



# デジタルコヒーレント光通信技術の 研究開発

## Research on Digital Coherent Optical Communication Systems

菊池 和朗  
Kazuro Kikuchi

東京大学 大学院工学系研究科 電気系工学専攻  
Department of Electrical Engineering and Information Systems  
The University of Tokyo



## 1.はじめに

## 2.コヒーレント光受信器におけるデジタル信号処理

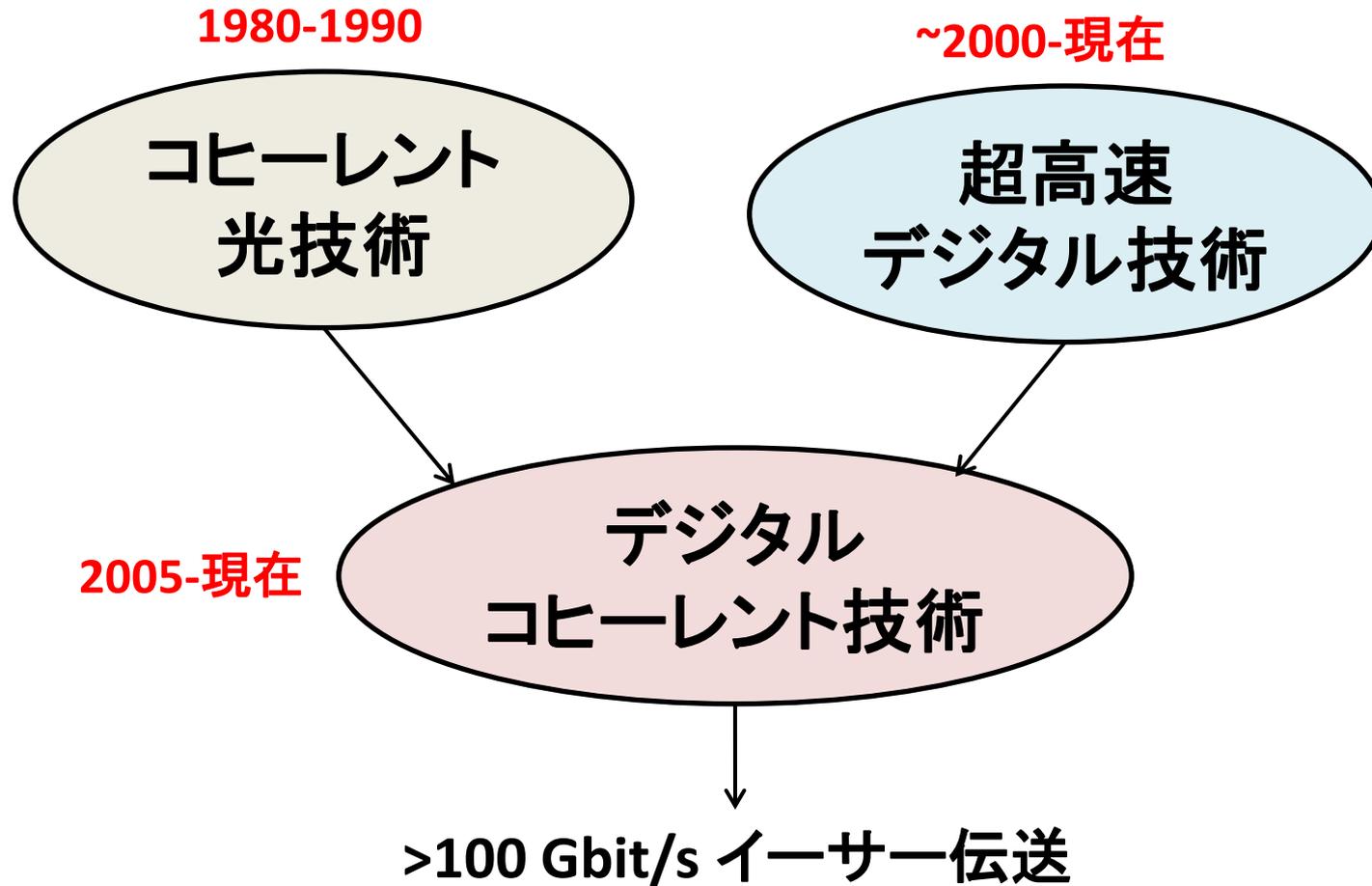
(1)適応等化器の機能

(2)新しい適応等化器の提案と実験

## 3.コヒーレント多値光伝送実験

## 4.むすび

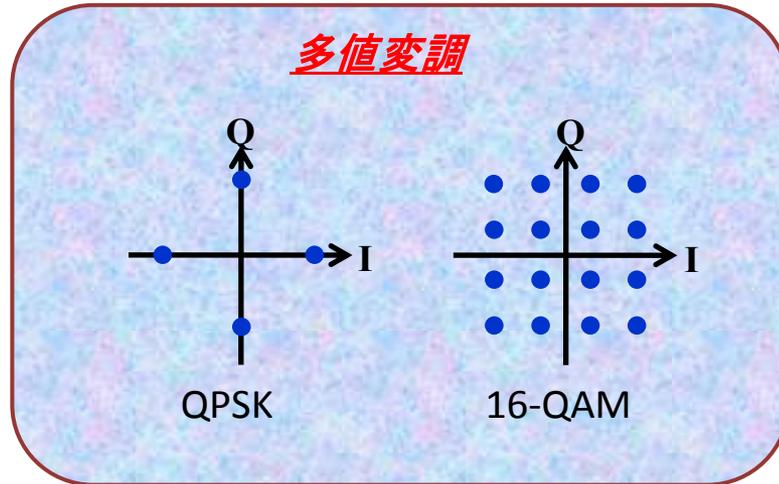
