

**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 [II]
～見通し内伝搬路の場合～**

唐沢 好男

講演の要旨(研究会原稿の「はじめに」から)

送受信局の双方でアレーアンテナを用いる無線通信はMIMOと呼ばれ、大容量・高品質情報伝送を実現している。最近は、第五世代移動通信への導入を目指して、アンテナ素子数が100～1000にも及ぶMassive MIMOの研究が進んでいる。MIMOには、アレーアンテナの自由度を使ってのビームフォーミング利得向上と並列伝送による空間分割多重利得獲得の二つの特長があるが、アレー素子数が限られている場合には、その利得の両方を同時に満足させることは難しい。一方、Massive MIMOでは、基地局アレーの多素子化により、その両立が可能になる点にメリットがある。

前々稿では、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。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。

前稿では、前々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、ユーザ局が見通し外(NLOS)環境にある場合について、通信路容量特性を調べた。本稿では、前稿と同じ設定で、ユーザ局が見通し内(LOS)環境に有る場合の通信路容量推定法を示し、それに基づく通信路容量特性を調べる。

本発表の位置づけ

Massive MIMOの情報伝送能力

→ 選択型マルチストリーム伝送(固有モード伝送)の通信路容量

1) シングularyザシステム (P-P)	2018.11 RCS/AP研 2019.01 AP研
(有相関伝搬環境、NLOSとLOS)	

2) マルチユーザシステム (P-MP)	2019.12 AP研
(NLOS, i.i.d.環境)	

3) マルチユーザシステム (P-MP)	(本発表)
(LOS, i.i.d.環境)	

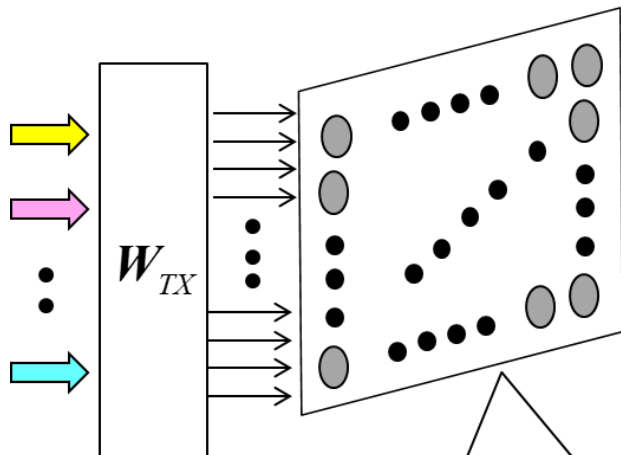
発表内容

1. ストリーム選択型固有モード伝送
2. 大規模行列における漸近固有値分布(MP則)
3. 伝送特性評価の定式化
4. MU Massive MIMOの通信路容量の簡易推定法
5. LOS環境でのMU Massive MIMOの通信路容量の計算例
6. まとめ

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



素子数が1000程度の
大規模アレー

キーポイント 2
伝搬チャネルの理解

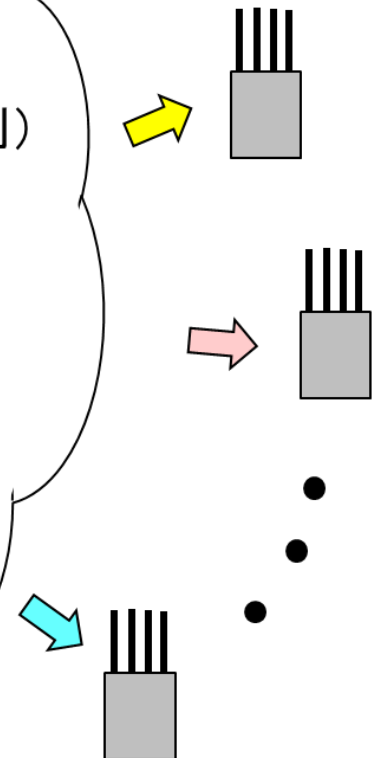
伝搬チャネル
(大規模ランダム行列)

