

第16章 LTspiceによる混合回路の シミュレーション

本稿掲載のWebページ

古橋 武

目次

第 16 章 LTspice による混合回路のシミュレーション	2
16.1 はじめに	2
16.2 局部発振回路	3
16.3 中間周波トランス	5
16.4 局部発振回路の自励発振のシミュレーション	7
16.5 混合回路の自励発振のシミュレーション	11
16.6 混合回路による周波数変換のシミュレーション	13
16.7 まとめ	15
参考文献	16

第 16 章 LTspice による混合回路のシミュレーション

16.1 はじめに

拙著ラジオノートの第 10 章混合回路内の回路について LTspice でシミュレーションしたので報告します。

図 10.1.1 の回路のシミュレーションを目標にします。放送周波数のキャリアは 700 [kHz] とします。

まず、局発振回路、中間周波トランスのコイル定数を算定しました。そして、局発振回路と中間周波トランスそれぞれについて、並列共振現象のシミュレーションをしました。次に、図 10.1.5 の回路による、自励発振をシミュレーションしました。この回路では同調回路と中間周波トランスを短絡してあります。微弱なホワイトノイズを回路に注入することで、自励発振が起きることを確認しました。そして、図 10.1.6 にほぼ一致する結果を得ました。その後、図 10.1.3 のように、図 10.1.5 の回路に中間周波トランスを挿入してシミュレーションを行いました。動作は図 10.1.4 と同様の結果を得ました。

最後に図 10.1.1 の回路によるシミュレーションを行いました。 L_1, C_1 からなる同調回路の代わりに、キャリア周波数 700 [kHz] の AM 放送信号源を接続しました。混合回路により、700 [kHz] の AM 信号が 455 [kHz] の AM 信号へと周波数変換されることを確認しました。

筆者が作成した回路図ファイルはラジオノートの目次欄の第 16 章からダウンロードできます。各節の回路図には対応する.asc ファイルを記してあります。

16.2 局部発振回路

図 10.2.3 に OSC コイルの巻き数を記してあります。図 16.1 に再掲します。

コイル L_2, L_3, L_4 のインダクタンスを求めるにあたって、以下の仮定を設けました。

仮定 a. バリコン C'_1 の静電容量を 50 [pF] とします。 C'_1 の静電容量は最大 70 [pF] であることと、700 [kHz] は中波帯では低い方なので、50 [pH] は実際とそれほどずれていないと見込めます。

仮定 b. コイル L_2 と L_3 間の結合係数 $k_{23} = 0.9$ とします。これらのコイルは同じコア上に巻かれているので、高い結合を想定します。

仮定 c. コイル L_2 と L_4 間および L_3 と L_4 間の結合係数 $k_{24} = k_{34} = 0.5$ とします。 L_4 は共振周波数にはほとんど影響しないと仮定します。

実際には、結合係数の値は 16.4 節のシミュレーション結果が実験と極力合うように決めました。その結果を、仮定として前に持ってきて、話を組み立て直しています。

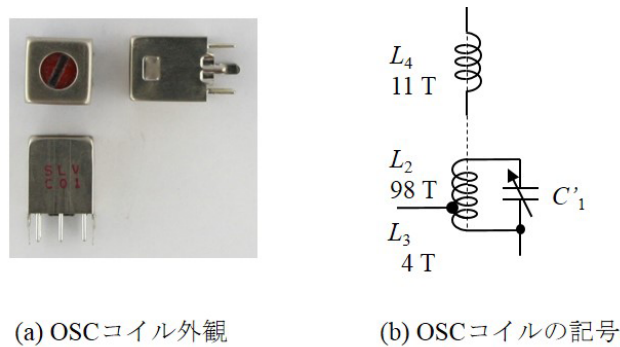


図 16.1: OSC コイル

図より、巻き数は $N_2 = 98, N_3 = 4, N_4 = 11$ です。巻き数比は

$$\begin{aligned} a_{32} &= \frac{N_3}{N_2} = 0.0408 \\ a_{42} &= \frac{N_4}{N_2} = 0.1125 \end{aligned} \quad (16.1)$$

