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

Co.Tomorrowing

MACNICA

©Macnica,Inc.

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

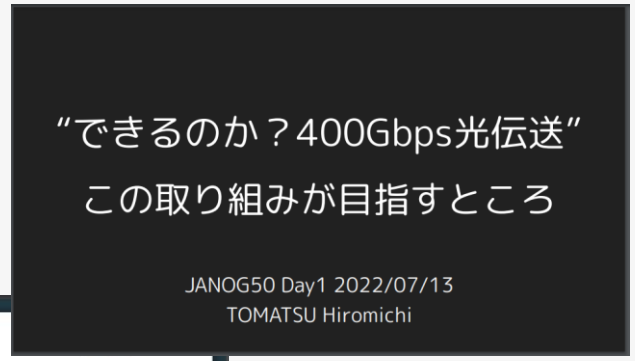
©Macnica,Inc.

JANOG 50 @ 函館 でこんな発表がありました













出典：https://www.janog.gr.jp/meeting/janog50/400g/

「400G-ZR/ZR+の技術解説」を深堀りしてみる

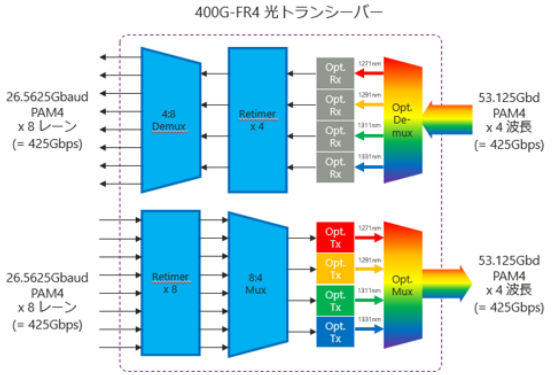
- デジタルコヒーレント方式が長距離・大容量通信で使われるのはなぜか？
- 実機も触ってみる

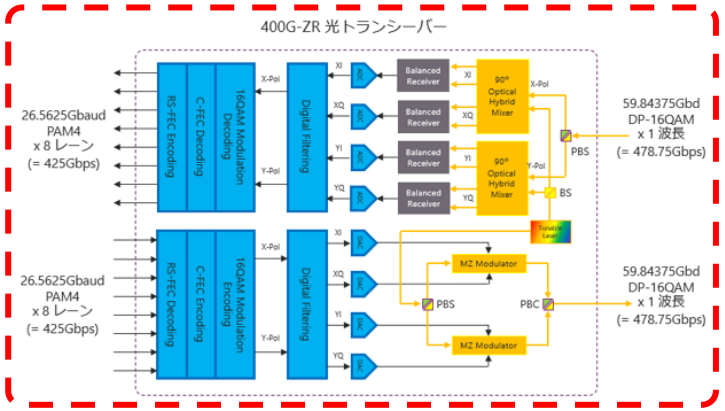


よくある400G光トランシーバーとは何が違う？

Confidential

	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+



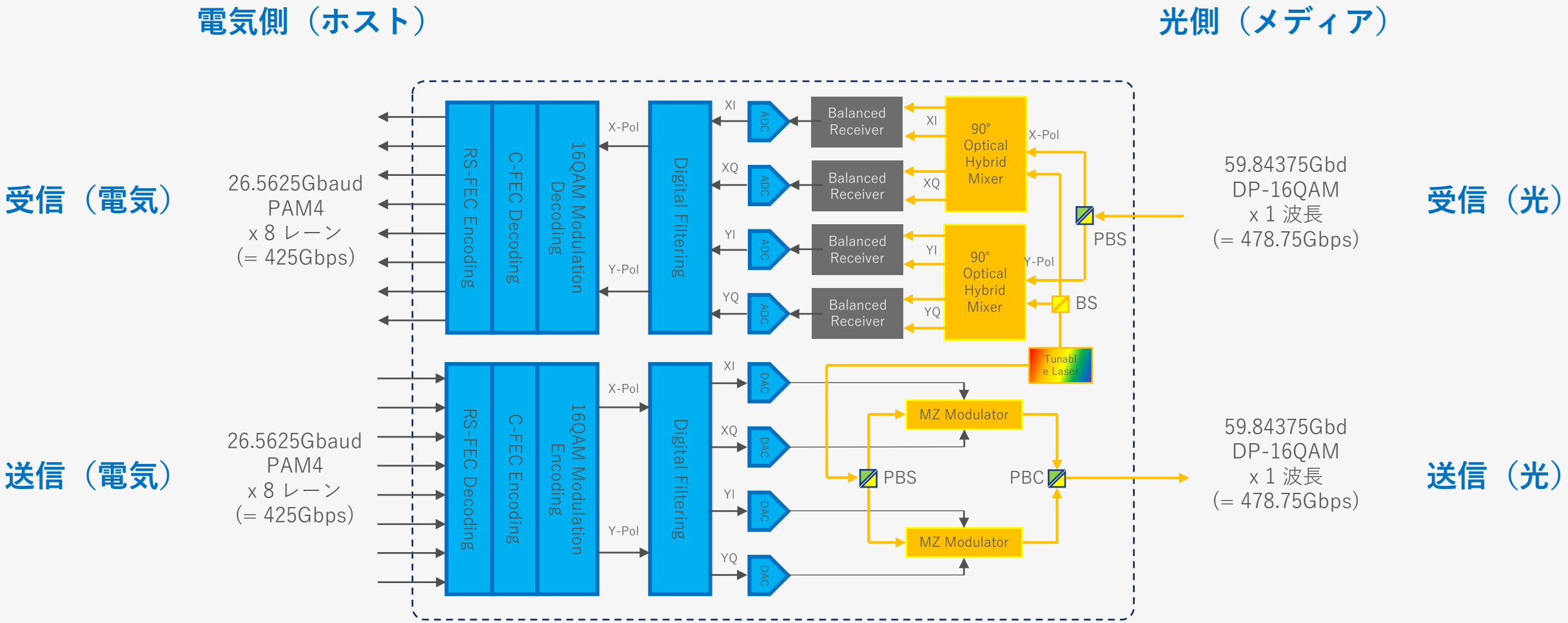


MACNICA 50

© Macnica, Inc.

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

400G-ZR 光トランシーバのブロック図



©Macnica,Inc.

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

©Macnica,Inc.

