

LTSPICE による HDMI コンプライアンステストシミュレーション

シグナル工房： www.signalkhobho.com

野田 敦人

LTSPICE™はリニアテクノロジー社のノード制限のないフリーの SPICE 解析ツールです。これまで、LTSPICE でサポートされている伝送線路モデルは無損失の TLINE か一定損失の LTLINE であるため、広帯域の周波数特性が必要なタイムドメインのアイパターンシミュレーションには使われてきませんでした。しかしながら国産の株式会社ウィンドワードが開発した GreenExpress™で抽出した SPICE 等価回路モデルを使用することにより、LTSPICE でもある程度の精度でアイパターンシミュレーションができるようになりました。本稿はシグナル工房の Web でダウンロード販売されている GreenExpress™による SPICE モデルを使用した HDMI のテストベンチの利用方法を説明します。

注) 全ての作業は C:\¥LTSPICE のディレクトリーで行いますので、予め C:\¥LTSPICE の作成をお願いします。

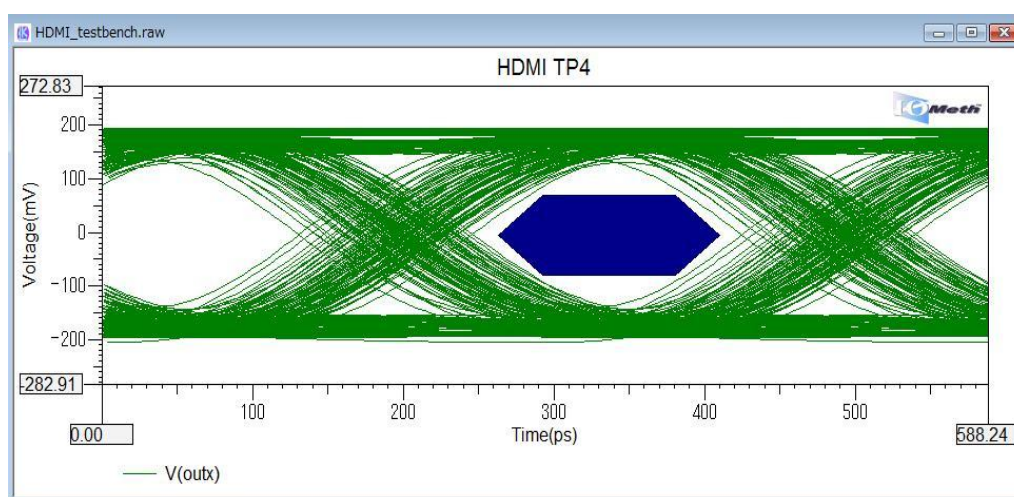


図 1. LTSPICE による HDMI のアイパターン解析

1) ワーストケースケーブルモデルの作成

まず HDMI の仕様書 Fig4-23 で規定されている Cat2 ケーブルの減衰リミットに近い特性を持つ SPICE モデルを作成します。ここでは計算時間と file の大きさを考慮してケーブルの特性をシングルエンドのストリップ線路で置き換えたモデルとして作成します。

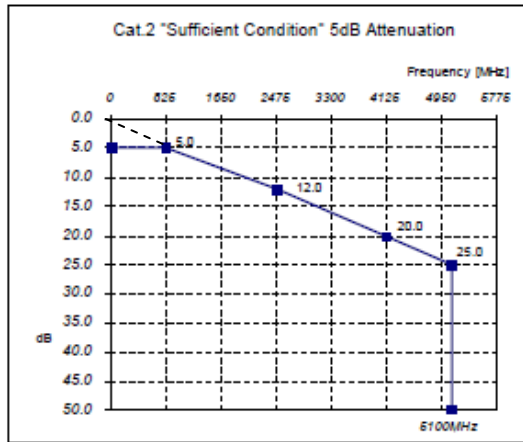


Figure 4-23 Category 2 Cable Attenuation Limits – Sufficient Condition

図 2.Cat2 ケーブルの減衰特性

通常伝送線路の減衰特性は 1-1)式のように、3つのパラメータで近似されます。

$$A + \sqrt{f} * B + f * C \quad 1-1)$$

ところが仕様書の特性を見ると 0～825MHz までは-5dB でフラット、5.1GHz までは直線的な減衰になっています。おそらく -5 dB の特性はケーブルコネクタの内部にパッシブイコライザの使用することを許可するためのものです。825MHz 以下を直線的な減衰特性で延長（図の点線）すると 0～5.1GHz までほとんど直線的（f に比例）になっていて誘電損失の特性が支配的であることが判ります。ところがこのケーブル特性はあまり現実的ではありません。というのは商用のケーブルというのは、出来るだけ誘電損失（tanδ）の小さい材料を選びます。また出来るだけ細く柔らかくするため細い電線を使うことになり、表皮効果の影響の大きくなる傾向のため数 GHz レベルでは√f の特性が支配的になるからです。これは想像ですが、このような直線的な特性にした理由として、記述が簡単なことと下図 3 のようなケーブルエミュレータの特性を考慮したものと思われる。つまりあまり実測定では入手できないようなモデルを抽出する必要があることを意味します。