です。信号周波数 $f_s = 700$ [kHz] とすると、局部発振回路の共振周波数 $f_{OSC} = 700 + 455 = 1155$ [kHz] です。これより、共振回路のインダクタンスを L_t とすると

$$\begin{aligned} L_t &= \frac{1}{(2\pi f_{OSC})^2 C'_1} \\ &= 380 [\mu\text{H}] \end{aligned} \quad (16.2)$$

と求められます。結合係数 k_{23} のコイルのインダクタンス L_t は、**和動的な接続**の場合

$$L_t = L_2 + L_3 + 2k\sqrt{L_2L_3} \quad (16.3)$$

です。また、インダクタンスは巻き数の 2 乗に比例します。

$$\begin{aligned} L_3 &= \left(\frac{N_3}{N_2}\right)^2 L_2 \\ &= a_{32}^2 L_2. \end{aligned} \quad (16.4)$$

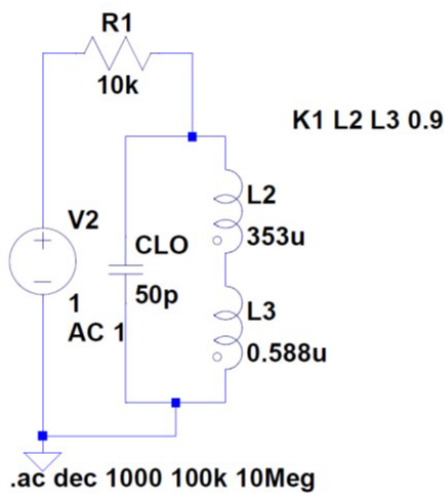
この式を (16.3) 式に代入すると

$$\begin{aligned} L_2 &= \frac{L_t}{a_{32}^2 + 2ka_{32} + 1} \\ &= 353[\mu\text{H}] \end{aligned} \quad (16.5)$$

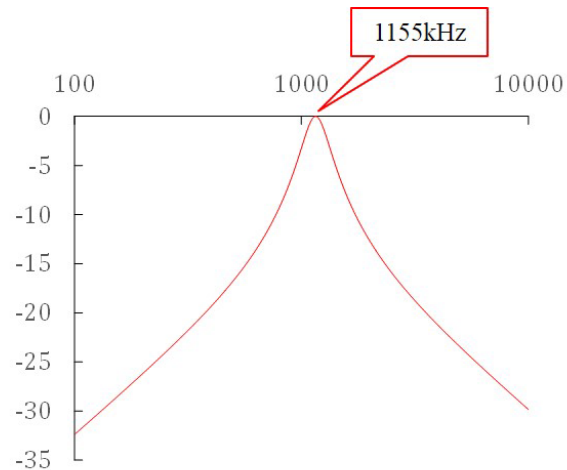
と求められます。ただし、 L_4 は結合が弱いので、共振周波数には影響しないとしています。
巻き数比より

$$\begin{aligned} L_3 &= a_{32}^2 L_2 = 0.588[\mu\text{H}] \\ L_4 &= a_{42}^2 L_2 = 4.45[\mu\text{H}] \end{aligned} \quad (16.6)$$

と求められます。



(a) 局部発振回路のシミュレーション回路



(b) 局部発振回路の周波数特性

図 16.2: 局部発振回路のシミュレーション回路と結果 (LoOSC.asc)

図 16.2 は局部発振回路のシミュレーション回路と結果の周波数特性です。共振周波数が 1155 [kHz] である結果が得られました。図説中の **LoOSC.asc** は LTspice の回路図ファイルです。

16.3 中間周波トランス

図 11.2.2 を図 16.3 に再掲します。中間周波トランス IFT₁ の巻き数は 123 : 36 : 5 です。また、IFT₁ の内蔵コンデンサ $C_{IFT_1} = 182$ [pF] です。

