

Internet Week 2024

400G-ZRでつなぐDCIネットワーク

デジタルコヒーレント方式が長距離・大容量通信に向いているのはなぜ？！

株式会社マクニカ クラビス カンパニー

阿部野 一郎
三田村 友也

自己紹介



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



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

略歴：

2023年よりマクニカにて光通信に関する製品のFAEとして活動

Agenda

400G-ZRでつなぐDCIネットワーク

- 400G-ZR/ZR+の全体像

400G-ZR/ZR+は、FR4などと比べて何が違う？

400G-ZR/ZR+、400G-FR4の主要諸元

| | 400G-ZR | 400G-ZR+ | 400G-FR4 |
|----------|----------|----------|------------|
| 伝送距離 | 120km | 600km | 2km |
| 変調方式 | 16QAM | 16QAM | PAM4 |
| 受信方式 | コヒーレント検出 | コヒーレント検出 | 直接検出 |
| ホスト側FEC | RS FEC | RS FEC | RS FEC |
| メディア側FEC | C-FEC | O-FEC | なし |
| 波長数 | 1波長 | 1波長 | 4波長多重 CWDM |
| 偏波多重 | あり | あり | なし |
| 消費電力 | < 20W | > 20W | ~ 10W |

400G-ZR/ZR+、デジタルコヒーレント

400G-FR4、PAM4

400G-ZR 光トランシーバーのブロック図

電気側 (ホスト)

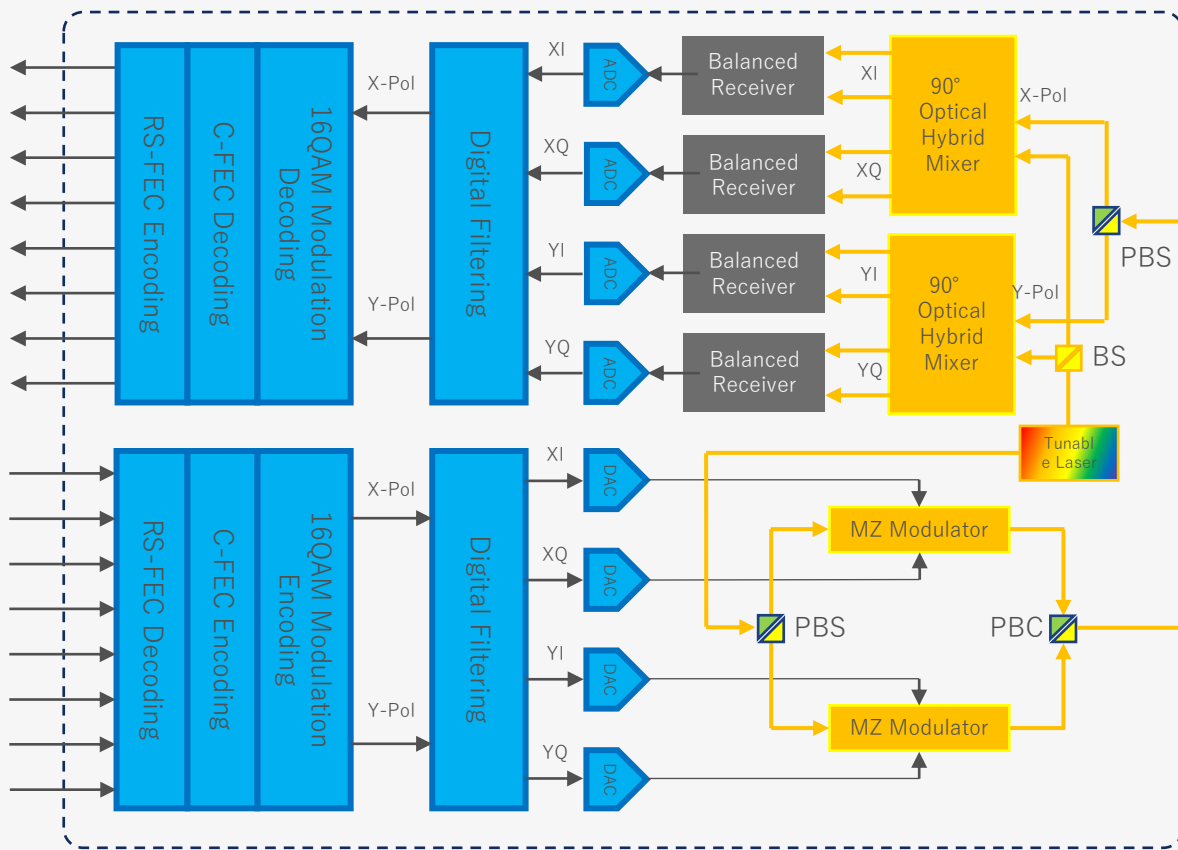
光側 (メディア)

受信 (電気)

26.5625Gbaud
PAM4
x 8 レーン
(= 425Gbps)

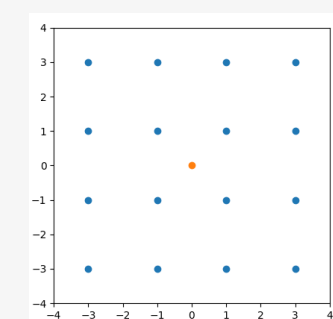
送信 (電気)

26.5625Gbaud
PAM4
x 8 レーン
(= 425Gbps)



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

受信 (光)



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

送信 (光)

Agenda

400G-ZRでつなぐDCIネットワーク

- 400G-ZR/ZR+の全体像
- データを光信号にのせる変調方式

400G-ZR 光トランシーバーのブロック図 (送信側)

電気側 (ホスト)

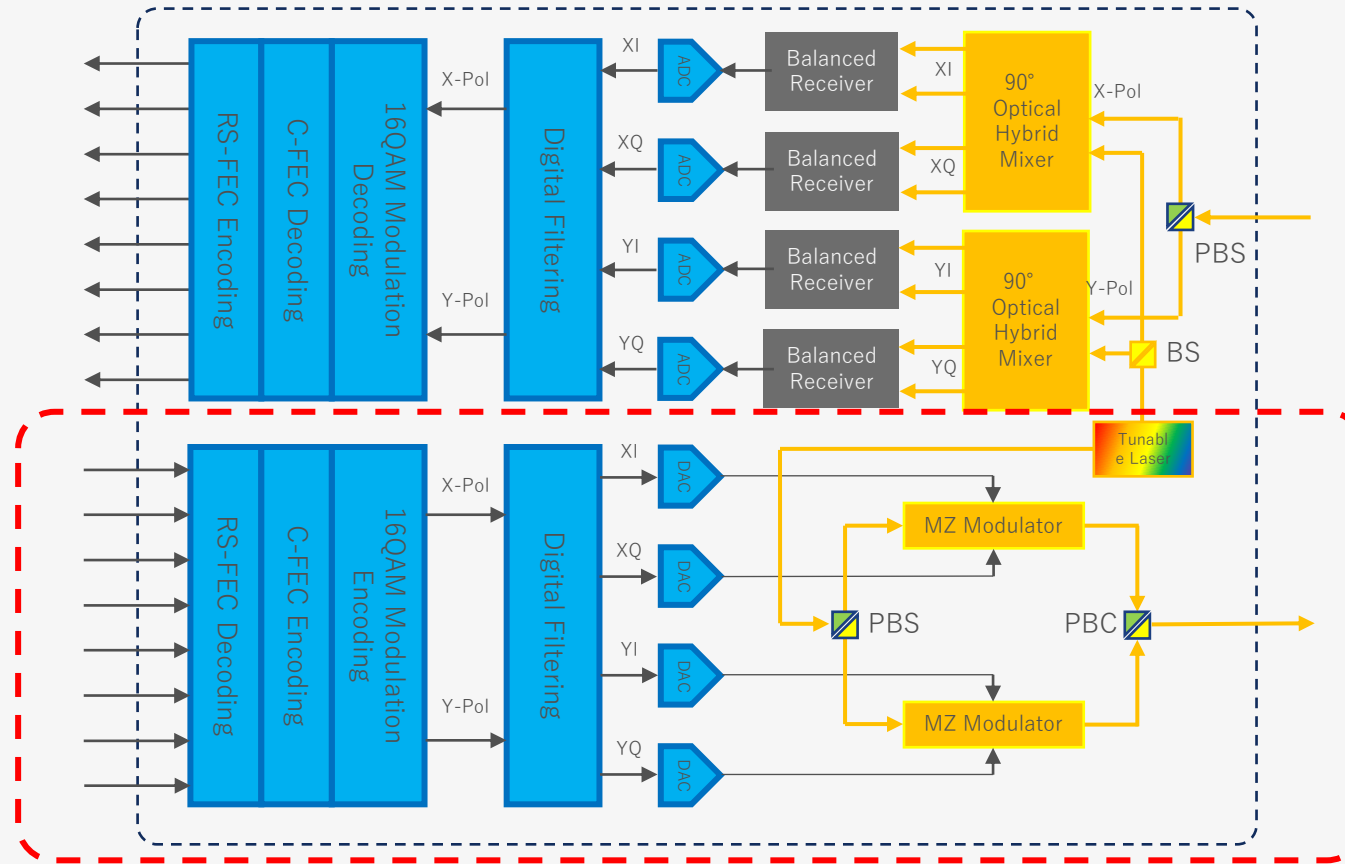
光側 (メディア)

受信 (電気)

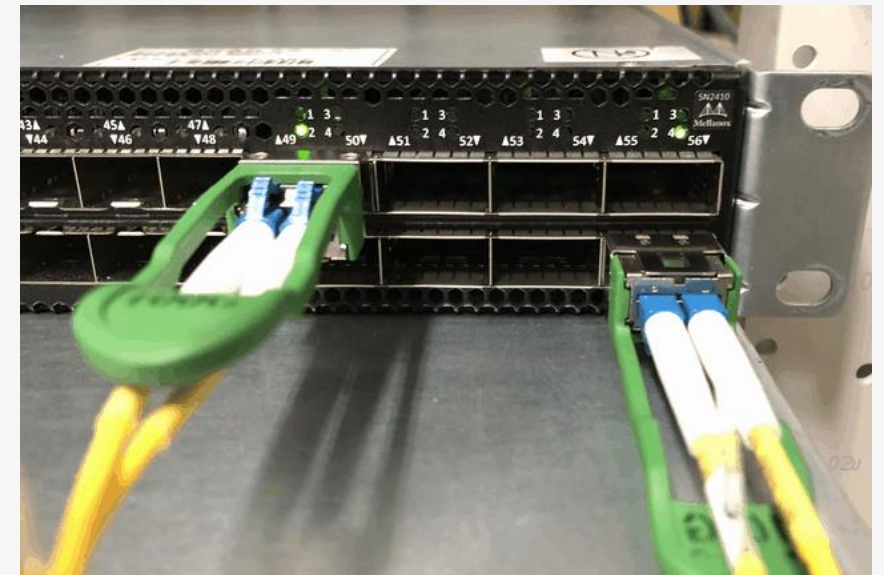
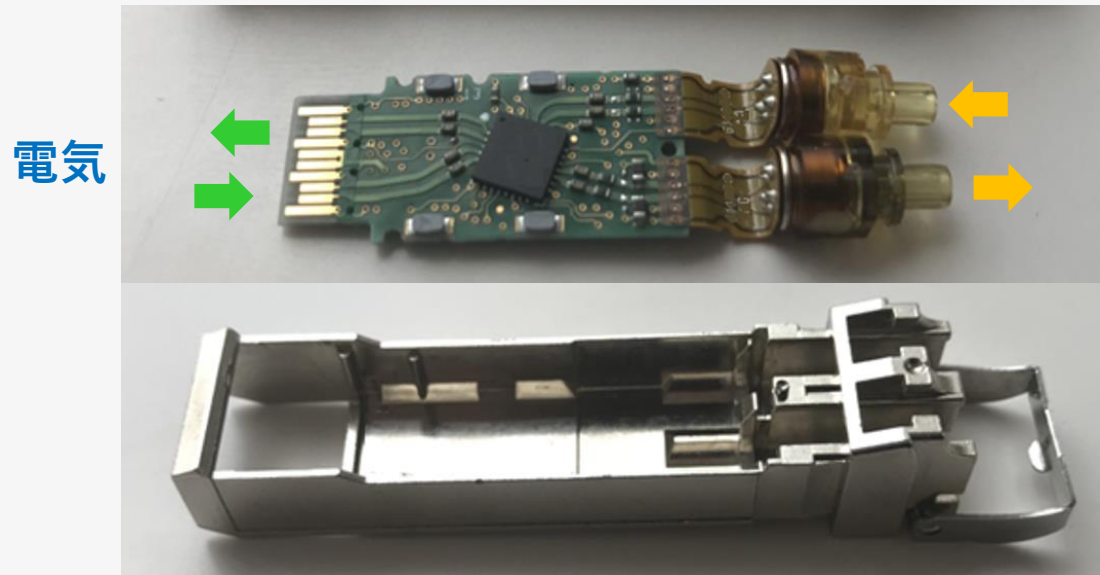
受信 (光)

