

Bergeron と IBIS を用いた波形解析

Bergeron 図表は、ドライバの電圧・電流特性と線路の特性インピーダンスだけで反射波形を求めることができる最も基本的な波形解析方法の一つである。簡単には、紙と鉛筆で解析でき、ドライバの電圧・電流特性が非線形の場合にも適用できる。

IBIS モデルは、回路解析に必要な情報を提供する。

多くの大手 EDA ベンダーの解析ツールは、IBIS モデルに対応しているが、ここでは、Excel を用いて、IBIS モデルで Bergeron 解析を行う方法について述べる。

図 1 は Bergeron と IBIS とを用いた反射波形の解析結果の例である。

以下に、順を追って解説する。

1. Bergeron 解析

図 2 は Bergeron 解析である。解析方法については参考文献^{1),2),3)}を参照願いたい。

ドライバの出力特性を、横軸に電圧、縦軸に電流をとって表し、レシーバの特性(オープン)も記載する。なお、電流の向きは、ドライバに流れ込む向きをプラスとする。

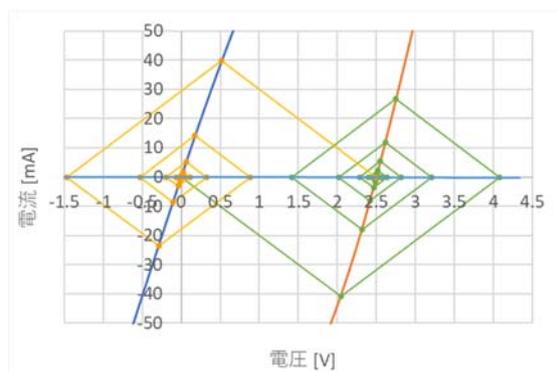


図 2. Bergeron 図表

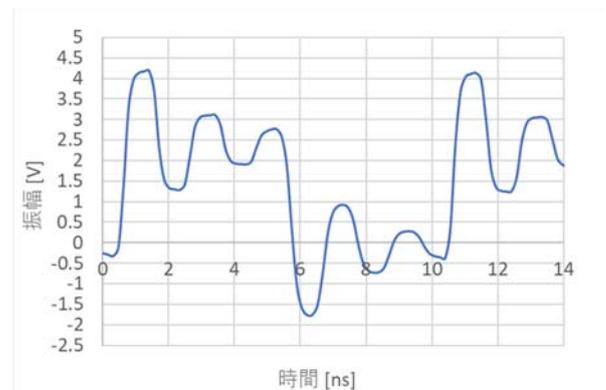


図 1. 波形解析結果

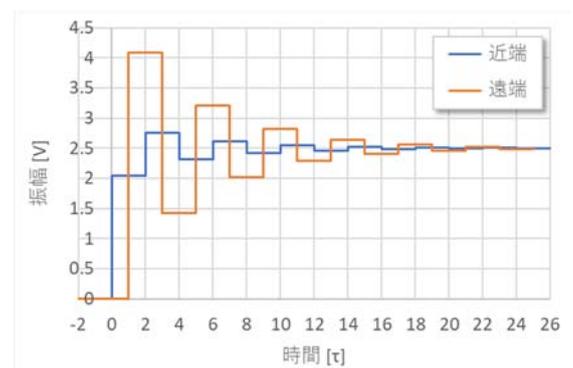


図 3. Bergeron 解析結果

図 3 は、立ち上がりを解析した結果であり、横軸は、線路の片道の伝搬遅延 τ である。

2. IBIS(I/O Buffer Information Specification)⁴⁾

IBIS は、1993 年に IBIS Open Forum において、伝送線路の信号波形の解析に必要な解析モデルを、策定し、度重なる改訂が行われ、最新版は、Version 7.2(2013.1.27)である。

基本的に必要なデータは、入出力端子の等価回路(RLC 情報)、出力端子の電圧・電流特性、出力波形デ

ータなどである。このほかにも、IC パッケージのパターンの情報などがあるが、本稿では用いない。

2.1. 電圧・電流特性

出力端子の電圧・電流特性は、Low 側(Pull Down)と High 側(Pull Up)それぞれに対して、電圧対電流で表す。Pull Down は、Gnd 基準であるが、Pull Up は V_{CC} 基準であり、Gnd 基準に変換する必要がある。

図 4 は、IBIS データの Pull Down と Pull Up をそのままプロットしたものであり、図 5 は、Pull Up を Gnd 基準に変換したものである。Pull Up の変換は、図 4 の Pull Up の横軸との交点(0,0)を、 V_{CC} に移動して左右反転させる。