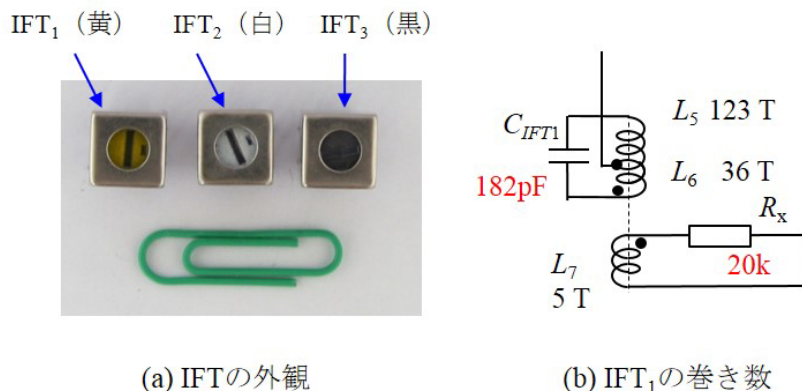


図 16.3: 中間周波トランス

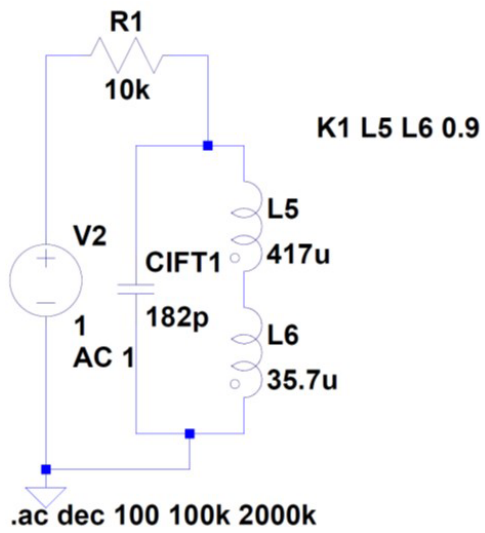
以下の仮定を設けて、共振周波数 455 [kHz] とする各コイルのインダクタンスを求めます。

仮定 d. コイル L_5 と L_6 間の結合係数 $k_{56} = 0.9$ とします。

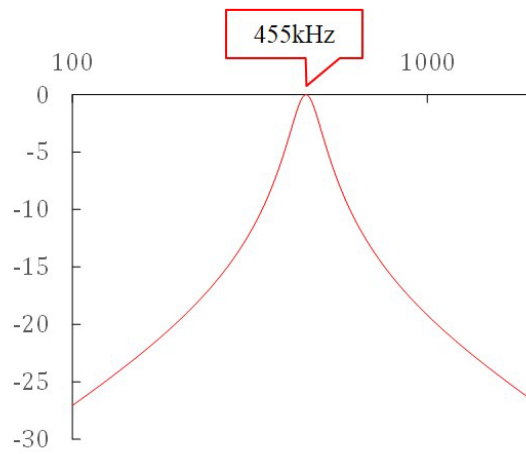
仮定 e. コイル L_5 と L_7 間および L_6 と L_7 間の結合係数 $k_{57} = k_{67} = 0.5$ とします。

前節と同様にして、 $L_5 = 417[\mu\text{H}]$, $L_6 = 35.7[\mu\text{H}]$, $L_7 = 0.789[\mu\text{H}]$ と求められます。

図 16.4 は中間周波トランスのシミュレーション回路と結果の周波数特性です。共振周波数が 455 [kHz] である結果が得られました。このシミュレーションではコイル L_7 は含まれていませんが、このコイルの巻き数は 5 回と他のコイルに比べて少なく、共振周波数への影響はほとんどないと見込まれます。



(a) IFTのシミュレーション回路



(b) 局部発振回路の周波数特性

図 16.4: 中間周波トランスのシミュレーション回路と結果 (IFT.asc)

