

JANOG54 BoF

長距離大容量通信でよく聞く デジタルコヒーレント方式について考えてみる

数式はできるだけ使わずに
実機も触ってみる

株式会社マクニカ
クラビスカンパニー技術部
阿部野 一郎

講師紹介



【講師】
阿部野 一郎 (あべの いちろう)

株式会社マクニカ
クラビスカンパニー

略歴：

2003年よりマクニカにてワイヤレス系製品のFAEとして活動
2020年くらいから光通信の分野にも活動の範囲を拡げています



【アシスタント】
三田村 友也 (みたむら ゆうや)

株式会社マクニカ
クラビスカンパニー



【アシスタント】
山本 剛士 (やまもと たけし)

株式会社マクニカ
クラビスカンパニー

Agenda

1. JANOG 50での発表
2. 電気側（ホスト）と光側（メディア）のデータレート
3. 変調の方法（送信側）
4. 検出の方法（受信側）
5. FECはどこでかけるのか？
6. まとめ

7. 実機デモの構成
8. トランシーバからの各種レポート例

JANOG 50 @ 函館 でこんな発表がありました

JANOGプログラム

できるのか？400G光伝送？

@ J50HAKODATE • 🕒 2022年8月2日


BroadBand Tower, Inc.
JANOG50 公表資料

できるのか？400Gbps光伝送

2022年07月13日
株式会社ブロードバンドタワー
Cloud&SDN研究所
西野大

JANOG50 「できるのか？400G光伝送？」
明日やってくる400GbEにどう立ち向かうか

情報処理推進機構 産業サイバーセキュリティセンター サイバー技術研究室
ソフトウェア株式会社
松本 智 (Matsumoto Satoshi)

2022/7/13 JANOG50 DAY1

“できるのか？400Gbps光伝送” この取り組みが目指すところ

JANOG50 Day1 2022/07/13
TOMATSU Hiromichi

400G-ZR/ZR+の技術解説

MACNICA

2022/7/13
株式会社マクニカ
磯野健二



© Macnica, Inc.

400G-ZR 持ち寄り検証

JANOG50 Day1 2022/07/13
Megumi Takagi
KADOKAWA Connected Inc.

© KADOKAWA Connected Inc.

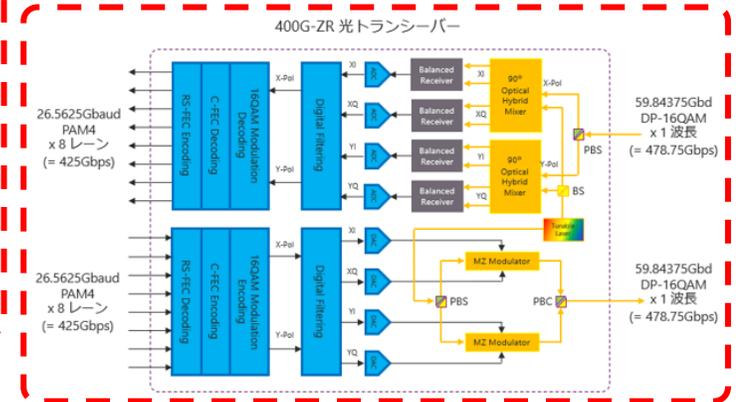
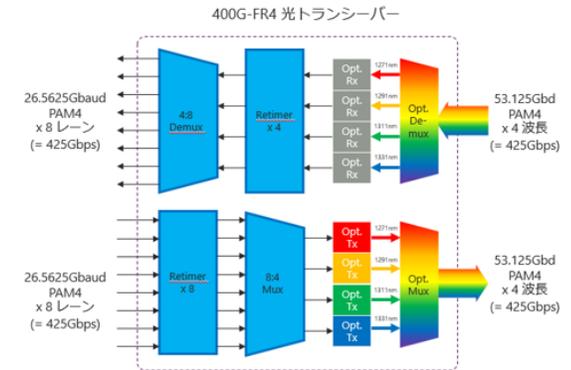
「400G-ZR/ZR+の技術解説」を深掘りしてみる

- デジタルコヒーレント方式が長距離・大容量通信で使われるのはなぜか？
- 実機も触ってみる



よくある400G光トランシーバーとは何が違う？

	400G-FR4	400G-ZR
伝送距離	2km	120km
波長数	4波長 (CWDM)	1波長
偏波多重	なし	あり
変調方式	PAM4 (2-bit/symbol)	16QAM (4-bit/symbol)
受信方式	直接検出 (DD)	コヒーレント検出 (CD)
FECをかける場所	スイッチ側のみ	スイッチと トランシーバー 内部の両方
QSFP-DD	Type 2	Type 2A
消費電力	10W	15W+



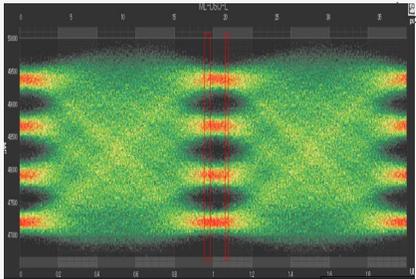
400G-ZR 光トランシーバのブロック図

電気側 (ホスト)

光側 (メディア)

受信 (電気)

26.5625Gbaud
PAM4
x 8 レーン
(= 425Gbps)

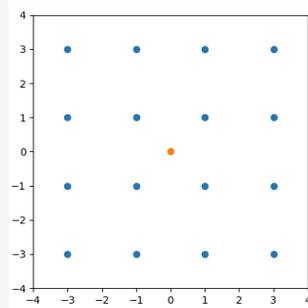


送信 (電気)

26.5625Gbaud
PAM4
x 8 レーン
(= 425Gbps)

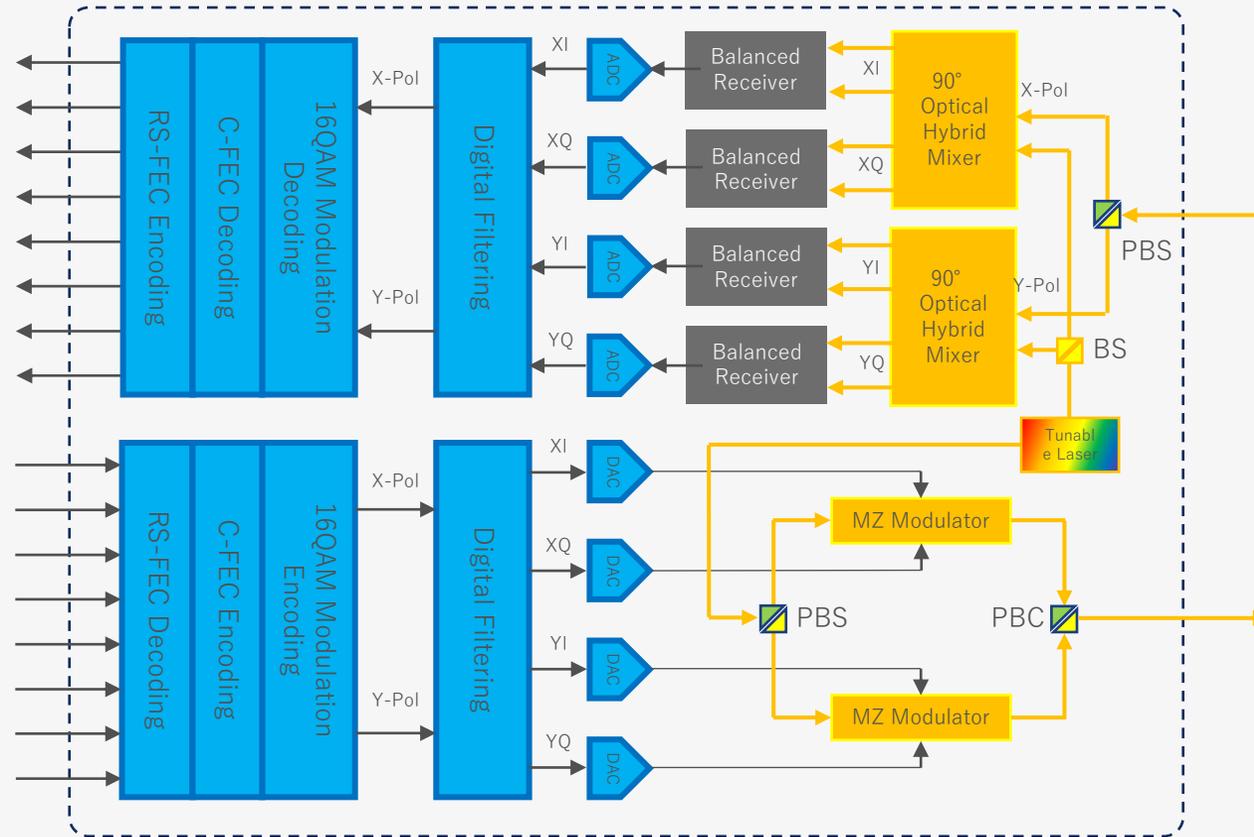
受信 (光)

59.84375Gbd
DP-16QAM
x 1 波長
(= 478.75Gbps)



送信 (光)

59.84375Gbd
DP-16QAM
x 1 波長
(= 478.75Gbps)



参考：400G FR4 光トランシーバ

電気側 (ホスト)

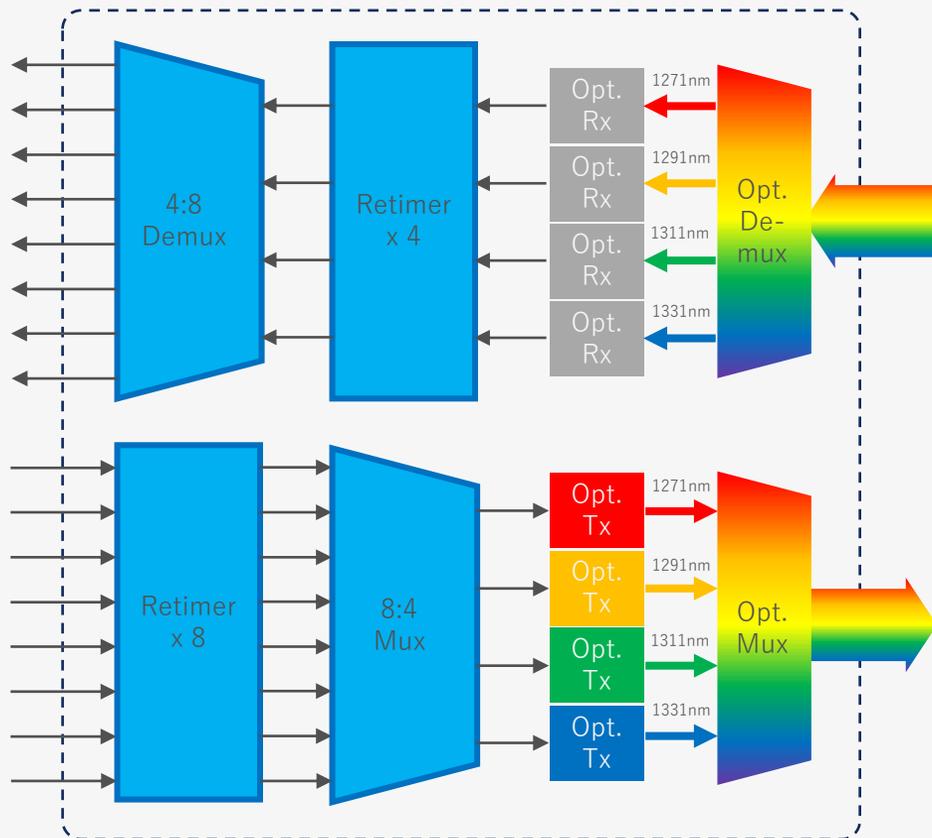
光側 (メディア)

受信 (電気)

26.5625Gbaud
PAM4
x 8 レーン
(= 425Gbps)

送信 (電気)

26.5625Gbaud
PAM4
x 8 レーン
(= 425Gbps)



受信 (光)

53.125Gbd
PAM4
x 4 波長
(= 425Gbps)

送信 (光)