- ・見通し外
- ・見通し内

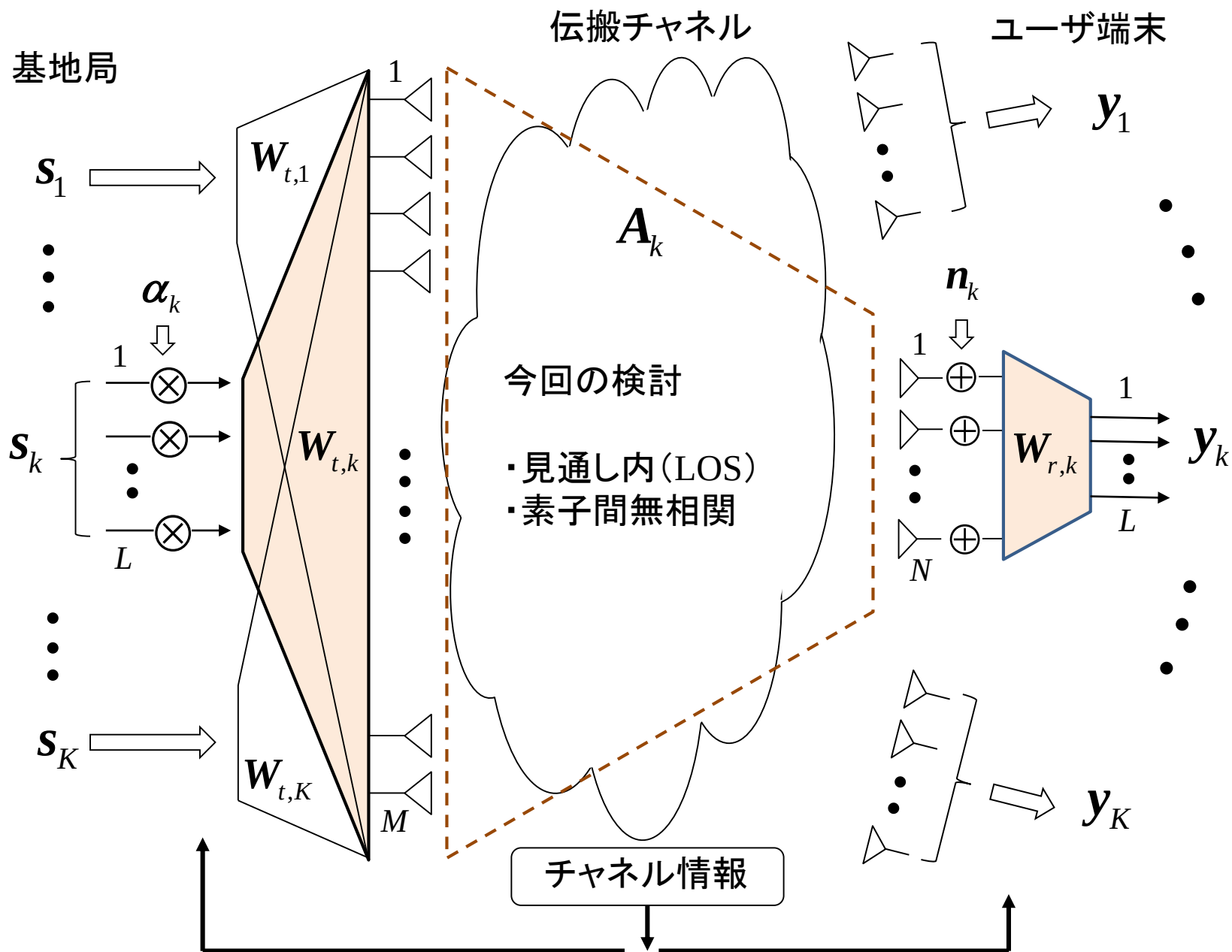
信号の素子間相関

- ・無相関
- ・有相関

多数のユーザ

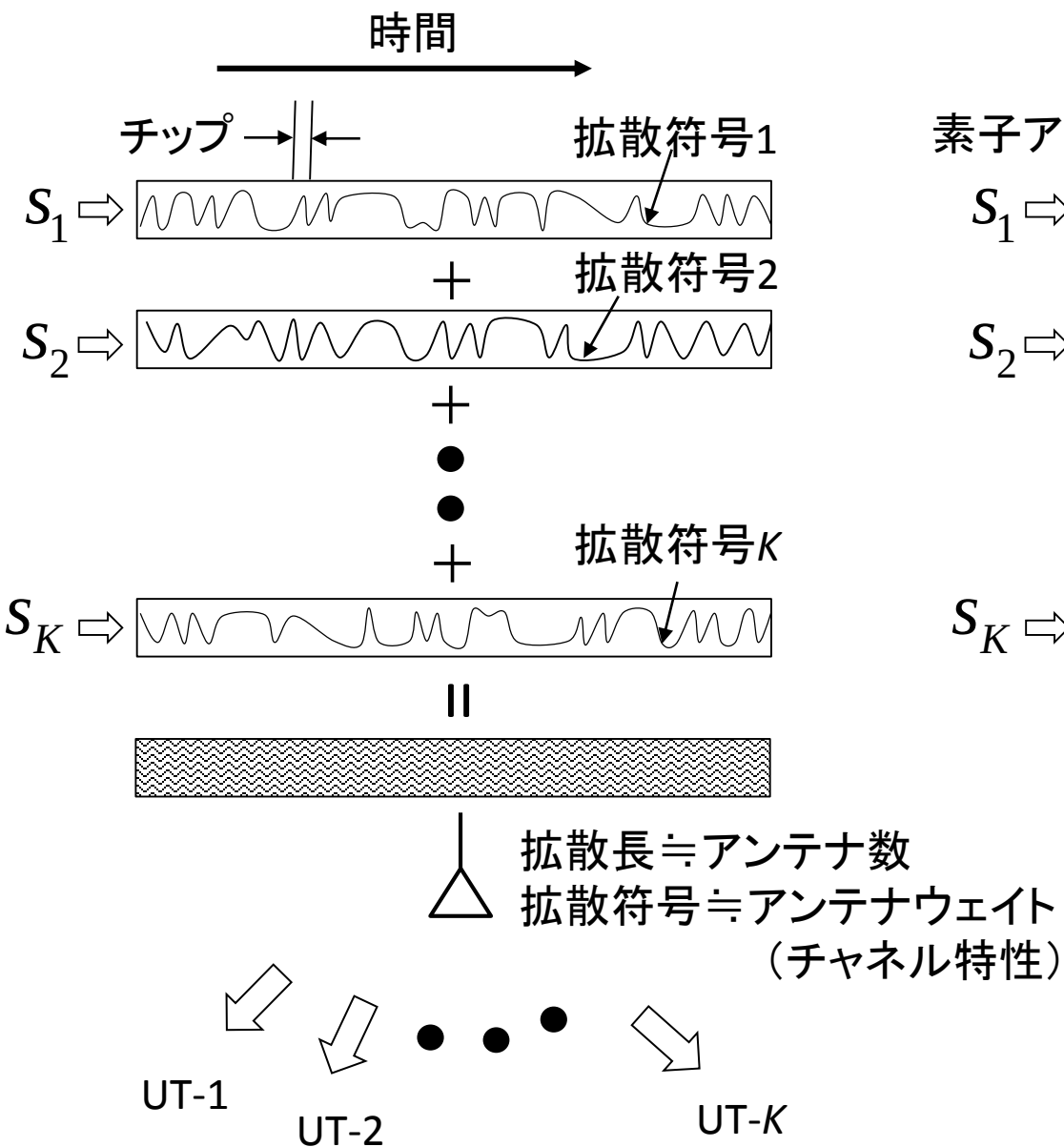


マルチユーザ Massive MIMO情報伝送システムの全体構成

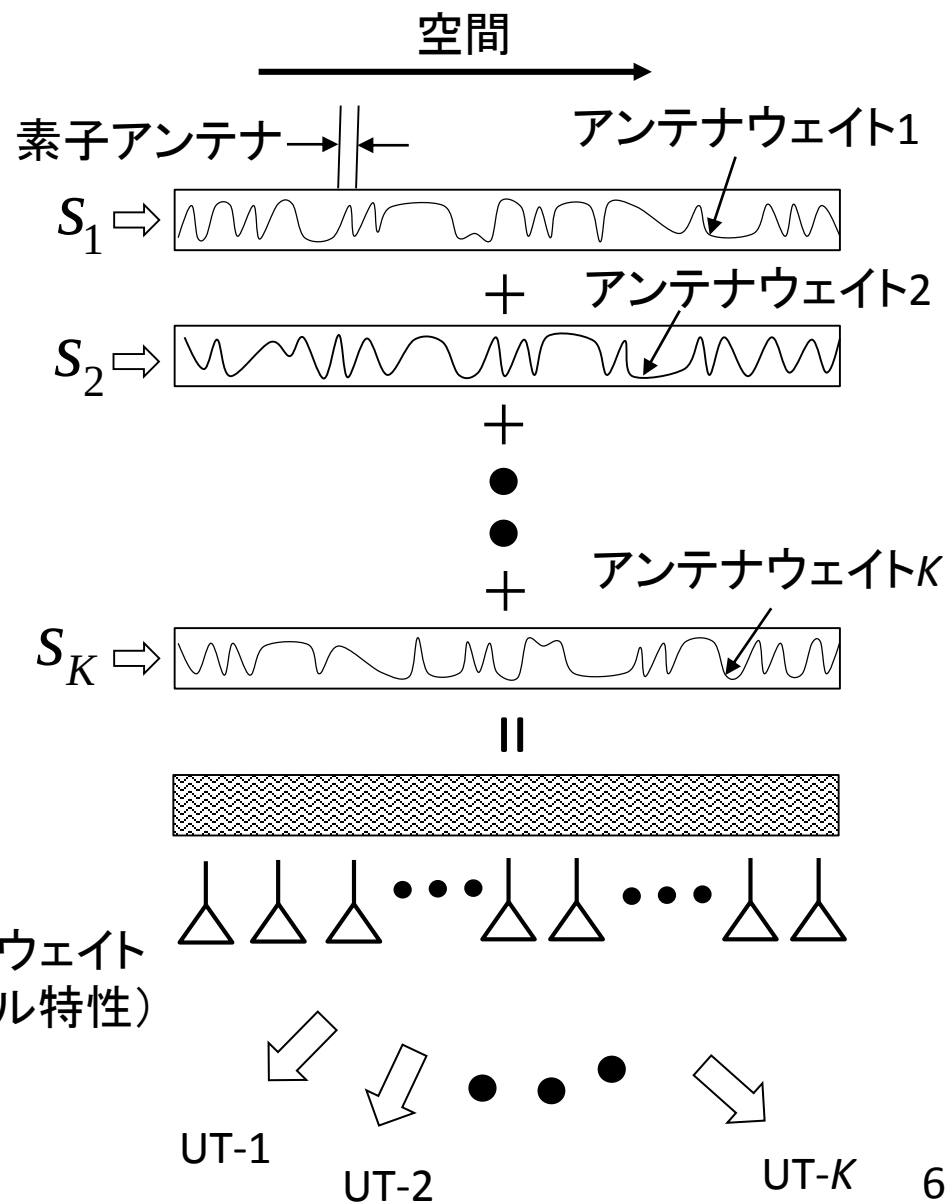


Massive MIMOにおける符号分割多重(CDM)との共通性

【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)

