

# フェージングエミュレータの 角度拡がり特性の測定実験

Experimental Verification on Spatial and Temporal Performance  
an ESPAR-Based Fading Emulator

2003年5月19日

梅田快貴 阪口啓 高田潤一 荒木純道 大平孝  
東京工業大学 ATR

Y.UMEDA K.SAKAGUCHI J.TAKADA K.ARAKI T.OHIRA  
Tokyo Institute of Technology ATR

# 発表内容

- 研究背景
- フェージングエミュレータの動作モデル
- 受信信号モデルの定式化と最尤推定
- 複素角度分布の考察
- 実験結果と検証
- まとめと今後の課題

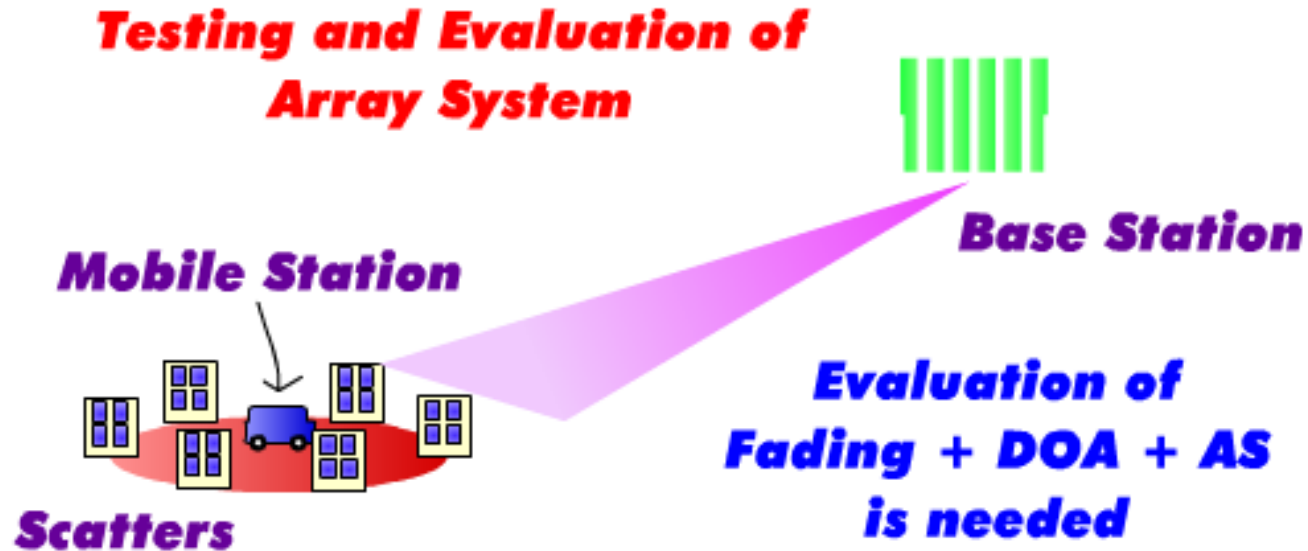
# 移動通信システムの課題

- 将来的な高速通信に対して  
アレーアンテナにおける適応的な  
多重波抑制・干渉除去技術が脚光  
アレー信号処理を用いた基地局評価

エスパアンテナ構造を利用した  
フェージングエミュレータで  
電波暗室内で安価で簡便に行う。

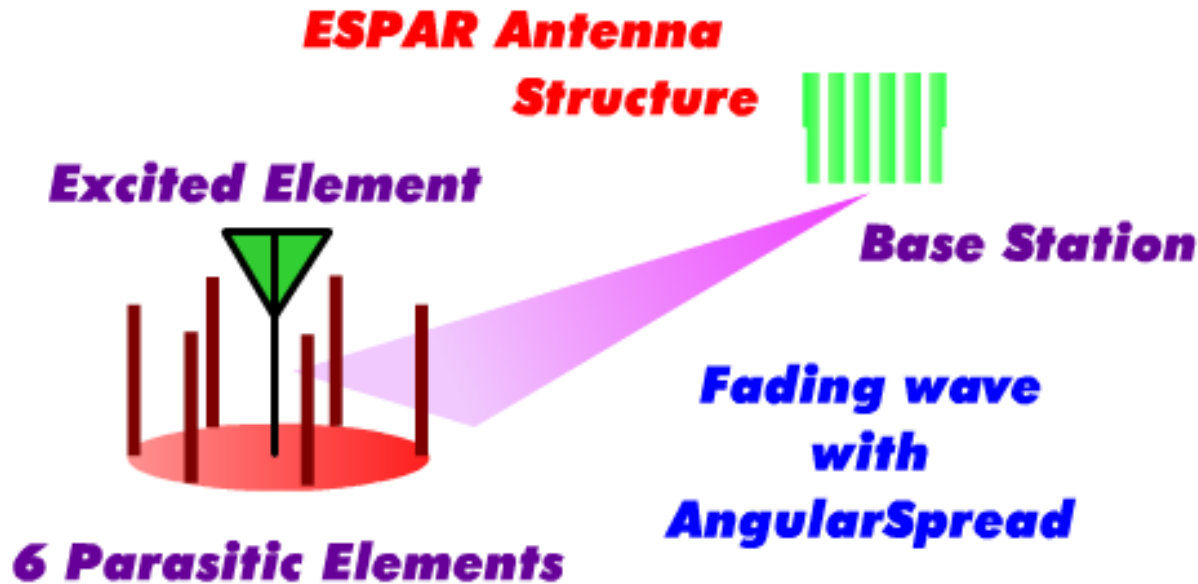
# フェージングエミュレータに 要求される性能

- 移動通信の伝搬環境



フェージング特性を電子的に制御したい！

# フェージングエミュレータの 動作モデル



$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_7 \end{bmatrix} = \mathbf{Y}[\mathbf{Y} + \mathbf{Y}_L]^{-1} \begin{bmatrix} I_{CW} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$$
$$\mathbf{Y}_L = \text{diag}[1/z_s, 1/jx_2, \dots, 1/jx_7]$$

バラクタを変化させることで  
各素子の電流分布が変化  
フェージングの生成

# フェージング受信信号モデルの 定式化

多重散乱波環境モデル (a:アレーモードベクトル)

$$\mathbf{r}(t) = \sum_{i=1}^N \beta_i \mathbf{a}(\theta_i) \mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t)$$