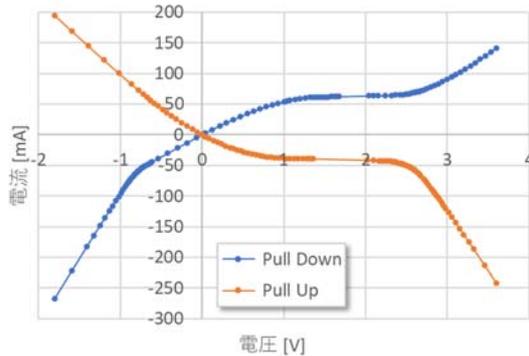


図 4. 出力端子の電圧・電流特性

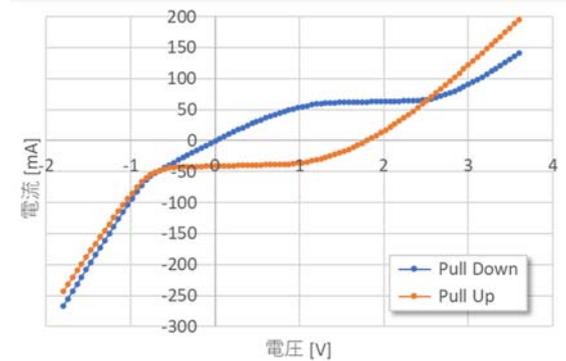


図 5. 出力端子の電圧・電流特性 (Gnd 基準)

図 5 の Pull Down と Pull Up を、図 2 に適用して立ち上がりと立ち下がりの反射を解析する。立ち上がりの解析結果が、図 3 である。

2.2. 波形データ

IBIS には、立ち上がり(rising waveform)と立ち下がり(falling waveform)のデータがある。時間対電圧で表す。

図 6 は、rising waveform をプロットしたものである。これには素子の遅延時間を含むので、原点にシフトする必要がある。

ここでは、波形のフル振幅に対して、20%と 80%の点を通るランプ波形が原点から立ち上がるようにシフトさせる。

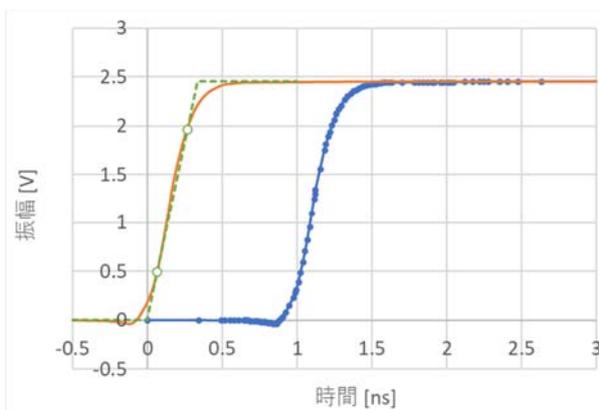


図 6. 立ち上がり波形

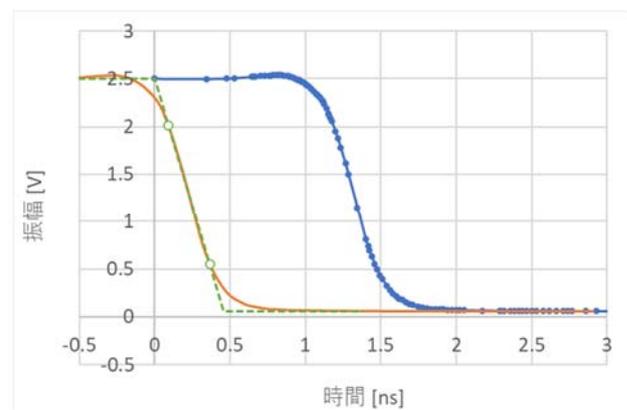


図 7. 立ち下がり波形

なお、waveform は、終端抵抗(R_{fixture})と終端電圧(V_{fixture})の条件下でデータを取得する。rising waveform は、 V_{fixture} を V_{CC} に、falling waveform は、 V_{fixture} を Gnd(0V)にすることが好ましい。図 2 の Bergeron 図表の動作点を参考にしてほしい。また、 R_{fixture} は、今回の例では 500Ω であるが、実際の動作点