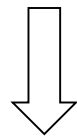
漸近固有値分布(マルチェンコ・パスツール(MP)則に基づく)

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

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

$p = F(\hat{\lambda})$ 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

送受信信号と伝搬チャネル(所望ユーザ k , 干渉ユーザ k')

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

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

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

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

ユーザ局(k)での受信信号

所望信号成分(ユーザ k 向けの信号)

$$\begin{aligned}\mathbf{y}_k^{(S)} &= \mathbf{W}_{r,k}^H \mathbf{A}_k \mathbf{W}_{t,k} \mathbf{x}_k \\ &= \text{diag}\left(\sqrt{\lambda_1^{(k)}} \quad \sqrt{\lambda_2^{(k)}} \quad \cdots \quad \sqrt{\lambda_L^{(k)}}\right) \mathbf{x}_k\end{aligned}$$

通信路行列の特異値分解

$$\mathbf{A}_k = \mathbf{E}_{r,k} \mathbf{D}_k \mathbf{E}_{t,k}^H$$

干渉信号成分(ユーザ k' 向けの信号)

$$\begin{aligned}\mathbf{y}_k^{(I)} &= \mathbf{W}_{r,k}^H \mathbf{A}_k \sum_{\substack{k'=1 \\ k' \neq k}}^K \mathbf{W}_{t,k'} \mathbf{x}_{k'} \\ &= \begin{pmatrix} \sqrt{\lambda_1^{(k)}} & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \sqrt{\lambda_2^{(k)}} & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & \sqrt{\lambda_L^{(k)}} & 0 & \cdots & 0 \end{pmatrix}_{(L \times N)}\end{aligned}$$

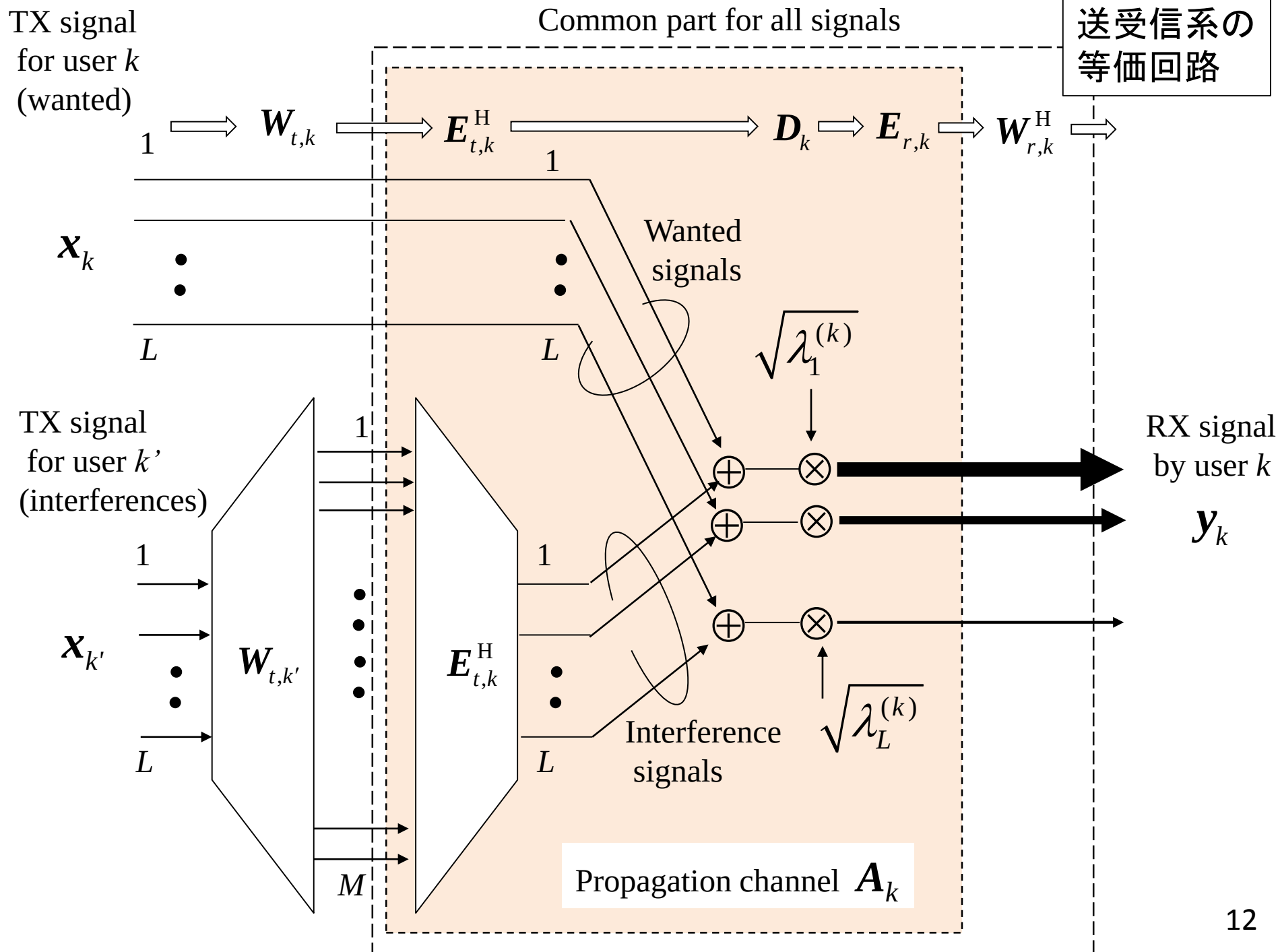
全ユーザ共通の行列

ランダム行列

$$\mathbf{E}_{t,k}^H \sum_{\substack{k'=1 \\ k' \neq k}}^K \mathbf{W}_{t,k'} \mathbf{x}_{k'}$$

雑音成分

$$\mathbf{y}_k^{(N)} = \mathbf{W}_{r,k}^H \mathbf{n}_k$$



通信路容量の計算式(等電力分配の場合)

ユーザ k に対する通信路容量

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

実効SN比

$$\gamma_{k,i} \approx \frac{P_{k,i}^{(S)}}{P_{k,i}^{(N)} + P_{k,i}^{(I)}} = \begin{cases} \frac{(\alpha_i^{(k)})^2 \lambda_i^{(k)} \gamma_0}{1 + \frac{(K-1)}{M} \lambda_i^{(k)} \gamma_0} & \text{(最適電力分配)} \\ \frac{M \lambda_i^{(k)} \gamma_0}{L(M + (K-1) \lambda_i^{(k)} \gamma_0)} & \text{(等電力分配)} \end{cases}$$

チャネル行列固有値(仲上・ライスフェージング)

$$\lambda_i^{(k)} \approx \begin{cases} \frac{\eta}{\eta+1} \lambda_D^{(k)} + \frac{1}{\eta+1} \lambda_{R,i}^{(k)} & (i=1) \\ \frac{1}{\eta+1} \lambda_{R,i}^{(k)} & (2 \leq i \leq N) \end{cases}$$