推定パラメータ  
2 × Nケ

- 瞬時的な実現値に対して推定を行う  
推定パラメータの集約

# フェージング受信信号モデルの 定式化

$$\begin{aligned}\sum_{i=1}^N \beta_i \mathbf{a}(\tilde{\theta} + \Delta\theta_i) &\simeq \sum_{i=1}^N \beta_i \left[ \mathbf{a}(\tilde{\theta}) + \Delta\theta_i \frac{\partial \mathbf{a}(\tilde{\theta})}{\partial \theta} \right] \\ &= \left( \sum \beta_i \right) \mathbf{a}(\tilde{\theta}) + \left( \sum \beta_i \Delta\theta_i \right) \frac{\partial \mathbf{a}(\tilde{\theta})}{\partial \theta} \quad \text{ただし、} \\ &= \gamma \mathbf{a}(\tilde{\theta}) + \eta \frac{\partial \mathbf{a}(\tilde{\theta})}{\partial \theta} \quad \gamma = \sum_{i=1}^N \beta_i \\ &= \gamma \left[ \mathbf{a}(\tilde{\theta}) + \xi \frac{\partial \mathbf{a}(\tilde{\theta})}{\partial \theta} \right] \quad (6) \quad \eta = \sum_{i=1}^N \beta_i \Delta\theta_i \\ &\simeq \gamma \left[ \mathbf{a}(\tilde{\theta} + \xi) \right] \quad \xi = \frac{\eta}{\gamma}\end{aligned}$$

$$\mathbf{r}(t) \simeq \gamma \mathbf{a}(\tilde{\theta} + \xi) \mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t) \quad \text{【近似モデル】}$$

