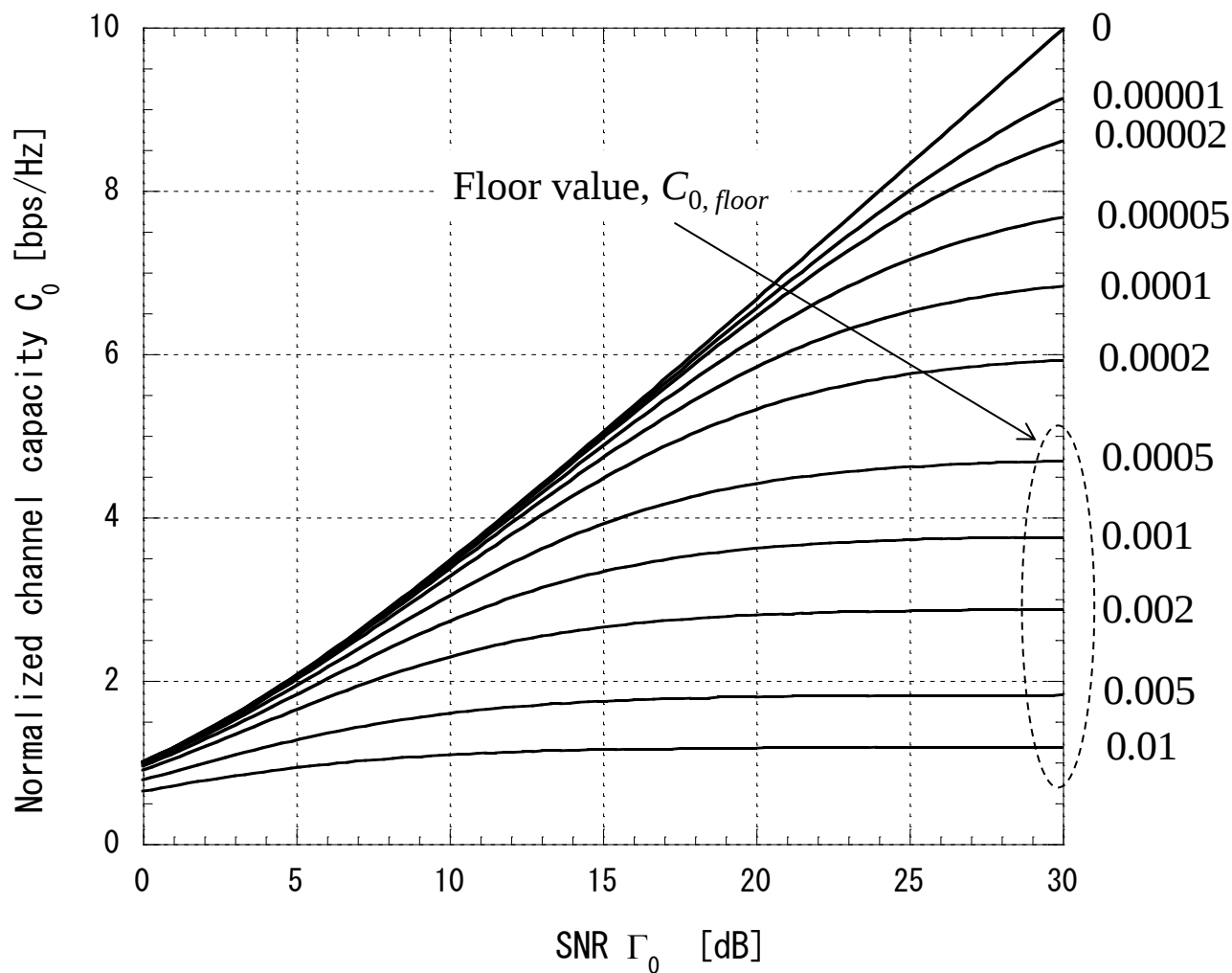
結論

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)