(η : ライスファクタ)

$$\lambda_D^{(k)} = MN$$

$$\lambda_{R,i}^{(k)} = F_{MP}^{-1}(p_i)$$

$$p_i = \frac{N-i+1}{N+1}$$

ユーザ当たりの通信路容量: 簡易計算式

パラメータ

- ・アンテナ素子数: M, N
- ・使用ストリーム数: L ・ユーザ数: K
- ・SN比: γ_0 ライスファクタ: η

ユーザ当たりの通信路容量

等電力分配

$$C_k^{(\text{EP})} = \sum_{i=1}^L \log_2 \left(1 + \frac{M \lambda_i^{(k)} \gamma_0}{L (M + (K-1) \lambda_i^{(k)} \gamma_0)} \right) \quad [\text{bit/sec/Hz/user}]$$

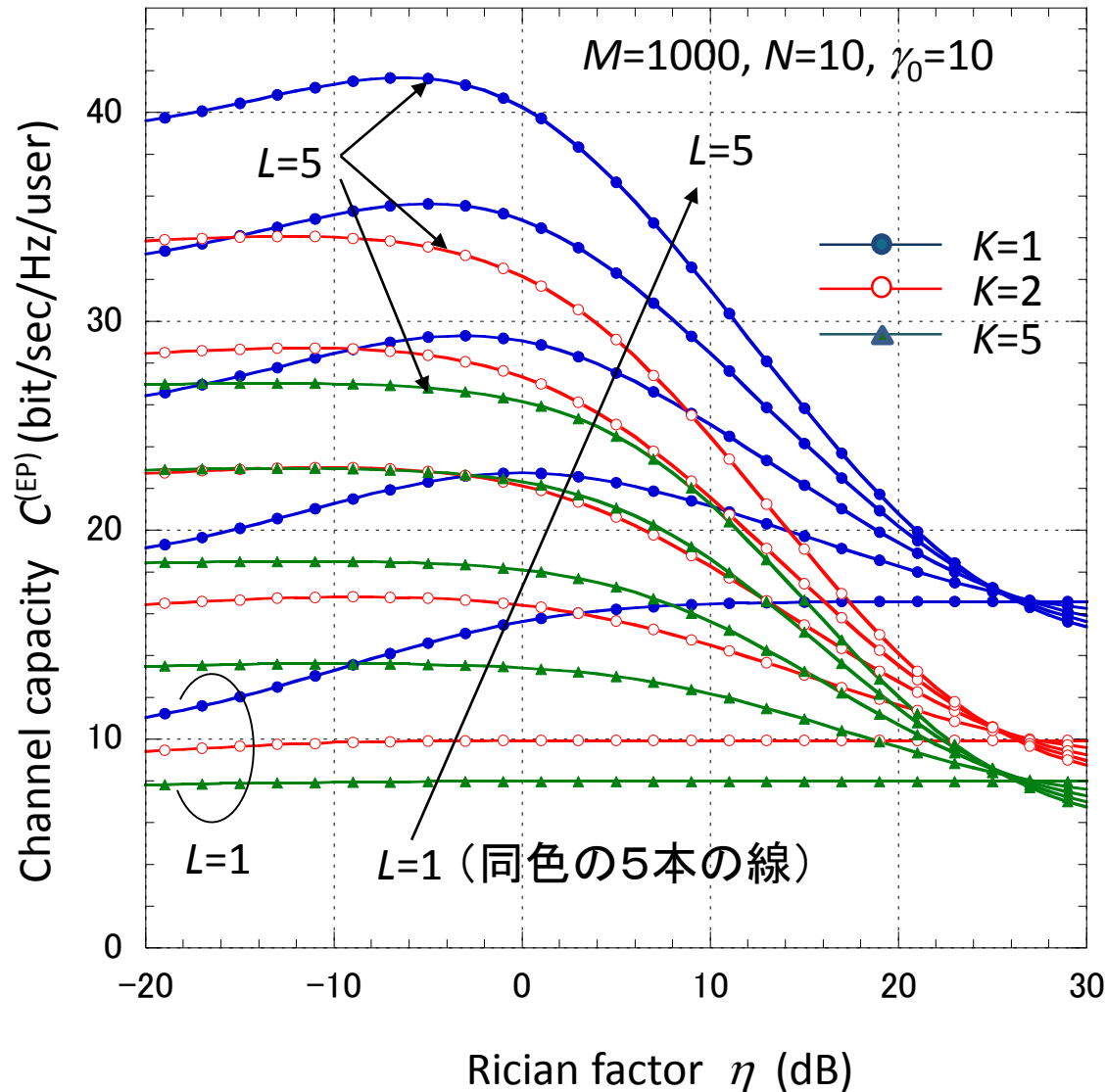
最適電力分配 (注水定理に基づく)

$$C_k^{(\text{WF})} = \sum_{i=1}^{L_0} \log_2 \left(1 + \frac{M (\alpha_i^{(k)})^2 \lambda_i^{(k)} \gamma_0}{M + (K-1) \lambda_i^{(k)} \gamma_0} \right) \quad \left(L_0 \leq L, \sum_{i=1}^{L_0} (\alpha_i^{(k)})^2 = 1 \right)$$

ユーザ合計の通信路容量 (SN比: 無限大)

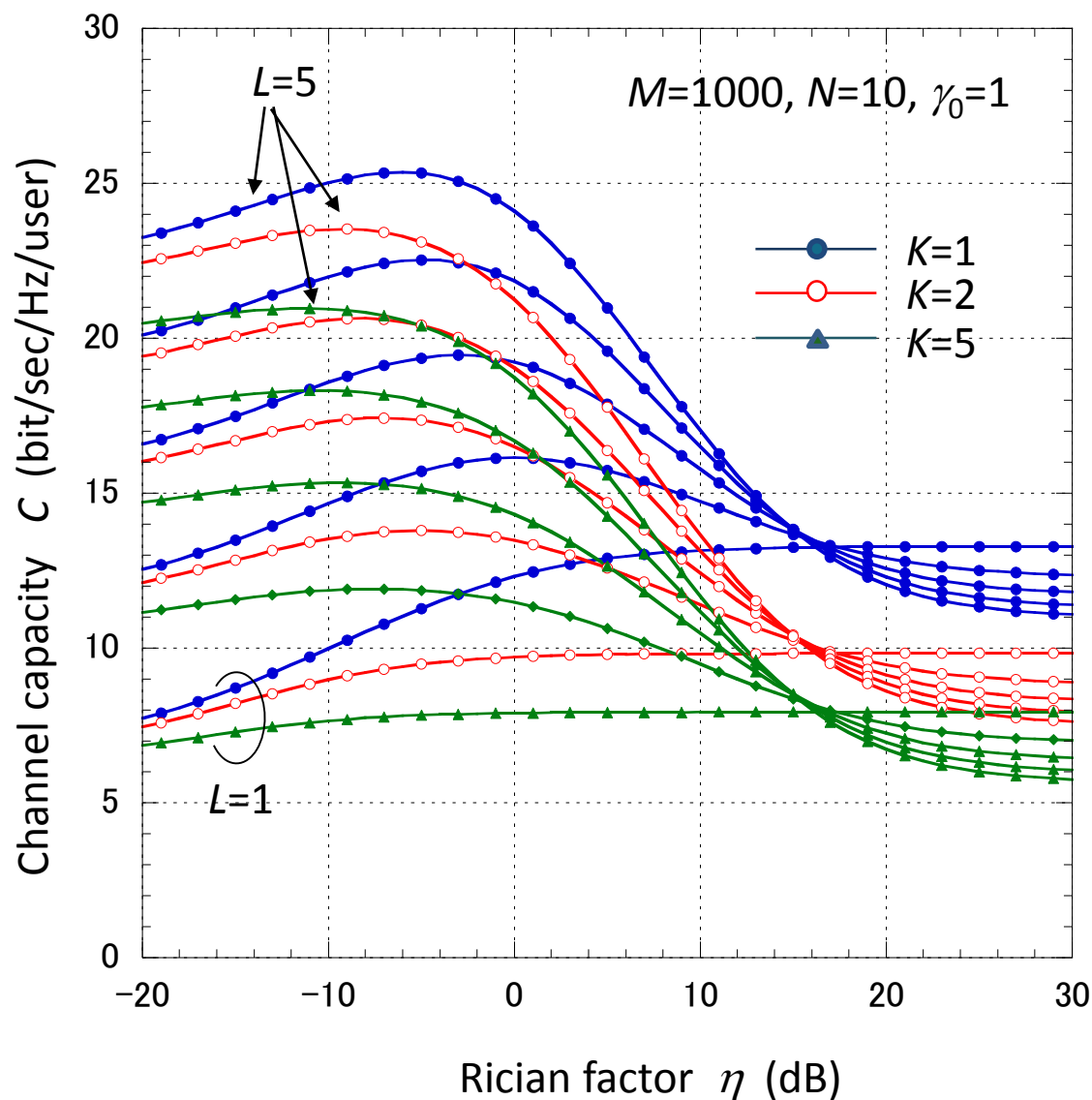
$$C_{\text{total}} = KC = KL \log_2 \left(1 + \frac{M}{L(K-1)} \right) \rightarrow C_{\text{total}, \max} = \lim_{K \rightarrow \infty} C_{\text{total}} \approx M / \ln 2$$

