



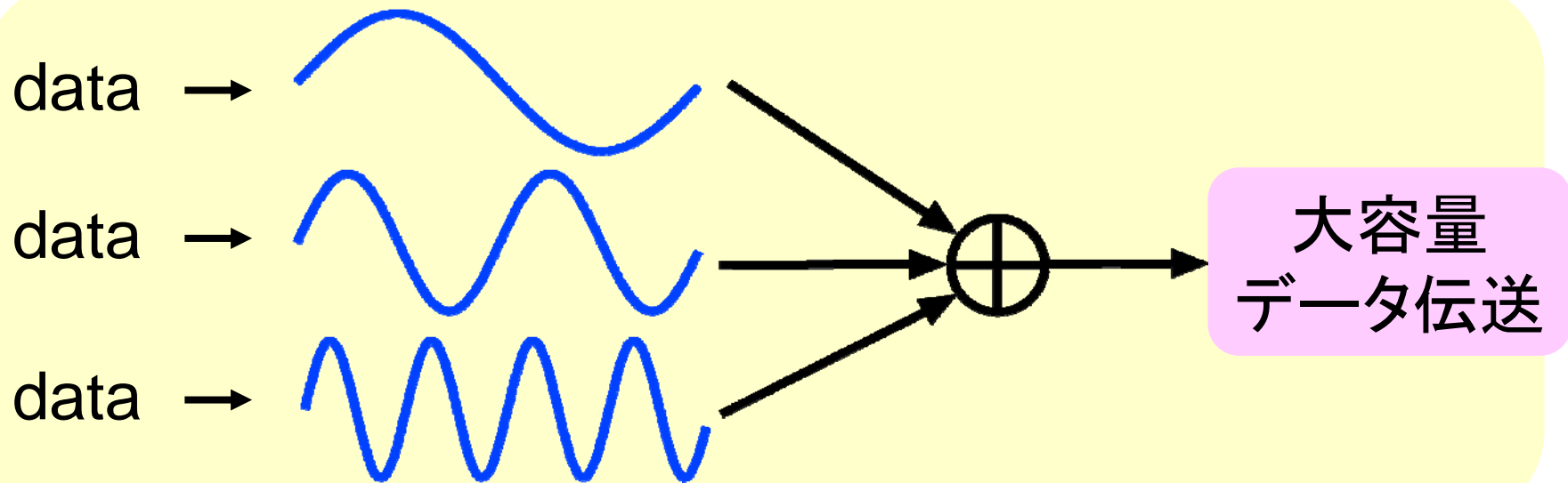
インパルス性雑音の時間変動を考慮した マルチチャネル信号判定手法

名古屋大学 片山研究室
石牟礼涼太

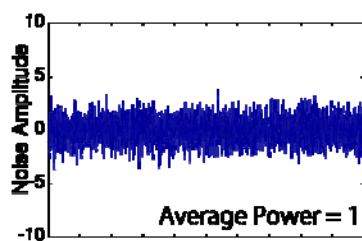
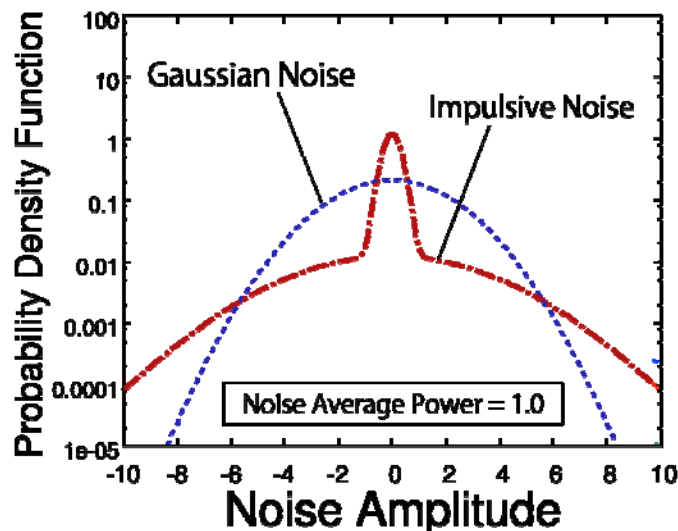


大容量データ伝送のために

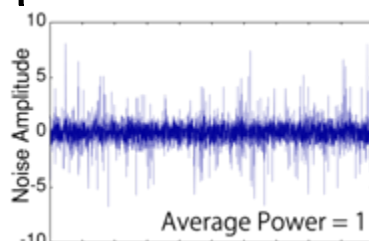
- 複数の帯域を利用してデータを伝送
 - マルチチャネル伝送システム
 - OFDM等



研究背景:通信におけるインパルス性雑音



ガウス雑音時間波形



インパルス性雑音時間波形

- ガウス雑音

- 主に受信機内部で発生する熱雑音が原因

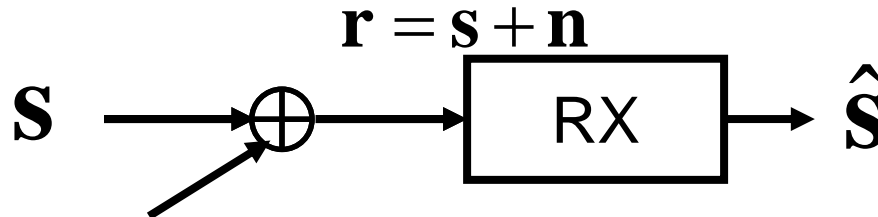
- インパルス性雑音

- 様々な要因による突発的な雑音
 - 電力線通信における電力線雑音[1]
 - レーダーのちらつき雑音[2] など

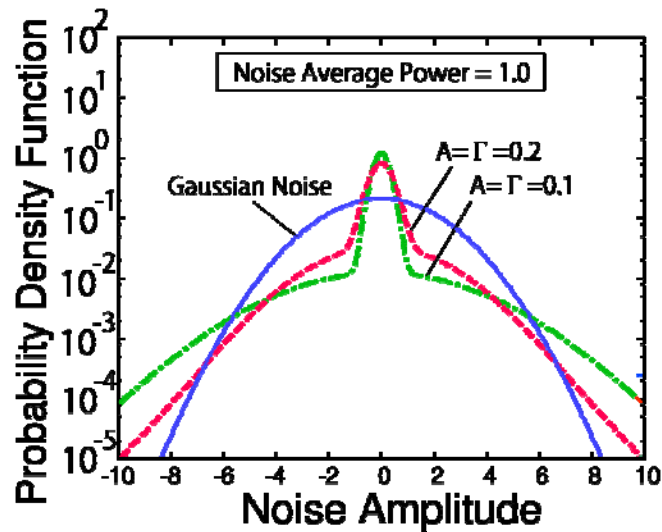
[1] N. Andreadou, et al. "Modeling the Noise on the OFDM Power-Line Communications System", IEEE Trans., 2010

[2] S. Fang, et al., "Modeling and simulation of non-Gaussian correlated clutter," in Proc. CIE Int. Conf. Radar, 1996

雑音に関する知識を利用した信号判定

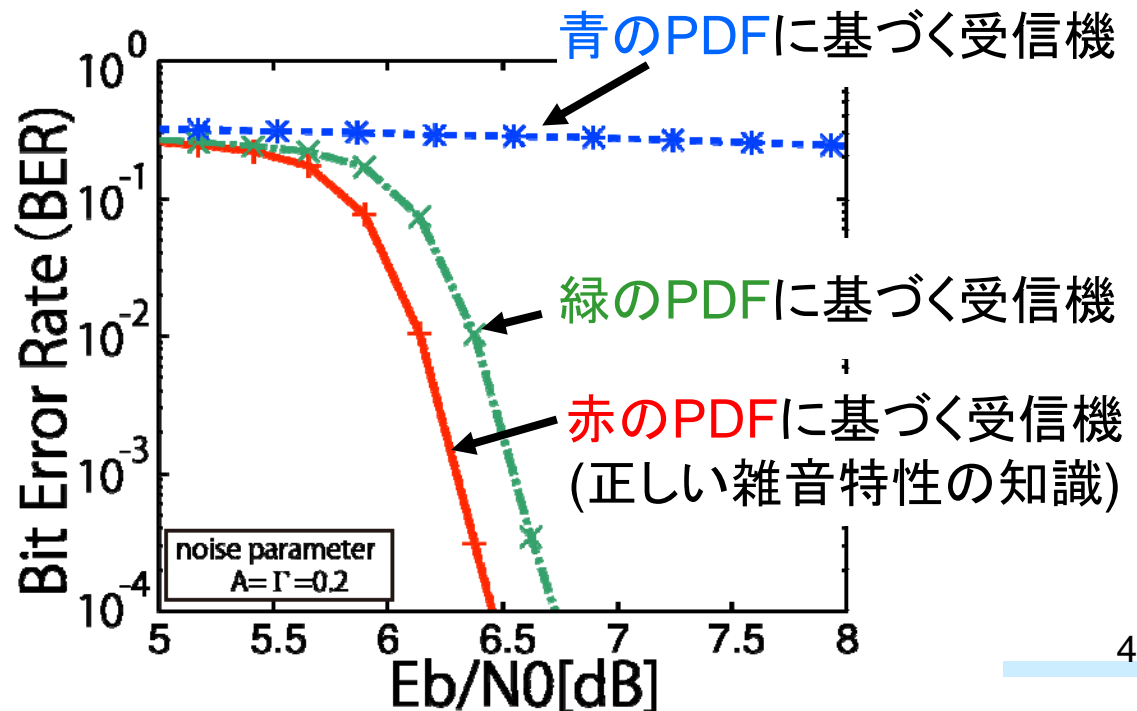


Noise(赤色のPDF)