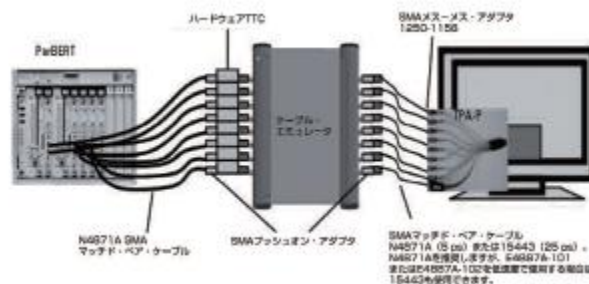


図 3.Agilent 社の HDMI ケーブルエミュレータ

それではフリーの伝送線路パラメータの計算ソフトである `W c a l c` を起動します。
 (`W c a l c` はフリーの GNU ソフトで <http://wcalc.sourceforge.net/obtaining.html> からダウンロードできます。) ストリップラインのモデルを選択して 5.1GHz で -25dB のターゲットになるパラメータを選択します。ここでは主に長さ (Length) と誘電正接 T_{and} を変えてみました。誘電損失が支配的にするために T_{and} の値を通常より高めの値 0.04 にしました。また差動で 100Ω に対応する Z_0 を 50Ω に維持することに注意願います。5.1GHz を確認した後は、825MHz で -5dB に近い値であることを確認します。(この例では -5.269dB をちょっとオーバーですが全てを合わせるのは困難なため、これでよとしました。)

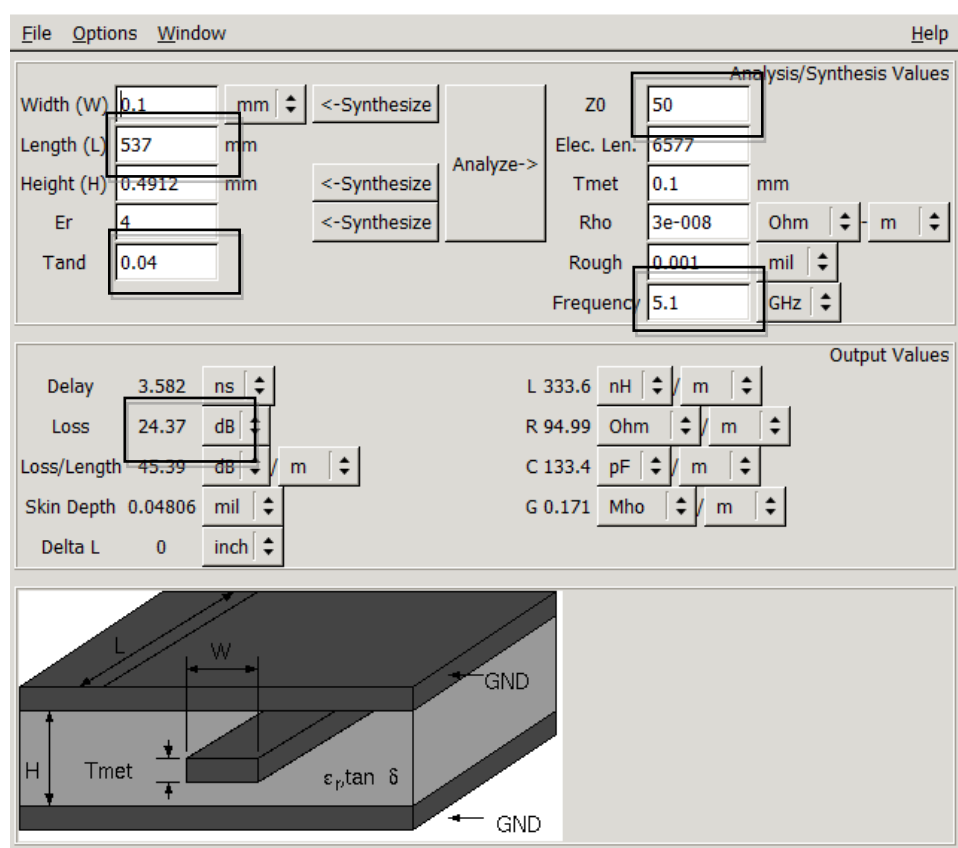


図 4. Wcalc の計算例

次にこのストリップラインの SPICE モデルをウィンドワードが開発した GreenExpress で作成します。 <http://www.windward.co.jp> (GreenExpress は有料のツールですが、テストベンチにはここで抽出された SPICE モデル HDMI_480mm.tln が含まれています。)

