



TNJ-002 アナログ電子回路技術ノート

OP アンプの開ループ・シミュレーション

著者: 石井 聡

はじめに

アナログ・デバイセズでは、SPICE シミュレーション・ソフトウェア NI Multisim Analog Devices Edition をリリースしております。

<http://www.analog.com/jp/multisim>

Analog Devices Edition ということで、使用可能素子数に制限はありますが、SPICE 解析をイメージしなくても、信号源やオシロスコープ、ボーデ・プロッタなどを仮想的に接続して、波形観測ができるという優れたものです！（製品版も 20 万円ちょっとからです。業務で使用するのであれば、それほど高くありません！）

またアナログ・デバイセズのかなりの製品の SPICE モデルが使えるようになっています。

少しこれを使って遊んでみようと思います。

どんなツールがあるか

波形観測できるツール群を紹介しましょう。これらは「仮想測定器」というツール群です。SPICE 解析上での面倒な解析パラメータを入れることなく、SPICE で言う、いわゆる Probe 機能の設定をほとんどせずに、まるで半田付けして測定器で測定する感覚でシミュレーションできます。上の左から、マルチメータ、ファンクション・ジェネレータ、電力計、オシロ（2CH, 4CH）、ボーデ・プロッタ、ワード・ジェネレータ、ロジアナ (!)、カーブトレーサです。これ以外にもツールがあります。

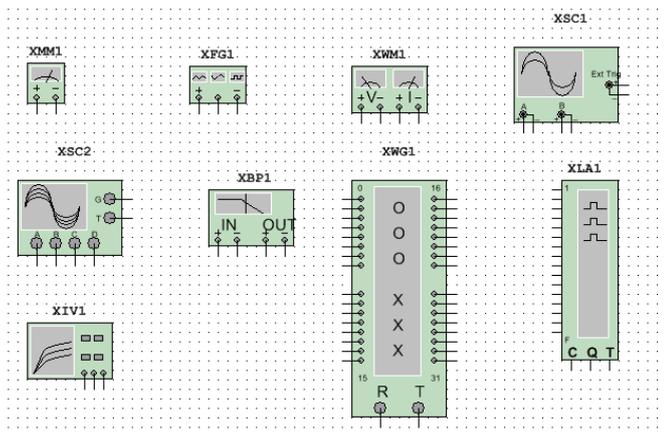


図 1. NI Multisim で使える仮想測定器ツール群

SPICE ツールが使われるシーン

回路設計はまずブロック図でシステムを構築しますが、それを実際の回路に置き換えたあたりで、定数を決定するとか、周波数特性や応答特性の基本的評価をする際に SPICE を使います。「とっかえひっかえ」半田ごてで部品を載せかえて、オシロで測定しながら…というプロセスが省けますので、とても良いと思います。

とはいえそのあたりが微妙で、経験の少ないエンジニアだと、不適切な定数を設定してシミュレーションしてしまい、実機でうまく動作しない、ということが往々にしてあります。そのため実機でいろいろ経験し、「経験 + 理解」をベースにシミュレーションをかける、ということが重要だと思います。

最後には実機評価はかならず必要

その後に（やはり）ブレッドボードとか試作基板できちんと動作を「実機評価」することも大事です。高速とか高精度だと、きちんと本番の基板と同じもので確認しておかないと、ろくな結果になりません。シミュレーションでは出てこなかった問題点が露呈することが、まま（いや…定期的）にあります。

経験を積んで、うまく併用する

ということで、「経験 + 理解 + シミュレーション + 実機測定」をうまく併用することが、そして経験をさらに積んでピンポイントでシミュレーション結果を実機に落せるようになることが、成功の近道だと思います。

ちょっとおふざけ

ちょっとふざけてデジタル回路のシミュレーションで遊んでみました（笑）。次はアナログ回路をやってみますが…。

図 2 は NI Multisim 上で作ってみた 3 ビットの Synchronous（同期）UP Counter です。図 3 のように 8 ステートで元に戻っています。シミュレーション開始時に F/F を初期化していませんので、ロジアナで（複数回トリガして）見てみると、そのときの F/F の値が横軸 0 時間のときに出ています。本来であれば F/F はリセットしましょう（笑…カスタム IC ではサインオフができませんね）。