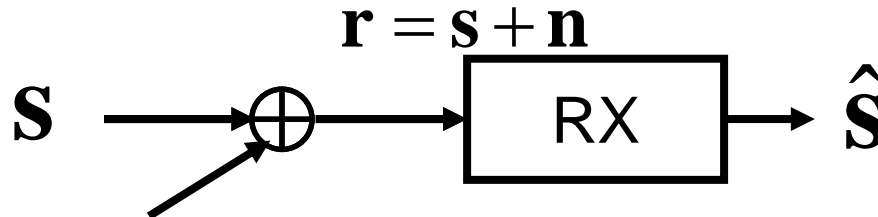


シミュレーション諸元

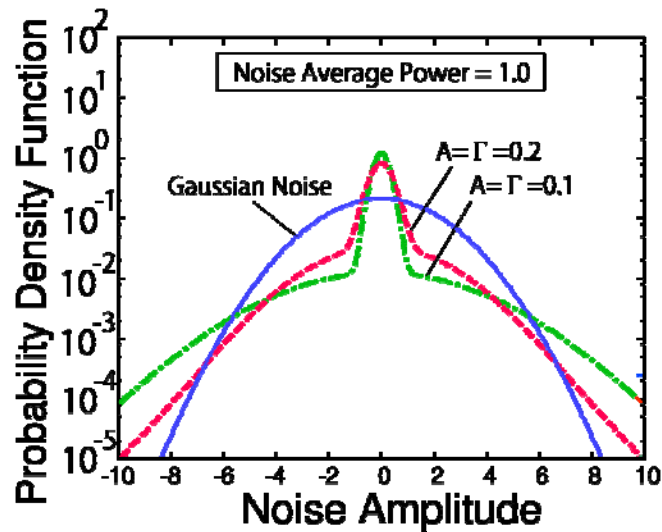
変調方式	BPSK
符号化方式	ターボ符号
符号化率R	1/3



雑音に関する知識を利用した信号判定



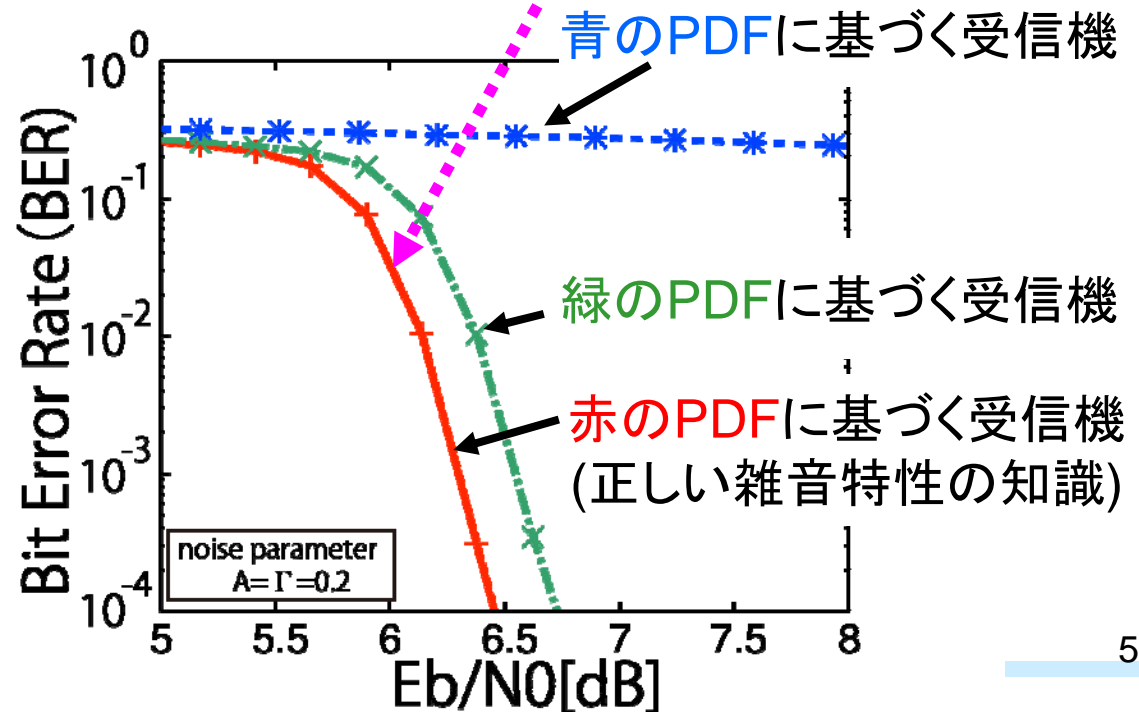
Noise(赤色のPDF)



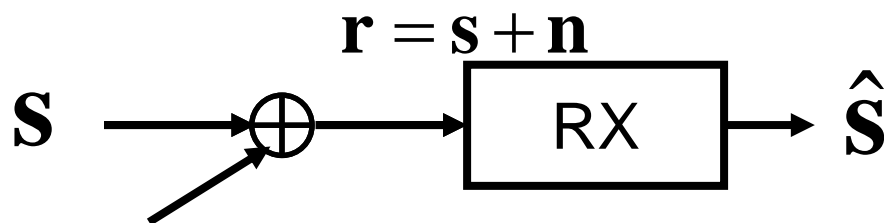
シミュレーション諸元

変調方式	BPSK
符号化方式	ターボ符号
符号化率R	1/3

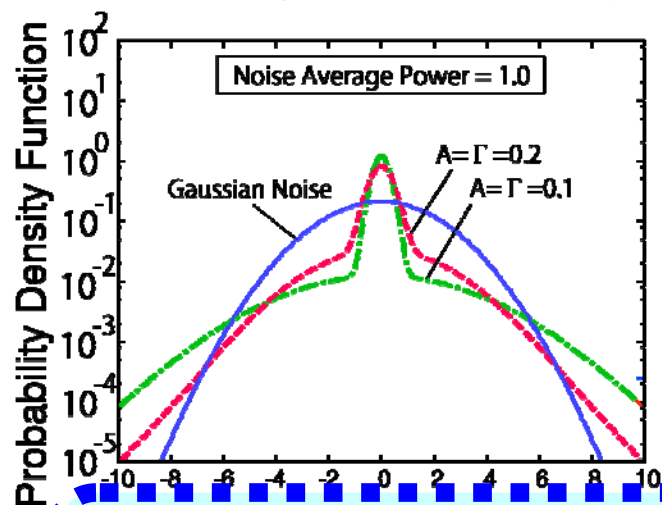
雑音の特性の知識(PDF)を利用することで特性改善



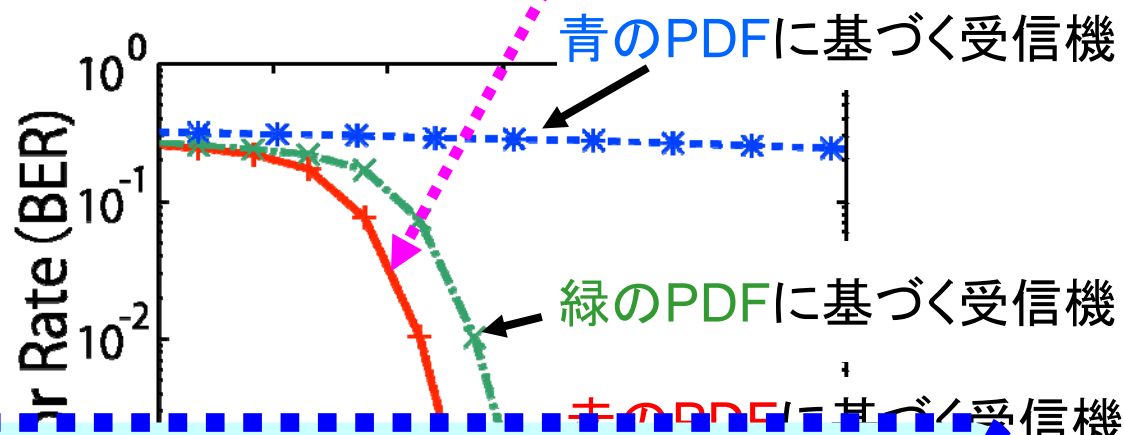
雑音に関する知識を利用した信号判定



Noise(赤色のPDF)



雑音の特性の知識(PDF)を利用することで特性改善



雑音の特性を理解した受信機構成が重要



研究目的

インパルス性雑音環境下での マルチチャネル伝送システムの特性向上

- 各チャネル間のインパルス性雑音の非独立性を利用したマルチチャネル受信機構成の提案
- 同様のシステムモデルにおいて構成を簡単化した信号判定手法を提案

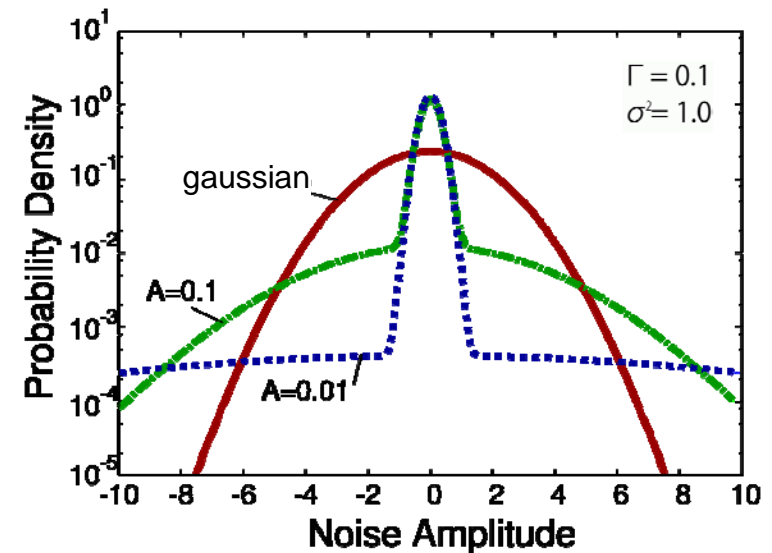
MiddletonのクラスA雑音モデル[3]

- インパルス性雑音を統計的に表したモデル

クラスA雑音の確率密度関数(PDF)

$$p(n) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{e^{-A} A^m}{m!} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_m} \exp\left(-\frac{n^2}{2\sigma_m^2}\right)$$

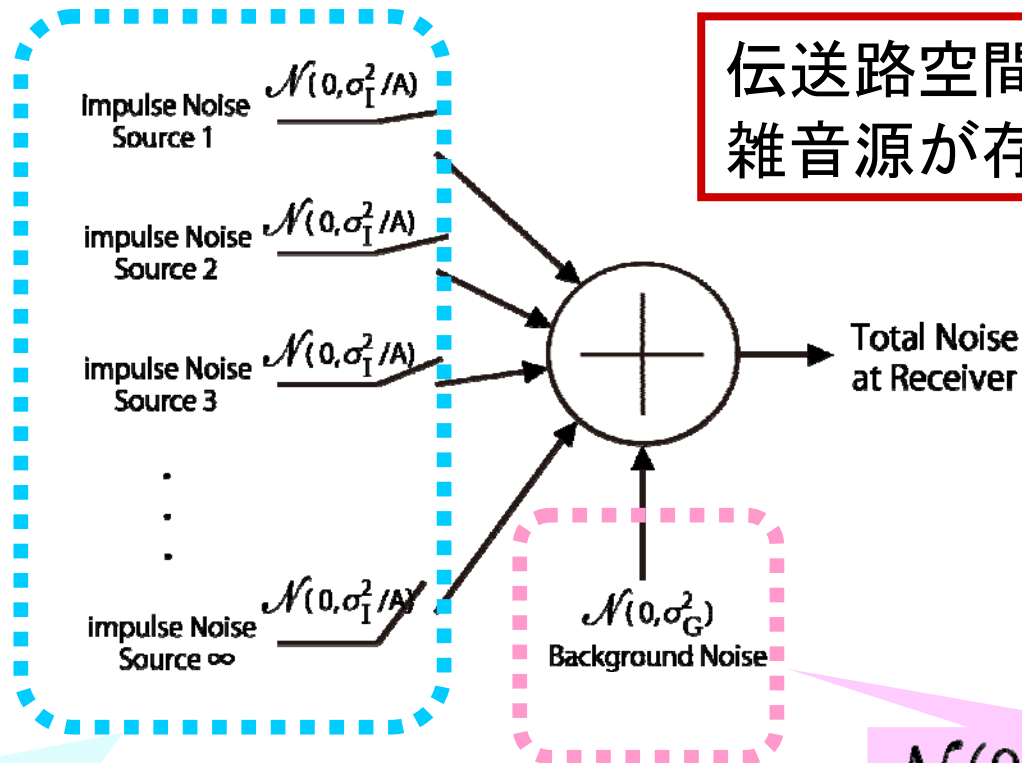
$$\sigma_m^2 = \frac{m/A + \Gamma}{1 + \Gamma} \cdot \sigma^2$$



インパルス性の統計的性質を表す2つのパラメータA, Γ と平均電力 σ^2 で決まる

[3]D. Middleton, "Statistical-physical models of electromagnetic interference", IEEE Trans. 1977

