

Reference Design:

**HFRD-31.0**

Rev. 2; 11/08

---

---

## REFERENCE DESIGN

20Gbps、クワッド SFP のアクティブ銅ケーブルアセンブリ

---

---

# 20Gbps、クワッド SFP のアクティブ銅ケーブルアセンブリ

## 目次

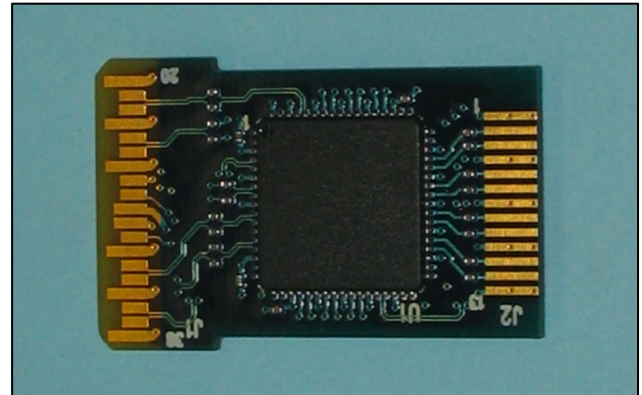
1 概要	2
2 その他の情報について	2
3 高速銅リンク	3
4 QSFP要件	3
5 実装	3
6 制御インターフェース	6
7 評価	10
8 付属文書	13

## 1 概要

高周波リファレンスデザイン 31.0 (HFRD-31.0)は、クワッド SFP (QSFP)ケーブルアセンブリへの集積化向け、アクティブトランスミッタおよびレシーバです。このリファレンスデザインでは、4 つのリンクのそれぞれで最大 5Gbps のレートが可能です。HFRD-31.0 は、各ケーブル長に合わせてイコライゼーションを調整可能であり、干渉信号が生じる前に受信信号を再生して近端クロストーク(NEXT)の影響を低減しています。この再生手順によって信号対ノイズ比が大幅に向上し、結果としてビットエラーの-marginが改善され、ケーブルのスパンを長くすることが可能になります。アクティブケーブルアセンブリのテストと評価をサポートするため、ホストアダプタボード(HFRD-32.0)では、電力を供給し、I<sup>2</sup>C シリアル通信に対応し、さらに QSFP 高速信号接続部を SMA コネクタに変換できるようにしています。

HFRD-31.0 は 2 チップのソリューションです。デバイスの 1 つはマイクロコントローラで、QSFP ソフトウェアインターフェースに準拠するために必要なものです。もう 1 つのデバイスは、8 チャンネルのイコライザである MAX3983 信号コンディショナで、4 つの送信チャンネルと 4 つの受信チャンネルをサポートします。

ドキュメント一式、性能評価、および完全に組み立てられた回路ボードを用意することによって、HFRD-31.0 はアクティブケーブルアセンブリの実験に伴うリスクを低減しています。



### 1.1 特長

- 回路図
- 部品表
- ガーバープロットファイルに対応
- 3.3V 単一電源
- 調整可能なトランスミッタのプリエンファシス
- ホスト側のレシーバに送出する前に微弱信号を再生
- QSFP シェルに収まる PCB

## 2 その他の情報について

数量は限定されていますが、クワッド SFP アクティブ銅ケーブルアセンブリ(HFRD-31.0)を入手していただくことが可能です。このリファレンスデザインの詳細について、またボードの入手については、<https://support.maxim-ic.com/>にてお問い合わせください(英語のみの対応となります)。

### 3 高速銅リンク

数メートルのケーブルで動作する高速銅リンクには、符号間干渉(ISI)によって誘発されるジッタを補正する補償が必要です。単純な銅ケーブルの損失メカニズムでは、低周波成分よりも高周波成分が著しく低減します。この不均衡な減衰において許容可能な性能を実現するためには、いくつかの信号特性に留意する必要があります。この信号特性としては、遷移時間、スイング、クロストーク(ケーブルのカバーと構造)、および信号対ノイズ比(SNR)があります。

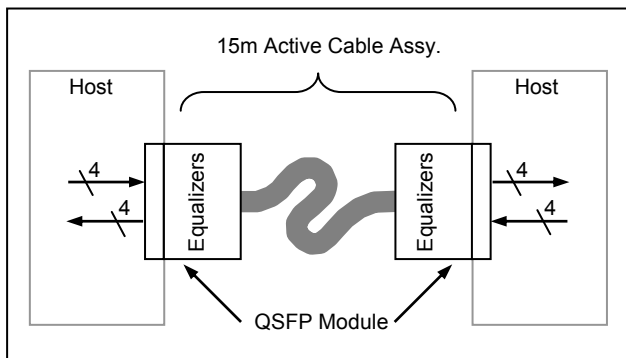


図 1. QSFP アクティブケーブルアセンブリは、MAX3983 イコライザを利用するもので、銅ケーブルによって 15m スパンを実現しています。

遷移時間と振幅は、クロストークと SNR に対立するものです。スイングの増加と遷移時間の減少によって各チャネルの性能を改善しようとする、隣接する低レベルの受信チャネルでより多くの干渉が発生します。送信ラインと受信ラインの接近によって生じるクロストークは回避することができません。ただし、ノイズが蓄積する前に信号を再生して、レシーバ側で SNR を改善することはできます。

ケーブルの補償を行うトランスミッタだけで、ライン末端における信号のアイオープニングは 100mV になると思われます。アイソレーションとしては、これで悪いことはありませんが、4 つのアウトバウンドトランスミッタが近接する中では、このアイオープニングではクロストークの影響を受けることになります。さらに、QSFP インタフェースというレシーバの出力要件では、アクティブレシーバの高出力が求められます。

### 4 QSFP 要件

QSFP マルチソース協定委員会が公開した仕様では、シリアル通信リンクを介してステータス、モニタ、および制御のすべての機能にアクセスすることが必要となっています。たとえば、レシーバの信号喪失(LOS)やトランスミッタのレーザ障害は、現在のところ、1 つのレジスタを通じてのみ報告されます。このレジスタは、SFP インタフェースの専用ピンではなく I<sup>2</sup>C を使用して読み取られます。また、すべてのモジュールが、受信電力、温度、および供給電圧など、さまざまな測定値を報告する必要があります。この後者の測定にはマイクロコントローラが必要となります。

### 5 実装

MAX3983 は、15m スパンの大部分を補償することができる 4 つのトランスミッタと、補償と信号再生の作業を遂行する 4 つのレシーバを備えています。この結果、低クロストークと低ジッタを実現したエンドツーエンドの物理リンクが得られ、QSFP の最小要件をはるかに超える出力スイングを生成することができます。Atmel® ATMEGA48PV-10MU を選択した理由は、このマイクロコントローラが内蔵サーモメータと十分な容量のフラッシュメモリ、EEPROM、および RAM を搭載しており、このアプリケーションに対応可能であるからです。Atmel ATMEGA48PV-10MU は、5mm x 5mm の超小型リードレスクワッドパッケージ(QFN)に収納されています。スペース上の制約があるため、このマイクロコントローラと MAX3983 は、ボードの両側に搭載されています。図 2 を参照してください。

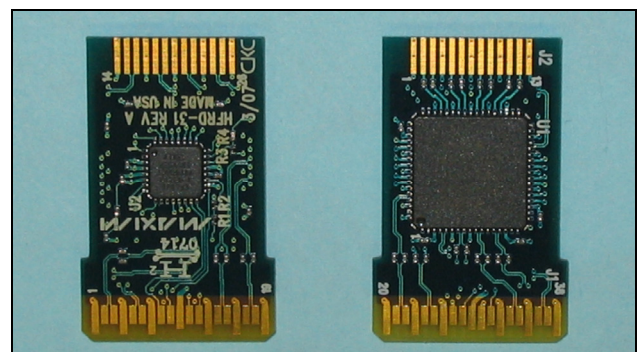


図 2. HFRD31.0 の前面と裏面

Atmel は Atmel Corporation の登録商標です。

## 5.1 ケーブルトランスミッタとレシーバ

MAX3983 は、送信と受信の両方の機能に加えて信号検出器を備えています。図 3 は、MAX3983 の機能ブロック図です。4 段階のプリエンファシスレベルがケーブルトランスミッタの TX\_OUT 端で利用可能で、さまざまな長さのケーブルを補償しています。図 4 を参照してください。ホスト側の出力 RX\_OUT 端では、

2 段階のプリエンファシスレベルが利用可能で、モジュールとホストレシーバ間の回路ボードやコネクタの損失を低減しています。図 5 を参照してください。すべての入力に固定イコライゼーションが備わっています。ケーブルの受信入力 RX\_IN は、約 5 メートルの 24AWG ケーブルを補償します。ホスト側の受信入力 TX\_IN は、5Gbps において約 10 インチの FR4 を補償します。

