

マッシュブMIMOのマルチユーザ運用における 情報伝送能力について

唐沢 好男

講演の要旨(研究会原稿の「はじめに」から抜粋)

前稿(前会発表)では、Massive MIMOの情報伝送能力に着目し、Point-to-Pointすなわちシングルユーザ伝送の場合の電波伝搬環境との関係を調べた(詳細は研究室HP公開レポートYK-016-rev)。対象とした伝送方式は、多数の素子対向によって得られる直交ストリームのうち、相対的に利得の高いいくつかを選んでそこに情報を並列伝送する選択型固有モード伝送(Selected Multi-Stream Transmission: SMST)である。伝搬環境は、見通し外通信のレイリーフェージング環境と見通し内通信の仲上・ライスフェージング環境を取り上げ、基地局側アレーに対する空間相関を考慮した。

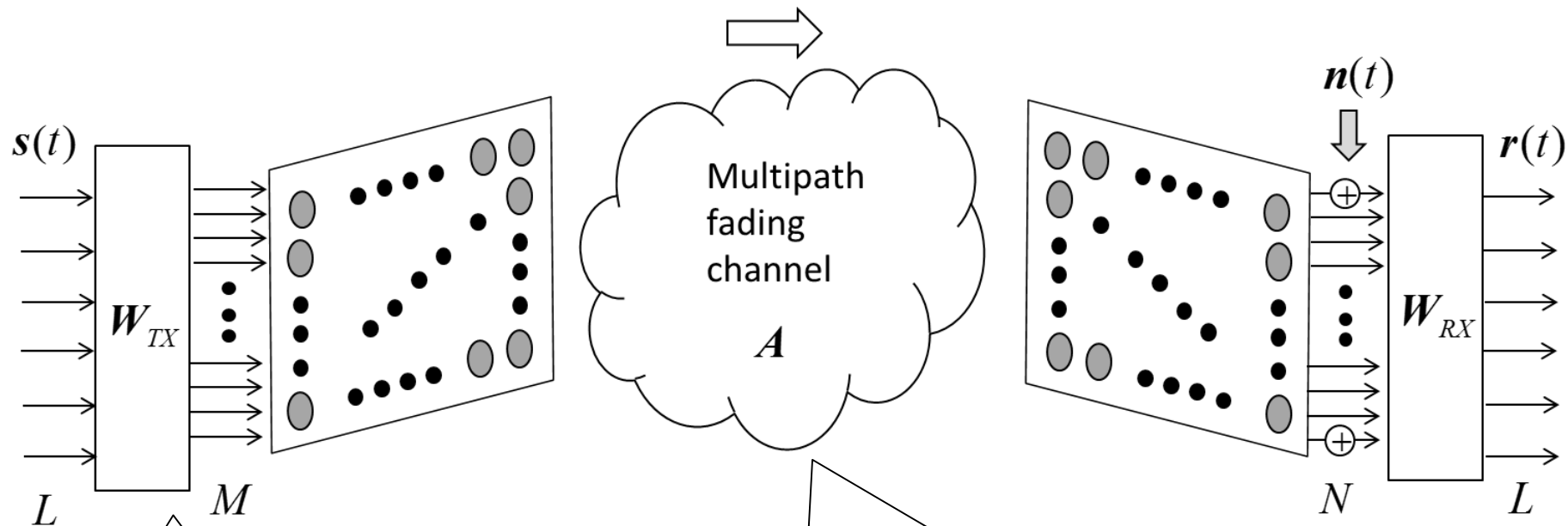
本発表では、前稿での検討手法を拡張し、Point-to-Multipoint、すなわち、マルチユーザ伝送におけるMassive MIMOの情報伝送能力を調べる。なお、ここではその基礎的な性質を調べる第一歩として、レイリーフェージングでかつ空間相関の無い場合(i.i.d.)についての伝送能力を明らかにする。また、伝送方式では、基地局側のアレイアンテナ素子数が十分大きいこと(例えば、1000素子)を前提に、ユーザ毎には、前稿で検討したSMST方式とする。ユーザ毎のウェイト制御は独立に行うため、ランダム符号による符号分割多重(Code-Division Multiplex: CDM)[7]と等価な情報伝送の力をもつ多重化方式である。

発表内容

1. ストリーム選択型固有モード伝送
 - Point-to-Point システム
 - Point-to-Multi-Point システム
2. ランダム行列の漸近固有値分布
3. MU Massive MIMOの通信路容量の理論推定式
4. シミュレーションによる理論推定式の確認
5. MU Massive MIMOの通信路容量の計算例

送受信の双方で大規模アレーを有するマッシブMIMO

第一ステップ: Point-to-Point伝送(シングルユーザの場合)



伝送方式

- ・固有モード伝送
(マルチストリーム伝送)
- ・ $M \geq N$ として、
 N ストリームから
上位 L ストリームを使う

アレー素子間に相関(空間相関)有り

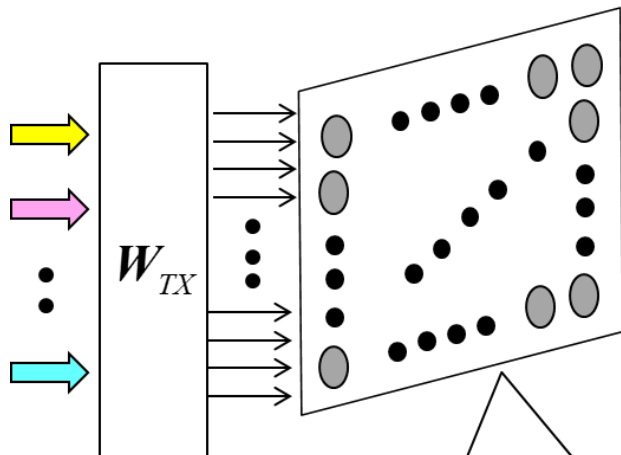
- ・レイリーフェージング(NLOS)
- ・仲上ライスフェージング(LOS)

$$\mathbf{r}(t) = \mathbf{W}_{RX}^H \{ \mathbf{A} \mathbf{W}_{TX} \mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t) \}$$

第5世代移動通信のマッシブMIMO情報伝送システム (高機能マルチユーザシステム)

キーポイント 1
情報の送り方

基地局



キーポイント 2
伝搬チャネルの理解

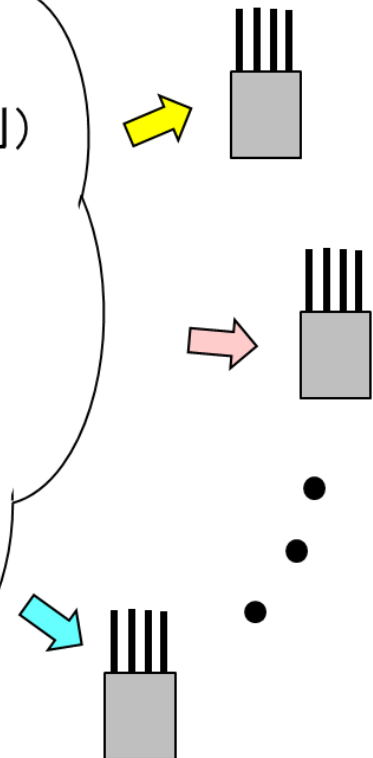
伝搬チャネル
(大規模ランダム行列)

