

高速デジタル・アイソレータを動かして その性能を観測してみた&とても大きいトランスの話

著者：石井 聡

はじめに

それは新卒で入社して3年くらいのときだったかもしれません。「いい君、今つかっているフォトカブラだとスピードでなくてね。なんかいいの知らない？」と他の部署の先輩が聞いてきました。

「ああ、◎◎社のやつなんか結構高速は高速ですよ」「うん、ありがとう」

その後の経緯は良く記憶にありませんが、私の直属の上長だったひとにも相談に行ったようで、その人は今使っていたフォトカブラで、コレクタについている抵抗を少し大きくして、「ほれ」とその他部署の人に見せていました。蓄積時間を少なくして高速化するという技でした。「うーむ。なるほどねえ」と駆け出しの頃に思ったものでした（とはいえこの手法は、フォトカブラの電流伝達率の経時変化の観点から本当は良くない）。

といっても、現在のデジタル信号伝送はより高速になってきています。フォトカブラで信号伝送させるにも「スピードでなくてね。なんかいいの知らない？」となりがちでしょう。

現在では、フォトカブラと同じ機能を実現し、高速通信が可能な高速デバイス、「**デジタル・アイソレータ**」と呼ばれる各種の製品が販売されています。

デジタル・アイソレータの使いみち

デジタル・アイソレータは、回路の1次側と2次側を直流的に絶縁するものです。フォトカブラと同じ機能なわけなので、使い道は（フォトカブラを考えれば）イメージしやすいものではないでしょうか。

ところで図1のようなシステムで、「ミックスドシグナル・プリント基板上でアナログ GND とデジタル GND をどうつなぐ？」というのは良くある話です。このふたつのグラウンド間を不適切に接続すると、グラウンド・ノイズによりアナログ的な性能が低下してしまいます。

プリント基板上でのパターン・レイアウトにより解決する方法もありますが、複雑なシステムでは理想形はかなり難しいかもしれません。

ここに高速のデジタル・アイソレータを活用することができます。アナログ GND とデジタル GND を分離したままで信号伝送が可能になります。直流レベルがアイソレーションされ、グラウンド間に生じるグラウンド・ノイズの影響をゼロにできます。無線通信みたいなものですね。

重要な部品のレイアウトの最適化がスタート

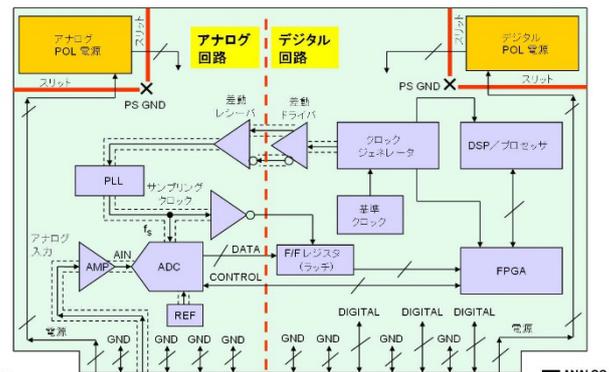


図1. ミックスドシグナル・プリント基板上でアナログ GND とデジタル GND をどうつなぐ？

iCoupler のスピードを「パネル de ボード」の評価用変換ボードで実験してみる

そこでアナログ・デバイスズのデジタル・アイソレータ「iCoupler」のスピードがどんなモンか実験してみようと思います。P版.comの「パネル de ボード」のサービスで、このiCoupler専用のアイソレーションされた評価用変換ボードを用意しており、これを活用して実験してみたいと思います（図2）。

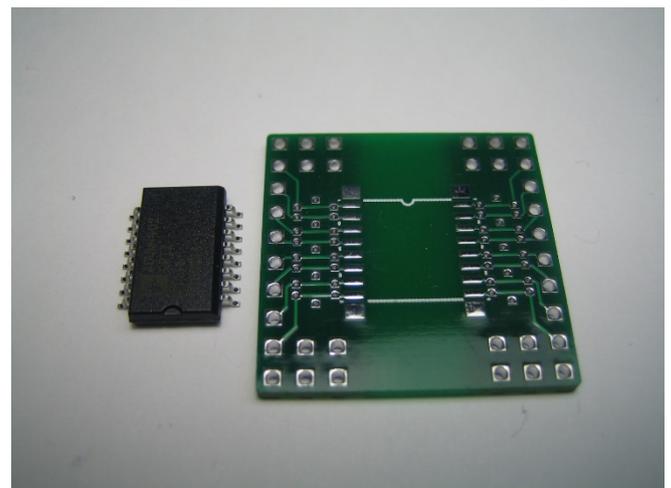


図2. iCoupler のスピードを「パネル de ボード」の評価用変換ボードで実験してみる

アナログ・デバイスズ株式会社は、提供する情報が正確で信頼できるものであることを期していますが、その情報の利用に関して、あるいは利用によって生じる第三者の特許やその他の権利の侵害に関して一切の責任を負いません。また、アナログ・デバイスズ社の特許または特許の権利の使用を明示的または暗示的に許諾するものでもありません。仕様は、予告なく変更される場合があります。本紙記載の商標および登録商標は、それぞれの所有者の財産です。
©2017 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