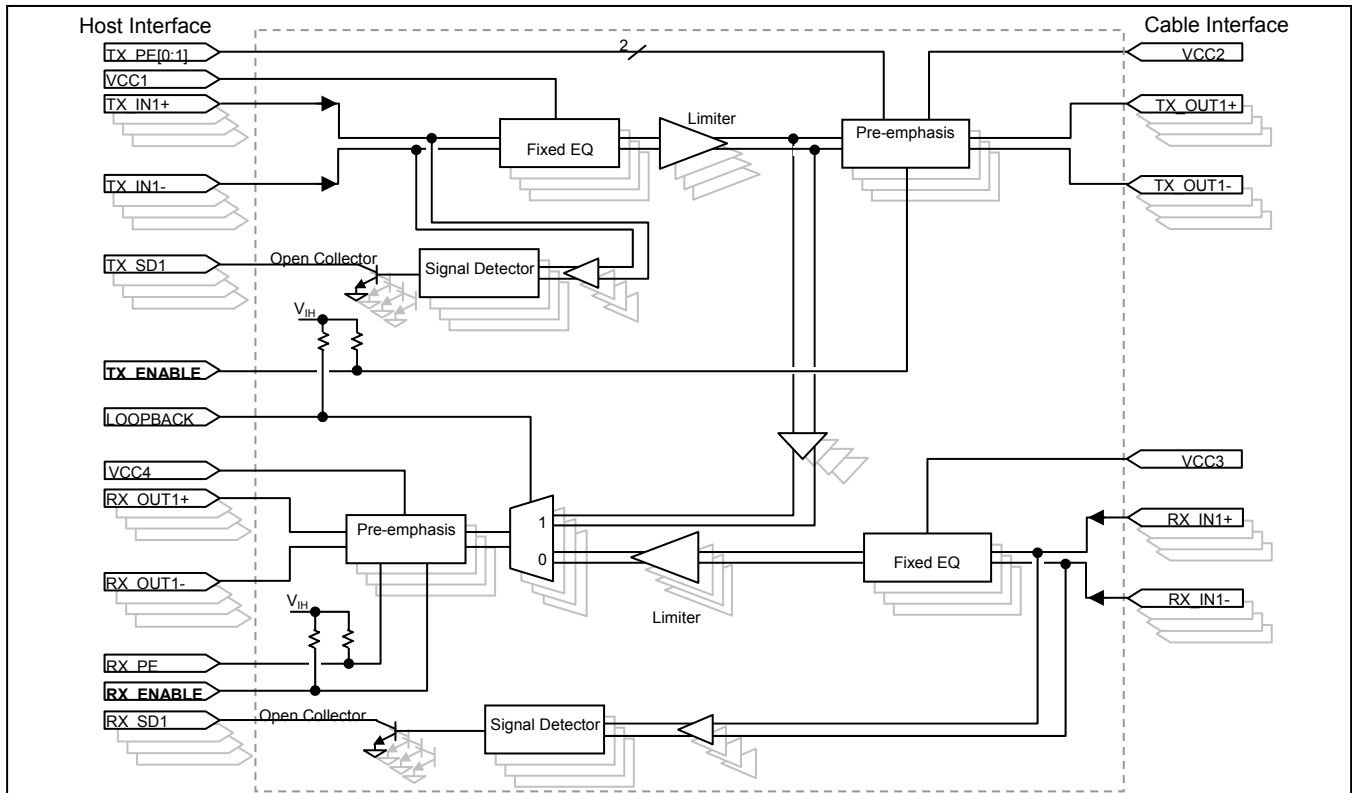


図 3. MAX3983 は、8 つの差動チャネル、4 つのアウトバウンドと 4 つのインバウンドをサポートします。

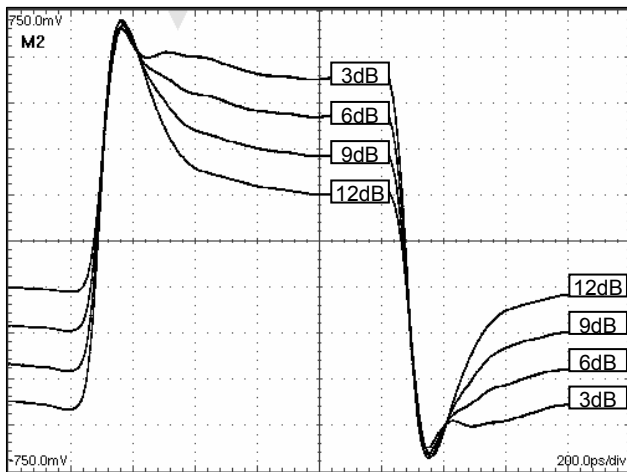


図 4. TX\_OUT のプリエンファシスレベル

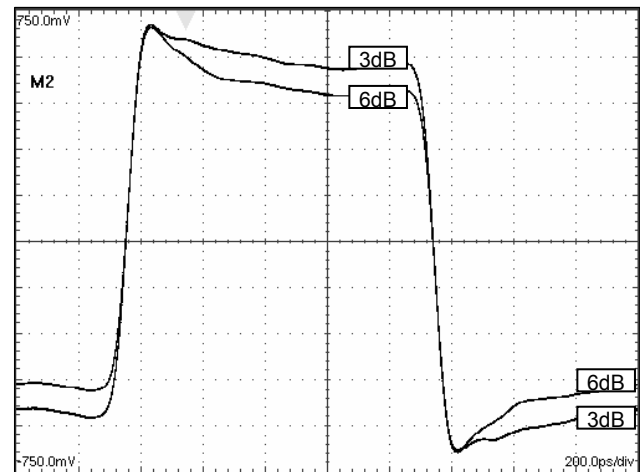


図 5. RX\_OUT のプリエンファシスレベル

## 5.2 構造

推奨ケーブルは、Amphenol の 28AWG (American Wire Gauge : 米国ワイヤゲージ規格)、8 ペア SpectraStrip® SkewClear®です。他の太さのゲージワイヤを使用してもかまいませんが、損失特性はゲージによって異なります。たとえば、28AWG の予想損失は、24AWG の予想損失を約 50%上回ります。この 2 つを比較するもう 1 つの方法として、距離による方法が挙げられます。24AWG ケーブルは、28AWG ケーブルよりも約 50%遠い距離まで届きます。

Amphenol の多芯ケーブルは、8 つの差動ワイヤペアを備えています。各ペアは、信号シールドとして機能する裸線(ドレイン)とともに、金属被覆の薄いポリエステル箔で包装されています。ペアごとの包装箔には、アセンブリ時に容易に識別することができるよう、数インチごとにラベルが貼られています。モジュールシェル内でより多くのスペースが利用可能であれば、ケーブルジャケットをさらに剥いで、各ペアを単純に撚り合わせて編み込むことによって、任意の形態で容易に仕上げるのが可能になると考えられます。Amphenol の SpectraStrip のワイヤ配列により、配線作業が大幅に簡素化されます。多少の小さな変動はありますが、個々の差動ワイヤペアは図 6 に示すような構造になります。これは、すべてのケーブルベンダに当てはまるものではありません。

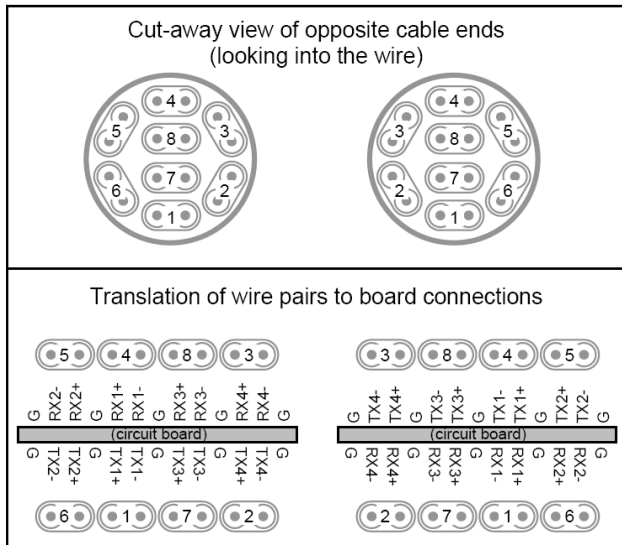


図 6. ケーブルバンドル内のワイヤ配列とボードに対する各ペアの配置

図 6 では、左側の図が右側の図の鏡像になっていることに注意してください(すなわち、垂直軸に対して反転)。図 6 の下側部分は、信号ペアをケーブルバンドルから回路ボードに変換する方法を示しています。

ケーブルバンドル内のワイヤの整列を図 7 に示しています。バンドルからボードにワイヤを移す方法を慎重に考察することで、仕上げの問題を最小限に抑えることができます。ケーブルの他端(図示せず)も、図の一端と同様に整然と仕上げられています。

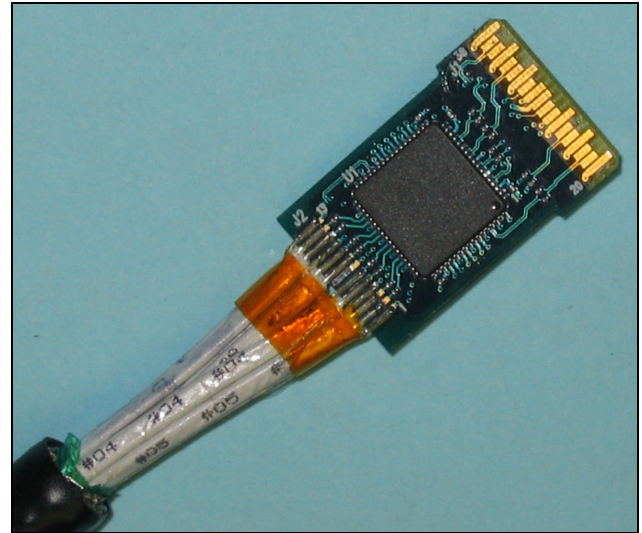


図 7. HFRD-31.0 と 28AWG ケーブル。入念に検討した結果、整然とした省スペースのワイヤに仕上がっています。

最後に、回路ボードへの半田接続が切断しないように、モジュールシェル内のワイヤを固定する必要があります。ケーブル/ボード間の終端付近に非伝導性のシリコン接着剤を多量に使用することで、残りのスペースを埋めて確実に接続することをお勧めします。

