

StudentZone — 2018年8月 「ADALM1000」で、SMUの基本を学ぶ トピック8:LC並列回路の共振

著者: Doug Mercer、Antoniu Miclaus

Share on 💟 🚹 in

アナログ・ダイアログの2017年12月号から、アクティ ブ・ラーニング・モジュール「ADALM1000」について 紹介しています。その第8回目となる今回も、引き続き 同モジュールを使用して、小規模かつ基本的な測定を行 う方法を説明します。ADALM1000に関する以前の記事 は、こちらからご覧になれます。



図1. ADALM1000のブロック図

目的

今回は、LC並列共振回路で生じる発振の観測を行いま す。その上で、現実のインダクタで生じる自己共振も観 測してみます。

背景

共振回路は、同調回路とも呼ばれます。インダクタとコ ンデンサを組み合わせて、電圧源または電流源に接続す ることで実現されます。共振回路は、電子機器で使われ る非常に重要な回路の1つです。数多くの種類と用途が ありますが、代表的なものとしては、ラジオ局やテレビ 局の選局に使われる共振回路が挙げられます。常に周囲 に存在する膨大な数の信号の中から、所望のラジオ局や テレビ局を選局することができるのは、その共振回路の おかげです。

共振回路は、その入力端子の電圧と電流が同相で、入力 インピーダンスが抵抗成分のみである場合に共振状態に なります。



図2. 並列共振回路

ここでは、図2に示したRLC並列回路を例にとります。この回路によって与えられる定常状態のアドミタンスは、次式のようになります。

$$Y = \frac{1}{R} + j\left(\omega C - \frac{1}{(\omega L)}\right) \tag{1}$$

上述したように、共振は、入力端子の電圧と電流が同相 のときに発生します。この状況は、アドミタンスが実数 である場合に生じます。そのため、必要条件は次式で与 えられます。

$$\omega C - \frac{1}{\omega} L = 0 \tag{2}$$

L、C、またはωを調整することによって、共振の条件が 成立します。LとCを一定にすると、共振周波数ω。は以下 のようになります。

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}} (rad/s) \tag{3}$$

あるいは、以下のように表現することもできます。

$$f_o = \frac{1}{(2\pi\sqrt{LC})} \quad (Hz) \tag{4}$$

準備するもの

- ► ADALM1000
- ▶ ソルダーレス・ブレッドボード、ジャンパ線
- ▶ インダクタ: 4.7mH(またはそれ以上)
- コンデンサ:10μF
- ▶ 抵抗:1kΩ
- ▶ 小信号用のダイオード (1N914)

説明

まず、実験用に簡単な分流回路を構成します。その回路で は、ダイオードをスイッチとして使用します。

ソルダーレス・ブレッドボードを使って、図3に示す回 路を構成します。そして、「AWG CH-A」からサイン波 を出力するように設定を行います。サイン波の仕様は、 周波数が100Hz、「Min」の値が0.5V、「Max」の値が 4.5V(つまり、Vp-pが4V)とします。 チャンネルAについては、サイン波の2サイクル分が表示されるように水平方向の時間スケールを調整します。 「Channel B」を「Hi-Z Mode」に設定し、D₁とR₁をつ ないだ点に接続します。



図3. ダイオードを使ったテスト用の回路



図4.図3の回路の実現方法。 ブレッドボード上で各部品をこの図のように接続します。

手 描 きの回路 図を作成し、ADALM1000から CH-A、2.5V、CH-Bへの接続に注意深くラベル付けします。 ラベルに関する情報は、実験レポートに記載しておきましょう。 トレースを表示するために、「Curves」ドロップダウン・メニュー から「CA-V」、「CA-I」、「CB-V」を選択します。スコープ画 面の右側で、「CA-V」と「CB-V」のオフセットを調節するため に、2.5Vという値を入力します。この実験において、すべての 測定値は2.5Vの共通レールを基準にします。また、「CH-A」と 「CH-B」の垂直位置の設定値に0を入力します(スコープ画面 の下部)。垂直方向の目盛は、現在、0を中心として-2.5~2.5 の範囲になっているはずです。



以上の設定を終えたら、「Run」をクリックします。ここまで、詳細な説明を行ってきましたが、以下のステップでは適宜説明 を省略します。この実験のいくつかのステップでは、掃引の開 始/停止を行う必要がありますが、それについては把握済み であることを前提として説明を進めます。