クラスA雑音の概念



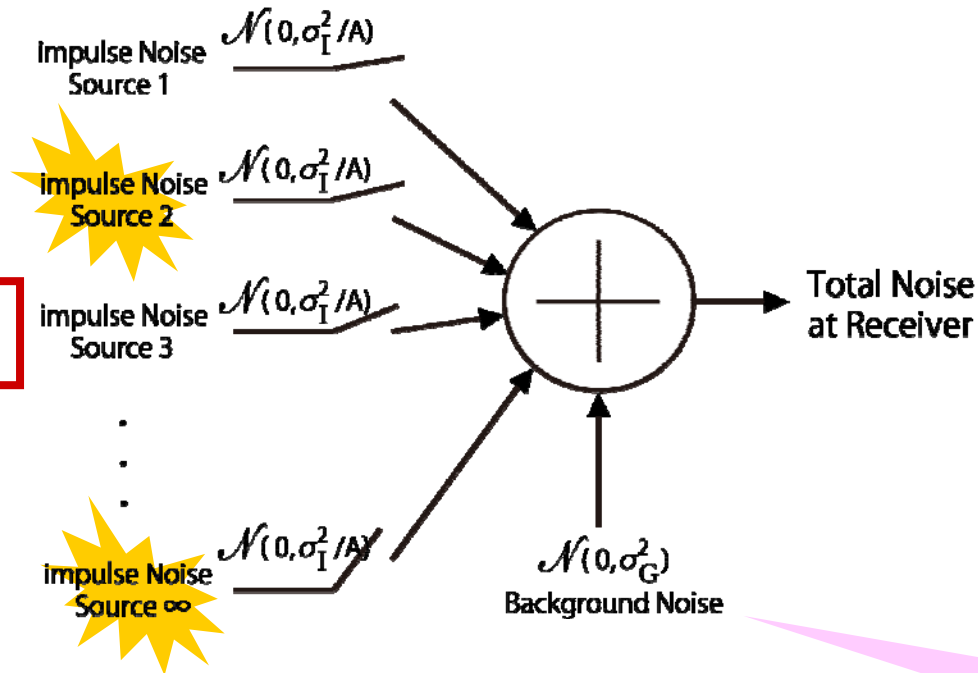
伝送路空間中に2種類の雑音源が存在する

ある時刻 k において、
 m_k 個の $\mathcal{N}(0, \sigma_I^2/A)$ に従う雑音が発生
 m_k : 平均 A のポアソン分布に従う

$\mathcal{N}(0, \sigma_G^2)$ に従う
背景雑音は常に発生

クラスA雑音の概念

$m_k=2$ の場合

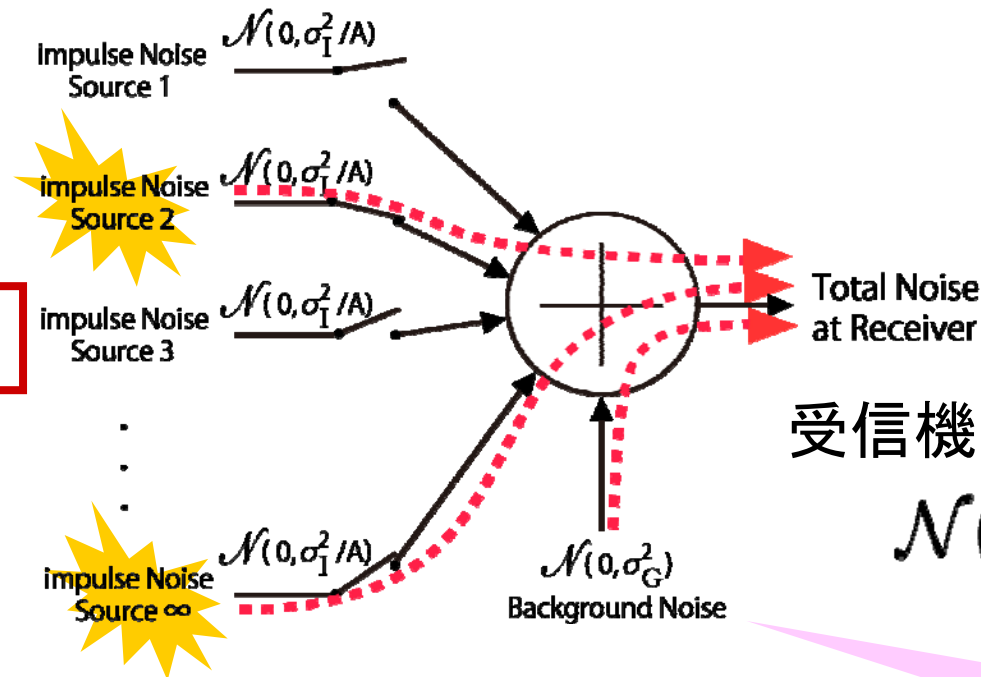


ある時刻 k において、
 m_k 個の $\mathcal{N}(0, \sigma_I^2/A)$ に従う雑音が発生
 m_k : 平均 A のポアソン分布に従う

