

# PAM4 ビットエラーレート測定

シグナル クオリティ アナライザ-R MP1900A シリーズ

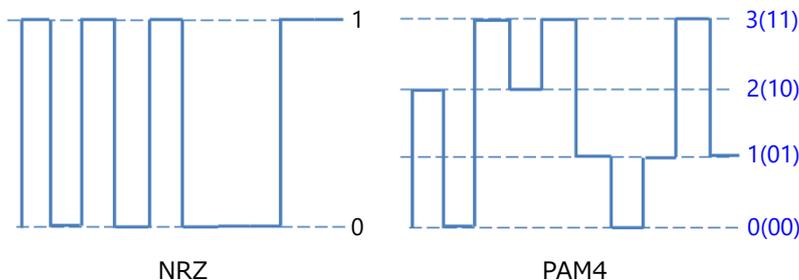
PAM4 BERT MU196020A/MU196040B

## 目次

<b>1</b>	<b>はじめに</b> .....	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>PAM4 信号のビットエラー、PAM4 シンボルエラー概要</b> .....	<b>2</b>
2.1	ビットエラー、PAM4 シンボルエラー概要 .....	2
2.2	GRAY-CODE について .....	4
<b>3</b>	<b>MP1900A PAM4 BERT による PAM4 信号測定ソリューション</b> .....	<b>5</b>
3.1	BER 測定、PAM4 SER 測定、キャプチャー機能.....	5
3.2	GRAY-CODE 機能、GRAY-DECODE と FEC 解析.....	7
<b>4</b>	<b>まとめ</b> .....	<b>8</b>

# 1 はじめに

5G 通信やクラウドコンピューティングの高速データ通信網を支えるデータセンタでは、400 GbE 通信規格の導入が進められています。400 GbE では、伝送フォーマットとして PAM4 が採用されています。従来の NRZ 方式は、単位時間あたりに 1 ビット、0 または 1 の 2 値のデータを伝送するのにに対し、PAM4 は 2 ビット、00、01、10、11 の 4 値で伝送するため、2 倍の伝送容量を実現することができます。



通信品質の評価の際、NRZ 方式では、1↔0 値間の変化を検出し、ビットエラーとして表しますが、PAM4 方式では、0(00),1(01),2(10),3(11)の 4 値間での複数のエラーケースが想定され、従来のビットエラーだけでなく、PAM4 シンボルエラーを評価する必要があります。

本アプリケーションノートでは、PAM4 信号のビットエラー、PAM4 シンボルエラーの概要、およびシグナル クオリティ アナライザ-R MP1900A シリーズによる PAM4 エラー測定ソリューションの説明を行います。

## 2 PAM4 信号のビットエラー、PAM4 シンボルエラー概要

### 2.1 ビットエラー、PAM4 シンボルエラー概要

前述のように、NRZ と PAM4 方式では、単位時間あたりに伝送する情報量の違いがあります。それにより、NRZ での伝送エラーケースは 2 通りであるのに対して、PAM4 では 12 通りのエラーケースが考えられます。NRZ、PAM4 信号で表す情報の概要は以下のようになります。

表 2.1-1 NRZ、PAM4 信号概要

	NRZ	PAM4
パルスレベル値	2	4
ビット数 (/単位時間)	1	2
ビット定義 (/単位時間)	0, 1	00, 01, 10, 11
伝送エラーケース	2 通り	12 通り

送信側でのビット列に対して、伝送エラーが発生した場合、受信側で検出される各エラーケースは以下のとおりです。



表 2.1-2 NRZ のエラーケース

送信ビット	→	受信ビット	ビットエラー数
0	伝送エラー	1	1
1		0	1

表 2.1-3 PAM4のエラーケース

送信ビット		受信ビット	ビットエラー数	PAM4 シンボルエラー数
00	→ 伝送エラー	01	1	1
		10	1	1
		11	2	1
01		00	1	1
		10	2	1
		11	1	1
10		00	1	1
		01	2	1
		11	1	1
11		00	2	1
		01	1	1
		10	1	1

2ビット列による4値で信号を表現するPAM4では、上記のように1(01)⇔2(10)、0(00)⇔3(11)間でレベル変化するエラーが生じた場合、受信側で検出されるビットエラー数は2ビットとなります。また、PAM4ではビットエラーとは別に、単位時間あたりのエラー数を評価するための指標として、PAM4シンボルエラーが用いられます。上の伝送エラーの例で示しているすべてのエラーケースは1PAM4シンボルエラーとして検出されます。