電気側（ホスト）のデータレート

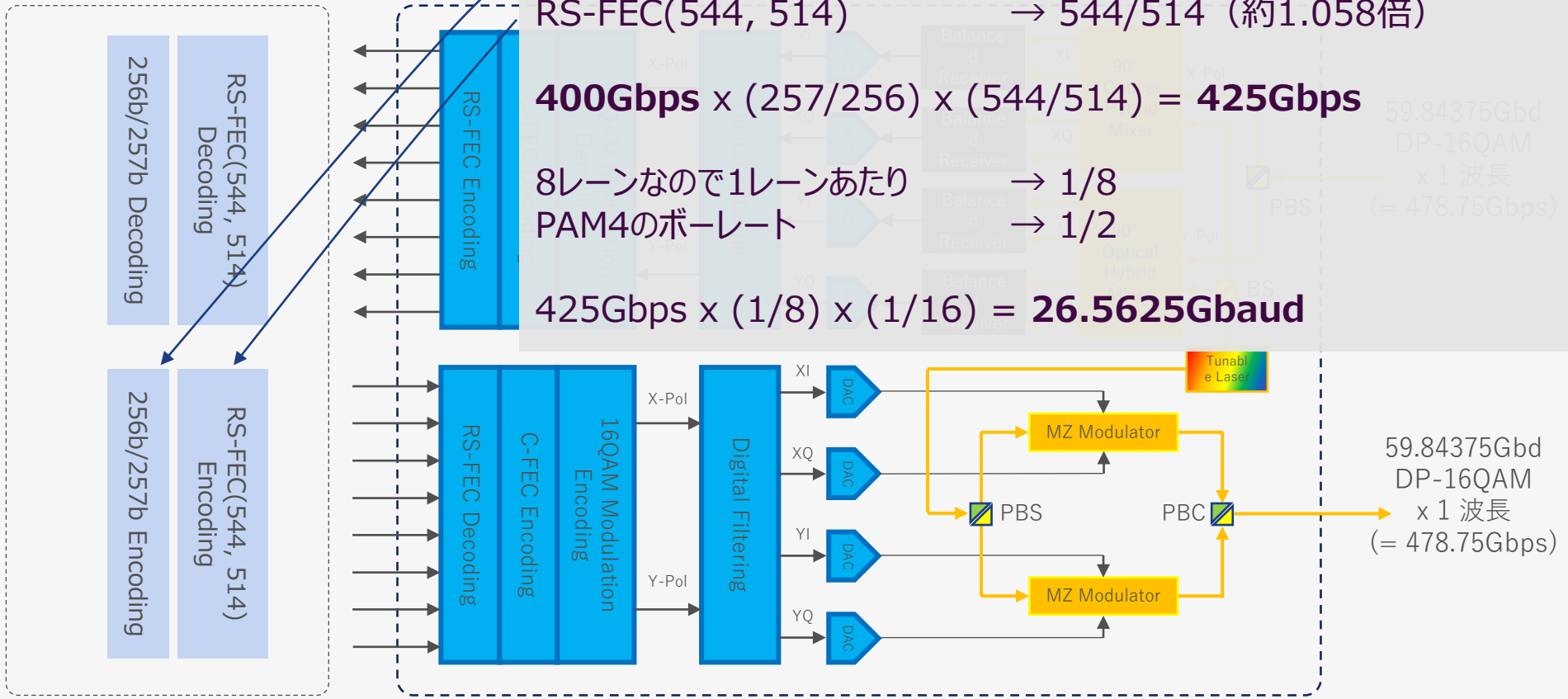
なぜ26.5625Gbdなのか？！

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）

400Gbps x (257/256) x (544/514) = **425Gbps**

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

425Gbps x (1/8) x (1/16) = **26.5625Gbaud**



400Gbps　425Gbps　478.75Gbps

参考：https://www.ieee802.org/3/bs/public/17_03/gustlin_3bs_03_0317.pdf

©Macnica,Inc.

光側（メディア）のデータレート

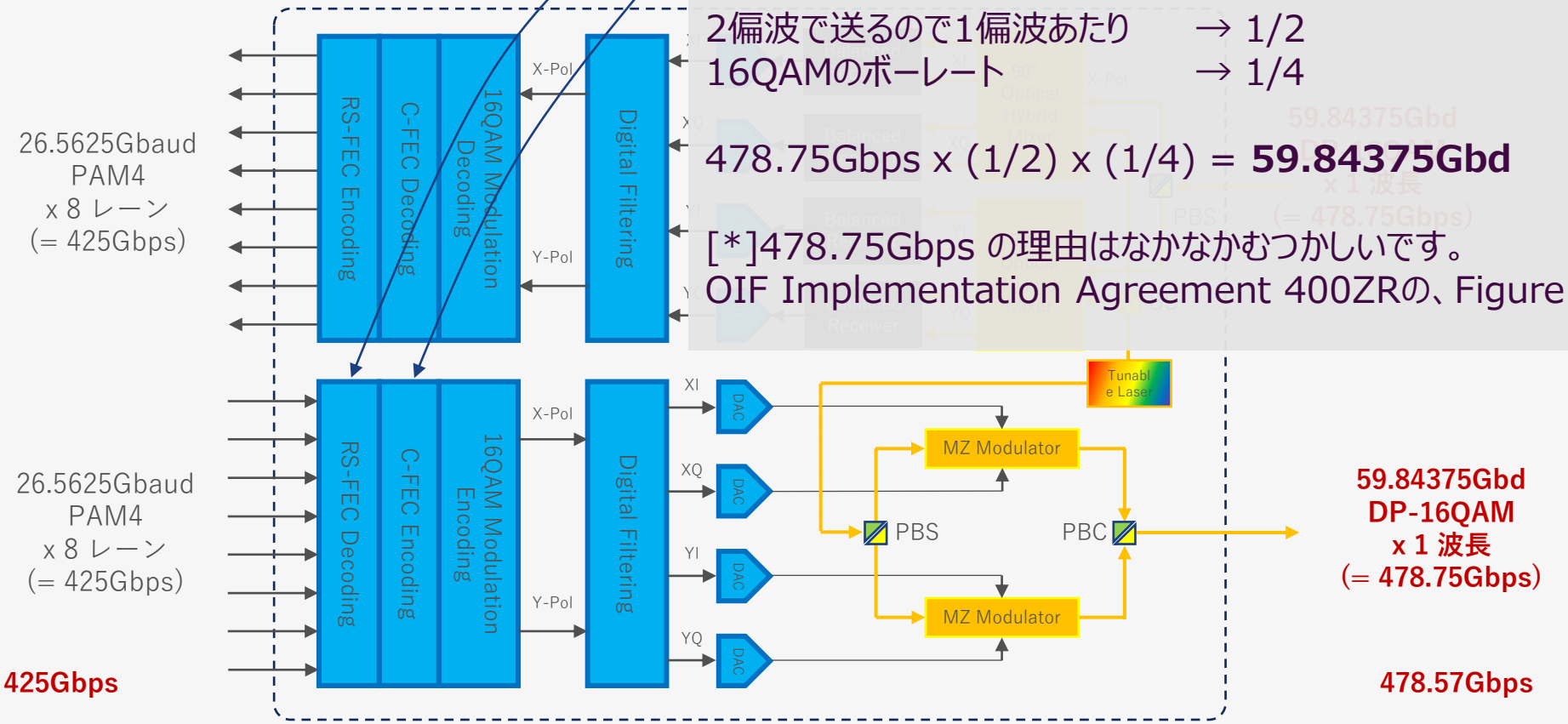
なぜ59.84375Gbdなのか？！

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

478.75Gbps x (1/2) x (1/4) = **59.84375Gbd**

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



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

©Macnica,Inc.

Agenda

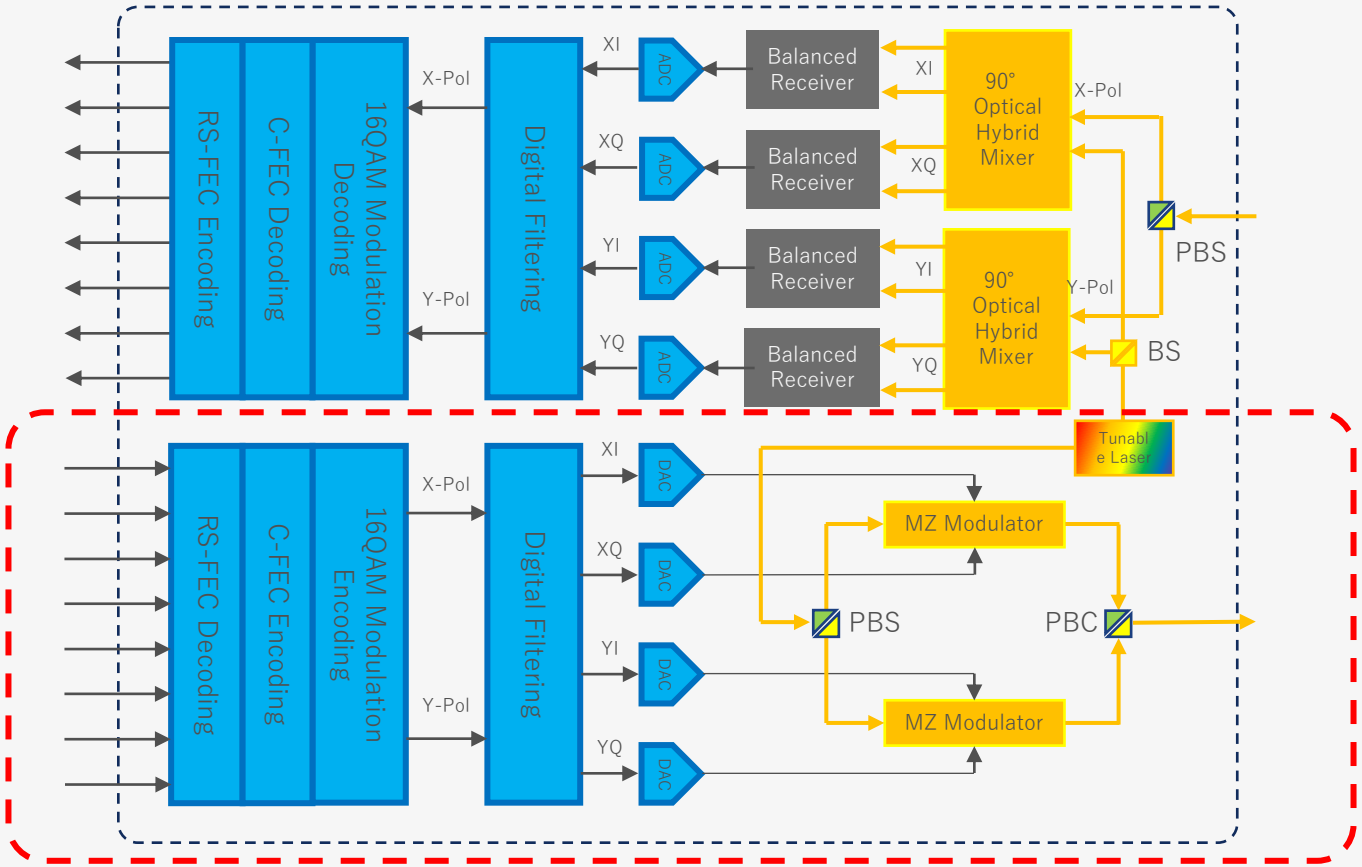
1. JANOG 50での発表
2. 電気側（ホスト）と光側（メディア）のデータレート
3. 変調の方法（送信側）
4. 検出の方法（受信側）
5. FECはどこでかけるのか？
6. まとめ

