

# NRZ と PAM4 シグナリングのための 光帯域要件

ホワイト・ペーパー

光チャンネルの光帯域と電気帯域、また光リファレンス・レシーバ（ORR）との関係については混乱があります。PAM4 シグナリングには、レシーバが仕様に適合するための、より複雑な最小帯域要件があります。

最近まで、ボー・レートの 0.75 倍で計算される光と電気の帯域幅は同じ結果でしたが、新しい IEEE の仕様変更ではこれがボー・レートの 0.5 倍になり、電気と光の帯域幅は同じ値にならなくなったため、この 2 つの関係において混乱が生じています。このホワイト・ペーパーでは、これらの用語を正しく定義し、計算からその関係を説明し、光チャンネルのための光と電気の帯域計算を理解し、確実に計算するための基本について説明します。

**光帯域**は、チャンネルにおける光パワーが 1/2 になる周波数と定義されます。パワーは W（ワット）で計算されるので、 $10 \times \log_{10}(W/W_0)$  で -3dB ポイントを求めます。これを、光デシベル（dBo）と呼びます。この式で、 $W_0$  は DC におけるパワー・レベルであり、DC における周波数応答が 0dB になるように正規化するために使用されます。

電圧で信号レベルを測定する電気チャンネルでは、**電気帯域**は今でもエネルギーが 1/2 になったポイント（-3dB ポイント）と定義されます。しかし、数式が  $10 \times \log_{10}(V^2/V_0^2)$  に変更されています。電力は電圧の二乗に比例するため、電圧は二乗になっています。また、 $V_0$  は DC における電圧です。

対数の公式を使い、電圧にある二乗を対数の前に移動します。

$$10 \times \log_{10}(V^2/V_0^2) = 2 \times 10 \times \log_{10}(V/V_0) = 20 \times \log_{10}(V/V_0)$$

光レシーバは、二乗検波器と呼ばれるものを使用しています。ワットは直接ボルト（電圧）に変換されます。レシーバの変換利得は W 入力と V 出力の比率であり、 $V = cW$  では、電圧（V）はワット（W）とレシーバの変換利得（c）の掛け算になります。この式から、電力と電圧はリニアな関係であることを意味しています。

## NRZとPAM4 シグナリングのための光帯域要件

ホワイトペーパー

光チャンネルでは、チャンネルの入射信号は光で供給され、ワットで測定されます。O/E（光／電気変換）後の信号は電圧で測定されます。したがって、入射光信号の帯域、または O/E 出力における電気信号の帯域のいずれかについて言及します。レシーバの電気信号出力の帯域は  $20 \times \log_{10}(V/V_o)$  であり、この式に  $V = cW$  を代入すると以下ようになります。

$$20 \times \log_{10}(V/V_o) = 20 \times \log_{10}(cW/cW_o) = 20 \times \log_{10}(W/W_o)$$

これは電氣的な dB（dBe）であり、モジュールの電気帯域の定義で使用されます。光デシベルの式は、先に説明したように  $10 \times \log_{10}(W/W_o)$  です。電気デシベル（dBe）は、光デシベル（dBo）の 2 倍になります。

$$dBo = 10 \times \log_{10}(W/W_o)$$

$$dBe = 20 \times \log_{10}(W/W_o)$$

この 2 倍の係数（ $dBe = 2 \times dBo$ ）は、電気帯域（BW）を光帯域（BW）に変換する際に重要になります。

### NRZ 信号の 4 次フィルタ

IEEE は、オシロスコープのリファレンス・レシーバとして、4 次のベッセル・フィルタを定義しています。このフィルタは、NRZ 信号ではビット・レートの 0.75 倍において  $-3\text{dBe}$  と定義されます。図 1 の例は、25Gbps の ORR フィルタを示しています。 $-3\text{dBe}$  ポイントは、 $0.75 \times 25 = 18.75\text{GHz}$  です。この図から、 $-6\text{dBe}$  ポイントは  $25.625\text{GHz}$  となります。 $dBe = 2 \times dBo$  であるため、 $-6\text{dBe}$  ポイントは  $-3\text{dBo}$  ポイントになります。このフィルタでは、 $-3\text{dBo}$  ポイントは  $25.625\text{GHz}$  になるため、都合の良いことに  $-3\text{dBe}$  ポイントはちょうどビット・レートになります。これは、ビット・レートの 0.75 倍で定義される任意の 4 次フィルタに当てはまります。したがって NRZ 信号では、周波数帯域と ORR はほとんど同じ意味で使用されます。25GHz の光（ $-3\text{dBo}$ ）帯域は、ビット・レートの 0.75 倍の関係による 25Gbps の ORR フィルタとほぼ同じになります。