IEEE802.3で標準化されている、PAM4を採用するインタフェース400GAUI-8 C2C(Annex 120D)や400GAUI-8 C2M(Annex 120E)のレシーバテストでは、従来のNRZと同様に、ビットエラーを検出することによるBER(Bit Error Ratio)性能が規定されています。上記のようにPAM4では複数のエラーケースがあり、さらに1ビットまたは2ビットのビットエラーとなるケースが存在するため、エラー要因の特定やデバッグには、従来のビットエラー数やBERの評価だけでなく、PAM4シンボルエラーを検出することによるPAM4SER(Symbol Error Ratio)、さらには、どのビットにエラーが生じているのか詳しく評価する必要があります。

## 2.2 Gray-code について

2.1 のエラーケースで示すように、PAM4 の場合、値の変化に応じて 1 ビットまたは 2 ビットエラーとして検出されます。これに対して、1(01)⇔2(10)の隣り合う値で変化した場合のエラーを、2 ビットエラーではなく、1 ビットエラーとして扱うための符号化法として、Gray-code が用いられます。2 ビットで表す PAM4 では、送信側で 10 を 3(11)、11 を 2(10)と Gray-code した信号を出力し、受信側で 2(10)を 11、3(11)を 10 と Gray-decode することにより、伝送ロスなどによって隣あう値への変化したエラーを、1 ビットエラーとして評価することができます。



表 2.2-1 Gray-code、Gray-decode を加えた PAM4 のエラーケース

送信ビット	→ Gray-code		伝送路出力	ビット エラー数	→ Gray-decode	ビット エラー数
00	00	伝送路	00	0	00	0
			01	1	01	1
			10	1	11	2
			11	2	10	1
01	01		00	1	00	1
			01	0	01	0
			10	2	11	1
			11	1	10	2
10	11		00	2	00	1
			01	1	01	2
			10	1	11	1
			11	0	10	0
11	10		00	1	00	2
			01	2	01	1
			10	0	11	0
			11	1	10	1

### 3 MP1900A PAM4 BERT による PAM4 信号測定ソリューション

#### 3.1 BER 測定、PAM4 SER 測定、キャプチャー機能

IEEE 400 GbE で定義されている 400GAUI-8 C2C や 400GAUI-8 C2M インタフェースのジッタ耐力テストでは、ジッタストレスを付加したテスト信号源とエラーディテクタを使用し、DUT のレシーバで発生するビットエラーが基準値以下であることを確認します。

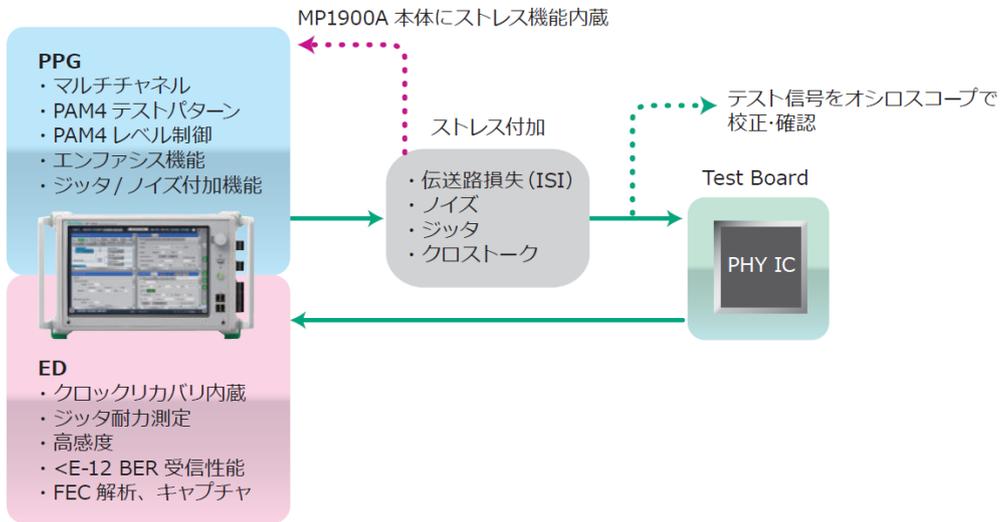


図 3.1-1 PAM4 BERT によるジッタ耐力測定概要

MP1900A シリーズ PAM4 ED MU196040B は、PAM4 信号で起こりえる 12 通りすべてのエラーケースについて、一画面で測定結果を確認することができます。これにより、どのレベル間でエラーが発生しているか確認することができ、エラー要因の特定に役立ちます。さらに、BER の詳細測定と PAM4 SER 測定に加え、MSB と LSB それぞれの測定により、伝送経路における物理的なエラーだけでなく、論理的なエラーの検証にも貢献します。