送信 (電気)

送信 (光)



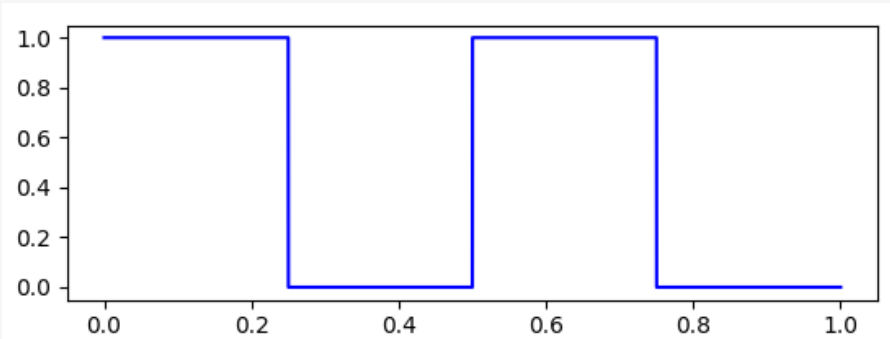
復習・・・光トランシーバを使った通信



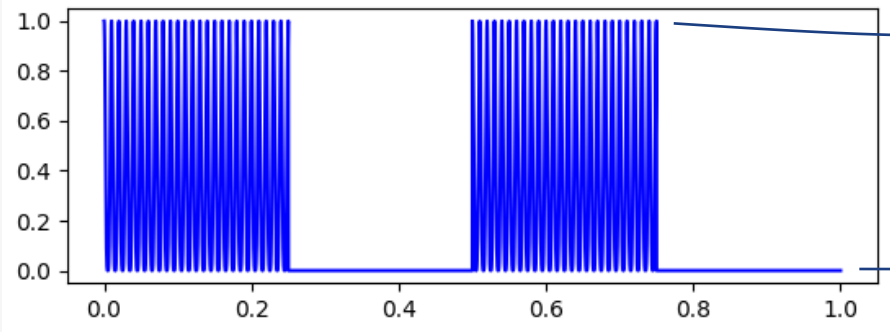
復習・・・変調方式～NRZ

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

電気



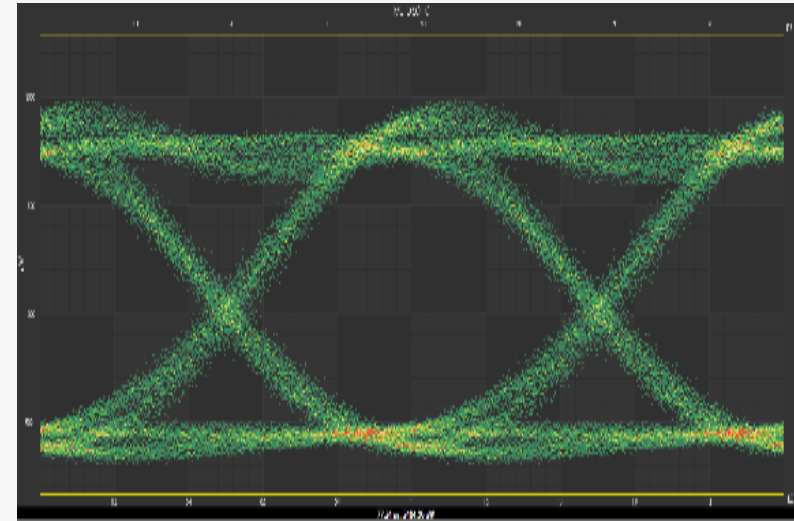
光



1レベル

0レベル

1Gbps、10Gbps
100Gbps 4レーン製品 (25Gbps/Lane)



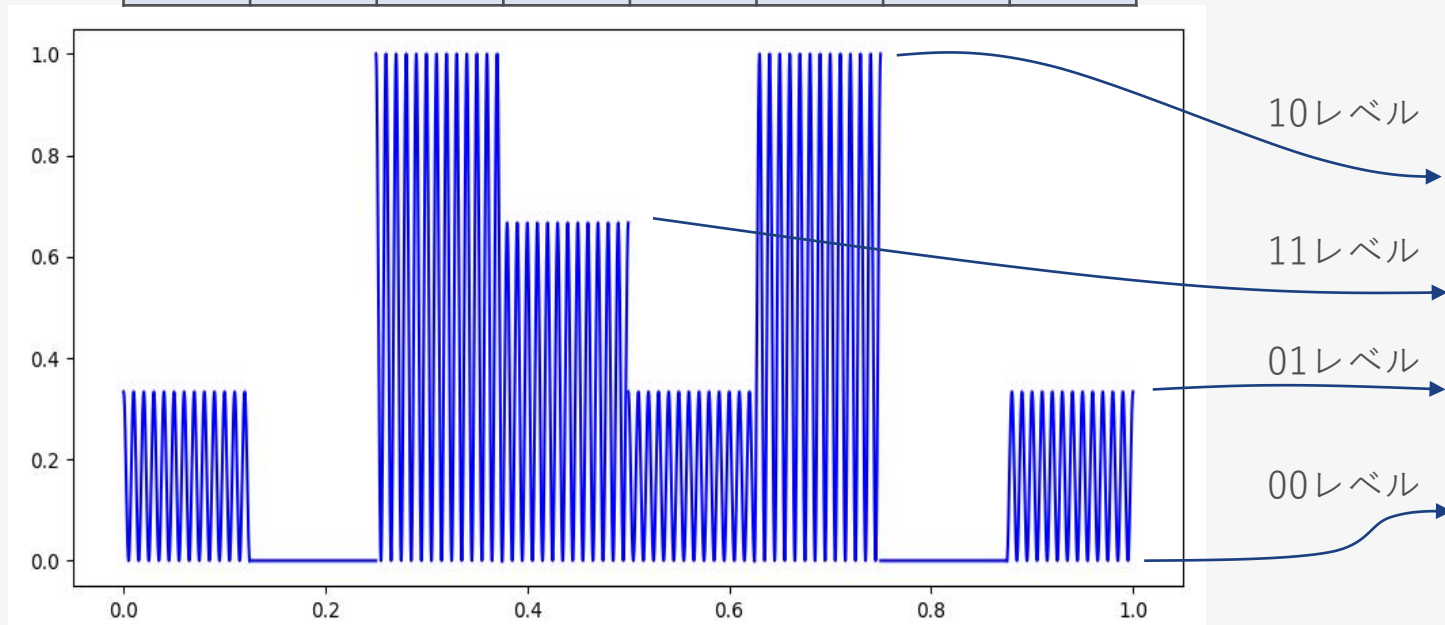
NRZアイパターンの例

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

復習・・・変調方式～PAM4

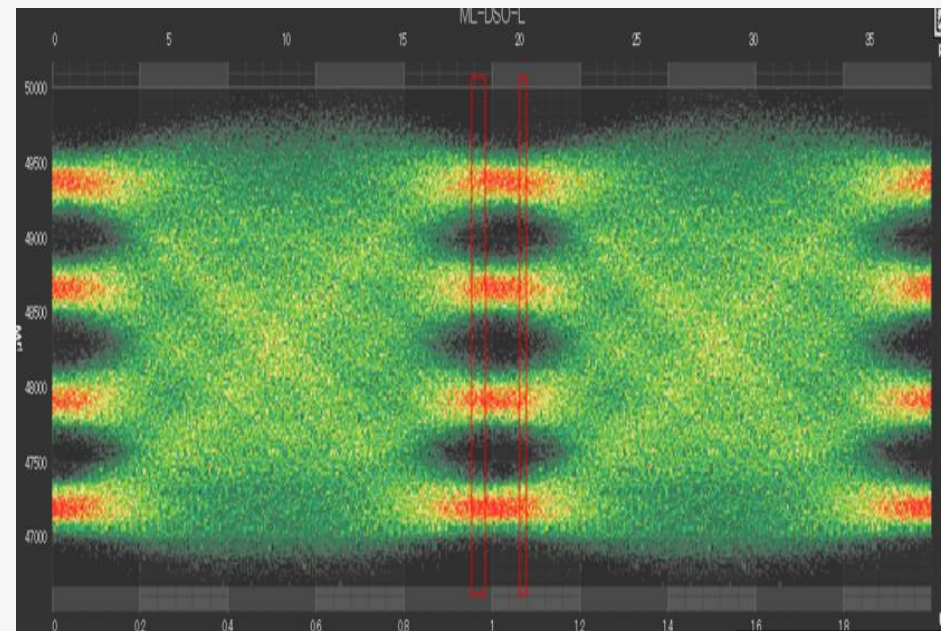
- デジタル信号を光の**振幅**にのせる
- Pulse Amplitude Modulation, 4-level

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



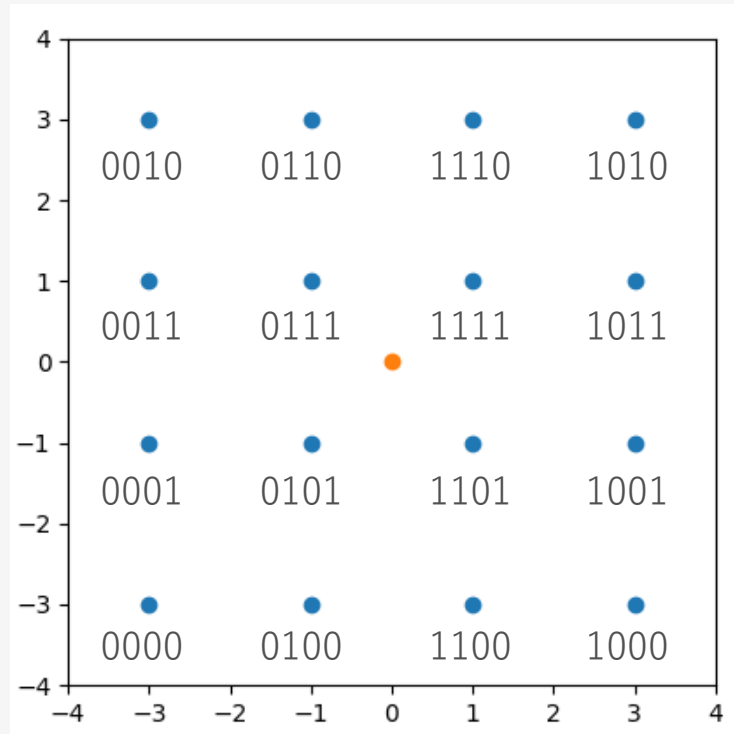
波形のイメージ（縦軸：光の強さ、横軸：時間）
実際はフィルターにより波形がなまっています