+ は複素角、角度拡がりの表現が可能

# パラメータの最尤推定

$$r_1(t) = \gamma a_1(\theta) s(t) + n_1(t)$$

$$r_2(t) = \gamma a_2(\theta) s(t) + n_2(t)$$

⋮

$$r_M(t) = \gamma a_M(\theta) s(t) + n_M(t)$$

尤度を最大にするように  $\theta$  と  $\gamma$  を推定する

ネットワークアナライザで測定することを想定するので  $s(t)=1$  とおいて

$$f \stackrel{\text{def}}{=} |r_1 - \gamma a_1|^2 + |r_2 - \gamma a_2|^2 + \dots + |r_M - \gamma a_M|^2$$

$f$  を最小とする  $\theta$  と  $\gamma$  を推定する



# パラメータの最尤推定

最小二乗法より、

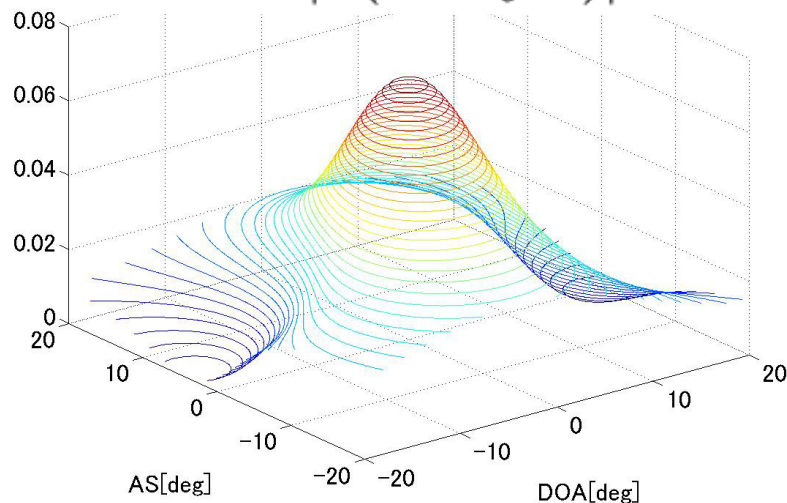
$$\hat{\gamma} = \frac{\mathbf{a}^\dagger \mathbf{r}}{|\mathbf{a}|^2}$$

ゆえに評価関数は

$$\begin{aligned} f &= |\mathbf{r} - \hat{\gamma} \mathbf{a}(\theta)|^2 \\ &= |\mathbf{r}|^2 - \frac{|\mathbf{a}(\theta)^\dagger \mathbf{r}|^2}{|\mathbf{a}(\theta)|^2} \end{aligned}$$

1, 2の数値探索となる

$$\arg \max_{\theta_1, \theta_2} \frac{|\mathbf{a}(\theta_1 + j\theta_2)^\dagger \mathbf{r}|^2}{|\mathbf{a}(\theta_1 + j\theta_2)|^2}$$



# 複素到来角分布の考察

- 複素到来角の分布は  $\sum \beta_i \Delta \theta_i / \sum \beta_i$  の分布に従う  
ガウス分布の比の統計分布

$$p(\xi) = \frac{1}{2C} \frac{1}{(\xi^2/C^2 + 1)^{3/2}} \quad \text{【 M分布 】}$$

$$C = \sqrt{\theta_i^2}$$

Cは絶対値一次モーメントであり、素波の角度分布の標準偏差に一致。

# 推定結果の劣化の考察

- システム誤差を含む加法性雑音

$$|n|^2 = |r(t) - \gamma a(\theta)|^2$$

が小さいときに近似誤差は大きくなり、  
雑音は大きくなるから、

$$|\gamma| < \sigma$$

が雑音の標準偏差 より小さくなるときは  
近似の妥当性がくずれ、推定のしにくい  
状態であると考ええる。

# フェージング測定実験

- 暗室実験の概要

中心周波数:2.484[GHz]

