

信号再生器が配置された 光ファイバ伝送路の情報速度解析

松本正行 小林大禎

大阪大学大学院工学研究科
電気電子情報工学専攻

電子情報通信学会光通信システム研究会

2011年7月11日

大阪大学 中之島センター

発表の概要

- 研究の背景
 - 信号再生器の効用と問題
- 信号再生器が配置された伝送路における情報速度の計算
 - 伝送路の記憶を考慮に入れた情報速度の計算
 - NRZ-OOK信号を想定した数値計算
- 情報速度の数値計算結果
- 最尤系列推定

長距離光ファイバ伝送の主要な信号劣化要因

- 分散（波長分散、偏波分散）

種々の方法を用いることによって原理的に補償が可能

（例：コヒーレント受信と電気信号処理の組み合わせ）

- 非線形効果（チャンネル内、チャンネル間）

ある程度の補償は可能、雑音を増強する効果あり

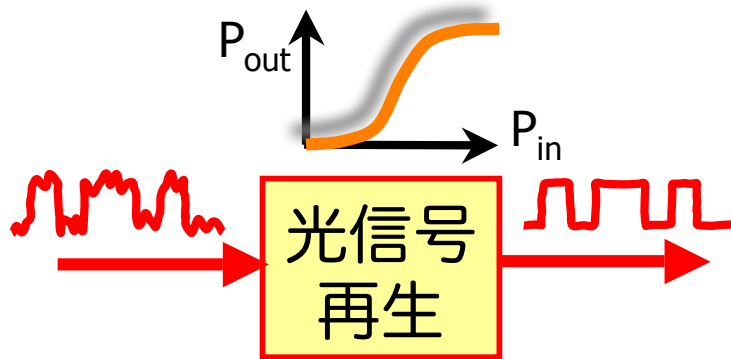
- 雑音（損失を補償するための光増幅から生ずる雑音）

信号伝送距離を最終的に制限する要因

・ファイバの低損失化 ・光増幅器の低雑音化 ・信号再生器の利用

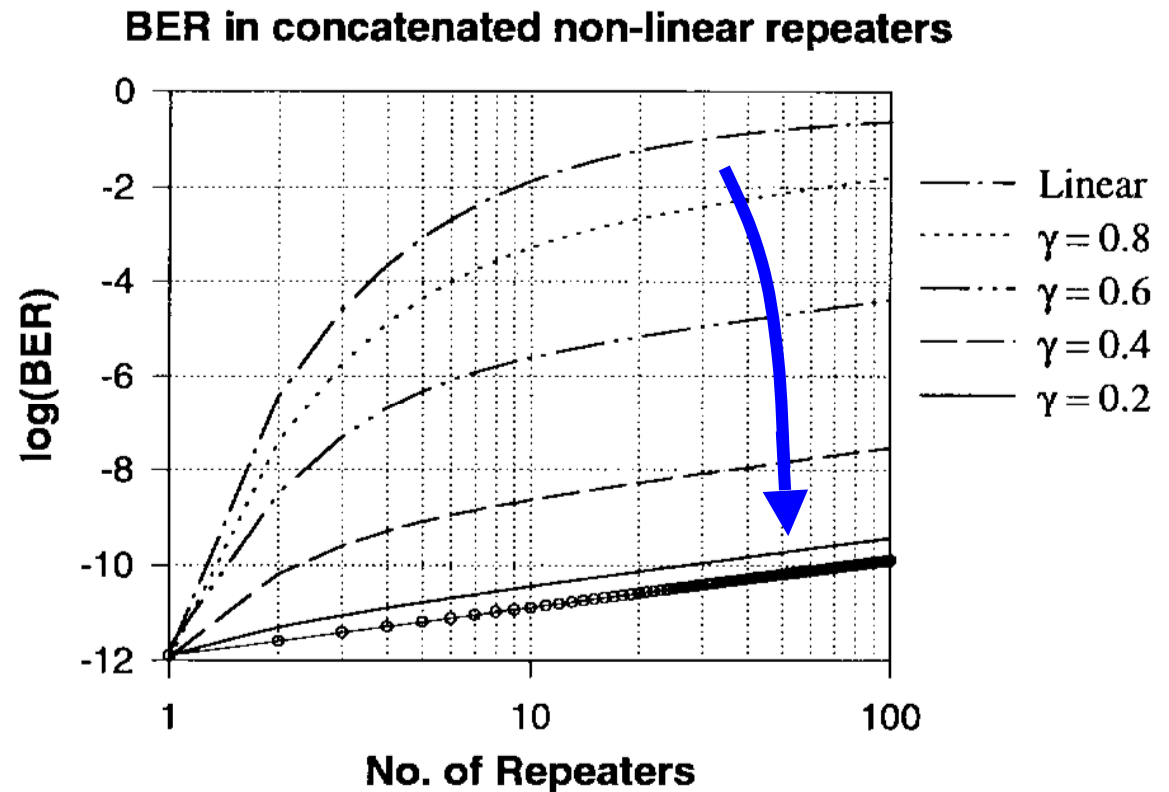
信号再生

デジタル信号伝送においては
信号再生による雑音除去 (reshaping) が可能



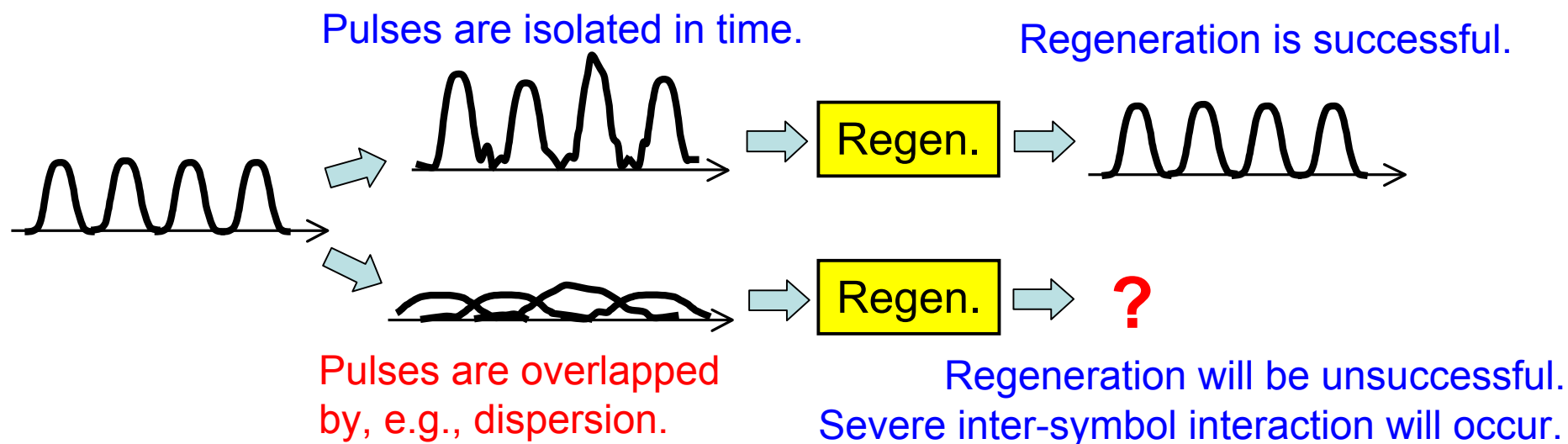
例えば

P. Öhlén and E. Berglind,
IEEE PTL9, 1011(1997).



信号再生の問題点

信号再生は非線形の信号処理であるので、時間的に重なった複数の信号を同時に処理することが難しい。



- ▲ 信号再生の前に分散補償が必要
- ▲ 信号再生の前に波長分離が必要

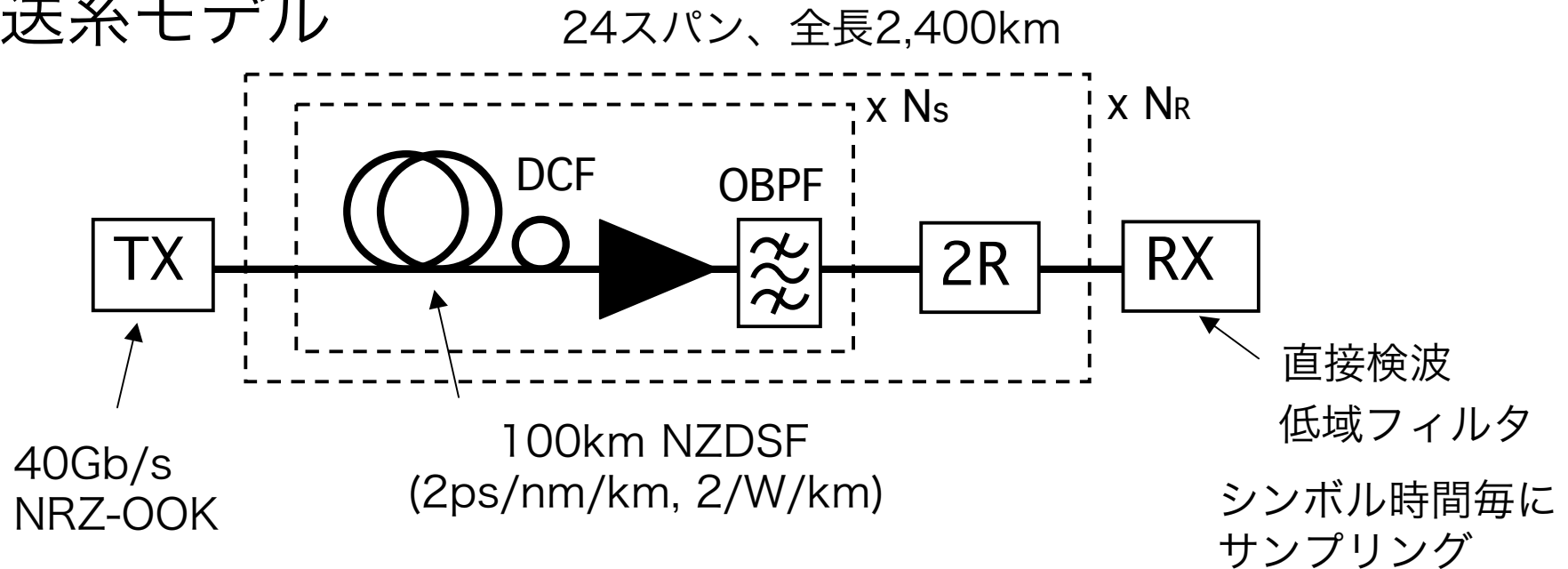