- ・見通し外
- ・見通し内

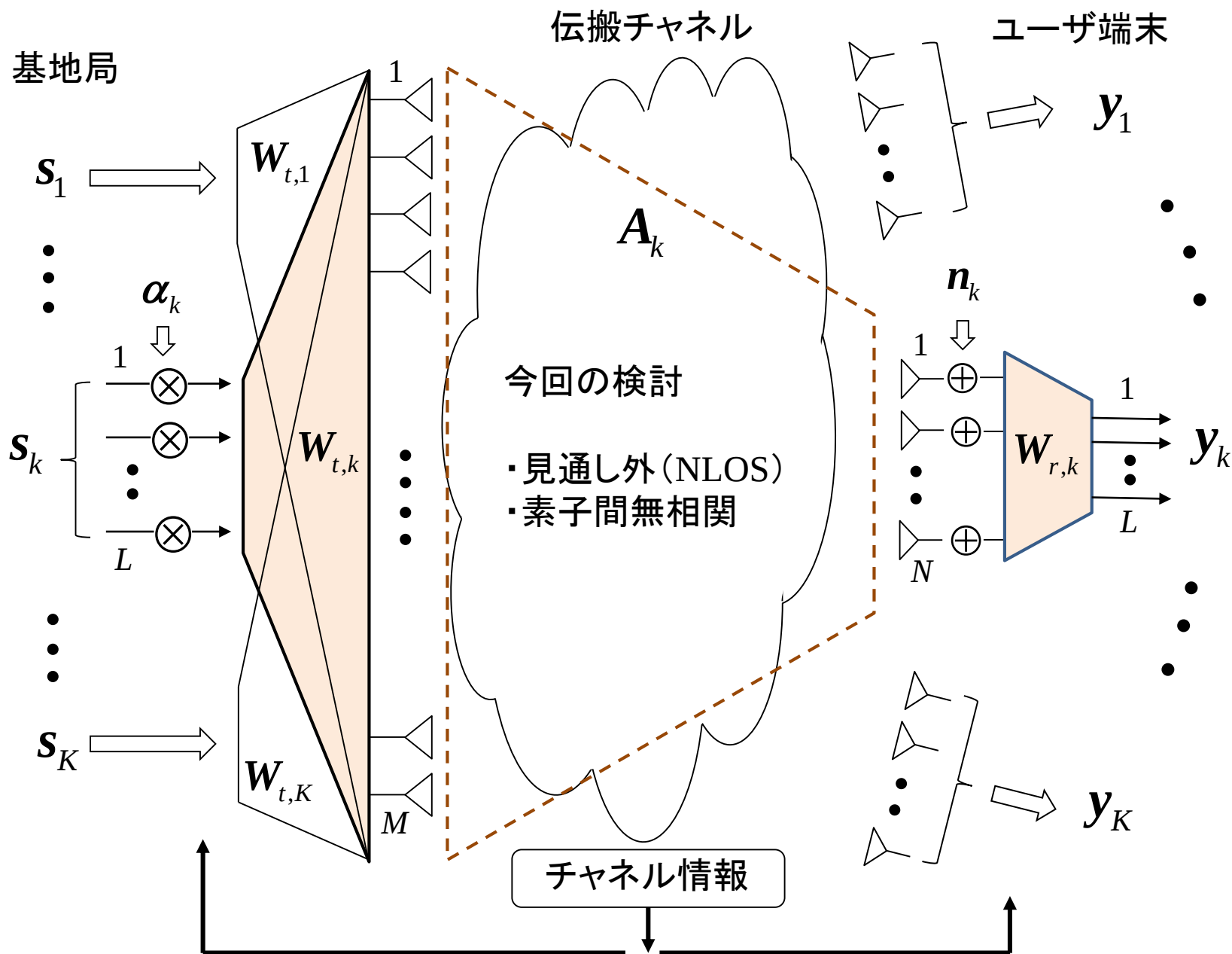
信号の素子間相関

- ・無相関
- ・有相関

多数のユーザ

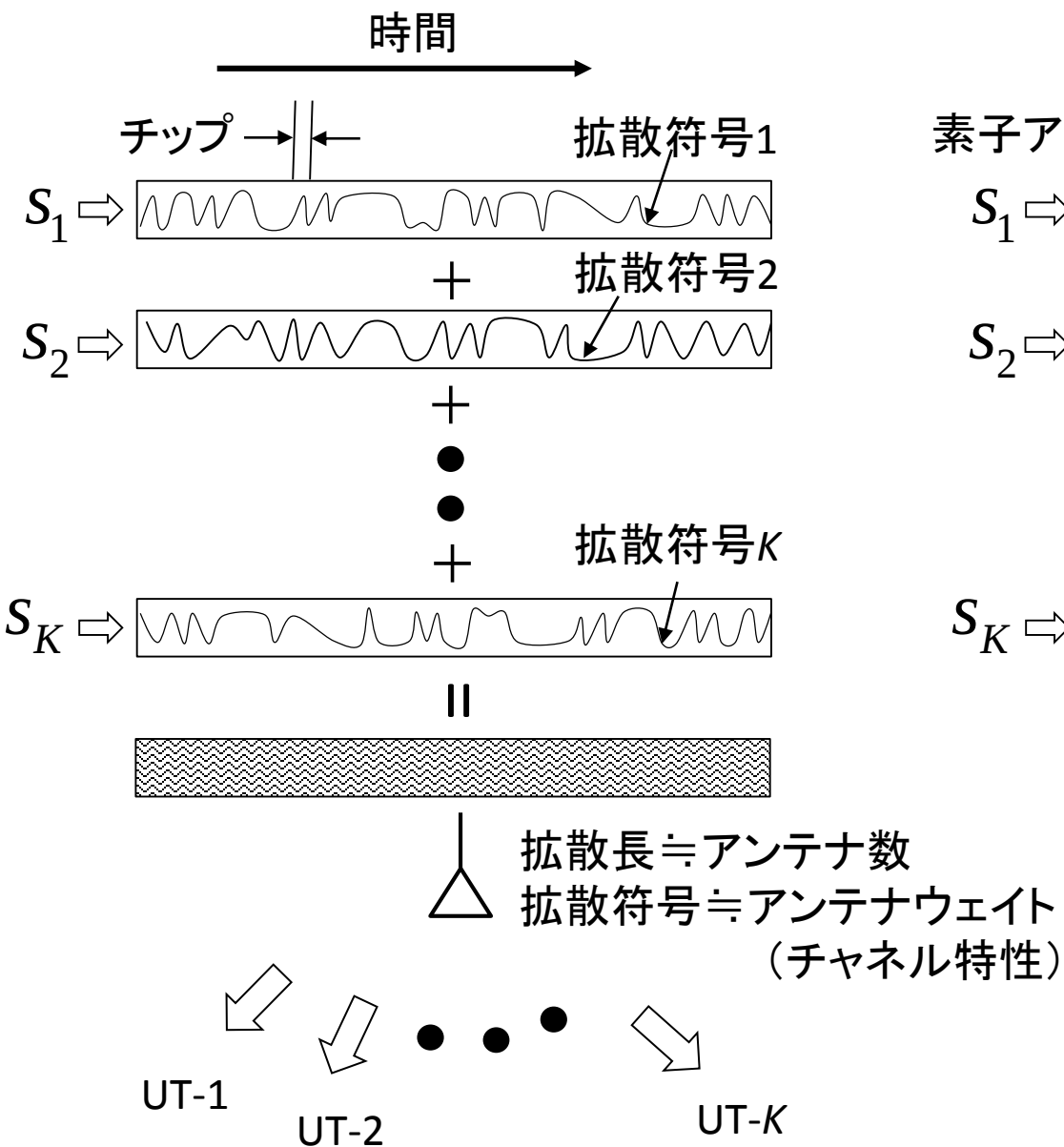


マルチユーザ Massive MIMO情報伝送システムの全体構成

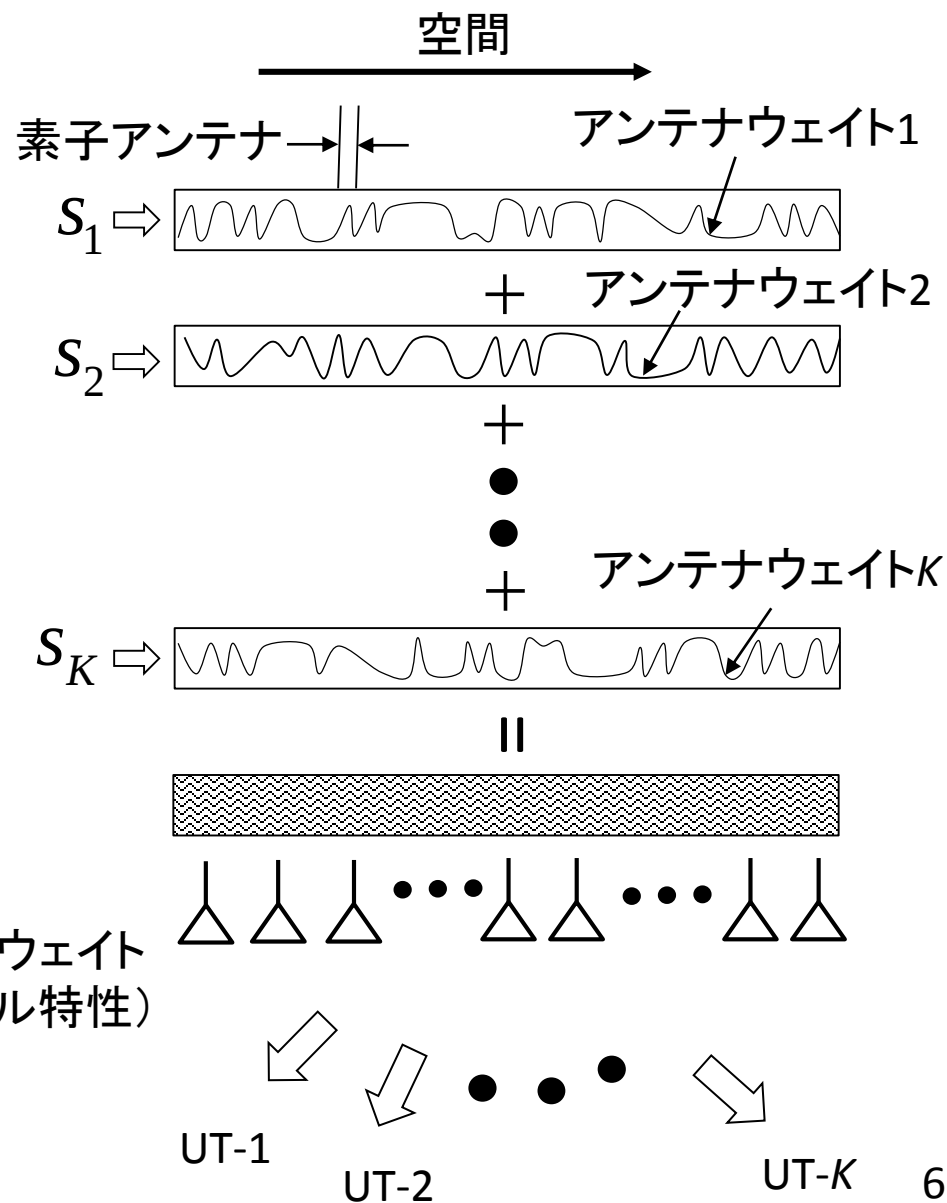


Massive MIMOにおける符号分割多重(CDM)との共通性

【CDM】



【Massive MIMO SDM】



ランダム行列の漸近固有値分布: マルチェンコ・パスツール則

ウィシャート行列の正規化固有値

ランダム行列 A (行列サイズ: $N \times M$)

ウィシャート行列

AA^H (行列サイズ: $N \times N$)

$A^H A$ (行列サイズ: $M \times M$)

ランダム行列 A の要素が i.i.d. $\Rightarrow$ マルチェンコ・パスツール則

(マッシュブMIMOの特性評価では、
ウィシャート行列の漸近固有値分布が重要)

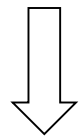
漸近固有値分布(マルチェンコ・パスツール(MP)則に基づく)

M と N の比を β とし、そのもとでの $N \rightarrow \infty$ での順序無正規化固有値の漸近固有値分布を考える

$$\beta \equiv M / N$$

$$\hat{\lambda} = \lambda / N$$

← 順序無正規化固有値