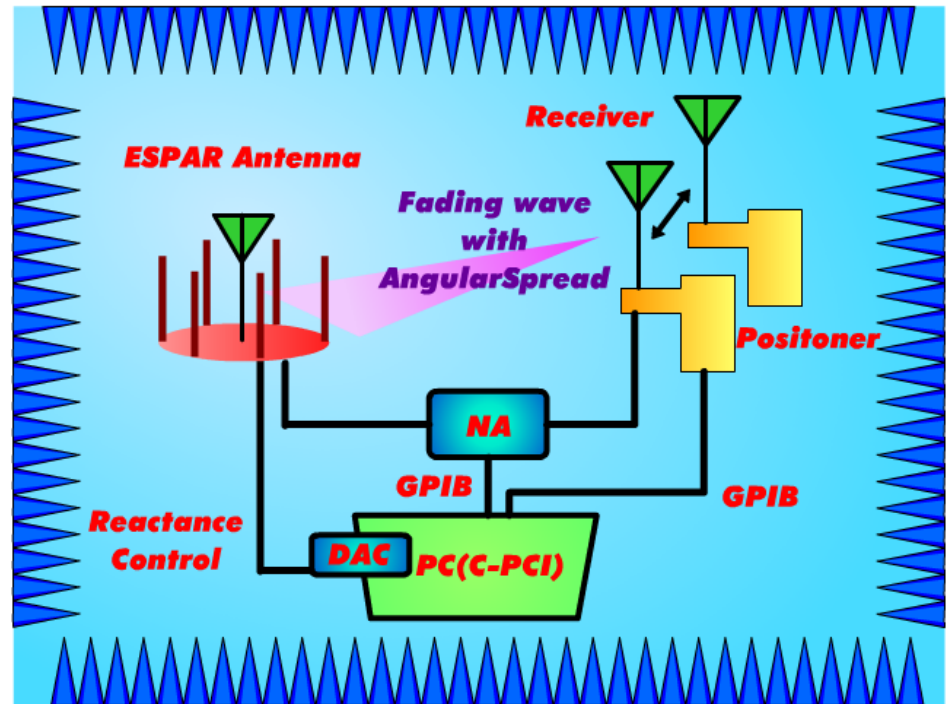
フェージング波の受信系は

素子数6の合成開口アレー

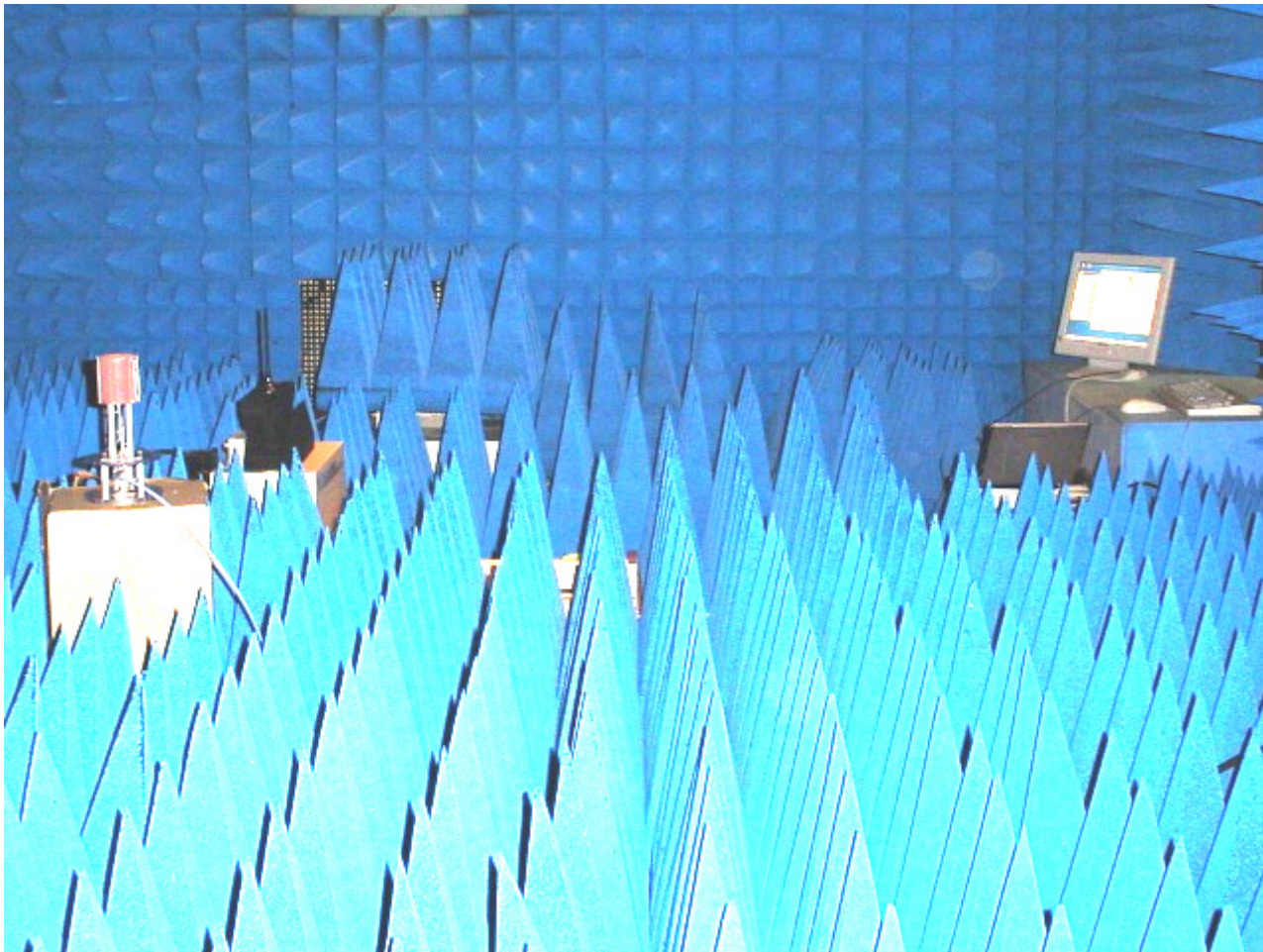
アレー間隔: /2

送受信間距離:約1.2[m]