$\mathcal{N}(0, \sigma_G^2)$ に従う
背景雑音は常に発生

クラスA雑音の概念

$m_k=2$ の場合



受信機に届く雑音分布

$$\mathcal{N}(0, 2\sigma_I^2/A + \sigma_G^2)$$

$\mathcal{N}(0, \sigma_G^2)$ に従う
背景雑音は常に発生

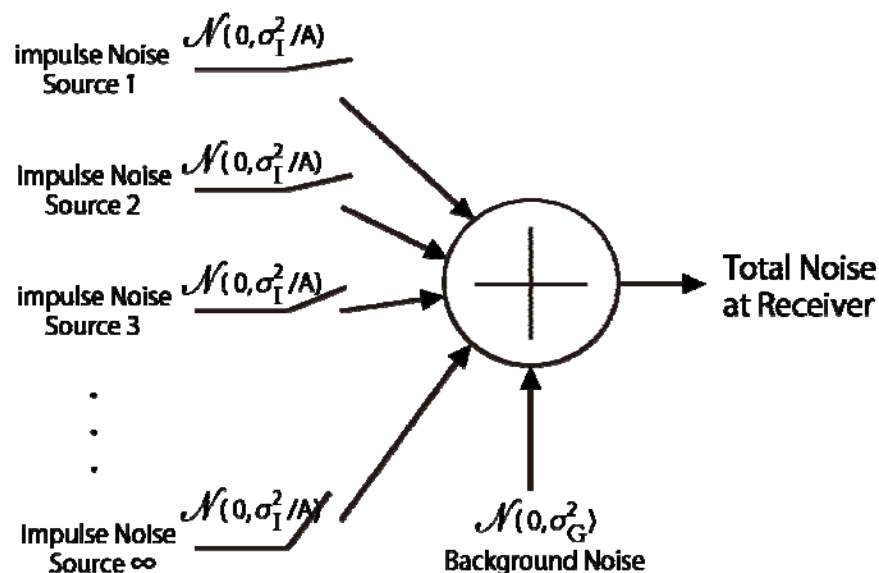
ある時刻 k において、

m_k 個の $\mathcal{N}(0, \sigma_I^2/A)$ に従う雑音が発生

m_k : 平均 A のポアソン分布に従う

時間変動する雑音分布

時間kごとに変化する雑音分布

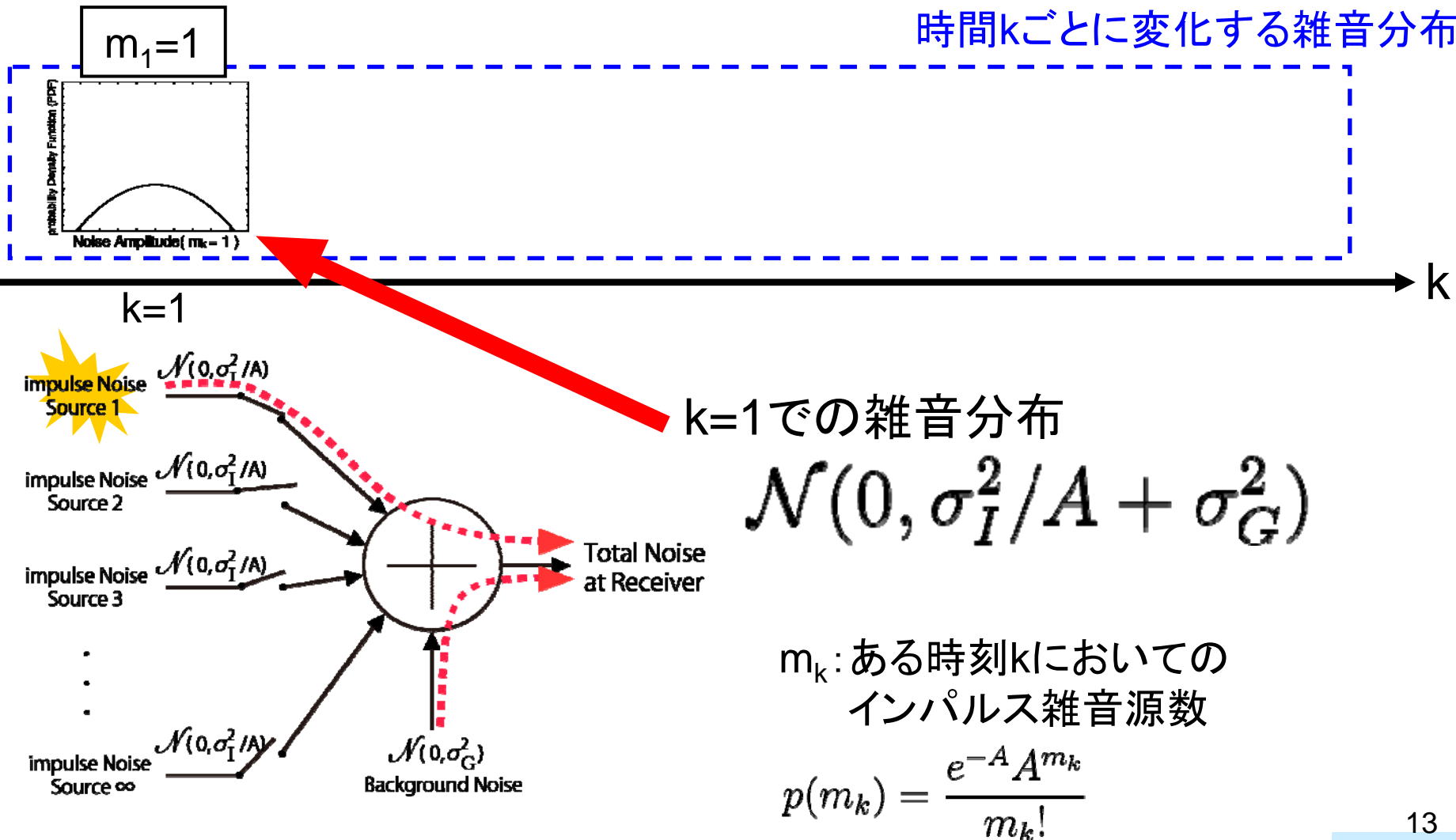


m_k : ある時刻kにおいての
インパルス雑音源数

$$p(m_k) = \frac{e^{-A} A^{m_k}}{m_k!}$$

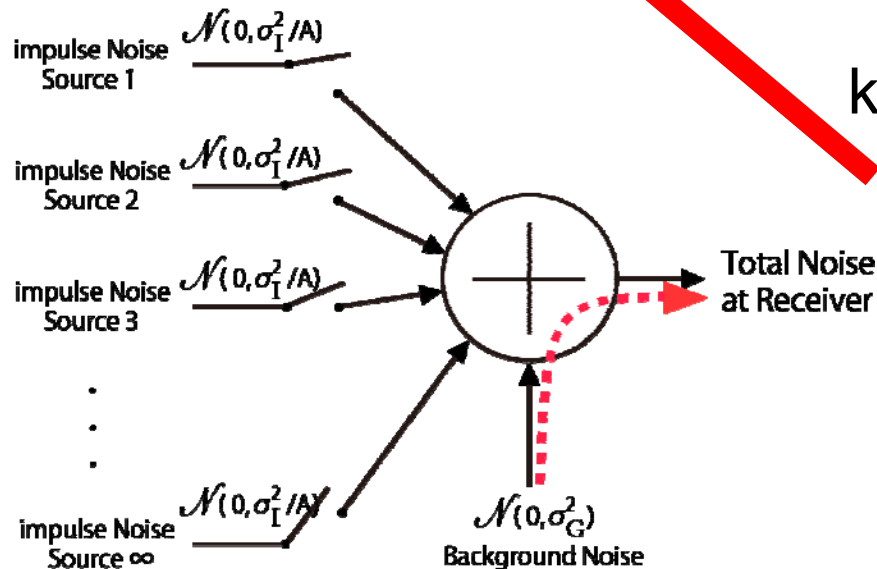
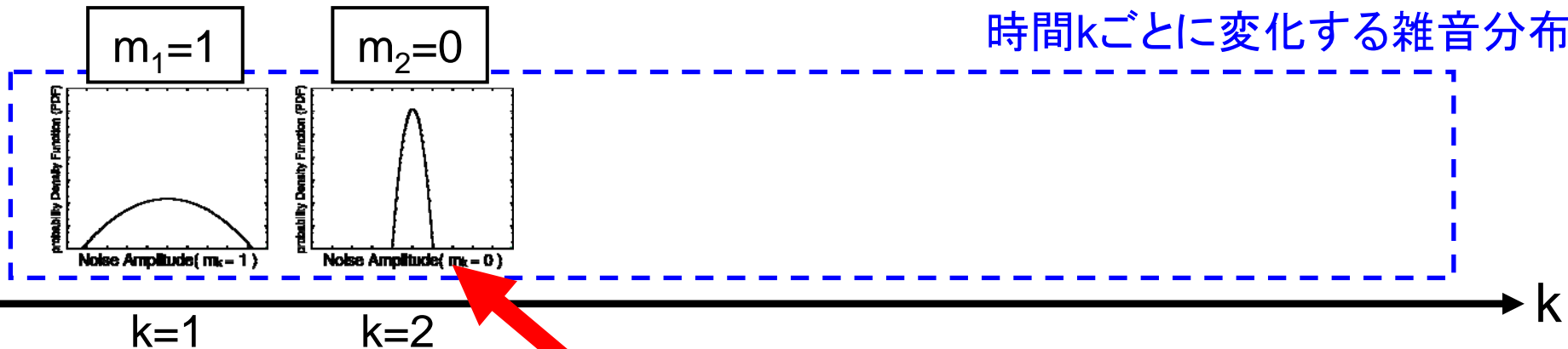
時間変動する雑音分布

時間kごとに化する雑音分布



時間変動する雑音分布

時間kごとに変化する雑音分布



k=2での雑音分布

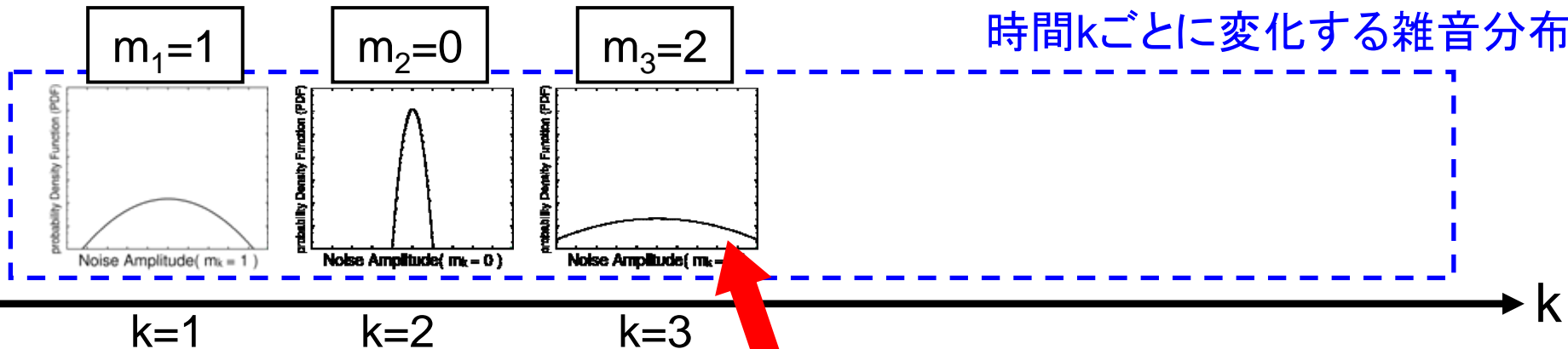
$$\mathcal{N}(0, \sigma_G^2)$$

m_k : ある時刻kにおいての
インパルス雑音源数

$$p(m_k) = \frac{e^{-A} A^{m_k}}{m_k!}$$

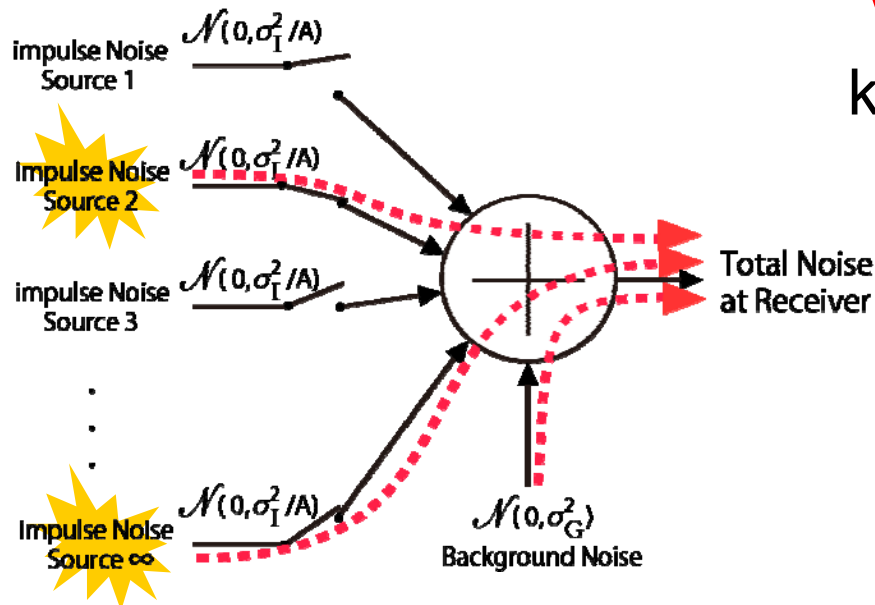
時間変動する雑音分布

時間kごとに化する雑音分布



k=3での雑音分布

$$\mathcal{N}(0, 2\sigma_I^2/A + \sigma_G^2)$$

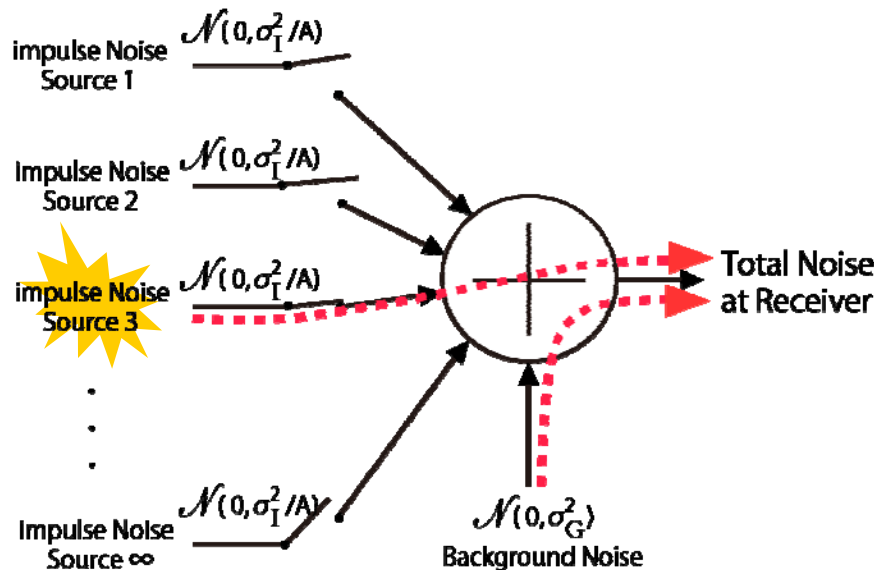
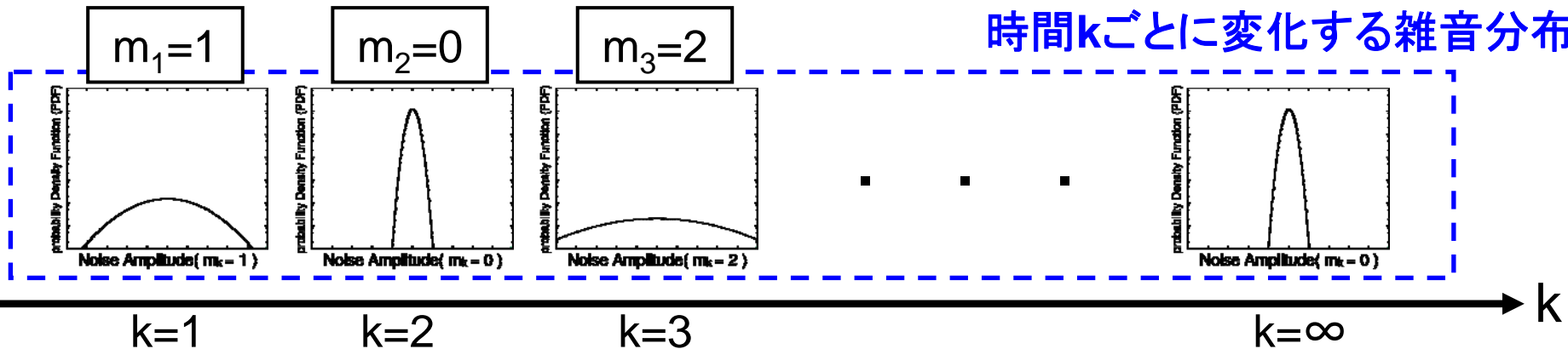


m_k : ある時刻kにおいての
インパルス雑音源数

$$p(m_k) = \frac{e^{-A} A^{m_k}}{m_k!}$$

時間変動する雑音分布

時間kごとに変化する雑音分布



時刻 k での雑音分布

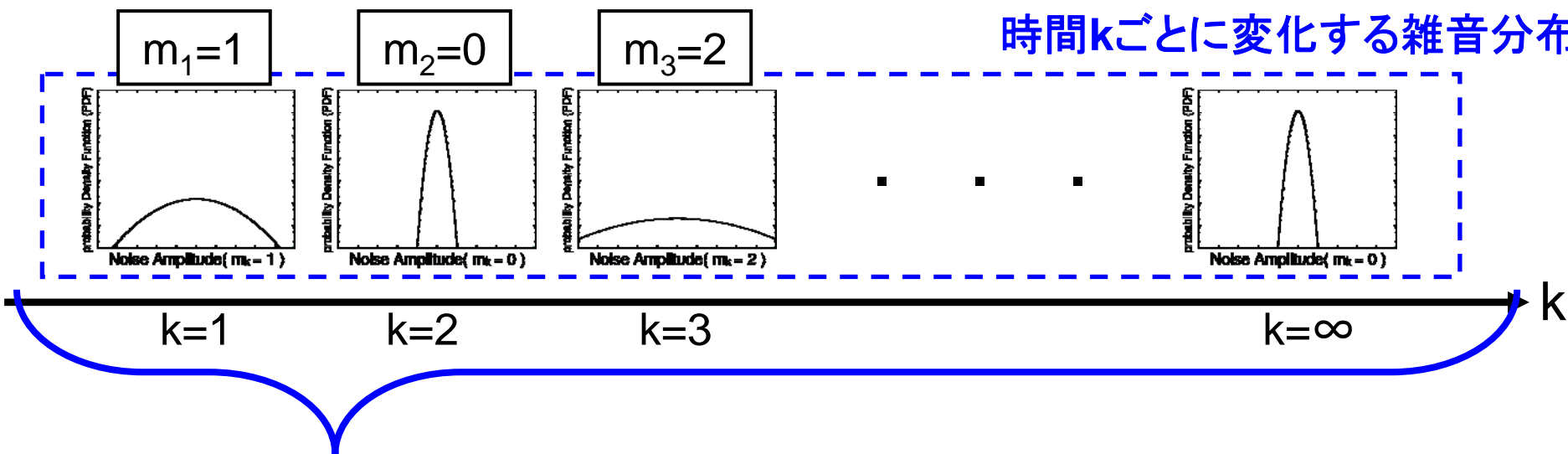
$$\mathcal{N}(0, m_k \sigma_I^2/A + \sigma_G^2)$$