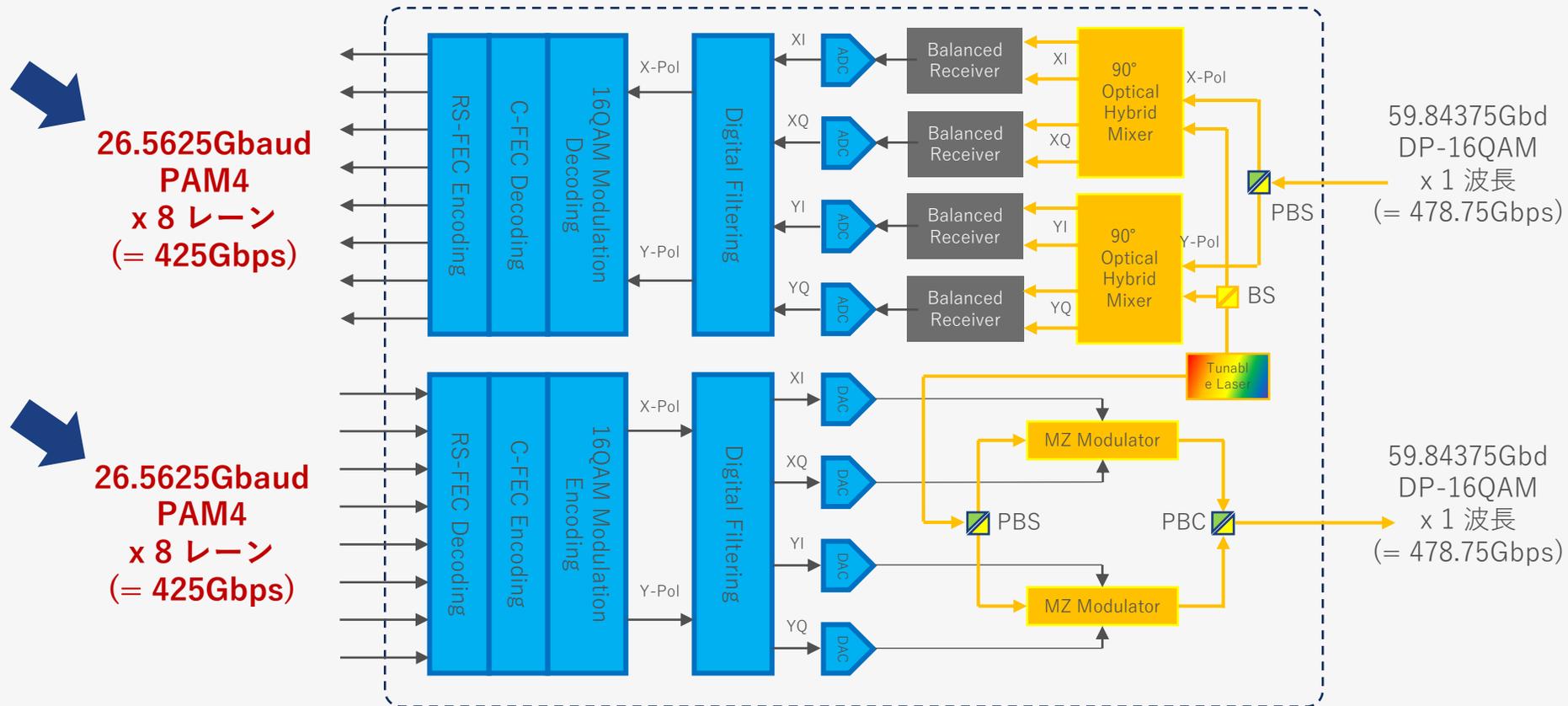
53.125Gbd
PAM4
x 4 波長
(= 425Gbps)

Agenda

1. JANOG 50での発表
2. 電気側（ホスト）と光側（メディア）のデータレート
3. 変調の方法（送信側）
4. 検出の方法（受信側）
5. FECはどこでかけるのか？
6. まとめ

7. 実機デモの構成
8. トランシーバからの各種レポート例

電気側（ホスト）のデータレート



電気側（ホスト）のデータレート

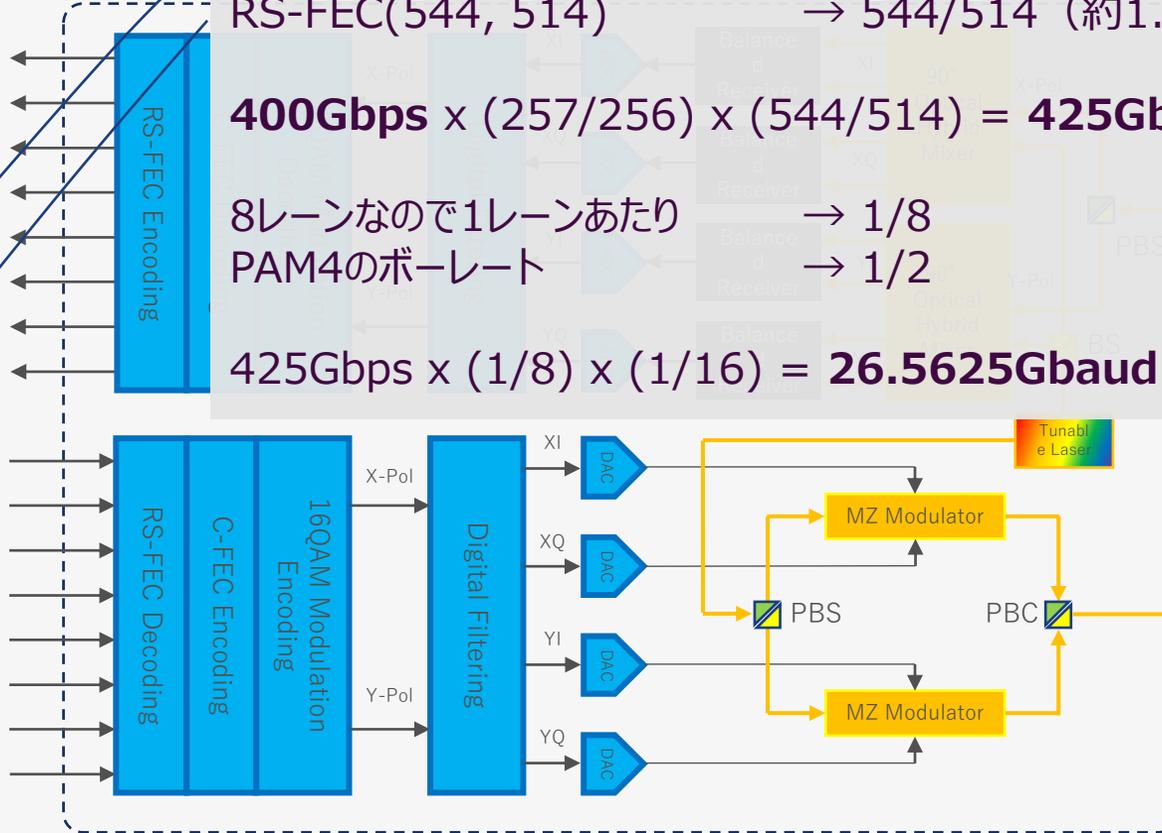
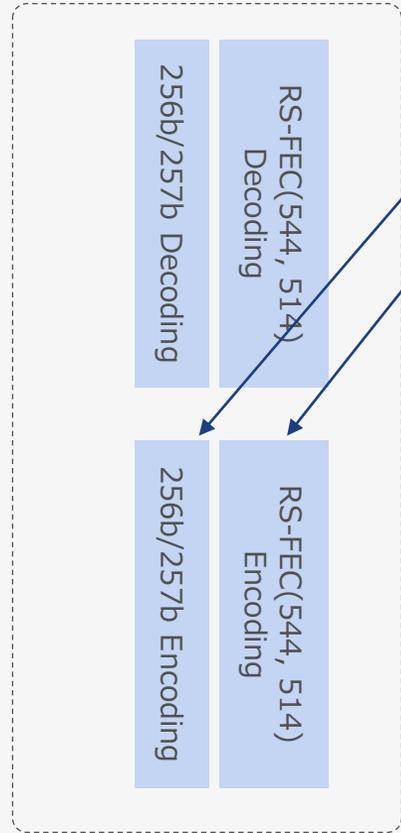
なぜ26.5625Gbdなのか？！

256b/257bエンコーディング → 257/256 (約1.004倍)
 RS-FEC(544, 514) → 544/514 (約1.058倍)

$$400\text{Gbps} \times (257/256) \times (544/514) = 425\text{Gbps}$$

8レーンなので1レーンあたり → 1/8
 PAM4のボーレート → 1/2

$$425\text{Gbps} \times (1/8) \times (1/2) = 26.5625\text{Gbaud}$$

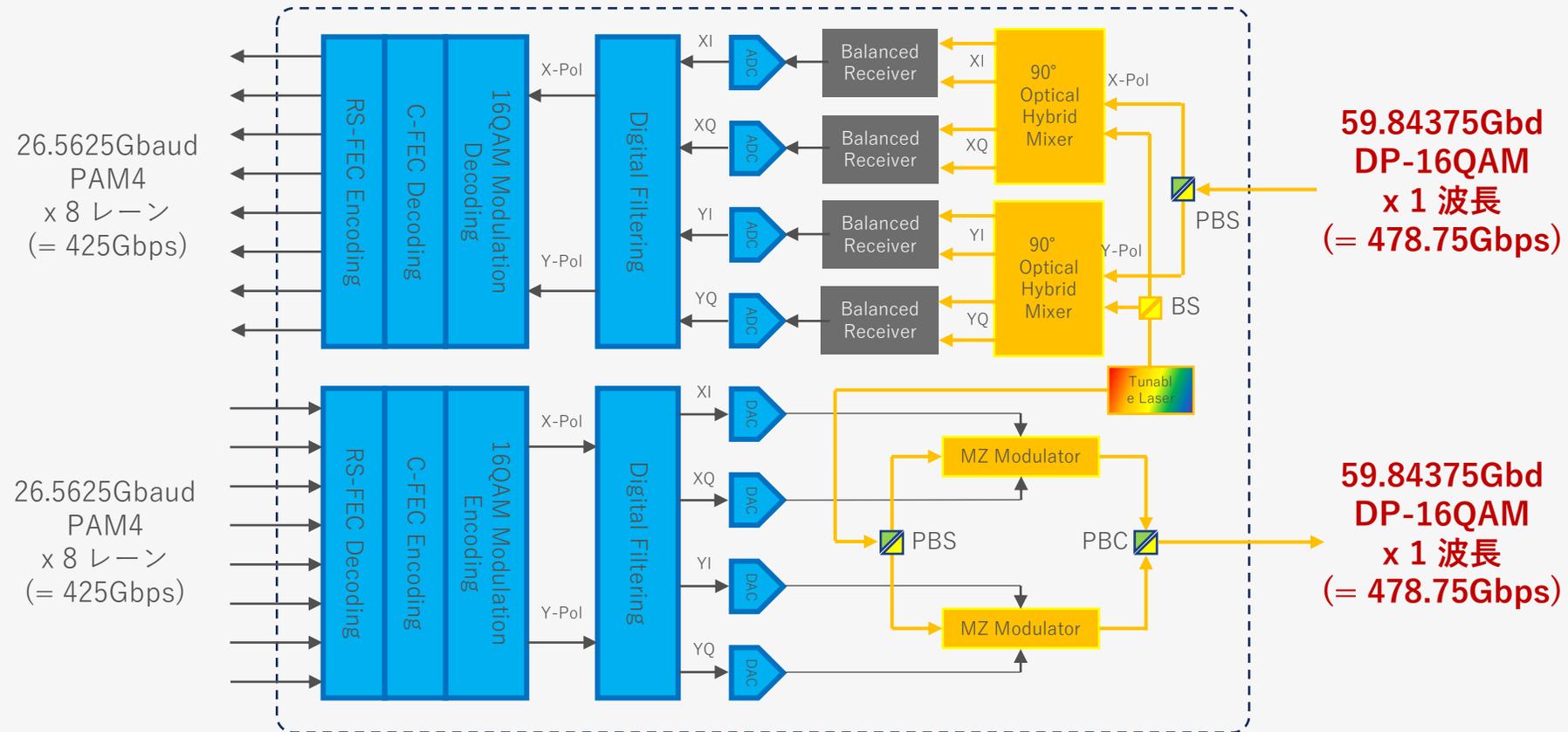


400Gbps

425Gbps

478.75Gbps

光側（メディア）のデータレート



光側（メディア）のデータレート

なぜ59.84375Gbdなのか？！

ホストインターフェースの425Gbps から RS-FEC(544, 514) をデコードさらにC-FECなどの処理を行い、結果的に 478.75Gbps[*] となります

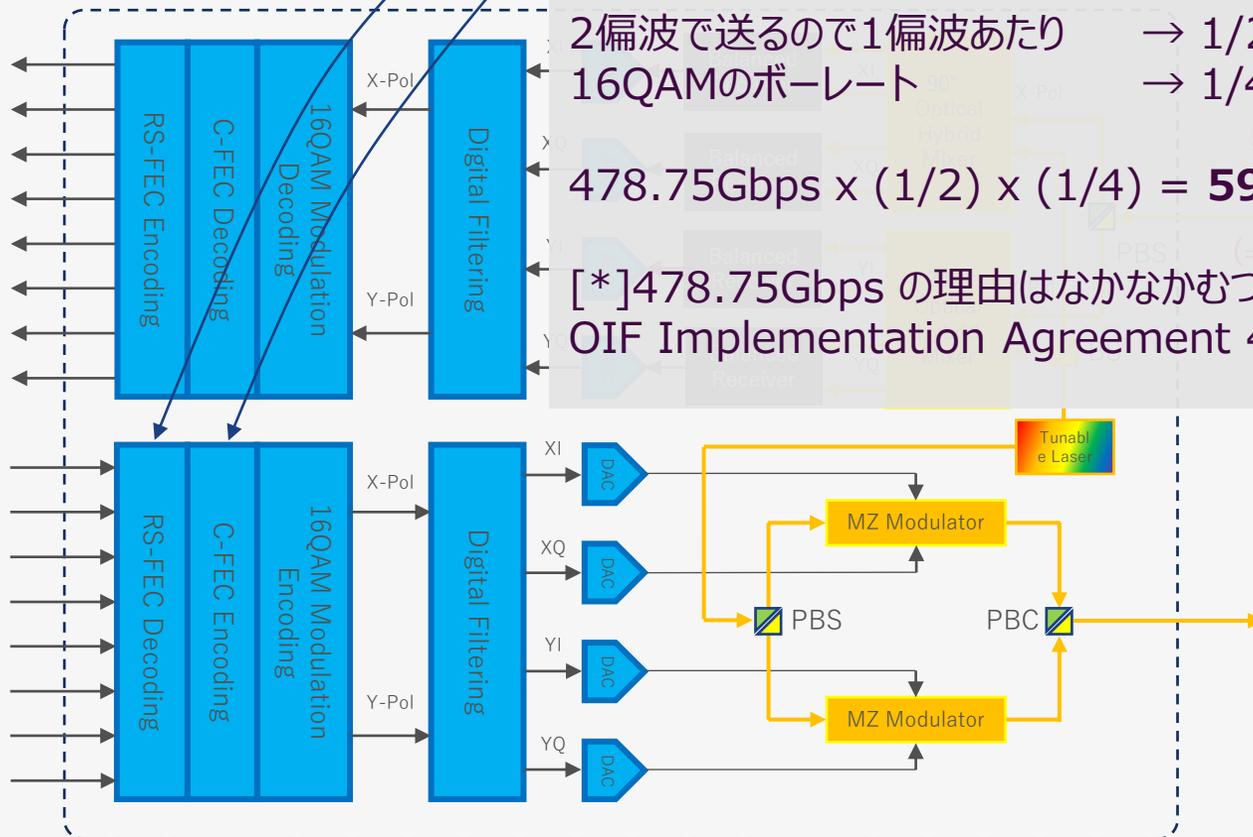
2偏波で送るので1偏波あたり → 1/2
16QAMのボーレート → 1/4

$478.75\text{Gbps} \times (1/2) \times (1/4) = 59.84375\text{Gbd}$

[*]478.75Gbps の理由はなかなかむづかしいです。
OIF Implementation Agreement 400ZRの、Figure 39をご参照ください。