# デジタルコヒーレント光通信技術



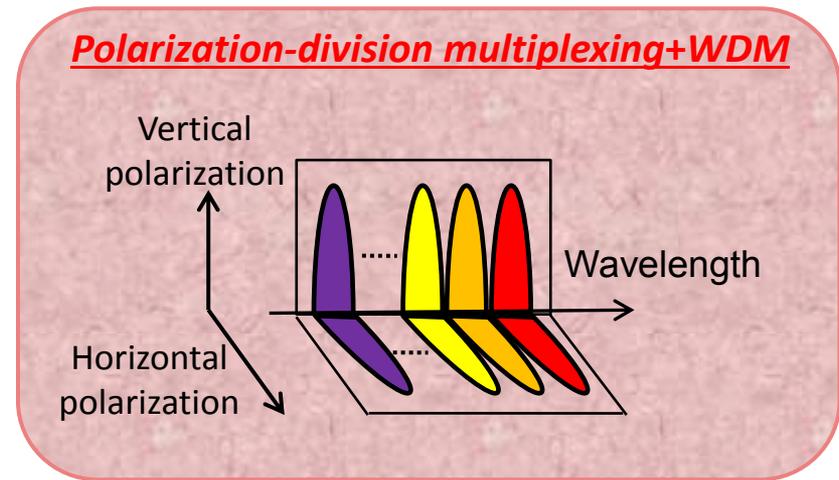
# 将来の光伝送システムで用いられる基本的 コヒーレント技術



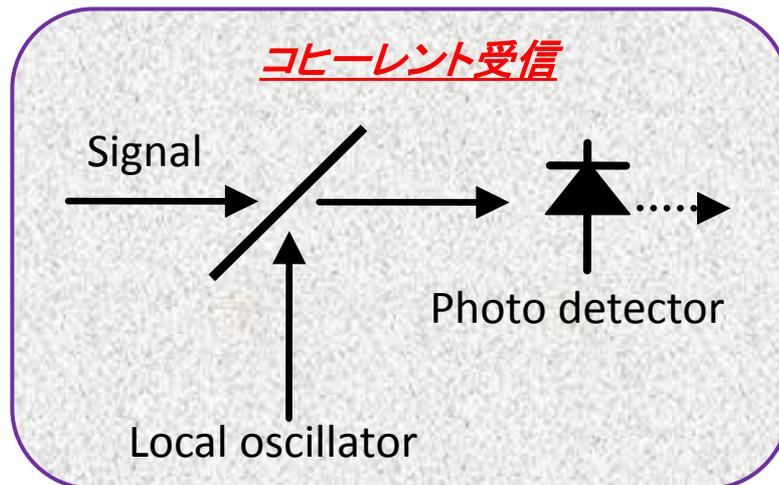
## 変調フォーマット



## 多重化方式

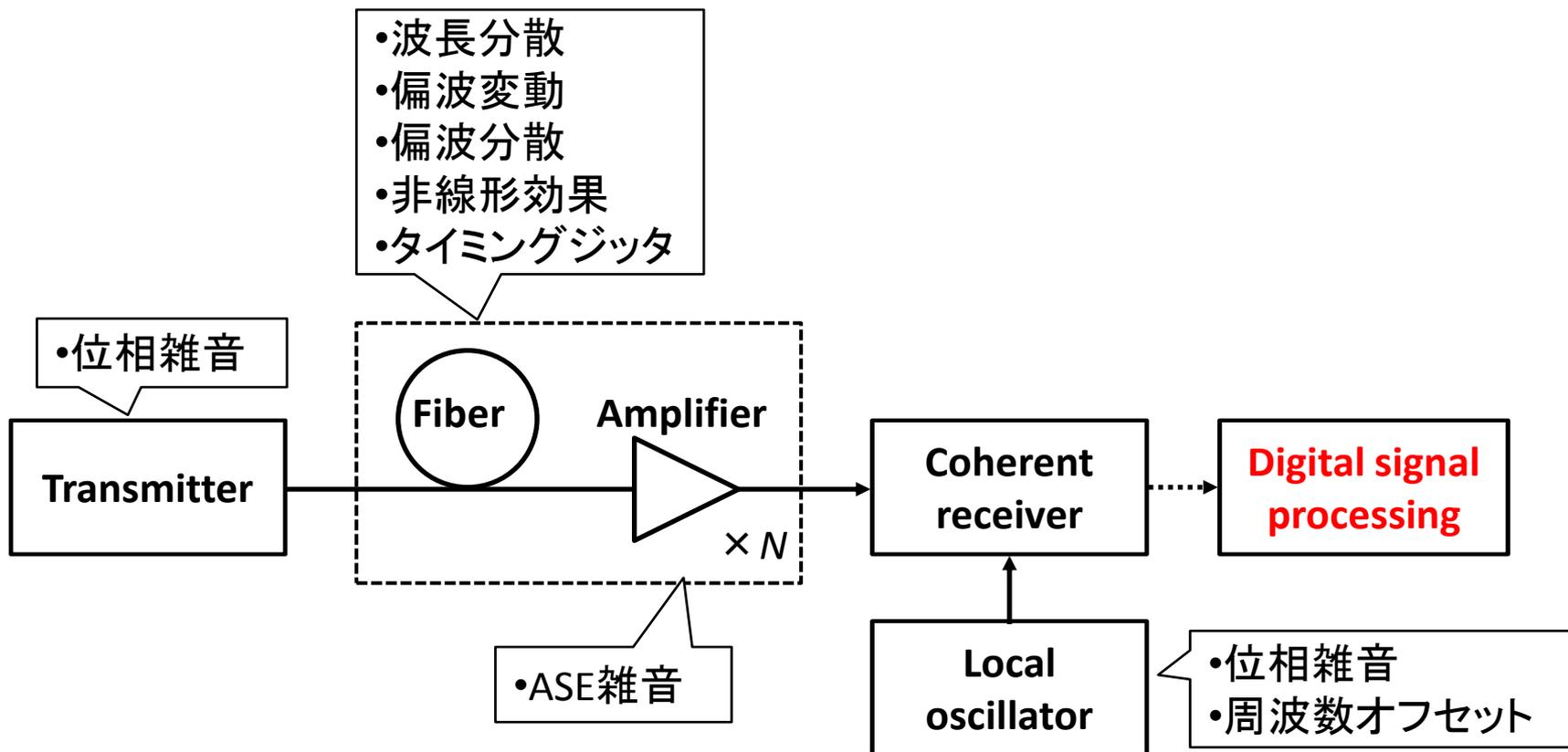


## 検波方式



- このようなコヒーレント伝送システムは、極限的な性能を持つ。
- しかし、各種の伝送障害に対して耐性が小さい。

# 本研究の目的



これらの障害をデジタル領域で補償する方式を検討。



伝送実験による実証。



## 1. はじめに

## 2. コヒーレント光受信器におけるデジタル信号処理

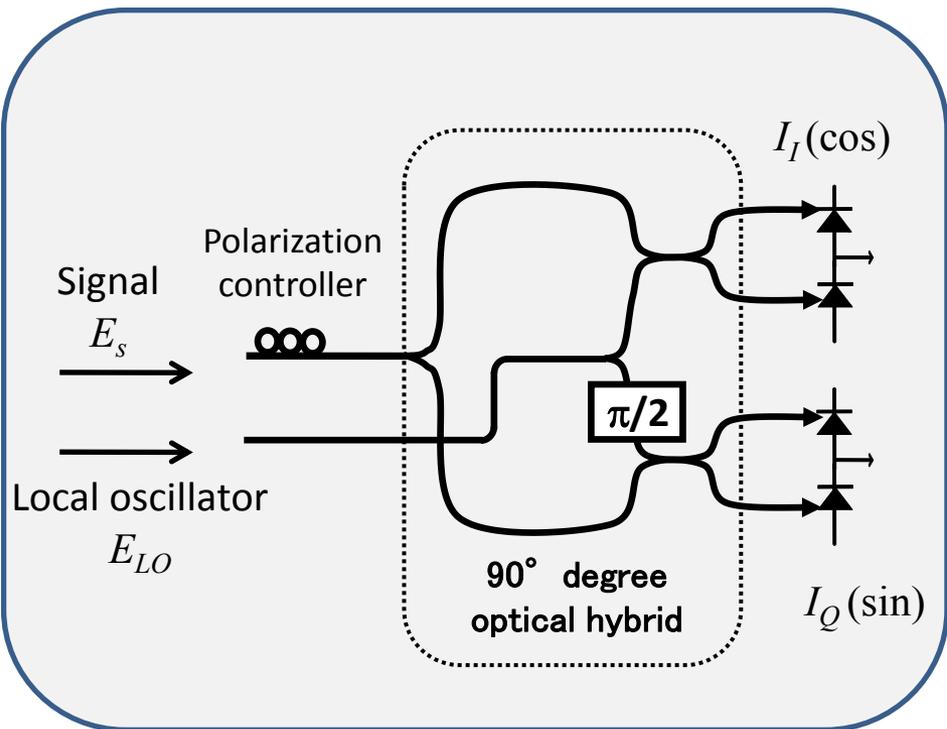