m_k : ある時刻 k においての
インパルス雑音源数

$$p(m_k) = \frac{e^{-A} A^{m_k}}{m_k!}$$

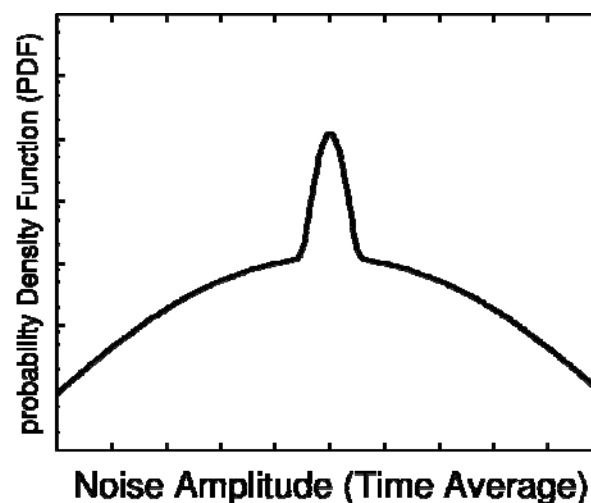
時間変動する雑音分布

時間kごとに変化する雑音分布



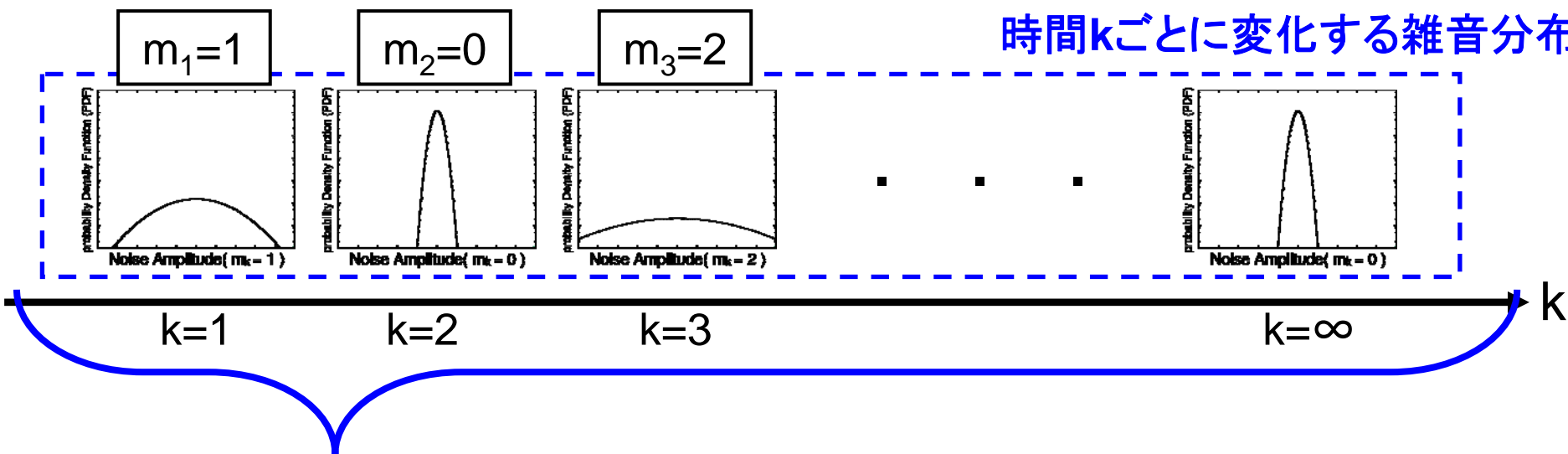
時間平均は、

$$p(n) = \sum_{m_k=0}^{\infty} \frac{e^{-A} A^{m_k}}{m_k!} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{m_k}} \exp\left(-\frac{n^2}{2\sigma_{m_k}^2}\right)$$



時間変動する雑音分布

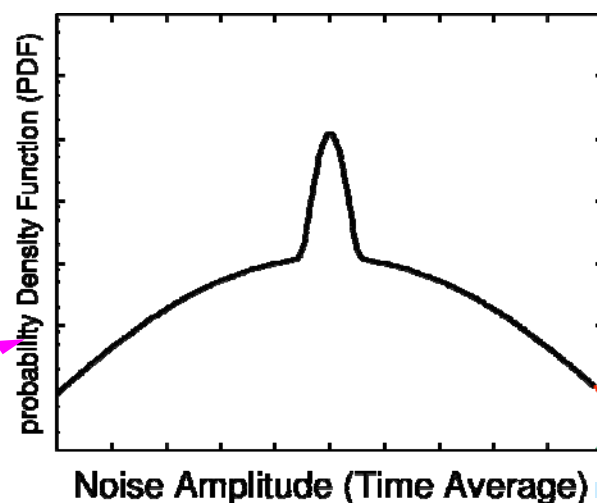
時間kごとに変化する雑音分布



時間平均は、

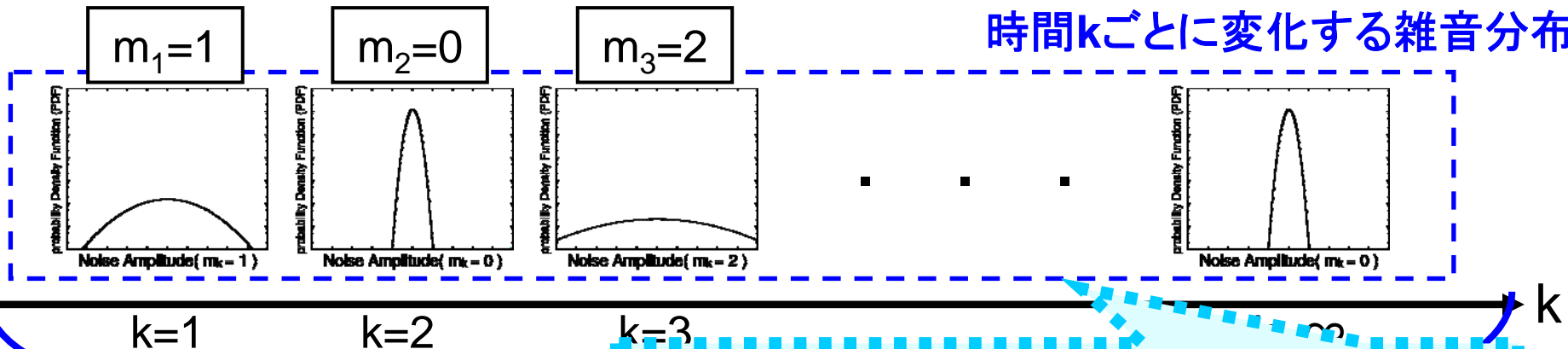
$$p(n) = \sum_{m_k=0}^{\infty} \frac{e^{-A} A^{m_k}}{m_k!} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{m_k}} \exp\left(-\frac{n^2}{2\sigma_{m_k}^2}\right)$$

従来研究の多くは、時間平均した
PDFを考慮したもの



時間変動する雑音分布

時間kごとに変化する雑音分布

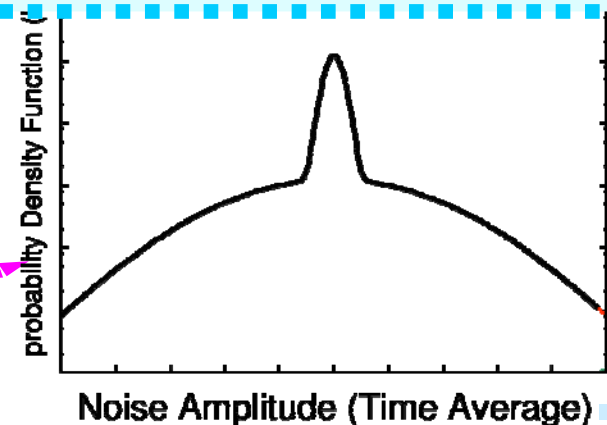


時間平均は、

時刻ごとの雑音の分布を知ることが
できれば、特性向上が期待できる

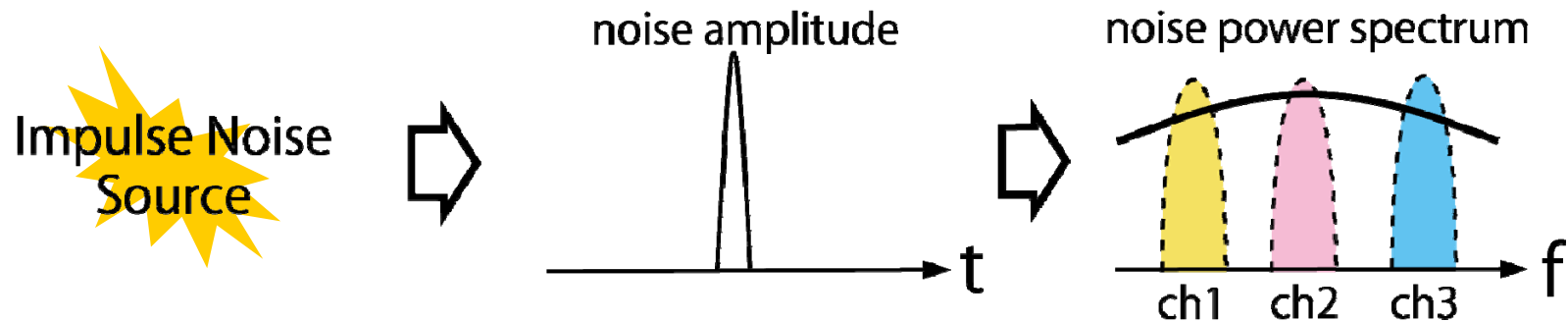
$$p(n) = \sum_{m_k=0}^{\infty} \frac{e^{-A} A^{m_k}}{m_k!} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{m_k}} \exp\left(-\frac{n^2}{2\sigma_{m_k}^2}\right)$$