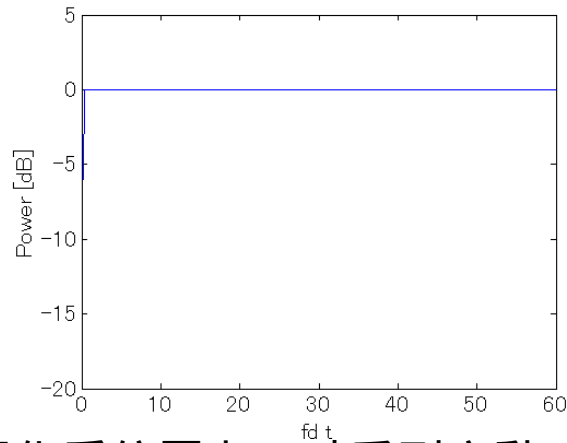
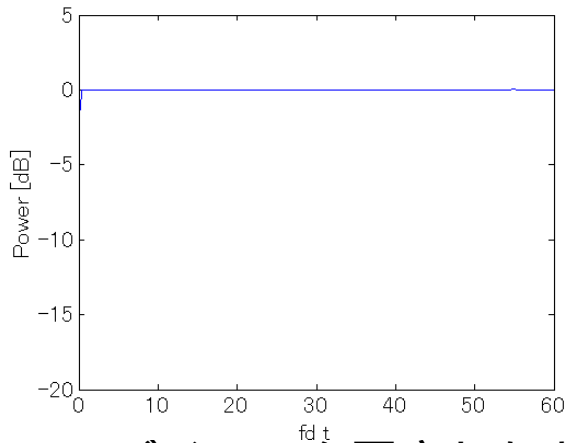
$$\sqrt{\theta_i^2} = 1.25[\text{deg}]$$