電気信号処理を併用することによって、伝送路管理、チャネル管理の制約を緩和することができないか。

発表内容

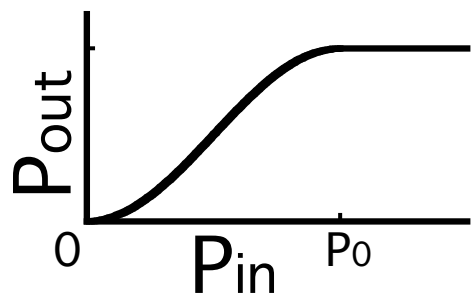
- 信号再生器が周期的に配置された伝送系における単一チャネル信号の情報速度を伝送路の記憶を考慮して解析する。
- 不完全に分散補償された信号が再生器に入力された場合に生ずる波形歪みを受信機における信号処理によって補償することができるかどうかを調べる。

信号再生器を含む伝送系の特性解析

伝送系モデル



2R再生器特性



$$P_{out} = \begin{cases} P_0 \sin^2 \left[\frac{\pi P_{in}}{2P_0} \right] & (P_{in} \leq P_0) \\ P_0 & (P_{in} > P_0) \end{cases}$$

位相に関してトランスペアレント

信号再生器を含む伝送系の特性解析

情報速度 (Information Rate)

入力シンボル列 $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ $X_i = 0, 1$

出力サンプル列 $Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_n)$ Y_i : 実数変数

相互情報量 $I = H(Y) - H(Y|X)$

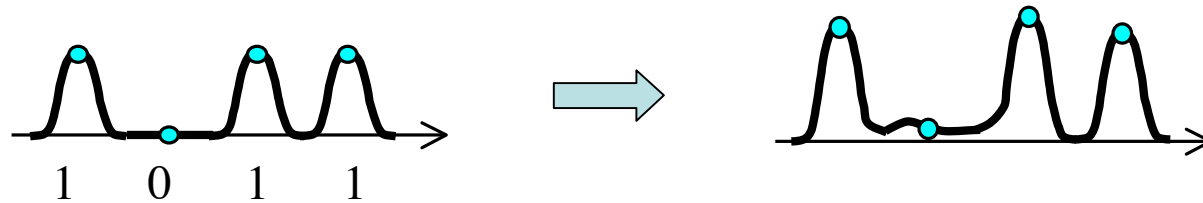
$H(Y), H(Y|X)$: シンボルあたりのエントロピー

入力シンボルのアルファベットの選び方および出現確率を変えて相互情報量を最大化した量が通信路容量

ここでは、変調形式をOOKに限定し、アルファベットの選び方を $X_i = 0, 1$ に限定 (等確率) \rightarrow そのときの相互情報量 = 情報速度