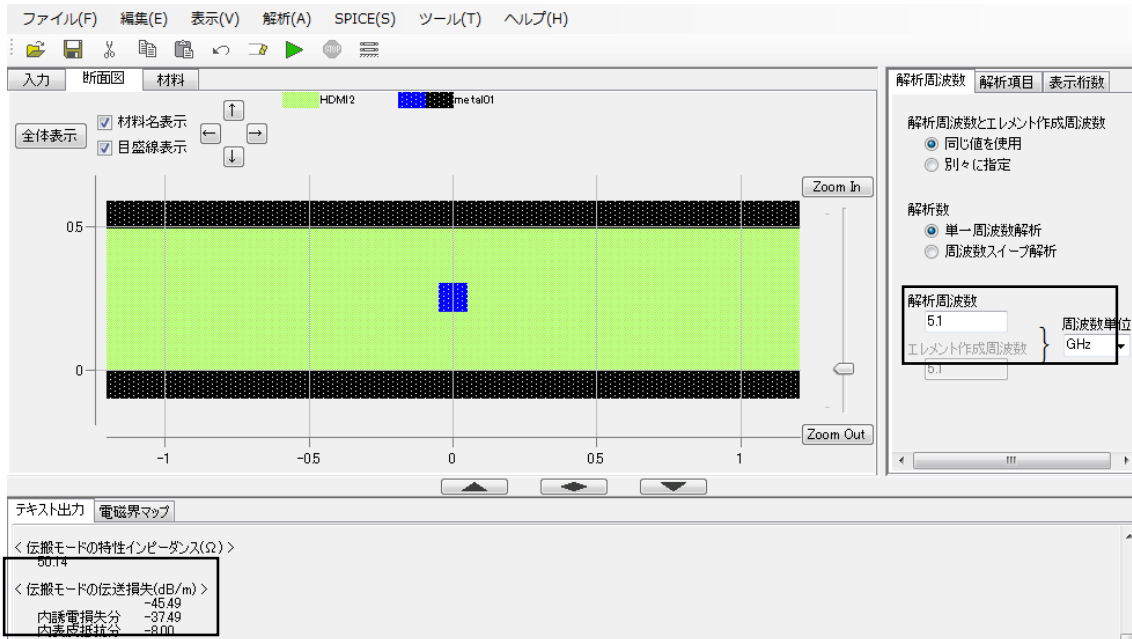


図 5. GreenExpress の解析結果

GreenExpress の解析結果は、-45.48dB/m で Wcalc の-45.39/m に一致しています。この解析結果から SPICE モデルを抽出します。LTSPICE での解析精度を上げるためにはオプションで減衰回路段数と LC 回路段数の決定基準を 1% (デフォルト 10%) にしてください。

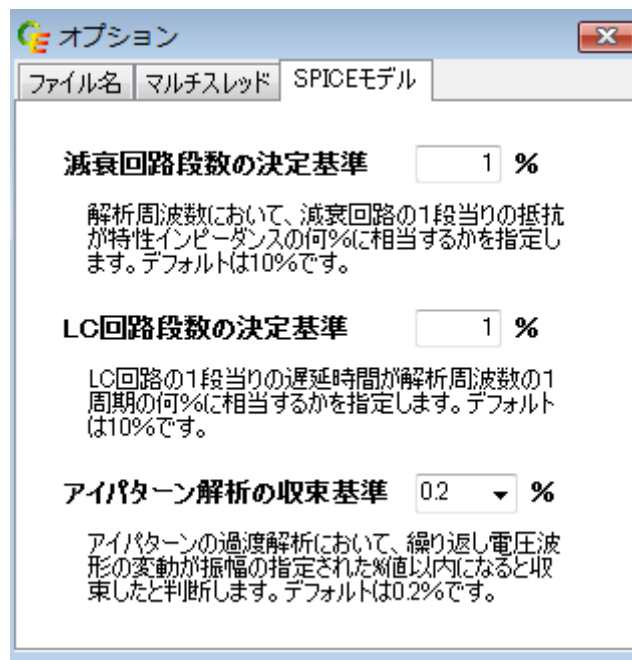


図 6. オプション指定

最終的には、下図のような LTSPICE による周波数ドメインによる減衰解析結果を見て、長さを 537mm から 480mm に微調整した SPICE モデルを採用しました。
(この差は GreenExpress のモデルによるものか LTSPICE によるものか不明です)