26.5625Gbaud
PAM4
x 8 レーン
(= 425Gbps)

26.5625Gbaud
PAM4
x 8 レーン
(= 425Gbps)



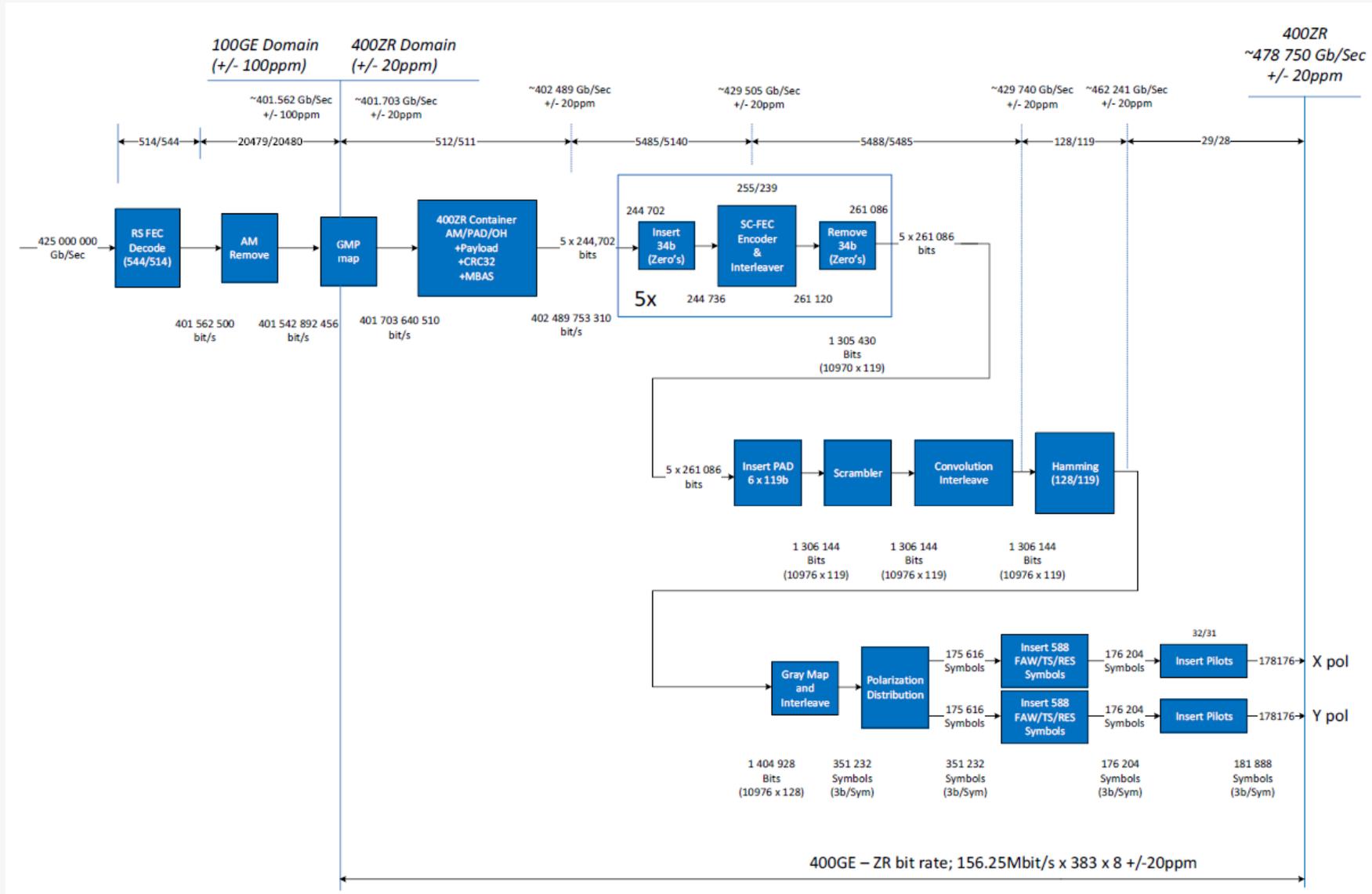
59.84375Gbd
DP-16QAM
x 1 波長
(= 478.75Gbps)

478.57Gbps

425Gbps

参考：<https://www.oiforum.com/wp-content/uploads/OIF-400ZR-02.0.pdf>

参考：400ZRのデータレート



参考：<https://www.oiforum.com/wp-content/uploads/OIF-400ZR-02.0.pdf>

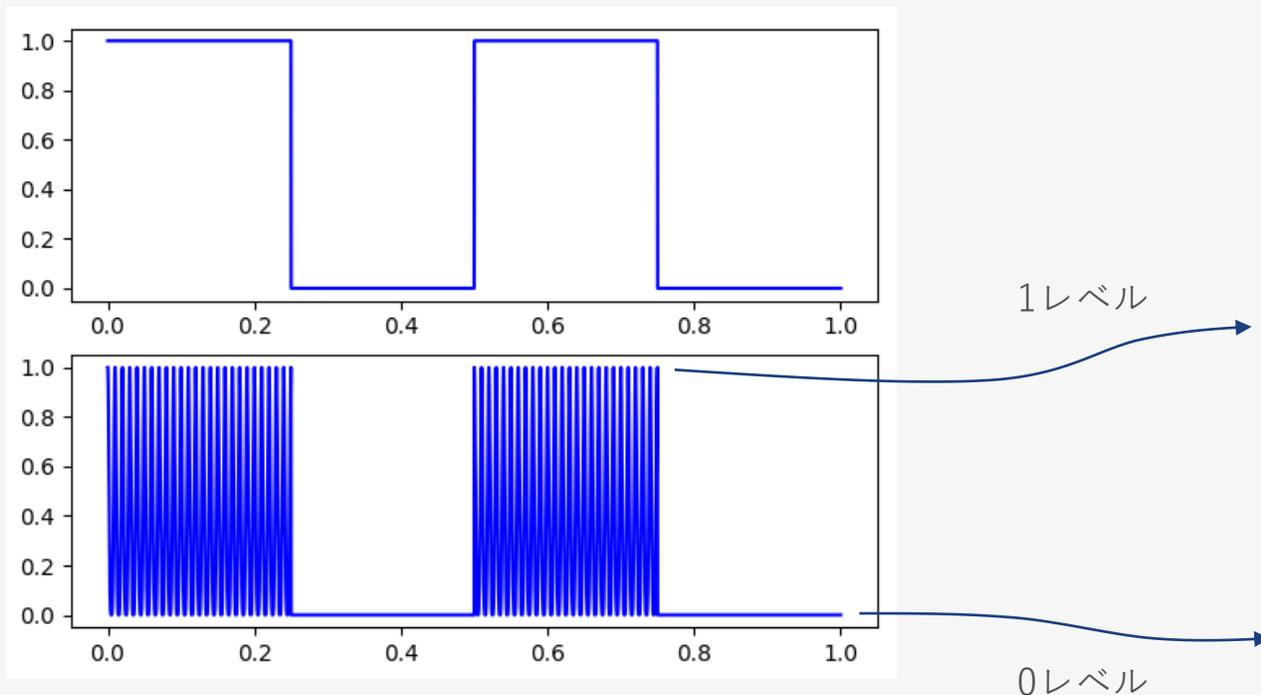
Agenda

1. JANOG 50での発表
2. 電気側（ホスト）と光側（メディア）のデータレート
3. 変調の方法（送信側）
4. 検出の方法（受信側）
5. FECはどこでかけるのか？
6. まとめ

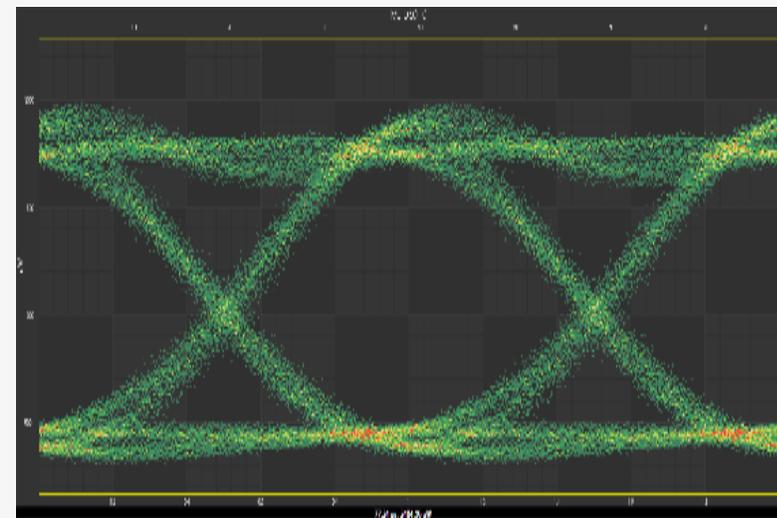
7. 実機デモの構成
8. トランシーバからの各種レポート例

参考：変調方式 ～ NRZ

- Non Return to Zero
- デジタル信号を光の**振幅**にのせる



波形のイメージ（縦軸：光の強さ、横軸：時間）
実際はフィルタにより波形がなまっています

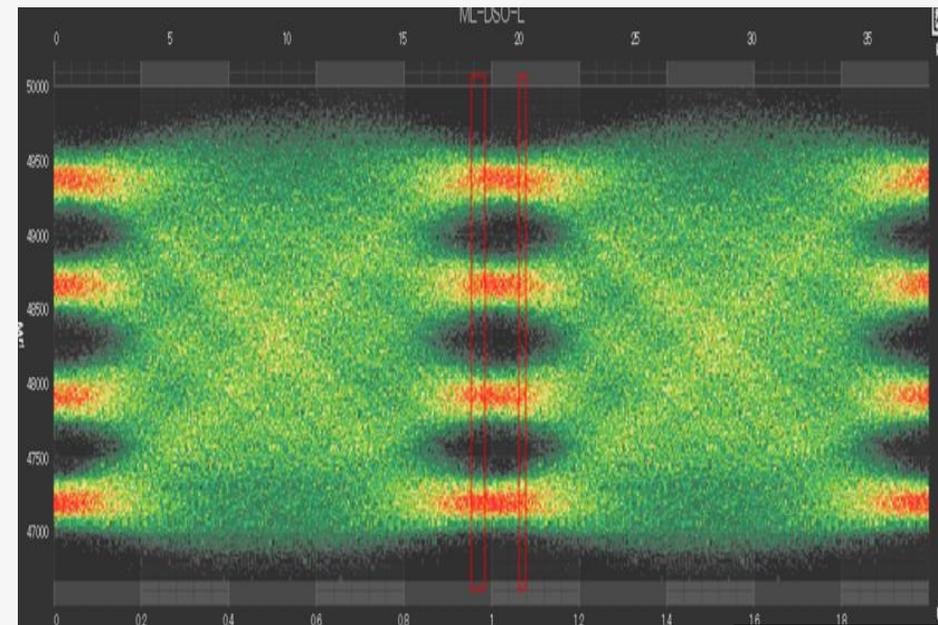
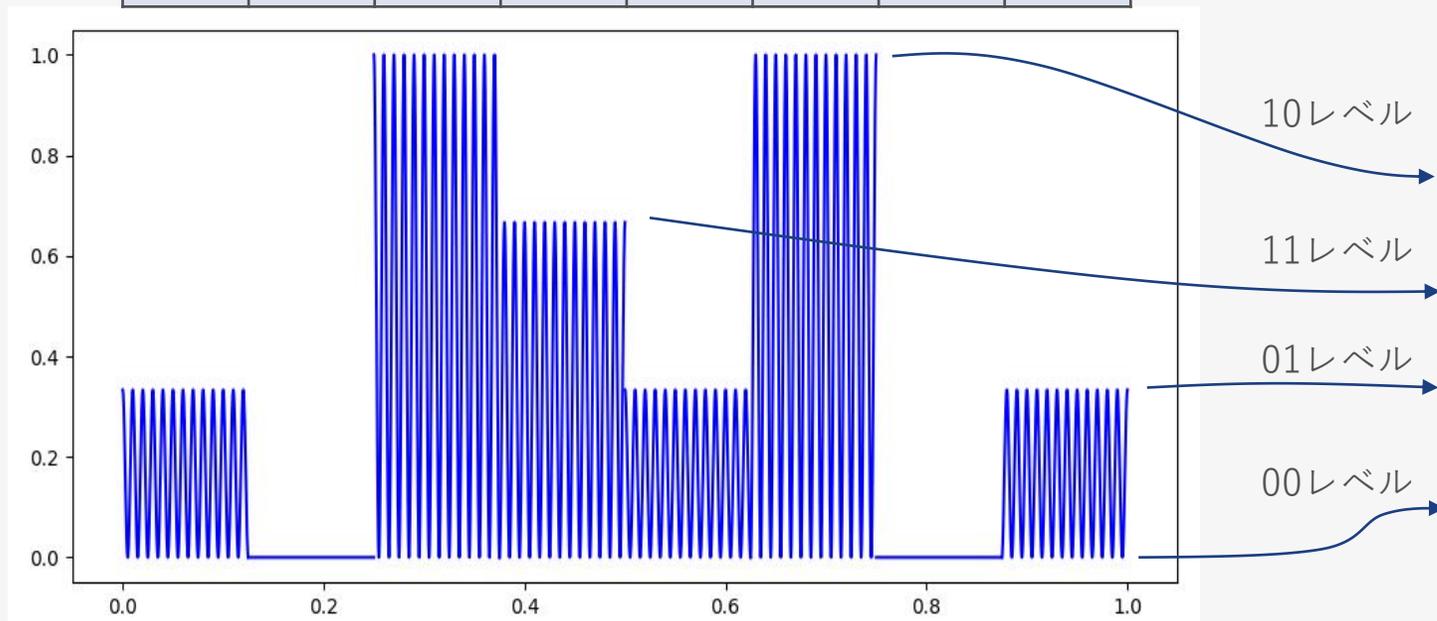