200Gbps 4レーン製品（50Gbps/Lane、25Gbd/Lane）
400Gbps 4レーン製品（100Gbps/Lane、50Gbd/Lane）



400G-ZR/ZR+の変調方式 ～ 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

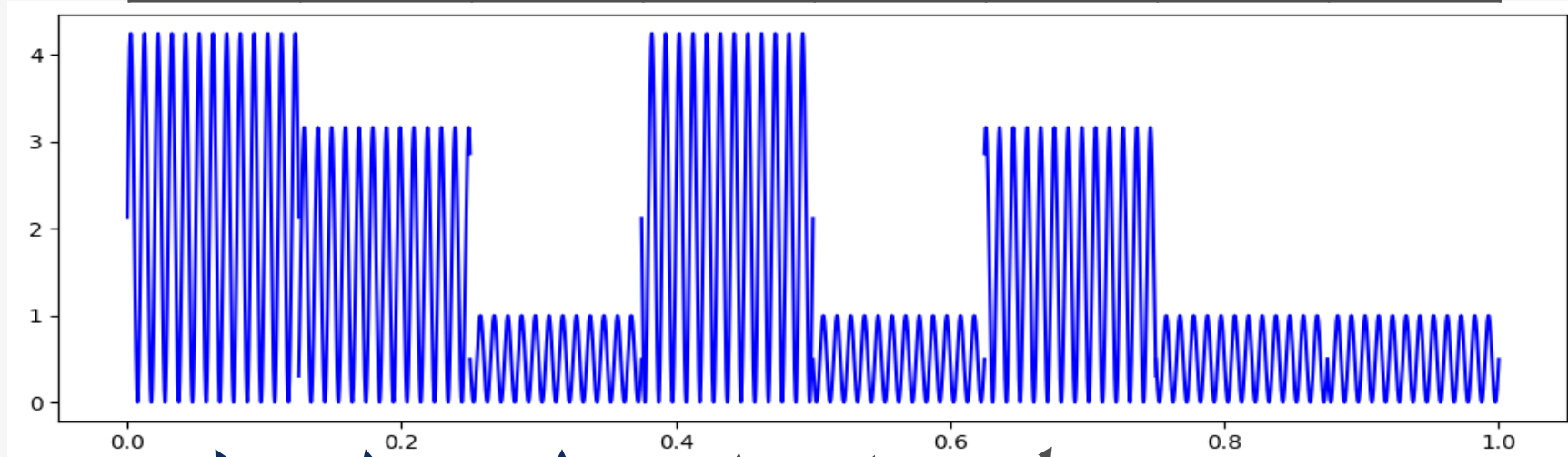
400G-ZR (200Gbps/偏波、50Gbd/偏波)

ポイント① 振幅だけでなく位相も使う

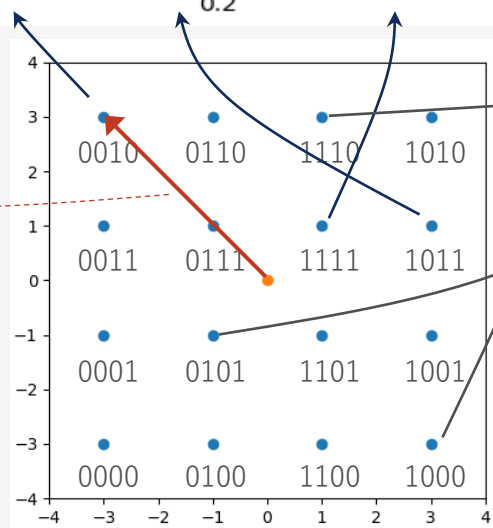
- ・一度にたくさんのデータを送ることができる (ボーレートを低く保ちつつ、ビットレートを速くできる)
- ・大容量通信に向いている

16QAM変調波の、実際の波形はどうなっているのか？

| | | | | | | | |
|-------------------------|-------------------------|--------------|-------------------------|----------------|--------------------------|----------------|---------------|
| 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 $3\pi/4$ |

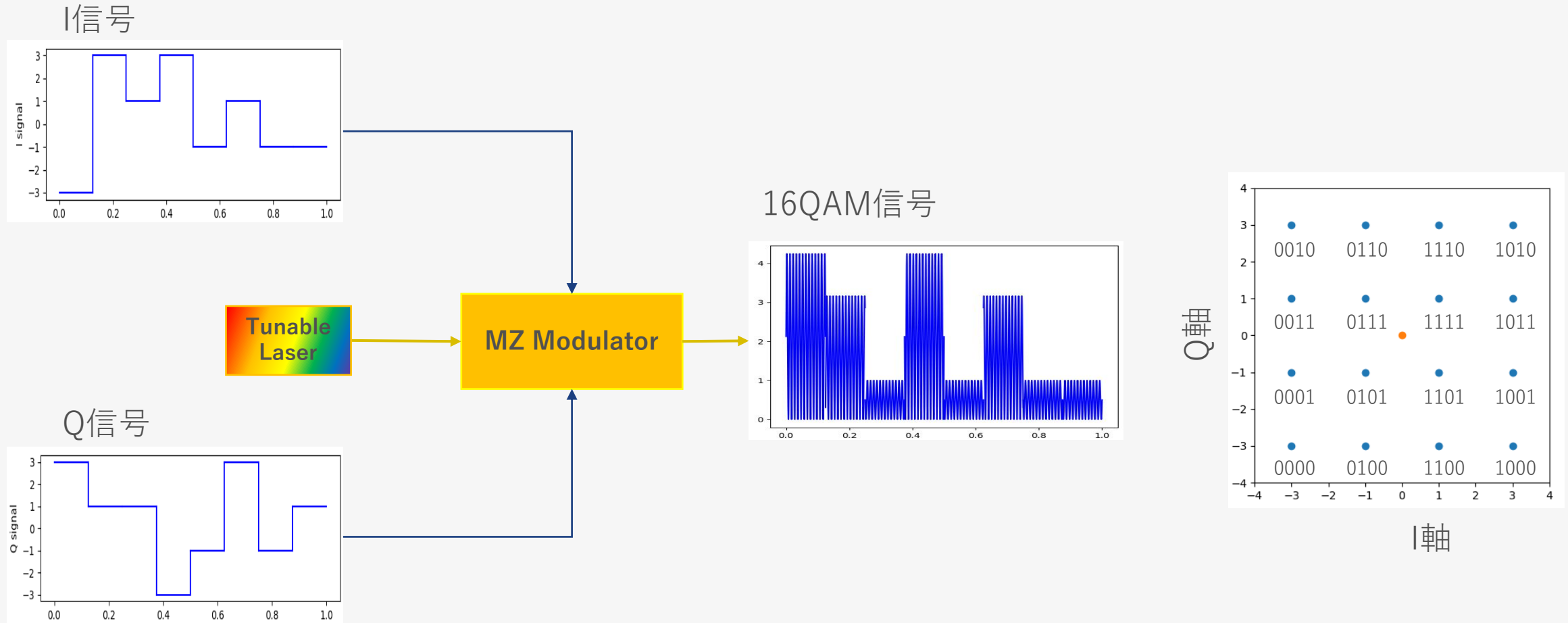


振幅= $\sqrt{18}$
位相= $3\pi/4$



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

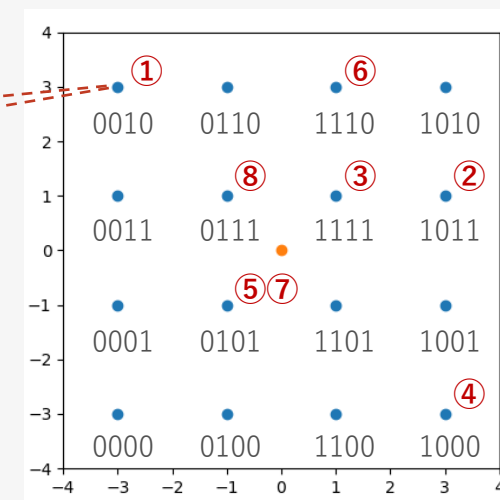
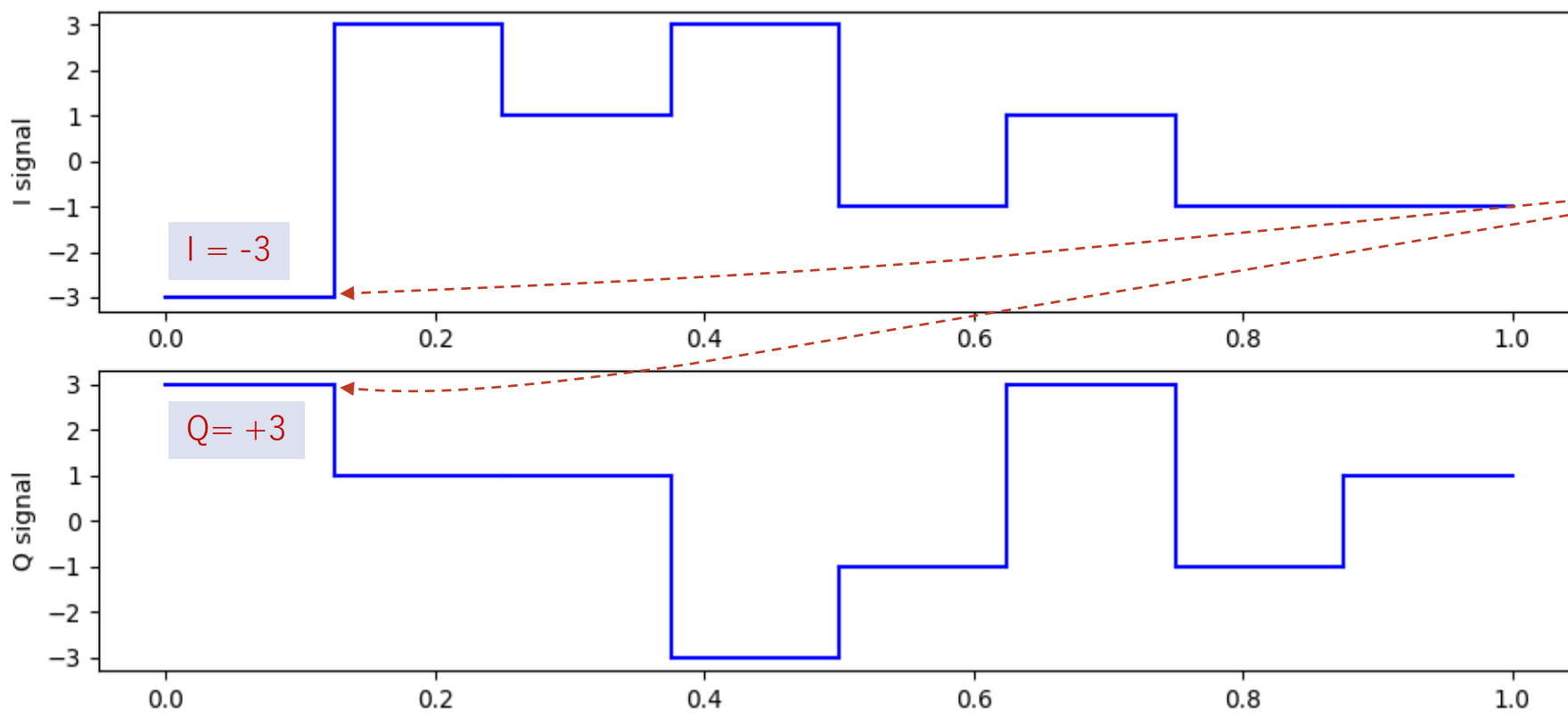
16QAM変調波を、どうやって作るのか？（変調器）