Rev. 0

使う iCoupler は ADuM4402 という高速品

使う iCoupler は ADuM4402 というもので、左行き 2ch、右行き 2ch の構造になっているものです（図 3）。電源電流を 20mA (@ 3V) まで流すのを許容すれば 90Mbps までいきます。2Mbps であれば、電源電流は 0.9mA (@ 3V) です。

一般的に使われているフォトカプラですと、大体 1~数 Mbps が良いところではないでしょうか。自分も昔はフォトカプラを使っていましたが、オープンコレクタ構造であることから、蓄積時間があり、キャリアが消滅するまで時間がかかるので、高速フォトカプラを使っても、立ち上がりが $1\mu\text{s}$ 程度の波形になることが多いのではないのでしょうか。

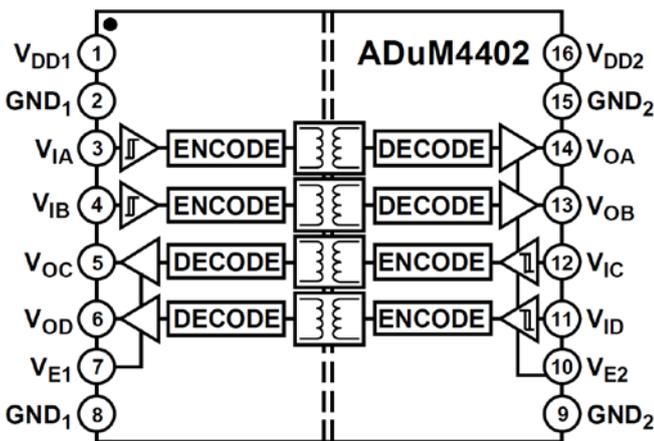


図 3. ADuM4402 の基本構造

古いフォトカプラで予備実験してみる

その私が駆け出しの頃、今では「いにしえ」ともいえる頃に販売されていたフォトカプラを秋月電子で入手したので、まずは予備実験としてどんな特性が得られるかを見てみましょう。フォトカプラということで、アナログ・デバイセズの製品ではありません…。

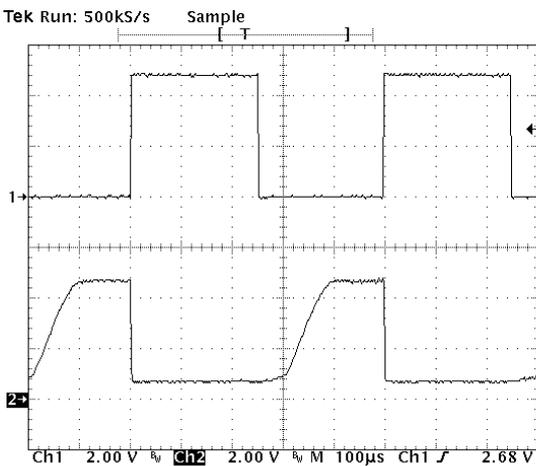


図 4. 古いフォトカプラで実験してみる ① (コレクタ出力、LED 電流 12mA、コレクタ抵抗 470Ω、電源 5V)

図 4 に測定結果を示します。LED 電流は 12mA 流します。コレクタに接続した出力抵抗は 470Ω、電源は 5V です。入力デジタル・データは 4kbps ととても低速ですが、それでも出力波形が鈍って観測されます。オープンコレクタの回路構成なので、入出力の波形の極性が反転しています。

出力波形の立ち上がりは $100\mu\text{s}$ ほどになっています。かなり古い製品なので、信号の応答はとても低速です…。最新の高速フォトカプラであれば、より高速な伝送は可能です。

「それでは蓄積時間が影響しないはずのエミッタ・フォロワ型はどうか」というわけで、エミッタ・フォロワ型にフォトカプラ回路を構成しなおして、波形を観測してみましよう。フォトカプラのエミッタ出力に抵抗を接続し、コレクタ側は 5V 電源に直接接続します。測定してみた波形が図 5 ですが、あまり変化がありません…。

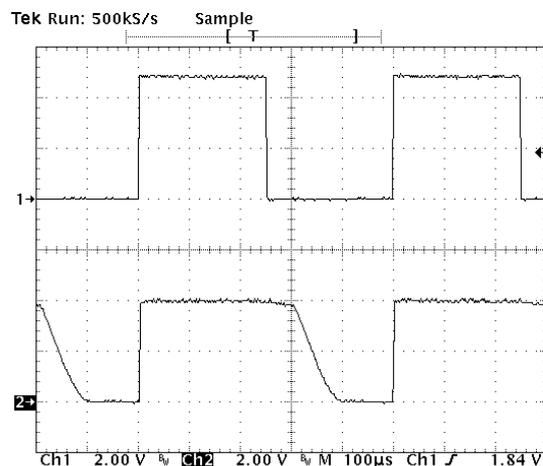


図 5. 古いフォトカプラで実験してみる ② (エミッタ出力、LED 電流 12mA、エミッタ抵抗 470Ω、電源 5V)

iCoupler はトランスによる磁気結合方式

iCoupler はデジタル入力の論理変化・論理状態をパルス信号に変換して IC 内のコイル間 (トランス) で 1 次側と 2 次側とで通信するような構造になっています。トランス構造ということで電磁誘導現象を用いた磁気結合方式になっています。

