

周波数特性分析装置(FRA:Frequency Response Analyzer)の試み

FRA（周波数応答分析装置。以下 FRA と記載）をご存知でしょうか？

この装置は、フィードバックループの安定性等の評価に有用な装置ですが、¥200 万円程度以上するので、弊社のような零細企業ではとても購入できる状況ではありません。

最近購入した Analog Discovery 2 を便利に使っていますが、信号発生器と 2ch のオシロスコープを搭載しており、またネットワーク・アナライザ機能があるので、FRA を実現できるはずだ、と以前より考えていました。

今回は、昇圧型 DC-DC コンバータの位相余裕の測定にトライしました。

Analog Discovery 2 について

外観は図 1 になります。PC からの USB 給電で動作可能なアナログ・デジタル回路解析ツールで、これ一台でデジアナ信号の可視化や信号発生、記録などが可能となります。

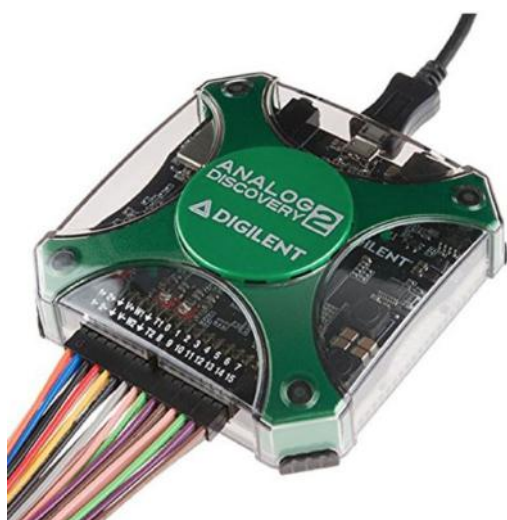


図 1. analog discovery2 の外観

Analog Discovery 2 の仕様

豊富な機能を有していますが、ここでは以下の機能を使用します。

- ・ 2ch オシロスコープ：14bit、100MSPS、30MHz アナログ帯域(オプション BNC ボード 使用時)
- ・ 信号発生器：14bit、100MSPS
- ・ ネットワークアナライザ：1Hz～10MHz