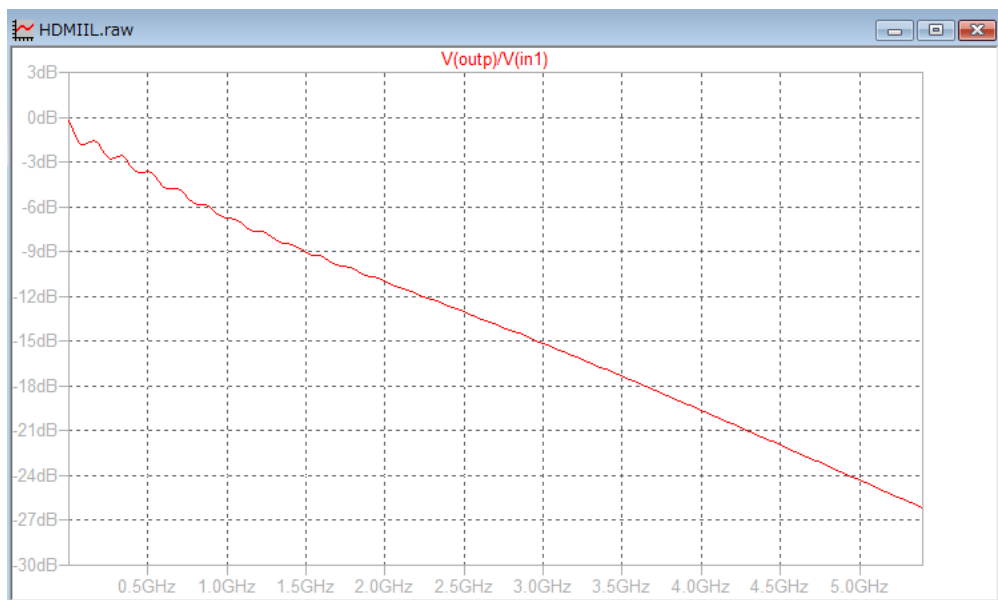


図 7.LTSPICE による周波数ドメイン解析結果

下図 8 が仕様と抽出モデルの解析結果を比較したものです。低周波で減衰が微妙に大きいですが、かなり一致した特性になっていることが判ります。

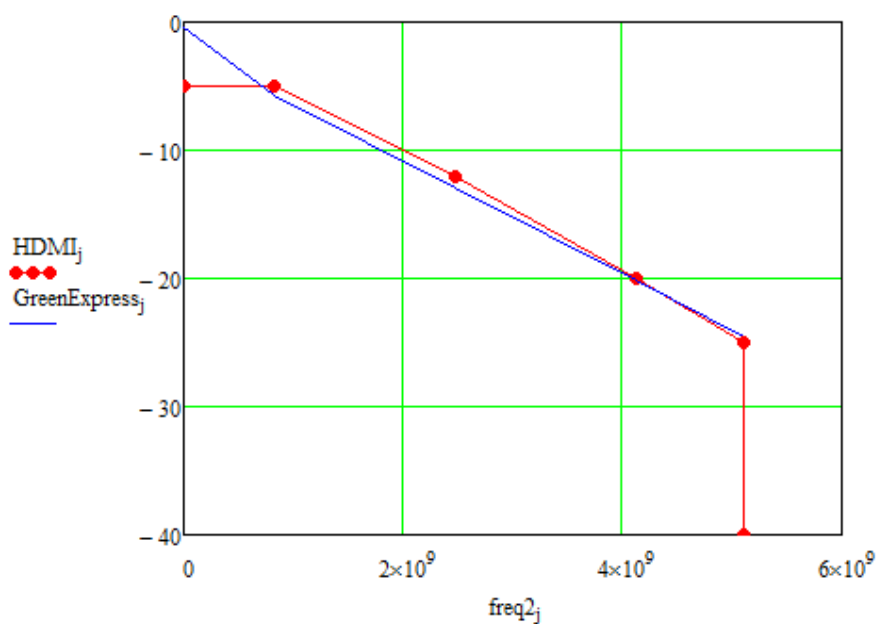


図 8 .HDMI の仕様と抽出モデルの特性

2. LTSPICE による HDMI の TP4 テストベンチ

ワーストケースケーブルの SPICE モデルが抽出できたので、いよいよ LTSPICE の TP4 テストベンチでアイパターンシミュレーションを行います。テストベンチは下図 9 のように 3 つのサブサーキットで構成されます。ここでは計算時間などを考慮して本来 100Ω 差動回路である HDMI を 50Ω のシングルエンドに仮定しました。