を考えると、解析する線路の特性インピーダンスに近い方が好ましい。

この、 R_{fixture} と V_{fixture} により、立ち上がり波形の最終値 2.5V に対して、2.452V とやや小さくなり、立ち下がり波形の最終値は、0V に対して、0.06V とやや大きくなる。

これらは、わずかな増減であるが、立ち上がりは 2.5V に、立ち下がりは、0V に補正しておく。

この IBIS では、 R_{fixture} が 500Ω なので、増減は小さいが、50Ω の場合もあり、その場合は、振幅の増減がもう少し顕著である。

2.3. Bergeron 解析結果の波形の分解

図 8 は、図 3 の Bergeron 解析波形を、タイミングごとに分解表示したものである。

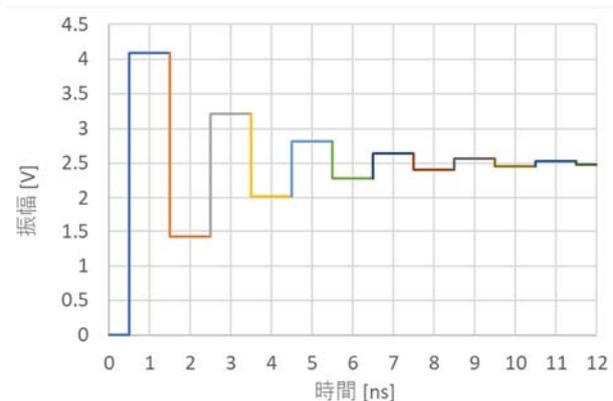


図 8. Bergeron 解析波形の分解 1

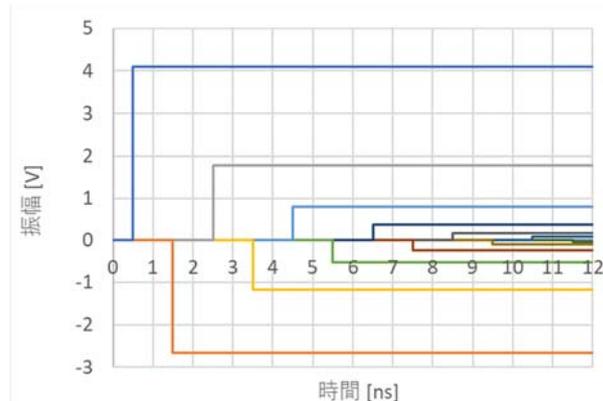


図 9. Bergeron 解析波形の分解 2

図 9 は、分解した図 8 の各タイミングを独立して表示したものである。この各波形に図 6、図 7 の波形を計算して図 8 から図 9 に分解する逆の操作をして図 10 から図 11 の合成波形を得る。