SpectraStrip および SkewClear は、Amphenol Corporation の登録商標です。



### 5.3 熱放散

QSFP モジュールは 3.5W の放散が可能です。このリファレンスデザインでは、1.5W ~ 1.6W を放散します。MAX3983 は、冷却用の大型パッドを底部に付けた状態でパッケージされています。このパッドは、グランドプレーンに半田付けされており、ほとんどのアプリケーションで十分な冷却を確保することができます。このパッドは、デバイス自体よりもほんのわずかに大きくしただけのものであり、冷却環境を直接利用するものではありません。このリファレンスデザインでは、ケーブルのドレインワイヤが適度な熱伝導を実現しています。MAX3983 パッケージの表面との直接的な熱接触によって、さらなる熱制御をモジュールのシェルデザインに組み込む必要があります。

## 6 制御インターフェース

QSFP 規格では、共通のモジュール機能とオプションのモジュール機能のすべてに関連するメモリ域が規定されています。この規格では、ベンダ固有の制御も許可されています。HFRD-31.0 は、ステータスを報告し、銅ケーブルの実装に関連する機能のモニタリングを許可します。たとえば、LOS は報告されますが、レーザ障害や受信した光電力など、その他の光学機能は報告されません。同様に、トランスミッタのプリエンファシスなど、共通 QSFP 制御に含まれていない、光以外の機能があります。表 1 は、ベンダに固有および HFRD-31.0 に固有のさまざまな機能に対するメモリ域とビット割当てを示しています。

プリエンファシスと出力ディセーブルの制御ビットに加え、4 バイトを使用して、温度と電圧のモニタのための利得とオフセットキャリブレーションの定数を格納します。QSFP は、3 つのうち 1 つの供給についてのみモニタリングすることが可能です。HFRD-31.0 は VCC\_TX ピンをモニタします。さらにもう 1 つのバイトは、パワーオン設定を保持するのに使用されます。電力を加えると、このバイトはバイト 226 (ページ 3)にコピーされます。これらの機能や他の QSFP 機能へのアクセスは、I<sup>2</sup>C インタフェースを通じて行われます。サポートするリファレンスデザイン HFRD-32.0 は、この I<sup>2</sup>C インタフェースと、実験室の機器用の適切な接続を提供しています。図 8 を参照してください。

Microsoft Windows は Microsoft Corporation の登録商標です。

表 1. HFRD-31.0 のベンダ固有の制御

Byte	Page	Bit	Description
226	3	5-7	Not used
		4	TX_DISABLE. Set to 1 to disable all transmitter outputs
		3	TX_PE1. Adds to level set by bit 2. Set to 1 to add 6dB of pre-emphasis. Set to 0 to add 0dB.
		2	TX_PE0. Set to 1 for 6dB. Set to 0 for 3dB of pre-emphasis.
		1	RX_DISABLE. Set to 1 to disable all receiver outputs
		0	RX_PE. Set to 1 for 6dB. Set to 0 for 3dB pre-emphasis
226	7		Power-On Defaults. Contains a copy of byte 226, page 3
227	7		Temp Monitor Calibration: Offset
228	7		Temp Monitor Calibration: Gain
229	7		Volt Monitor Calibration: Offset
230	7		Volt Monitor Calibration: Gain

ホストアダプタボードとそれに関連するグラフィカルユーザインターフェース(GUI)には、USB 2.0 が装備された Microsoft Windows®ベースのパーソナルコンピュータを介してアクセス可能です。図 9、10、および 11 は GUI の例です。

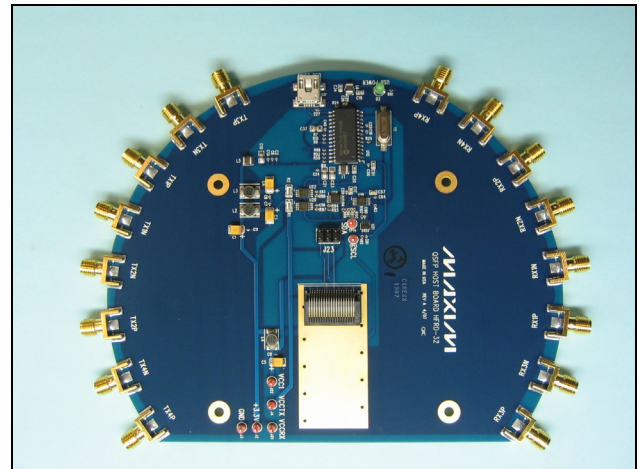


図 8. QSFP ホストアダプタボード(HFRD-32.0)には、USB/I<sup>2</sup>C 間のインタフェース、ホスト側の電源モニタ、QSFP インタフェースコネクタ、およびすべてのデータ信号のための SMA コネクタが搭載されています。

## 6.1 HFRD-32.0 QSFP ホストアダプタソフトウェア: Monitor (監視)ページ

**MAXIM Strategic Applications: QSFP Host Adapter**

**Communication**

Initialize  Module Found  Module NOT Found

Module Found Vendor Part Number: HFRD-31.0  OK  Warning

**Host Supplies**

**Receiver** 3.45 V 104 mA **Transmitter** 3.45 V 126 mA

**Monitor** | Interrupt Masks | Controls | Identification | Read/Write Byte | Options Available | HFRD-31.0 Settings

**Interrupt Flags: Channel Status**

**TX Fault**  TX1  TX2  TX3  TX4

**TX LOS**  TX1  TX2  TX3  TX4

**RX LOS**  RX1  RX2  RX3  RX4

**Flag Update Method**

Polling (2Hz rate)  Hardware Interrupt Line  Software Interrupt Bit

Indicates Flag is not asserted.  Indicates Flag is asserted.

History "ON" maintains flag history and does not clear flags. History "OFF" shows most recent flag status and clears with each update. "Clear" unconditionally clears flags. Use it to clear the history.

Items that are displayed as dim in intensity are not available or do not apply to the specific module. See "Options Available" page for vendor supplied features.

**History** OFF ON Clear

**Interrupt Flags: Channel Monitor**

**Alarms**

	High	Low
RX1 Power	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
RX2 Power	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
RX3 Power	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
RX4 Power	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
TX1 Bias	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
TX2 Bias	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
TX3 Bias	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
TX4 Bias	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Mod VCC	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Mod Temp	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

**Warnings**

	High	Low
RX1 Power	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
RX2 Power	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
RX3 Power	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
RX4 Power	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
TX1 Bias	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
TX2 Bias	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
TX3 Bias	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
TX4 Bias	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Mod VCC	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
Mod Temp	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

**Measurements**

RX1 OMA	0.0 uW
RX2 OMA	0.0 uW
RX3 OMA	0.0 uW
RX4 OMA	0.0 uW
TX1 Bias	0.000 mA
TX2 Bias	0.000 mA
TX3 Bias	0.000 mA
TX4 Bias	0.000 mA
Mod VCC	3.34 V
Mod Temp	61 C