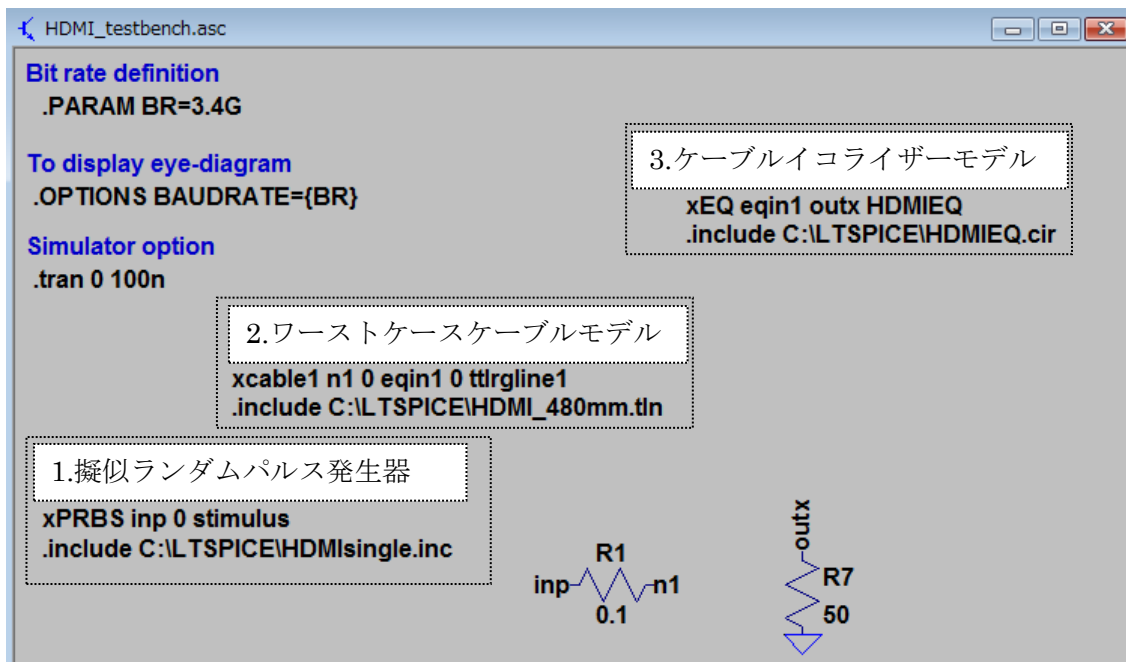


図 9. LTSPICE による HDMI の TP4 テストベンチ

まず擬似ランダムパルス発生器のサブサーキットです。特に受動部品のエンジニアに理解されていない場合が多いのですが、HDMI のコンプライアンステストでは TP1 で規定されたアイマスクがぎりぎり入る意図的なジッターを含む入力で評価する必要があります。

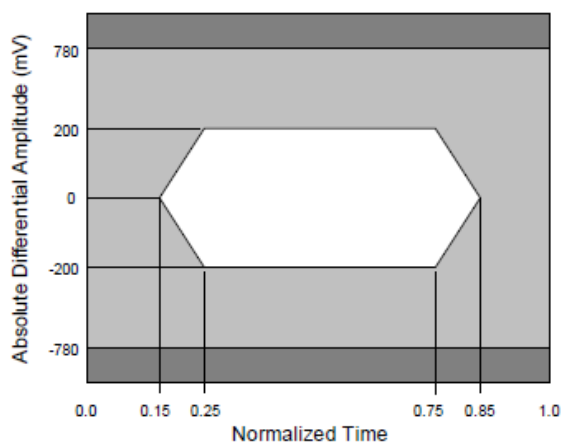


Figure 4-18 Eye Diagram Mask at TP1 for Source Requirements

図 10. TP1 アイマスク

この意図的なジッターを含んだ、Pre/De Emphasis の擬似ランダムパルスを作製するには、シグナル工房の扱う有償のPre/De-emphasis Stimulus Generator(下図11)か IOmeth社のSIMDEViwerのStimulus Generator(emphasis未対応)を使用します。