内部通信速度を高速にすれば、それに応じて高速にできるわけで、さきの ADuM4402 で 90Mbps という伝達速度も実現できるわけです。ADuM344x なんかですと 150Mbps までいきます。

英文ですがよい資料がありましたので、ご紹介します。

High Speed Digital Isolators Using Microscale On-Chip Transformers

この資料にも内部構造が掲載されていますが、事業部からもう少し IC 内のトランス画像を入手したのでご紹介します。

図 6 は一番基本的な「絵」でありまして、このように $20\mu\text{m}$ のポリイミドによりトランスの 1 次側と 2 次側が絶縁されています。同図の右側をみると、1 次側は CMOS のダイ、2 次側にも CMOS のダイがあり、その 2 次側のダイのうえにこのポリイミドをサンドしたトランスが形成されていることが分かります。

また図 7 は CMOS のダイ間にトランスが配置された構造のもの、図 8 はこのトランス部を拡大したものです。図 9 もトランスです (笑)。

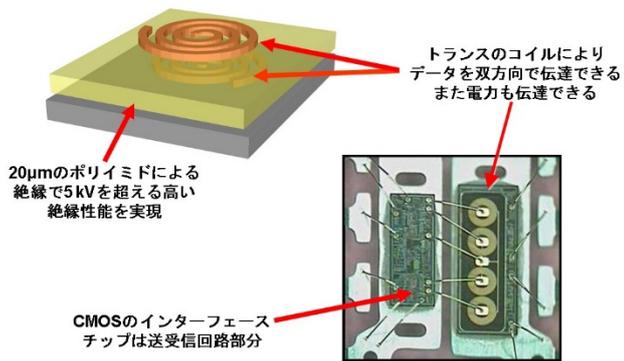


図 6. iCoupler のトランスの基本的構造

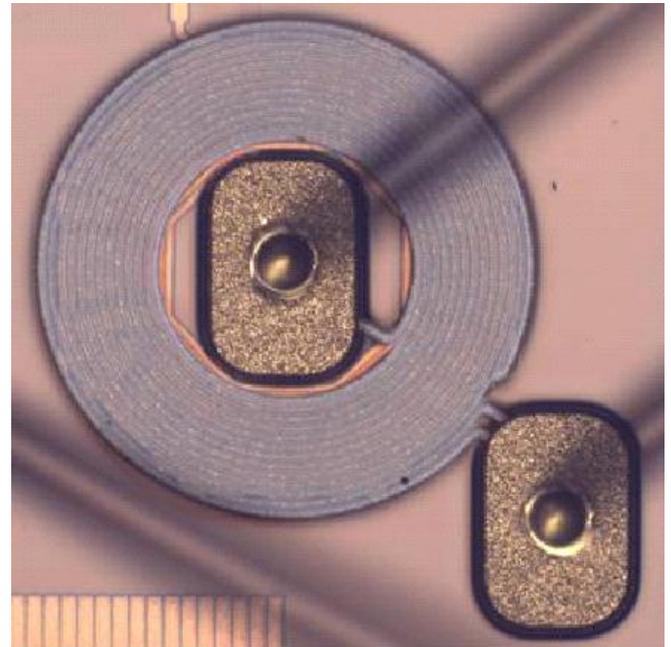


図 8. トランス部を拡大したもの

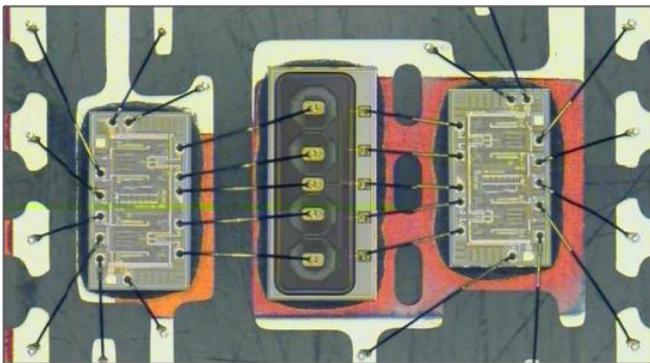


図 7. CMOS のダイ間にトランスが配置されたもの



図 9. これもトランス (笑)。右下は人が出入りできるドア



図 10. 図 9 のトランスはこんなところ（中央）に配置されている

図 9 のトランスは図 10 のような施設に設置されているものです。図 9 のトランスは中央のものになります。この写真を出すと、知っている人は「ああ…」と思うかもしれませんが、UVW (RST) が 3 相並んでいるようです。たしか左から東芝、三菱、日立で 1 相ずつを担当しています。iCoupler なら 3ch で 120° 位相ずらした通信って感じですかね（笑）。