**History** OFF ON Clear

図 9. HFRD-32.0 QSFP ホストアダプタの標準的なステータス表示

## 6.2 HFRD-32.0 QSFP ホスタアダプタソフトウェア: HFRD-31.0 固有の制御

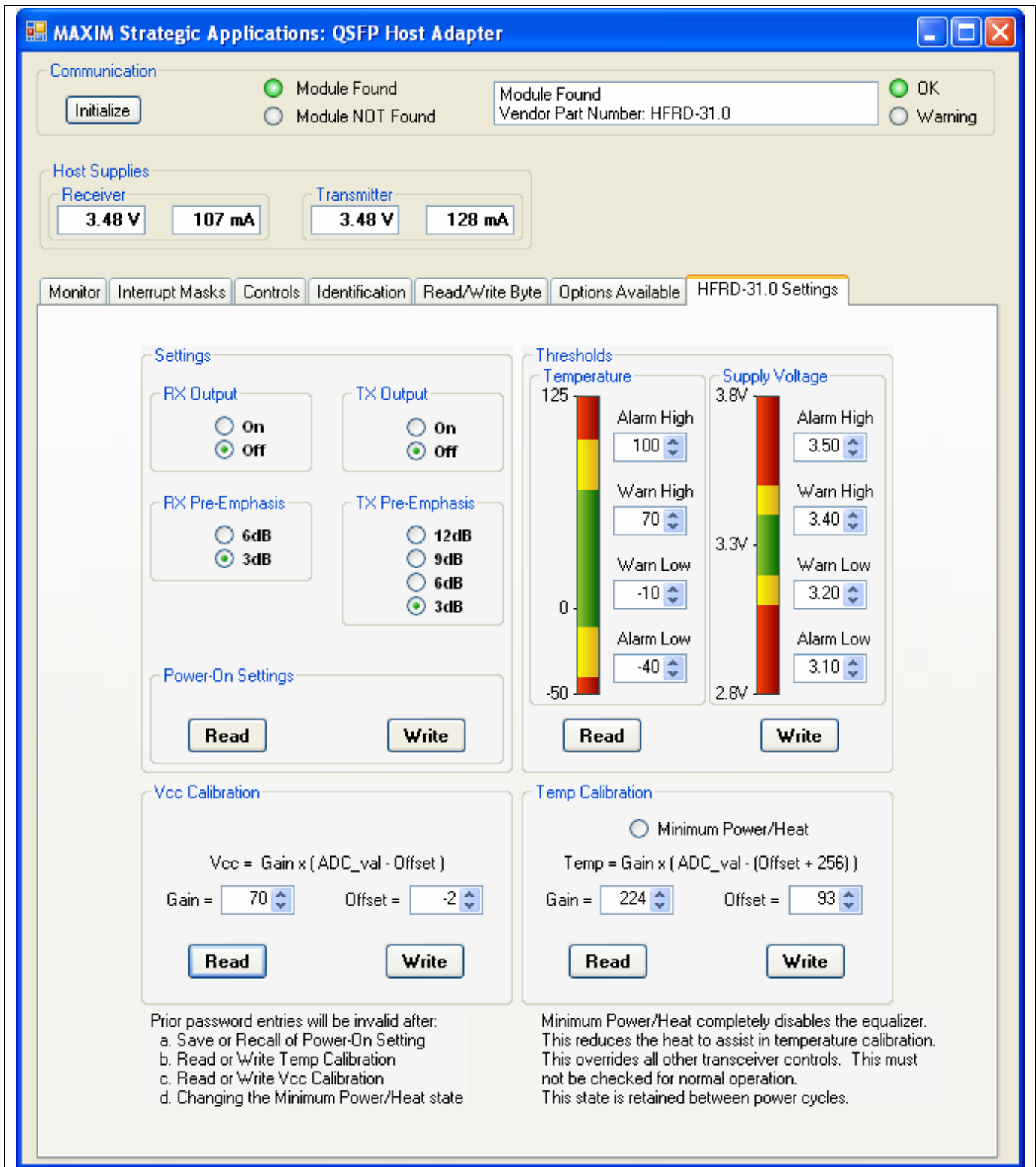


図 10. HFRD-32.0 は、HFRD-31.0 のベンダ固有の制御を表示します。このメニューは、ホスタアダプタが HFRD-31.0 を検出したときにのみ表示されます。



### 6.3 HFRD-32.0 QSFP ホストアダプタソフトウェア:ビットレベルおよびバイトレベルの読出し/書込み

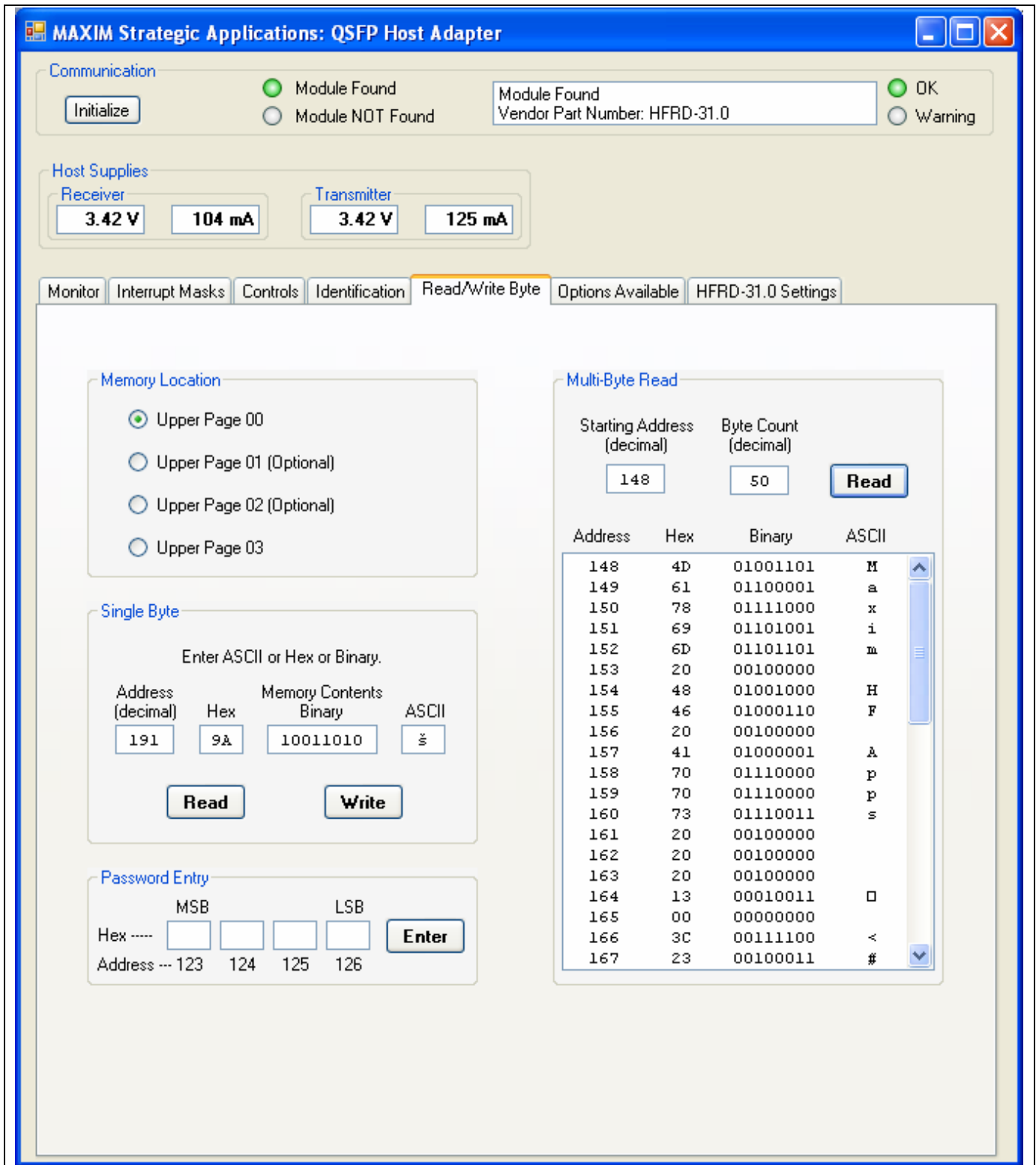


図 11. HFRD32.0 は、すべての QSFP メモリ域と内容にビットレベルおよびバイトレベルでアクセスすることができます。

## 7 評価

### 7.1 テスト装置

テスト装置を図 12 に示しています。Agilent ParBERT™ のパターン発生器は、複数のチャネルを使用してデータを送出し、アグレッサ信号を導入しています。Agilent 70843B は「ビクティム」信号を供給します。HFRD-32.0 ホストアダプタボードは、実験室の機器とケーブルアセンブリとの間のインタフェースを提供します。Tektronix CSA8000 オシロスコープはアイダイアグラムを生成しています。

### 7.2 結果

表 2 は、さまざまなデータレート、ケーブル長、プリエンファシス設定値、および 2 つのワイヤゲージでのアイダイアグラムを集めたものです。これらの画像は、図 12

に示す信号経路の全体(QSFP コネクタ、約 5 インチ 6mil の FR-4 マイクロストリップ、SMA コネクタ、および 1V<sub>P-P</sub> のアグレッサ信号)を取り込んでいます。アイダイアグラムには、レシーバ出力からの残留プリエンファシスの一部も明示されています。使用した最小設定は 3dB で、ホストレシーバまでの距離が若干長い場合、一部のエンファシスが残留しています。

表 3 は、10m、28AWG ケーブルの単一構成の場合のトランスミッタプリエンファシスにおける相違を示しています。4.25Gbps と 5.0Gbps の最適化ジッタ設定は、低レートでの設定とは異なることに注意してください。低レートにすると、次に遷移する前にピーク遷移の安定により多くの時間が必要になるため、高ピーキングの恩恵を受けることができます。5.0Gbps で動作しているときには、9dB のピーキング(表の右側)によって実際に信号が劣化します。動作範囲が 4.25Gbps 以上の場合、6dB (表の左側)を選択するのが適切な妥協案です。