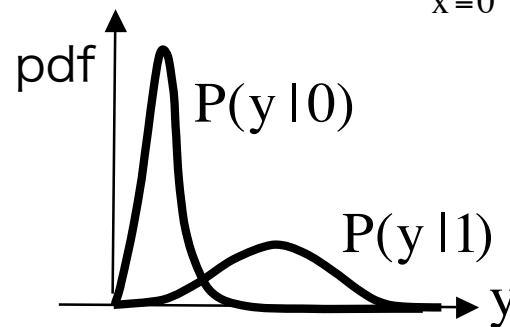
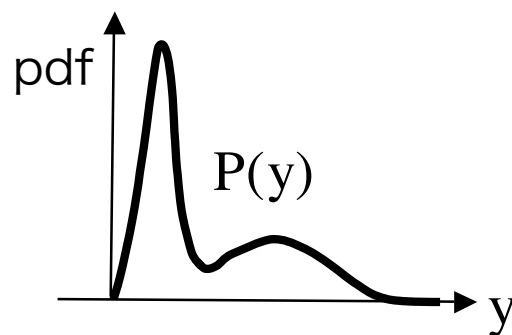
無記憶の場合の情報速度の計算

各シンボルが独立に伝送され、受信サンプル値が当該シンボル以外のシンボルの影響を受けない場合。



各シンボルのサンプル値の揺らぎに着目し、シンボルごとに $P(Y)$ と $P(Y|X)$ を計算する

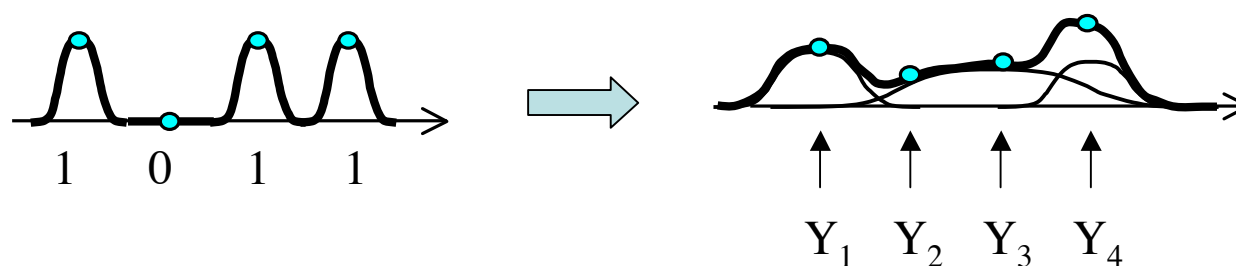
$$\rightarrow \begin{cases} H(Y) = -\int_y P(y) \log P(y) dy \\ H(Y|X) = -\sum_{x=0}^1 P(x) \int_y P(y|x) \log P(y|x) dy \end{cases}$$



$P(y|0)$ と $P(y|1)$ が重なりをもたなければ $IR=1 \text{ bit/symbol}$

伝送路の記憶を考慮した情報速度の計算

パルス幅が広がり、シンボル間干渉が生じたり、パターン依存性の波形歪みが生じる場合。



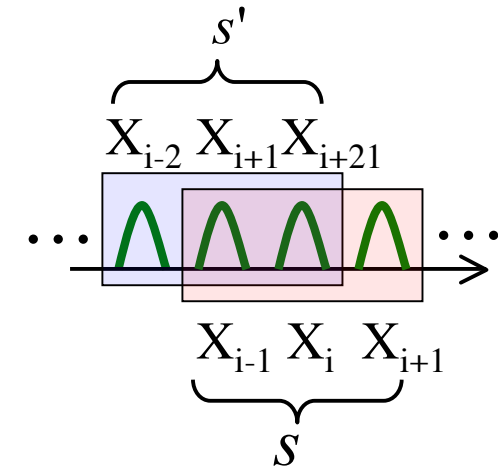
受信信号サンプル Y_i は互いに独立でなくなる→シンボルごとの計算によって情報速度を求めることはできない

多次元のサンプル空間内の確率密度関数 $P(Y_1, Y_2, \dots, Y_n)$ が必要となる

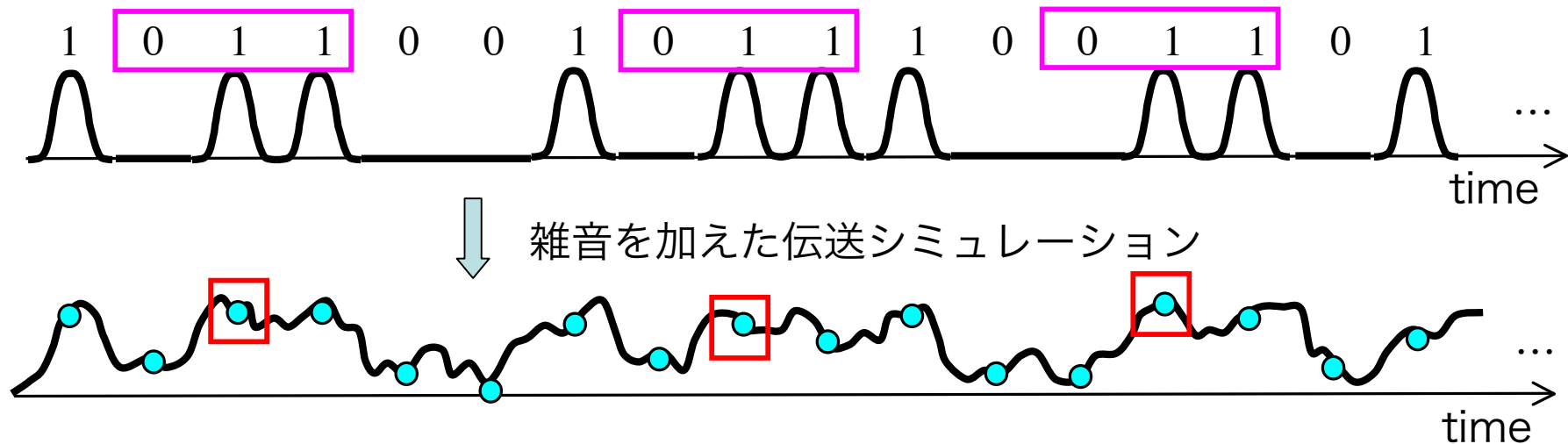
$P(Y_1, Y_2, \dots, Y_n)$ を反復計算によって求める

伝送路の記憶を考慮した情報速度の計算

1. 当該シンボルとその前後 m シンボル（計 $2m+1$ シンボル）からなる状態 s を導入する



2. 数値計算によって $P(Y_i | s)$ を求める



$P(Y_i | s)$ ($s = \{011\}$) が求まる (例)