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

I信号とQ信号と、16QAM変調波の関係はどうなってるのか？

| 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

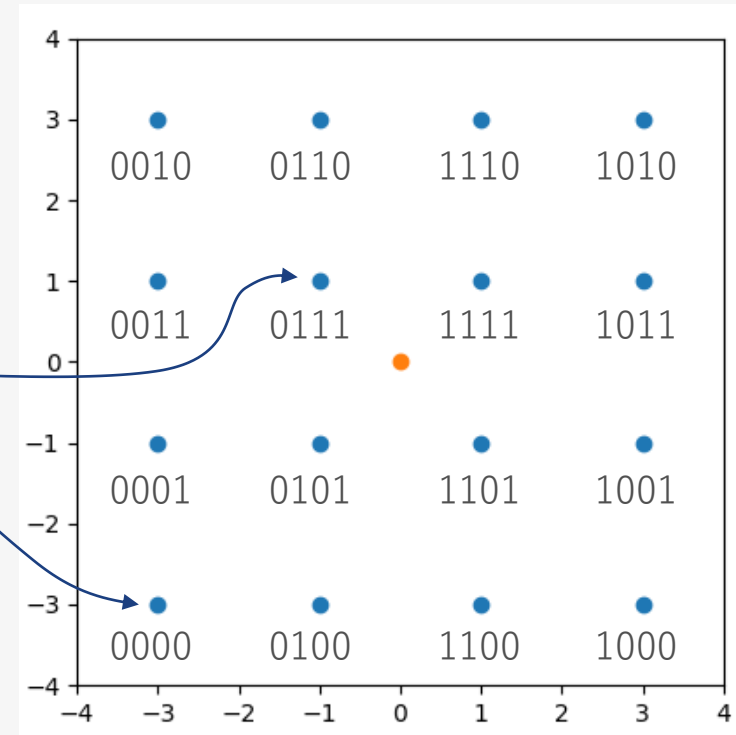
波形のイメージ（縦軸：信号レベル、横軸：時間）
実際はフィルターにより波形がなまっています

16通りのビット列を、16個あるどの点に割り当てるのか？

- 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 |

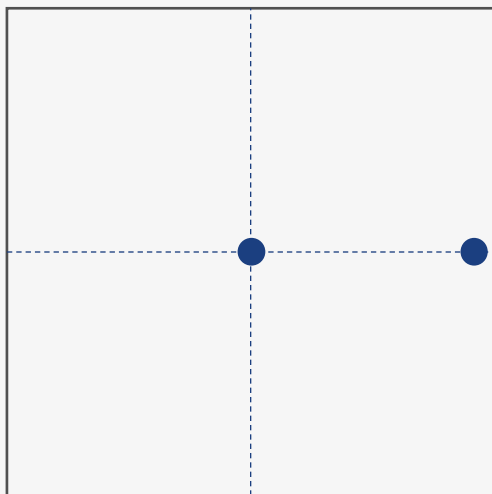
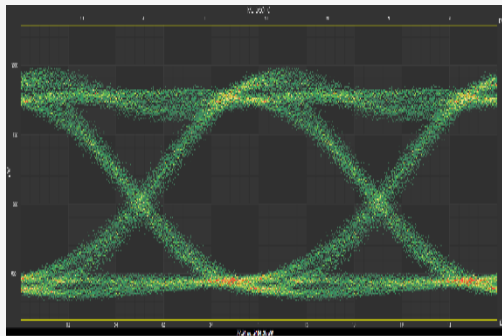
Table 10: In-phase (I) and quadrature phase (Q) symbol amplitude



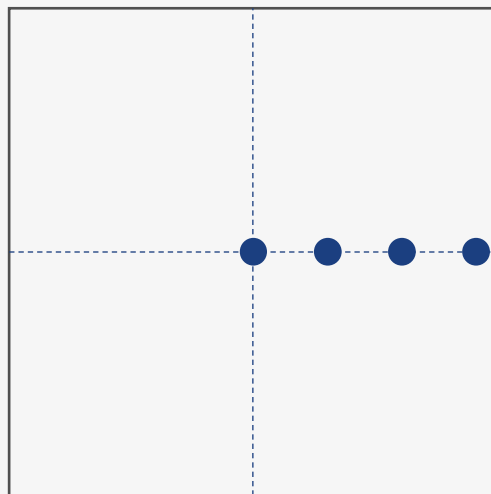
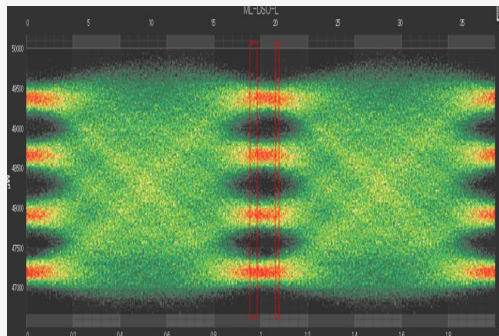
16QAMのマッピング例
横軸：I、縦軸：Q

NRZ、PAM4、16QAMを、同じ表記で比較してみよう

NRZ

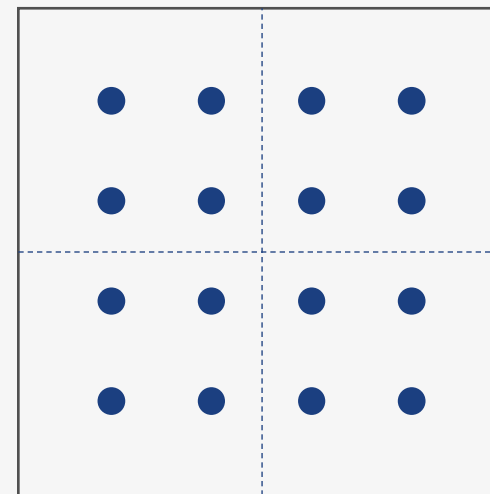


PAM4



16QAM

いいサンプルがなくて
すいません・・・



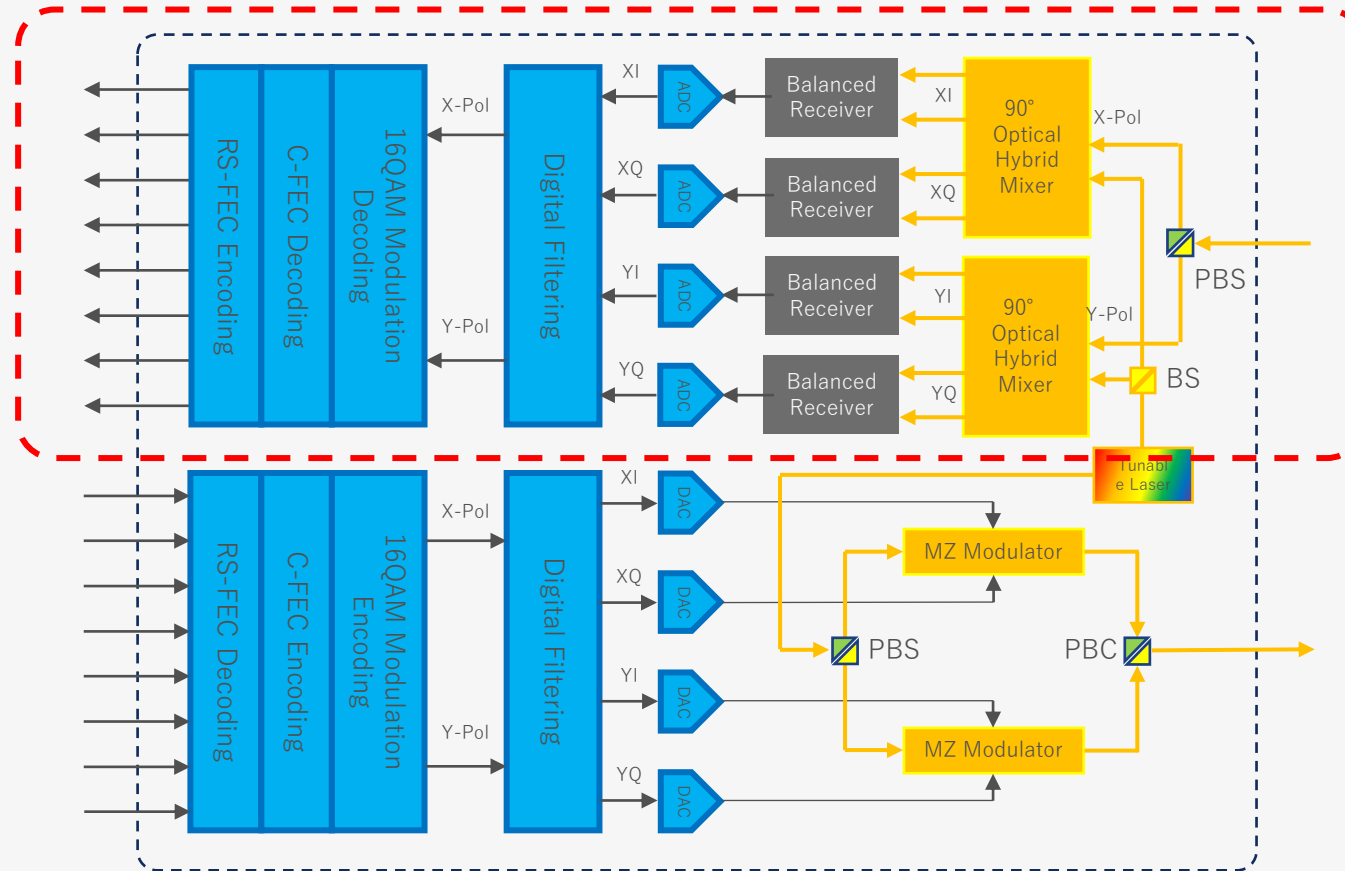
最大振幅時の大きさが同じになるようにスケールしています

Agenda

400G-ZRでつなぐDCIネットワーク

- 400G-ZRのブロック図
- データを光信号にのせる変調方式
- 光信号からデータを取り出す検出方式

400G-ZR 光トランシーバーのブロック図 (受信側)