16.4 局部発振回路の自励発振のシミュレーション

本節では、[図 10.1.5](#) の回路による **自励発振** のシミュレーションを行います。 [図 16.5](#) はシミュレーション回路です。

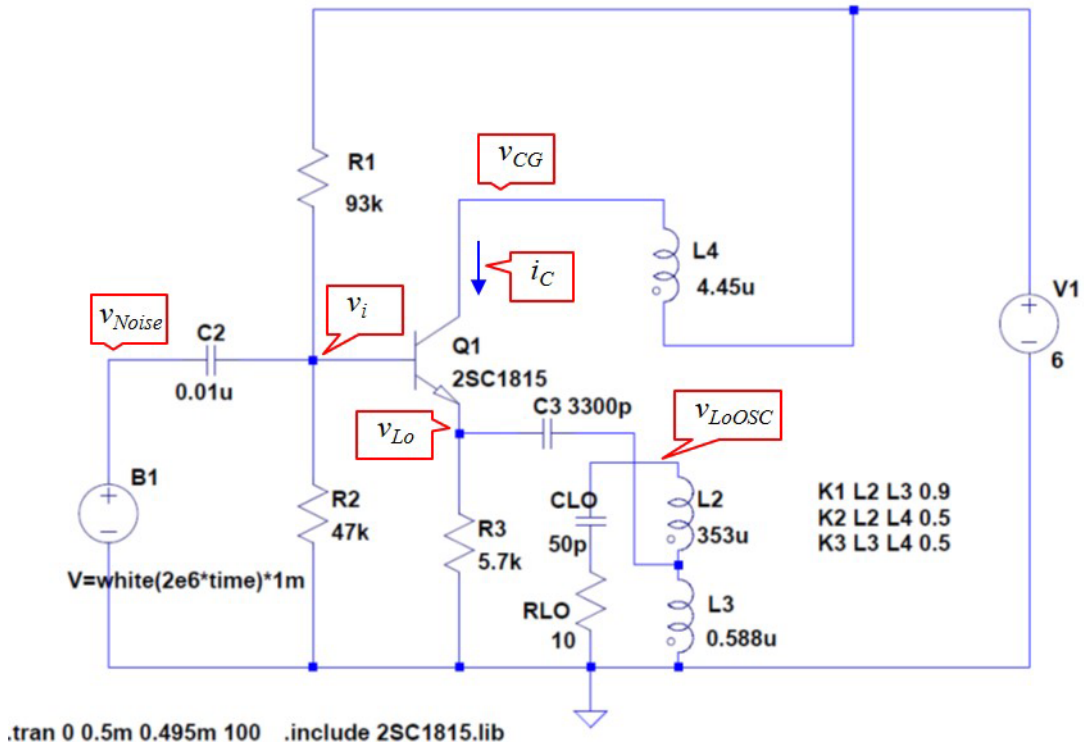


図 16.5: 局部発振回路の自励発振のシミュレーション回路 (`local_self_oscillation.asc`)

ここで新たにもう一つ仮定を設けています。

仮定 f. 局部発振回路の共振回路内には抵抗成分が存在する。

[図 16.5](#) において、 $R_{Lo} = 10[\Omega]$ としています。LTspice ではコイルの **内部抵抗** の値を指定できます。デフォルト値は $0[\Omega]$ です。本節の回路図では内部抵抗を明示的に示すため、コイルの外に内部抵抗を設けています。

まず、トランジスタ `2SC1815` のコンポーネントを登録する必要があります。リニアテクノロジー社が無償公開している LTspice IV には `2SC1815` のコンポーネントは組み込まれていません。

「LTspice」, 「2SC1815」とキーワードを入力してネット検索を行うと組み込み方法を容易に知ることができます。

```
.model 2SC1815 NPN(Is=2.04E-15 ...
```


という `.MODEL` ステートメントがネット上に紹介されています。これをコピーして、新規の text ファイルにペーストした後、拡張子を `.lib` として `/LTspiceIV/lib/sub` フォルダ内にセーブします。その後、LTspice を立ち上げ、メニューバーの右端の `.op` ボタンをクリックして、図 16.5 の回路図の下にあるように

```
.include 2SC1815.lib
```

と記入します。以上により、シミュレーションでトランジスタ 2SC1815 の特性を利用できます。

図中の V1 は直流電源です。直流電源だけでは、シミュレーションにおいて自励発振を励起できません。そこで、図中の B1 のような **ホワイトノイズ源** を使います。これは LTspiceIV に組み込まれています。Component 中の `bv` を選択し、図中に置きます。Value 欄に例えば

```
V=White(2e6*time)*1m
```

と記入することで、図 16.6(a) の v_{Noise} ような最大でも 0.5 [mV] 程度のランダムに振動するノイズをシミュレートできます。上式の最後尾の `1m` は、1 [mv] の意味です。Value 欄を

```
V=White(2e7*time)*1m
```