トランス容量を調べてみたら、どうやら 1000MVA みたいですね。実はこの設備は、東京電力新榛名変電所にある「100 万 V 実証試験設備」なのであります！

ところでこのトランス。最初は「トランス容量 3MVA」と思っていました。が、「？」と思って再確認すると 1000MVA = 1GVA で（汗）、スケールレンジを理解していないことを露呈した形になってしまいました！これで強電はペーパードライバということがバレバレです（汗）。電子回路からすれば「PN 接合での電圧降下は 3mV です」と言ってしまうようなモノです…。「考慮する対象のスケールレンジをイメージしていることが、いかに重要なのがここでも分かる」という副産物をご提供したことにして、少し言い訳させていただきました（汗）。

使う評価用変換ボードは「パネル de ボード」

P 版.com のパネル de ボードのサービスで、この iCoupler 専用のアイソレーションされた評価用変換ボードを用意しています。

今回はこれを使って ADuM4402 をテストしてみました。図 11 は部品面のような感じです。ところで「話の途中で雑談をささむと集中力が途切れる」といわれたことがありますが、それに反して雑談を（笑）。

図 11 の左上に 10 μ F 50V のコンデンサが見えますが、これは千石電商で 30 個注文したはずが 130 個到着したものです。「を

っ！」と驚き、発送ミスだろうと思いつつも、その一方で自分のオーダミスが頭をよぎりました。注文書を見てみると、「130 個」と、間違いなく、確かに、よぎったとおりでした（汗）…。

さて、iCoupler は電磁方式であるため、デカップリングが重要です。図 12 の半田面の写真をみて分かるように、VCC と GND が隣同士に並んでおり、またこのパネル de ボードでの変換ボードは 1608 チップが乗るサイズになっているため、非常にいい感じでグラウンドとのデカップリングが取れます。

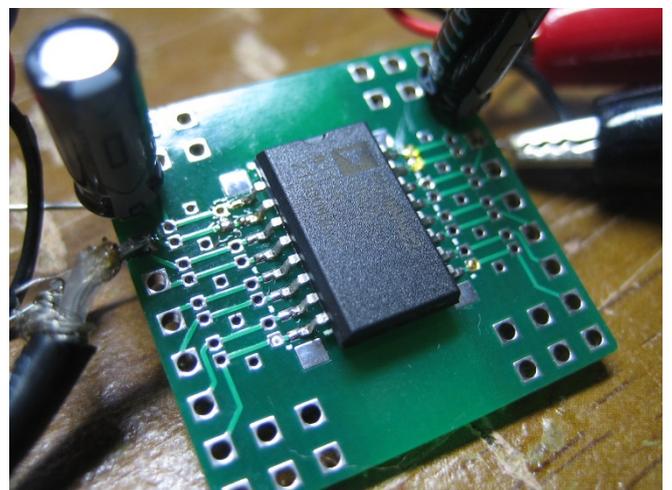


図 11. パネル de ボードでの iCoupler 専用のアイソレーションされた評価用変換ボード（部品面）

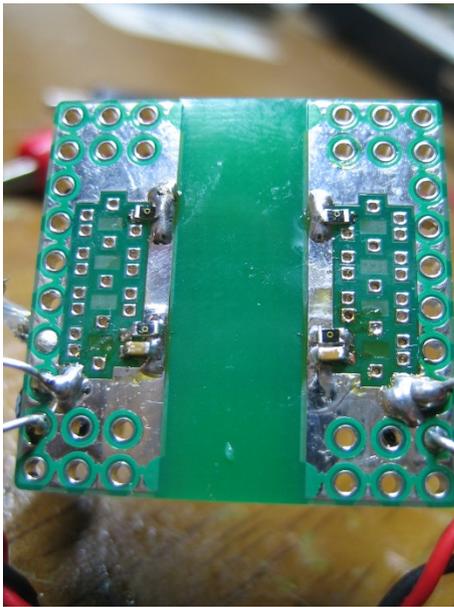


図 12. iCoupler 専用の評価用変換ボードの半田面。いい感じでグラウンドとのデカップリングが取れている

実際に特性を確認してみよう

ADuM4402CRIZ を使ってまずは小手調べ

実験で使用した iCoupler は ADuM4402CRIZ というモノで、C が 90Mbps 品を示しており、RI は距離 8mm の沿面距離の長いパッケージを示しています。RI は従来の RW パッケージの横幅が広がっているだけで、フットプリント（基板パターン。ピン先端から先端まで）は同じです。

はるか昔の「今つかってるフォトカプラだとスピードでなくてね」という話の時代での「高速通信（1Mbps 程度）」を、小手調べとしてやってみたのが、図 13 のオシロスコープの波形です。カーソルからカーソルが $1\mu\text{s}$ （1Mbps）です。入出力で若干の遅延は見えますが、「だいぶ余裕」という感じがですね。

なお、以降でも説明していきますが、この図 13 の波形観測はパッシブ・プローブを使用しています。しかし信号が高速になると適切に測定できなくなりますので、注意が必要です。