NRZアイパターンの例

参考：変調方式～PAM4

- デジタル信号を光の**振幅**にのせる
- Pulse Amplitude Modulation, 4-level

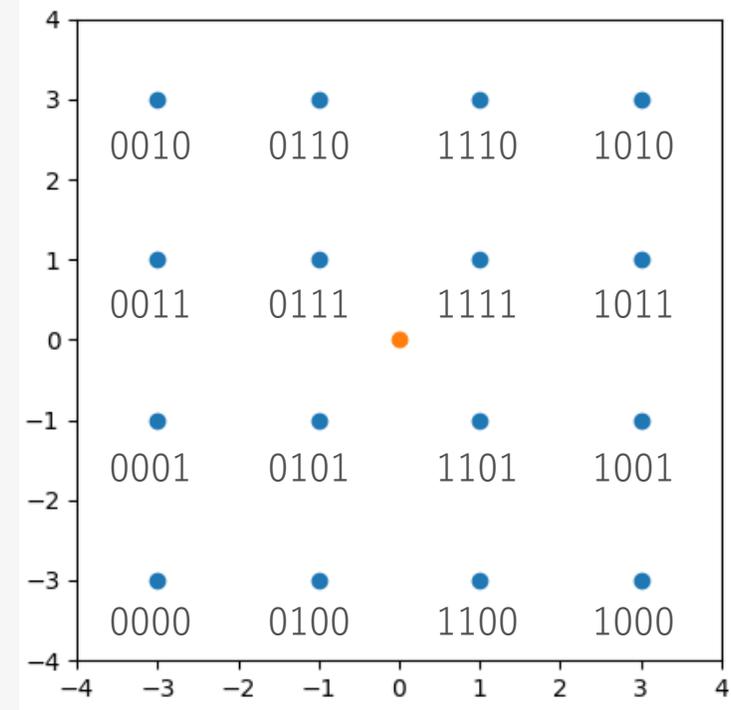
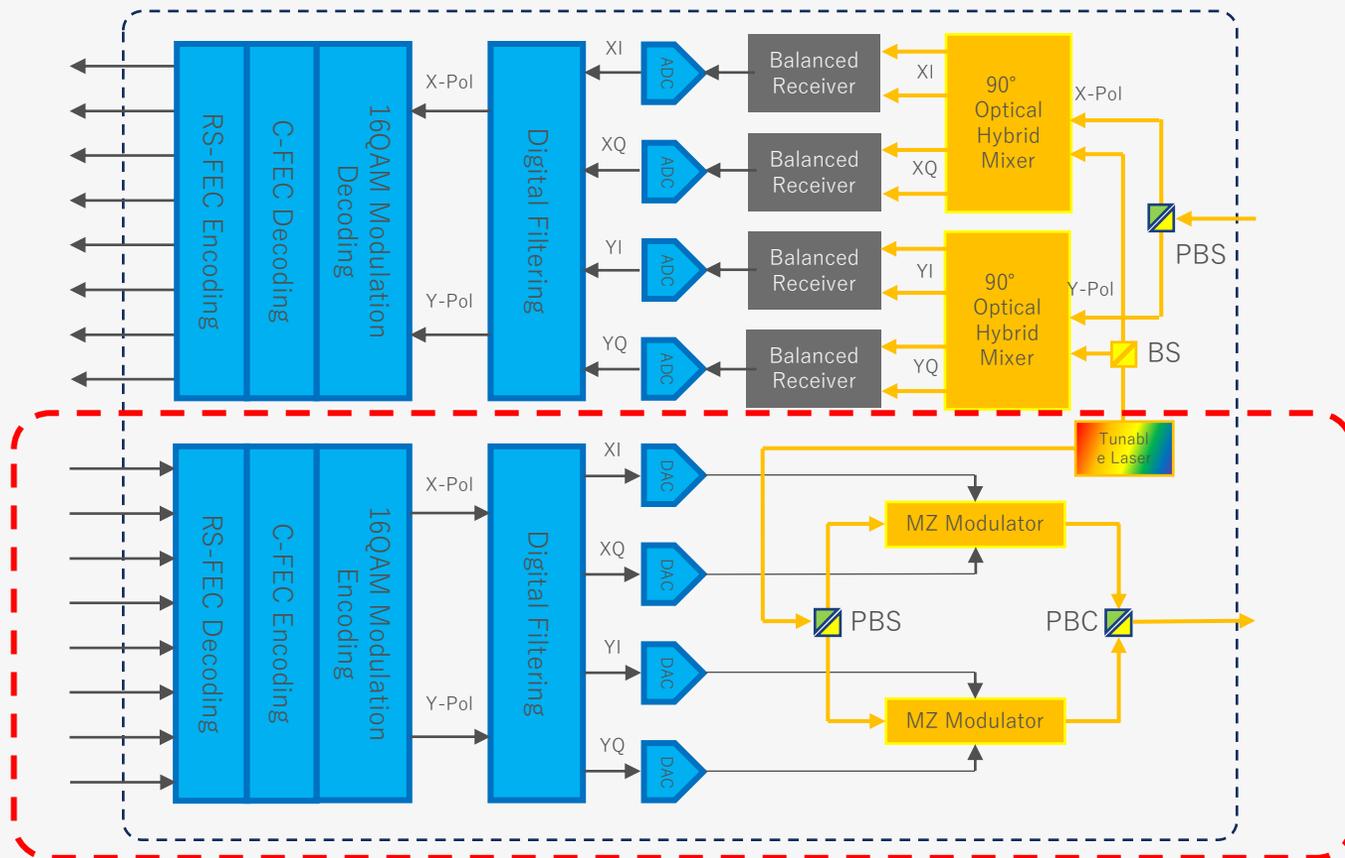
01	00	10	11	01	10	00	01
1/3	0/3	3/3	2/3	1/3	3/3	1/3	1/3



波形のイメージ（縦軸：光の強さ、横軸：時間）
実際はフィルタにより波形がなまっています

変調方式 ～ 16QAM

- デジタル信号を光の**振幅**と**位相**にのせる
- 16 Quadrature Amplitude Modulation



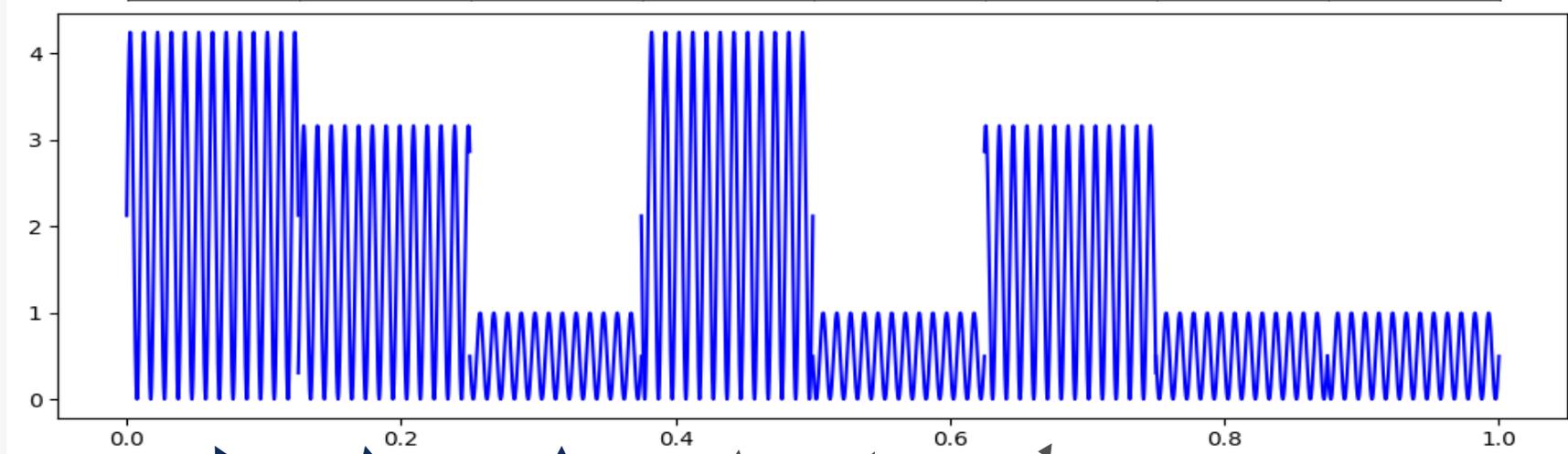
16 QAMのコンスタレーション
縦軸：Q、横軸：I

振幅だけでなく位相も使う

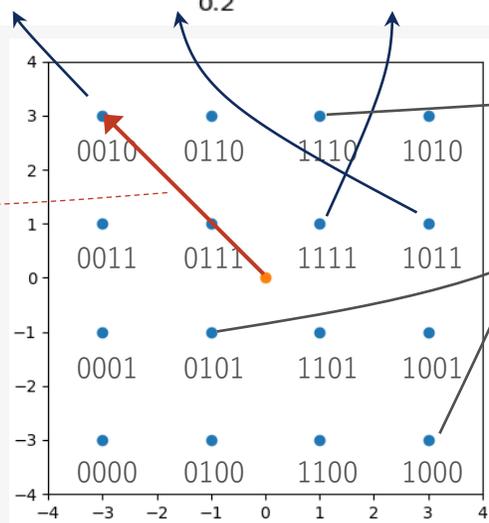
- ・一度にたくさんのデータを送ることができる（ボーレートを低く保ちつつ、ビットレートを速くできる）
- ・大容量通信に向いている

変調方式 ~ 16QAM (光波形)

0010	1011	1111	1000	0101	1110	0101	0111
$\sqrt{18}$ $3\pi/4$	$\sqrt{10}$ $\pi/10$	1 $\pi/4$	$\sqrt{18}$ $-\pi/4$	1 $-3\pi/4$	$\sqrt{10}$ $4\pi/10$	1 $-3\pi/4$	1 $3\pi/4$