伝送路の記憶を考慮した情報速度の計算

3. $P(y_i|s)$ を用いて、反復計算によって $P(y_i|y^{i-1})$ を求める

4. $\log P(y^n) = \sum_{i=1}^n \log P(y_i | y^{i-1})$ によって $\log P(y^n)$ を計算する

5. $H(Y) = -(1/N)\log P(y^N)$ (N は大きい数) によって $H(Y)$ を計算する

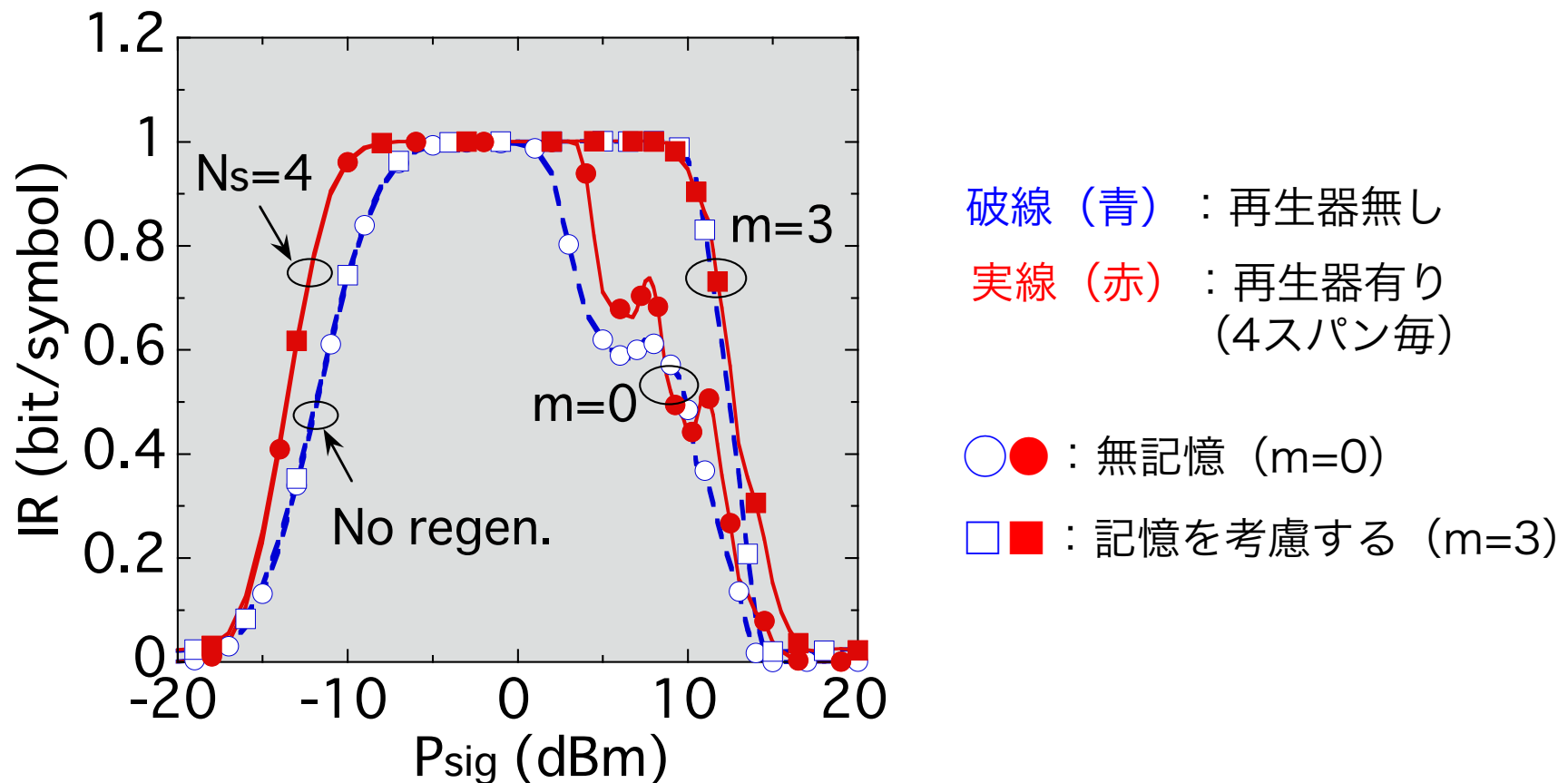
6. $H(Y|X) = -(1/N) \sum_{i=1}^N \log[P(y_i | s)]$ によって $H(Y|X)$ を計算する