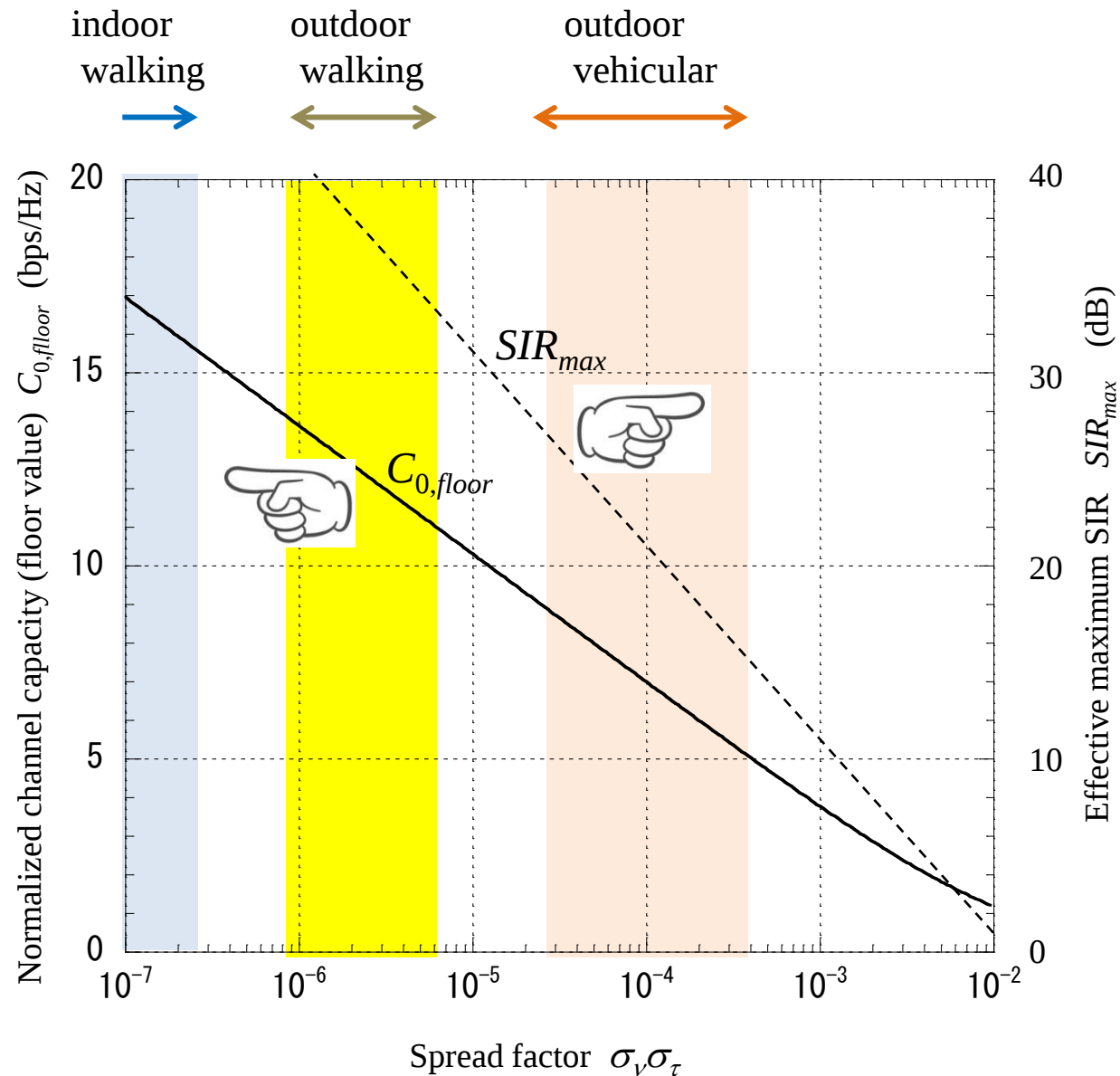
正規化通信路容量 C_0 のSNR特性

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



まとめ

- 1) 伝搬環境の過酷さを通信限界の視点で表す数値指標: 通信路容量
- 2) 伝搬環境(特に、二重選択性フェージング環境)の通信路容量に対する研究は情報理論(IEEE Trans. IT)の分野に膨大な蓄積があり、数学的に高度なレベルに達している(研究への参入障壁が高くなっている)
- 3) それでも、まだ、伝搬とシステムを結ぶ見通しの良い表現式は得られていない
- 4) そのため、堅牢の城を真正面から攻める「情報理論的アプローチ」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。
- 5) その式によって、伝搬環境の情報伝送能力が明らかになった

課題

- 1) 従来手法(情報理論的アプローチ)との、概念の共通性の確認
- 2) 今回は、SN比を一定とした解析を行ったが、送信電力を一定として、帯域幅のみを広げてゆくと、どういう景色が見えてくるか？
- 3) 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は？

課題: 1)、2)については、次回(2月AP研で)発表する