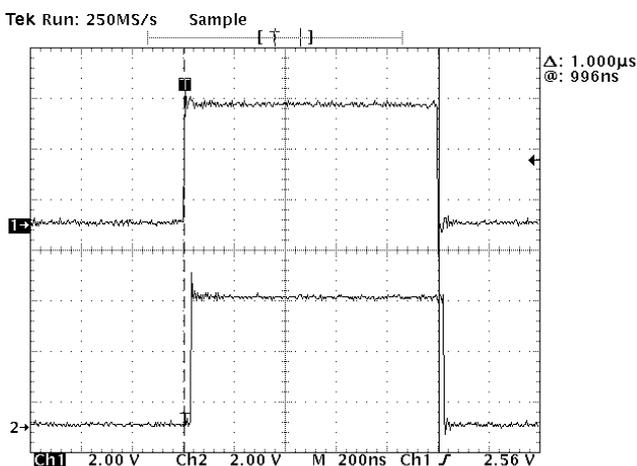


図 13. ADuM4402CRIZ を 1Mbps で動かしてみた

Table 4.

Parameter	Symbol	A Grade			B Grade			C Grade			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
SWITCHING SPECIFICATIONS											
Data Rate				1			10			90	Mbps
Propagation Delay	$t_{\text{PHL}}, t_{\text{PLH}}$	50	75	100	20	38	50	20	34	45	ns
Pulse Width Distortion	PWD			40			3		0.5	2	ns
Change vs. Temperature			11			5			3		ps/°C
Pulse Width	PW	1000			100			11.1			ns
Propagation Delay Skew	t_{PSK}			50			22			16	ns
Channel Matching											ns
Codirectional	t_{PSKCD}			50			3			2	ns
Opposing-Direction	t_{PSKOD}			50			6			5	ns

図 14. ADuM4402 のデータシートから各グレードにおける遅延時間の規格を抜粋してみた

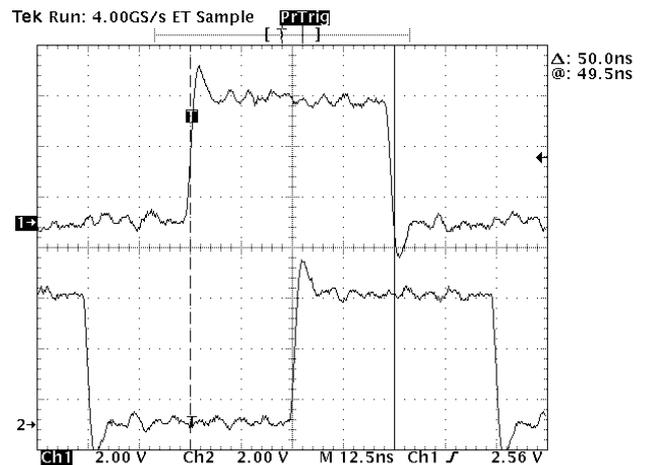


図 15. ADuM4402CRIZ を 20Mbps で動かしてみた

ところで ADuM4402 は A, B, C の 3 グレードあって、今回使ったのは C グレードです。これは max 90Mbps まで動作するものですが、図 14 にデータシートを抜粋したように、20 min~34 typ~45 max [ns] 程度の伝搬遅延があります。これはエンコーディング・デコーディングしているために生じているものです。さきほどの 1Mbps の波形でも見えていたものです。

つづいてこれまだまだ小手調べという感じがしますが、図 15 に 20Mbps で動かしてみたようすを示します。ここでも観測はパッシブ・プローブです。

この場合は遅延が約 25ns 程度になっていることが分かります。

デジタル・アイソレータのちょっと便利な使い方

アイソレータの便利な使い方の一つとして、レベル変換の例をお見せします。図 16 をご覧ください。1 次側を 5V 電源にして、2 次側をスペック最小の 2.7V 電源にしてみました。ちゃんと 2 次側では 2.7V の出力レベルになっています（あたりまえ…）。

アイソレーションされていることで、このように簡単にロジック・レベルの変換が可能です。なおこの際は、単なるレベル・シフトということで、1 次側と 2 次側のグラウンドをつないでご利用ください。

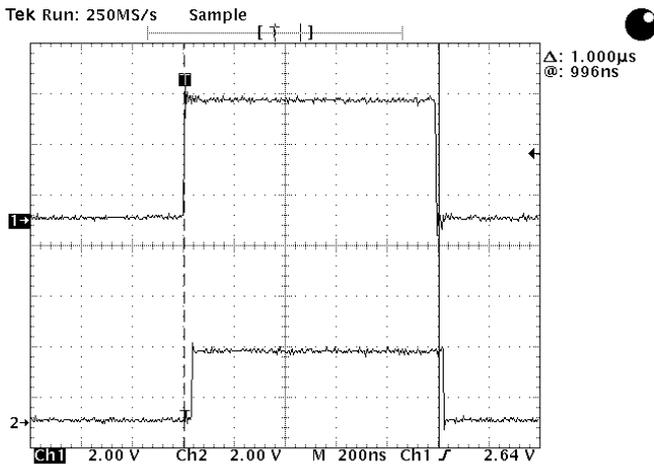


図 16. ADuM4402CRIZ をレベル変換として 5V から 2.7V に変換してみた（1 次側と 2 次側のグラウンドは接続する）

ADuM4402CRIZ を最高速 90Mbps で使ってみる

いよいよ 90Mbps、ということでもとても高速なビットレートなわけですが、まずはこれまでのように、テキトーにオシロスコプのパッシブ・プローブを接続して、この高速伝送の波形を観測したようすを図 17 にお見せします。一応ちゃんと動いていそうということが分かりますが、この波形は「測定という観点において、インテグリティが十分なのか？」という疑問が出てきてしまいますね。後半で、50Ω系の設定で計測してみたものもお見せします。