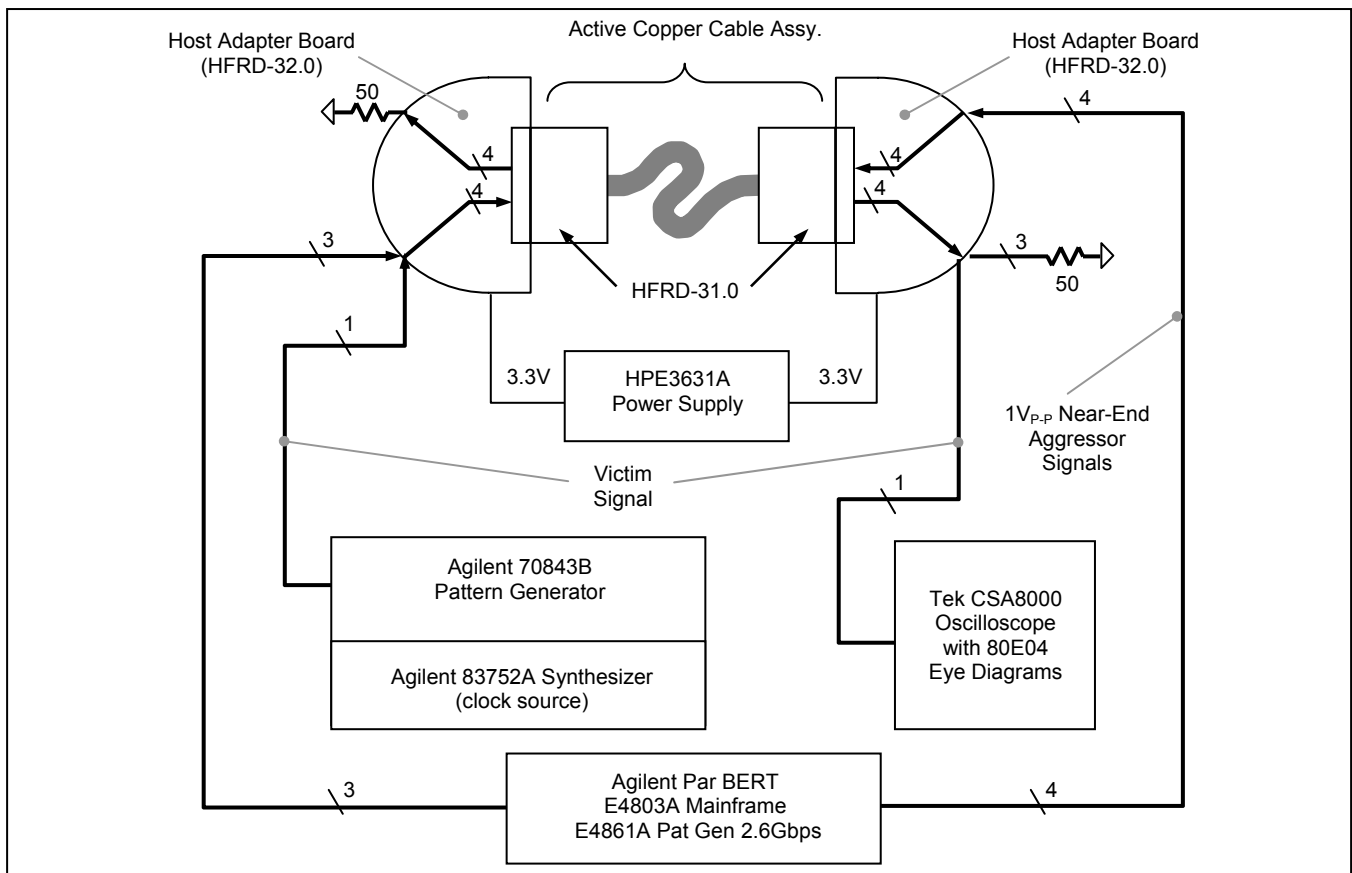


図 12. テスト装置は、すべてのチャネルを使用し、干渉アグレッサ信号が存在する状態での性能を評価します。

ParBERT は Agilent Technologies Inc. の商標です。

表 2. さまざまなケーブルとビットレートでのエンドツーエンド性能

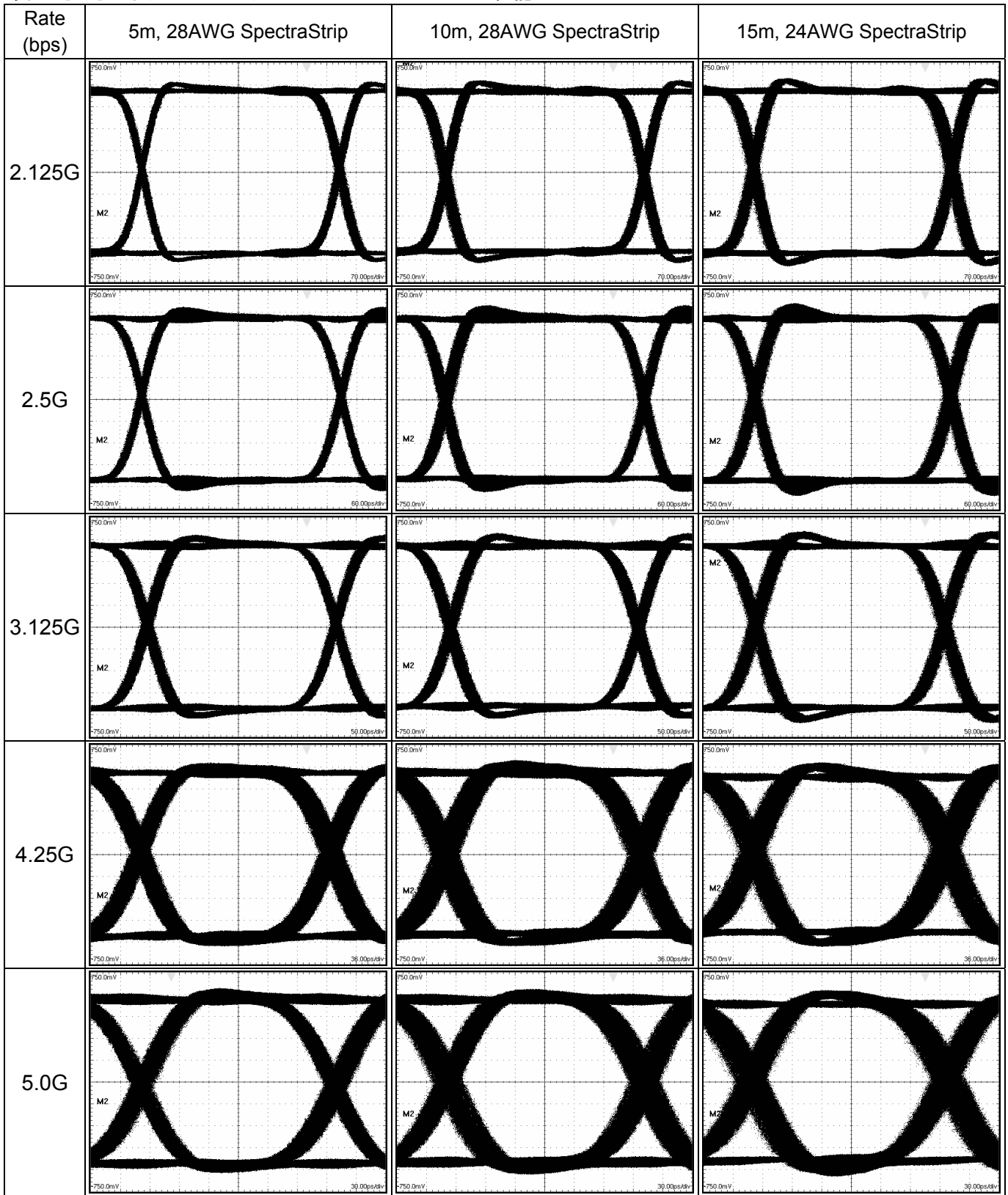
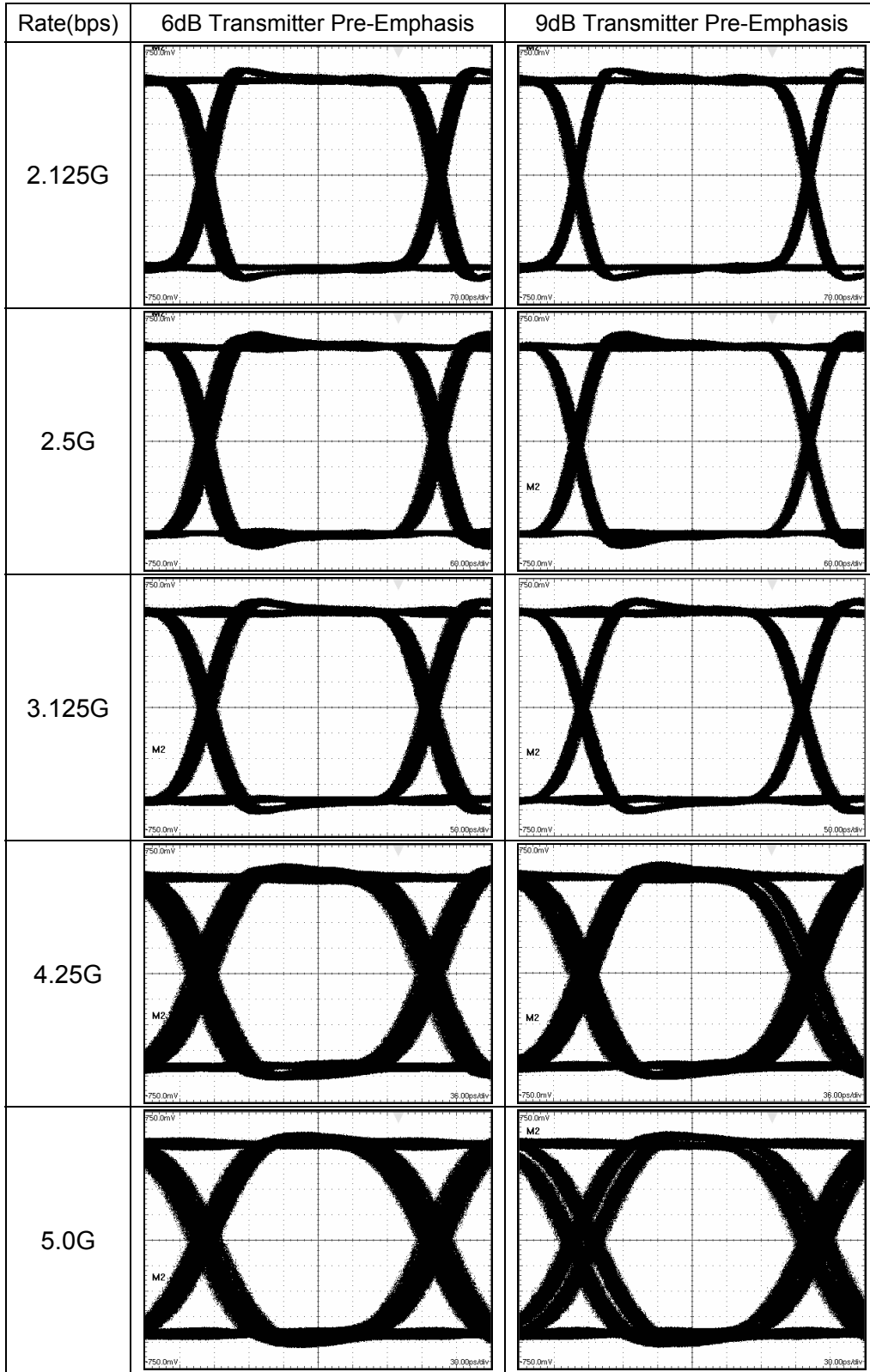