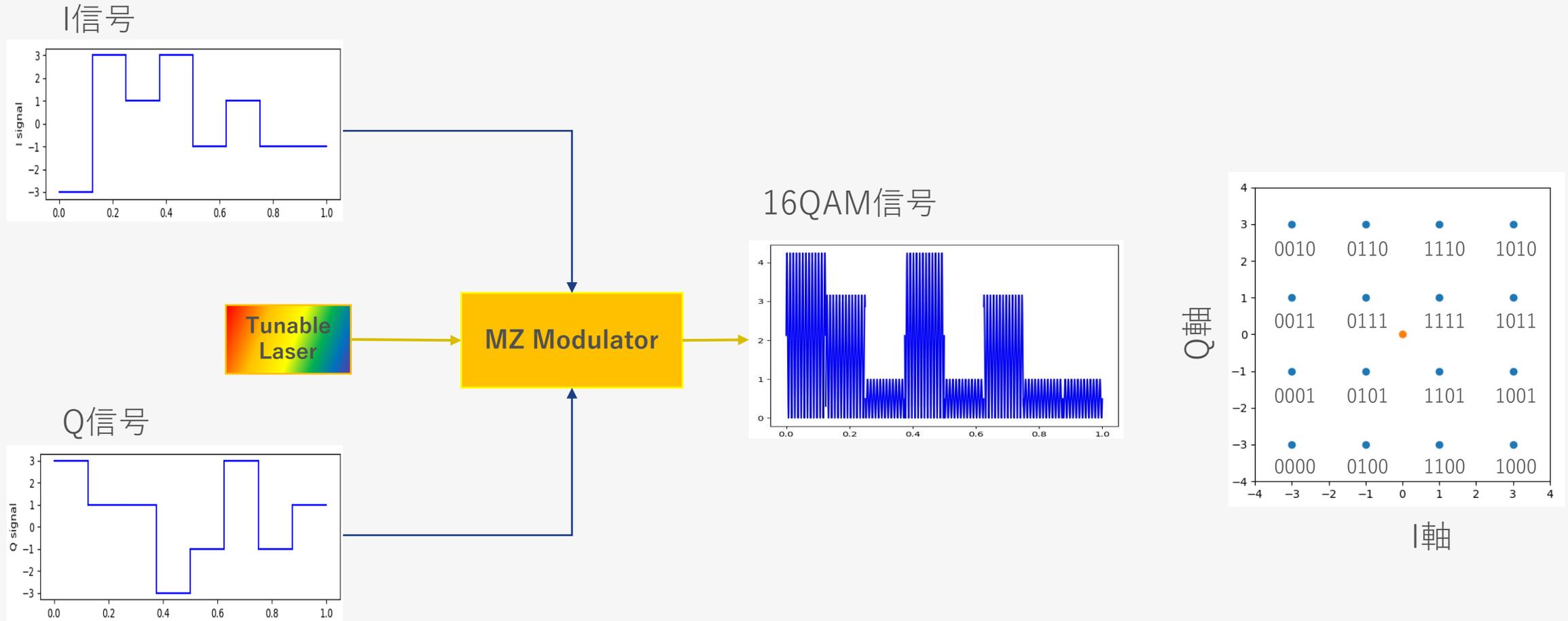


振幅= $\sqrt{18}$
位相= $3\pi/4$



波形のイメージ (縦軸: 光の強さ、横軸: 時間)
実際はフィルタにより波形がなまっています

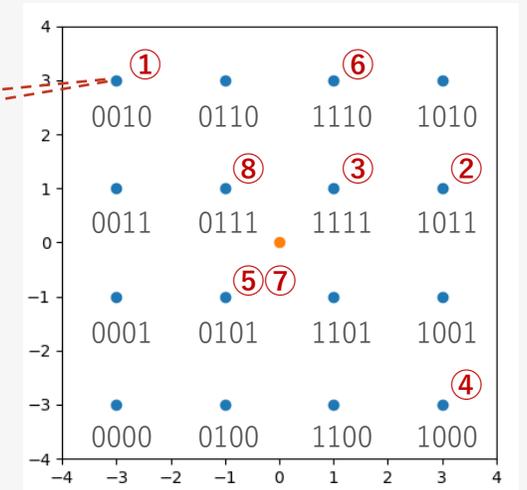
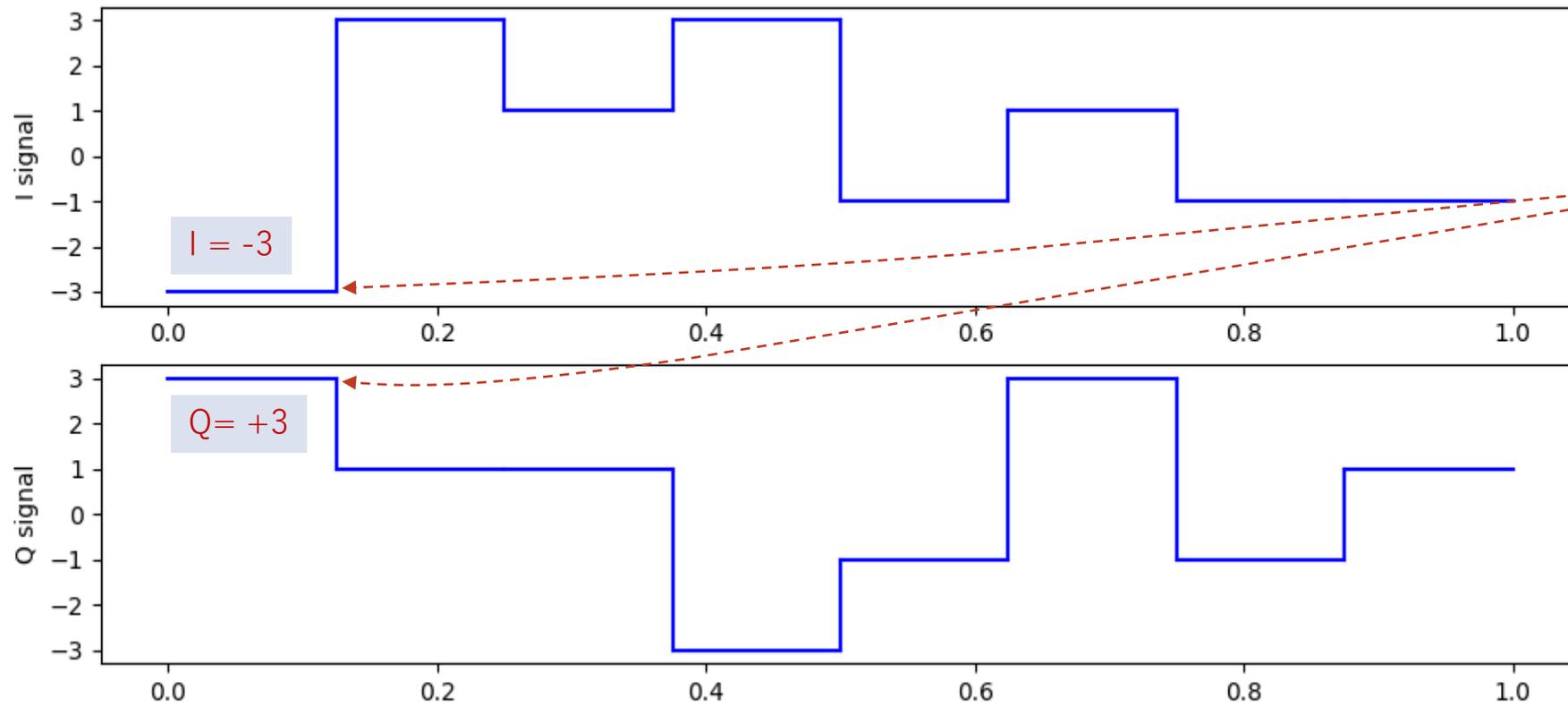
変調方式 ~ 16QAM (変調器)



波形のイメージ (縦軸：信号レベル、横軸：時間)
実際はフィルタにより波形がなまっています

変調方式 ~ 16QAM (IQ信号)

①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
0010	1011	1111	1000	0101	1110	0101	0111
$\sqrt{18}$ $3\pi/4$	$\sqrt{10}$ $\pi/10$	1 $\pi/4$	$\sqrt{18}$ $-\pi/4$	1 $-3\pi/4$	$\sqrt{10}$ $4\pi/10$	1 $-3\pi/4$	1 $3\pi/4$



横軸：I
縦軸：Q

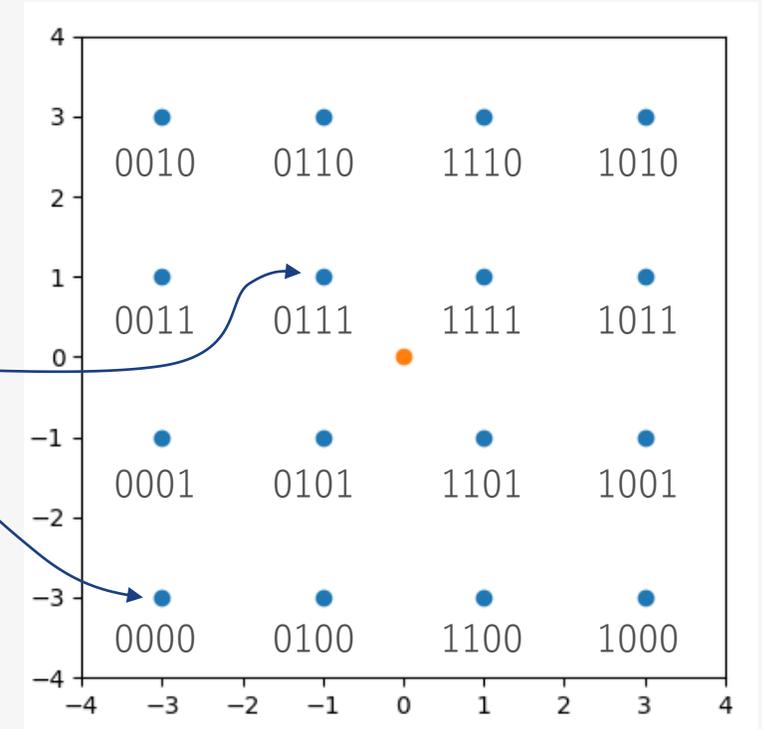
波形のイメージ（縦軸：信号レベル、横軸：時間）
実際はフィルタにより波形がなまっています

変調方式 ~ 16QAM (マッピング)

- OIF Implementation Agreement 400ZRのTable 10参照

$(c_{8i}, c_{8i+1}, c_{8i+2}, c_{8i+3})$ or $(c_{8i+4}, c_{8i+5}, c_{8i+6}, c_{8i+7})$	I	Q
(0,0,0,0)	-3	-3
(0,0,0,1)	-3	-1
(0,0,1,0)	-3	3
(0,0,1,1)	-3	1
(0,1,0,0)	-1	-3
(0,1,0,1)	-1	-1
(0,1,1,0)	-1	3
(0,1,1,1)	-1	1
(1,0,0,0)	3	-3
(1,0,0,1)	3	-1
(1,0,1,0)	3	3
(1,0,1,1)	3	1
(1,1,0,0)	1	-3
(1,1,0,1)	1	-1
(1,1,1,0)	1	3
(1,1,1,1)	1	1

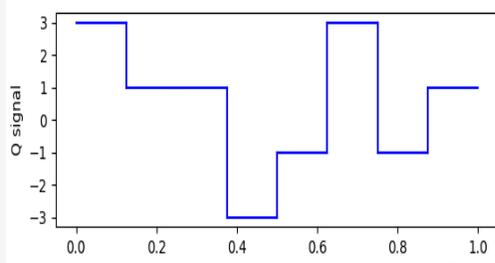
Table 10: In-phase (I) and quadrature phase (Q) symbol amplitude



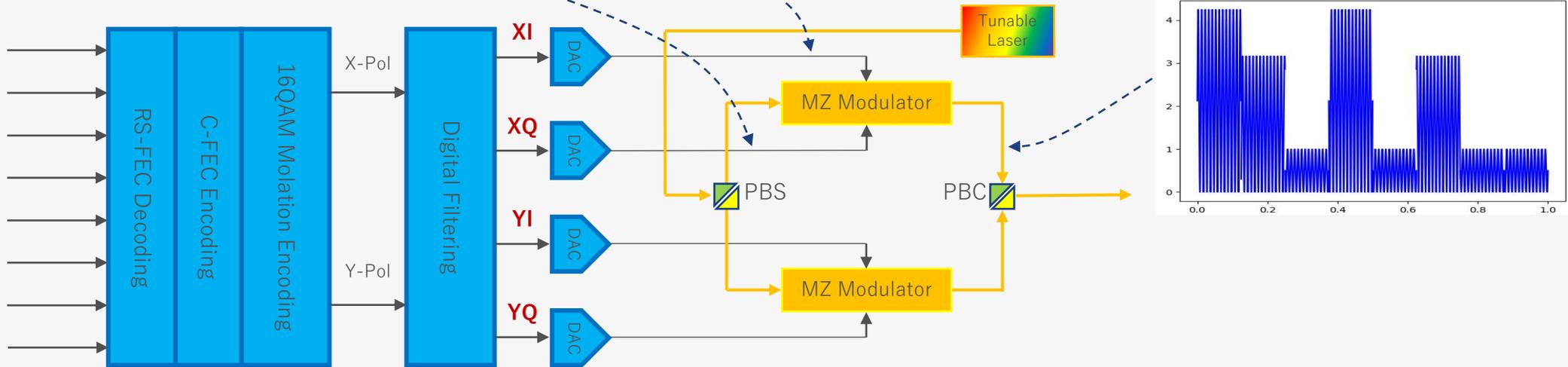
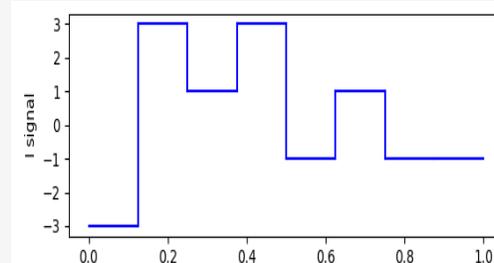
16QAMのマッピング例
横軸：I、縦軸：Q

変調方式 ~ 16QAM (XI, XQ, YI, YQ)