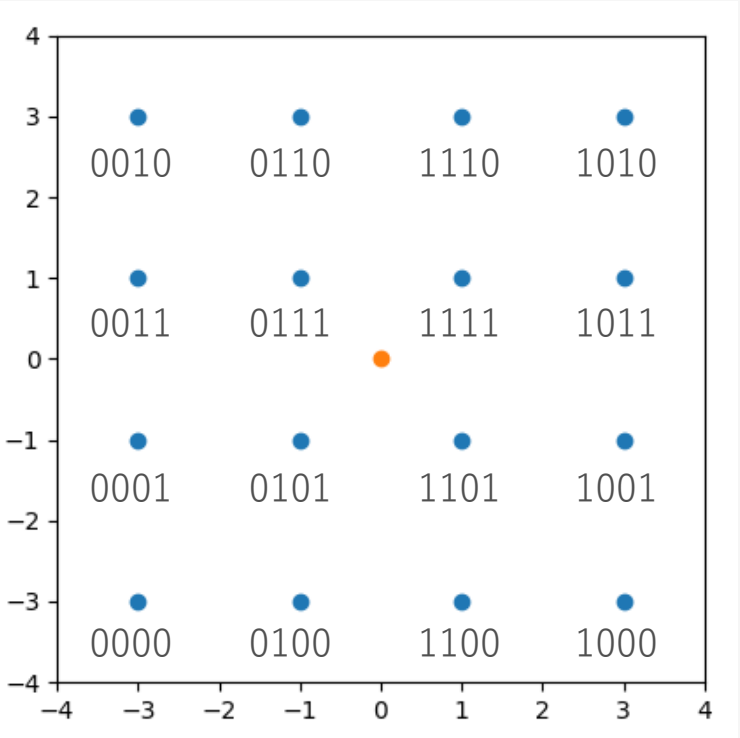
7. 実機デモの構成
8. トランシーバからの各種レポート例

©Macnica,Inc.

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

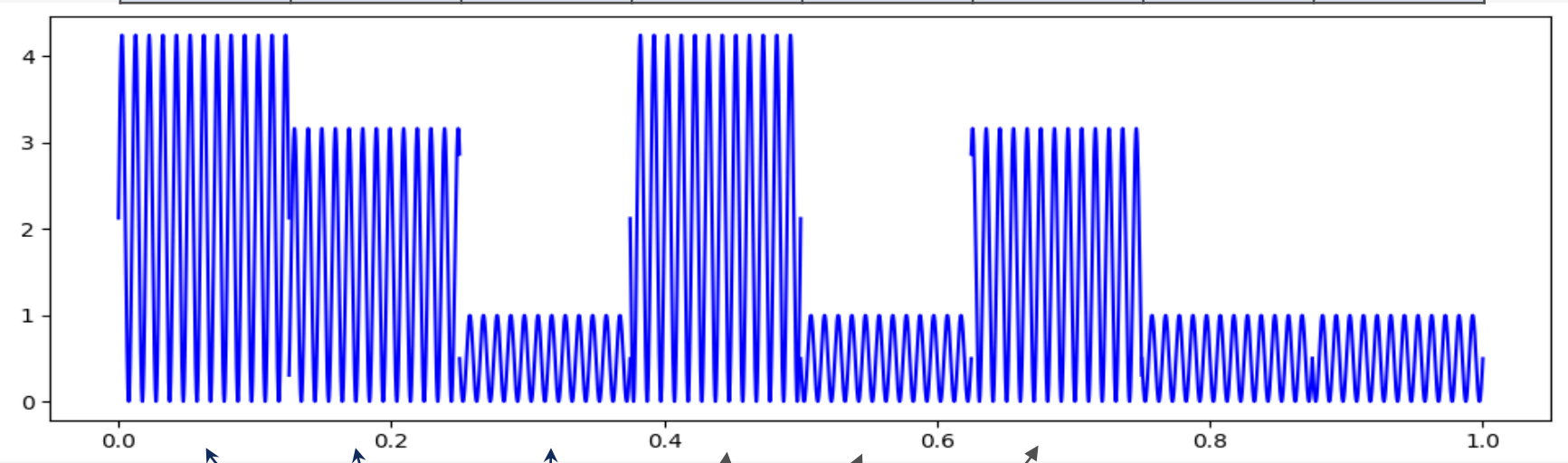
振幅だけでなく位相も使う
・一度にたくさんのデータを送ることができる（ボーレートを低く保ちつつ、ビットレートを速くできる）
・大容量通信に向いている

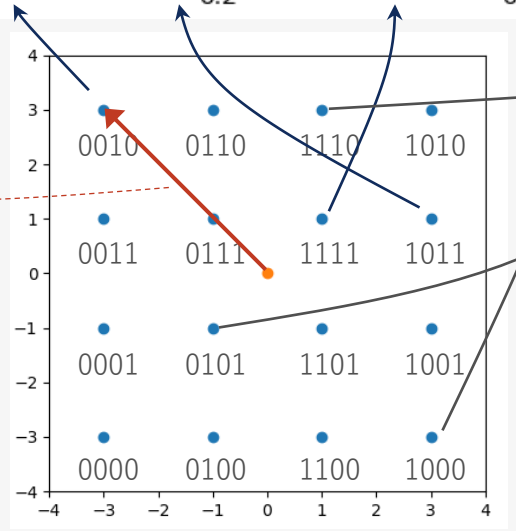
©Macnica,Inc.

変調方式 ～ 16QAM　（光波形）

0010	1011	1111	1000	0101	1110	0101	0111
√18 3π/4	√10 π/10	1 π/4	√18 -π/4	1 -3π/4	√10 4π/10	1 -3π/4	1 3π/4

振幅=√18
位相=3π/4



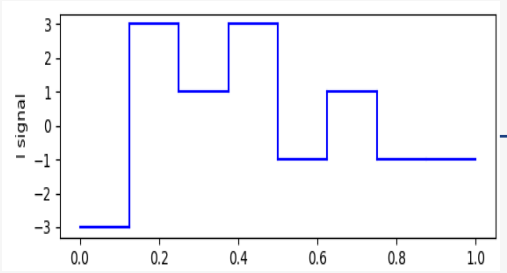


波形のイメージ（縦軸：光の強さ、横軸：時間）
実際はフィルタにより波形がなまっています

©Macnica,Inc.