従来研究の多くは、時間平均した
PDFを考慮したもの



仮定: m_k の推定

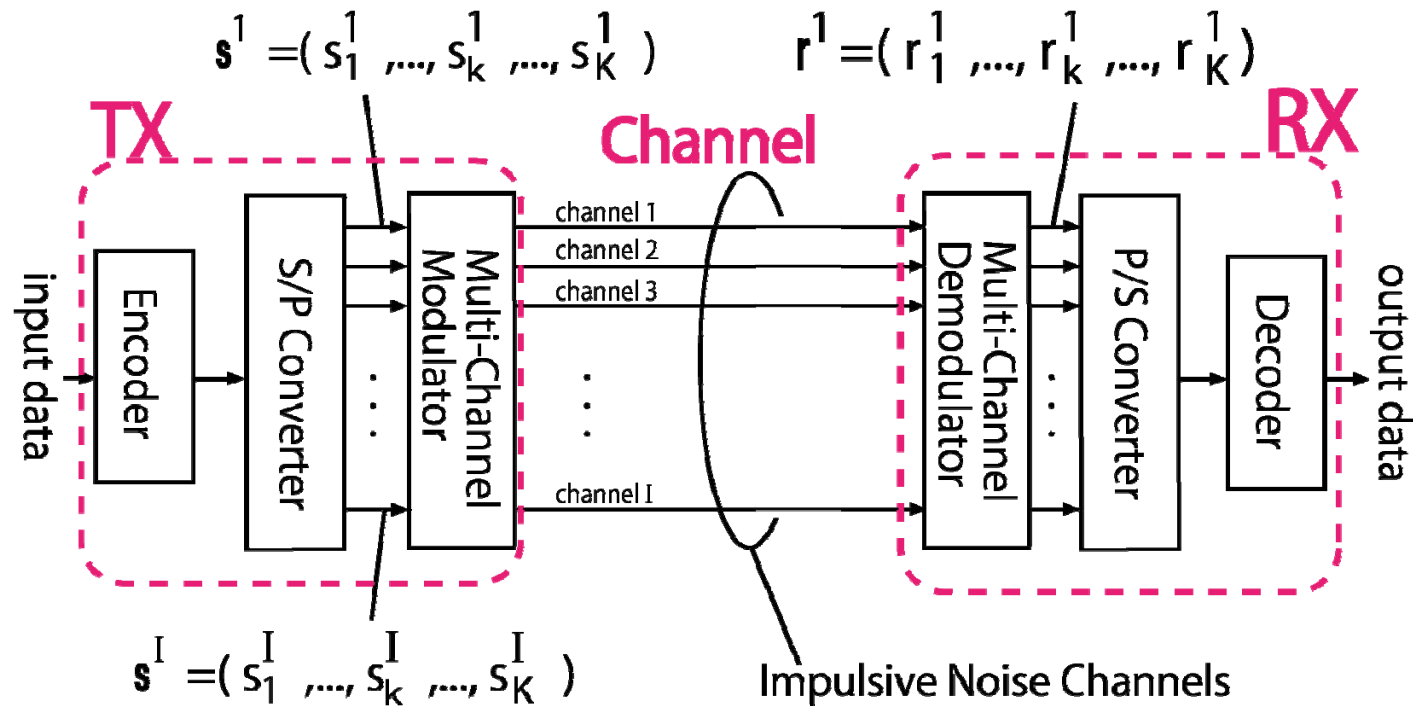
- 本研究ではマルチチャネル伝送システムを想定
 - 広帯域なインパルス雑音は複数の帯域に影響を与えると想定できる



雑音状態 m_k は複数のチャネルで共通だと仮定

雑音状態 m_k : インパルス雑音数

想定システムモデル(1/2)



- マルチチャネル伝送システム
- インパルス性雑音チャネル

k:time index(k=1~K)
i:channel index(i=1~I)

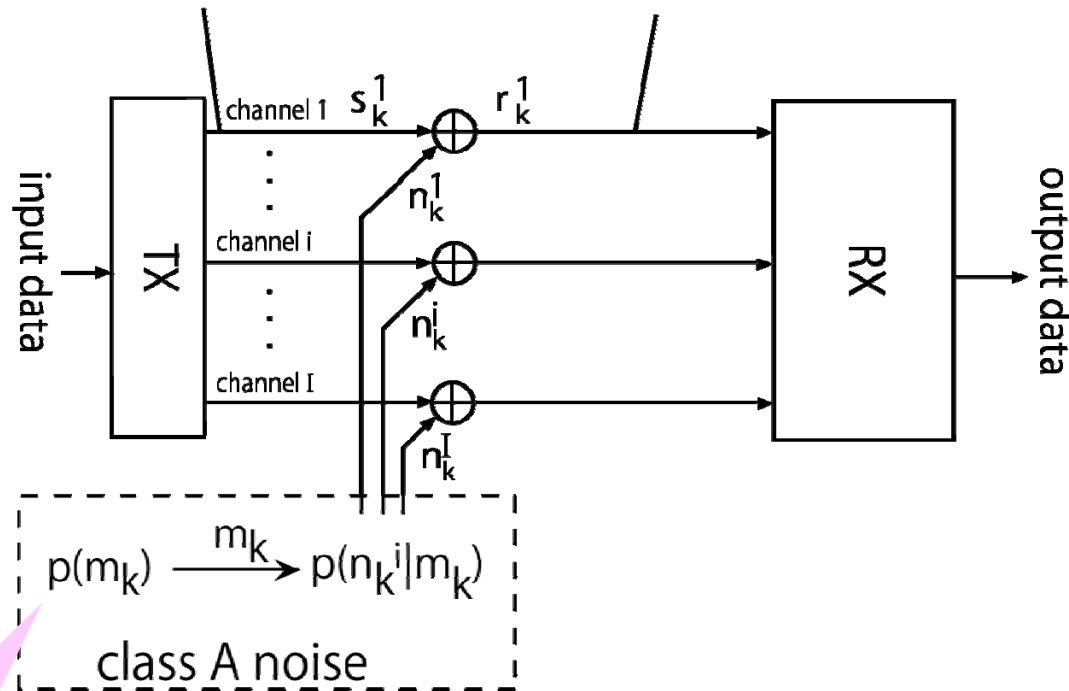
想定システムモデル(2/2)

$$\mathbf{s}^1 = (s_1^1, \dots, s_k^1, \dots, s_K^1)$$

$$\mathbf{r}^1 = (r_1^1, \dots, r_k^1, \dots, r_K^1)$$

k:time index(k=1~K)

i:channel index(i=1~I)



雑音状態 m_k が決定
(各チャネルに共通)

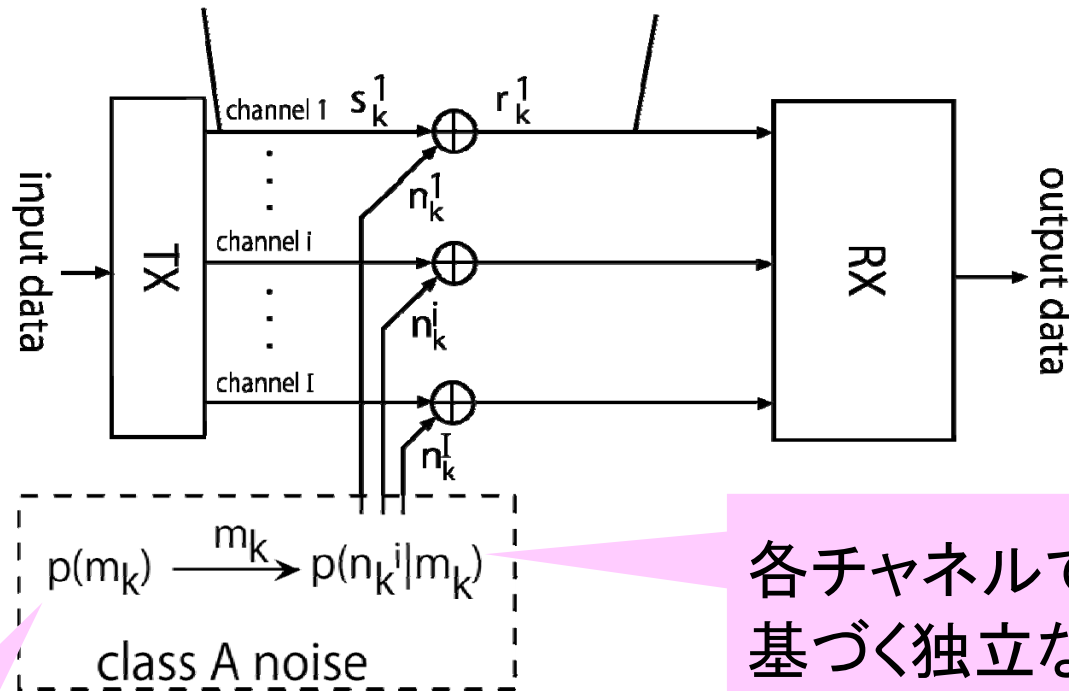
想定システムモデル(2/2)

$$\mathbf{s}^1 = (s_1^1, \dots, s_k^1, \dots, s_K^1)$$

$$\mathbf{r}^1 = (r_1^1, \dots, r_k^1, \dots, r_K^1)$$

k:time index(k=1~K)

i:channel index(i=1~I)



各チャネルでは雑音状態 m_k に基づく独立な雑音が発生

雑音状態 m_k が決定
(各チャネルに共通)

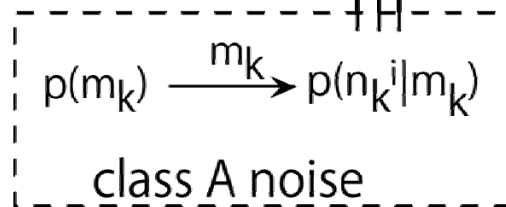
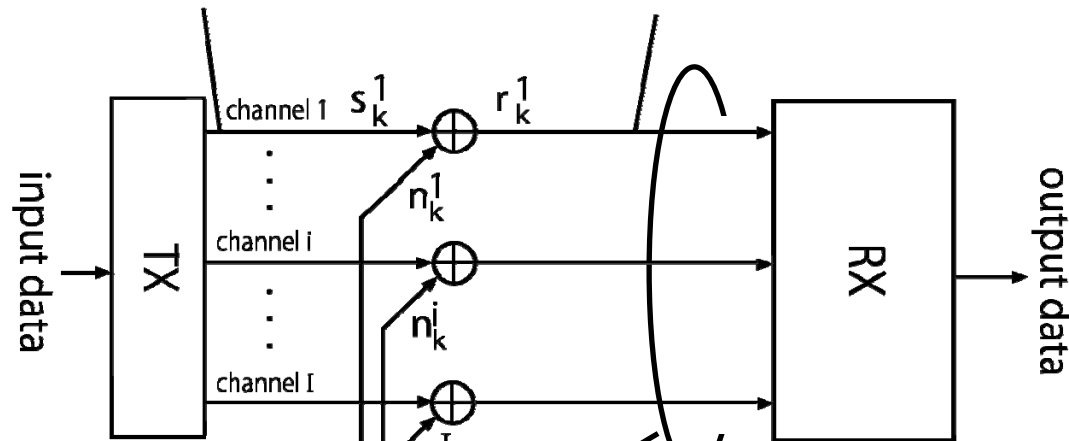
想定システムモデル(2/2)

$$\mathbf{s}^1 = (s_1^1, \dots, s_k^1, \dots, s_K^1)$$

$$\mathbf{r}^1 = (r_1^1, \dots, r_k^1, \dots, r_K^1)$$

k: time index (k=1~K)