XQ信号



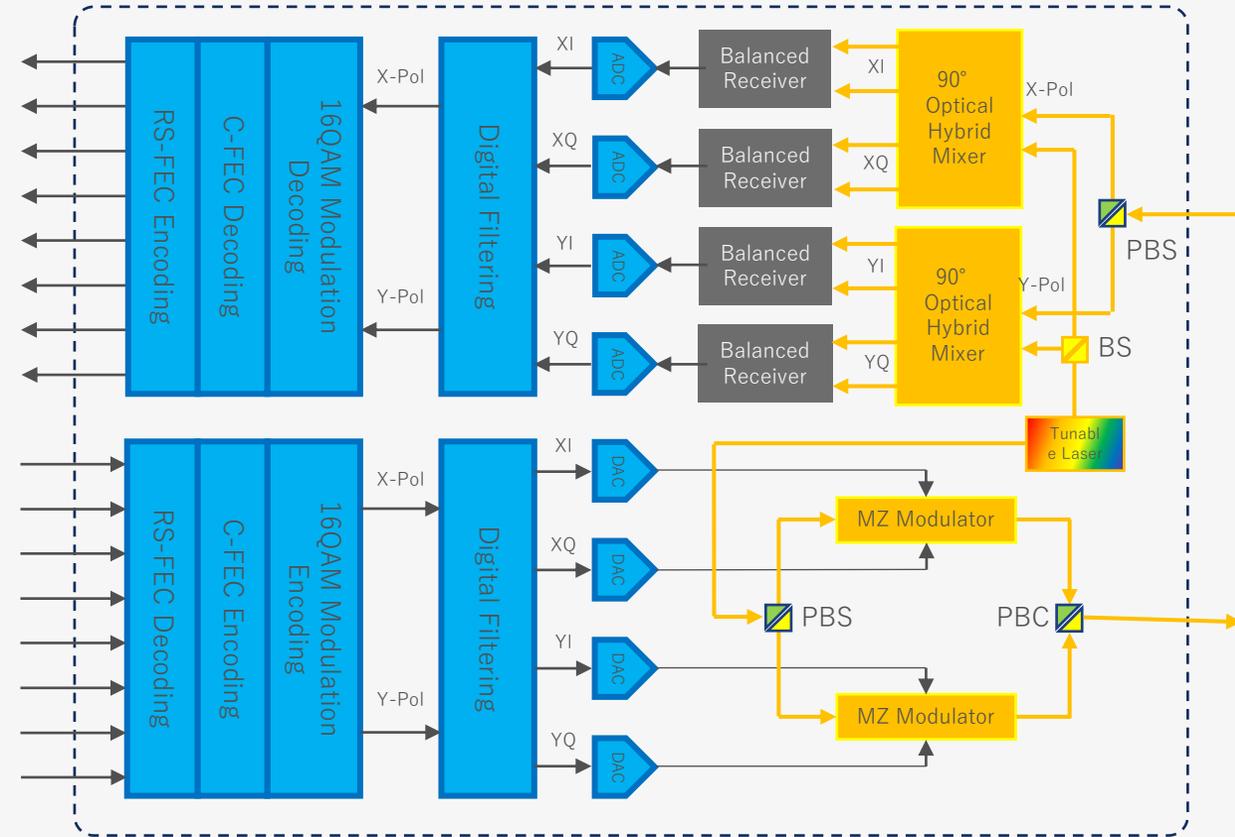
XI信号



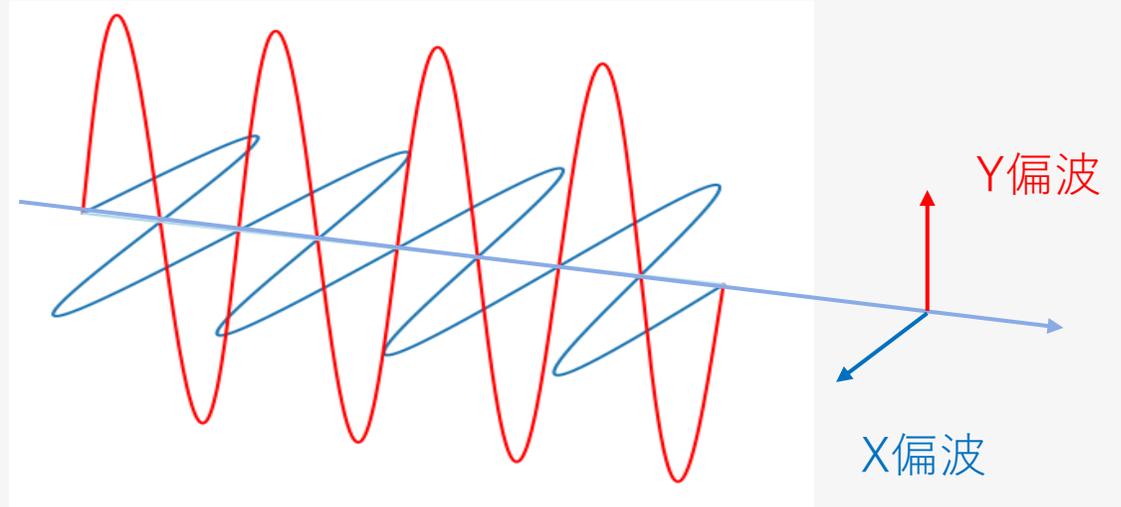
波形のイメージ (縦軸：信号レベル、横軸：時間)
 実際はフィルタにより波形がなまっています