見通し内環境(仲上・ライスフェージング)での通信路容量(1) (等電力配分、SN比:10 (10dB))

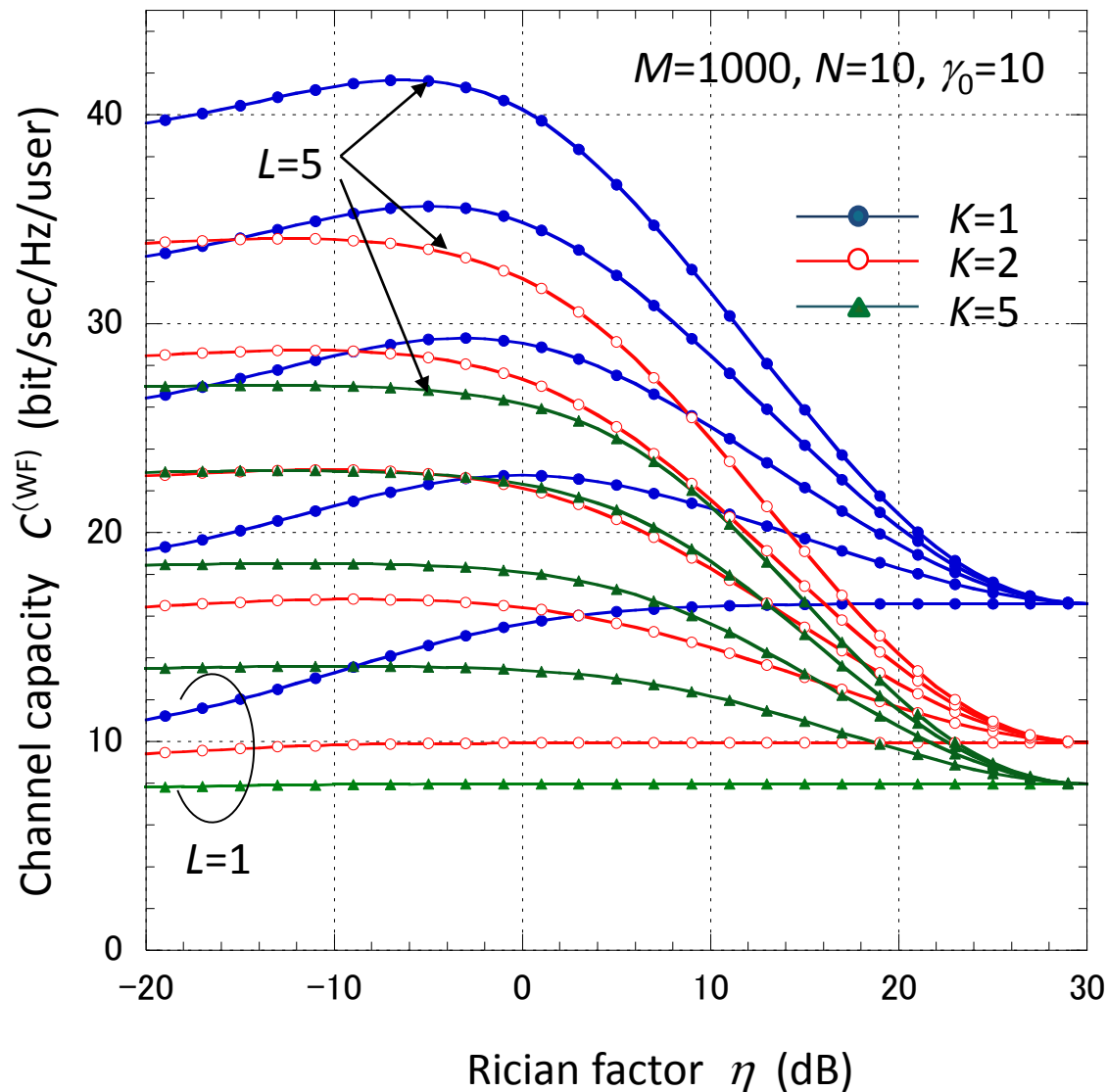


- 1) ライスファクタ0dB以下では、NLOSと変わらない
- 2) ライスファクタ10dB程度でも空間多重効果はある
- 3) ライスファクタ20dB以上では最大固有値パスに集約
- 4) 等電力分配はライスファクタが大きいところで通信路容量逆転