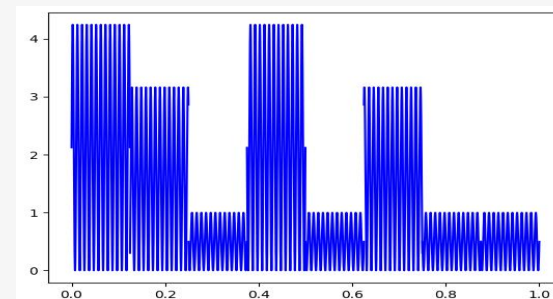


コヒーレント検出でI信号とQ信号を取り出す

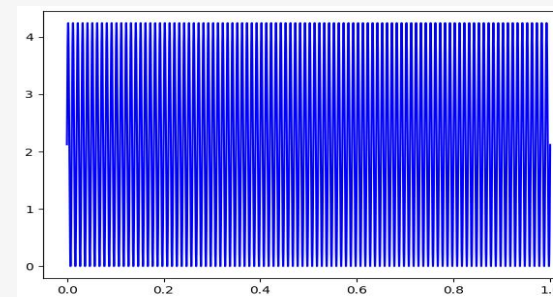
PBSで偏波を分離する



16QAM変調光



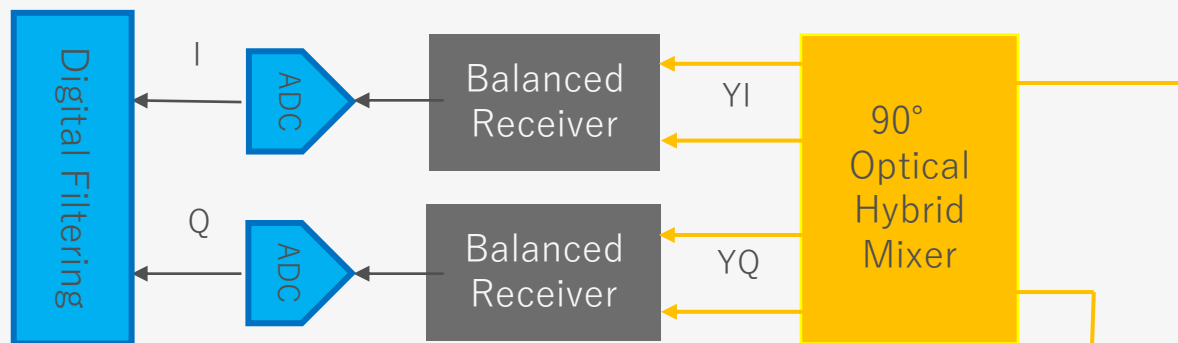
ローカル光



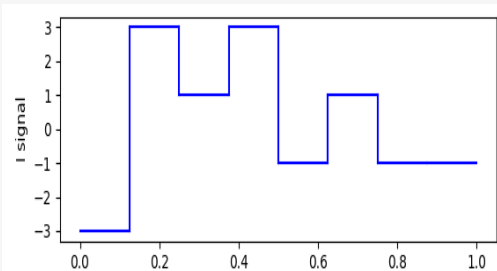
変調光とローカル光を干渉させる

IQ成分を取り出す

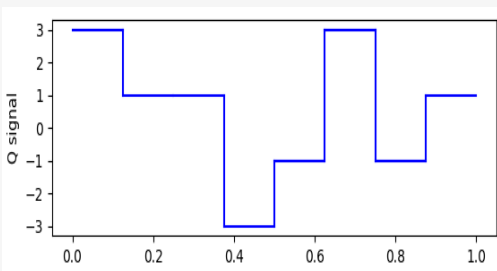
高速AD変換で取り込む



I信号



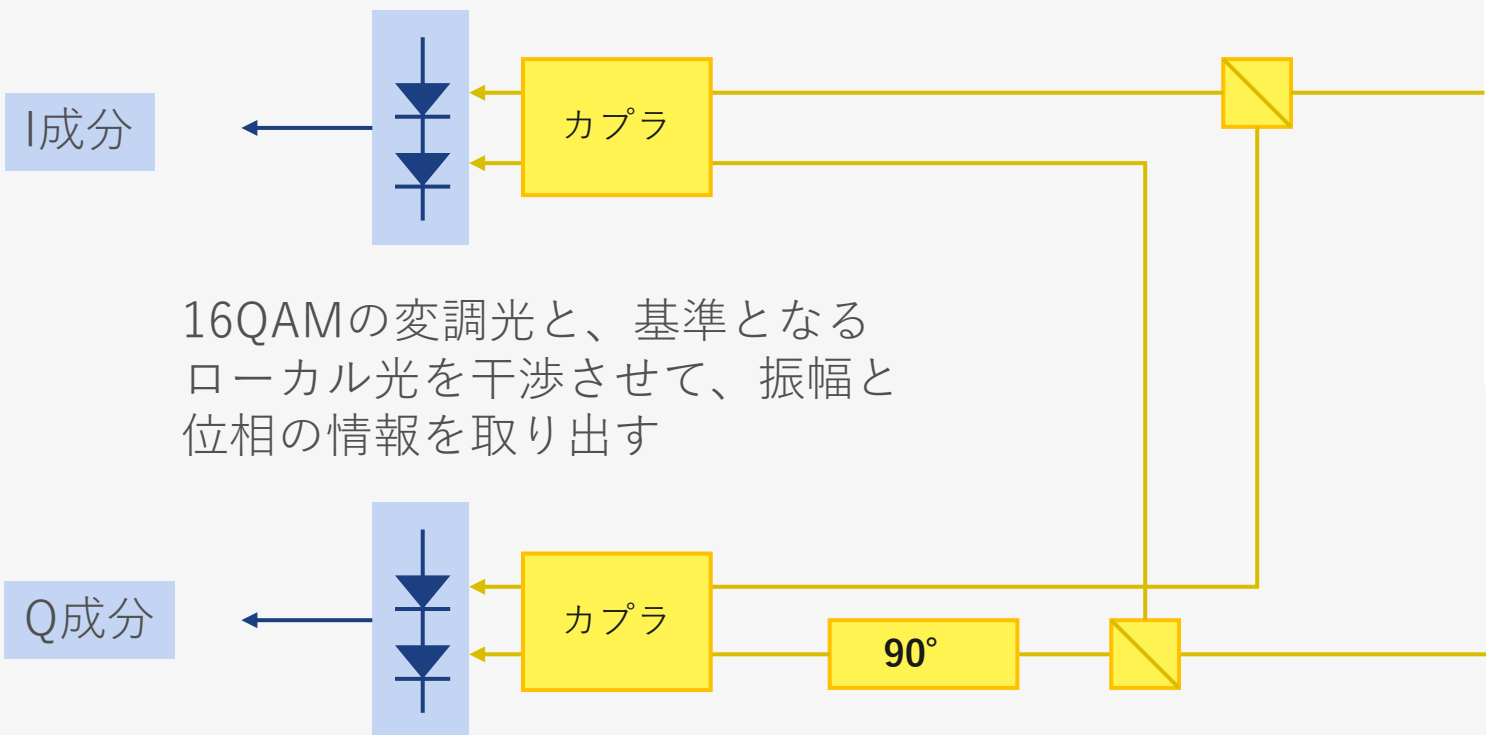
DSPのパワーで各種の補正をかける



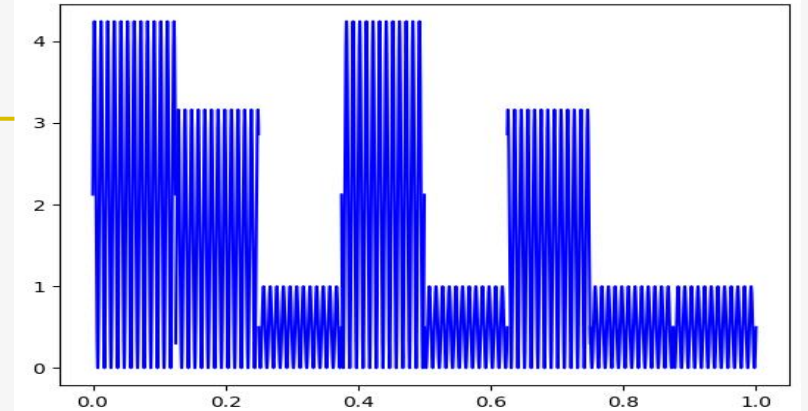
Q信号

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

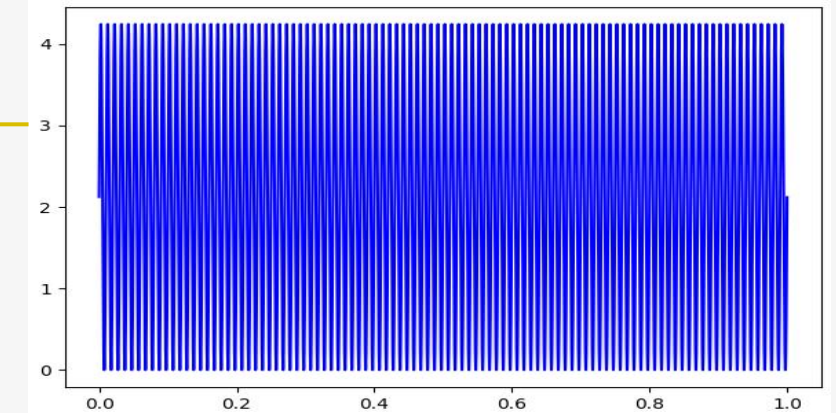
コヒーレント検出でI信号とQ信号を取り出す（続き）



16QAM変調光



ローカル光

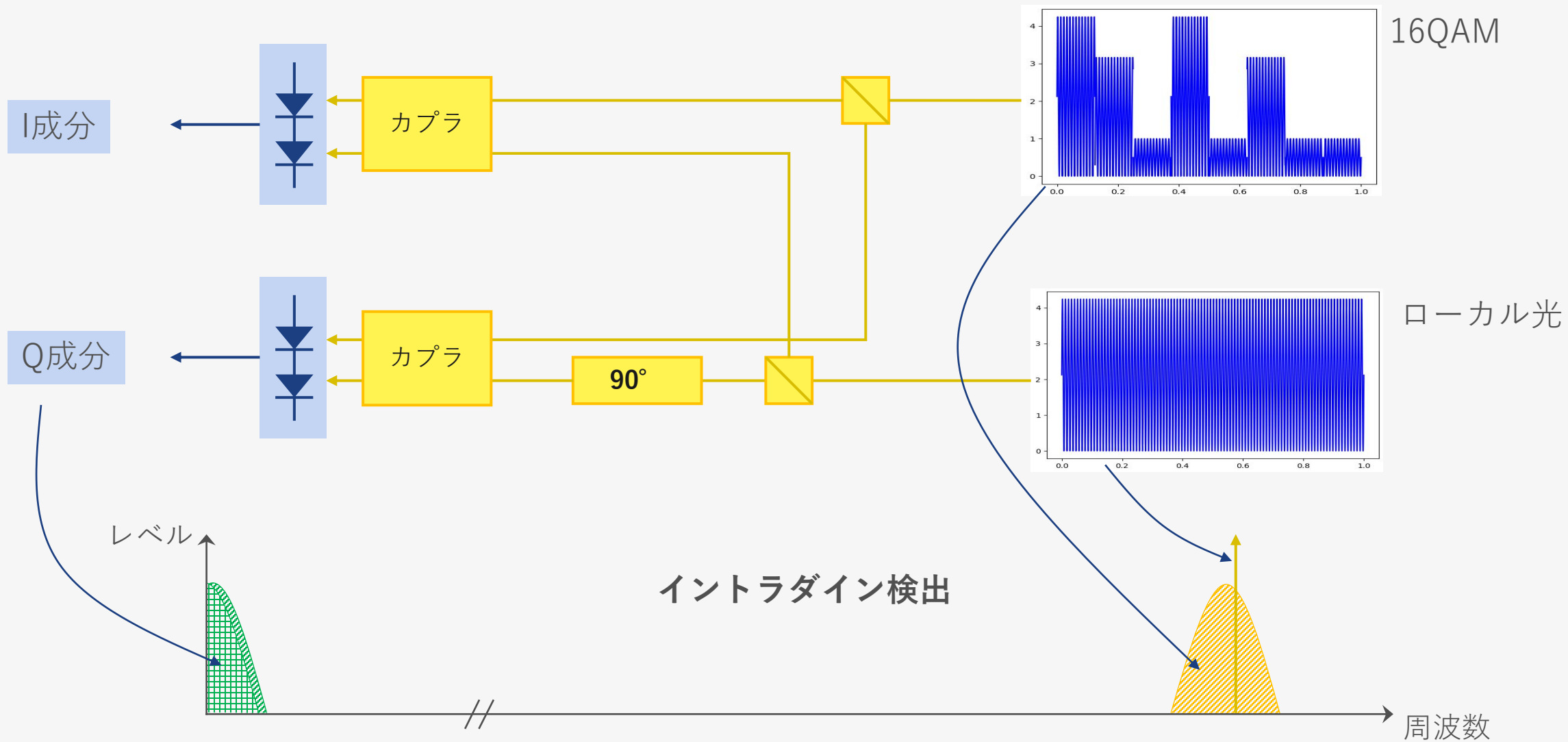