と変更すれば、同図 (b) のように繰り返し周期の短い（より高い周波数成分を持つ）ホワイトノイズを生成できます。これは抵抗などで発生している熱雑音を模擬しています。

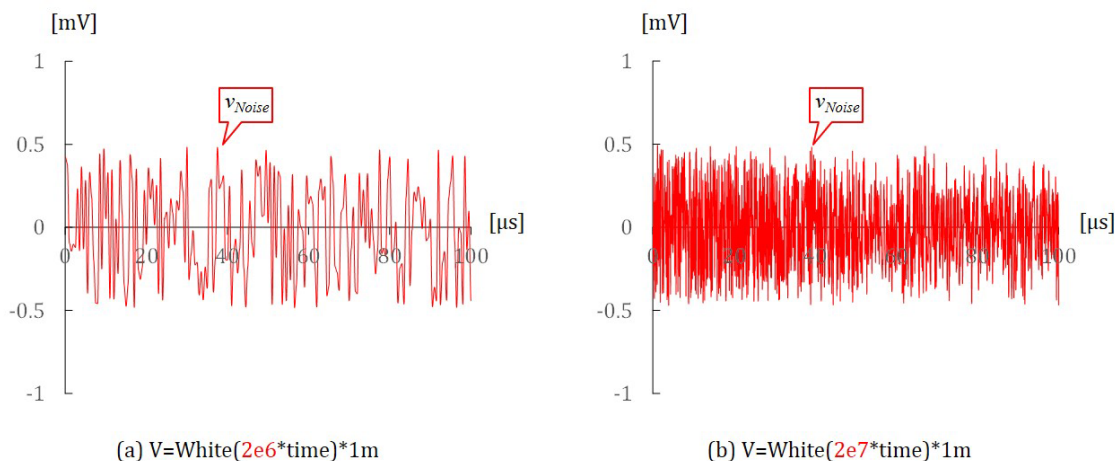


図 16.6: ホワイトノイズの波形例

図 16.7(a) は自励発振の励起の様子を示します。図は局部発振回路の電圧 v_{LoOSC} の振幅が時間とともに大きくなっていく様子です。横軸の時間が図 16.6 とは大きく異なるので注意してください。自励発振が安定するまでに約 0.5 秒かかっています。横軸の時間を引き延ばすと電圧 v_{LoOSC} が正弦波形をしていることが分かります。図 16.7(b) は同図

(a) の時間軸を 50000 倍に引き延ばし、499.99 [ms] から 500 [ms] の 10 [μs] の間の v_{LoOSC} の波形を示します。図では 10 [μs] の間に 11 回強の振動が見られ、共振周波数が約 1.15 [MHz] であることが分かります。