変調方式 ～ 16QAM　（変調器）

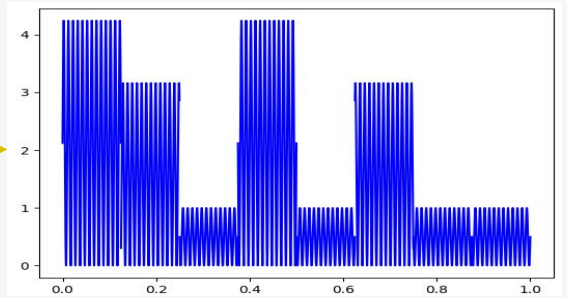
I信号



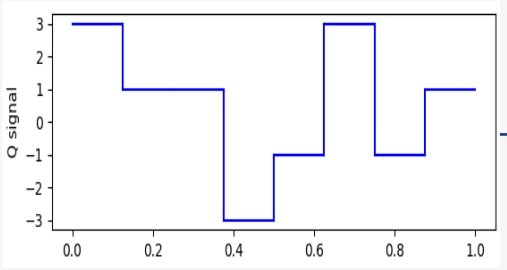
Tunable Laser

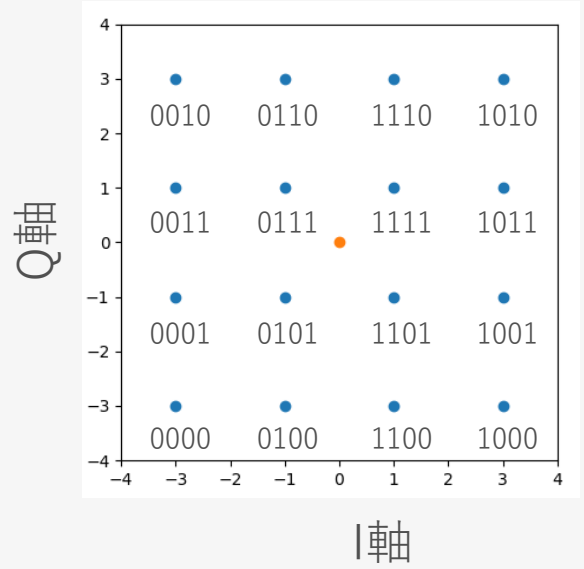
MZ Modulator

16QAM信号



Q信号



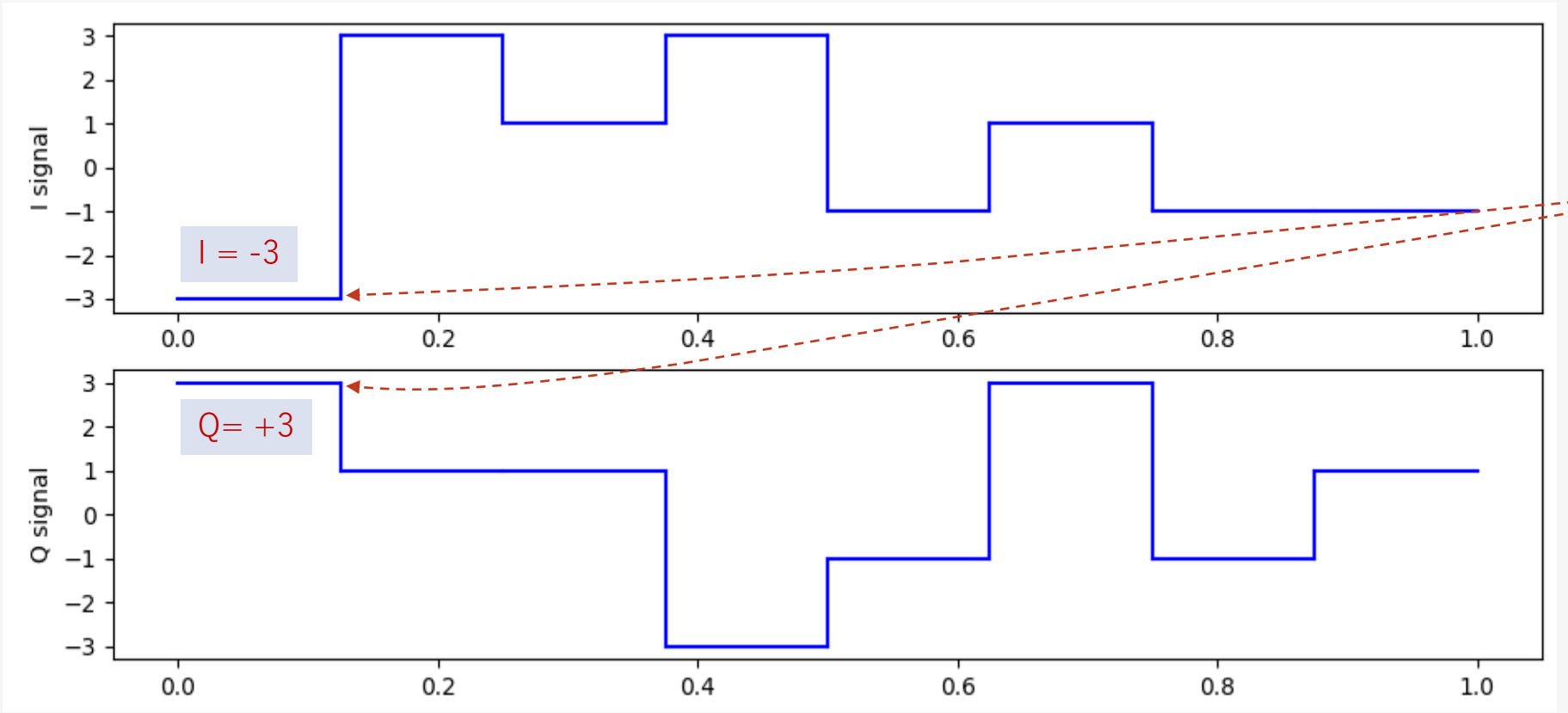


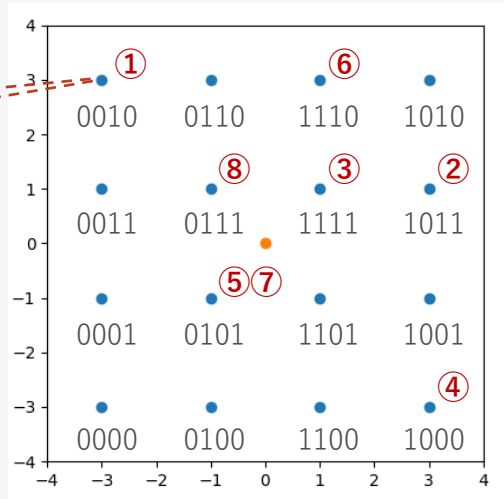
波形のイメージ（縦軸：信号レベル、横軸：時間）
実際はフィルタにより波形がなまっています

©Macnica,Inc.

変調方式 ～ 16QAM　（IQ信号）

0010	1011	1111	1000	0101	1110	0101	0111
√18 3π/4	√10 π/10	1 π/4	√18 -π/4	1 -3π/4	√10 4π/10	1 -3π/4	1 3π/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

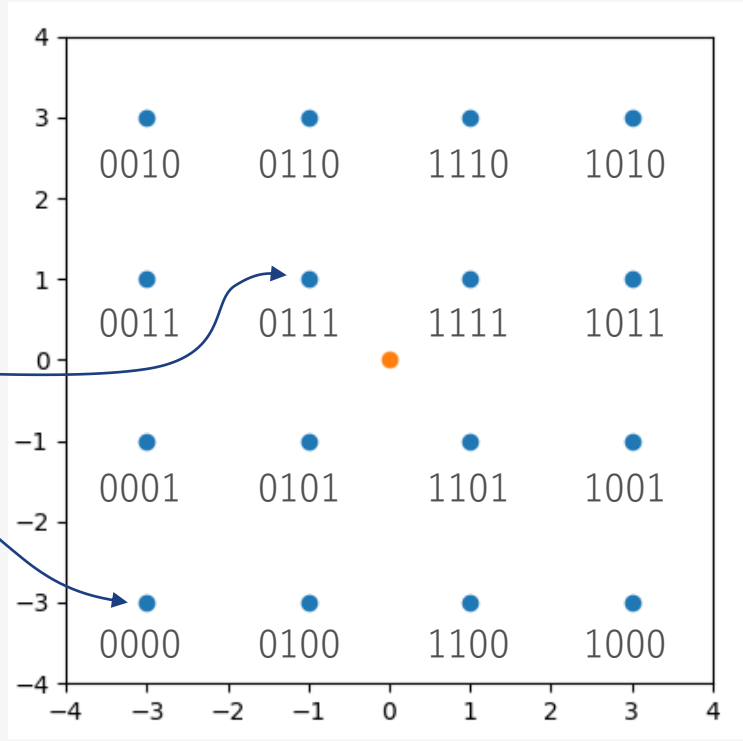
©Macnica,Inc.