ポイント② 大きなレベルのローカル光を使う

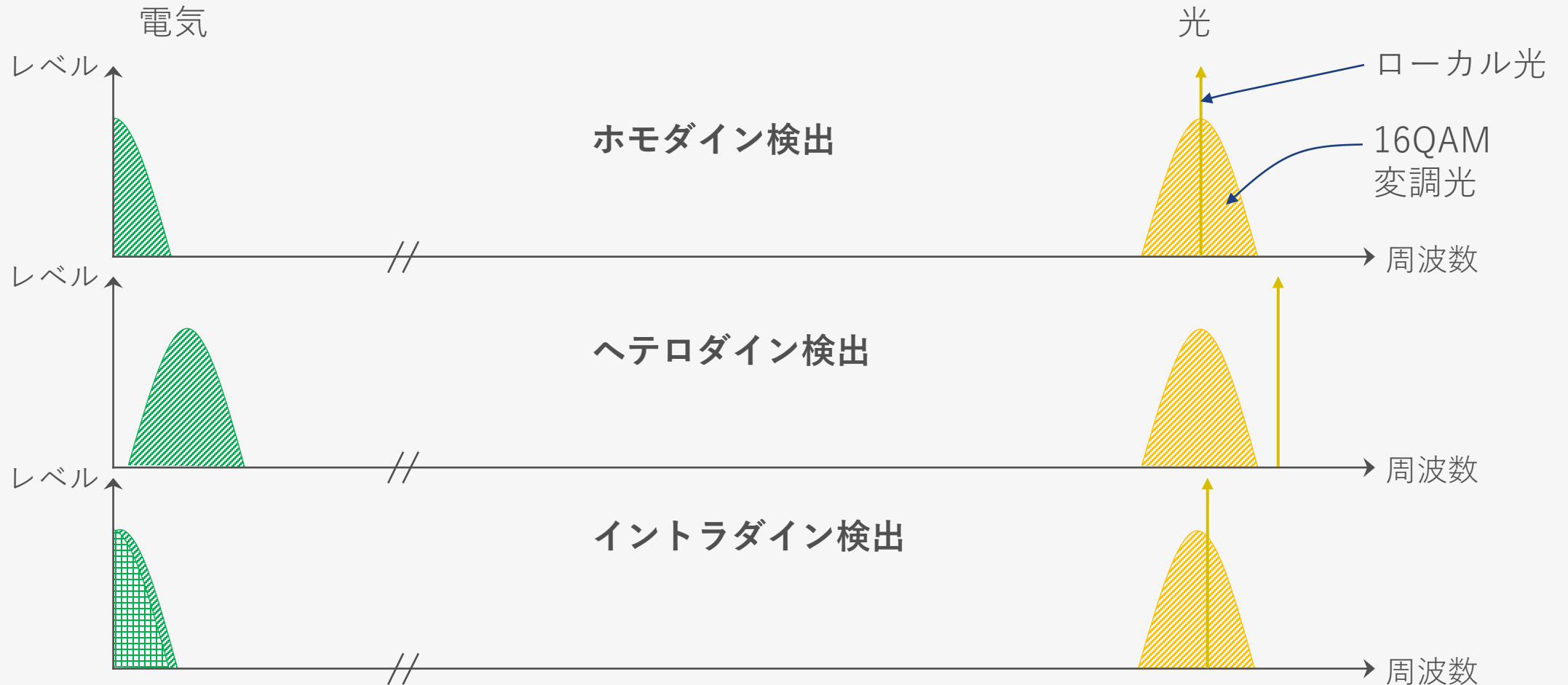
- 変調光のレベルが小さくても大きなレベルのI/Q成分が得られる
- 受信感度が良くなる（長距離向き）

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

コヒーレント検出における、周波数の関係は？



コヒーレント検出における、周波数の関係は？（続き）



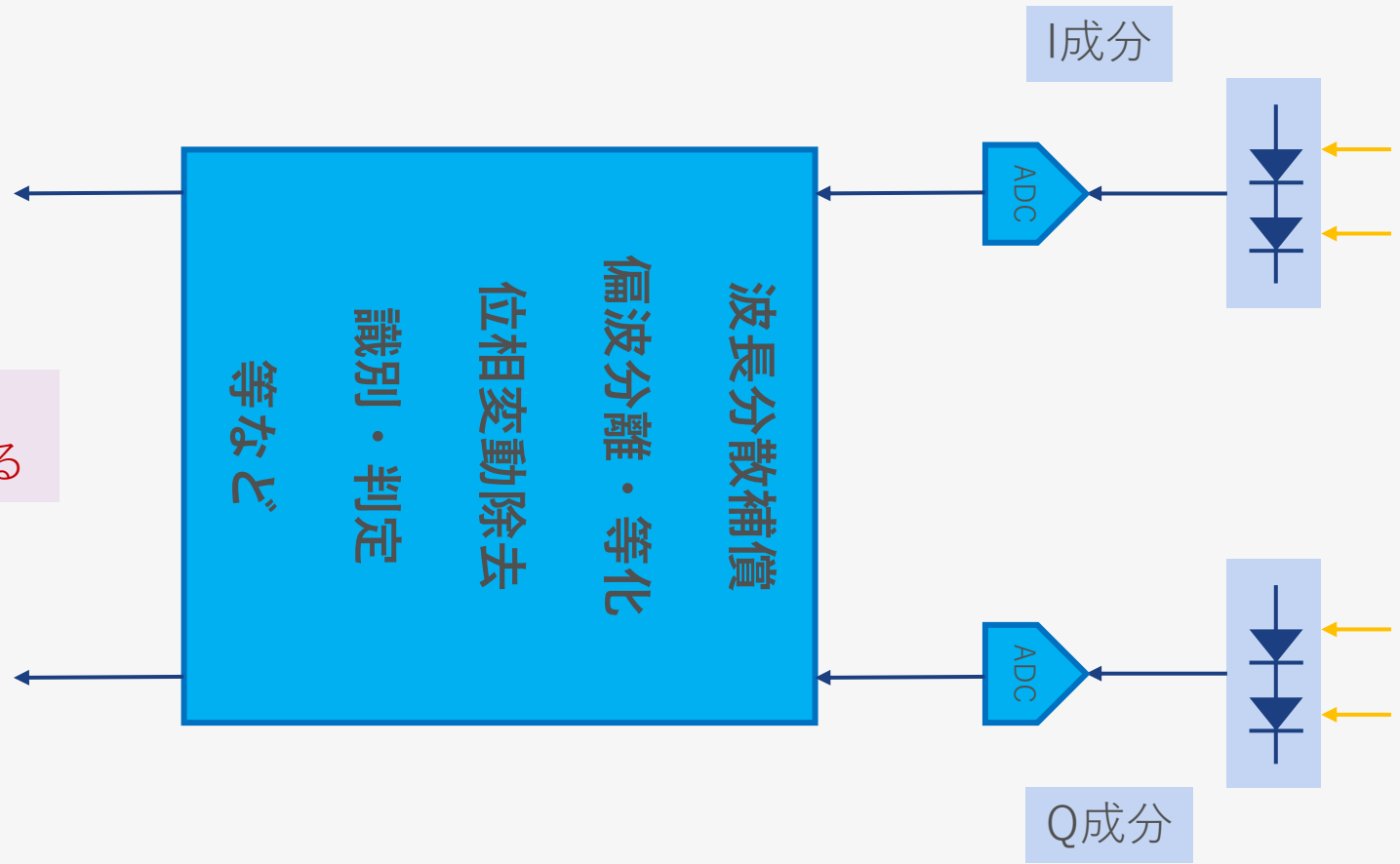
ポイント③ スペクトルを保ったままDSPに渡す

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

DSPの補正によってきれいなI信号とQ信号を取り出せる

ポイント④ デジタル信号処理技術
→光領域のひずみを電気領域で補正する

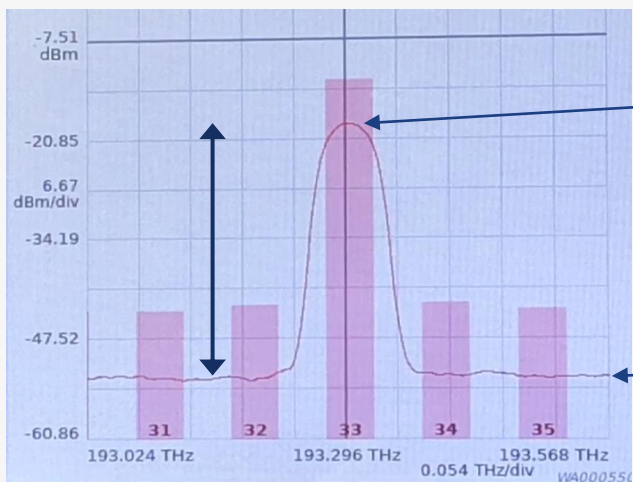


Agenda

400G-ZRでつなぐDCIネットワーク

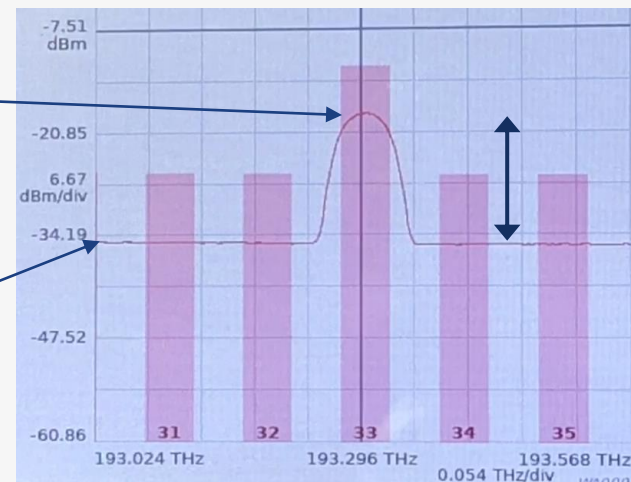
- 400G-ZR/ZR+の全体像
- 400G-ZRのブロック図
- データを光信号にのせる変調方式
- 光信号からデータを取り出す検出方式
- OSNRが重要です