$N \leq M$ 、すなわち $\beta \geq 1$ の AA^H の漸近固有値に対して

$$f(\hat{\lambda}) = \begin{cases} \frac{\sqrt{4\beta - (\hat{\lambda} - 1 - \beta)^2}}{2\pi\hat{\lambda}} & \text{for } (1 - \sqrt{\beta})^2 \leq \hat{\lambda} \leq (1 + \sqrt{\beta})^2 \\ 0 & \text{for others} \end{cases}$$

MP則に従う漸近固有値分布の累積分布

$$F(\hat{\lambda}; \beta) = \int_{\hat{\lambda}_{\min}}^{\hat{\lambda}} \frac{\sqrt{4\beta - (x-1-\beta)^2}}{2\pi x} dx$$

$$= \frac{1}{2\pi} \left\{ \sqrt{-\hat{\lambda}^2 + 2(1+\beta)\hat{\lambda} - (1-\beta)^2} - (1+\beta) \sin^{-1} \left(\frac{1+\beta-\hat{\lambda}}{2\sqrt{\beta}} \right) \right. \\ \left. - |1-\beta| \sin^{-1} \left(\frac{(1+\beta)\hat{\lambda} - (1-\beta)^2}{2\sqrt{\beta}\hat{\lambda}} \right) + \pi \right\}$$