### (1) 適応等化器の機能

### (2) 新しい適応等化器の提案と実験

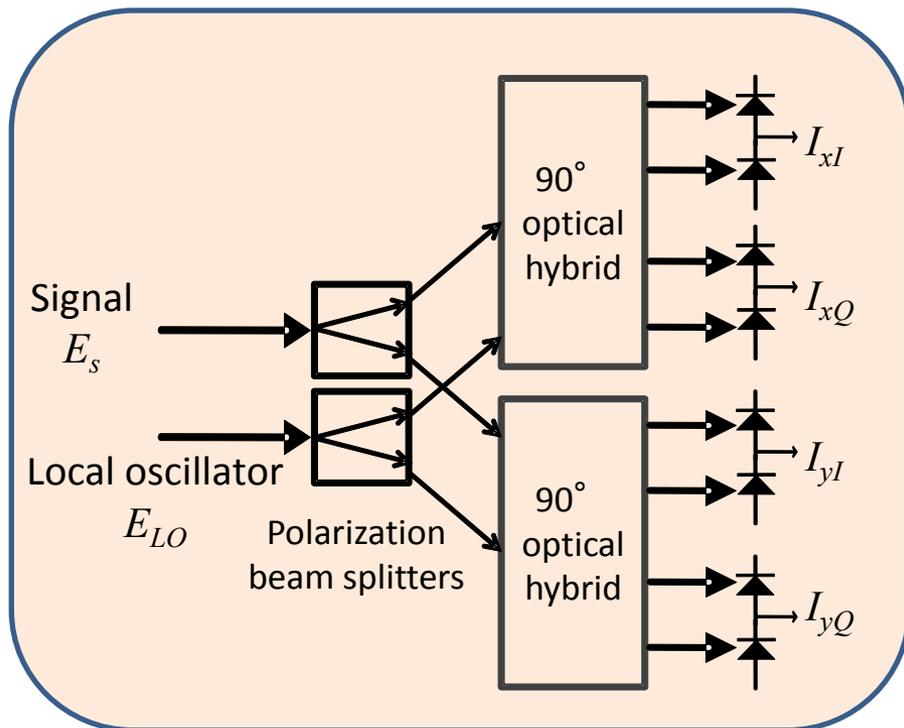
## 3. コヒーレント多値光伝送実験

## 4. むすび

# コヒーレント光受信器の構成



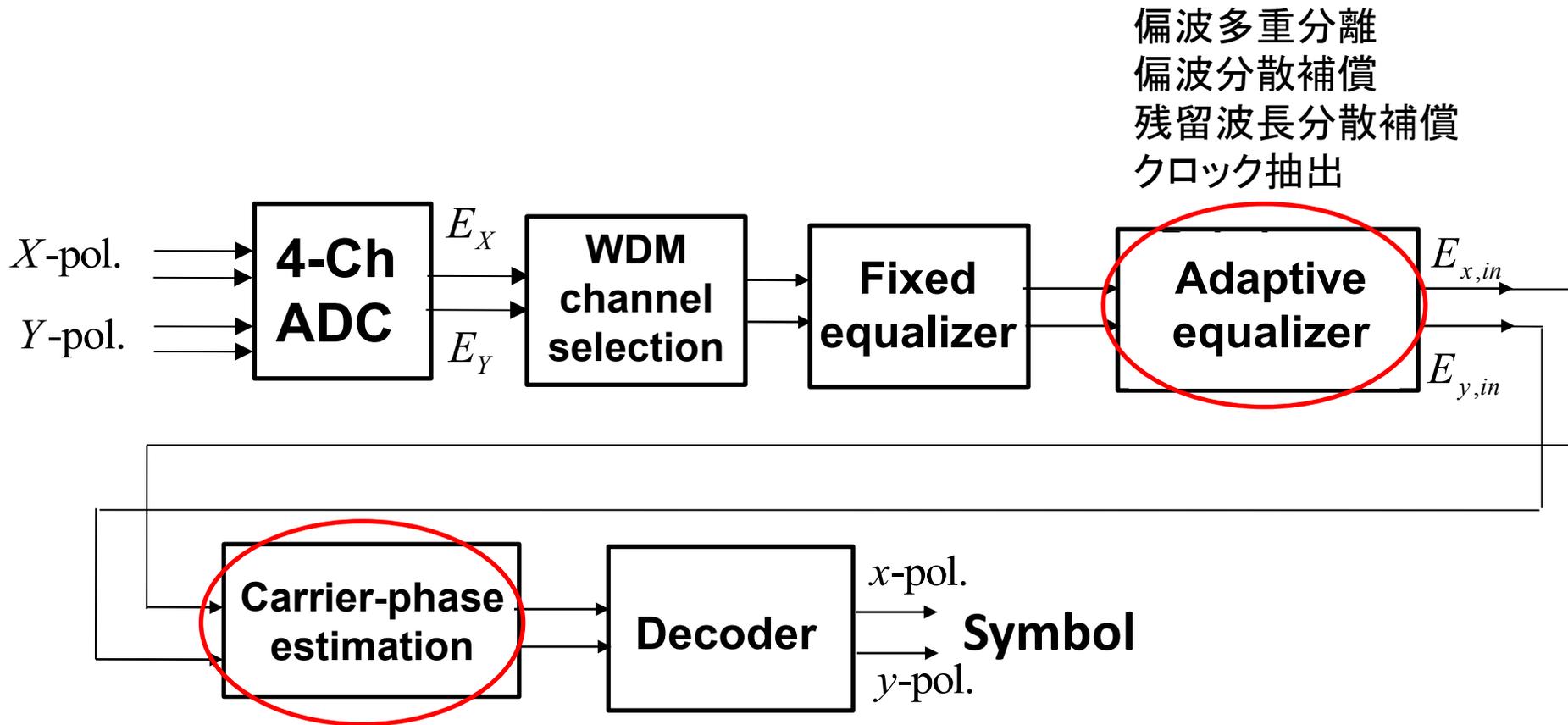
位相ダイバーシティホモダイン受信器



位相・偏波ダイバーシティホモダイン受信器

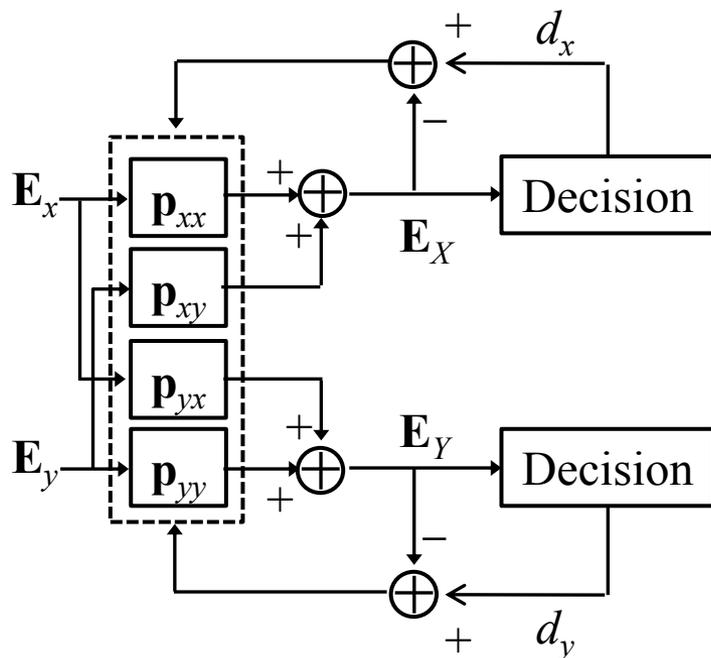


# デジタル信号処理回路



等化器との協調動作

# バタフライ構成のFIRフィルタ



タップ更新のための  
判定指向型LMS(DD-LMS)アルゴリズム

$$\mathbf{p}_{xx}(n+1) = \mathbf{p}_{xx}(n) + \mu \{ \underline{d_x(n)} - E_X(n) \} \mathbf{E}_x^*(n)$$