「Math」ドロップダウン・メニューを使って、CH-AとCH-Bの違いを確認できるようにするためのトレースを追加します。この実験では、垂直方向のスケールが、表示されている3つの信号ですべて同じであることを確認します。

サイン波がダイオードを通過するときの波形と、Channel Aから供給されている電流の波形を観測します。それらの波形については、文章での説明を加えます。表示を保存し、実験レポートにコピー&ペーストしてください。AWGのソースによって生成された入力電圧、同ソースによって供給された電流、抵抗にかかる出力電圧にラベル付けします。また、重要なポイントについては、各信号の振幅を表示してみます(プロットの目盛を見るだけでは値はわかりません)。

1. この実験におけるダイオードの役割

「AWG A」の波形を「square wave output」に切り替 え、オシロスコープに数サイクル分の信号が表示される ことを確認します。この波形も保存し、レポートにコピ ー&ペーストしておきます。すべてのプロットには注釈 を付加してください。

続いて、ブレッドボード上の回路を図5のように再構成 します。使用する部品は、ダイオード、インダクタ、コ ンデンサです。ダイオードにチャンネルAを接続し、コ ンデンサとインダクタをつないだ点にチャンネルBを接 続します。



図5. テスト用のLC共振回路



図6.図5の回路の実現方法。ブレッドボード上で各部品を この図のように接続します。

2. 回路の発振周波数を算出する

次に、オシロスコープを使って、回路が発振する周波数 を測定します。100Hzの矩形波を加えたとき、LC回路は 矩形波の立下がりエッジの直後に発振を開始します。グ リッドの左側に発振の位置がくるように、水平方向の位置 あるいはホールドオフ時間を変更します。それによって、 できるだけ多くの発振波形を確認できるようにします。

発振周期を観測/測定しやすくするために、「Horizontal Time/Div」を変更します。掃引を停止した状態で(赤色 の停止ボタンを使います)グリッドを左クリックするこ とにより、表示用のマーカー・ポイントが加わります。 最後の2つのマーカーに対応する電圧および時間の差分も 表示されます。発振信号のピークまたは谷のうち隣接す る2点選択し、それらの間の時間差を測って周期を求め ます。この表示も保存し、レポートにコピー&ペースト します(あらゆる注釈も付加しておきます)。

3. 周期の値を基に回路の発振周波数を算出する

周期の測定値を基に算出した周波数は、周波数の理論値 とほぼ等しくなるはずです。そうでない場合、回路や計 算に使用した各部品の値を確認してください。実測によ って求めた周波数が、理論値より高いか低いかというこ とも、レポートに記録します。

ここでダイオードを使用した理由を説明しましょう。ダ イオードでは、一方向のみに電流が流れます。矩形波の 振幅が2.5Vのレールよりも上にある間は、ダイオードが 導通してLC共振回路にエネルギーが供給されます。2.5V のレールよりも下にある間は、ダイオードは導通しませ ん。その間、LC共振回路は事実上AWGのソースから切 り離され、自律的に発振することになります。

4. 振幅は一定か? 増大/減衰していないか?

観測された波形と理論値に差がある理由について検討す る必要があります。インダクタの仕様書を確認し、振幅 の増大/減衰は、どのような特性が原因で生じるのか考 察します(仕様書に記載されたすべての事柄を読むこと を強くお勧めします)。

ここで、矩形波の「Min」の値を0.5V、「Max」の値を3.5V(つまり、Vp-pは3V)に変更します。

先ほどと同じ測定を繰り返し、再びプロットのデータを 保存すると共に、注釈を加えます。矩形波の「Min」と 「Max」の値を様々に組み合わせて、どのようなことが 起きるか調べてみます。

5. プロットを比較し、電圧の差について検討する

エネルギーの蓄積

並列に接続されたコンデンサとインダクタの両端の電圧 は、減衰シヌソイド(減衰正弦波)になっているはずで す。現実に即したインダクタのモデルには、直列抵抗が 含まれます。その抵抗に電流が流れるとき、共振部のエ ネルギーの一部が熱に変換されます。このエネルギー損 失によって、発振の振幅は徐々に減衰します。

共振部の電圧のほか、コンデンサとインダクタの電流も 測定してみます。まず、コンデンサの電流を求めるため には、次の式を使用します。

$$I_{\rm C} = C \ \frac{dv}{dT} \tag{5}$$

コンデンサの電圧について、離散時間の微分係数を算出 します。そのためには、連続時間の信号をサンプリング した2つのサンプルの差を求め、それらのサンプル間の 時間差で割ります。サンプル間の時間差というのは、サ ンプリング・レートの逆数です。ADALM1000では、サ ンプリング・レートが100kSPSなので、サンプル間の時 間は10マイクロ秒です。C₁の値は10µFなので、10マイク ロ秒で割るとちょうど相殺されます。この式では電流の 単位はAです。ここではmAを単位としてプロットするために、1000倍することにします。「Math」軸を「I-A」 に設定し、「Math」の式に次式を入力します。