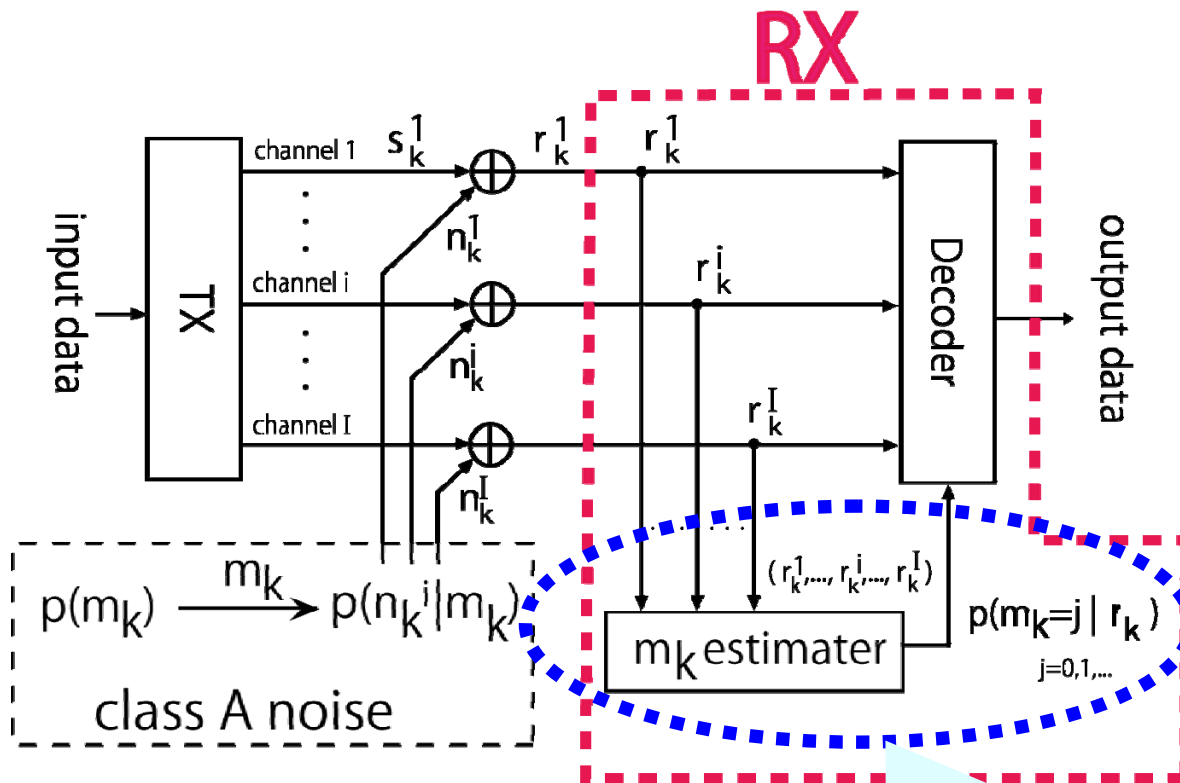
i: channel index (i=1~I)



$$\begin{bmatrix} r_k^1 \\ r_k^2 \\ \vdots \\ r_k^i \\ \vdots \\ r_k^I \end{bmatrix}$$

時刻kにおける受信ベクトルは、
 $\mathcal{N}(0, m_k \sigma_I^2 / A + \sigma_G^2)$
 に従う独立な雑音加わる

提案受信機の構成



- ・各時刻の m_k を推定する
- ・復号の前段階で行う
- ・雑音観測用チャネルは設けない

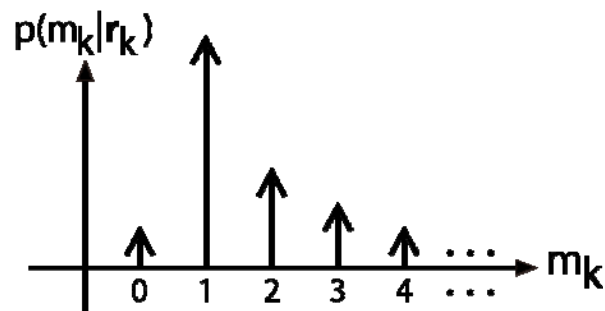


複数チャネルの受信ベクトルから m_k の推定

- 時刻 k の受信成分 $(r_k^1, r_k^2, \dots, r_k^i, \dots, r_k^I)$ から m_k のベイズ推定法により事後確率分布を計算

$$p(m_k | \mathbf{r}_k) = \frac{p(\mathbf{r}_k | m_k) \cdot p(m_k)}{p(\mathbf{r}_k)}$$
$$= \frac{p(m_k)}{p(\mathbf{r}_k)} \prod_{i=1}^I \frac{1}{2\sqrt{2\pi\sigma_{m_k}^2}} \left\{ \exp\left(-\frac{(r_k^i - 1)^2}{2\sigma_{m_k}^2}\right) + \exp\left(-\frac{(r_k^i + 1)^2}{2\sigma_{m_k}^2}\right) \right\}$$
$$(\because p(\mathbf{r}_k | m_k) = \prod_{i=1}^I \sum_{s_k^i} p(r_k^i | m_k, s_k^i) p(s_k^i), s_k^i \in \{-1, +1\})$$

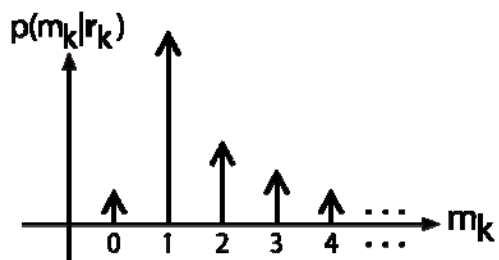
ある時刻 k に対して $p(m_k | \mathbf{r}_k)$ の事後確率分布が得られる



$p(m_k|\mathbf{r}_k)$ を利用した信号判定[RX1]

- $p(m_k|\mathbf{r}_k)$ の分布を利用する信号判定 [RX1]

事後確率分布 $p(m_k|\mathbf{r}_k)$ を $p(m_k)$ の分布の事前知識と置き換え



$$p(m_k) = \frac{e^{-A} A^{m_k}}{m_k!}$$

平均Aのポアソン分布

尤度関数[RX1]

$$\Lambda_{P1}(s_k^i = s | r_k^i) = \sum_{j=0}^{\infty} p(m_k = j | \mathbf{r}_k) \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{m_k}^2}} \exp\left(-\frac{(r_k^i - s)^2}{2\sigma_{m_k}^2}\right)$$

数値例1

- 雑音の時間変動を考慮しない、従来型の最適手法とBER特性比較

尤度関数[RX1]

$$\Lambda_{P1}(s_k^i = s | r_k^i) = \sum_{j=0}^{\infty} p(m_k = j | \mathbf{r}_k) \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{m_k}^2}} \exp\left(-\frac{(r_k^i - s)^2}{2\sigma_{m_k}^2}\right)$$

尤度関数(従来手法)

$$\Lambda_C(s_k^i = s | r_k^i) = \sum_{m_k=0}^{\infty} \frac{e^{-A} A^{m_k}}{m_k!} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{m_k}^2}} \exp\left(-\frac{(r_k^i - s)^2}{2\sigma_{m_k}^2}\right)$$

- 理想的な場合として、 m_k の推定が完璧な受信機の特性を合わせて示す

シミュレーション諸元

クラスA雑音 パラメータ	$A=\Gamma=0.1$ (インパルス性の強い環境), $A=\Gamma=0.2$ (インパルス性の弱い環境)
変調方式	BPSK
符号化方式	ターボ符号($R=1/3$)
繰り返し復号回数	10
E_b/N_0	3~8[dB]
チャネル数	2~7
試行回数	100000

クラスA雑音パラメータ(A, Γ, σ^2)の推定は完全だと仮定

シミュレーション諸元

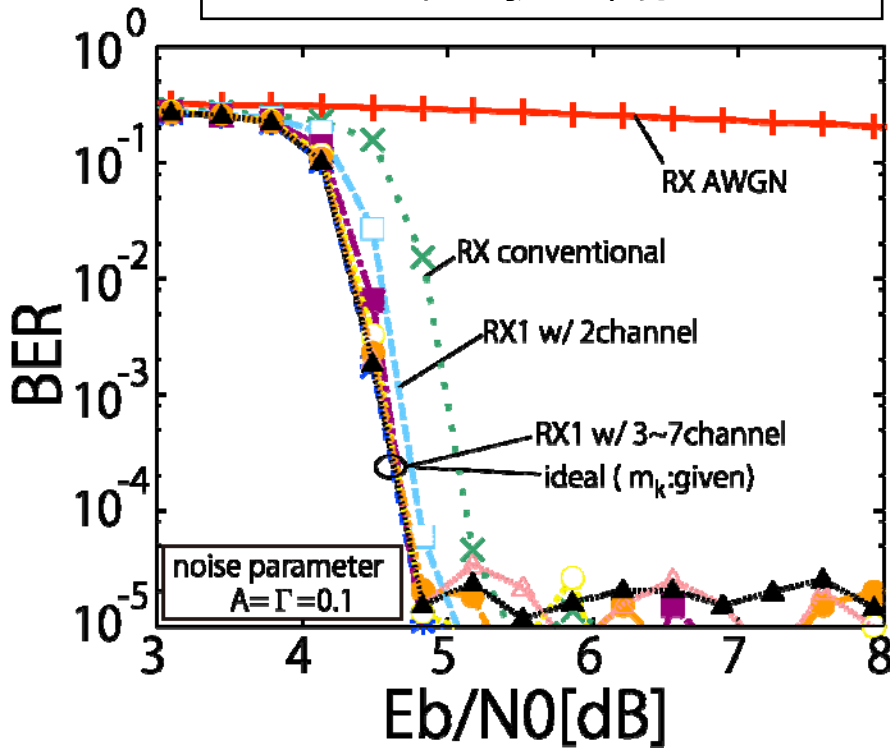
クラスA雑音 パラメータ	$A=\Gamma=0.1$ (インパルス性の強い環境), $A=\Gamma=0.2$ (インパルス性の弱い環境)
変調方式	BPSK
符号化方式	ターボ符号($R=1/3$)
繰り返し復号回数	10
E_b/N_0	3~8[dB]
チャネル数	2~7
試行回数	100000

クラスA雑音パラメータ(A, Γ, σ^2)の推定は完全だと仮定

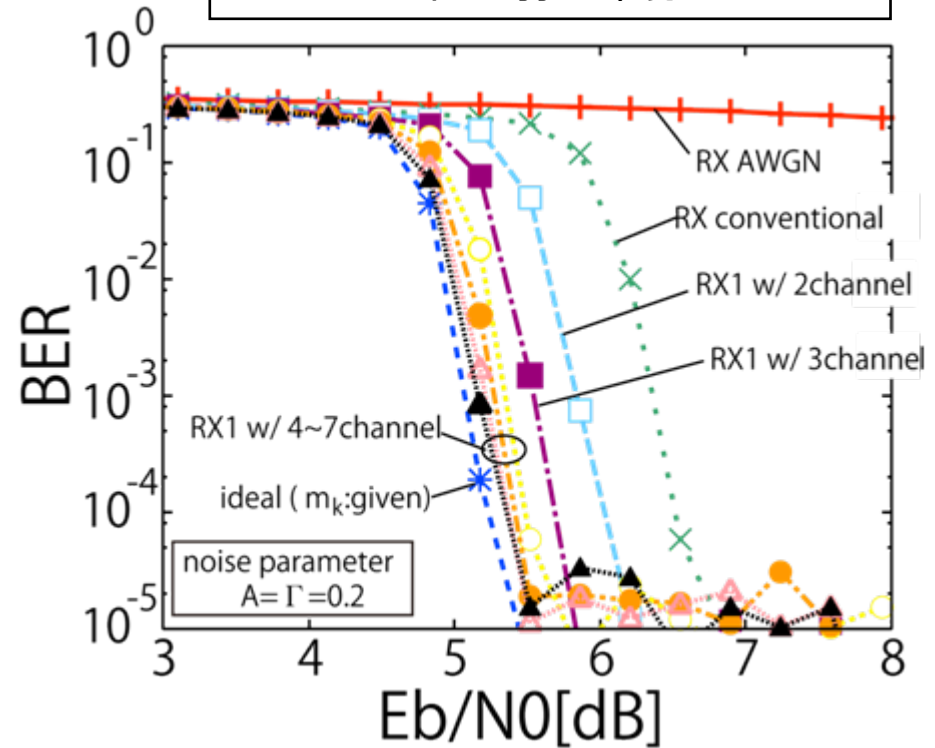
m_k を推定するためのサンプル数に相当

数値例1:BER RX1

インパルス性の強い環境: $A=\Gamma=0.1$



インパルス性の弱い環境: $A=\Gamma=0.2$

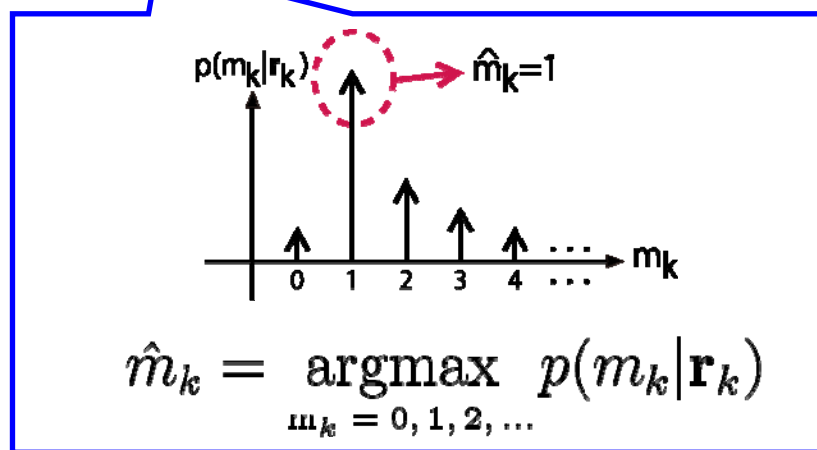
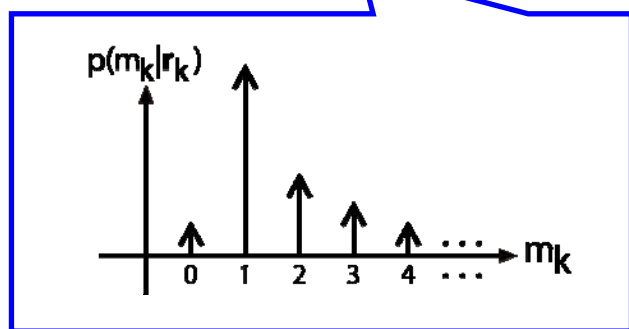