アナログ電子回路技術ノート

TNJ-002

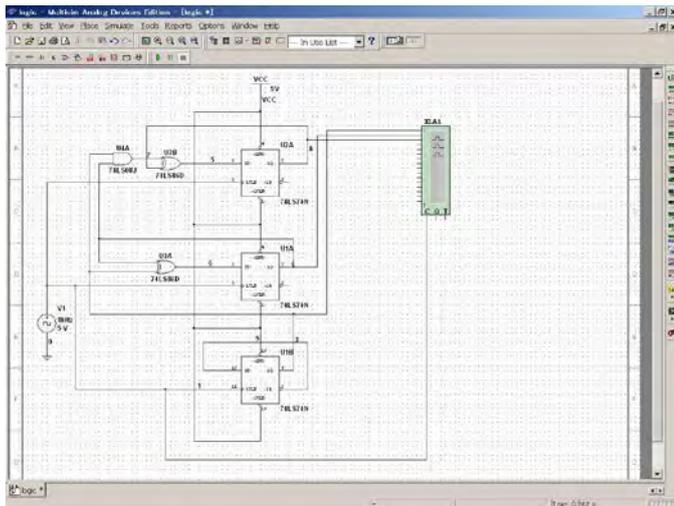


図 2. NI Multisim 上で作った 3 ビット同期カウンタ回路

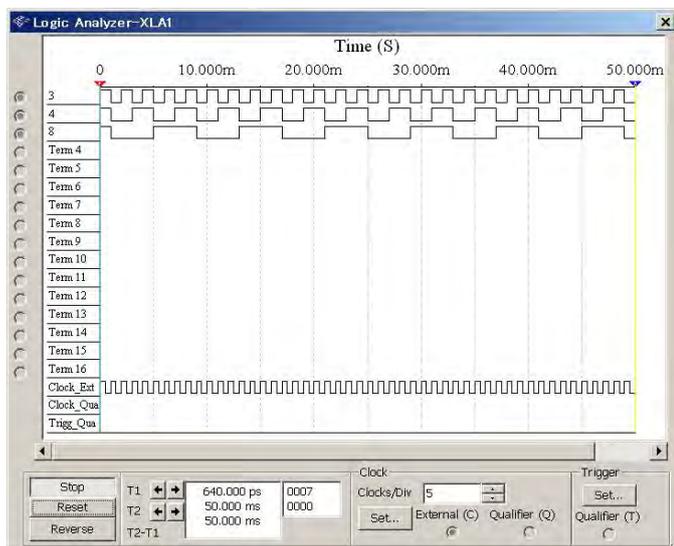


図 3. 図 2 の回路をシミュレーションしてみたようす

OP アンプの開ループをシミュレーション

OP アンプのループを開いたときの利得（オープンループ・ゲイン／開ループゲイン／一巡伝達関数などとも言う）を、シミュレーションで確認してみたので示してみます。

OP アンプは理想モデルを作って

図 4 は実際に作って見たシミュレーション回路図です。ここでは実際の OP アンプではなく、理想モデルを複数の素子を使って作ってみました。利得が 10000 倍、カットオフは 159Hz のモデルにしてみました。

電圧源を出力からフィードバック経路に挿入する

出力からフィードバック経路に電圧源 V1 を挿入します。そうするとこの測定系で、アンプの利得 A と帰還系の帰還量 β の掛け算である $A\beta$ 、つまり OP アンプのループを開いたときの利得（オープンループ・ゲイン／開ループゲイン／一巡伝達関数）を

$$A\beta = \frac{\text{V1 の「+端子」～ GND の電圧}}{\text{V1 の「端子」～ GND の電圧}}$$

として測定できます。それぞれの電圧をベクトルで読めば位相も計算できます。R4 は実際の測定の場合は、トランスを使ってフローティングで電圧を供給するため必要なものですが、SPICE シミュレーションでは電圧源は抵抗ゼロなので、不要ともいえるでしょう。

なぜこのように測定する？

「開ループ特性を測定するなら、ループを開けばいいのでは？」と思うのも当然だと思います。しかしシミュレーション、実機、どちらでも同じ結果になりますが、正しい測定を行うことができません。

それは、OP アンプの入力のオフセットがそのまま開ループ利得倍されて出てくるため、出力がどちらかに張り付いてしまい、正しい出力が得られないからです。

結果はボーデ・プロッタを使って表示させる

上記で示した $A\beta$ は、仮想計測器の「ボーデ・プロッタ」を使って表示させることができます。図 4 の上側の部品がそれです。ボーデ・プロッタは横軸を周波数として、縦軸を OUT/IN の比としてシミュレーションできます。