FRA について

装置の構成は、図2のようになります。

フィードバック・ループ中に 50Ω 程度の抵抗を挿入し、その両端に信号を加え、その両端の波形を各々観測し、振幅および位相を比較します。

$$\text{利得} = \frac{|V_A|}{|V_R|}$$

$$\text{位相} = \angle R_A - \angle R_R$$

特に、 V_A と V_R の振幅が等しいときの位相差を位相余裕といい、フィードバック・ループの安定性の評価において重要なパラメータです。

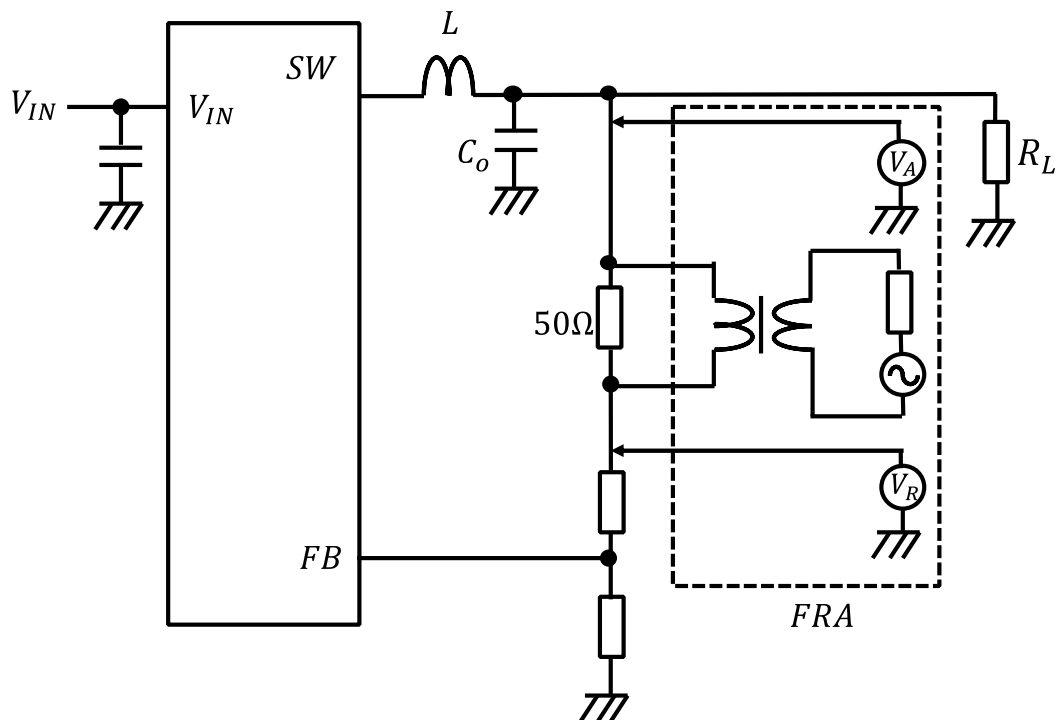


図2. FRAの構成概要

次に、Analog Discovery 2の使用を想定した構成を図3に、また自作アダプタの写真を図5に示します。

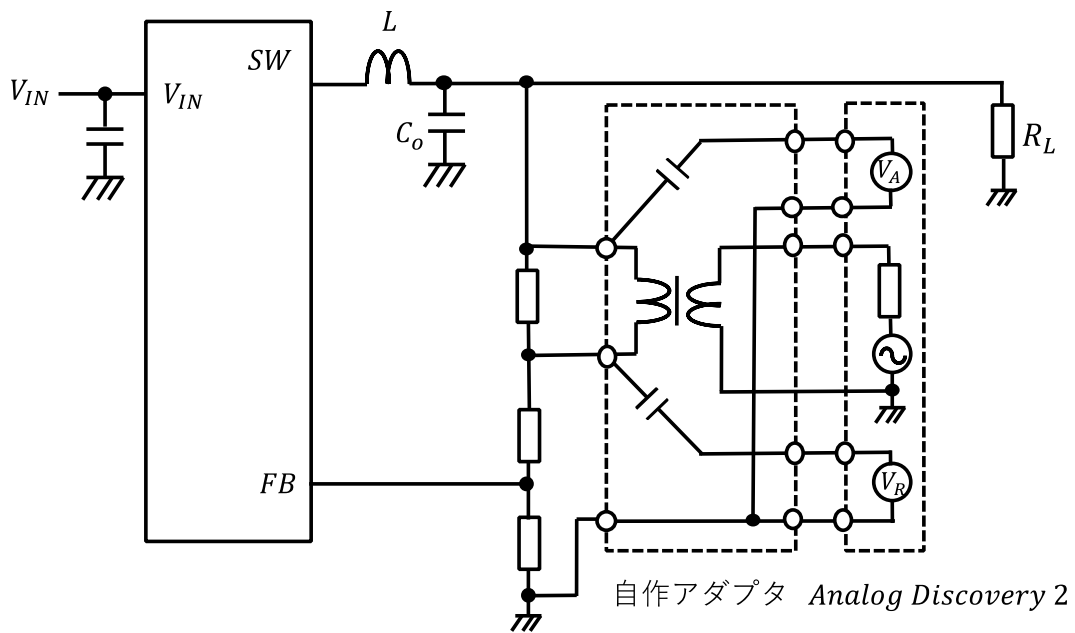


図3. Analog Discovery 2 を用いた FRA の構成

FRA による位相余裕の測定原理

図4に利得および位相の特性例を表示しています。利得が 0dB を横切る周波数(図7では、十数 kHz)における位相の値(約 50°)が位相余裕です。

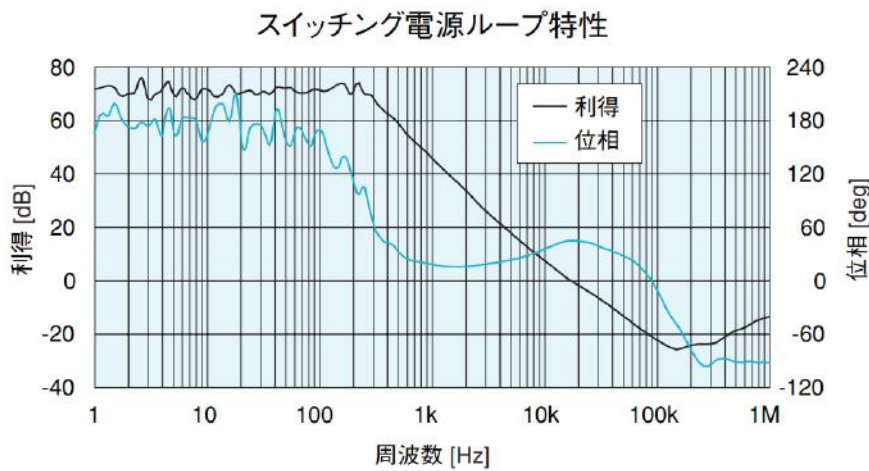


図4. FRA による測定結果の例(株式会社エヌエフ回路設計ブロック社の周波数特性分析器[FRA]のアイデアと技術 (PDF : 633KB) より引用)

アダプタの製作

信号をフローティングさせるためにトランスを使用しています。

また、Analog Discovery 2 のオシロスコープでは AC 結合ができないので、DC カット用のコンデンサを追加しています。なお、専用の簡易 FRA アダプタを使用すれば、接続するだけで AC 結合での波形測定が可能です。