PBC: Polarization Beam Combiner
 PBS: Polarization Beam Splitter

偏波多重



PBC: Polarization Beam Combiner
 PBS: Polarization Beam Splitter

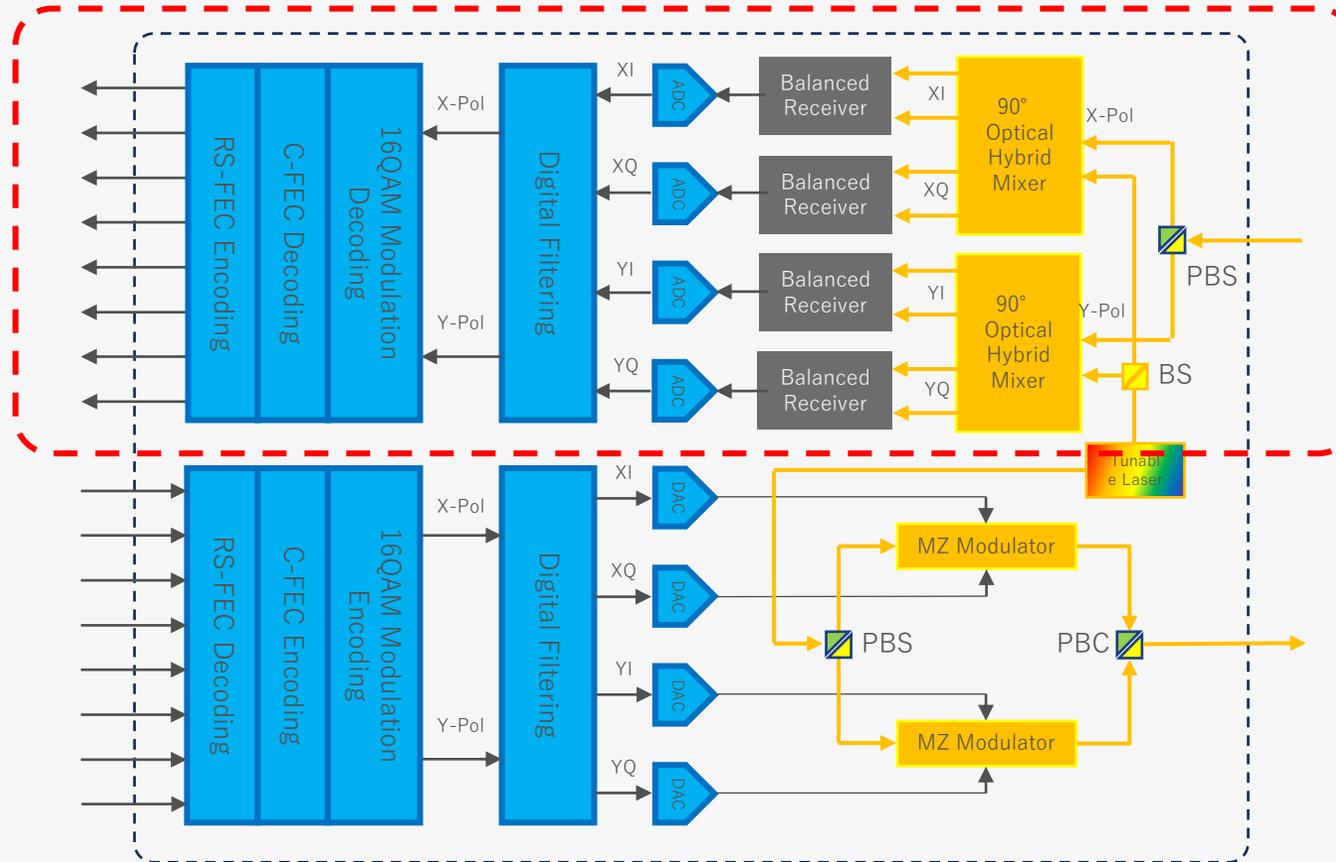


Agenda

1. JANOG 50での発表
2. 電気側（ホスト）と光側（メディア）のデータレート
3. 変調の方法（送信側）
4. 検出の方法（受信側）
5. FECはどこでかけるのか？
6. まとめ

7. 実機デモの構成
8. トランシーバからの各種レポート例

受信側

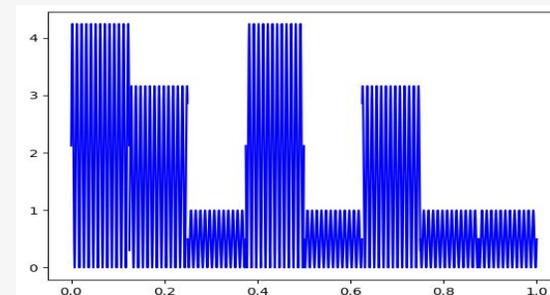


コヒーレント検出

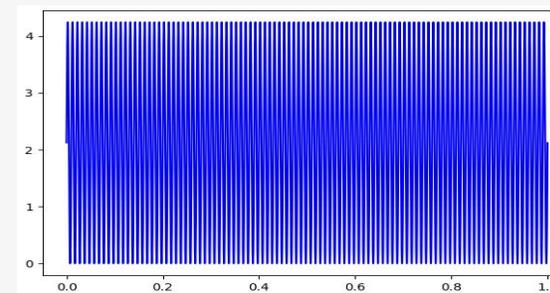
PBSで偏波を分離する



16QAM変調光



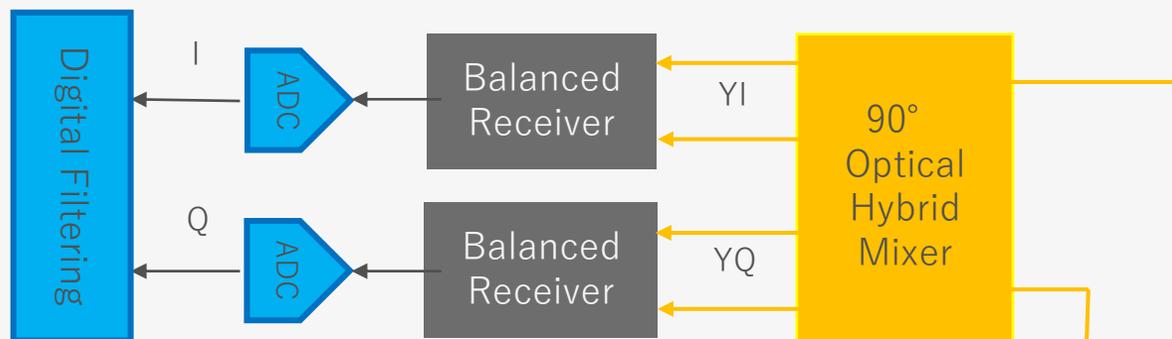
ローカル光



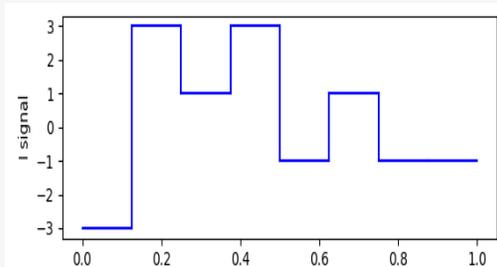
変調光とローカル光を干渉させる

IQ成分を取り出す

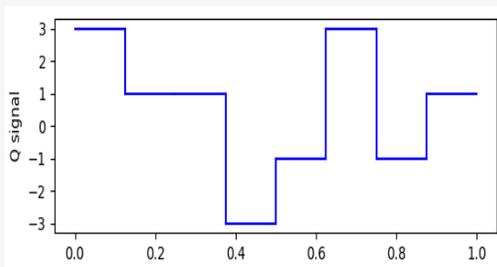
高速AD変換で取り込む



I信号



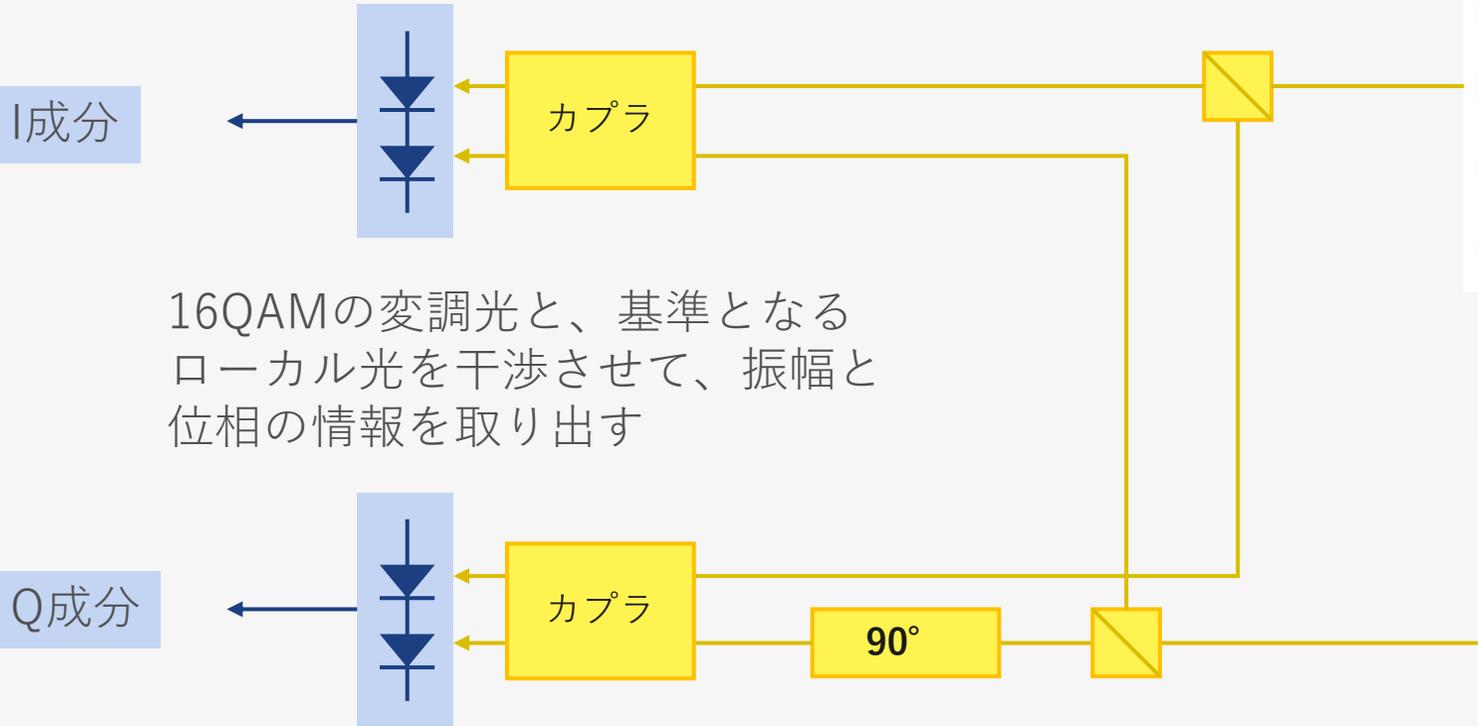
DSPのパワーで各種の補正をかける



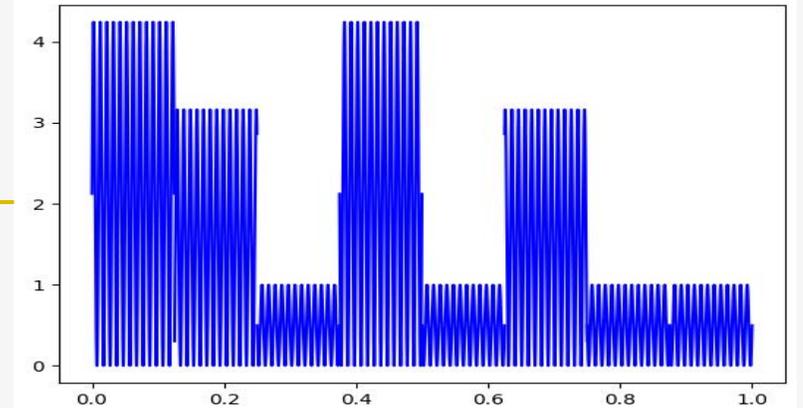
Q信号

波形のイメージ（縦軸：信号レベル、横軸：時間）
実際はフィルタにより波形がなまっています

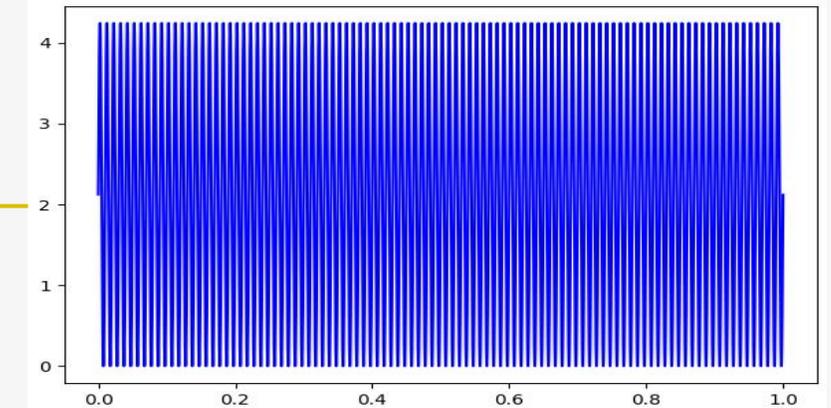
コヒーレント検出 (干渉させる)



16QAM変調光



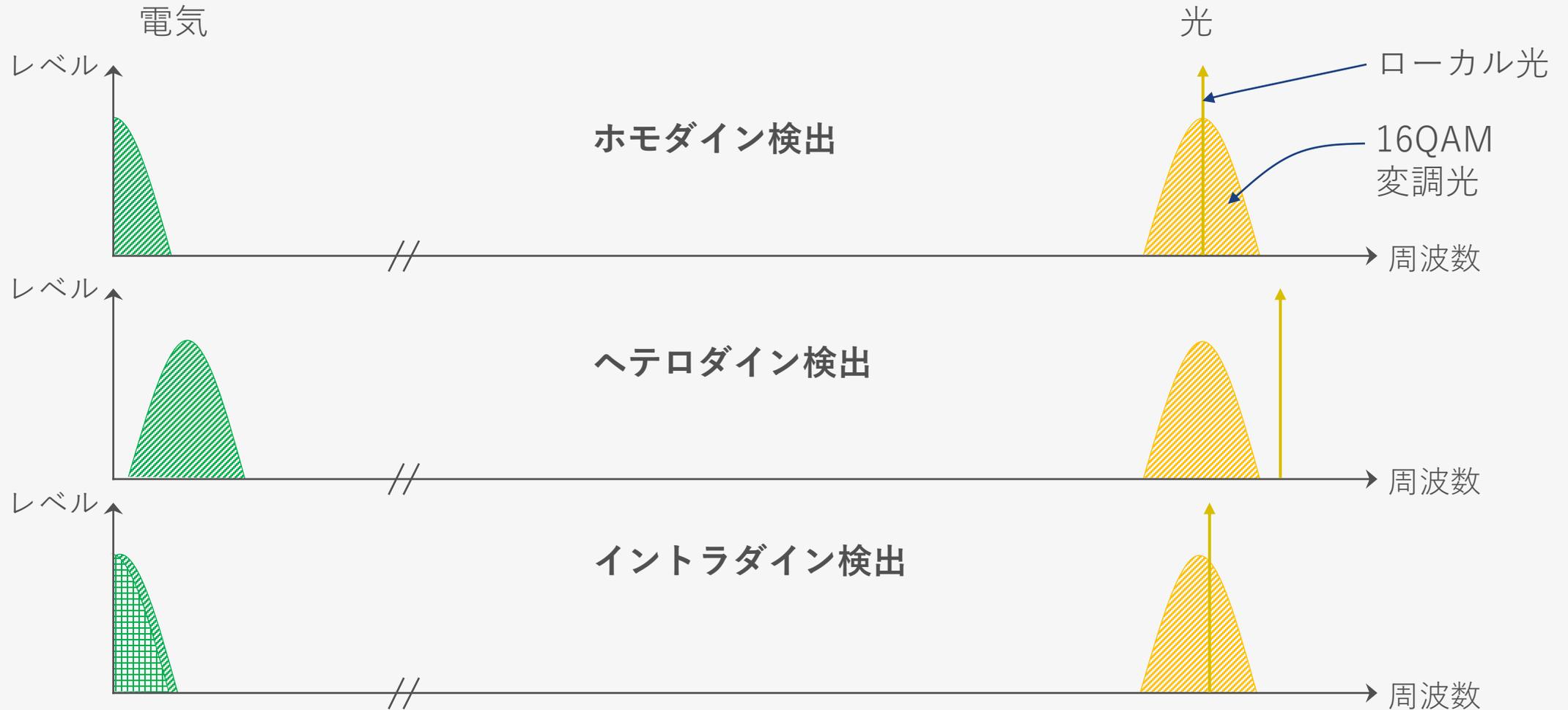
ローカル光



大きなレベルのローカル光を使う
→ 変調光のレベルが小さくても大きなレベルのI/Q成分が得られる
→ 受信感度が良くなる

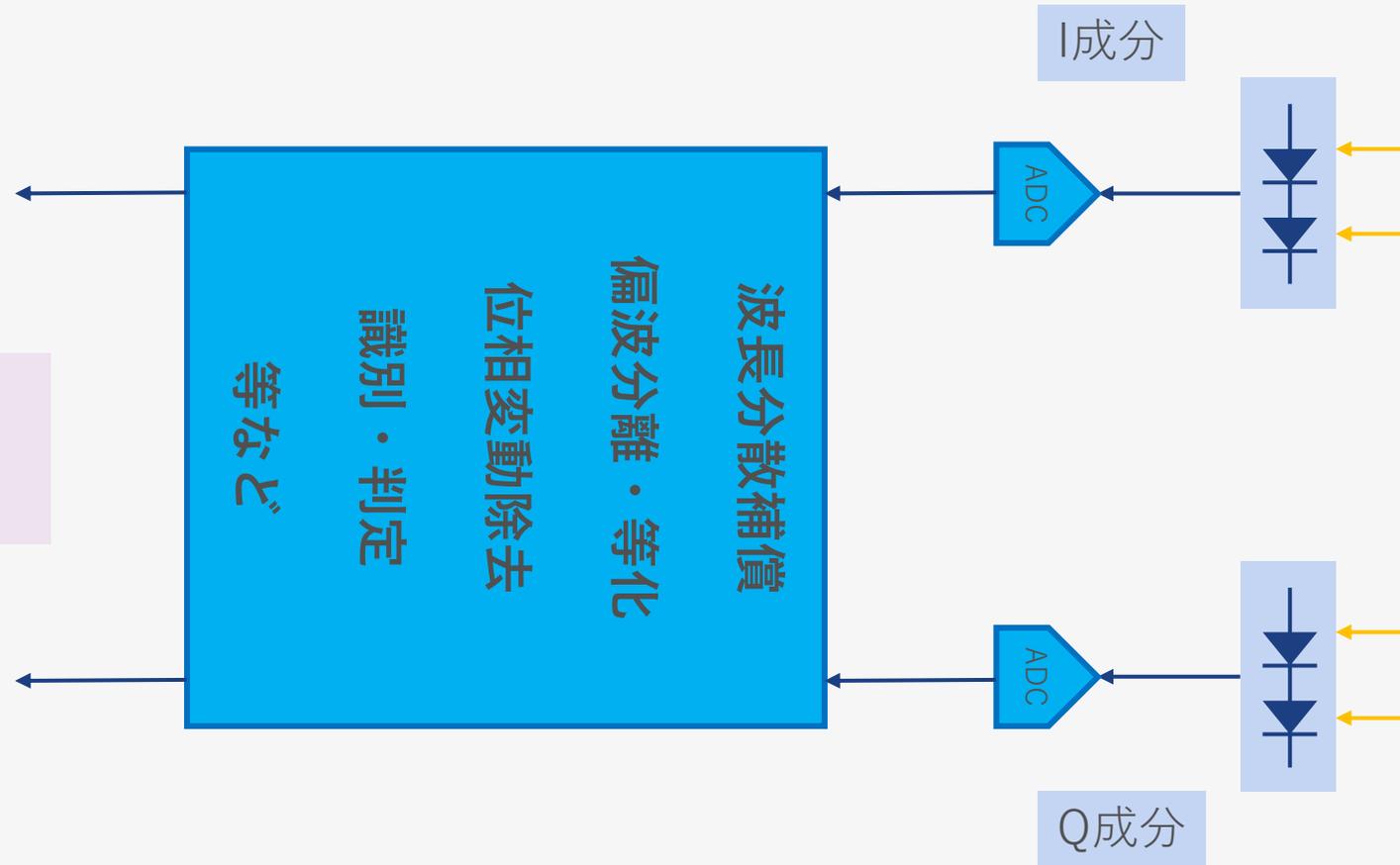
波形のイメージ (縦軸: 信号レベル、横軸: 時間)
実際はフィルタにより波形がなまっています

コヒーレント検出 (変調光とローカル光の位置関係)



受信した変調光と同じスペクトルの電気信号をDSPに渡す (振幅と位相情報の両方を渡す)
→ DSPにて各種の補正をかけることができる

コヒーレント検出 (DSPによる補正)