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



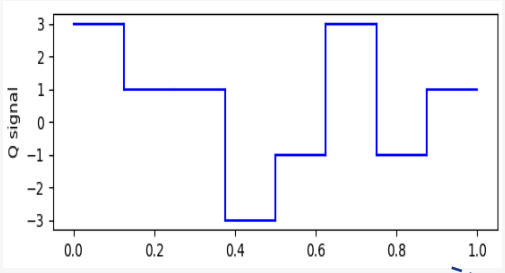
16QAMのマッピング例
横軸：I、縦軸：Q

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

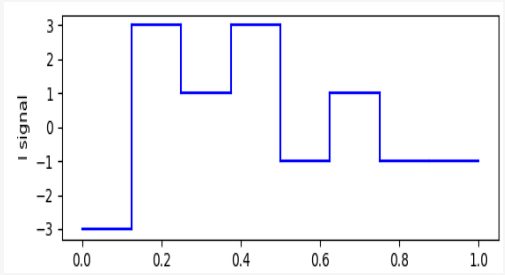
©Macnica,Inc.

変調方式 ～ 16QAM　（XI, XQ, YI, YQ）

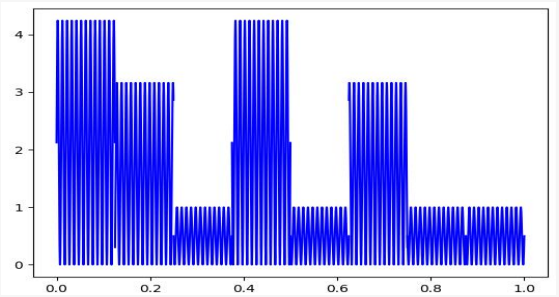
XQ信号

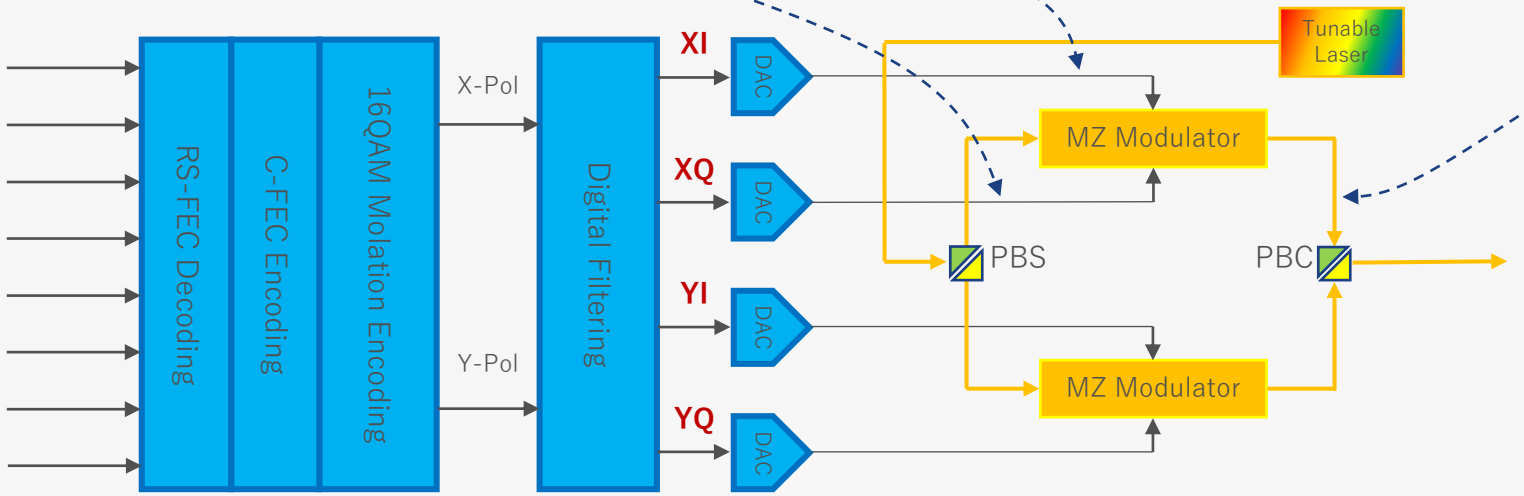


XI信号



16QAM信号（X）





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

©Macnica,Inc.

Agenda

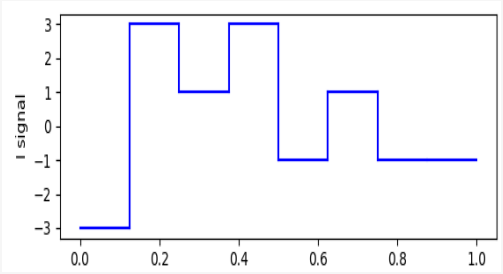
1. JANOG 50での発表
2. 電気側（ホスト）と光側（メディア）のデータレート
3. 変調の方法（送信側）
4. 検出の方法（受信側）
5. FECはどこでかけるのか？
6. まとめ

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

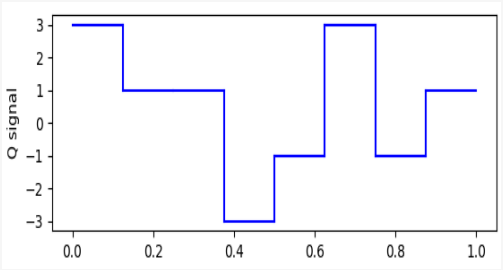
©Macnica,Inc.