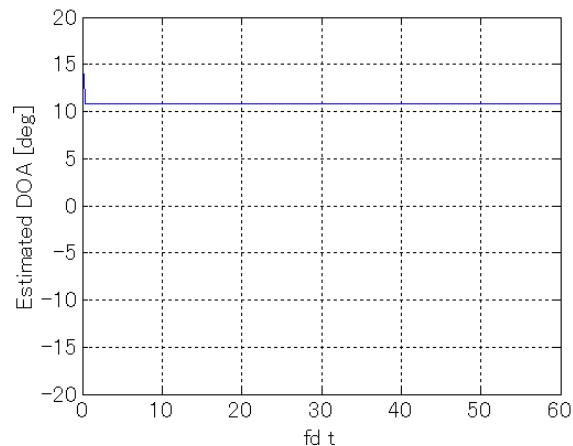
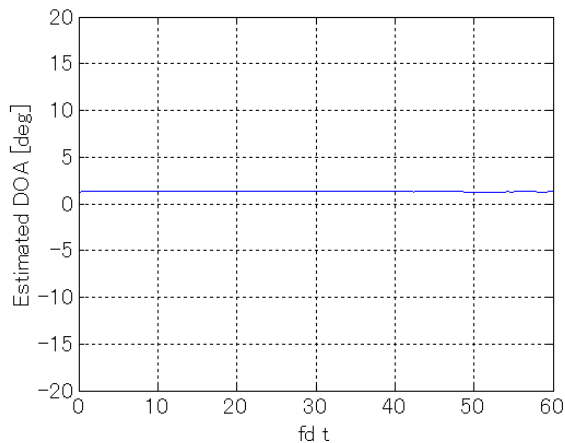
# 測定の様子



- フェージングエミュレータを時間的に固定させたとき

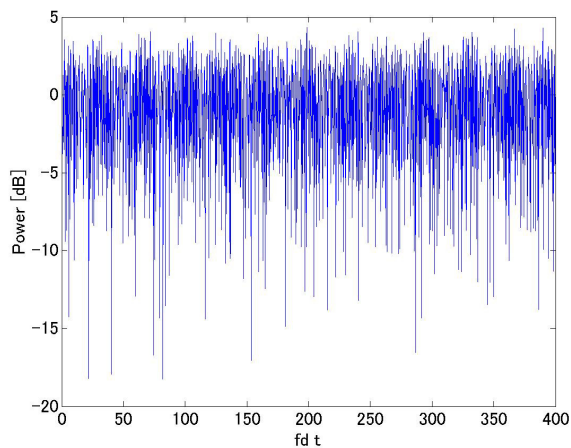


バイアスを固定したときの正規化受信電力の時系列変動  
(左:0[deg]に設置、右:10[deg]に設置)