 $(V_{BUFF}B[t] - V_{BUFF}B[t-1]) \times 1000$

図5の回路を見ると、ダイオードがオフになり、共振部 が発振しているとき、コンデンサの電流の行き先はイン ダクタだけであることがわかります。つまり、次式が成 り立ちます。

 $I_L = I_C \tag{6}$

インダクタの電流波形とコンデンサの電圧波形から、それぞれの瞬時エネルギーを算出できます。「Math」の式を使って、2つのエネルギー波形を時間の関数としてプロットします。

1つはインダクタにおけるエネルギーです。インダクタ ンスの単位はJ/A²です。エネルギーをJで表すと、次式の ようになります。

$$E_L = \frac{1}{2} L I^2 \tag{7}$$

ここでは4.7mHのインダクタを使用していますが、その値の1/2は0.00235Hです。40mAの電流が流れている4.7mH のインダクタは0.00000376J、つまりは3.76µJのエネルギ ーを蓄積します。値が非常に小さいので、10⁶倍して扱う ことにします。インダクタのエネルギーをµJ単位でプロ ットするために、「Math」の式に次式を入力します。

$$E_{t} = 2350 \times (V_{BUFF}[t] - V_{BUFF}B[t-1])^{2}$$

もう1つはコンデンサにおけるエネルギーです。容量の単 位はC²/Jです。コンデンサに蓄積される電荷量をCを使っ て表すと、容量×電圧に等しくなります。したがって、エ ネルギーをJで表すと、次式のようになります。

$$E_C = \frac{1}{2} CV^2 \tag{8}$$

ここでは10µFのコンデンサを使用しており、その容量値 の1/2は0.000005Fです。1Vで充電された10µFのコンデ ンサは0.000005J、つまりは5µJのエネルギーを蓄えてい ます。値が非常に小さいので、ここでも10⁶倍して扱うこ とにします。コンデンサのエネルギーをµJ単位でプロット するために、「Math」の式に次式を入力します。

$5 \times (V_{BUFF}B[t])^2$

これらのプロットを保存してリポートにコピー&ペース トし、注釈を付加しておきます。

2つのエネルギーの値、2つのエネルギーの経時変化、両 者の関係について検討しましょう。例えば、インダクタ にエネルギーの大半、あるいはすべてが蓄積されるのは いつでしょう。また、コンデンサにエネルギーの大半、 あるいはすべてが蓄積されるのはいつでしょうか。時間 の経過やサイクルごとに、どのような変化が現れるでし ょうか。できるだけ定量化しつつ、全体像に注目してみ ましょう。 インダクタの電流は、2.5Vの電源レールから切り離 し、図7に示すようにAWGのチャンネルBに接続するこ とによって直接測定することができます。その際には 「AWG CH-B」を「SVMI Mode」に設定します。ま た、「Shape」については、「Max」の値として2.5Vを 与え、dcを選択します。更に「Curves」メニューから 「CB-I trace」を選択します。

算出したコンデンサの電流(および同様の推論に基づく インダクタの電流)のトレースを比較します。違いに注 目し、その理由を説明してみてください。

コンデンサの電流を直接測定するためには、この測定手 法をどのように使えばよいでしょうか。



図7. インダクタの電流を直接測定する方法



図8.図7の回路の実現方法。 ブレッドボード上で各部品をこの図のように接続します。

自己共振

現実のインダクタには、必ず寄生容量(浮遊容量)が存在 します。そのため、現実のインダクタは、並列にコンデン サが接続されているかのような挙動を示します。

ブレッドボードからコンデンサを取り除き、インダクタ が発振する周波数を測定します。必要に応じて水平方向 の時間スケールを調整し、発振の様子をはっきりと観測 できるようにします。インダクタが自己共振する高い周 波数を測定する際には、おそらく(オプション・メニュ ーの下の)「Waveform Smoothing」をターン・オンす るとよいでしょう。