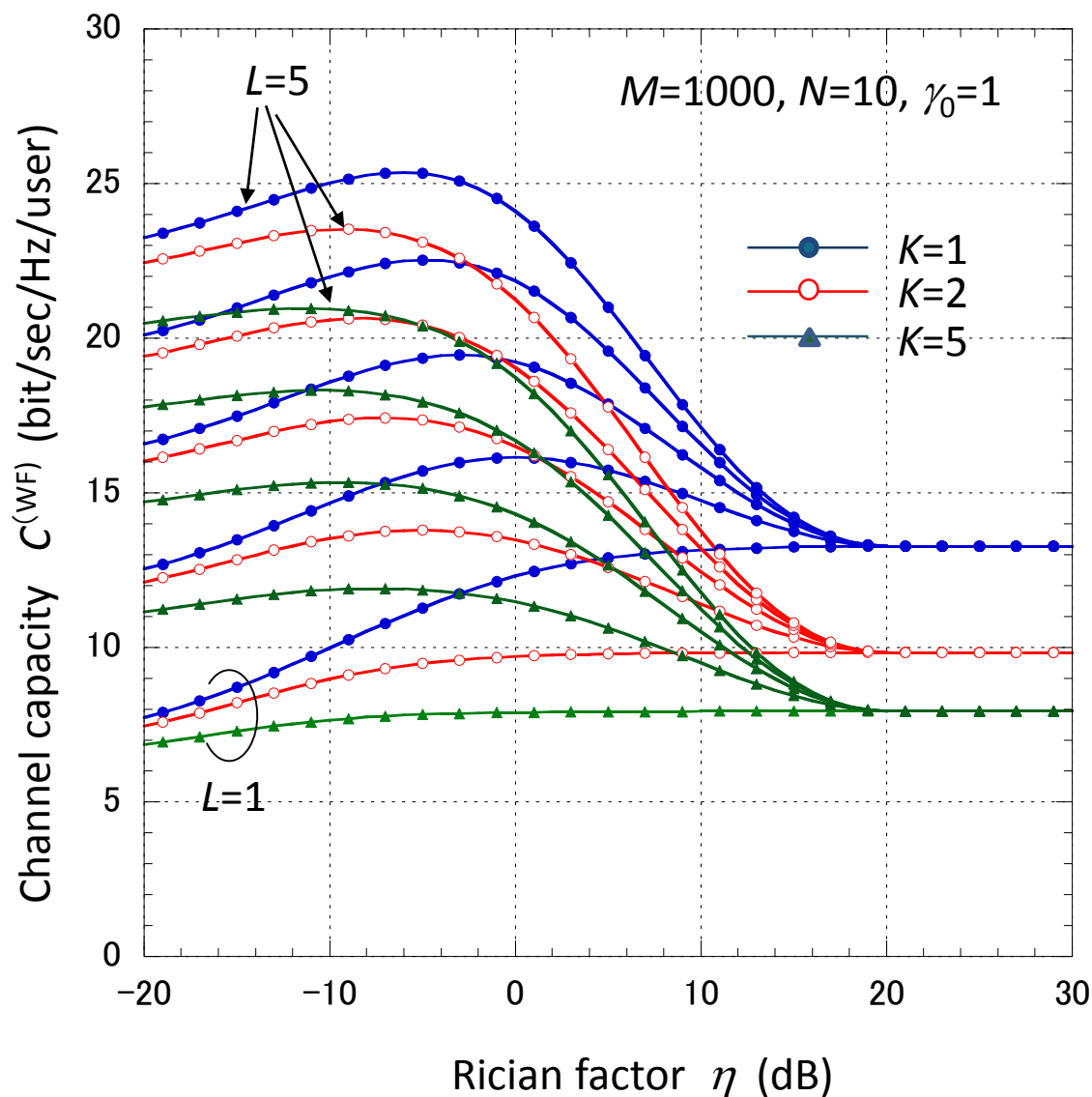
見通し内環境(仲上・ライスフェージング)での通信路容量(2) (等電力配分、SN比:1 (0dB))



見通し内環境(仲上・ライスフェージング)での通信路容量(3) (最適電力配分、SN比:10 (10dB))



見通し内環境(仲上・ライスフェージング)での通信路容量(4) (最適電力配分、SN比:1 (0dB))



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

今回対象とした伝搬環境は見通し内(LOS)環境、アレー素子間は無相関(シングルユーザの検討から、有相関の場合はむしろ通信路容量は増える)

見通し内環境では、多重度などの特性がライスファクタに依存し、これを明らかにした。

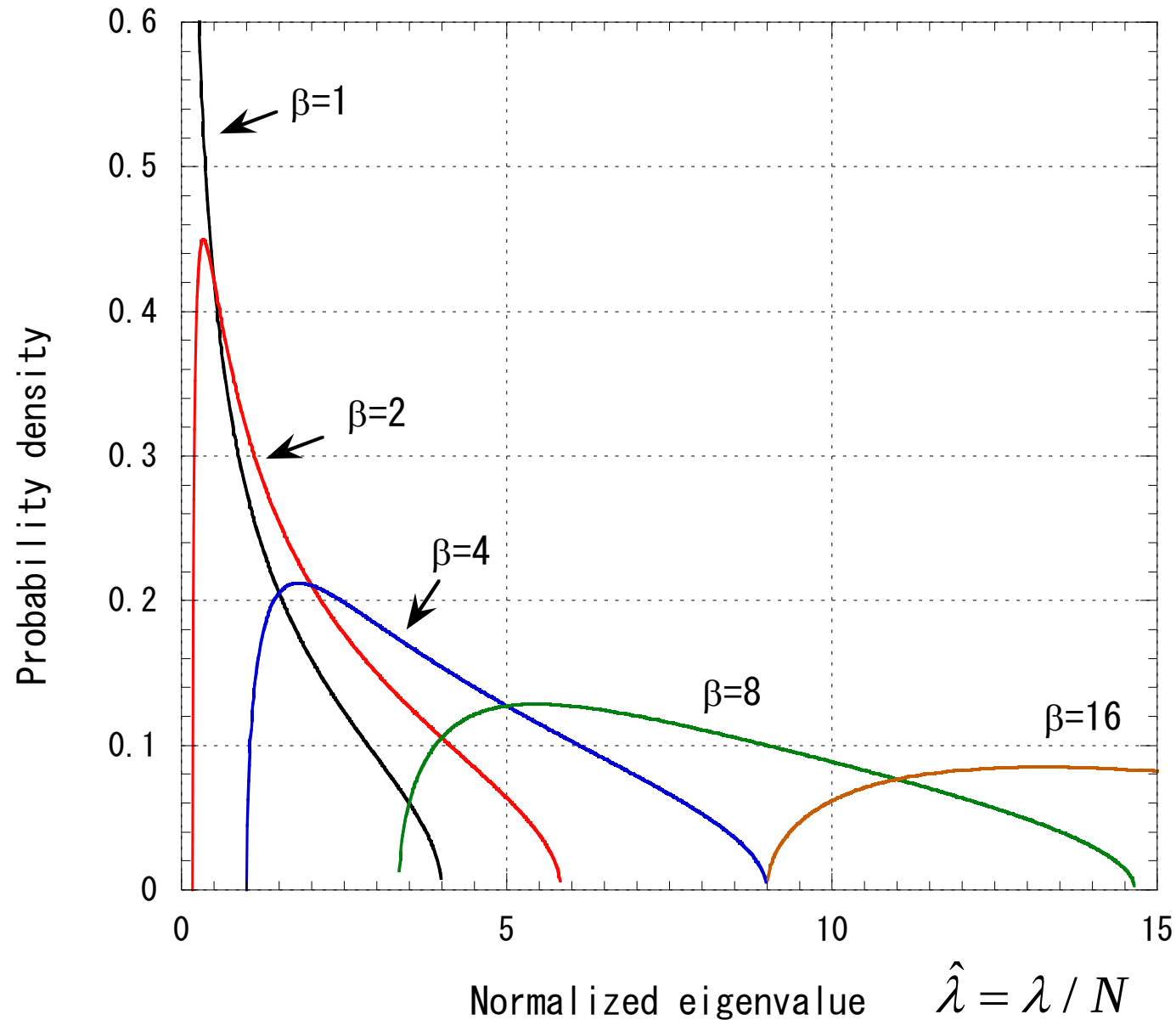
総合的なまとめ(NLOS, LOS, 無相関、有相関)は、3月のRCS研で発表予定

本日の発表の詳細、および、前回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)