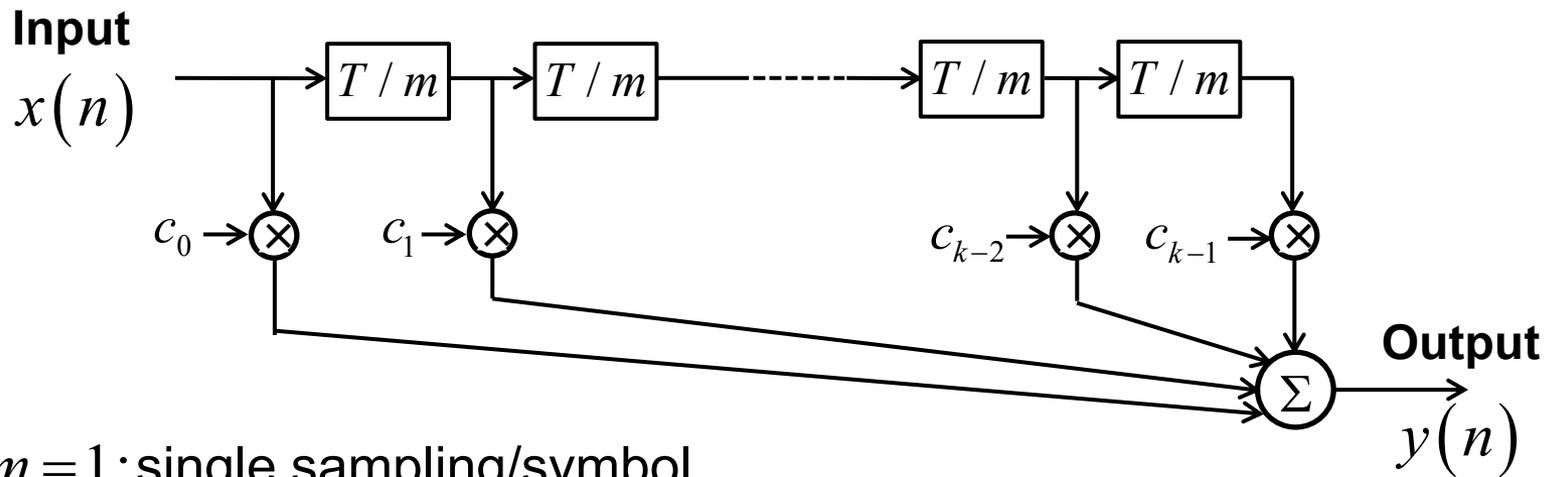
$$\mathbf{p}_{xy}(n+1) = \mathbf{p}_{xy}(n) + \mu \{ \underline{d_x(n)} - E_X(n) \} \mathbf{E}_y^*(n)$$

$$\mathbf{p}_{yx}(n+1) = \mathbf{p}_{yx}(n) + \mu \{ \underline{d_y(n)} - E_Y(n) \} \mathbf{E}_x^*(n)$$

$$\mathbf{p}_{yy}(n+1) = \mathbf{p}_{yy}(n) + \mu \{ \underline{d_y(n)} - E_Y(n) \} \mathbf{E}_y^*(n)$$