自己共振の例

図9に、自己共振の典型的な波形を示しました。この例では、4.7mHのインダクタを使用しています。



図9. 自己共振

問題

- ▶ 1. 寄生容量の値を算出してください。
- ▶ 2. インダクタにも、モデル化するときに無視すべきではない寄生素子が他にもあります。それは、内部に存在する直列抵抗です。この抵抗によって、LC回路で測定した発振信号にはどのような影響が及んでいるのでしょうか。

答えはStudentZoneで確認できます。

付録



図10.「Time/Div」の設定。 0.5マイクロ秒に設定します。

注記

アクティブ・ラーニング・モジュールを使用する記事で は、本稿と同様に、ADALM1000に対するコネクタの接 続やハードウェアの設定を行う際、以下のような用語を 使用することにします。まず、緑色の影が付いた長方形 は、ADALM1000が備えるアナログI/Oのコネクタに対 する接続を表します。アナログI/Oチャンネルのピンは 「CA」または「CB」と呼びます。電圧を印加して電流 の測定を行うための設定を行う場合には、「CA-V」の ように「-V」を付加します。また、電流を印加して電圧 を測定するための設定を行う場合には、「CA-I」のよう に「-I」を付加します。1つのチャンネルをハイ・インピ ーダンス・モードに設定して電圧の測定のみを行う場合、 「CA-H」のように「-H」を付加して表します。

同様に、表示する波形についても、電圧の波形は「CA-V」と「CB-V」、電流の波形は「CA-I」と「CB-I」のように、チャンネル名とV(電圧)、I(電流)を組み合わせて表します。

本稿の例では、ALICE (Active Learning Interface for Circuits and Electronics)のRev 1.1 を使用しています。

同ツールのファイル (alice-desktop-1.1-setup.zip) は、 こちらからダウンロードすることができます。

ALICEは、次のような機能を提供します。

- ▶ 電圧/電流波形の時間領域での表示、解析を行うための2チャンネルのオシロスコープ
- ▶ 2チャンネルのAWG(任意信号発生器)の制御
- ▶ 電圧と電流のデータのX/Y軸プロットや電圧波形のヒ ストグラムの表示
- ▶ 2チャンネルのスペクトル・アナライザによる電圧信号の周波数領域での表示、解析
- スイープ・ジェネレータを内蔵したボーデ・プロッタ とネットワーク・アナライザ

- ▶ インピーダンス・アナライザによる複雑なRLC回路網の解析、RLCメーター機能、ベクトル電圧計機能
- ▶ 既知の外付け抵抗、または50Ωの内部抵抗に関連する 未知の抵抗の値を測定するためのDC抵抗計
- 2.5Vの高精度リファレンス「AD584」を利用して行うボードの自己キャリブレーション。同リファレンスはアナログ・パーツ・キット「ADALP2000」に含まれている
- ▶ ALICE M1Kの電圧計
- ▶ ALICE M1Kのメーター・ソース
- ▶ ALICE M1Kのデスクトップ・ツール

詳細についてはこちらをご覧ください。

注)このソフトウェアを使用するには、PCに ADALM1000を接続する必要があります。





著者:

Doug Mercer (doug.mercer@analog.com)は、1977年にレンセラー工科 大学で電気電子工学の学士号を取得しました。同年にアナログ・デバイセ ズに入社して以来、直接または間接的に30種以上のデータ・コンバータ製 品の開発に携わりました。また、13件の特許を保有しています。1995年に アナログ・デバイセズのフェローに任命されました。2009年にフルタイム 勤務からは退きましたが、名誉フェローとして仕事を続けており、Active Learning Programにもかかわっています。2016年に、レンセラー工科大 学 電気/コンピュータ/システム・エンジニアリング学部のEngineer in Residenceに指名されました。



Doug Mercer

この著者が執筆した 他の技術文書

StudentZone — 2018年7月 「ADALM1000」で、 SMUの基本を学ぶ — トピック7:RLC共振回路

Analog Dialogue 52-07

Antoniu Miclaus (antoniu.miclaus@analog.com)は、アナログ・デバイ セズのシステム・アプリケーション・エンジニアです。アカデミック・プ ログラムや、Circuits from the Lab®向けの組み込みソフトウェア、QAプ ロセス・マネジメントなどに携わっています。2017年2月から、ルーマニ アのクルジュナポカで勤務しています。

現在、バベシュボヨイ大学においてソフトウェア・エンジニアリングに関 する修士課程にも取り組んでいます。また、クルジュナポカ技術大学で電 子工学と通信工学の学士号を取得しています。



Antoniu Miclaus

この著者が執筆した 他の技術文書



Analog Dialogue 52-07