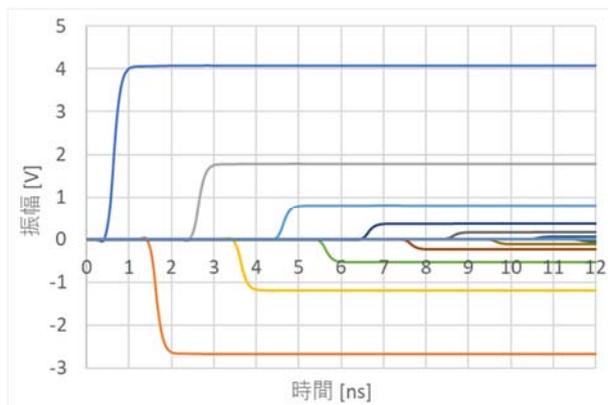


図 10. 分解した波形に waveform をかける

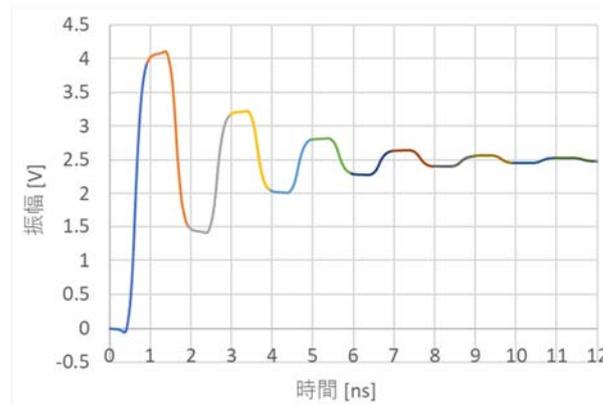


図 11. 合成波形

立ち下がりについても同様の操作をして、立ち下がり波形をパルス幅分だけ遅らせて立ち上がりに加えると、所定のパルス幅の単発波形を得る。

2.4. 繰り返し周期の考慮

この例のように、比較的反射の大きな波形の場合、反射は長く継続し、繰り返し波形の次の周期に重なる。

例えば、パルス周期が、10ns とすると、図 12 において、10ns 付近はまだ反射が収束していない。

したがって、この場合は、一つ前の周期を考慮する必要がある。図 13 は、一つ前の周期と、一つ後の周期

を同じグラフに表したものである。この3つの波形を重ねたものが、冒頭の図1である。

反射の程度および繰り返し周期によって、前の周期の影響をどの程度考慮する必要があるかはそのつど検討する必要がある。少ない反射で大きな周期および広いパルス幅なら単発パルスで十分であるし、反射が大き

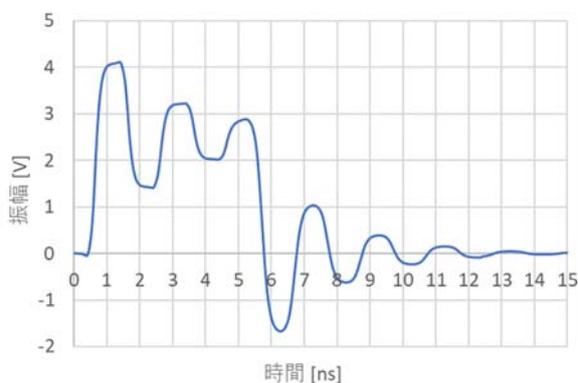


図 12. 所定のパルス幅の単発波形

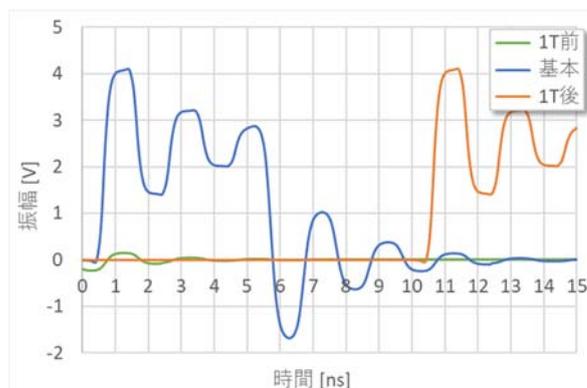


図 13. 前後の周期

くて、周期が短く、パルス幅も狭い場合には、前の周期だけでなく、もう一つ前の周期の影響も考慮する必要がある場合がある。図13のように、前の周期、さらにその前の周期の波形も並べて表示して決める。

3. まとめ

Bergeron 図表は、初歩的な解析ツールで、せいぜい図3のような解析しかできないと思われているが、IBIS データと組み合わせると、最終的には、図1のような解析までできる。

エクセルを用いることにより、リアルタイムで解析結果を得ることができるので、例えば、周期やパルス幅を変えると波形がどのように変化するかなど、いろいろな解析ができるので試みてほしい。

参考文献

- 1) 碓井有三：ボード設計者のための分布定数回路のすべて(改訂3版) 自費出版
(<http://radioy.a.la9.jp/>), pp.25-28, 2016
<http://radioy.a.la9.jp/book/book.htm>
- 2) 碓井 有三：シグナルインテグリティ講座 「第2回 分布定数回路の等価回路と方程式」 エレクトロニクス実装学会誌 21巻4号(2018年7月号) pp.313-315
- 3) Bergeron 図表
バージョン図表：<https://www.macnica.co.jp/business/semiconductor/articles/basic/122501/>
非線形バージョン図表：<https://www.macnica.co.jp/business/semiconductor/articles/basic/122797/>
- 4) IBIS モデルを用いた反射の解析
IBIS モデルを用いた反射の解析～その1
<https://www.macnica.co.jp/business/semiconductor/articles/basic/111905/>
IBIS モデルを用いた反射の解析～その2
<https://www.macnica.co.jp/business/semiconductor/articles/basic/112009/>

IBIS の最新仕様は以下

IBISver7.2; IBIS version 7.2 ratified 27 January 2023 by the IBIS Open Forum

<https://ibis.org/ver7.2/>

なお, 本稿では, 以下の IBIS モデルを使用した.
SN74ALVC00 の ALVC00_OUT_25

<https://www.ti.com/jp/lit/zip/scem206>

線路の片道の遅延時間は, 0.5ns で, 7~8cm 程度.

特性インピーダンスは 50Ω

信号の繰り返し周期は 10ns, パルス幅は 5ns