偏波多重分離  
偏波分散補償  
残留波長分散補償  
クロック抽出

# FIRフィルタの構成



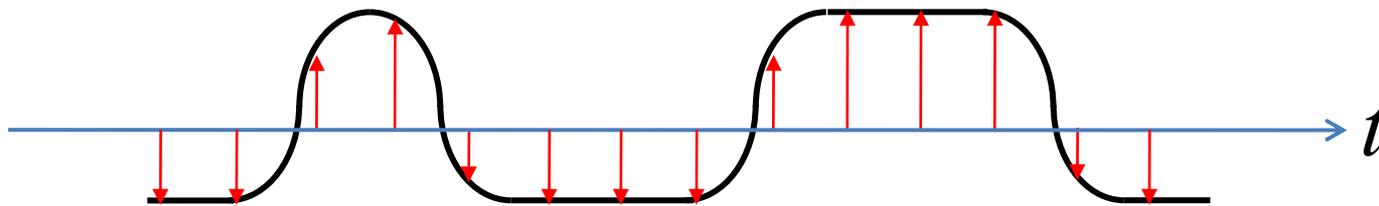
$m = 1$  : single sampling/symbol

$m = 2$  : double sampling/symbol

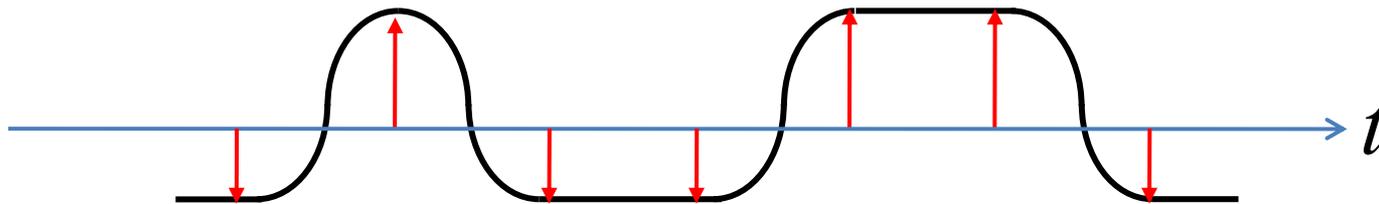
# FIRフィルタによるクロック抽出



非同期2倍オーバサンプリング



連続的時間遅延

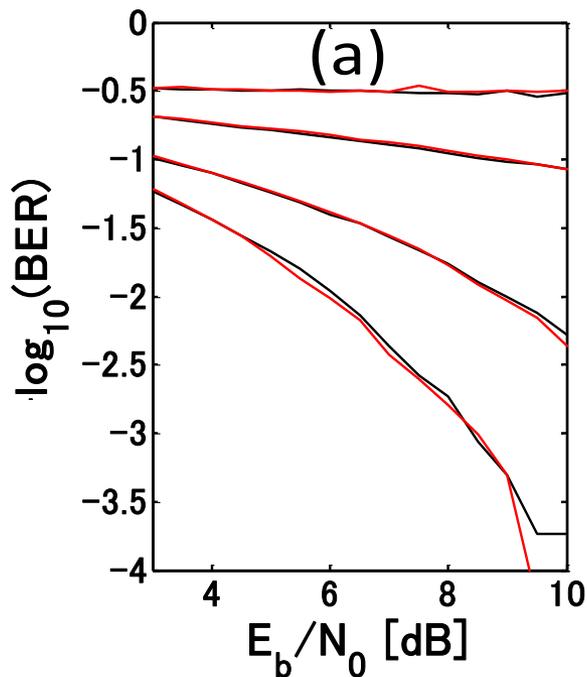


同期シンボルレートサンプリング

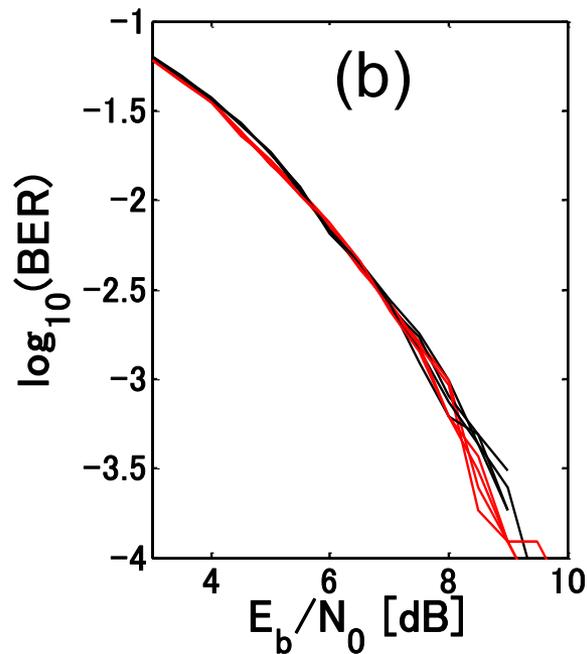
クロック抽出

K. Kikuchi, "Clock recovering characteristics of adaptive finite-impulse-response filters in digital coherent optical receivers," *Optics Express* **19**, 5611-5619 (2011).