- 従来手法と比較してRX1のBER特性が改善
- チャネル数が4程度以上でほぼ理想的な特性

簡単化した信号判定手法[RX2]

- 推定値 \hat{m}_k を利用する信号判定[RX2]

事後確率分布 $p(m_k | \mathbf{r}_k)$ から推定値 \hat{m}_k を決定して利用(MAP推定)



尤度関数[RX2]

$$\Lambda_{P2}(s_k^i = s | r_k^i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\hat{m}_k}^2}} \exp\left(-\frac{(r_k^i - s)^2}{2\sigma_{\hat{m}_k}^2}\right)$$



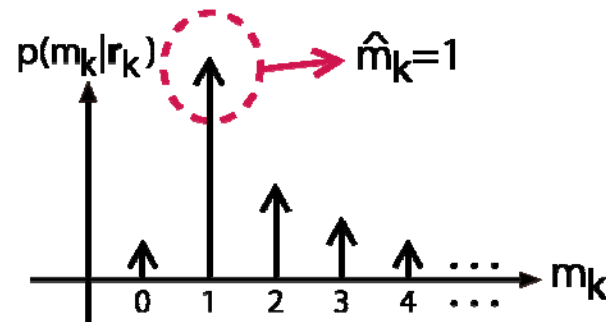
簡単化した信号判定手法[RX2]の利点

- 尤度関数がRX1より簡単

$$\text{RX1: } \Lambda_{P1}(s_k^i = s | r_k^i) = \sum_{j=0}^{\infty} p(m_k = j | \mathbf{r}_k) \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{m_k}^2}} \exp\left(-\frac{(r_k^i - s)^2}{2\sigma_{m_k}^2}\right)$$

$$\text{RX2: } \Lambda_{P2}(s_k^i = s | r_k^i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\hat{m}_k}^2}} \exp\left(-\frac{(r_k^i - s)^2}{2\sigma_{\hat{m}_k}^2}\right)$$

- $p(m_k | \mathbf{r}_k)$ の分布が必要な判定[RX1]と比較して、推定値 \hat{m}_k を求める計算コストが一般的に小さい
 - 分布全体の計算は不要





簡単化した信号判定手法[RX2]の利点

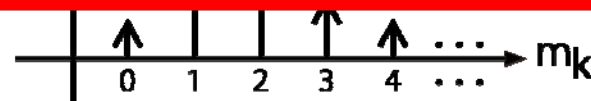
- 尤度関数がRX1より簡単

$$\text{RX1: } \Lambda_{P1}(s_k^i = s | r_k^i) = \sum_{j=0}^{\infty} p(m_k = j | \mathbf{r}_k) \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{m_k}^2}} \exp\left(-\frac{(r_k^i - s)^2}{2\sigma_{m_k}^2}\right)$$

$$\text{RX2: } \Lambda_{P2}(s_k^i = s | r_k^i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\hat{m}_k}^2}} \exp\left(-\frac{(r_k^i - s)^2}{2\sigma_{\hat{m}_k}^2}\right)$$

- $p(m_k | \mathbf{r}_k)$ の分布が必要な判定[RX1]と比較して、推定値 \hat{m}_k を求める計算コストが一般的に小さい
 - 分布全体の計算は不要

構成を簡単化したことにより特性が劣化する可能性



数値例2

- 雑音PDFを直接利用する従来手法と比較し、提案手法の有効性を示す

尤度関数(RX2)

$$\Lambda_{P2}(s_k^i = s | r_k^i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\hat{m}_k}^2}} \exp\left(-\frac{(r_k^i - s)^2}{2\sigma_{\hat{m}_k}^2}\right)$$

尤度関数(従来手法)

$$\Lambda_C(s_k^i = s | r_k^i) = \sum_{m_k=0}^{\infty} \frac{e^{-A} A^{m_k}}{m_k!} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{m_k}^2}} \exp\left(-\frac{(r_k^i - s)^2}{2\sigma_{m_k}^2}\right)$$

- 2通りの提案受信機の性能差を観察する
 - 分布 $p(m_k | \mathbf{r}_k)$ を利用したRX1と推定値 \hat{m}_k を利用し構成を単純化したRX2の特性比較

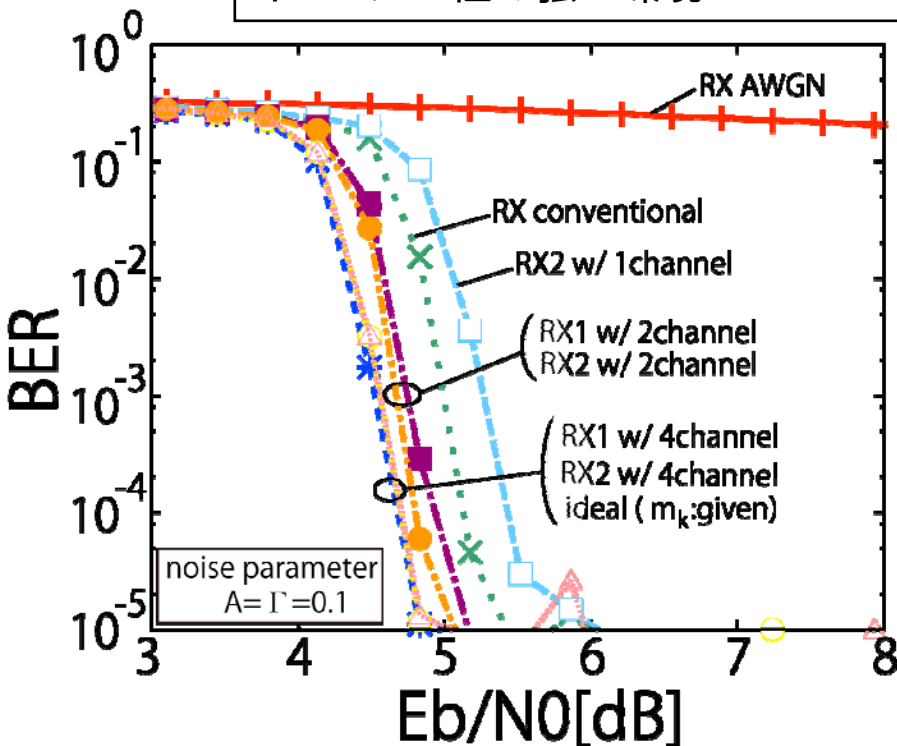
シミュレーション諸元

クラスA雑音 パラメータ	$A=\Gamma=0.1$ (インパルス性の強い環境), $A=\Gamma=0.2$ (インパルス性の弱い環境)
変調方式	BPSK
符号化方式	ターボ符号($R=1/3$)
繰り返し復号回数	10
E_b/N_0	3~8[dB]
チャネル数	1,2,4
試行回数	100000

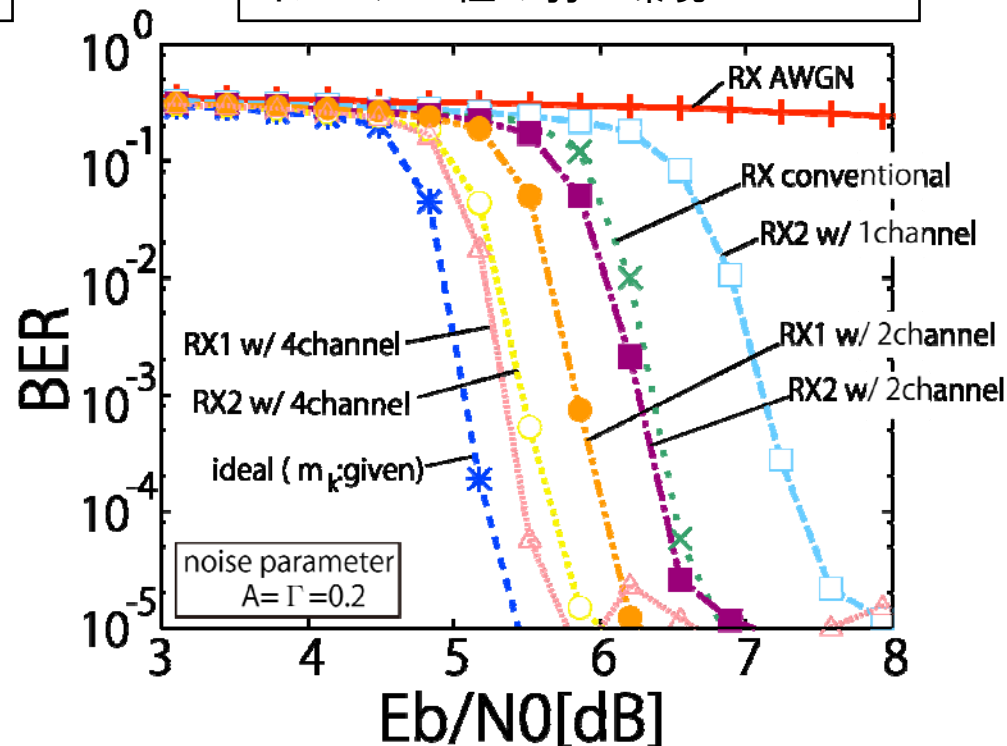
クラスA雑音パラメータ(A, Γ, σ^2)の推定は完全だと仮定

数値例2:BER RX1,RX2比較

インパルス性の強い環境: $A=\Gamma=0.1$



インパルス性の弱い環境: $A=\Gamma=0.2$



- チャンネル数が1,2程度では、RX2の特性はRX1と比較して悪い
- チャンネル数が4程度あればRX1とRX2の性能差は小さい

まとめ

- マルチチャネル通信システムにおいてインパルス性雑音の非独立性を利用した受信機を提案

提案受信機

- ・複数チャネルの受信信号から状態 m_k を推定し信号判定利用
- ・状態 m_k は信号判定前に推定
 - 従来手法と比較してBER特性が向上
- 分布 $p(m_k|\mathbf{r}_k)$ を利用する判定手法[RX1]と推定値 \hat{m}_k を利用し構成を単純化した手法[RX2]を提案
 - RX1と比較してRX2のBER特性は劣るが、チャネル数が一定数(4程度)以上ある場合には性能差は小さい

発表実績

- ・電子情報通信学会 WBS研究会 2012年11月発表
- ・電子情報通信学会 英文論文誌 2013年(投稿予定)