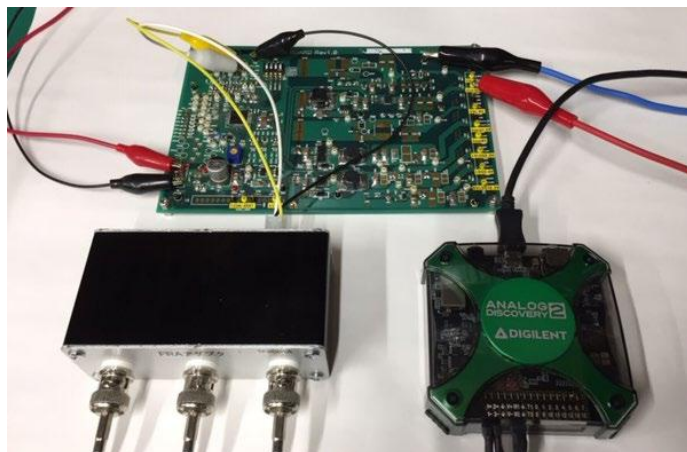


図5. 簡易 FRA アダプタ (手前左側) の外観

(簡易 FRA アダプタ発売中)

測定

今回は、5V→15V の昇圧型 DC-DC コンバータの特性を測定してみました。

負荷は 22Ω の抵抗を使用しているため、電流連続モードで動作しています。

実験の様子は図6のようになります。また、結果は図7のようになります。

図7で、上の青色と黄色の2つの利得曲線が重なる周波数が 0dB 周波数です。この周波数での位相(約 50°)が位相余裕と考えられます。

念の為に、0dB 周波数での2つの波形を別のオシロスコープで観察しました(図8参照)。概ね 50° の位相差があるように思います。

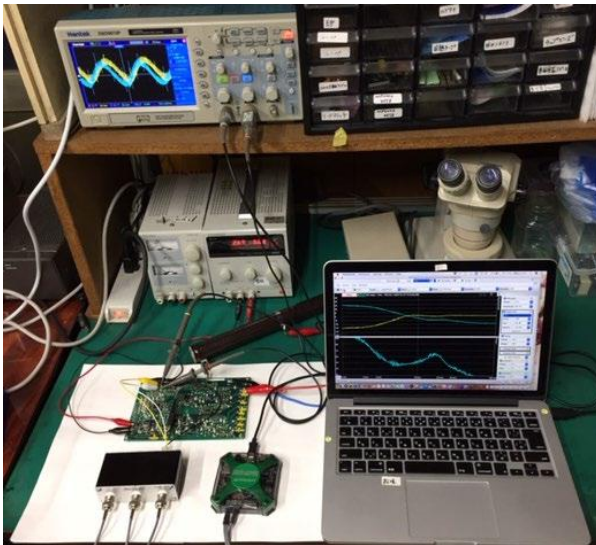


図 6. 測定系全体

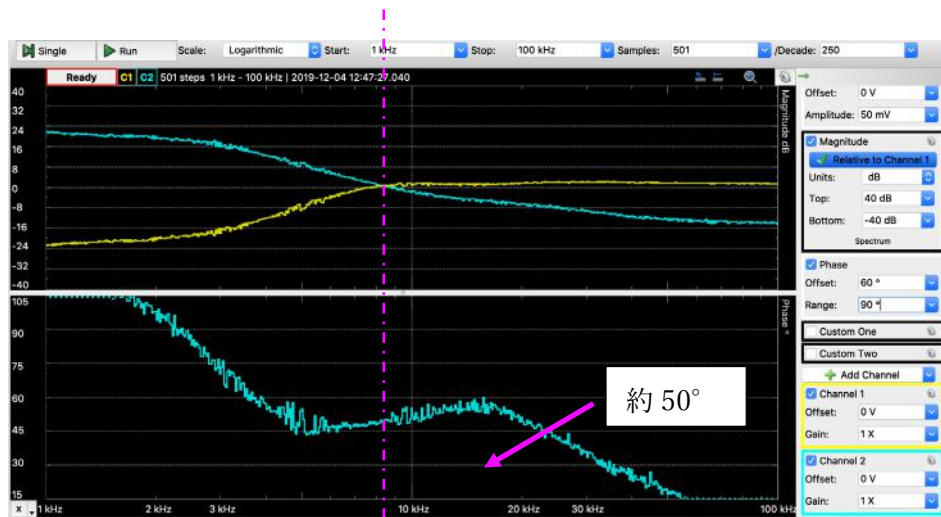


図 7. 測定結果

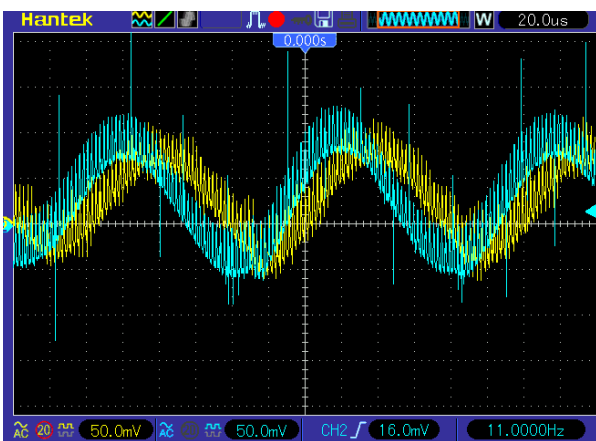


図 8. 図 7 の上側の 2 つの波形が重なる周波数での波形写真

図7の結果は、約 50° です。

ちなみに、自作の昇圧型DC-DCコンバータ用シミュレータで得られた結果(図9参照)では、0dB周波数は20kHz弱と測定値の約2倍大きいですが、位相余裕(56°)は近いので、まあまあうまく測定できているのではないかと思います。

正式データとしては使えないかもしれませんが、試作等には十分かと思います。

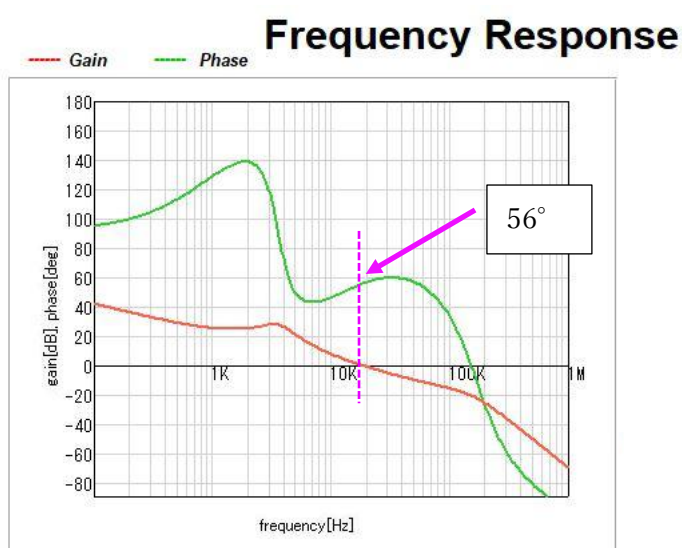


図9. 自作シミュレータの結果