表 3. 10m、28AWG の SpectraStrip での 6dB と 9dB の補償の比較



# 8 付属文書

## 8.1 HFRD-31.0 の回路図(1/2)

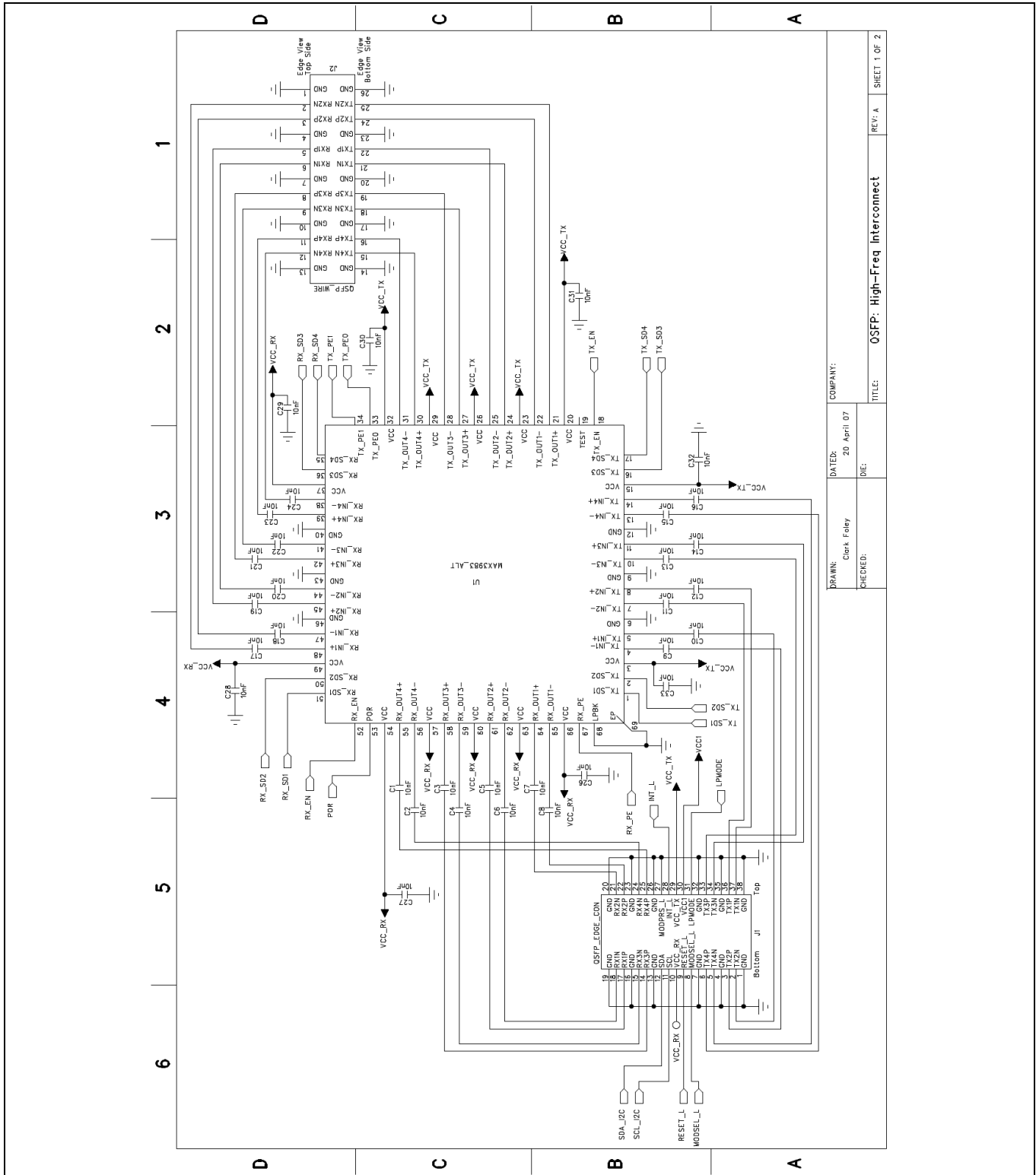


図 13. HFRD-31.0 の回路図 — 高速データとイコライザ。ケーブルは J2 に接続されています。





### 8.3 HFRD-31.0 のアートワーク

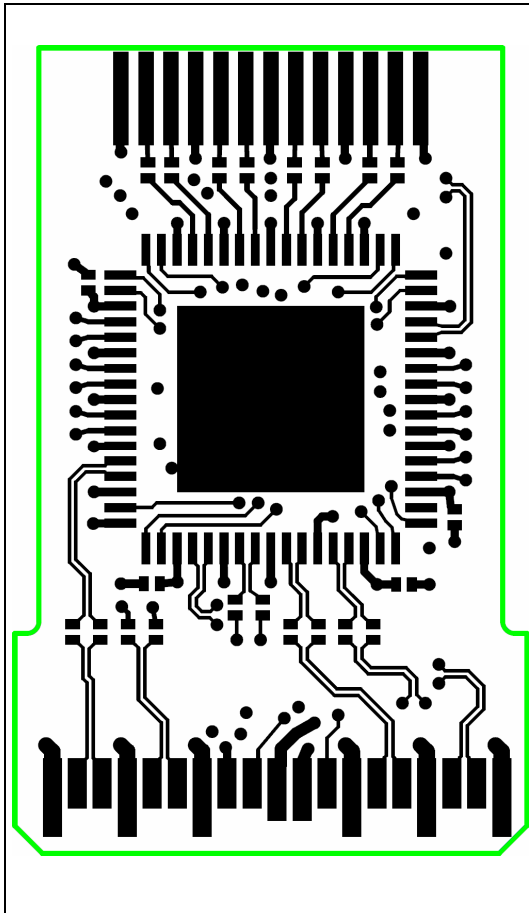


図 15. 第 1 層(最上層)