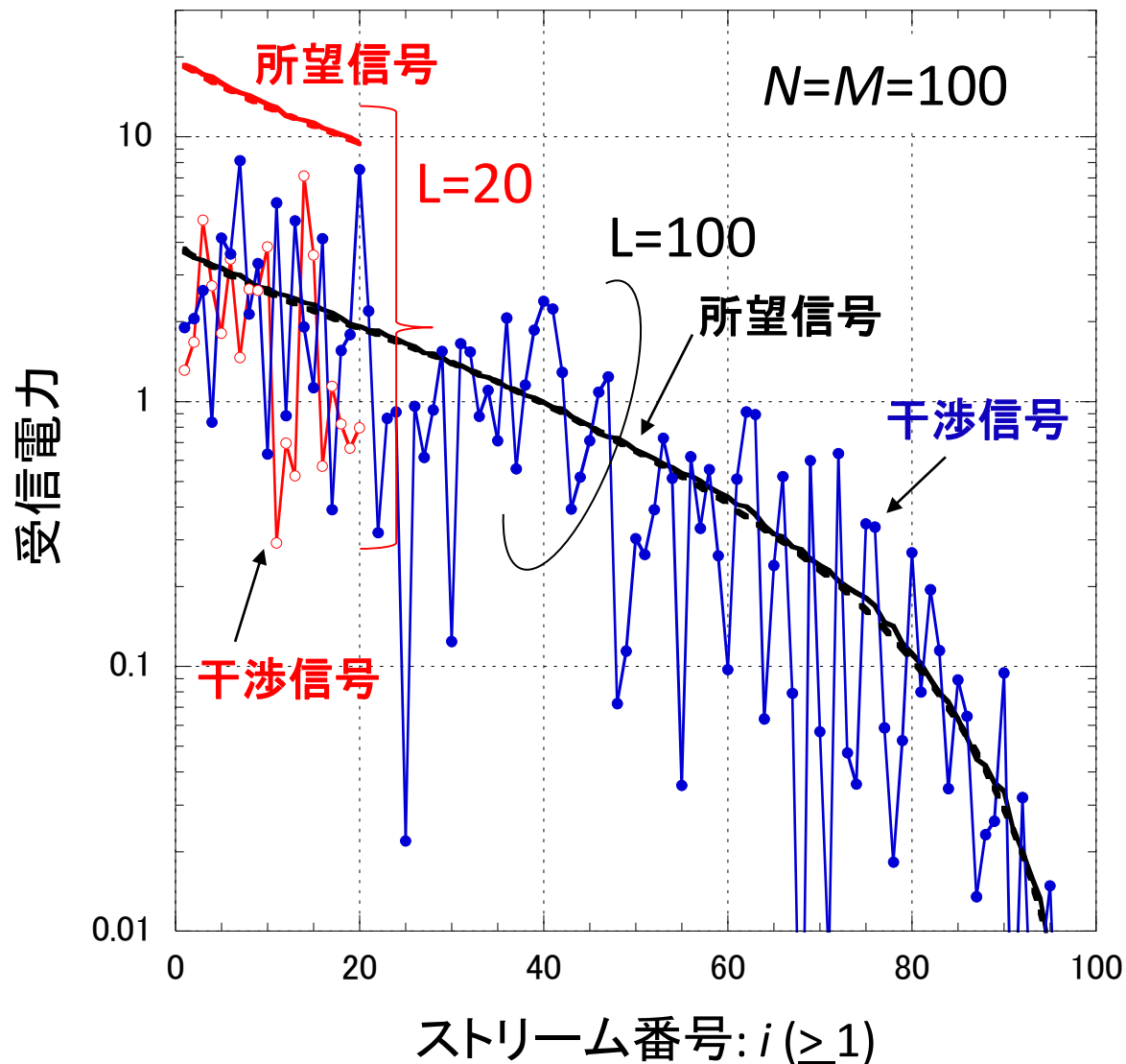
参考図面(2019.12 AP研発表)

NLOS環境(レイリーフェージング環境)での特性

MP則に従う漸近固有値分布(確率密度関数:PDF)



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

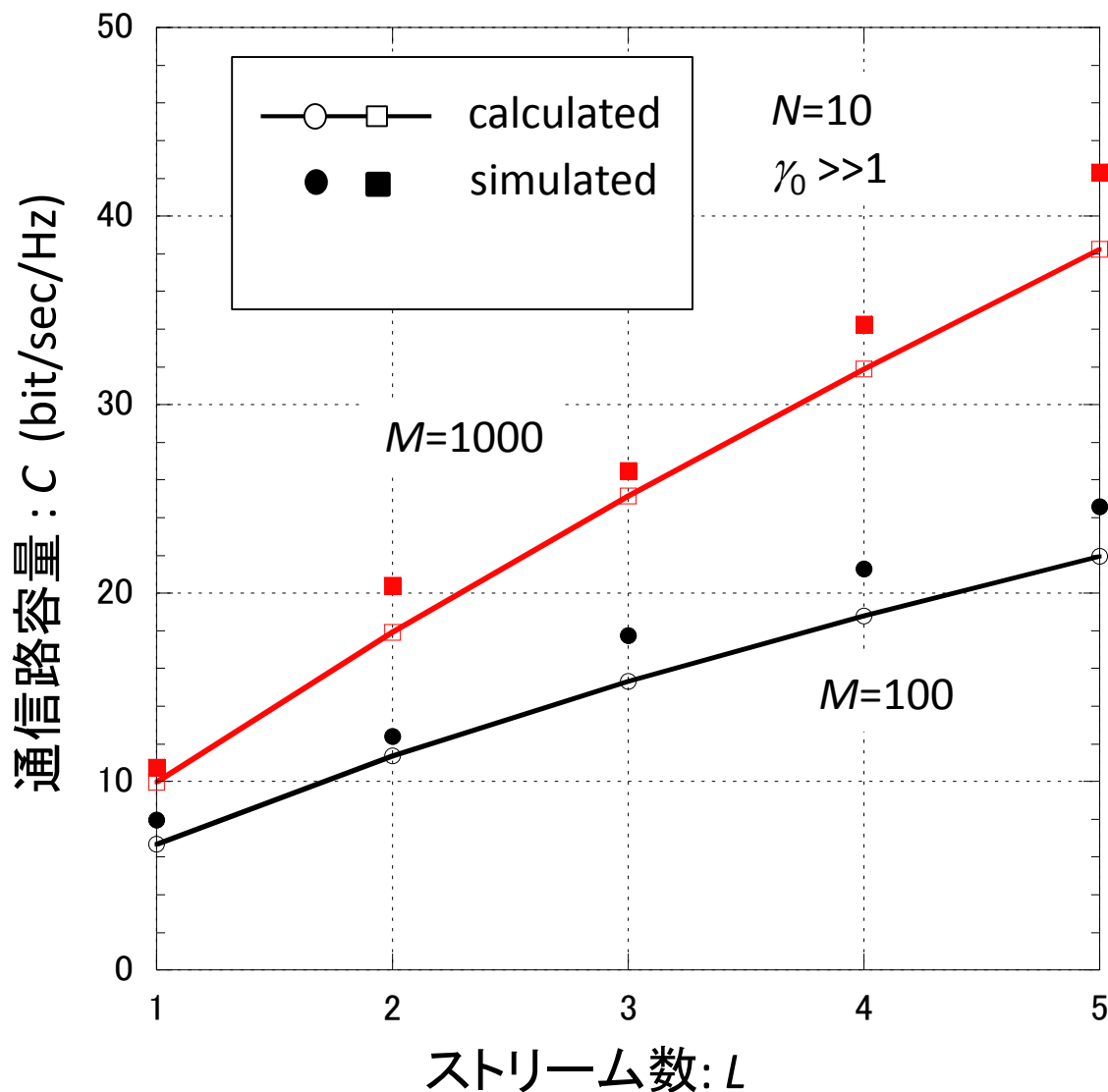
所望信号電力

- ・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)