実は、Analog Discovery 2はCSV形式でデータを保存できるので、Excelで図9と同様なグラフを作成してみました(図10参照)。

青色が利得で単位はdb、橙色が位相で単位は $^{\circ}$ です。

利得は図9で見られる30kHz付近のピークが見られないことや1kHz付近での利得が合わないこと等、まだ十分とは言えませんが、位相特性のほうは雰囲気が出ている気がします。

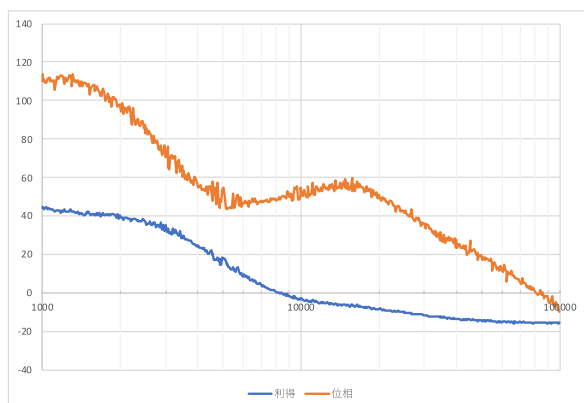


図10. 図7の特性をエクセル(利得、位相特性)で表示

所感

フィードバック回路は多くの電子回路で使用されていますが、その安定性評価は通常は高価な FRA 装置が必要なので、安定性についてはステップ応答特性等の簡易な確認で済ませているケースがほとんどではないでしょうか？

DC-DC コンバータ等においては、出力段に LC 回路による 180° の位相遅れがあり、さらにネガティブ・フィードバックによる 180° の位相遅れが加わるので、しっかりした位相補償が不可欠です。

高価な FRA を置き換えるには機能や性能は明らかに不十分ですが、位相余裕等の簡易な測定に本アダプタと Analog Discovery 2 が有効に使えるのではないかと思います。

今後いろいろなフィードバック回路の測定にトライしてみようと思います。

なお、たまたま見つけたのですが、今回の測定方法に関する最初の文献は以下のようです。

参考文献：

1. Measurement of loop gain in feedback system, INT. J. ELECTRONICS, 1975, VOL.38, NO.4, 485-512