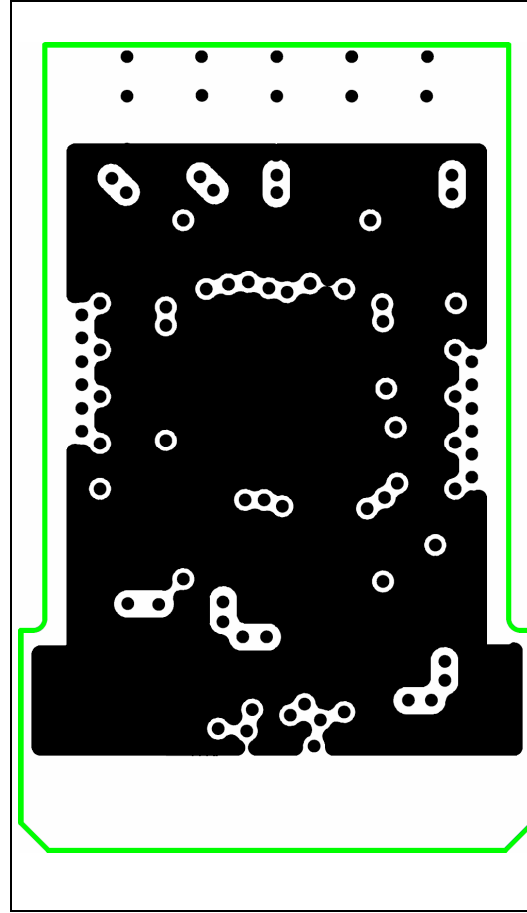


図 16. 第 2 層 — 最上層と第 3 層の伝送ラインのグランドリファレンス

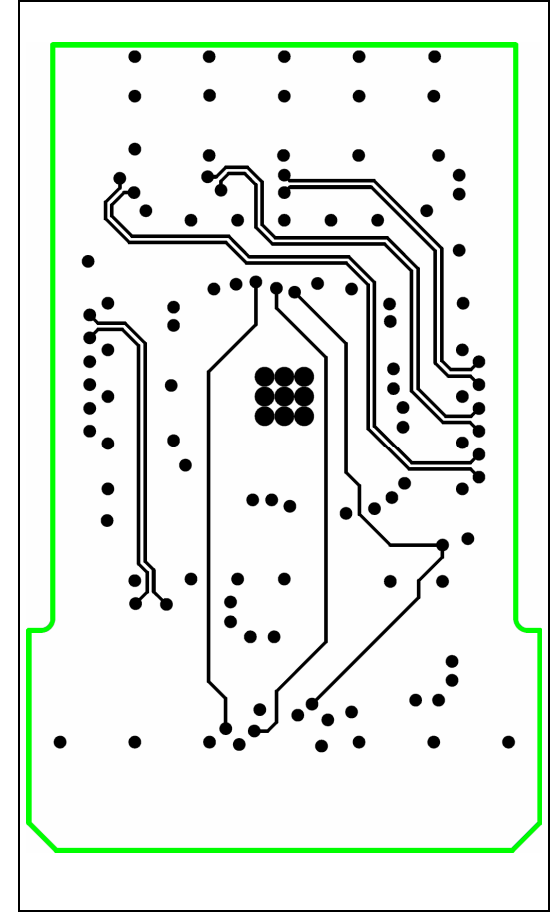


図 17. 第 3 層 — 第 2 層を基準とした差動データラインが含まれています。第 4 層は比較的離れています。

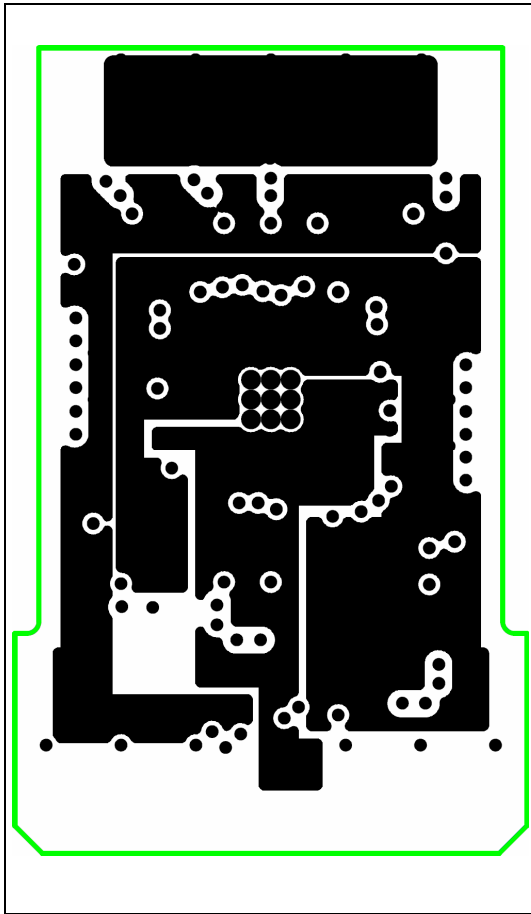


図 18. 第 4 層 — 電源の引き回し、および第 5 層と第 2 層を結ぶグランドパッチ

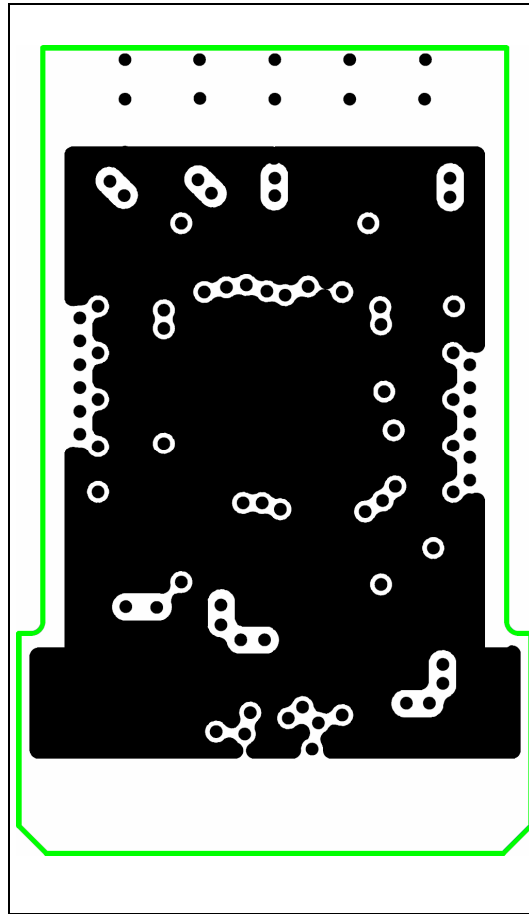


図 19. 第 5 層 — 最下層の伝送ラインのグランドリファレンス

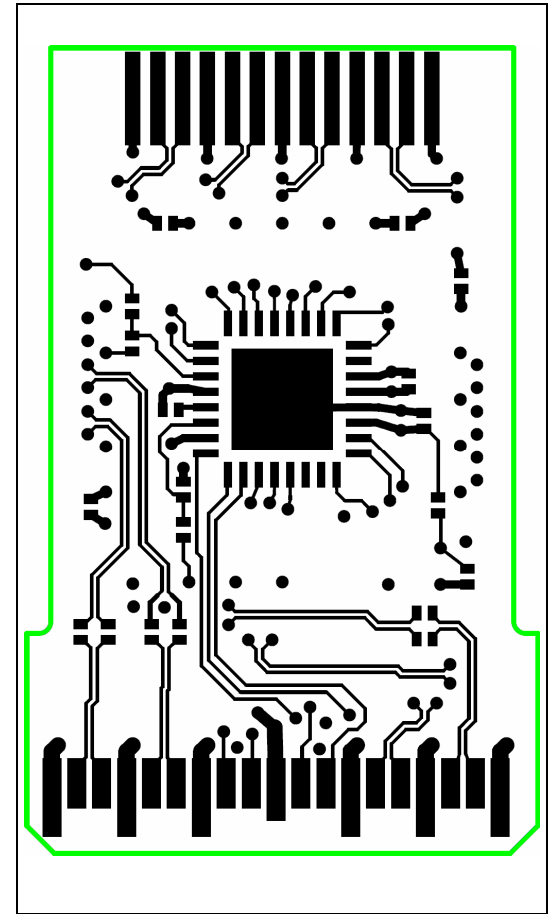


図 20. 最上層を通して見た第 6 層

#### 8.4 部品配置(HFRD-31.0 正面)

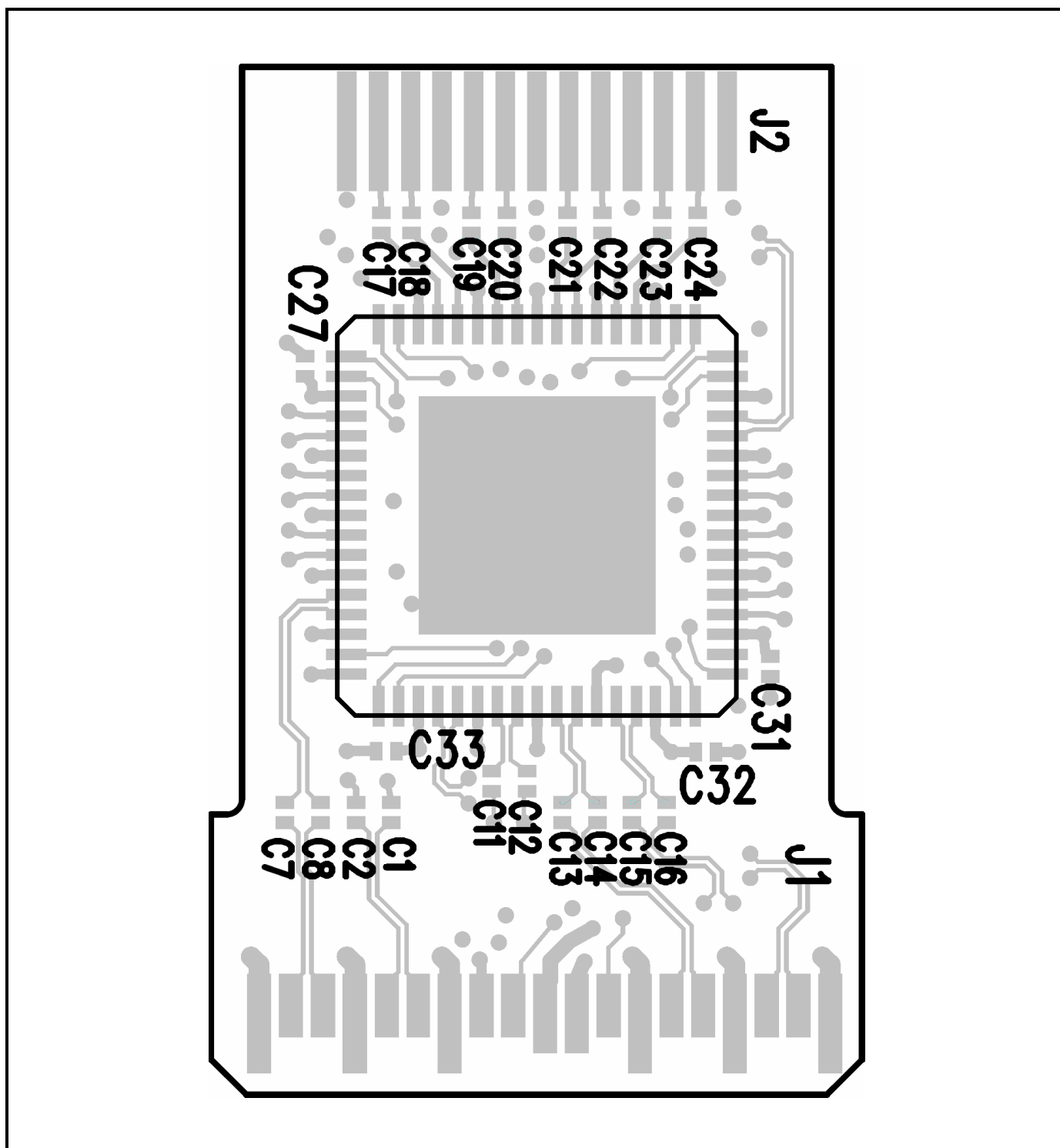


図 21. 最上層(正面)。ケーブルのレシーバ入力部分は、上部の J2 のピン 1~13 に半田付けされています。J1 は底部の QSFP インタフェースです。

## 8.5 部品配置(HFRD-31.0 裏面)

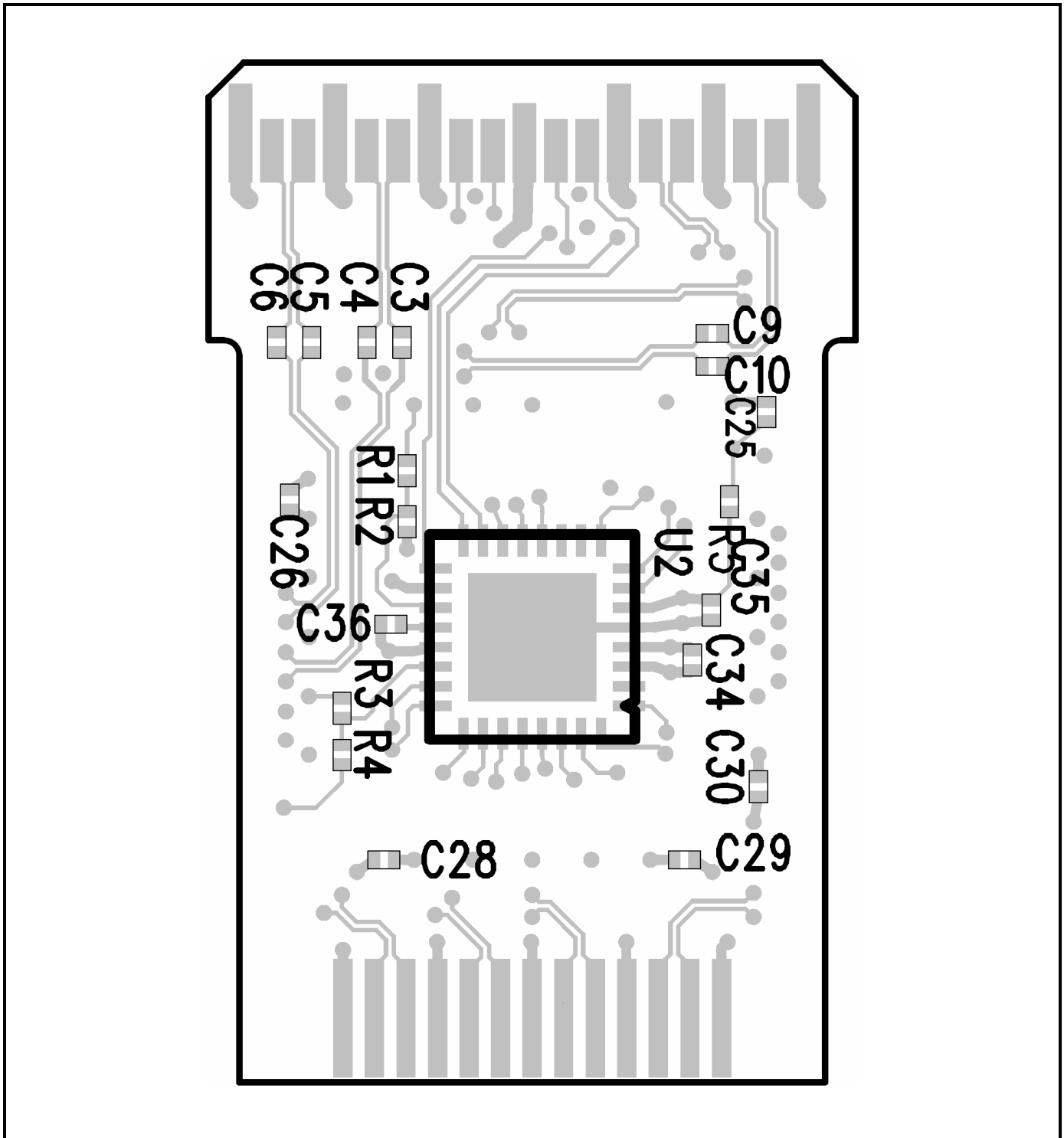
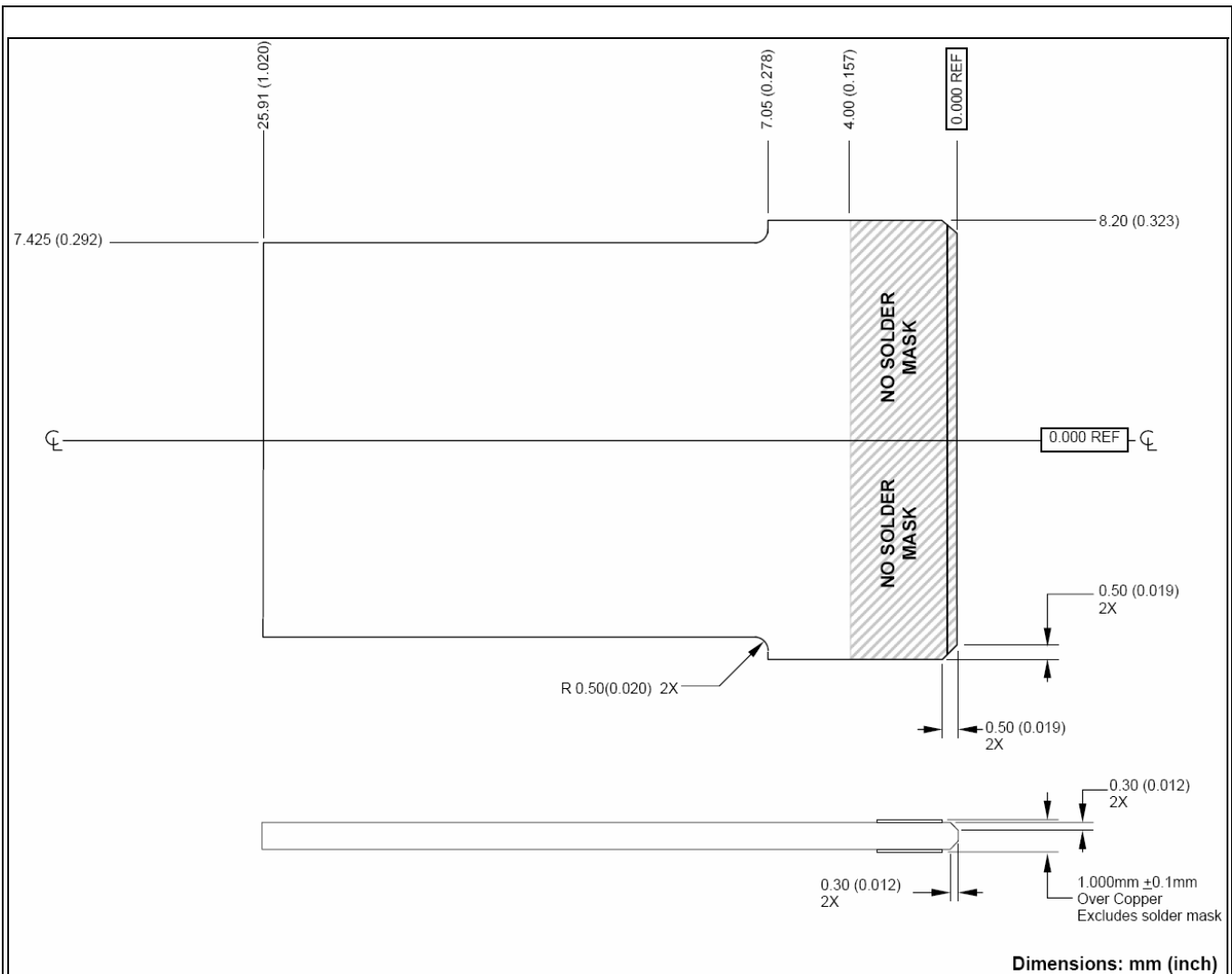


図 22. 最下層(底から見た図)。ケーブルのトランスミッタ出力部分は、底部のピン 14~26 に半田付けされています。QSFP インタフェースは上部にあります。



## 8.6 HFRD-31.0 の機械的寸法



### 6-Layer Stack up

HF S -----	1oz Cu + Au ply/prepreg	2.0mil 4.0mil	(Diff 100ohm: W=4mil S=4mil / Single 50ohm: W=6mil)
GND -----	0.5oz Cu core	0.7mil 3.0mil	