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

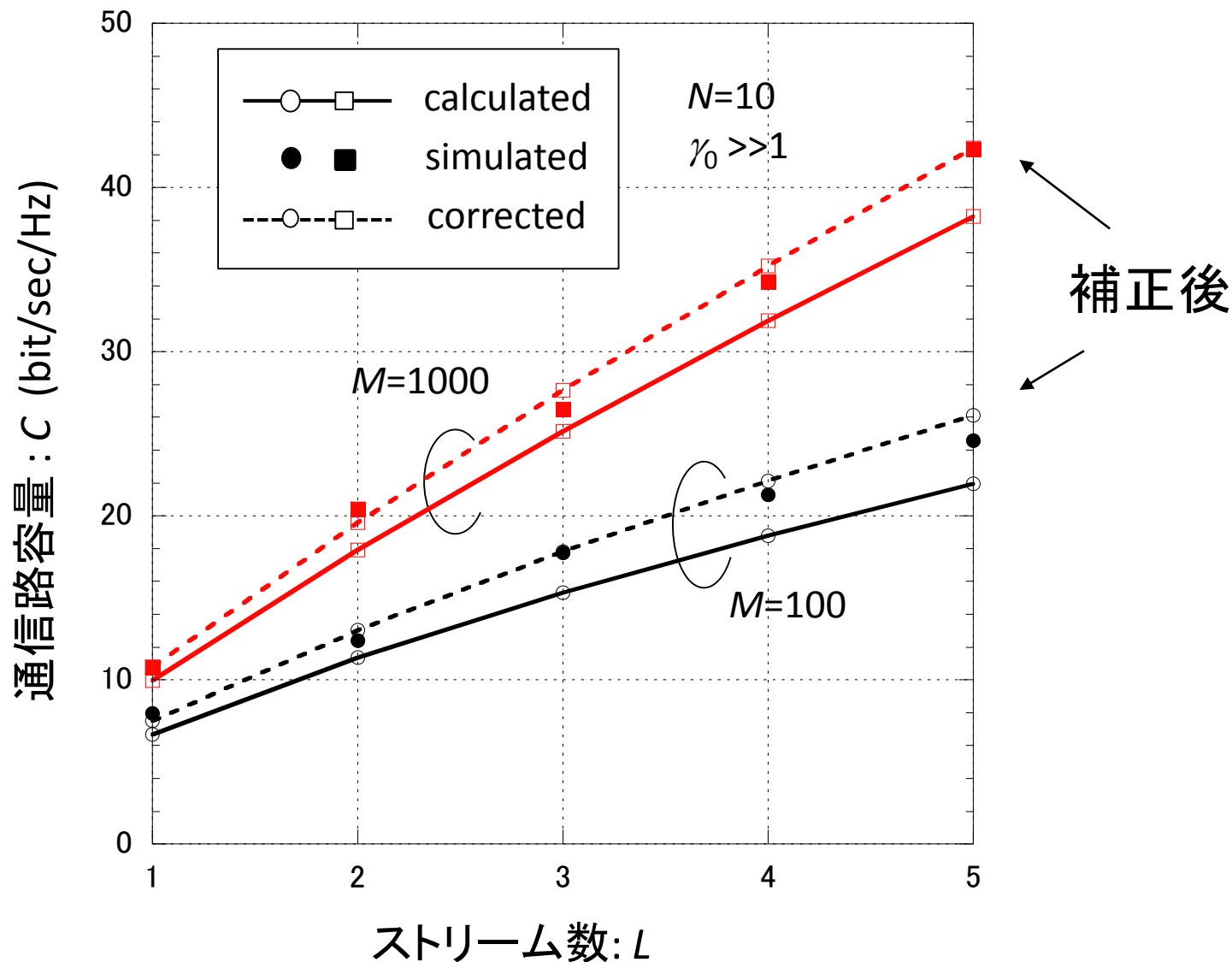
x は平均値1で指数分布する
干渉波電力変動係数

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

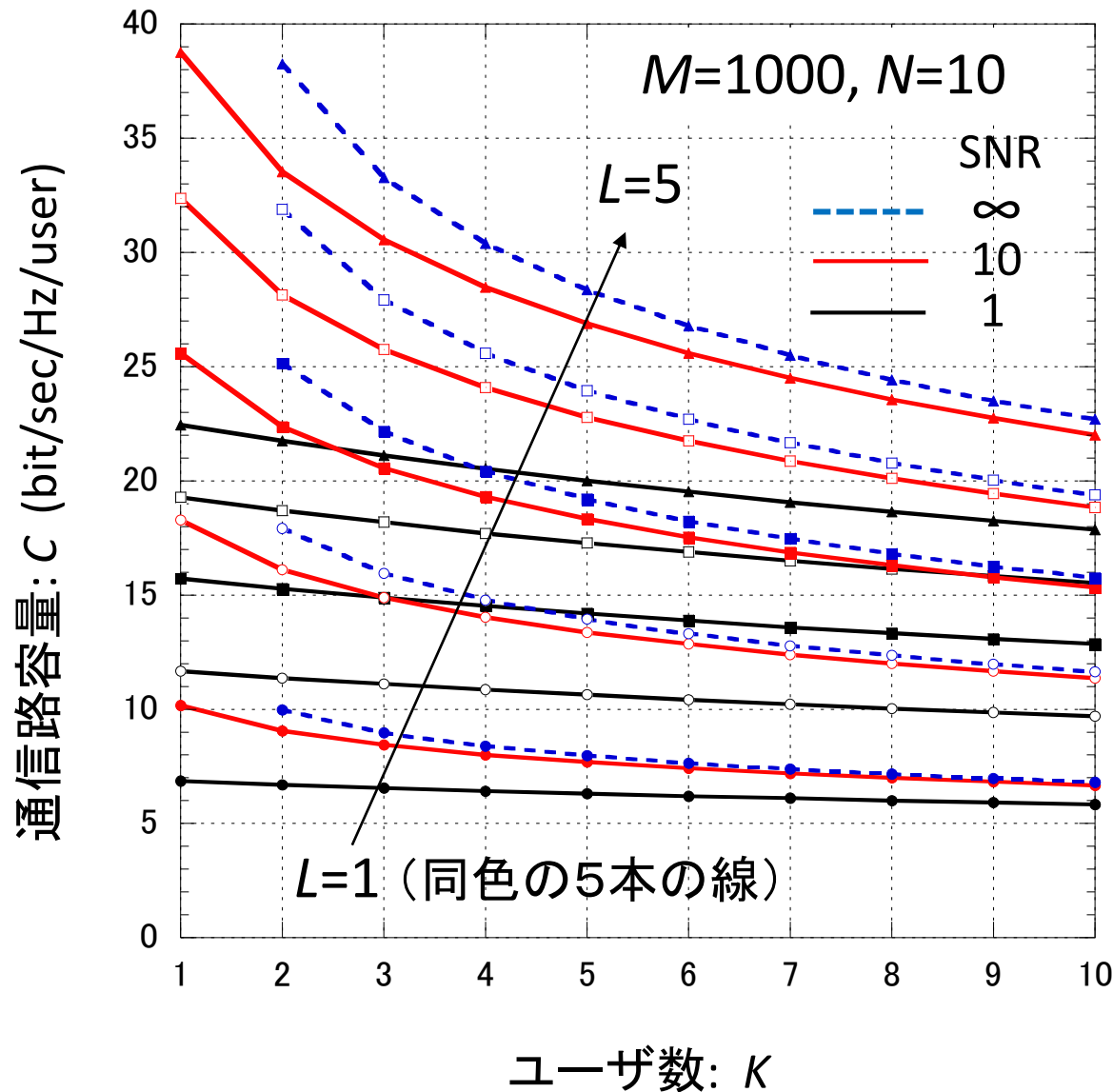
オイラーの定数

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

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