# BERのサンプリング位相依存性



Double sampling  
Nyquist filter  $\alpha=0.2$   
number of taps=1



Double sampling  
Nyquist filter  $\alpha=0.2$   
number of taps=5



## 1. はじめに

## 2. コヒーレント光受信器におけるデジタル信号処理

(1) 適応等化器の機能

(2) 新しい適応等化器の提案と実験

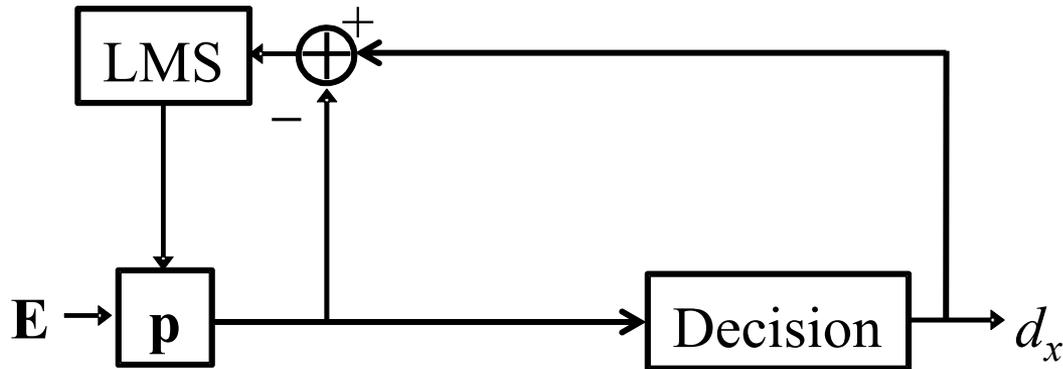
## 3. 多値光伝送実験

## 4. むすび



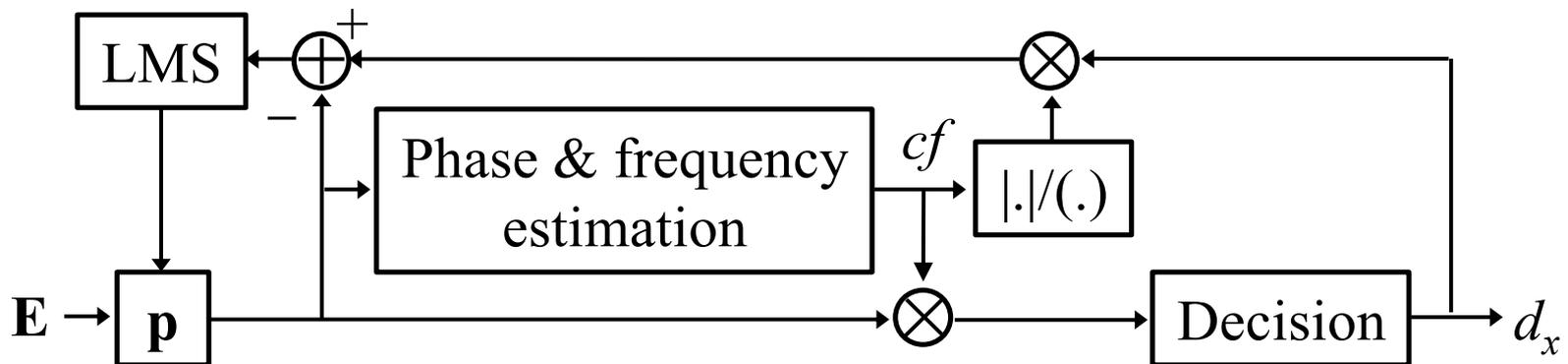
# DD-LMSの問題点と解決法

## 従来型



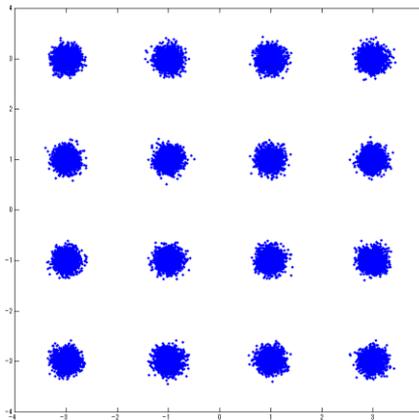
**欠点:** 変動の速い位相雑音や周波数オフセットを追尾するために、長いFIRフィルタ段数を使えない。

## 新提案



Y. Mori and K. Kikuchi, OECC 2011

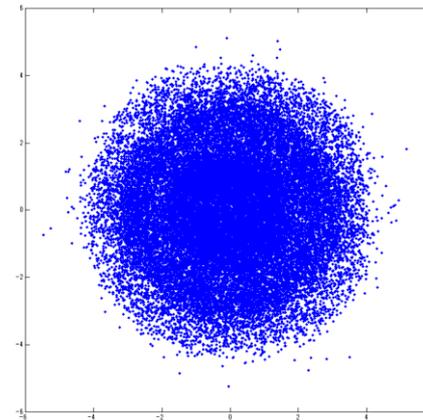
# DD-LMSアルゴリズムの動作不安定性



Without phase noise



位相雑音による  
動作不安定化



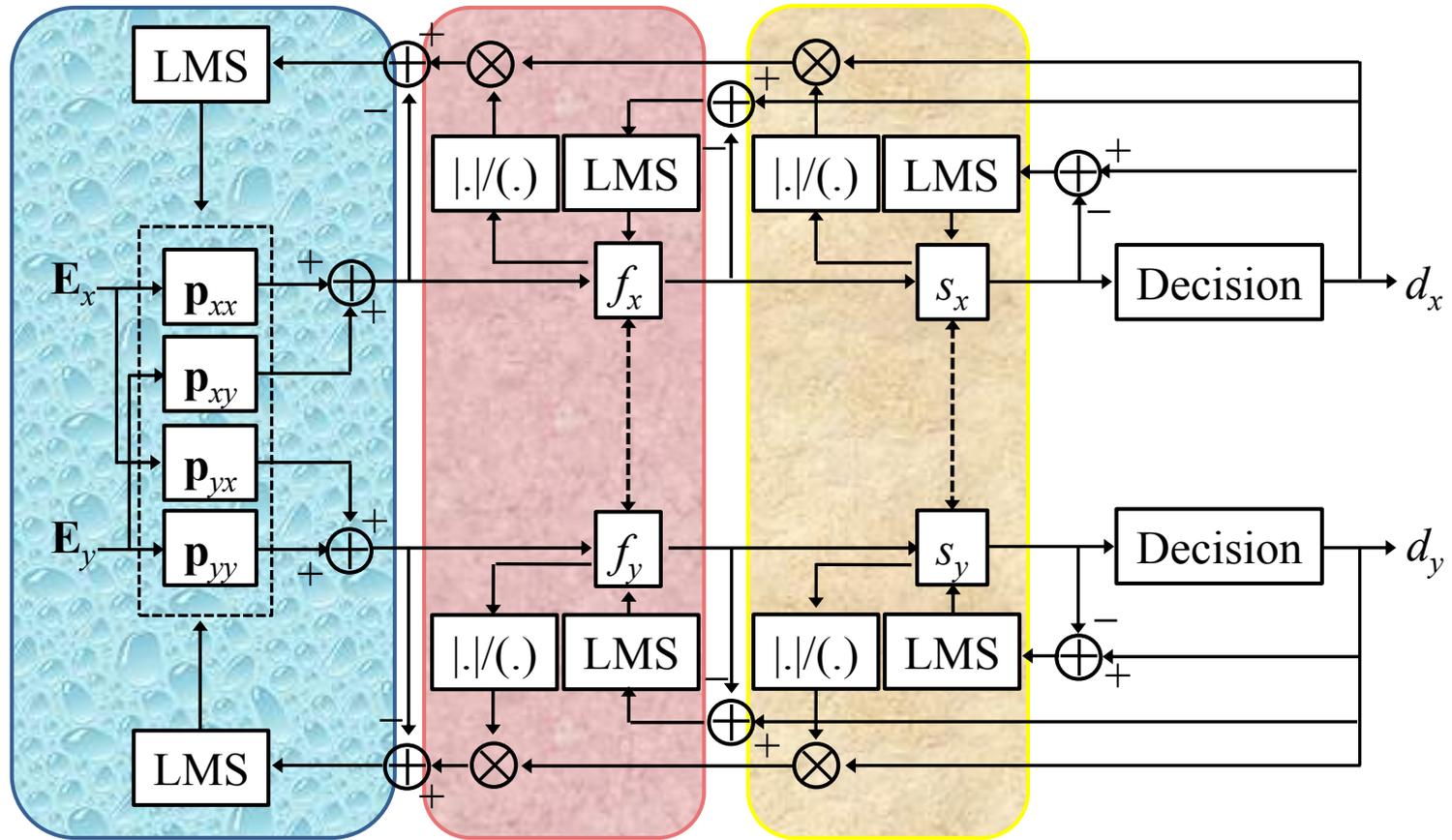
With phase noise and frequency offset

$$E(t) \propto \exp\left[j\left\{2\pi \underline{f_{\text{offset}}} t + \varphi_{\text{signal}}(t) + \varphi_n(t)\right\}\right]$$