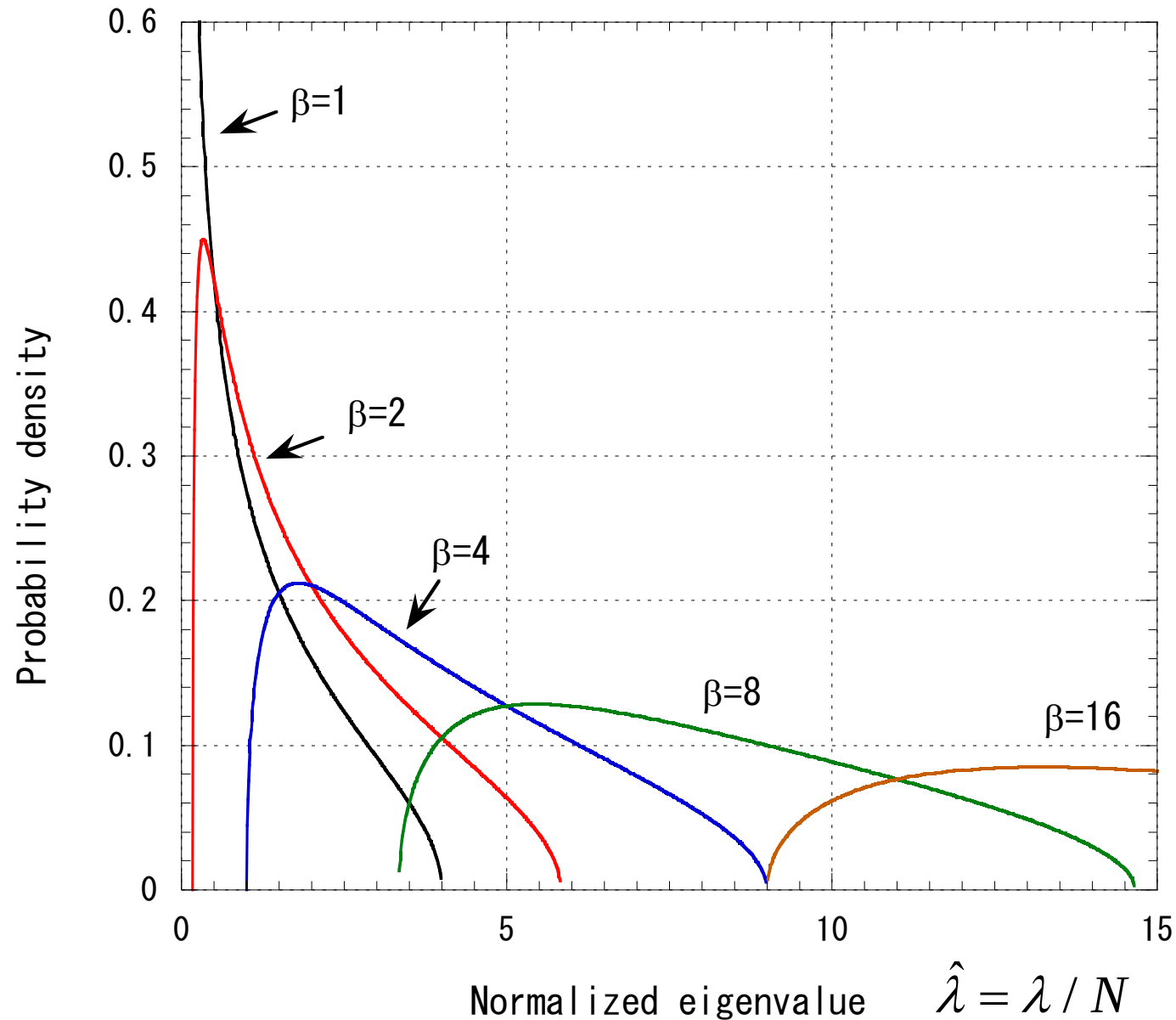
$p = F(\hat{\lambda})$ の形

$\hat{\lambda} = F^{-1}(p) \equiv g(p; \beta)$ の形もほしい

$$g(p; \beta) \{ \equiv F^{-1}(p; \beta) \} \approx \sum_{k=0}^6 b_k p^k$$

グラフ処理ソフトを使えば、
 F の計算値から F^{-1} の回帰式が、
容易に求められる

MP則に従う漸近固有値分布(確率密度関数:PDF)



送受信信号と伝搬チャネル

ユーザ k における受信信号

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{W}_{r,k}^H \left(\mathbf{A}_k \sum_{k'=1}^K \mathbf{W}_{t,k'} \mathbf{x}_{k'} + \mathbf{n}_k \right)$$

$$\mathbf{x}_k = \text{diag}\{\boldsymbol{\alpha}_k\} \mathbf{s}_k$$

$$\boldsymbol{\alpha}_k \equiv \left(\alpha_1^{(k)} \quad \alpha_2^{(k)} \quad \cdots \quad \alpha_L^{(k)} \right)^T$$

$$\mathbf{s}_k \equiv \left(s_1^{(k)} \quad s_2^{(k)} \quad \cdots \quad s_L^{(k)} \right)^T$$

$$\mathbf{n}_k \equiv \left(n_1^{(k)} \quad n_2^{(k)} \quad \cdots \quad n_N^{(k)} \right)^T$$

$$\mathbf{y}_k \equiv \left(y_1^{(k)} \quad y_2^{(k)} \quad \cdots \quad y_L^{(k)} \right)^T$$

ユーザ局 k' 向けのそれぞれの送信ウェイト

$$\mathbf{W}_{t,k'} = \left(\mathbf{w}_{t,1}^{(k')} \quad \mathbf{w}_{t,2}^{(k')} \quad \cdots \quad \mathbf{w}_{t,L}^{(k')} \right)$$

ユーザ局 k での受信ウェイト

$$\mathbf{W}_{r,k} = \left(\mathbf{w}_{r,1}^{(k)} \quad \mathbf{w}_{r,2}^{(k)} \quad \cdots \quad \mathbf{w}_{r,L}^{(k)} \right)$$

ユーザ k における通信路行列

$$\mathbf{A}_k \equiv \begin{pmatrix} a_{11}^{(k)} & a_{12}^{(k)} & \cdots & a_{1M}^{(k)} \\ a_{21}^{(k)} & a_{22}^{(k)} & \cdots & a_{2M}^{(k)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{N1}^{(k)} & a_{N2}^{(k)} & \cdots & a_{NM}^{(k)} \end{pmatrix}$$

SN比を定めるための電力条件

$$\left\langle \left| s_i^{(k)} \right|^2 \right\rangle = \gamma_0 / L, \quad \left\langle \left| n_n^{(k)} \right|^2 \right\rangle = 1$$

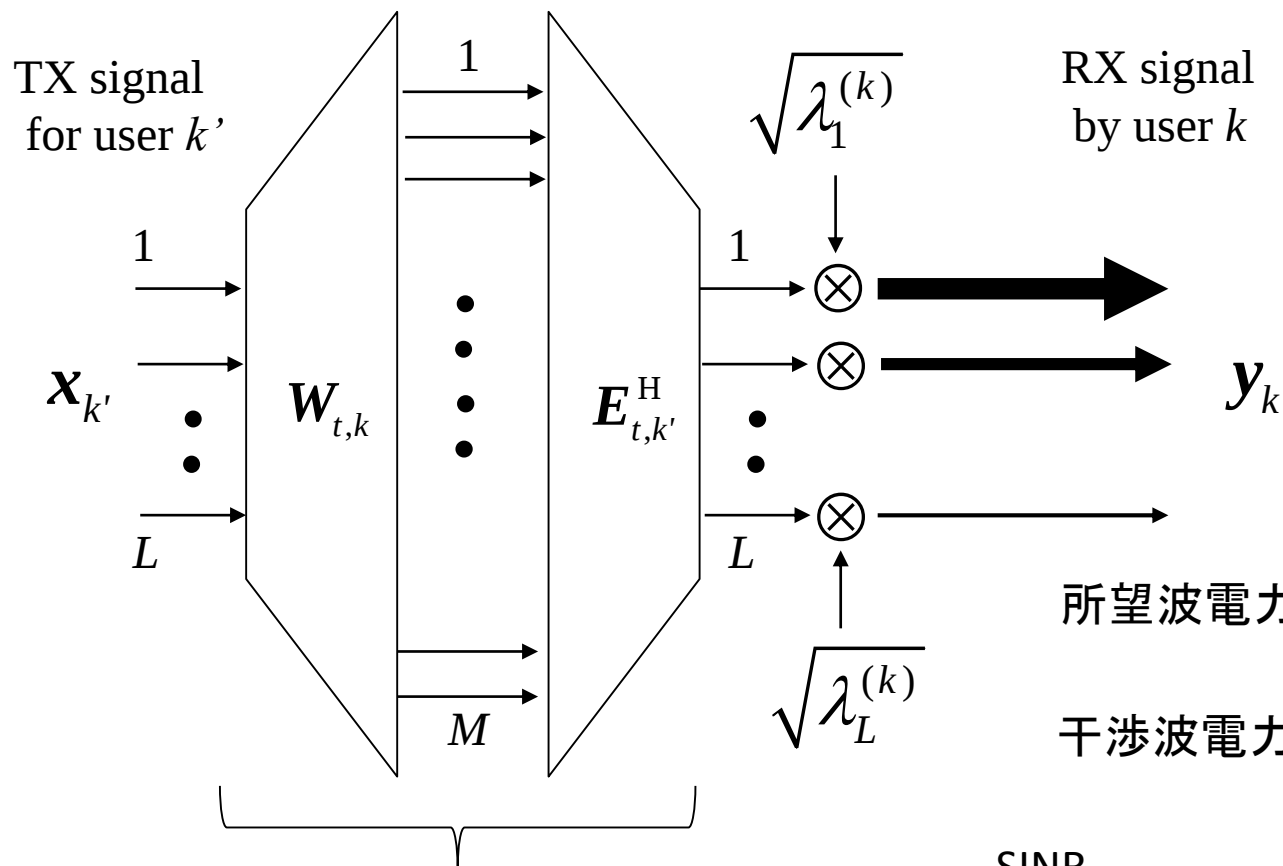
$$\|\boldsymbol{\alpha}_k\| = \|\mathbf{w}_{t,i}^{(k)}\| = \|\mathbf{w}_{r,i}^{(k)}\| = 1$$