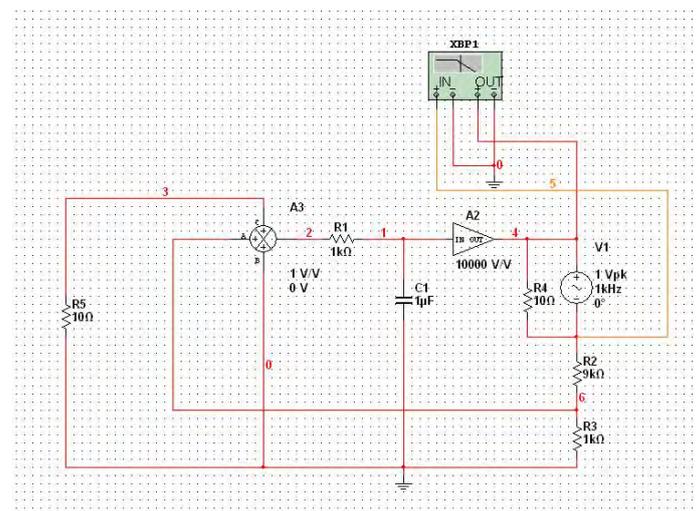


図 4. 理想モデルを使って OP アンプ回路を作ってみた

反転／非反転端子は VOLTAGE_SUMMER で実現する

利得 A は 10000 倍 = 80dB、帰還量 β は $\beta = 1/(1 + 9) = 1/10 = -20\text{dB}$ です。図 4 中に + 記号が 3 つある、A3 というものは、図 5 のように設定する VOLTAGE_SUMMER（電圧加算器）で、このように A 入力をマイナス 1 倍（反転入力端子に相当）、C 入力をプラス 1 倍（非反転入力端子に相当）として OP アンプの差動入力を模倣することができます。

アナログ電子回路技術ノート

TNJ-002



図 5. VOLTAGE_SUMMER の設定

シミュレーション結果

シミュレーション結果を図 6 に示します。仮想計測器ボード・プロッタで得られる表示です。Aβ=60dB の計算どおりで、-3dB 周波数もマーク読みで 156Hz になっています。関心するほど良く出来た測定方法なわけですね。

ではこのβの帰還量を小さく(-n dB の n を大きく)していけば、どんな利得の高いホンモノの OP アンプもオープンループ・ゲインが測定できますね！…といたいところですが、クロズドループ・ゲインが 1/β になりますので、入力のオフセットが飽和してしまい、結局はその測定しようとしても、もとの木阿弥なのでした… (適度なところまでは実現可能)。

とはいえ、実際の動作時の Aβ を、この計測方法で、きちんと求めることができるわけなのでね。

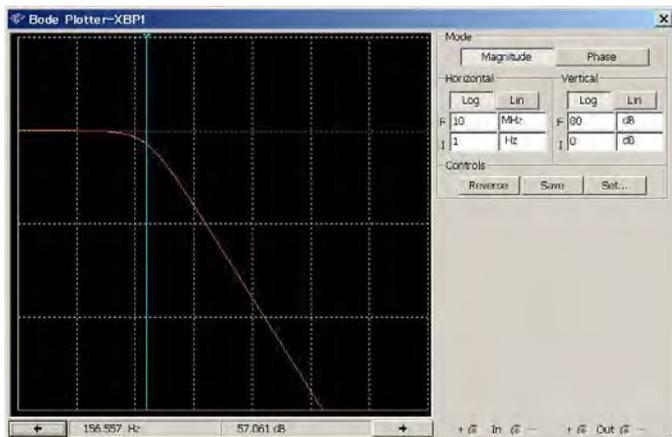


図 6. ボーデ・プロッタで得られるシミュレーション結果

2 次系にすれば…

この実験系を 2 次系 (もう一つ CR を増やす) にすれば、位相余裕とステップ応答のオーバシュートの実験も出来ますので、別途、別の技術ノートでやってみたいと思います。

電圧源 V1 の +/- 端子の電圧は？

それでは「付加した電圧源 V1 の + 端子、- 端子それぞれの電圧のようすはどうなるの？」という疑問に答える形で、Aβ=20dB の条件 (f=15.5kHz) と Aβ=0dB の条件 (f=155kHz) をシミュレーションしてみました。

仮想オシロスコープを接続して確認する

今度は V1 の両端子に仮想オシロスコープを接続して確認してみました。

Aβ=20dB の条件 (f=15.5kHz, 図 7) では、- 端子 (上) の電圧設定は 200mV/div. で、+ 端子 (下) の電圧設定は 2V/div. にしています。

Aβ=0dB の条件 (f=155kHz, 図 8) では、- 端子 (上) の電圧設定は 1V/div. で、+ 端子 (下) の電圧設定も 1V/div. にしています。

それぞれの差分量は peak 1V になっていることがわかります。電圧源 V1 は peak 1V で設定しているの、当たり前といえば当たり前前の結果ですが、このように動いているわけです。