Frequency offset

Phase noise

# DD-LMSアルゴリズムを用いた新しい構成のFIRフィルタ



*Slow*

偏波多重分離  
偏波分散補償  
残留波長分散補償  
クロック抽出

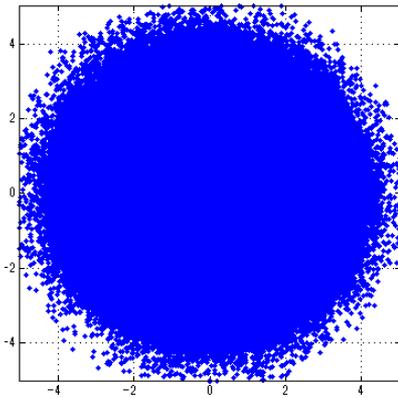
*Fast*

キャリア位相推定

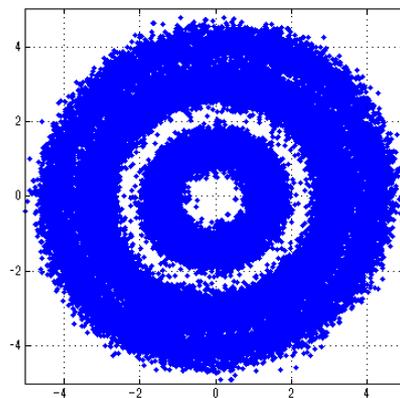
*Slow*

オフセット周波数推定

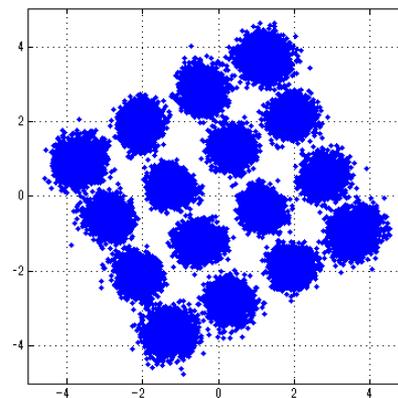
# 測定されたConstellation map



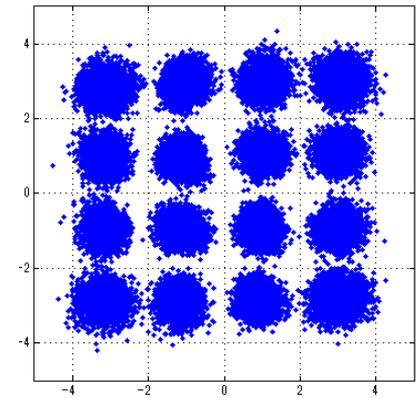
Before  
butterfly-structured  
FIR filters