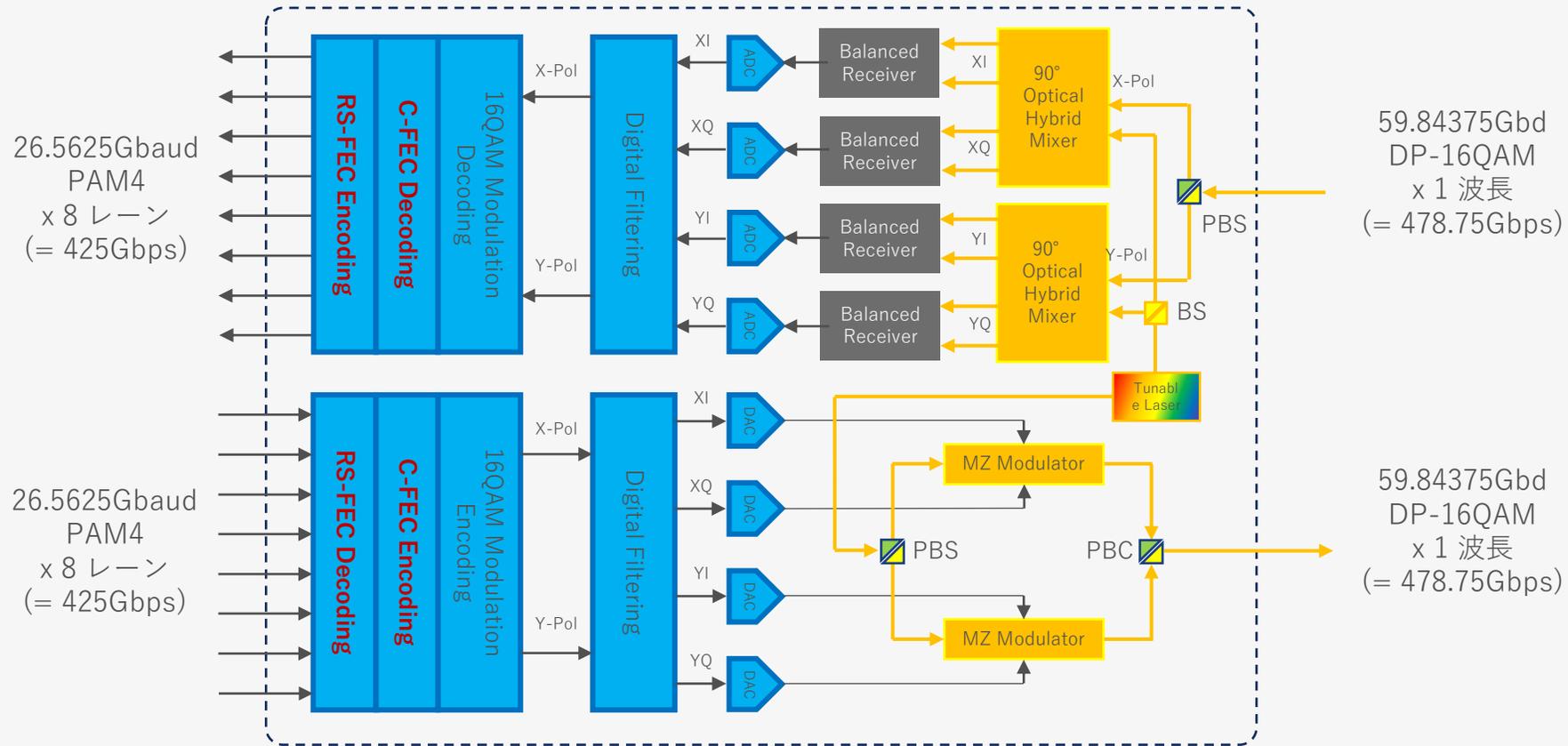
デジタル信号技術
→光領域のひずみを電気領
域で補正する

Agenda

1. JANOG 50での発表
2. 電気側（ホスト）と光側（メディア）のデータレート
3. 変調の方法（送信側）
4. 検出の方法（受信側）
5. FECはどこでかけるのか？
6. まとめ

7. 実機デモの構成
8. トランシーバからの各種レポート例

FECについて



Host interface側はRS-FEC

Media interface側はC-FEC

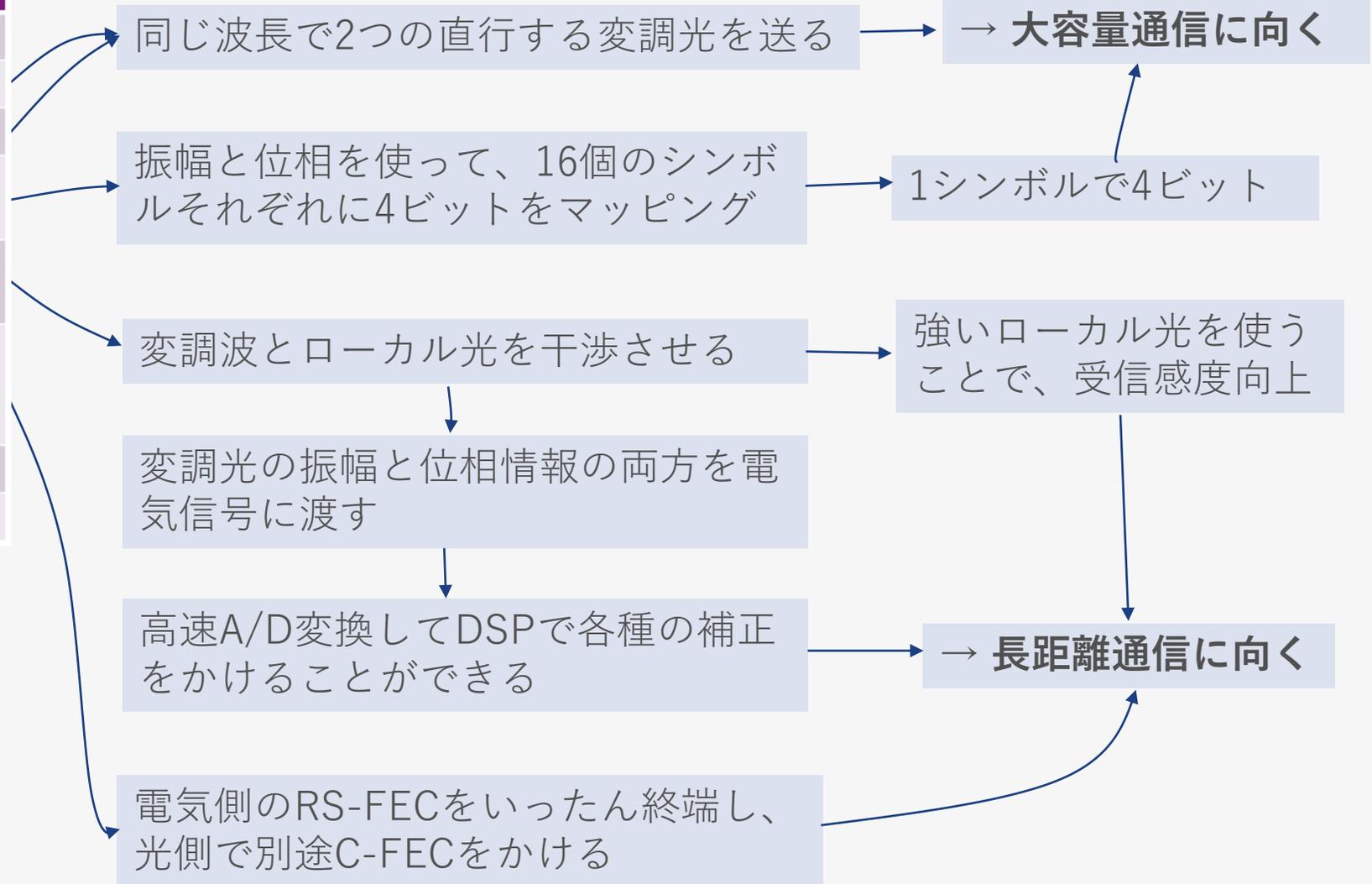
Agenda

1. JANOG 50での発表
2. 電気側（ホスト）と光側（メディア）のデータレート
3. 変調の方法（送信側）
4. 検出の方法（受信側）
5. FECはどこでかけるのか？
6. まとめ

7. 実機デモの構成
8. トランシーバからの各種レポート例

まとめ (ちょっと強引ですが)

400G-ZR	
伝送距離	120km
波長数	1波長
偏波多重	あり
変調方式	16QAM (4-bit/symbol)
受信方式	コヒーレント検出 (CD)
FECをかける場所	スイッチと トランシーバー 内部の両方
QSFP-DD	Type 2A
消費電力	15W+



参考文献

OIF、「Implementation Agreement 400ZR」

<https://www.oiforum.com/wp-content/uploads/OIF-400ZR-02.0.pdf>

岩下 克、「コヒーレント光通信技術の進展」

<https://annex.jsap.or.jp/photonics/kogaku/public/38-05-sougouhoukoku2.pdf>

菊池和朗、「無線技術の光伝送への応用」 （電子情報通信学会 知識ベース 知識の森）

https://www.ieice-hbkb.org/files/ad_base/view_pdf.html?p=/files/05/05gun_03hen_07.pdf

菊池信彦、「光変復調方式」 （電子情報通信学会 知識ベース 知識の森）

https://www.ieice-hbkb.org/files/ad_base/view_pdf.html?p=/files/05/05gun_03hen_03.pdf

機械システム振興協会、「コヒーレント光通信システム に関する調査研究報告書」

<https://hojo.keirin-autorace.or.jp/seikabutu/seika/21nx /bhu /zp /21-10koho-07.pdf>

五百藏 雅幸、「コヒーレント光OFDMA における許容符号間時間差」

https://kutarr.kochi-tech.ac.jp/record/1724/files/m_1215039.pdf

岡本 聖司、「デジタルコヒーレント光伝送における超多値信号の高精度歪補償に関する研究」

<https://tohoku.repo.nii.ac.jp/record/127800/files/180327-OKAMOTO-5467-1.pdf>

磯野 健二、「400G-ZR/ZR+の技術解説」

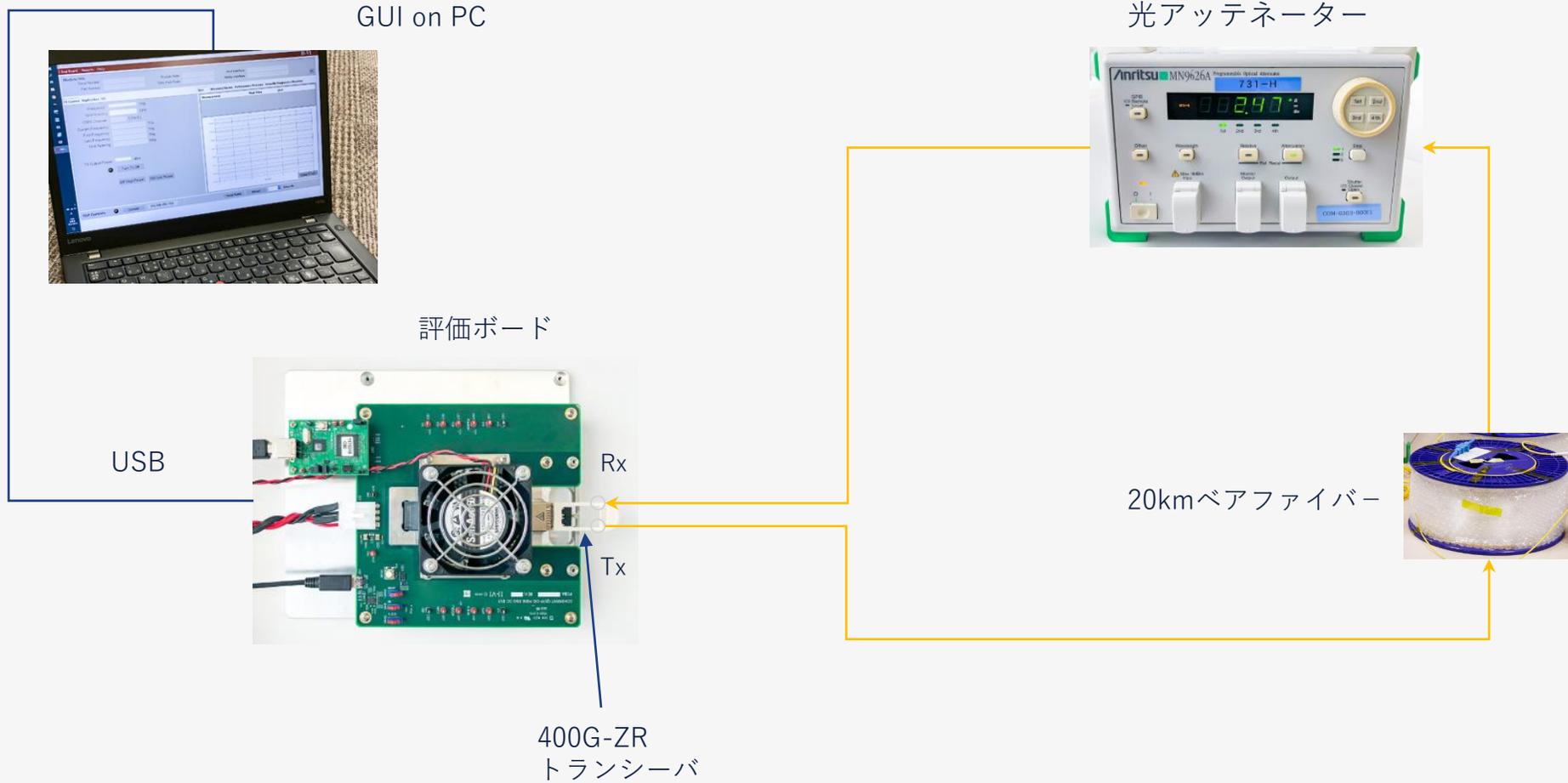
<https://www.janog.gr.jp/meeting/janog50/wp-content/uploads/2022/06/JANOG50-400G-Isono.pdf>

Agenda

1. JANOG 50での発表
2. 電気側（ホスト）と光側（メディア）のデータレート
3. 変調の方法（送信側）
4. 検出の方法（受信側）
5. FECはどこでかけるのか？
6. まとめ

7. 実機デモの構成
8. トランシーバからの各種レポート例

実機デモ



MACNICA

「本資料に記載された会社名、商品名、システム等は、各社または団体の商標または登録商標です」