コヒーレント検出

I信号



DSPのパワーで
各種の補正をかける

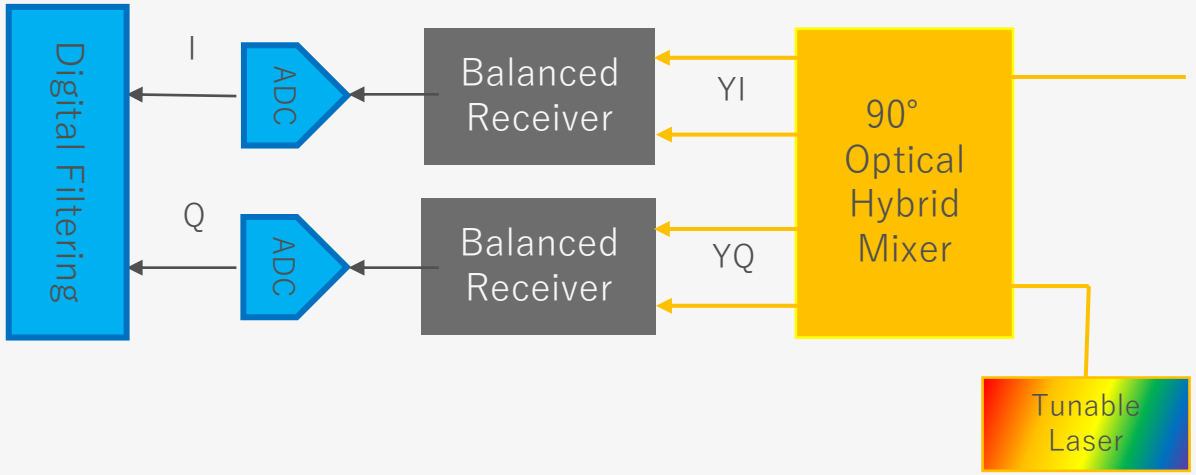


Q信号

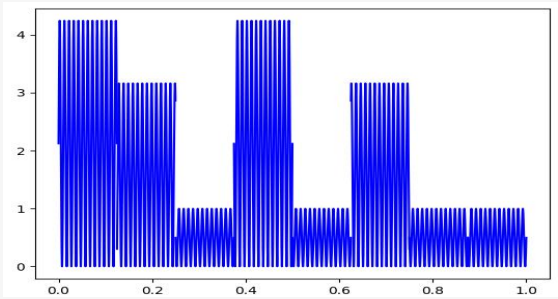
高速AD変換で
取り込む

IQ成分を
取り出す

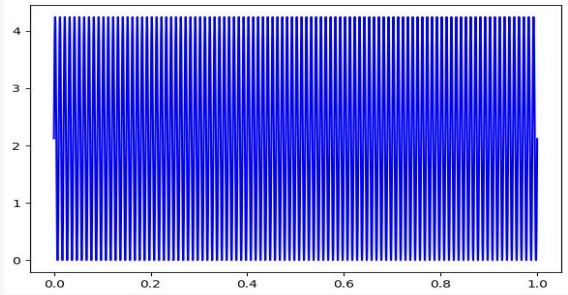
変調光と
ローカル光を
干渉させる



16QAM変調光



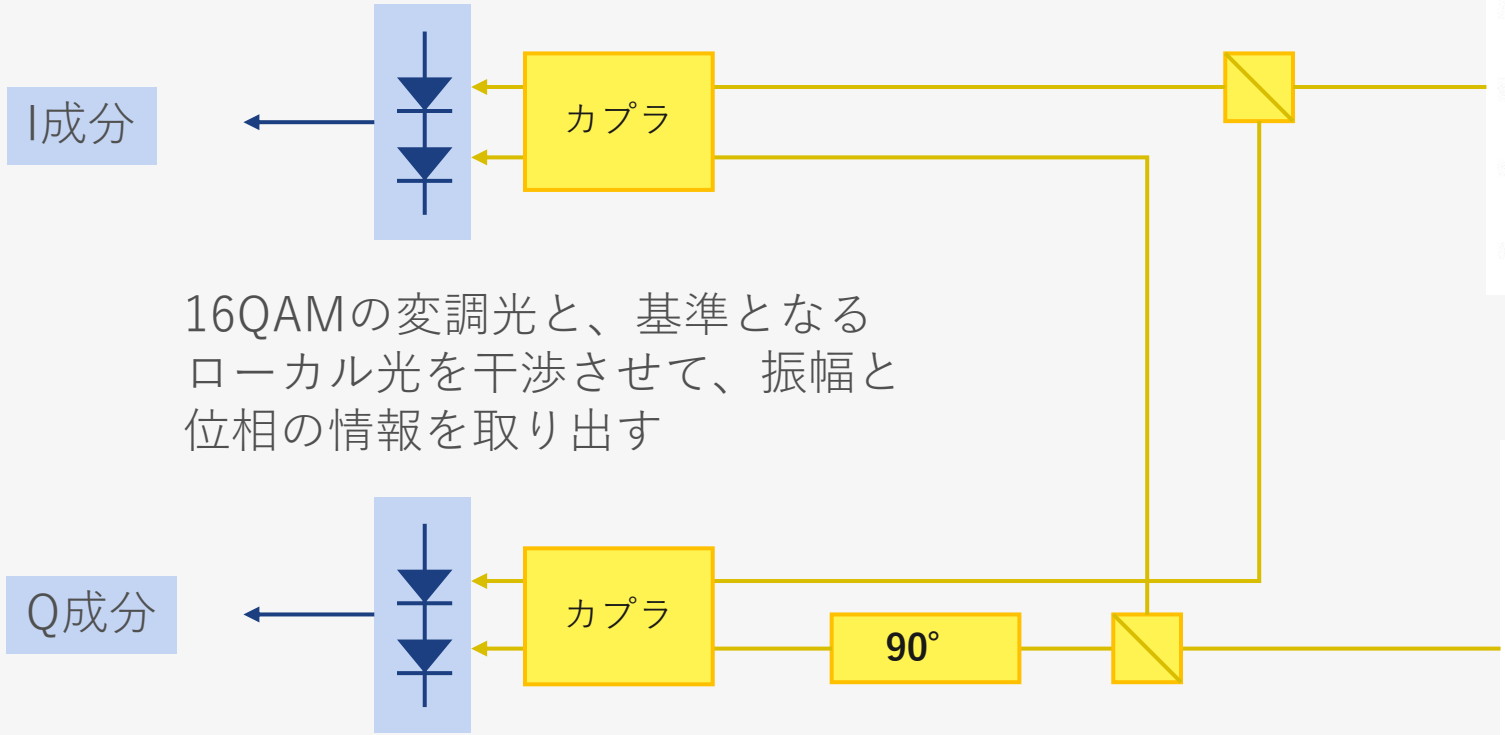
ローカル光



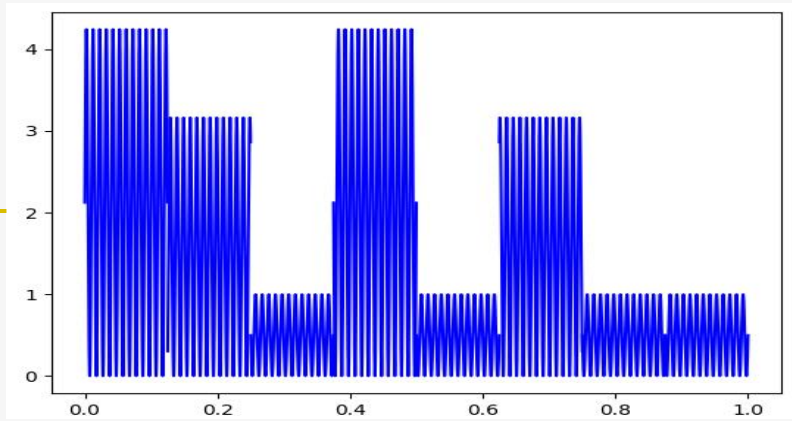
波形のイメージ（縦軸：信号レベル、横軸：時間）
実際はフィルタにより波形がなまっています

©Macnica,Inc.