After  
butterfly-structured  
FIR filters



After  
first-stage  
estimator



After  
second-stage  
estimator



## 1. はじめに

## 2. コヒーレント光受信器におけるデジタル信号処理

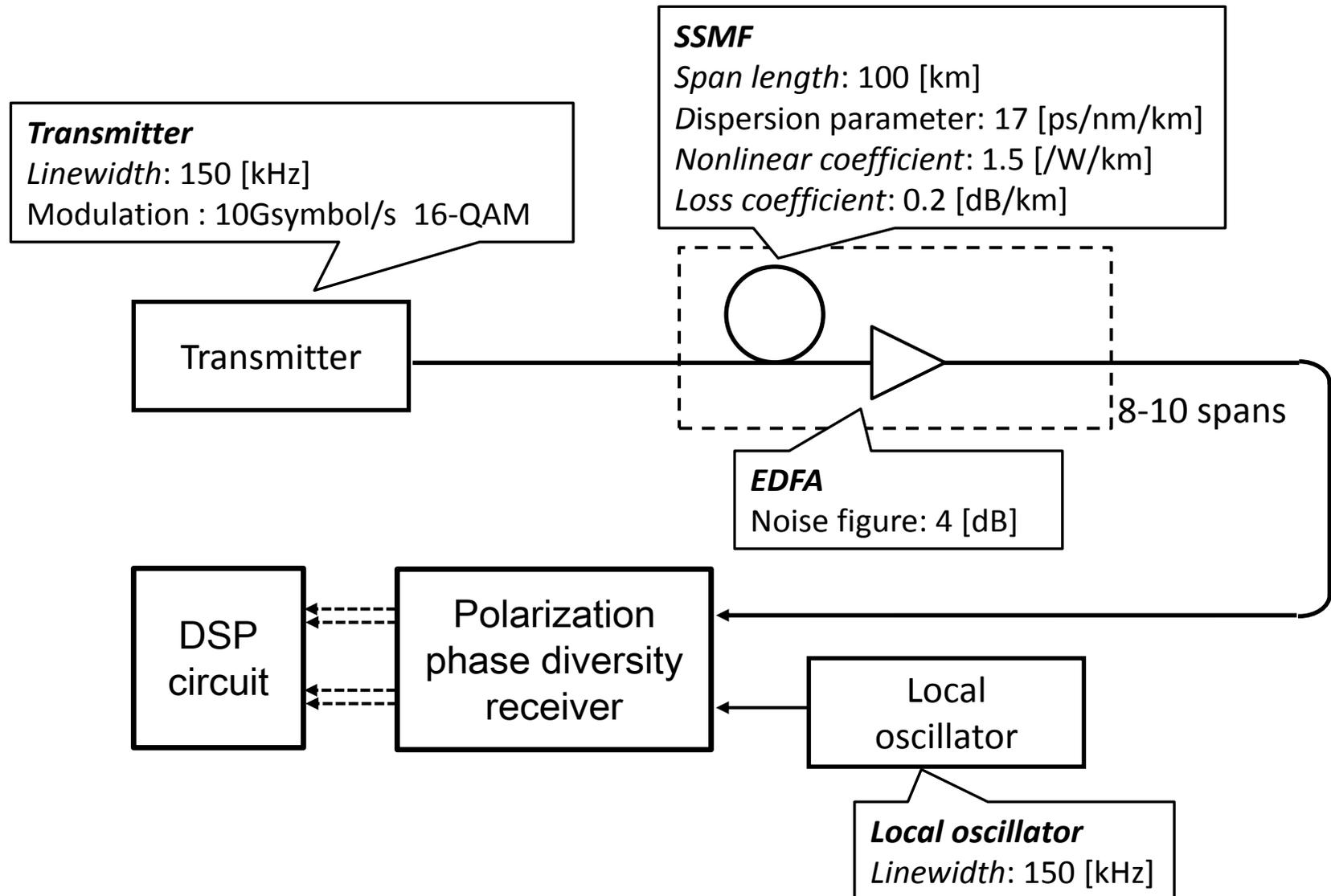
(1) 適応等化器の機能

(2) 新しい適応等化器の提案と実験

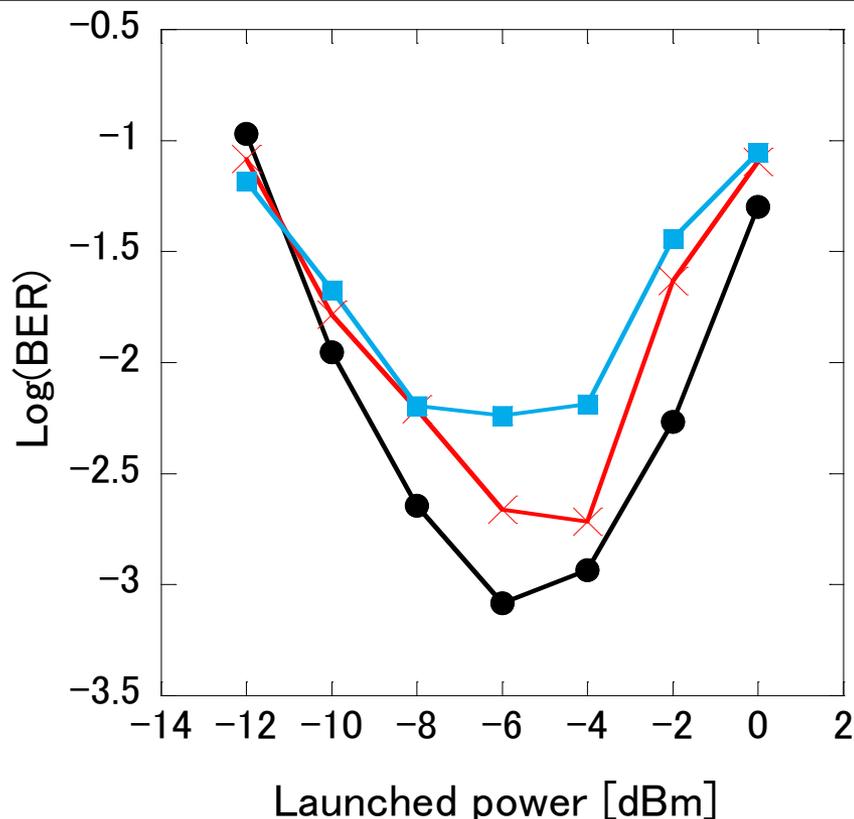
## 3. 多値光伝送実験

## 4. むすび

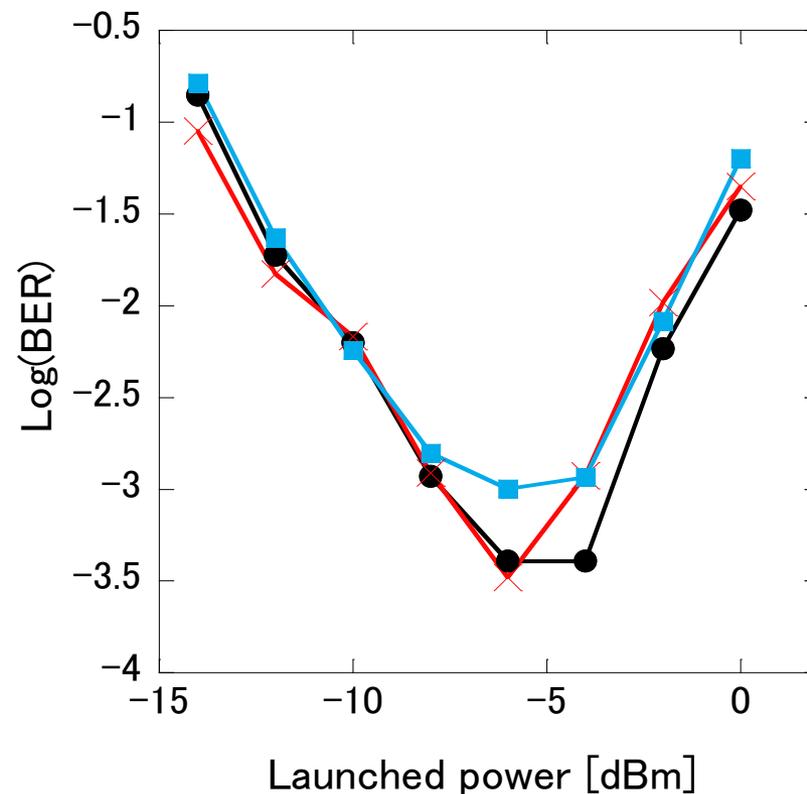
# 伝送システム実験系



# 伝送実験結果



1,000km SMF 伝送路を用いた 10Gsymbol/s  
16QAM 信号 WDM 伝送特性。  
チャンネル間隔 25GHz。●: 1ch, ×: 3ch,  
■: 3ch 偏波多重。



800km SMF 伝送路を用いた 10Gsymbol/s  
16QAM 信号 WDM 伝送特性。  
チャンネル間隔 25GHz。●: 1ch, ×: 3ch,  
■: 3ch 偏波多重。



## 1. はじめに

## 2. コヒーレント光受信器におけるデジタル信号処理

(1) 適応等化器の機能

(2) 新しい適応等化器の提案と実験

## 3. 多値光伝送実験

## 4. むすび



1. デジタルコヒーレント光受信器において、信号等化およびキャリア位相推定を行う新しい構成のFIRフィルタを提案した。
2. 開発された受信器を用いて、16QAM、長距離実験を行った。80Gbit/s WDM信号の800km伝送に成功した。スペクトル効率 $3.2\text{bit/s/Hz}$ である。
3. ファイバの非線形効果は、等化によっても除去することが困難であり、伝送距離を強く制限している。