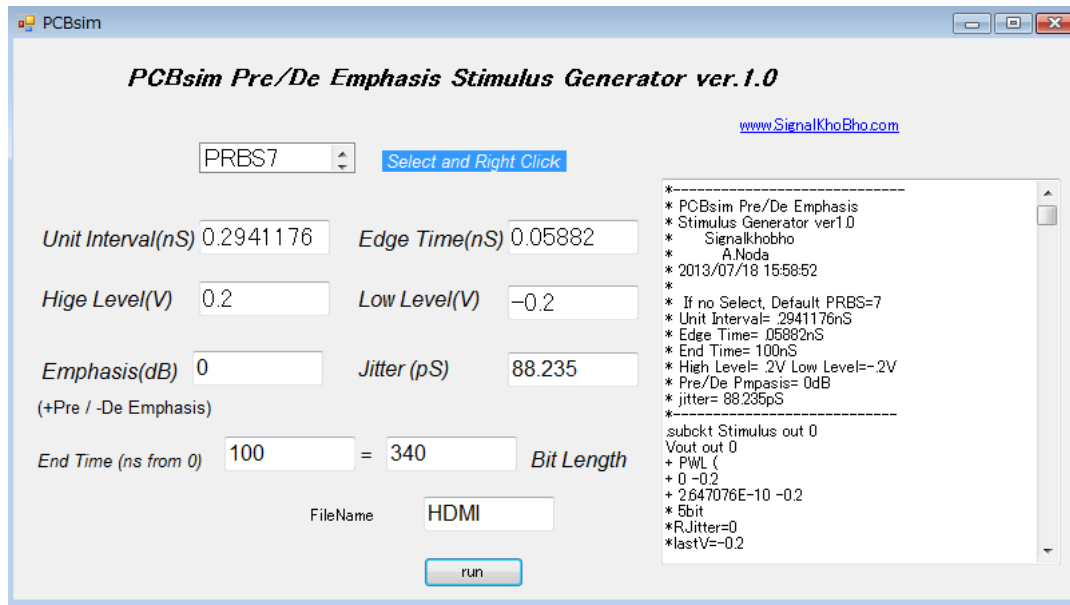


図 1 1 . Pre/De-emphasis Stimulus Generator

このツールにより作製されたのが下図 1 2 の TP 1 の入力パルスです。

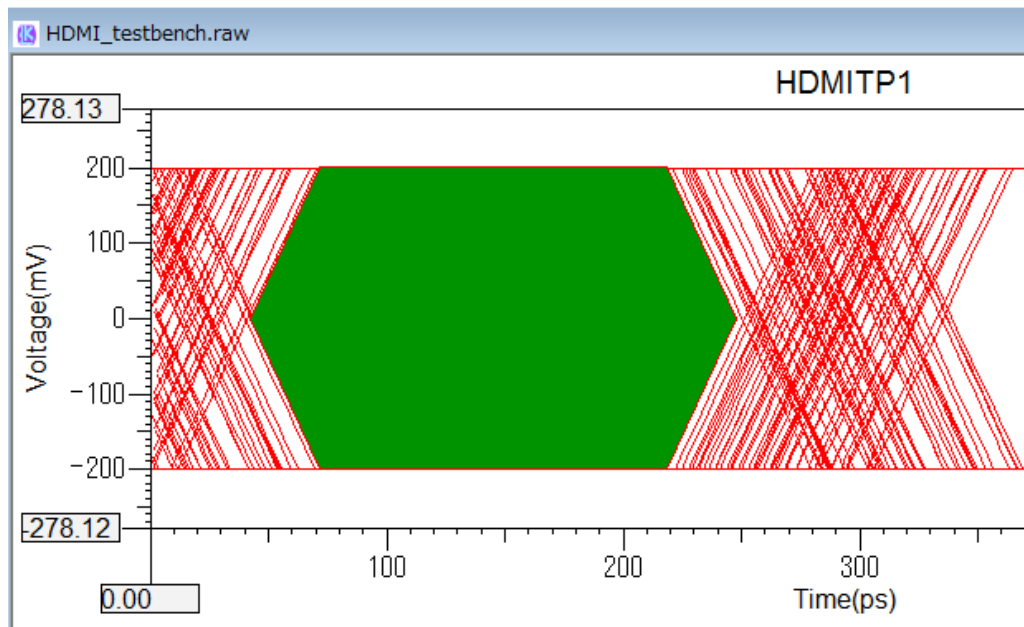


図 1 2.TP1 意図的なジッターを含む入力ランダムパルス

次に3つめのケーブルイコライザーモデルのサブサーキットでは、ゲインイコライザーを通して受信する必要があります。ここで HDMI の仕様書には実数のゲイン特性しか指定がなく虚数である位相特性の指定がありません。