情報速度の計算結果

40Gb/s NRZ-OOK 2,400km (24スパン) 伝送

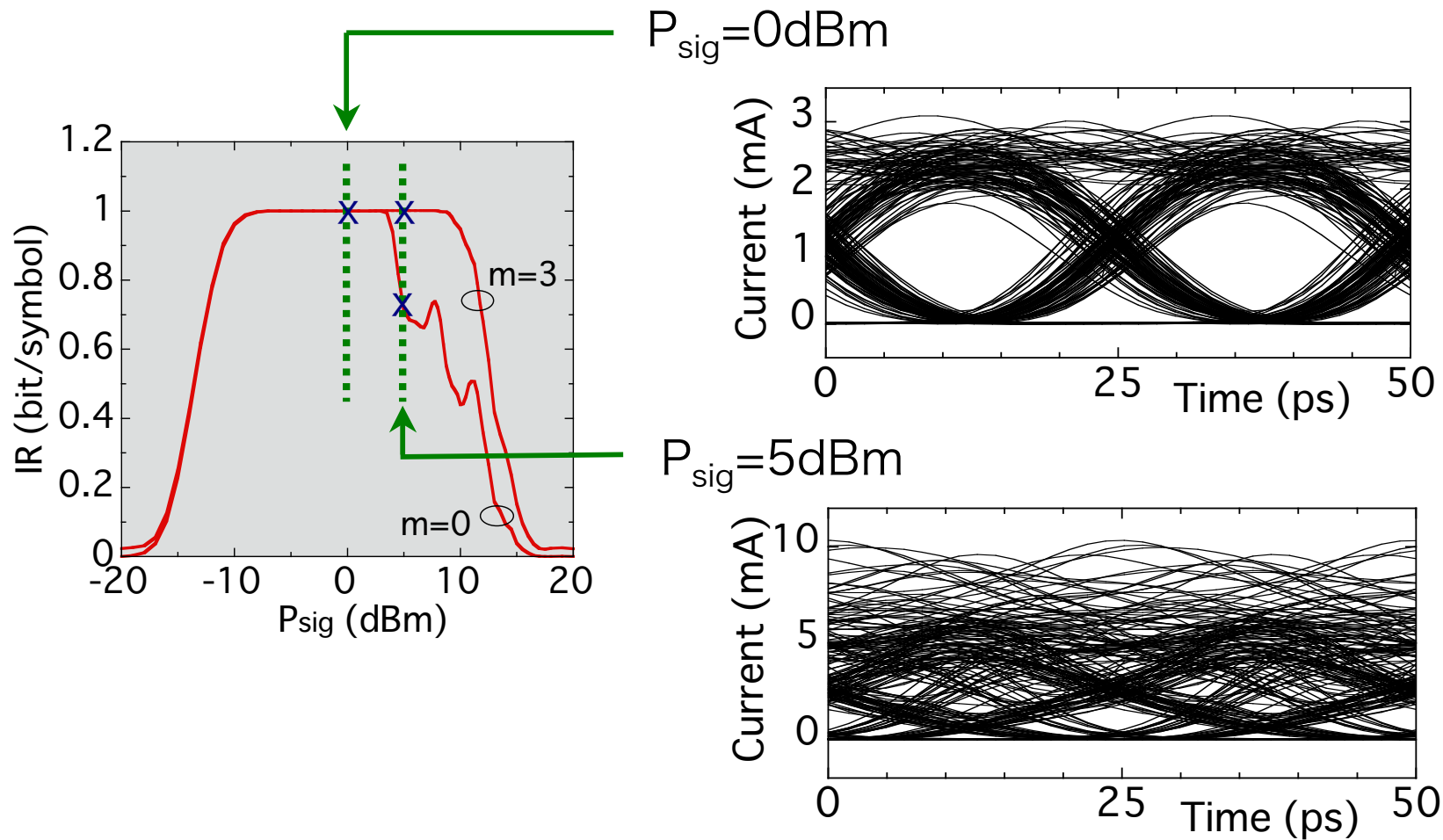
1. スパン毎に100%の分散補償を行う場合

情報速度 (IR) vs スパン入力信号電力



情報速度の計算結果

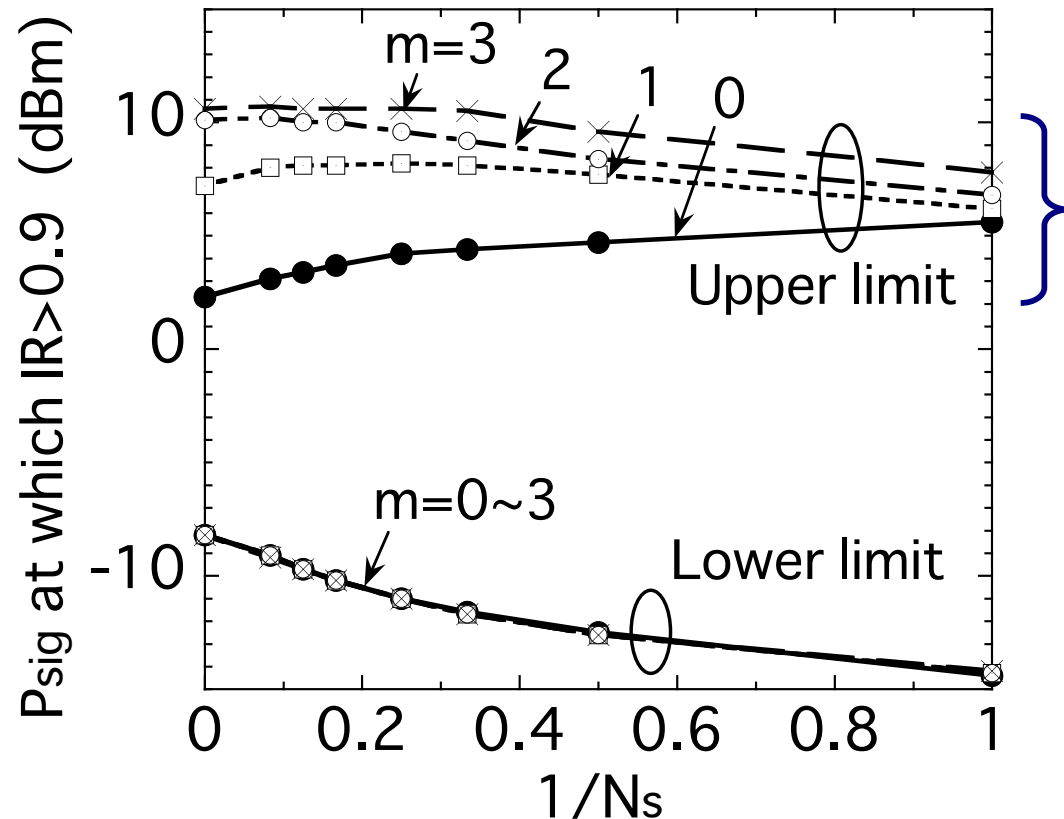
受信アイパターン (再生器有り (4スパン毎))