なお遅延が実測で 25ns ありますので、2 ビットうしろ（波形は見えない）あたりが受信側で（遅延したかたちで）得られるビット情報になっています。ここではパルスジェネレータの CLK をビット情報として入れていましたので、伝送の遅延時間が判らないという状態でした。そこで遅延時間もデータ・パターンから確認できるように、PRBS（Pseudo Random Binary Sequence; ランダム・データ）で入れてみましょう。

いずれにしても ADuM4402CRIZ は、きちんと信号伝送していることはだけ分かれます。

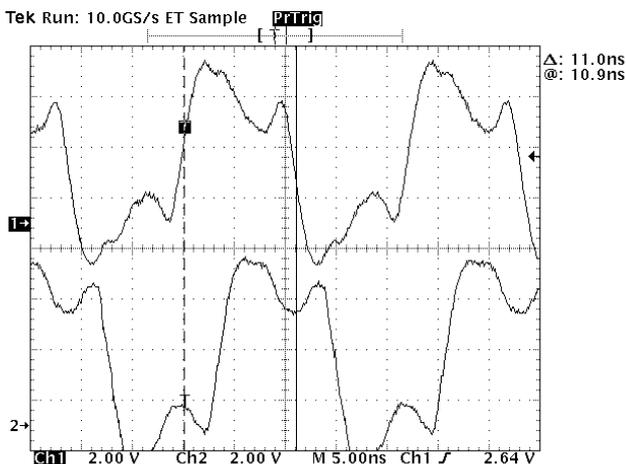


図 17. ADuM4402CRIZ を 90Mbps で動かして（これまでのように）パッシブプローブを接続して観測してみた

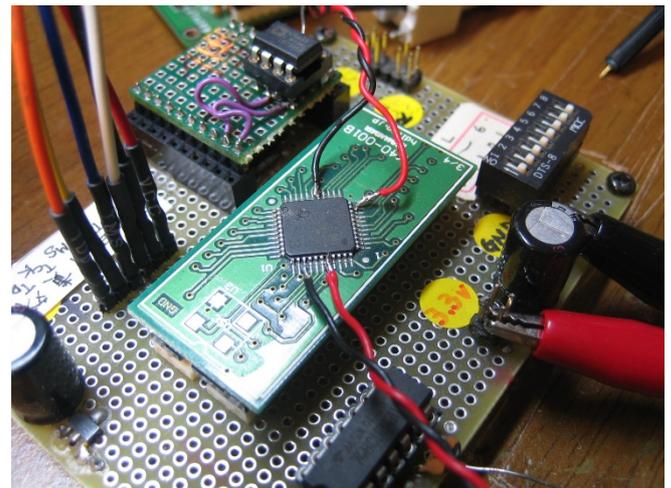


図 18. PRBS を発生させるための CPLD ボード（ヒューマン・データ社の製品）と周辺回路。XCR3064XL という CPLD が実装されている

Performance Summary	
Min. Clock Period	10.500 ns.
Max. Clock Frequency (fSYSTEM)	95.238 MHz.
Limited by Cycle Time for CLK	
Clock to Setup (tCYC)	10.500 ns.
Pad to Pad Delay (tPD)	9.100 ns.
Clock Pad to Output Pad Delay (tCO)	6.500 ns.

図 19. XCR3064XL の論理合成結果。95MHz まで動作することが確認できる

ADuM4402CRIZ に 75Mbps の PRBS をいれてみる

図 18 のような CPLD ボード（XCR3064XL。ヒューマンデータ社さんのモノ。もう 15 年以上前に買ったものかもしれない）を用いて、75Mbps の PRBS 信号を作って iCoupler ADuM4402CRIZ に入れてみました。XCR3064XL の論理合成結果では、図 19 のように 95MHz 程度まで動作できるようになっています。

ADuM4402CRIZ の仕様自体は 90Mbps まで動くものですが、また XCR3064XL も 90Mbps で動作できるはずですが、丁度 USB に挿すと 75MHz クロックが得られる基板があったので、これをクロック源として XCR3064XL にぶち込み（不適切な表現ですが、回路屋はこういう用語も使います）、75Mbps の PRBS データを作ってみました。

これを ADuM4402CRIZ に加えたときの波形を図 20 に示します。XCR3064XL の電源電圧制限から、ADuM4402CRIZ の電源は 3.3V にしてあります。図 20 の CH1 が ADuM4402CRIZ の入力側です。パッシブ・プローブでの観測、またこの入力をドライブする XCR3064XL の出力とは同軸ケーブルでつないであり、終端もしていないので、かなり暴れた波形になっています。