$$(n = 1 \cdots N; i = 1 \cdots L; k = 1 \cdots K)$$

対ユーザ毎に異なる部分

各ユーザ信号に対する共通部分

送受信系の
等価回路



所望波電力 $P_{SI} = \alpha_i^2 \gamma_0 \lambda_i \approx \frac{\gamma_0 \lambda_i}{L}$

干渉波電力 $P_{II} = \frac{(K-1) \gamma_0 \lambda_i}{M}$

$k' = k \rightarrow L \times L$ identity matrix

$k' \neq k \rightarrow L \times L$ random matrix

$\frac{1}{\sqrt{M}} \{i.i.d.\}$

SINR

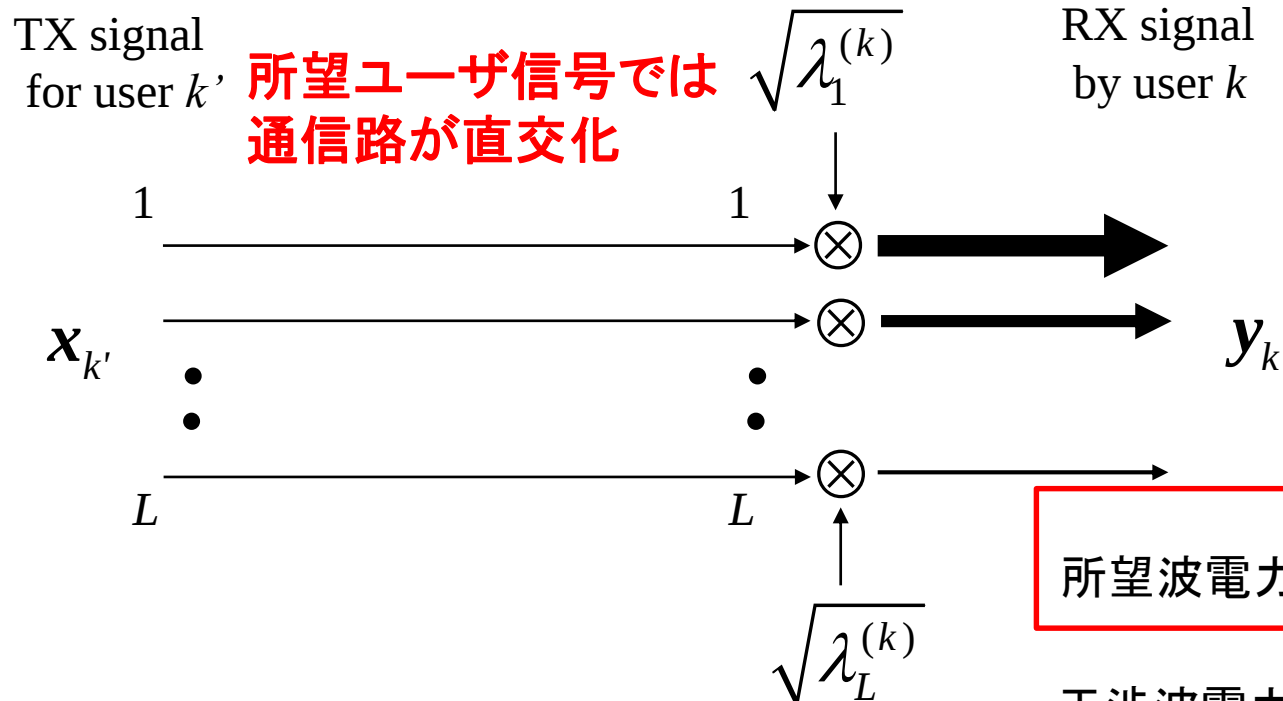
$$\gamma_{k,i} \approx \frac{P_{k,i}^{(S)}}{P_{k,i}^{(N)} + P_{k,i}^{(I)}} = \frac{(\alpha_i^{(k)})^2 \lambda_i^{(k)} \gamma_0}{1 + \frac{(K-1)}{M} \lambda_i^{(k)} \gamma_0}$$

$$\rightarrow \frac{M \lambda_i^{(k)} \gamma_0}{L (M + (K-1) \lambda_i^{(k)} \gamma_0)} \quad 12-1$$

対ユーザ毎に異なる部分

各ユーザ信号に対する共通部分

送受信系の等価回路



所望波電力 $P_{Sl} = \alpha_l^2 \gamma_0 \lambda_i \approx \frac{\gamma_0 \lambda_i}{L}$