16QAM信号にのっかるノイズとOSNRの関係

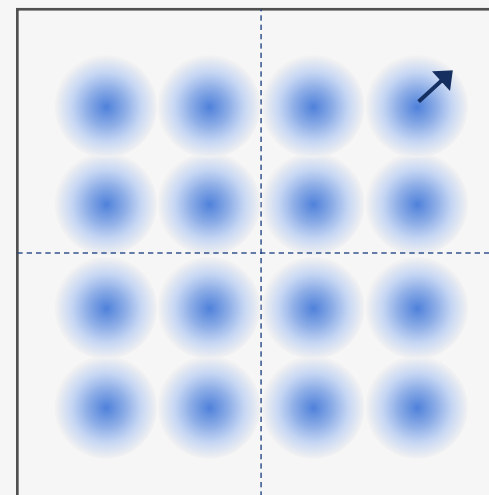
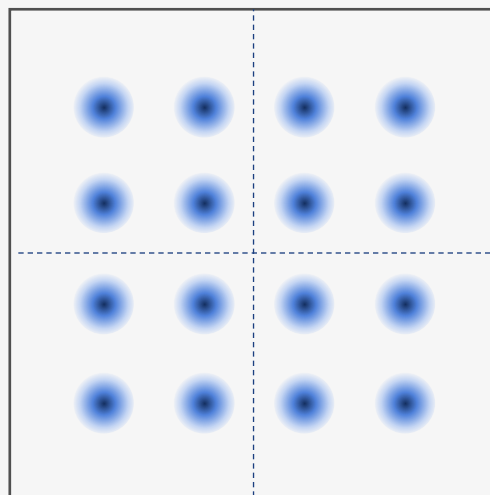
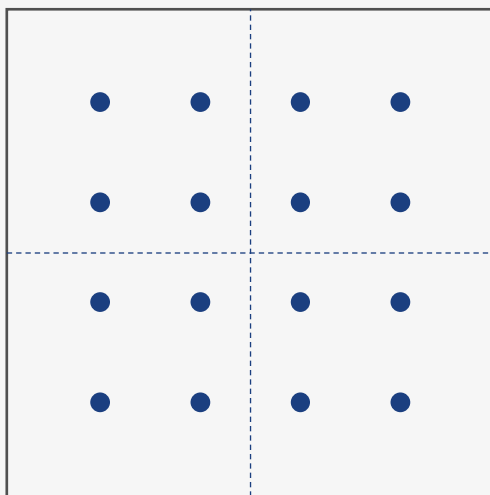


信号

ノイズ



OSNR



EVM

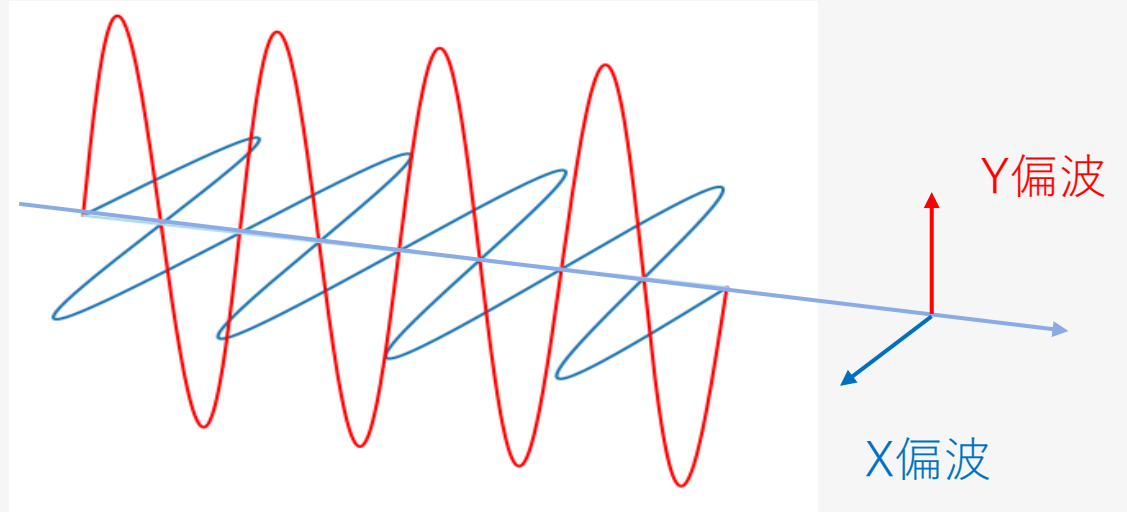
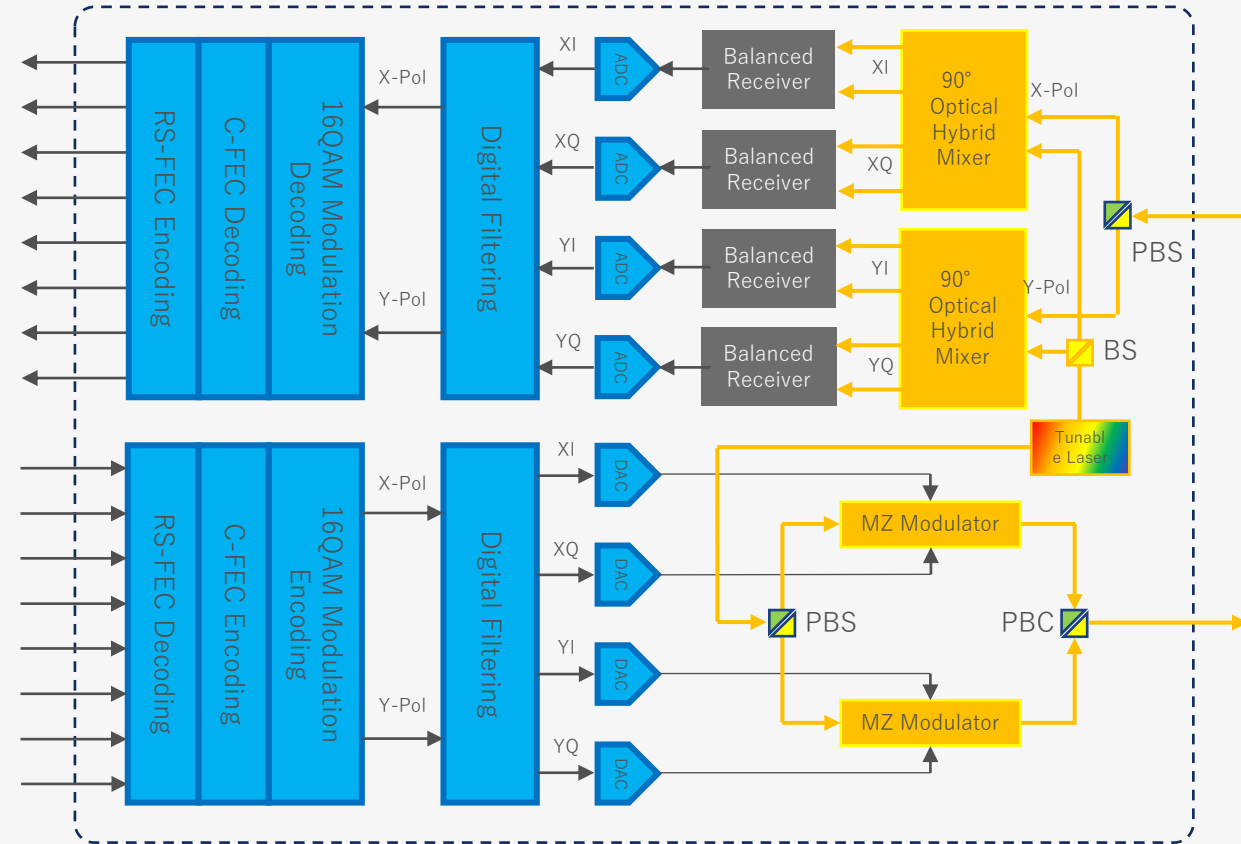
スペクトルとコンスタレーション図の関係はあくまでもイメージです

Agenda

400G-ZRでつなぐDCIネットワーク

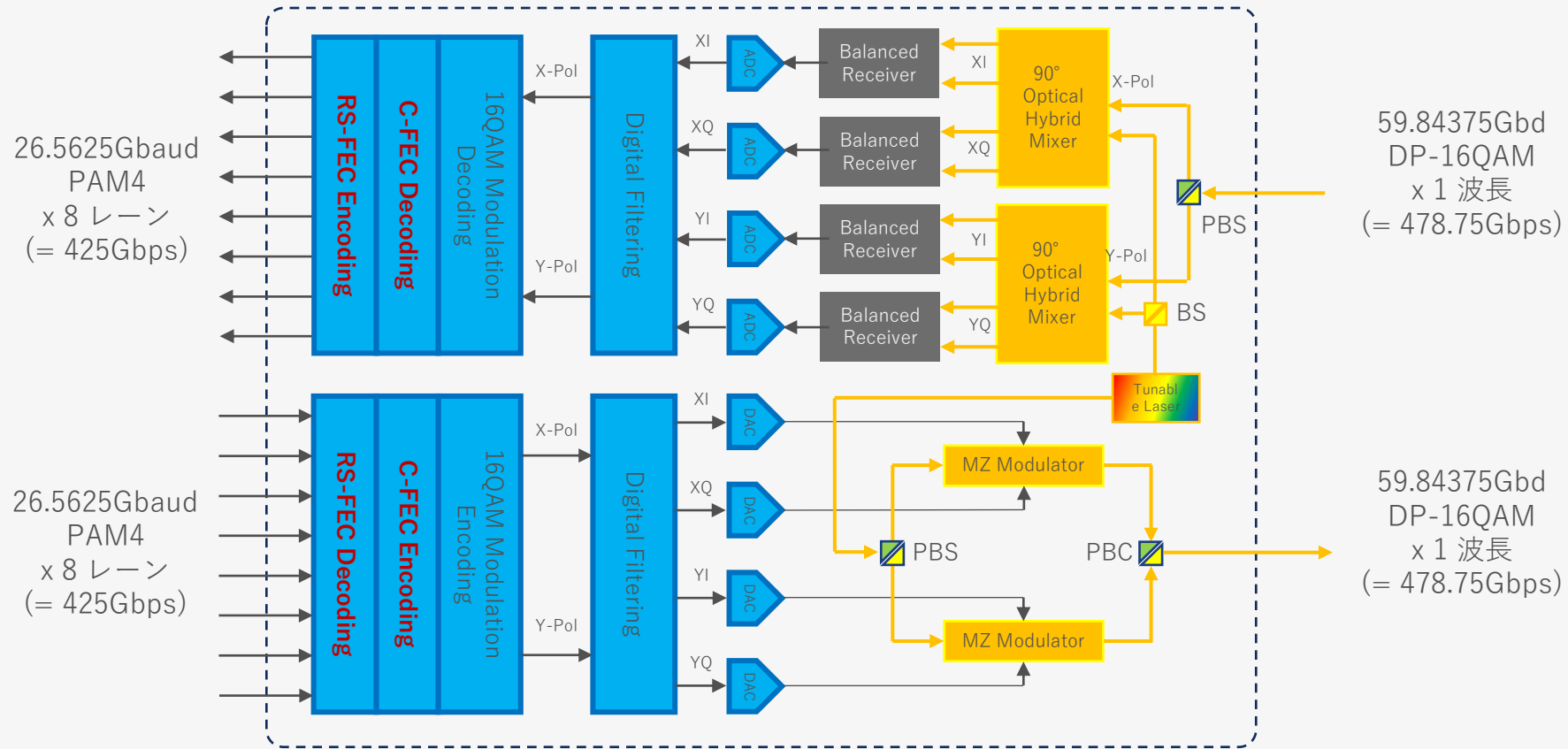
- 400G-ZR/ZR+の全体像
- データを光信号にのせる変調方式
- 光信号からデータを取り出す検出方式
- OSNRが重要です
- より長距離・大容量を実現するために