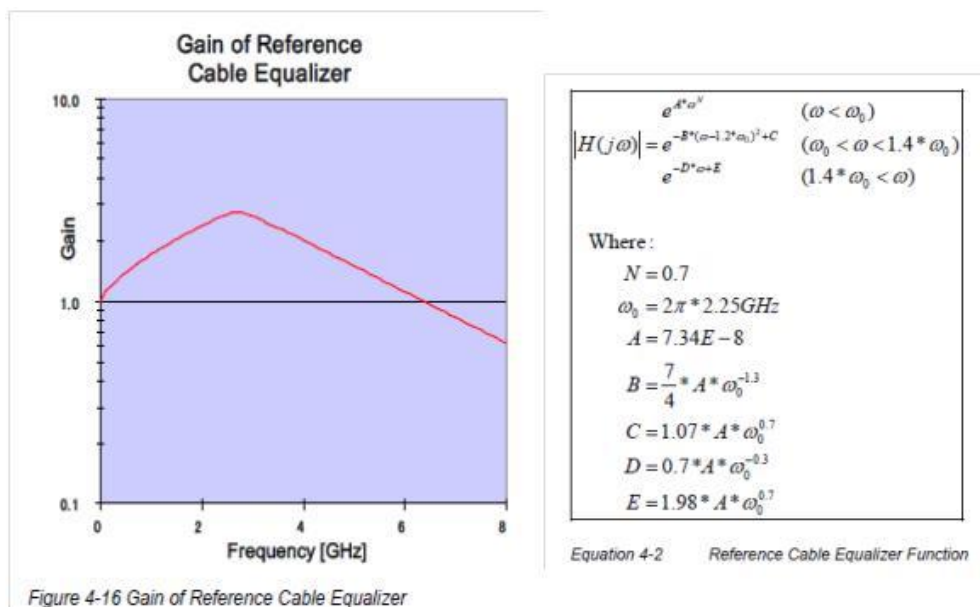


図 1 3 . ゲインイコライザーの特性

このイコライザーの位相特性は、ケーブルの表皮効果による位相歪を補償する重要な役目があり、図 1 4 の低周波部分の位相特性が重要になります。このテストベンチにはヒルベルト変換により数学的に得られた位相特性を持つイコライザーの SPICE モデルが付属します。この意図的なジッターを含むランダムパルスとゲインイコライザーフィルターを持つサンプリングオシロを実測用に購入すると 2 千万円以上の投資が必要になります。

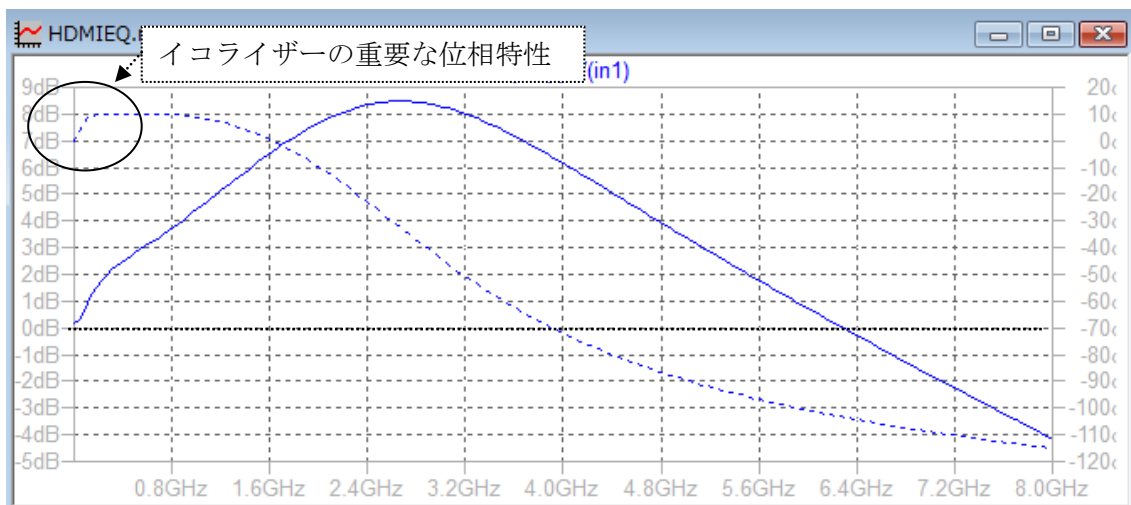


図 1 4 . ゲインイコライザーの位相特性

これにより最終的に得られたアイパターンが図 1 5 です。LTSPICE の標準の Viewer ではパルスの観測の開始時間を変えたり、アイマスクを書かせたりすることはできません。