干渉波電力 $P_{Il} = \frac{(K-1) \gamma_0 \lambda_i}{M}$

$k' = k \rightarrow L \times L$ identity matrix

$k' \neq k \rightarrow L \times L$ random matrix

$\frac{1}{\sqrt{M}} \{i.i.d.\}$

SINR

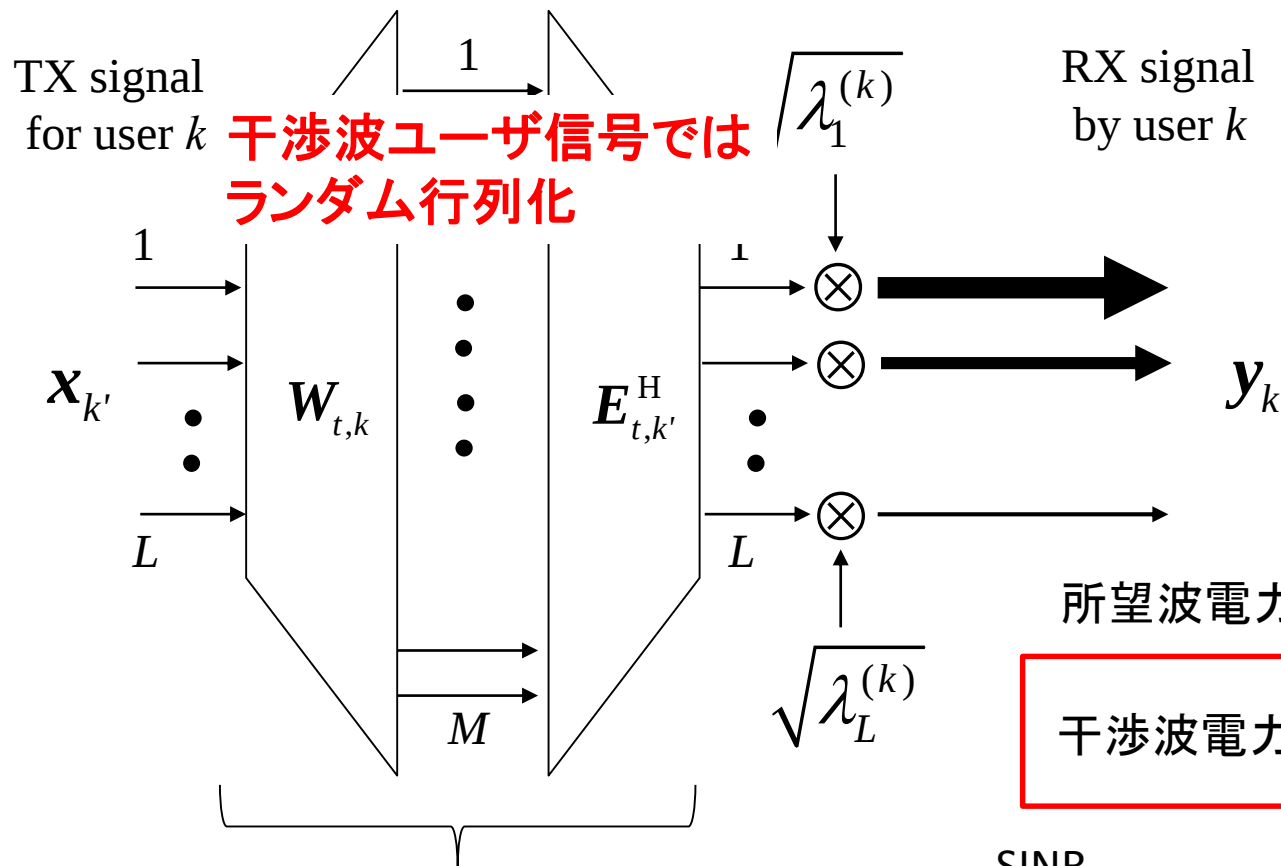
$$\gamma_{k,i} \approx \frac{P_{k,i}^{(S)}}{P_{k,i}^{(N)} + P_{k,i}^{(I)}} = \frac{(\alpha_i^{(k)})^2 \lambda_i^{(k)} \gamma_0}{1 + \frac{(K-1)}{M} \lambda_i^{(k)} \gamma_0}$$

$$\rightarrow \frac{M \lambda_i^{(k)} \gamma_0}{L (M + (K-1) \lambda_i^{(k)} \gamma_0)} \quad 12-2$$

対ユーザ毎に異なる部分

各ユーザ信号に対する共通部分

送受信系の等価回路



$k' = k \rightarrow L \times L$ identity matrix

$k' \neq k \rightarrow L \times L$ random matrix

$$\frac{1}{\sqrt{M}} \{i.i.d.\}$$

SINR

$$\gamma_{k,i} \approx \frac{P_{k,i}^{(S)}}{P_{k,i}^{(N)} + P_{k,i}^{(I)}} = \frac{(\alpha_i^{(k)})^2 \lambda_i^{(k)} \gamma_0}{1 + \frac{(K-1)}{M} \lambda_i^{(k)} \gamma_0}$$

$$\rightarrow \frac{M \lambda_i^{(k)} \gamma_0}{L (M + (K-1) \lambda_i^{(k)} \gamma_0)} \quad 12-3$$

通信路容量の計算式 (NLOS, 等電力分配の場合)

ユーザ k に対する通信路容量

$$C_k = \sum_{i=1}^L \log_2 \left(1 + \gamma_{k,i}(\lambda_i^{(k)}) \right) \approx \sum_{i=1}^L \log_2 \left\{ 1 + \gamma_{k,i} \left(\langle \lambda_i^{(k)} \rangle \right) \right\}$$

$$\gamma_{k,i}(\lambda_i^{(k)}; \gamma_0, M, L, K) = \frac{M \lambda_i^{(k)} \gamma_0}{L \left(M + (K-1) \lambda_i^{(k)} \gamma_0 \right)}$$

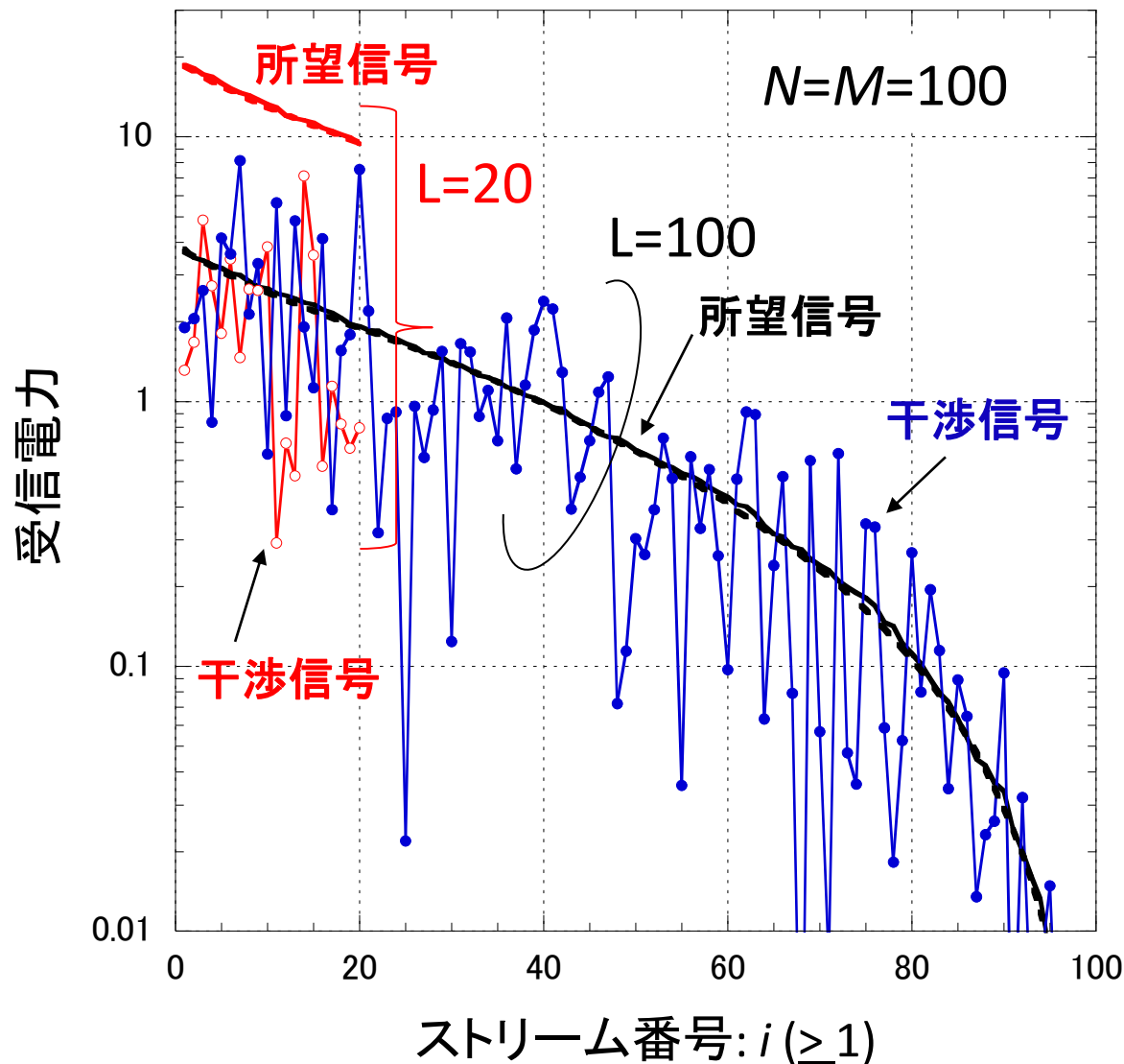
$$\langle \lambda_i \rangle = F_{MP}^{-1}(p_i; \beta), \quad p_i = \frac{N - i + 1}{N + 1}$$