CH2 が出力側です。ここはパッシブ・プローブが繋がっているだけなので、それほど暴れていません（あとで 50Ω系でインテグリティを高めた計測をしてみます）。PRBS のデータ・パターンから、75Mbps の信号が 29ns 程度のディレイでちゃんと通っていることが分かります。

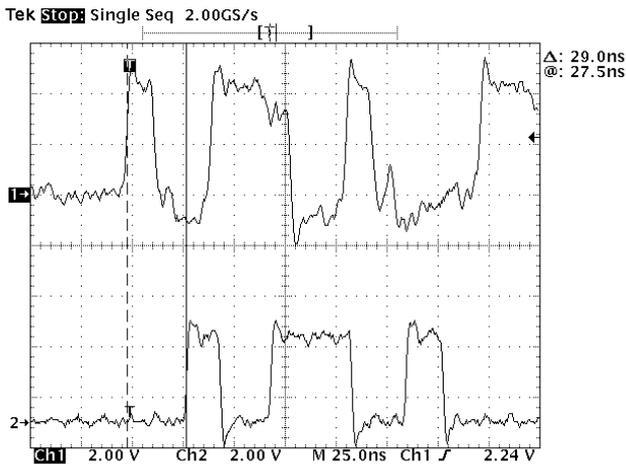


図 20. XCR3064XL で生成した PRBS 信号を ADuM4402CRIZ に加えてみる。ディレイが 29ns ということを確認できた (上は ADuM4402CRIZ への入力波形、下は出力波形)

ADuM4402CRIZ の 80Mbps 伝送をインテグリティ高い測定で観測してみる

ADuM4402CRIZ は 90Mbps まで伝送できると説明してきましたが、これまでお見せした測定での高速信号波形は、パッシブ・プローブをそのまま接続したものだったので、あまりキレイなものではありませんでした (インテグリティが悪い)。

そこでここでは、よりインテグリティの高い測定を行ってみたいと思います。

電源を 3V にして、図 21 のように、パルスジェネレータ (パルスジェネ) から 40MHz=80Mbps 相当の信号を出力します。それを同軸ケーブルで受けてオシロスコブの 50Ω 入力に入れて、その 50Ω 入力の結合部分から信号を取り出し、ADuM4402CRIZ の入力に接続します。

ADuM4402CRIZ の出力側は (これも図 21 のように) 470Ω の抵抗を直列に接続し、それを同軸ケーブルで受けてオシロスコブの 50Ω 入力に入れて、オシロスコブ側は 10:1 相当として表示倍率を 10 倍にして測定します。これと同じくみでできているプローブのことを「Z0プローブ」といいます。

このようにして、インテグリティを高めた測定をしてみます。図 22 をご覧ください。入力側が CH1 (上)、出力側が CH2 (下) になっています。高速信号伝送であっても、非常にきれいな波形が観測できています。80Mbps でも非常に良好に動作しているようすが分かります。