$m=0$ の場合のIR~0.7、 $m=3$ の場合のIR~1.0

情報速度の計算結果

IR \geq 0.9となるスパン入力信号電力の範囲



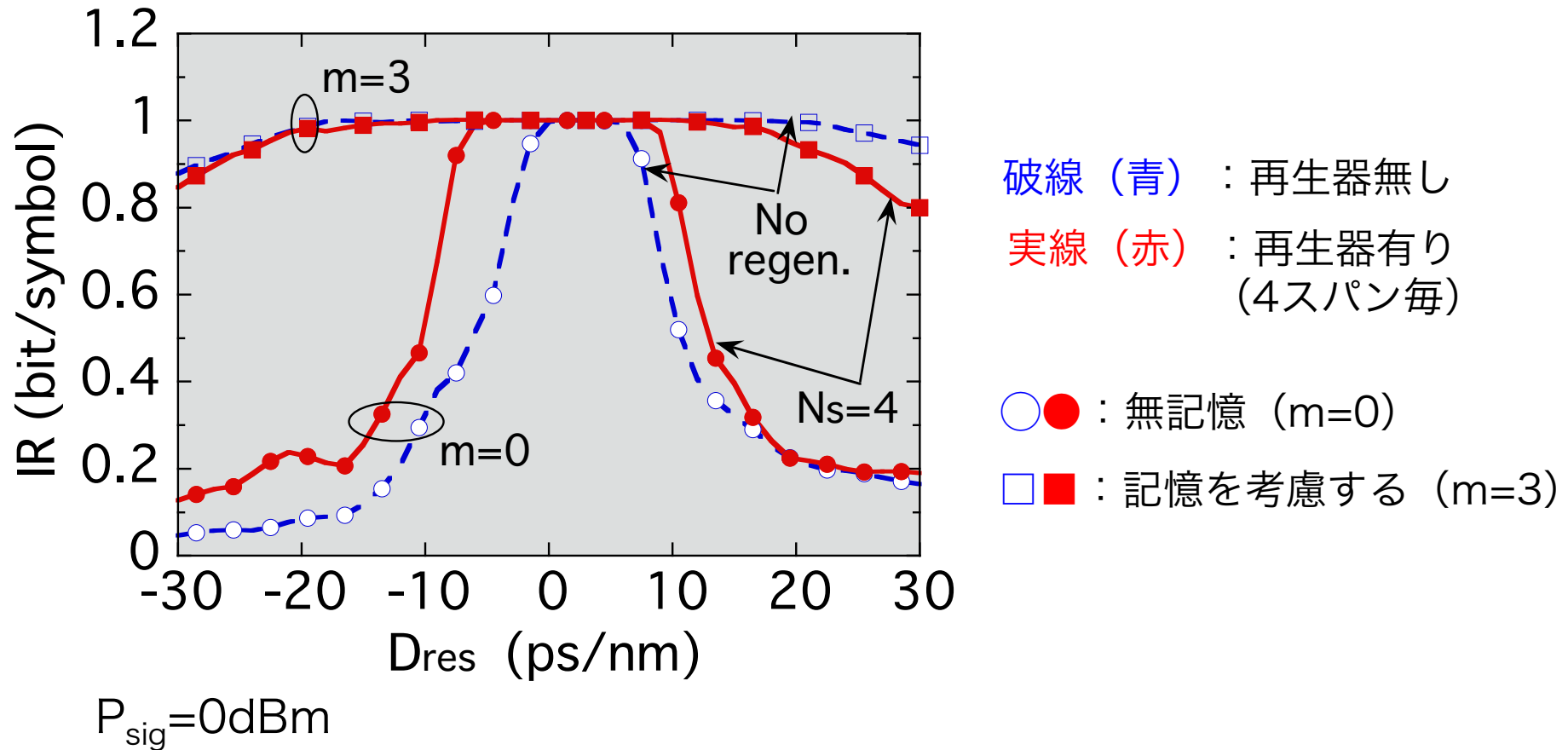
高信号電力側の劣化は非線形波形歪みによるものであり、パターン依存性の劣化である

m を大きくする（記憶の範囲を広げる）とIRが増大する

情報速度の計算結果

2. 各スパンに残留分散がある場合

情報速度 (IR) vs 1スパンあたりの残留分散

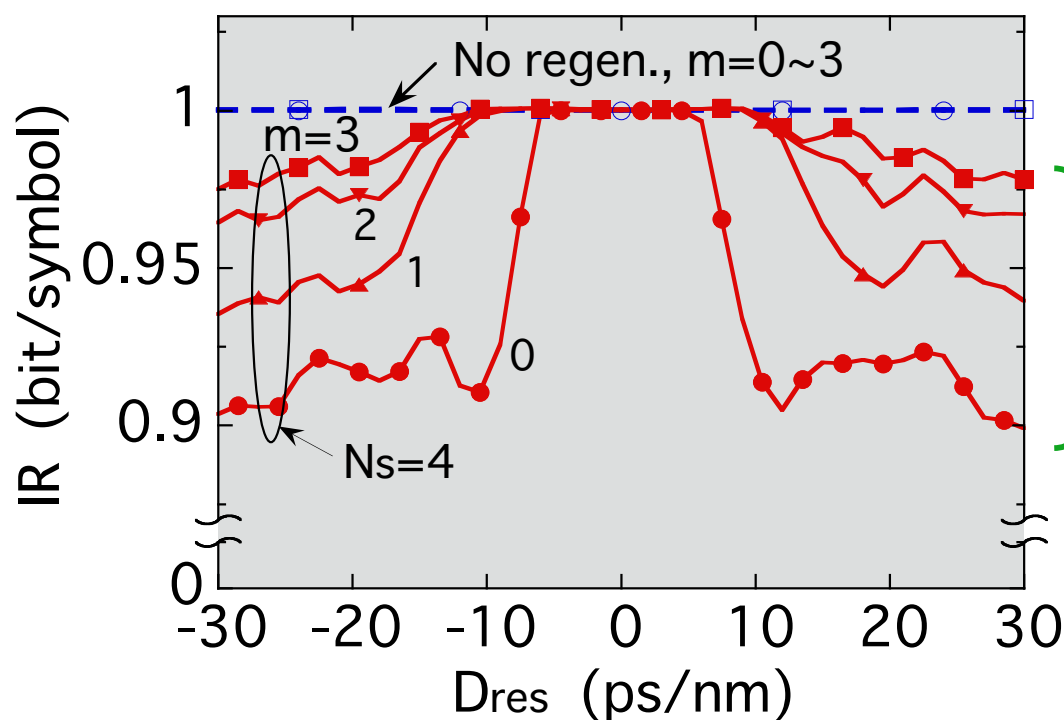


情報速度の計算結果

3. 各スパンに残留分散があり、全残留分散を受信端で一括して補償する場合

(伝送路は非線形性をもたないとし、再生器の非線形性の影響を調べる)

情報速度 (IR) vs 1スパンあたりの残留分散



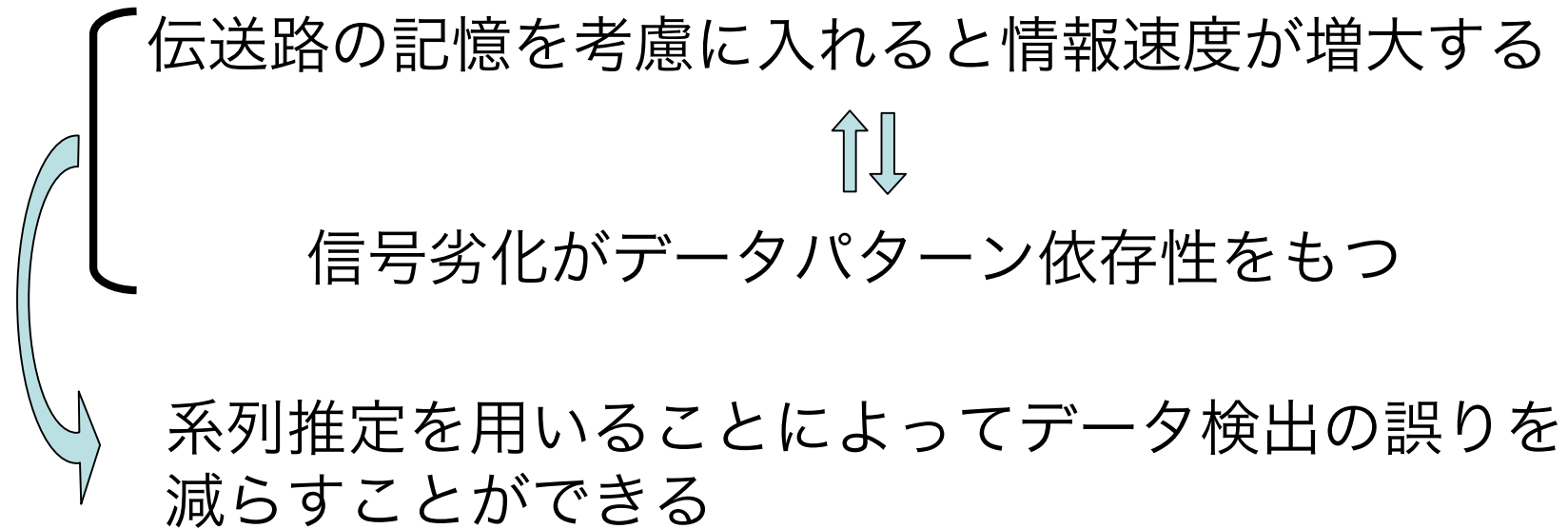
破線 (青) : 再生器無し
実線 (赤) : 再生器有り (4スパン毎)