MP則累積分布の逆関数

$P_{k,i}^{(I)} \gg P_{k,i}^{(N)}$ 、かつ、 $K > 2$ のとき

$$C \approx L \log_2 \left(1 + \frac{M}{L(K-1)} \right)$$

MU-MIMO: 所望波と干渉波のストリーム別電力についての理論推定値とシミュレーション値の比較



シミュレーション値は

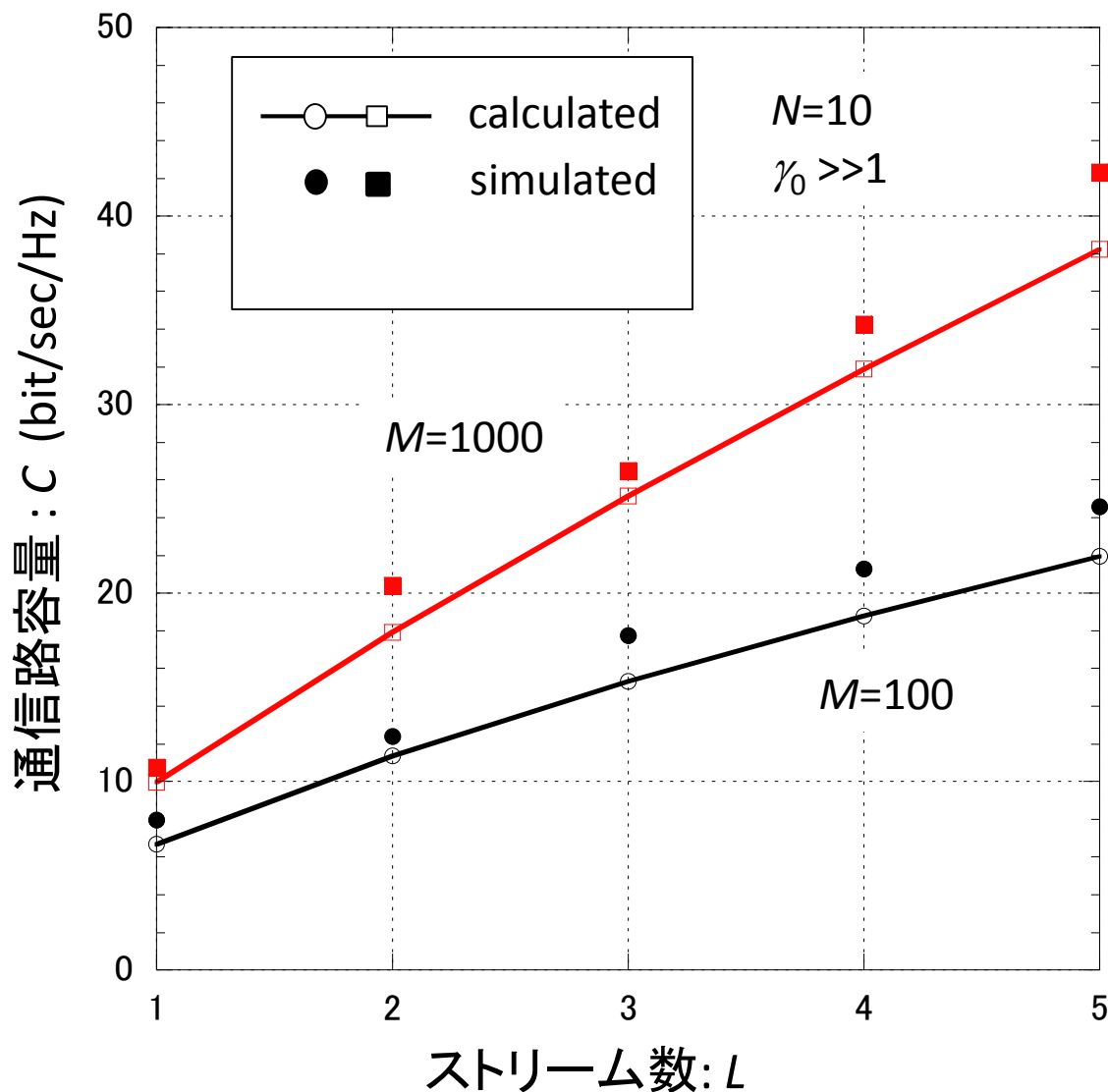
所望信号電力

- ・安定(ばらつきなし)
- ・理論値と一致

干渉信号電力

- ・不安定(ばらつき大)
- ・平均値が理論値と一致

通信路容量推定の検証評価(2ユーザの場合) (理論推定値 vs シミュレーション値(20回試行の平均値))



シミュレーション値
がやや大きめに出
る

→ 干渉信号電力の
ばらつきが通信路
容量の平均値を押
し上げる

理論計算値の補正(より厳密な意味での補正)

補正無し

補正有り

$$P_G = \frac{M}{L(J-1)} \rightarrow C_k \approx L \log_2 \left(1 + \frac{M}{L(J-1)} \right) \rightarrow C_k \approx L \left\{ \log_2 \left(1 + \frac{M}{L(J-1)} \right) + 0.8327 \right\}$$

補正の根拠

$$C_k \approx L \log_2 \left(1 + \frac{P^{(S)}}{\sum P^{(I)}} \right)$$

変動小さく、安定

変動大きく、不安定(指数分布)