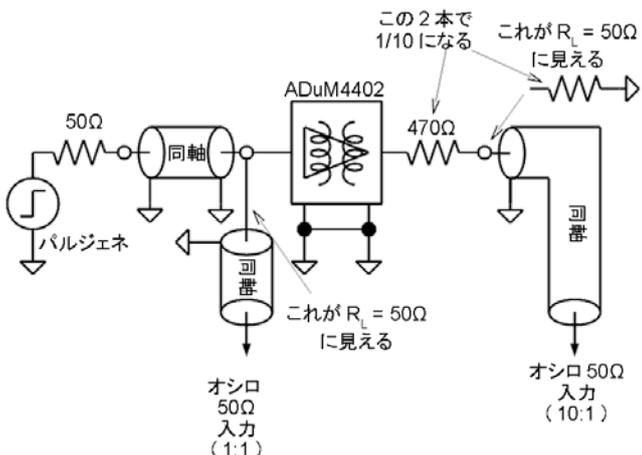


図 21. インテグリティ高い測定を実現するためのセットアップ

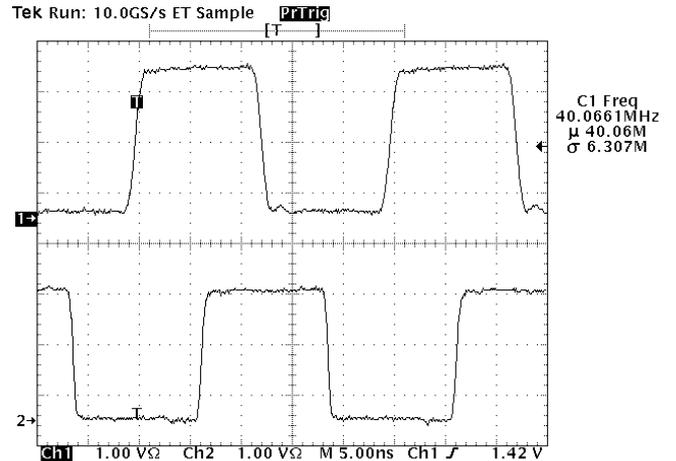


図 22. Z0 プローブの考え方をういてインテグリティ高い測定をしてみた。80Mbps でも非常にきれいな波形が観測されている

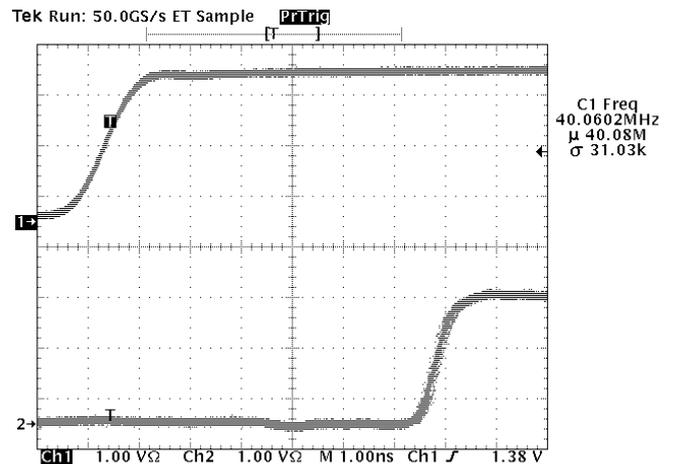


図 23. オシロスコブを連続ストアにして入出力の時間ジッタのようすを観測してみる

ADuM4402CRIZ の入出力時間ばらつきを観測してみる

これで最後です。オシロスコブを infinite persistence 表示 (連続ストア) にして、入出力の時間ジッタのようすを図 23 のように観測してみました。横軸は 1ns/div で、測定は Z0 プローブの考え方をういています。

上側 (CH1) が入力側、下側 (CH2) が出力側です。トリガは入力側にかけています。1ns = 1GHz なわけですが、思いのほか入出力の遅延バラツキ (時間ジッタ) が少ないことが分かります。

なおこれは ADuM4402CRIZ での測定ですので、他の iCoupler は異なる可能性もありますので、ご使用にあたってはご注意くださいだければと思います。

ここまでで判るように、iCoupler は高速なアイソレーション型インターフェースです、直流絶縁、AD/DA システムでの AGND/DGND の分離、レベル変換などなど、多彩なアプリケーションが考えられるでしょう。是非ご検討いただければと思います。

ADN4650/51/52 5kV/3.75kVrms 600Mbps LVDSアイソレータ

- 5 kV/3.75 kV rms signal **isolated LVDS**
- **600 Mbps High Speed, Low Jitter/Skew**
 - <1ns Part-to-Part Channel Skew
 - ≤120 ps Total Jitter
- Dual channel, multiple tx/rx options
- Complies with TIA/EIA-644-A LVDS
- 2.5V or 3.3V supplies (On-chip LDO)
- High CMTI
- Pass EN 55022 Class B rad. emissions
- Fail safe receiver inputs (ADN4651/52)
- Operating temperature: -40C to +125C

Packages	
20-ld SOIC-W (5 kV rms, 7.6mm Creepage)	
20-ld SSOP (3.75 kV rms, 5 mm Creepage)	
Sampling	Now (ADN4651, SOICW)

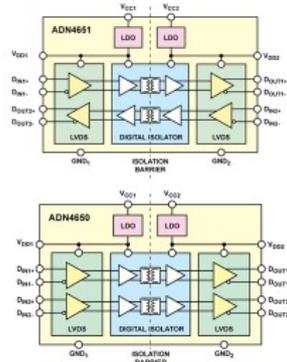


図 24. 最新の超高速製品。600Mbps LVDS アイソレータ

まとめにかえて

最後になりましたが最近の ADI の iCoupler 新製品・新技術の slides がありましたので、図 24 にお見せいたしましょう。

これは 600Mbps の LVDS 信号をアイソレーション伝送できる製品です。かなり高速ですね。このような製品も用意しておりますので、一度「どんなものがあるのかな？」という感じでも結構ですので、是非アナログ・デバイセズのウェブサイト <http://www.analog.com/jp/> をご覧いただければと思います。

「パネル de ボード」で基板を入手できる

ところで図 2 や図 11 で紹介した基板は、P 板.com の「パネル de ボード」サービスでも入手可能です。

パネルを選んでつなぐだけ「パネル de ボード」

上記の URL から「特別企画／メーカー提供パネル⇒アナログ・デバイセズ⇒8mm 沿面距離 iCoupler 用」を選んでください。

アイソレーションされた席でラーメンを

最後のオマケです。この実験をしたのはだいぶ前の話なのですが、その前後で久しぶりに秋葉原の「じゃんがらラーメン」に行きました。店に入店すると…

「何名様？お一人！では奥の左側の席へ！」

ゑ…？左側？

「左側ですか？」 「はい、左側の壁側です！」

奥に左側の席なんて無いはずだよなあ。カウンターは右側だけだし…。

なんと一番奥の左側に、図 25 のような「アイソレーション」されたシングル・シートがあったのでした！初めて座りましたし、初めて気がつきました。ということで iCoupler = isolation ネットで



図 25. 秋葉原の「じゃんがらラーメン」のアイソレーションされたテーブル



図 26. 注文したのは「ぜんぶ入り」「ライス」と半熟タマゴのトッピング