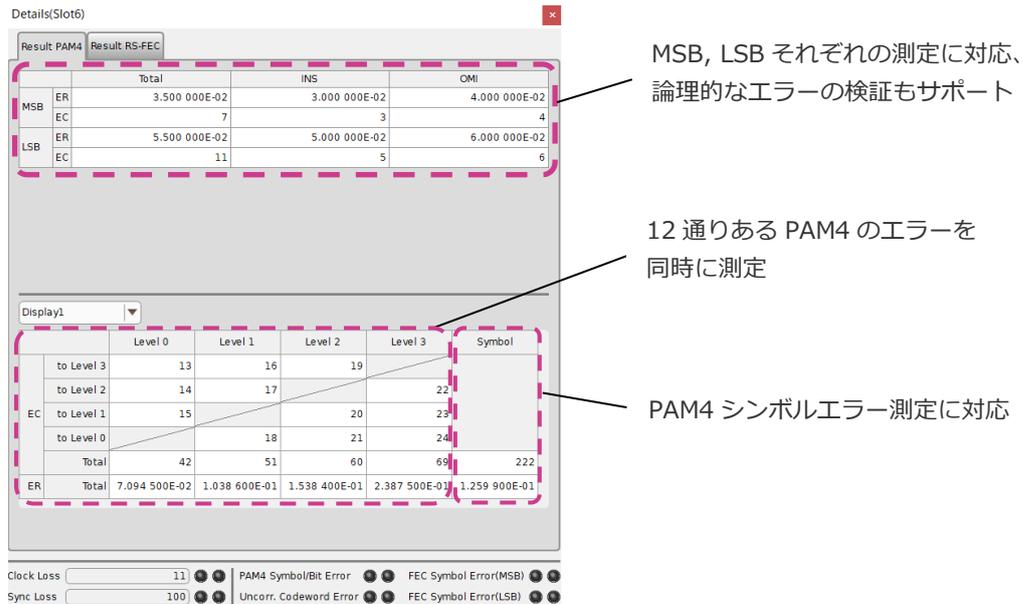


図 3.1-2 PAM4 エラー測定画面例

さらに、エラーを検出したタイミングで入力信号をキャプチャーすることにより、各エラービットをグラフィカルに確認することができます。キャプチャー機能を使った詳細調査により、エラー要因の解析やデバッグをサポートします。

The screenshot shows a digital capture tool interface with the following components:

- Header:** File, LSB, Cursor Addr: 2097015, Position: 2097015, Pattern Addr: 1128719893, Block: 1
- Main Display:** A grid of binary data (MSB/LSB) with error markers (red and yellow boxes) highlighting specific bits.
- Right Panel:**
  - Block Length: 4194300, symbol
  - Trigger Position: 2096896, symbol
  - Viewer Mode: Bin(MSB/LSB)
  - Notation: Bin(MSB/LSB)
  - Format: Pattern
  - Error:  MS,  CR
  - Move and Search: Pattern, Target: All, buttons for <Q, Jump, >Q
  - Error Search: Continuous Error: 1 bit, Target: All, buttons for <Q, <, >, >Q
- Bottom Table:**

	First Error Block/Address	Last Error Block/Address	Total Error Counts Bit Error/Total Err	Total FEC Symbol Error Counts FEC Symbol Error/Total FEC Symbols	Capture Depth
MSB	1 2097016	1 2097018	8 4194300	7 419430	4194300
LSB	1 2096854	1 2097136	27 4194300	16 419430	4194300

図 3.1-3 キャプチャー測定画面例

### 3.2 Gray-code 機能、Gray-decode と FEC 解析

MP1900A シリーズ PAM4 PPG MU196020A では、PAM4 の伝送で要求されるテストパターンとともに Gray-code 機能に対応しています。また、PAM4 ED MU196040B の FEC 解析機能により、FEC による訂正可能かどうかを基準としたジッタ耐力測定をサポートします。(FEC の評価については、「[MP1900A による 100/200/400 GbE FEC テスト](#)」アプリケーションノートを参照ください)