再生器の非線形性による波形劣化によりIRが低下する

m を大きくするとIRの低下が抑えられる

$P_{sig}=0dBm$

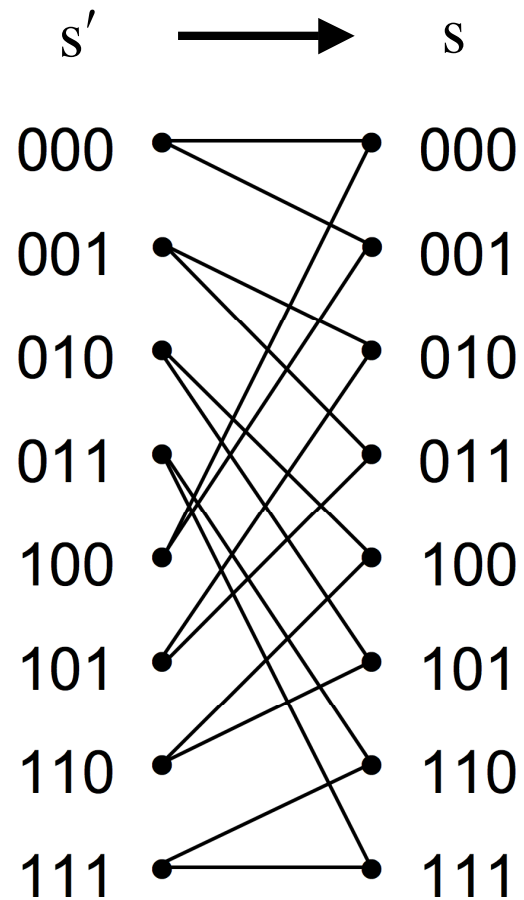
最尤系列推定



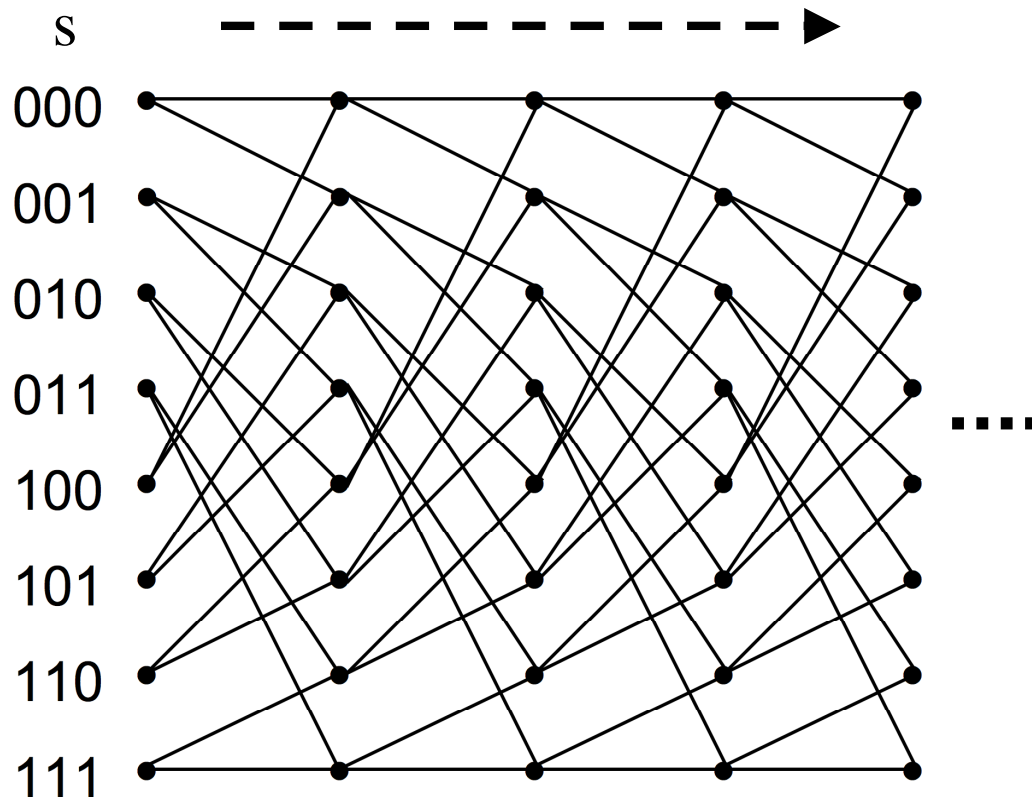
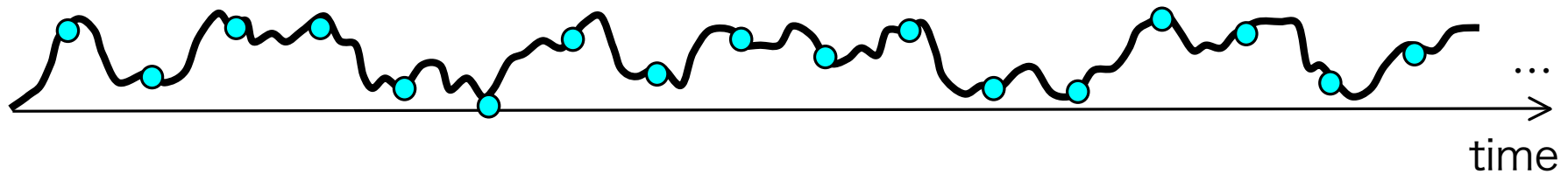
信号再生器の非線形性による波形劣化に起因する符号誤りを、最尤系列推定によって抑制する