1波長だけど、偏波を多重して容量を2倍に



PBC: Polarization Beam Combiner
 PBS: Polarization Beam Splitter

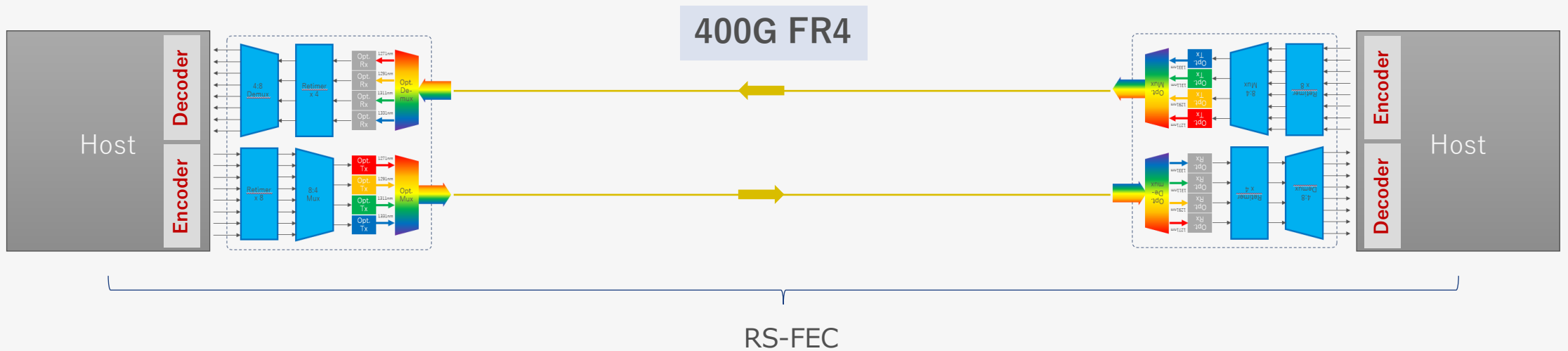
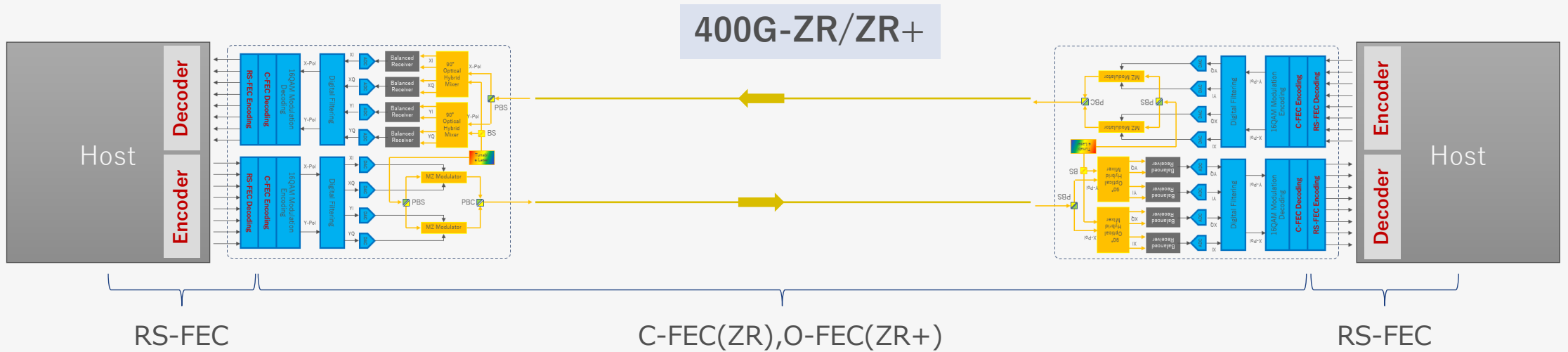
光側で専用のFECをかけて、さらに距離をのぼす



Host interface側はRS-FEC

Media interface側はC-FEC (ZR) またはO-FEC (ZR+)

FECをかける場所は？（400G FR4との比較）



Agenda

400G-ZRでつなぐDCIネットワーク（技術編）

- 400G-ZRのブロック図
- データを光信号にのせる変調方式
- 光信号からデータを取り出す検出方式
- OSNRが重要です
- より長距離・大容量を実現するために
- ここまでのまとめ

まとめ (ちょっと強引ですが)

| | 400G-ZR |
|----------|----------|
| 伝送距離 | 120km |
| 変調方式 | 16QAM |
| 受信方式 | コヒーレント検出 |
| ホスト側FEC | RS FEC |
| メディア側FEC | C-FEC |
| 波長数 | 1波長 |
| 偏波多重 | あり |
| 消費電力 | < 20W |

振幅と位相を使って、1シンボルで4ビットを送る

受信した変調光とローカル光を干渉させる

振幅と位相の両方を電気信号に変換

DSPで光領域の歪などを補正

電気側のRS-FECをいったん終端し、光側で専用のC-FECをかける

1波長で2つの直行する変調光を送る

強いローカル光を使うことで、受信感度が向上

長距離通信

大容量通信

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

400G-ZRでつなぐDCIネットワーク (Tips編)

- パフォーマンスモニタ機能

パフォーマンスモニタ

波長分散やOSNRなど、各種の特性をモニターできます！

| Parameter | Unit | Min | Avg | Max |
|-----------------|-----------------|-------|-------|-------|
| Tx Power | dBm | -9.39 | -9.39 | -9.39 |
| Rx Total Power | dBm | -8.74 | -8.74 | -8.74 |
| Rx Signal Power | dBm | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| CD-short link | ps/nm | 203.0 | 203.0 | 203.0 |
| PDL | dB | 0.7 | 0.7 | 0.7 |
| OSNR | dB | 36.5 | 36.5 | 36.5 |
| eSNR | dB | 33.5 | 33.5 | 33.5 |
| CFO | MHz | 16.0 | 48.0 | 69.0 |
| DGD | ps | 5.18 | 5.31 | 5.43 |
| SOPMD | ps ² | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

| Parameter | Unit | Min | Avg | Max |
|-----------------|-----------------|--------|--------|--------|
| Tx Power | dBm | -9.31 | -9.31 | -9.31 |
| Rx Total Power | dBm | -12.44 | -12.44 | -12.44 |
| Rx Signal Power | dBm | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| CD-short link | ps/nm | 296.0 | 296.0 | 296.0 |
| PDL | dB | 0.7 | 0.7 | 0.7 |
| OSNR | dB | 32.9 | 32.9 | 32.9 |
| eSNR | dB | 29.9 | 29.9 | 29.9 |
| CFO | MHz | 53.0 | 65.0 | 71.0 |
| DGD | ps | 5.37 | 5.56 | 5.75 |
| SOPMD | ps ² | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

20kmファイバを追加（4dB相当）

400G-ZR パフォーマンスモニタの一例（ホストのCLIで取得）

Agenda

400G-ZRでつなぐDCIネットワーク

- パフォーマンスモニタ機能
- Application Select Codeに注意！

Application Select Codeに注意

トランシーバベンダーによって、Application Select Codeの割り当てが異なる

```
Active application selected code assigned to host lane 1: 1
Active application selected code assigned to host lane 2: 1
Active application selected code assigned to host lane 3: 1
Active application selected code assigned to host lane 4: 1
Active application selected code assigned to host lane 5: 1
Active application selected code assigned to host lane 6: 1
Active application selected code assigned to host lane 7: 1
Active application selected code assigned to host lane 8: 1
```

今はApplication Select Code = 1

Application Select Codeの割り当て

```
Application Advertisement: 1 - 400GAUI-8 C2M (Annex 120E) - Host Assign (0x1) - ZR400-OFEC-16QAM - Media Assign (0x1)
                           2 - 100GAUI-2 C2M (Annex 135G) - Host Assign (0x55) - ZR400-OFEC-16QAM - Media Assign (0x1)
                           3 - 100GAUI-2 C2M (Annex 135G) - Host Assign (0x15) - ZR300-OFEC-8QAM - Media Assign (0x1)
                           4 - 100GAUI-2 C2M (Annex 135G) - Host Assign (0x5) - ZR200-OFEC-QPSK - Media Assign (0x1)
                           5 - 100GAUI-2 C2M (Annex 135G) - Host Assign (0x1) - ZR100-OFEC-QPSK - Media Assign (0x1)
                           6 - 400GAUI-8 C2M (Annex 120E) - Host Assign (0x1) - 400ZR, DWDM, amplified - Media Assign (0x1)
                           7 - 100GAUI-2 C2M (Annex 135G) - Host Assign (0x55) - 400ZR, DWDM, amplified - Media Assign (0x1)
```

400G-ZR+のApplication Select Code例 (ホストのCLIで取得)

Agenda

400G-ZRでつなぐDCIネットワーク

- パフォーマンスモニタ機能
- Application Select Codeに注意！
- 波長の設定に注意！

お互いに同じ波長設定にしないとつながりません

トランシーバーベンダーによって波長の初期値が異なる → 合わせましょう

①リンクアップしない・・・

Port 1: A社製400G ZR光トランシーバー

Port 5: B社製400G ZR光トランシーバー

| Interface | Lanes | Speed | MTU | Oper | FEC | Alias | Vlan | Oper | Admin | ProtoDown | Eff Admin |
|------------|-------------------------|-------|------|------|-----|-------------|--------|--------|-------|-----------|-----------|
| Ethernet0 | 1,2,3,4,5,6,7,8 | 400G | 9100 | | rs | Eth1(Port1) | routed | down | up | False | up |
| Ethernet32 | 73,74,75,76,77,78,79,80 | 400G | 9100 | | rs | Eth5(Port5) | routed | routed | down | up | False |

②波長（周波数）を確認したところ、初期値が異なることを確認

| Port | Frequency | Grid space |
|------------|------------------|------------|
| Ethernet0 | <u>193700000</u> | 100GHz |
| Ethernet32 | <u>193100000</u> | 100GHz |

③Port 1の波長（周波数）を193.1THzに変更後、リンクアップ！

| Interface | Lanes | Speed | MTU | Oper | FEC | Alias | Vlan | Oper | Admin | ProtoDown | Eff Admin |
|------------|-------------------------|-------|------|------|-----|-------------|--------|--------|-------|-----------|-----------|
| Ethernet0 | 1,2,3,4,5,6,7,8 | 400G | 9100 | | rs | Eth1(Port1) | routed | up | up | False | up |
| Ethernet32 | 73,74,75,76,77,78,79,80 | 400G | 9100 | | rs | Eth5(Port5) | routed | routed | up | up | False |

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」