またここで Aβ=0dB の条件、つまり上の波形と下の波形が同じ振幅になったときの位相差が、位相余裕と関係しています。

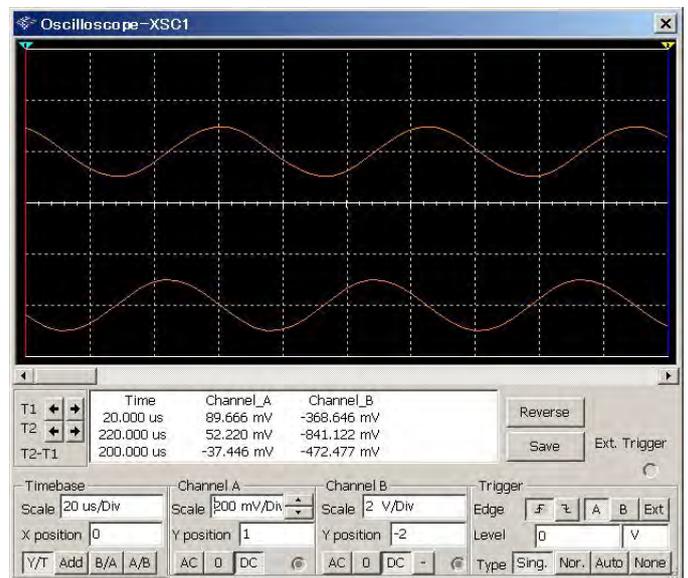


図 7. Aβ=20dB の条件 f = 15.5kHz

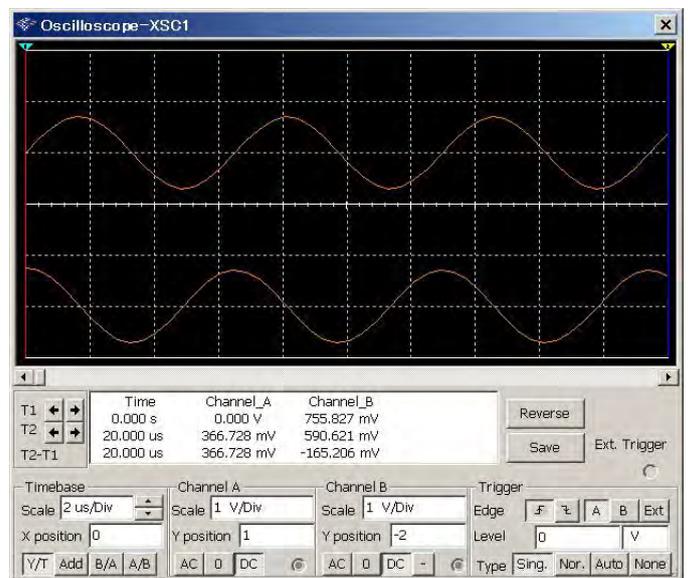


図 8. Aβ=0dB の条件 f = 155kHz

アナログ電子回路技術ノート

TNJ-002

位相について考えてみる

位相について考えてみます。図 9 はボーデ・プロッタに接続しなおして、位相を求めたものです。

図中の一番上が $+180^\circ$ 、一番下が 0° です。高域で $+90^\circ$ にとどまっていることがわかります。一番下が正帰還（位相ゼロ）になるところですので、 $A\beta = 0\text{dB}$ のところ、ここからどれだけ上にあるかで位相余裕が決まります。周波数が低いところで $+180^\circ$ なのは、

$$\text{angle}(A) = 180^\circ \quad (\text{反転増幅、}-A \text{なので})$$

$$\text{angle}(\beta) = 0^\circ$$

ということで、系として波形が反転するので（負帰還なので）こうなるわけです。それが周波数が上昇してくると、だんだん位相が遅れてきて、 $170^\circ \cdots 160^\circ$ となってきます。その結果最大 90° 遅れて、 $A\beta = 0\text{dB}$ のときに、一番下の 0° のところから見れば 90° 余裕があるのだ、と考えれば良いということですね。

なお、参考書によっては、このプロットの一番上の位置を 0° として示してあるものもあるので、ご注意ください。

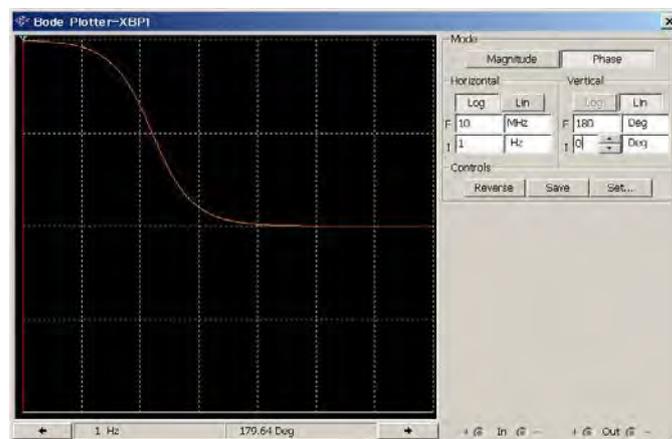


図 9.位相の変化するようす。高域で $+90^\circ$ に漸近している（一番上が $+180^\circ$ 、一番下が 0° ）