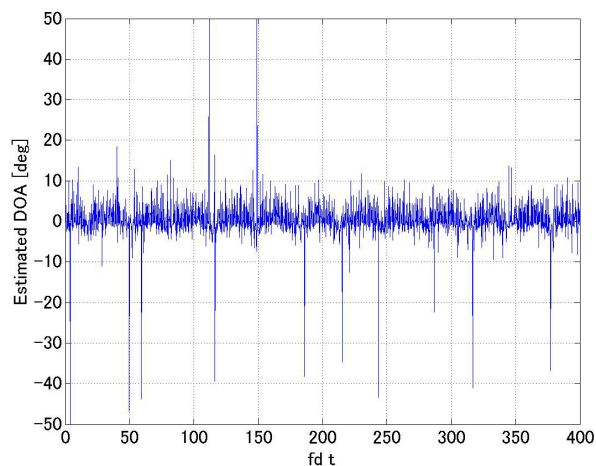


バイアスを固定したときの到来角度推定の時系列変動  
(左:0[deg]に設置、右:10[deg]に設置)

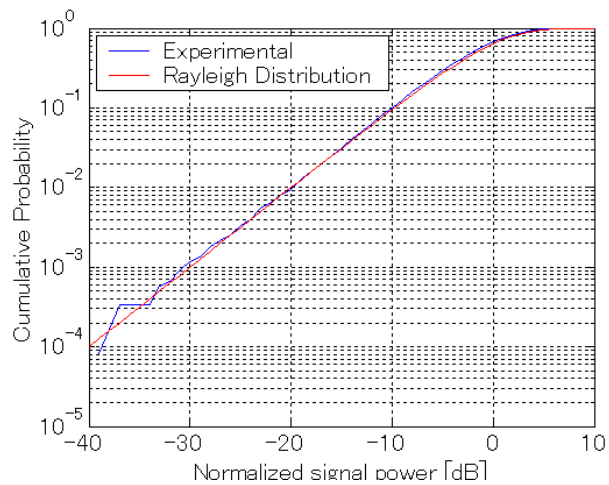
# ● 時間特性－受信電力変動のようす 0[deg]