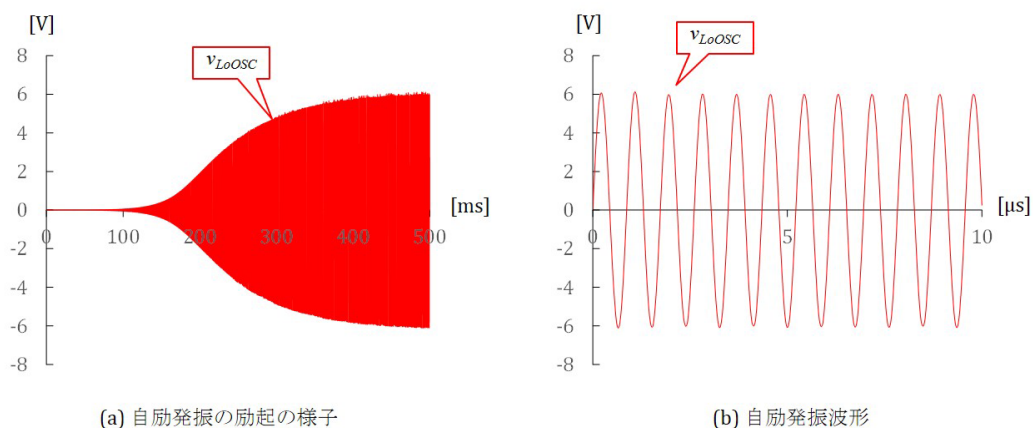


図 16.7: 自励発振の励起の様子

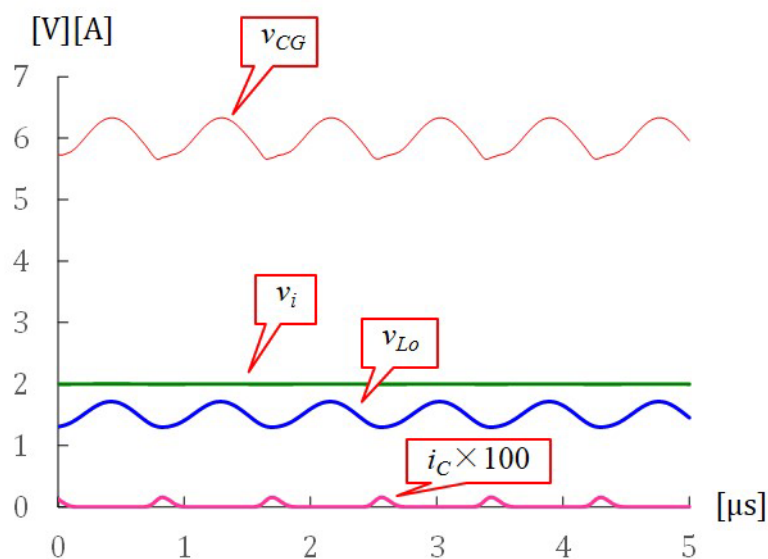


図 16.8: 局部発振回路の自励発振時の各部の波形

図 16.8 は局部発振回路の自励発振時の各部の波形です。十分に時間がたって、発振が安定した状態の時の各部の電圧・電流です。電圧・電流の定義は図 16.5 に示してあります。図 16.8 において上からコレクタ-グラウンド間電圧 v_{CG} 、ベース-グラウンド間電圧 v_i 、エミッタ-グラウンド間電圧 v_{Lo} 、コレクタ電流 i_C です。ただし、コレクタ電流は 100 の値を掛けて表示してあります。これらは図 10.1.5 の回路の記号と同じです。図 10.1.6

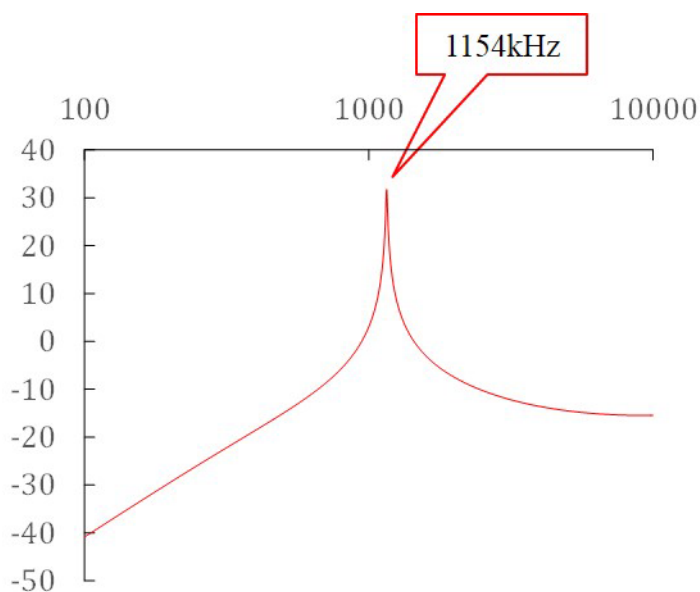


図 16.9: 局部発振回路の自励発振時の周波数特性

と図 16.8 を見比べてみてください。 v_i と v_{LO} の差がトランジスタのベース-エミッタ間電圧です。この電圧が 0.7 [V] 付近のときにトランジスタが導通してコレクタ電流 i_C が流れています。この電流は C_3, L_3 の経路を流れます。この電流により、共振回路は励起されます。また、 L_4 には誘起電圧が発生し、 v_{CG} は歪みます。実験結果とシミュレーション結果はよく合っていて、筆者自身が驚いています。もっとも、共振回路の内部抵抗 R_{Lo} の値、およびコイル L_2, L_3, L_4 間の結合係数は、両図の波形が極力合うように決めています。