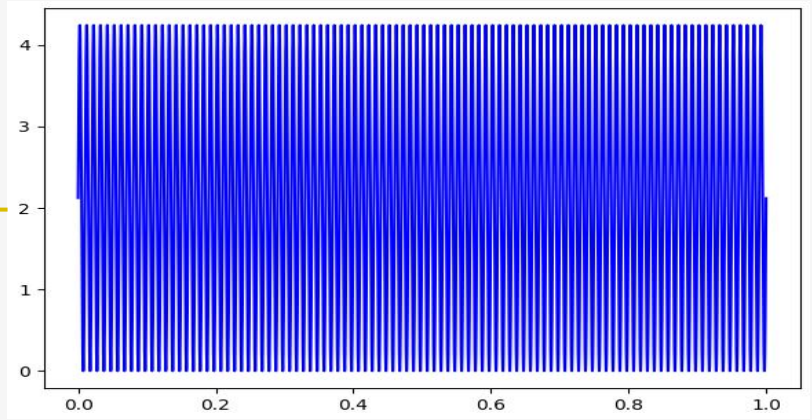
コヒーレント検出　（干渉させる）



16QAM変調光



ローカル光

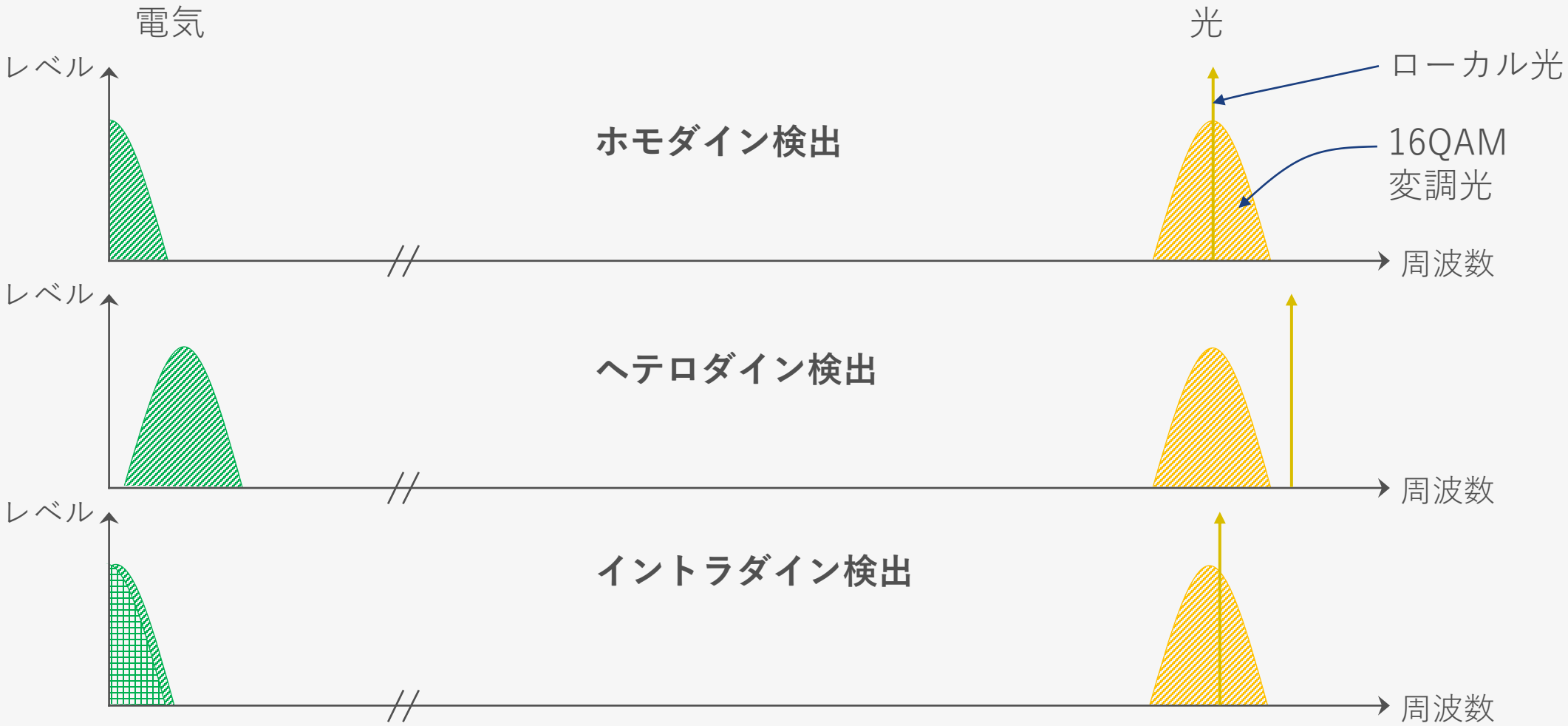


大きなレベルのローカル光を使う
→ 変調光のレベルが小さくても大きなレベルのI/Q成分が得られる
→ 受信感度が良くなる

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

©Macnica,Inc.

コヒーレント検出　（変調光とローカル光の位置関係）

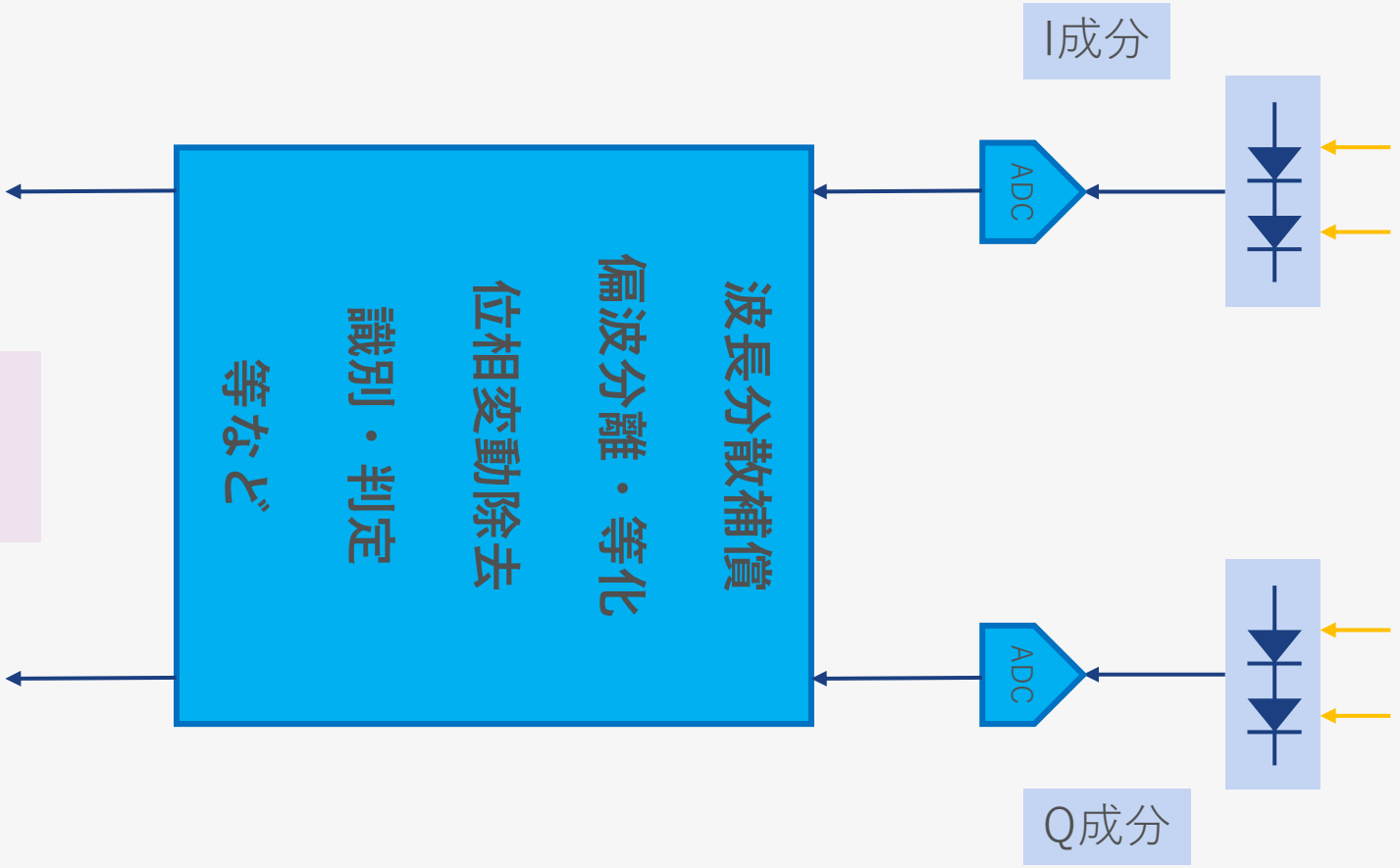


受信した変調光と同じスペクトルの電気信号をDSPに渡す（振幅と位相情報の両方を渡す）
→ DSPにて各種の補正をかけることができる

©Macnica,Inc.

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



出典：https://www.ieice-hbkb.org/files/05/05gun_03hen_03.pdf

©Macnica,Inc.