最尤系列推定

$m=1$ (当該シンボル前後 1 シンボルの影響を受ける) の場合の状態遷移



最尤系列推定



送信シンボル列が s の場合の中央のシンボル時刻における受信信号の確率密度 $p(y|s)$ が既知である。

全ての可能な状態遷移の系列について

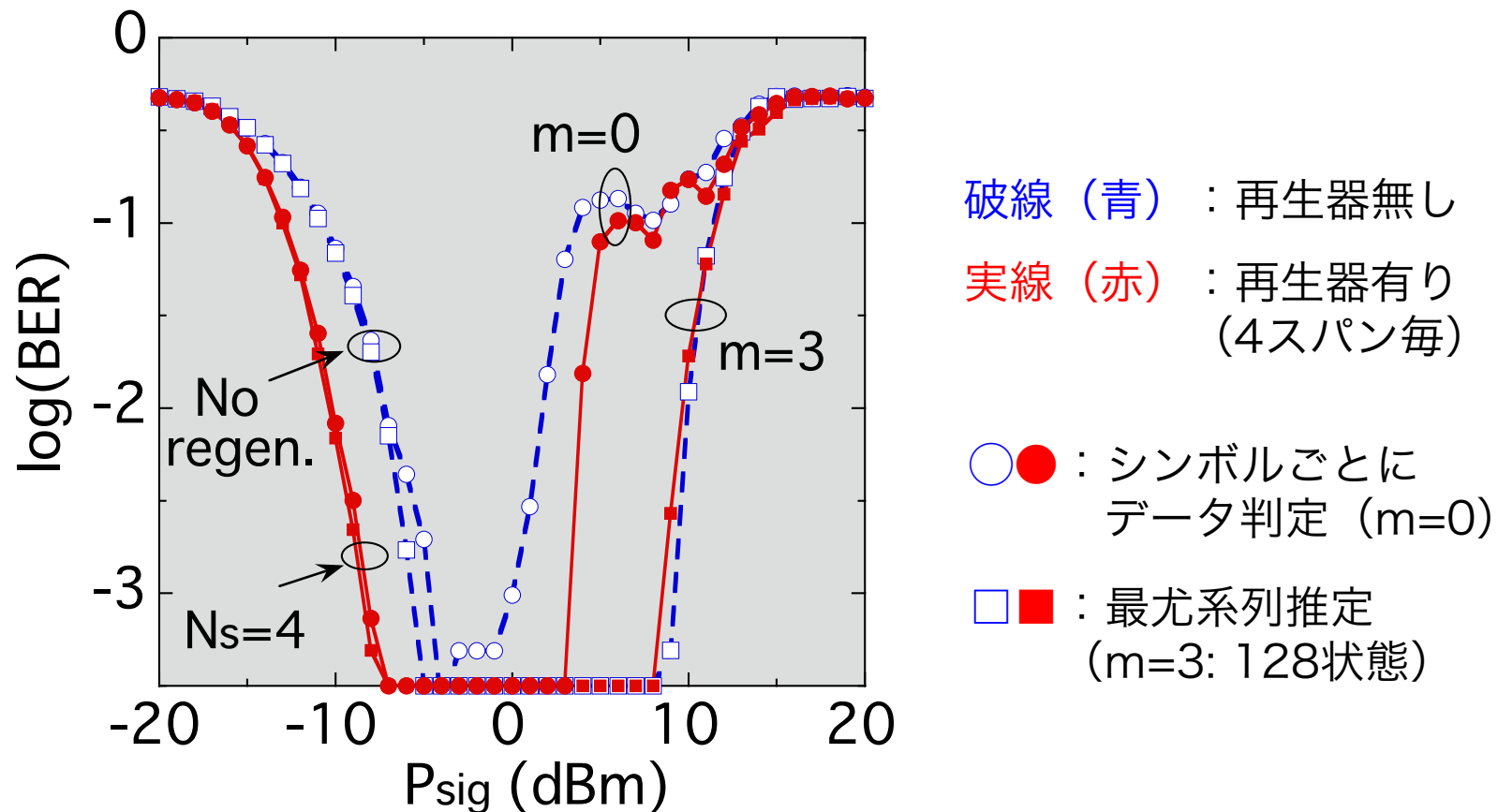
$$\lambda = \sum_{i=1}^n \log[p(y_i | s)]$$

を計算し、 λ が最大になる送信データ系列を探す。

最尤系列推定の計算結果

1. スパン毎に100%の分散補償を行う場合

ビット誤り率 vs スパン入力信号電力

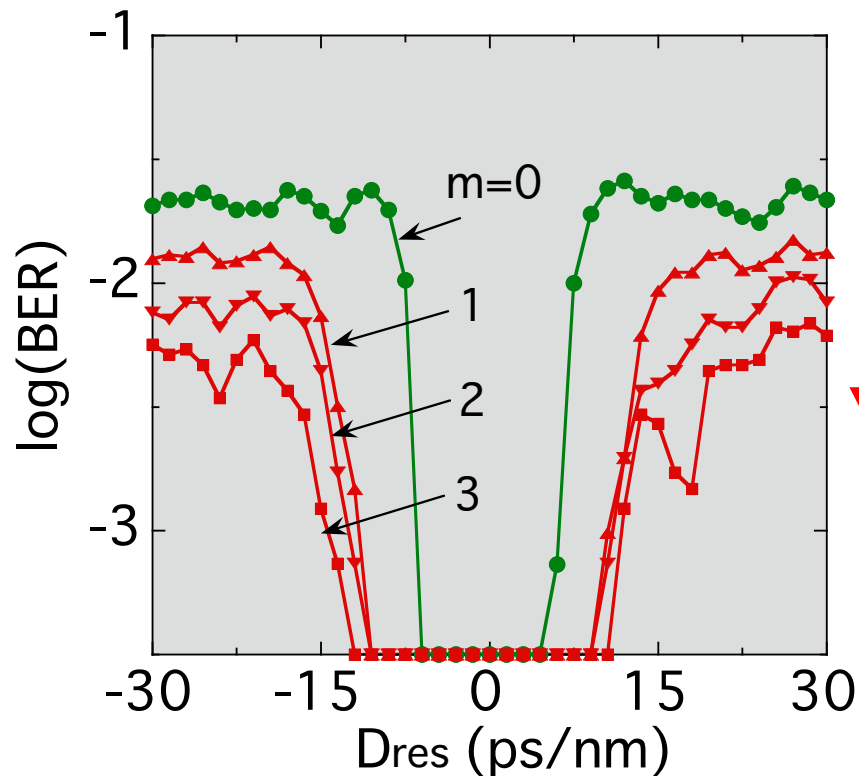


最尤系列推定の計算結果

3. 各スパンに残留分散があり、全残留分散を受信端で一括して補償する場合

(伝送路は非線形性無し。再生器の非線形性によって信号が劣化する)

ビット誤り率 vs 1スパンあたりの残留分散



再生器有り (4スパン毎)

$m=0$: シンボルごとにデータ判定

$m=1$: MLSE (8状態)

$m=2$: MLSE (32状態)

$m=3$: MLSE (128状態)

まとめ

信号再生器が配置された光ファイバ伝送路における単一チャネル信号伝送の情報速度解析を行った。

- 理想的な条件下では、再生器によって雑音が除去されるため信号の情報速度が大きくなる。
- 伝送路に残留分散が存在し、隣接シンボルが時間的に重なった状態で再生器に入力される場合は、パターン依存性の波形歪みが生じ、記憶を考慮せずに評価した情報速度は低下する。
- 再生器の非線形性によって生ずるパターン依存性の波形歪みに起因するビット誤りは検波後の最尤系列推定によってある程度抑制できる。