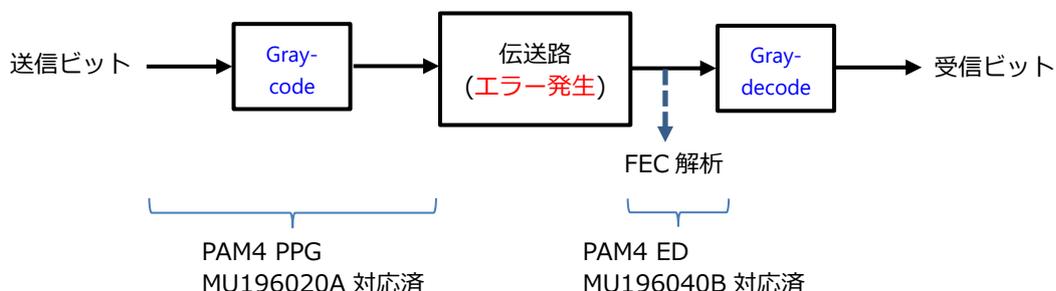


表 3.2-1 PAM4 のエラーケース

送信ビット	→ Gray-code	伝送路出力	ビットエラー数	→ Gray-decode	ビットエラー数
00	00	00	0	00	0
		01	1	01	1
		10	1	11	2
		11	2	10	1
01	01	00	1	00	1
		01	0	01	0
		10	2	11	1
		11	1	10	2
10	11	00	2	00	1
		01	1	01	2
		10	1	11	1
		11	0	10	0
11	10	00	1	00	2
		01	2	01	1
		10	0	11	0
		11	1	10	1

なお、伝送路あるいは DUT 通過のビットエラーは、2.2 項で説明したような、1(01)↔2(10)間で変化が生じるエラーケースでは、2 ビットエラーとしてカウントされるため、隣あう値への変化を 1 ビットエラーとしてカウントする Gray-decode 後の測定結果と比較すると、ビットエラー数、および FEC 解析結果に差が生じます。そのため、Gray-decode 前後のビットエラー、FEC 解析結果を比較考察する場合は、エラーケースに応じたエラービット数の違いを考慮する必要があります。

## 4 まとめ

PAM4 信号を用いた通信品質やデバイスの評価では、従来の BER 測定に加えて、PAM4 SER 測定、ビットエラーの詳細調査が必要です。シグナル クオリティ アナライザ-R MP1900A シリーズは、PAM4 信号の BER、PAM4 SER 測定やキャプチャー機能によるエラー詳細測定により、設計検証とデバッグ作業の効率化をサポートします。さらに、ビットエラー測定と FEC 解析機能で、FEC により訂正可能かどうかを基準とした測定に対応します。

アンリツは今後とも業界動向を把握し、お客様と業界発展に貢献するソリューションをタイムリーに提供し続けます。

参考文献： IEEE 802.3

## アンリツ株式会社

<https://www.anritsu.com>

本社 〒243-8555 神奈川県厚木市恩名5-1-1 TEL 046-223-1111  
厚木 〒243-0016 神奈川県厚木市田村町8-5  
通信計測営業本部 TEL 046-296-1244 FAX 046-296-1239  
通信計測営業本部 営業推進部 TEL 046-296-1208 FAX 046-296-1248  
仙台 〒980-6015 宮城県仙台市青葉区中央4-6-1 S S 3 0  
通信計測営業本部 TEL 022-266-6134 FAX 022-266-1529  
名古屋 〒450-0003 愛知県名古屋市中村区名駅南2-14-19 住友生命名古屋ビル  
通信計測営業本部 TEL 052-582-7283 FAX 052-569-1485  
大阪 〒564-0063 大阪府吹田市江坂町1-23-101 大同生命江坂ビル  
通信計測営業本部 TEL 06-6338-2800 FAX 06-6338-8118  
福岡 〒812-0004 福岡県福岡市博多区榎田1-8-28 ツインスクエア  
通信計測営業本部 TEL 092-471-7656 FAX 092-471-7699

ご使用前に取扱説明書をよくお読みのうえ、正しくお使いください。

2104

■カタログのご請求、価格・納期のお問い合わせは、下記または営業担当までお問い合わせください。

通信計測営業本部 営業推進部

TEL: 0120-133-099 (046-296-1208) FAX: 046-296-1248  
受付時間/9:00~12:00、13:00~17:00、月~金曜日(当社休業日を除く)  
E-mail: SJPost@zy.anritsu.co.jp

■計測器の使用法、その他については、下記までお問い合わせください。

計測サポートセンター

TEL: 0120-827-221 (046-296-6640)  
受付時間/9:00~12:00、13:00~17:00、月~金曜日(当社休業日を除く)  
E-mail: MDVPOST@anritsu.com

■本製品を国外に持ち出すときは、外国為替および外国貿易法の規定により、日本国政府の輸出許可または役務取引許可が必要となる場合があります。  
また、米国の輸出管理規則により、日本からの再輸出には米国商務省の許可が必要となる場合がありますので、必ず弊社の営業担当までご連絡ください。