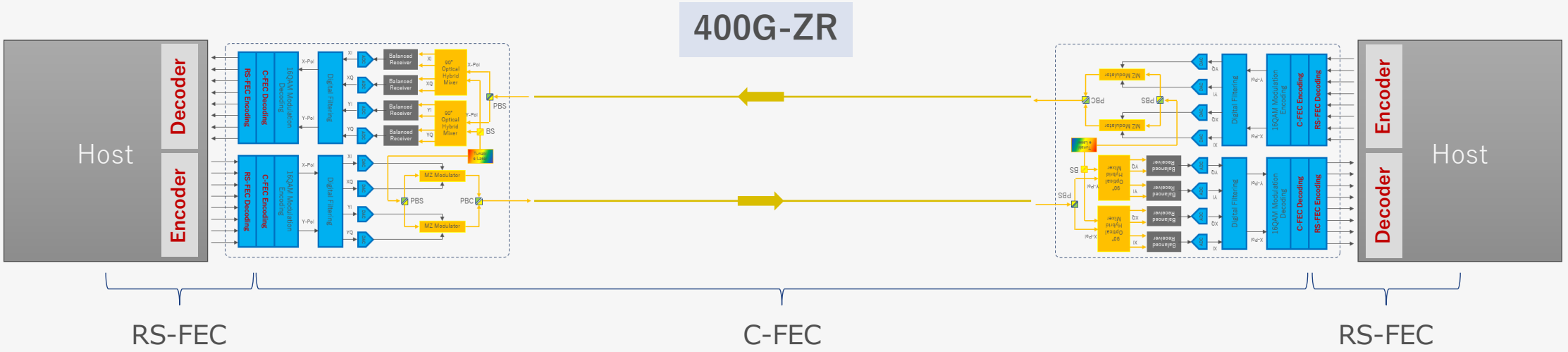
Agenda

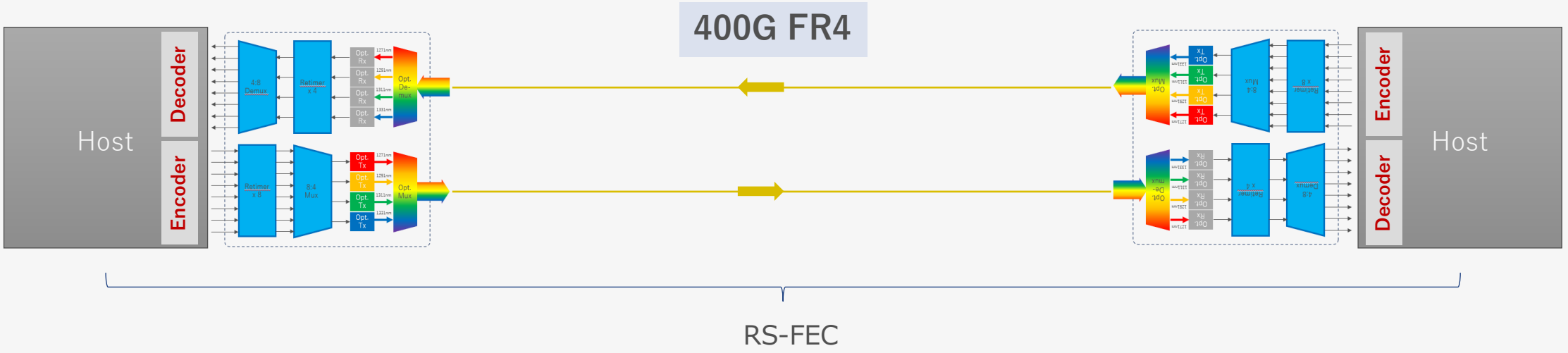
1. JANOG 50での発表
2. 電気側（ホスト）と光側（メディア）のデータレート
3. 変調の方法（送信側）
4. 検出の方法（受信側）
5. FECはどこでかけるのか？
6. まとめ

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

©Macnica,Inc.

FECをかける場所


400G-ZR
Host
Decoder
Encoder
Host
Encoder
Decoder
RS-FEC
C-FEC
RS-FEC


400G FR4
Host
Decoder
Encoder
Host
Encoder
Decoder
RS-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

©Macnica,Inc.

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+

同じ波長で2つの直行する変調光を送る → **大容量通信に向く**

振幅と位相を使って、16個のシンボルそれぞれに4ビットをマッピング → 1シンボルで4ビット

変調波とローカル光を干渉させる → 強いローカル光を使うことで、受信感度向上

変調光の振幅と位相情報の両方を電気信号に渡す

高速A/D変換してDSPで各種の補正をかけることができる → **長距離通信に向く**

電気側のRS-FECをいったん終端し、光側で別途C-FECをかける

©Macnica,Inc.

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

©Macnica,Inc.

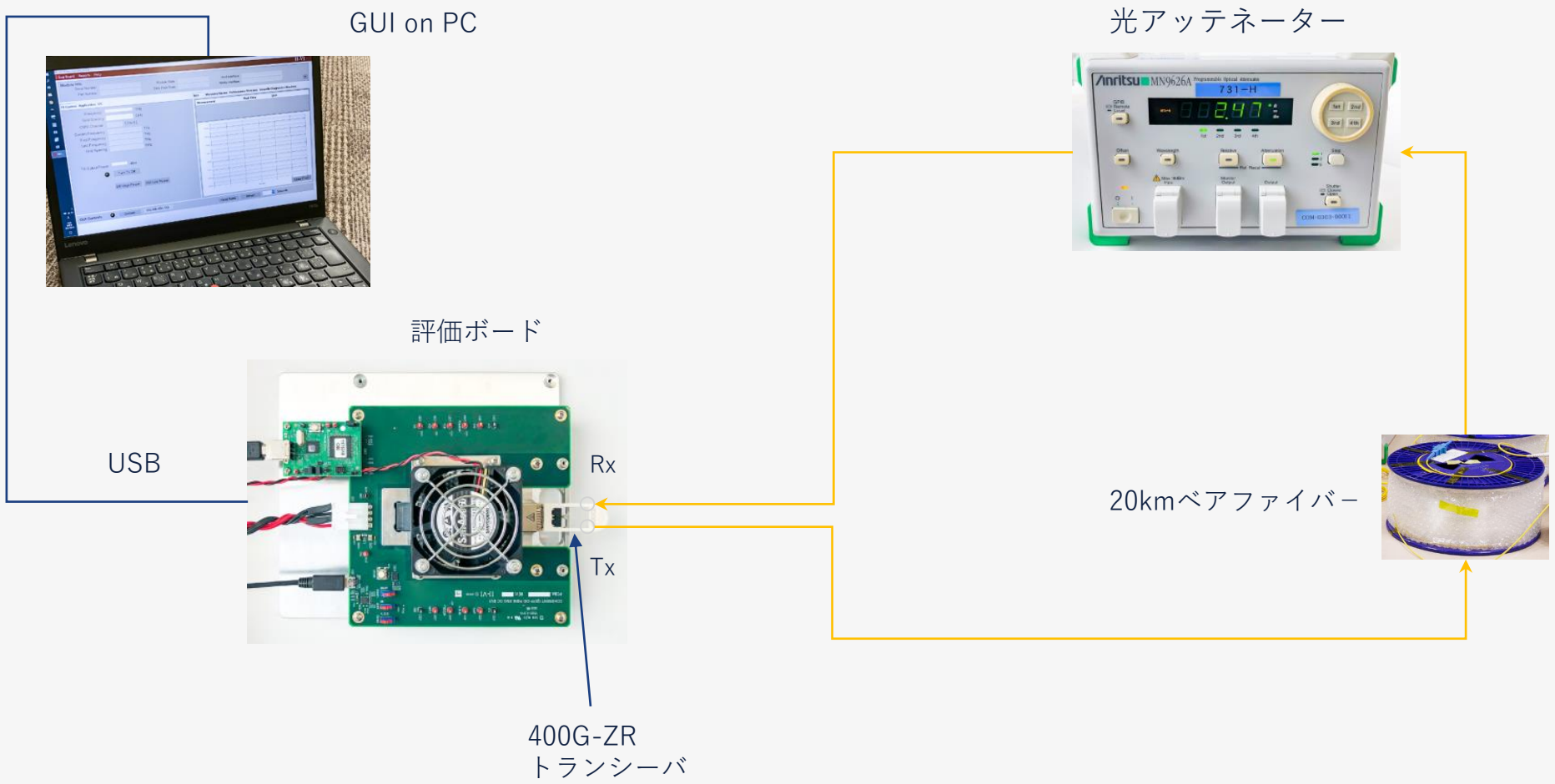
Agenda

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

©Macnica,Inc.

実機デモ



©Macnica,Inc.



「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」