HF S -----	0.5oz Cu ply/prepreg	0.7mil 18.6mil	(Diff 100ohm: W=4mil S=4mil / Single 50ohm: W=6mil)
Power-----	0.5oz Cu core	0.7mil 3.0mil	
GND -----	0.5oz Cu ply/prepreg	0.7mil 4.0mil	
HF S -----	1oz Cu + Au	2.0mil	(Diff 100ohm: W=4mil S=4mil, Single 50ohm: W=6mil)

Target is 1.0mm  $\pm$ 0.1mm (39.4mil  $\pm$ 4mil)

図 23. 寸法図およびFR-4 ボードのスタックアップ(損失タンジェント = 0.02)

## 8.7 部品表

Qty	Reference	Value	Tolerance	Manufacturer	Description
1	U2			ATMEL	ATMEL ATMEGA48PV-10MU microcontroller
2	C35-36	0.1uF	10%		CERAMIC CAPACITOR (0201)
34	C1-34	10nF	10%		CERAMIC CAPACITOR (0201)
1	U1			Maxim	MAX3983UGK Equalizer/Signal Conditioner
1	J1				QSFP Edge Connector. Etched pattern on board.
1	J2				QSFP WIRE LANDING, BOARD FEATURE
1	R5	10k	5%		RESISTOR (0201)
2	R1 R3	12.7k	1%		RESISTOR (0201)
2	R2 R4	2.49k	1%		RESISTOR (0201)

## 8.8 同梱されていないその他の資材

### ワイヤ

8 ペア、24AWG、100Ω のシールド平衡ケーブル  
(Amphenol SpectraStrip SkewClear、製品番号 166-2499-998)

8 ペア、28AWG、100Ω のシールド平衡ケーブル  
(Amphenol SpectraStrip SkewClear、製品番号 166-2899-997)