### PAM4 信号で再定義された ORR

400G-Ethernet のタスクフォースは最近、PAM4 シグナリングの ORR を再定義して、ボー・レートの 0.5 倍にしました。この新しい関係により、光帯域と ORR のフィルタ帯域を同じ意味で使用できなくなりました。したがって、光の帯域要件は計算する必要があります。

### 光帯域要件の求め方

2 つの例で手順を説明します。

# NRZとPAM4 シグナリングのための光帯域要件

ホワイトペーパー

## 例 1 – NRZ

56Gbps NRZ シグナリングの ORR フィルタは定義されていませんが、25Gbps で使用された  $-3\text{dBe}$  がビット・レートの  $0.75$  倍の関係を適用すると、56Gbps における  $-3\text{dBo}$  ポイントは  $56\text{Gbps} \times 0.75 = 42\text{GHz}$  になります。

## 例 2 – PAM4

53.125Gbaud、PAM4 ORR の電気帯域は  $26.56\text{GHz}$  ( $53.125 \times 0.5$ ) であり、光帯域は  $35.41\text{GHz}$  ( $53.125\text{Gbaud} \times 0.5 / 0.75$ ) です。したがって、PAM4 における正しい ORR フィルタは、 $-3\text{dBo}$  ポイントで  $35.41\text{GHz}$  になります。

	ビット・レート	光	電気
単位	Gbaud	GHz	GHz
旧来の方法	53.13	54.45	39.84
新しい方法	53.13	35.41	26.56

表 1. 新旧の定義による、53.125Gbd PAM4 信号の ORR 帯域。旧来の定義では、ORR のビット・レートと光帯域は非常に近い関係があった。新しい定義では、ビット・レートと光帯域には関係性がなくなっている

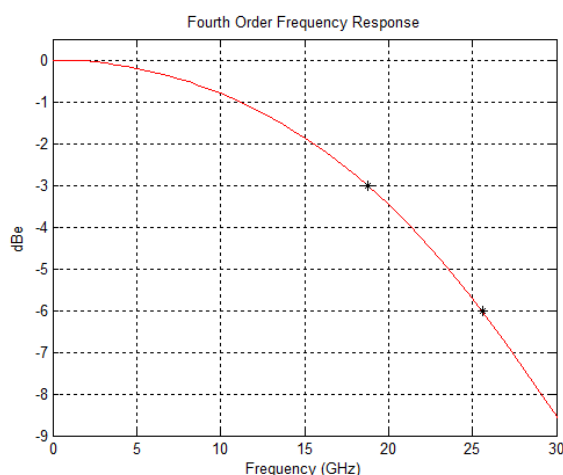


図 1. 25Gbps ORR (光リファレンス・レシーバ) のグラフ。 $-3\text{dBe}$  ポイントが  $18.75\text{GHz}$ 、 $-6\text{dBe}$  ( $-3\text{dBo}$ ) ポイントが  $1.025 \times 25\text{GHz} = 25.625\text{GHz}$  となっている

## 付録 – 計算に関する補足情報

4 次のフィルタ周波数応答は、ITU-T G.691 で以下のように定義されています。

$$H(y) = \frac{105}{105 + 105y + 45y^2 + 10y^3 + y^4}$$

## NRZとPAM4 シグナリングのための光帯域要件

ホワイトペーパー

分子の係数は4次ベッセル多項式からのものであり、 $y$  は周波数の関数です。

$$y(f_{BR}) = \frac{2.114f_{BR}j}{0.75}$$

ここで、2.114 は応答調整のために使用され、0.75 はフィルタがパワーの半分になるポイント、 $0.75 f_{BR}$  を求めます。新しい400GB Ethernet 規格では、0.75 は0.5に置き換わっています。

正規化周波数は、周波数をボー・レートで割ったものになります。

$$f_{BR} = \frac{f}{BR}$$

ここで、 $f$  は周波数、 $BR$  は ORR フィルタのボー・レートです。

簡単にするため、 $H_y$  は正規化周波数の関数と定義します。

$$H_y(f_{BR}) = H(y(f_{BR}))$$

ボー・レートでフィルタを正規化したため、5GHz の 10Gbd ORR の応答を計算するには、5GHz/10GHz の比をとって先の式に代入します。

$$H_y(0.5) = 0.139 - 0.842j$$

複素数であるため、dB に変換する前に絶対値にする必要があります。

フィルタの  $-3\text{dB}$  ポイントが  $0.75 \times$  ボー・レートであることを確認するため、0.75 における関数  $H_y$  を検証します。

$$|H_y(0.75)| = 0.7071 = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

$H_y$  が 1.025 で検証できるならば、フィルタの  $-6\text{dB}$  ポイントは  $1.025 \times$  ボー・レートになります。

$$|H_y(1.025)| = 0.4992 \approx 0.5$$

ここで、

$$20 \times \log_{10}(0.7071) = -3$$

$$20 \times \log_{10}(0.5) = -6$$