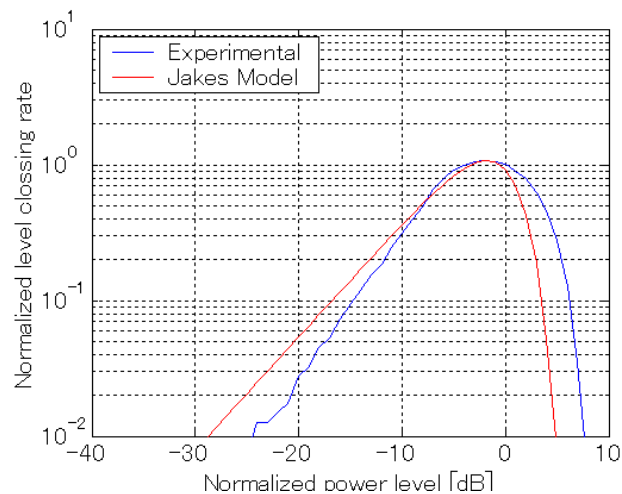
正規化受信電力の時系列変動



到来角度推定の時系列変動

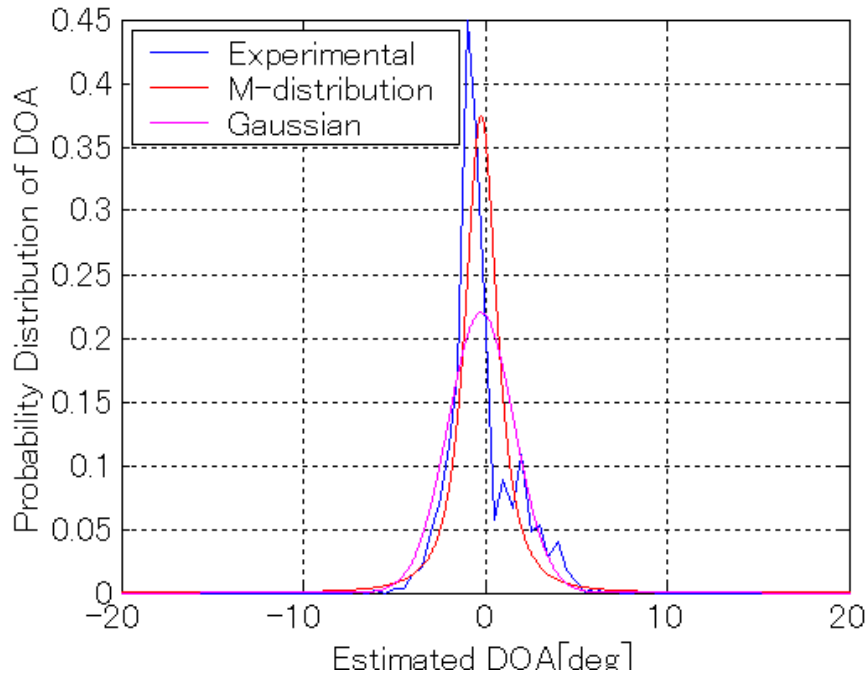


正規化受信電力の累積分布



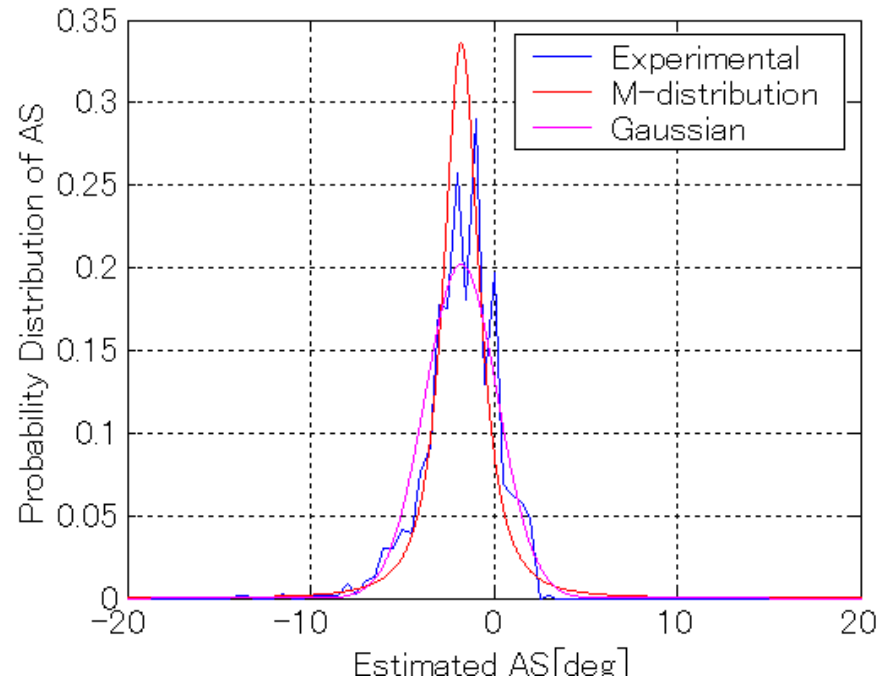
正規化受信電力のレベル交差回数

# 空間特性—到来角度分布・角度拡がり分布



到来方向推定の確率分布 0[deg]

絶対値1次モーメント:1.37



角度拡がり推定の確率分布 0[deg]

絶対値1次モーメント:1.49

**ガウス分布よりもM分布に近い分布  
として観測された。**



# まとめ

- 電波暗室内で角度拡がりを持つ  
レイリーフェージングの模擬を実現。
- 測定系も含めて、比較的安価で簡便に構築した。
- 最尤推定によるパラメタ推定の有効性を実証。
- M分布により理想的な角度拡がりであることを示した。
- アレー信号処理システム評価として要求されるフェージング特性が満足されたことを確認した。

# 今後の課題

## 【発展形として】

- 複数波到来環境の模擬
- 位相分布の制御可能な構成
- 空間相関特性の検討

【ケースに合わせた  
フェージングエミュレータの活用法】