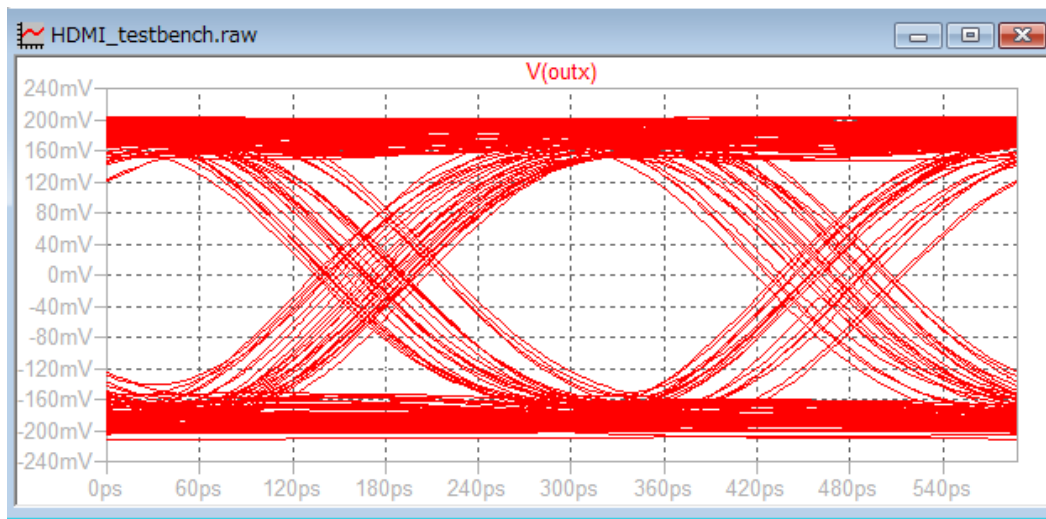


図 1 5 . LTSPICE の Viewer によるアイパターン波形

アイマスクを欠かせるには、有償ツールである IOmeth 社の SIMDEviewer か、シグナル工房が準備中の LTSPICE 用 EyeViewer を使用する必要があります。

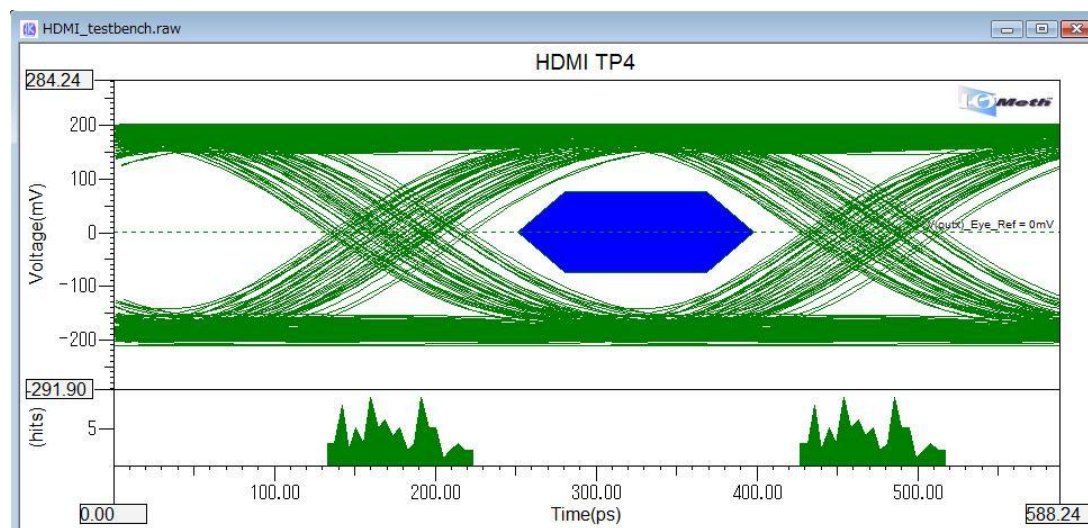


図 1 6 . IOmeth 社の SIMDEviewer

参考文献

野田敦人、「タイムドメインシミュレーションのための S パラメータの品質について（因果性 {Causality とは何か}）」、エレクトロニクス実装学会、超高速高周波エレクトロニクス実装研究会、平成22度第1回公開研究会