$$\approx L \log_2 \left(\frac{M}{L(J-1)x} \right)$$

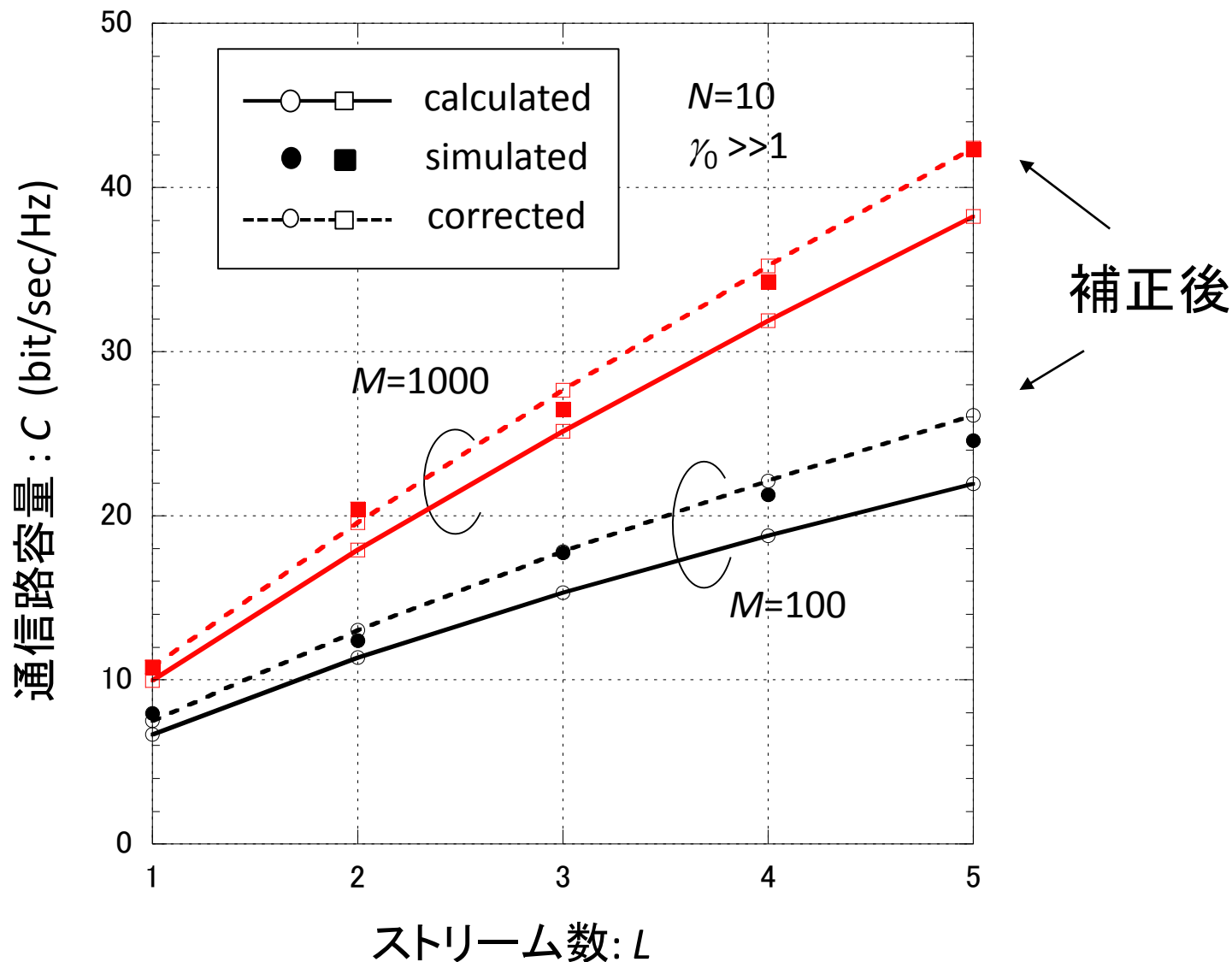
x は平均値1で指数分布する
干渉波電力変動係数

$$\langle C_k \rangle \approx L \log_2 \left(\frac{M}{L(J-1)} \right) - L \langle \log_2 x \rangle$$

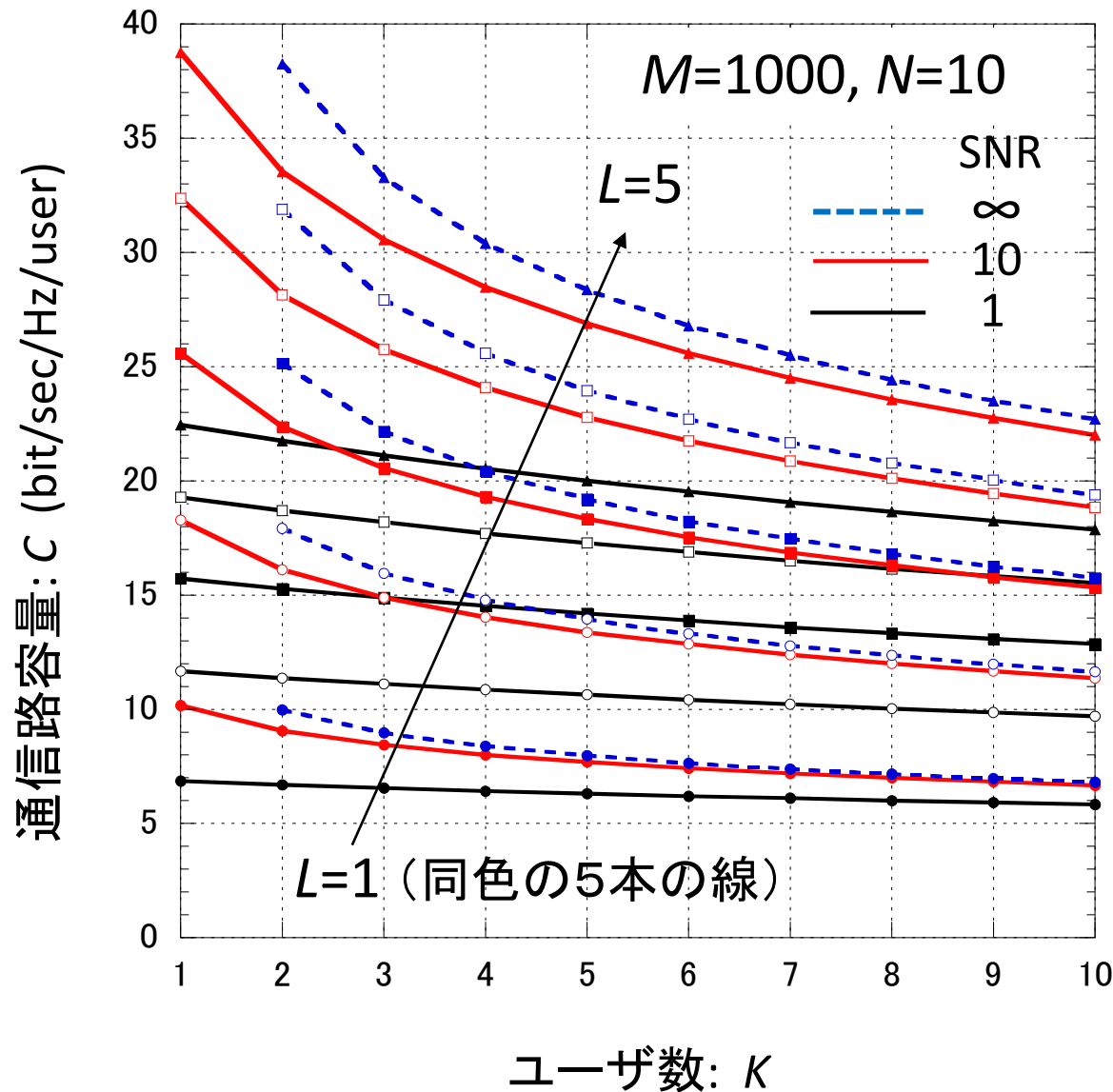
オイラーの定数

$$\langle \log_2 x \rangle = \int_0^\infty \log_2 x e^{-x} dx = \frac{1}{\log 2} \int_0^\infty \log x e^{-x} dx = -\frac{\gamma(=0.57721)}{0.69315} = -0.8327$$

通信路容量推定の検証評価(2ユーザの場合) (理論推定値 vs シミュレーション値(20回試行の平均値))



マルチユーザMassive MIMOのユーザ当たりの通信路容量



M : BSアンテナ数
 N : UTアンテナ数
 L : ストリーム数
 K : ユーザ数
 γ_0 : SNR

に対して、簡易に、
かつ、精度よく、
通信路容量を計
算できる式を得た

まとめ

ストリーム選択型固有モード伝送による、マルチユーザ Massive MIMOシステムの通信路容量の理論計算式を導出した。

導出した式は、送受信のアレー数、ストリーム数、ユーザ数、SN比に対して、簡易に、かつ、精度良く求めることができる

対象とした伝搬環境は見通し外 (NLOS) 環境、アレー素子間は無相関 (前回の検討から、有相関の場合はむしろ通信路容量は増える)

所望ユーザ局が見通し内 (LOS) 環境は、1月のRCS研で発表予定

本日の発表の詳細、および、1月発表の技術レポートを
唐沢研ホームページより公開 (12月AP研: YK-033; 1月RCS研: YK-035)