図 16.9 は局部発振回路の自励発振時の v_{LoOSC} の周波数特性です。図 16.5 においてノイズ源 B1 と直列に電圧源 V2 を新たに挿入し、周波数解析を実施した結果です。1154 [kHz] にピーク値があり、局部発振回路の共振周波数がわずかにずれたことが分かります。

16.5 混合回路の自励発振のシミュレーション

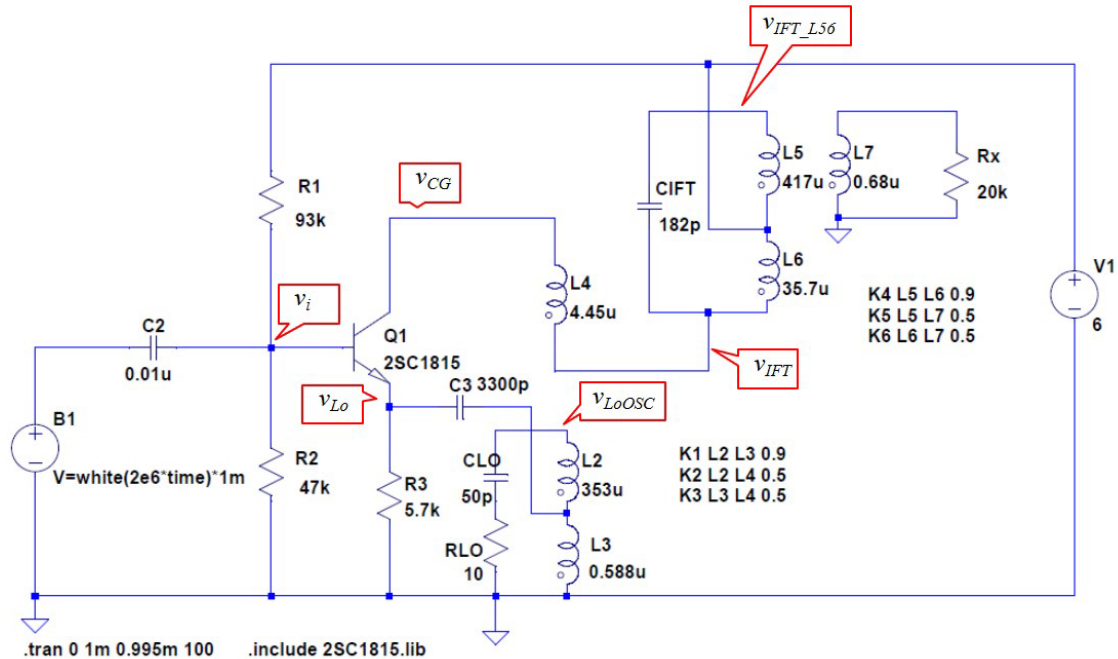


図 16.10: 混合回路の自励発振のシミュレーション回路

(local_self_oscillation_with_IFT.asc)

図 10.1.3 のように、図 10.1.5 の回路に中間周波トランスを挿入してシミュレーションを行います。図 16.10 は混合回路の自励発振のシミュレーション回路です。新たに L_5, L_6, L_7 からなる中間周波トランスを挿入してあります。抵抗 R_x は次段の中間周波増幅回路の入力抵抗です。図 16.5 と同様にホワイトノイズ源 B1 を用いて、混合回路内に自励発振が励起する様子をシミュレーションします。中間周波トランスのコイル L_6 と局部発振回路のコイル L_4 の接続点とグラウンド間の電圧を v_{IFT} としています。

図 16.11 は混合回路の自励発振時の各部の波形です。トランジスタ導通時に v_{IFT} に変動が見られますが、その他は図 16.8 とほとんど変わらない結果が得られました。中間周波トランスを挿入しただけでは 455 [kHz] の共振は起きないことが分かります。図 10.1.4 の実験波形と比べてみてください。シミュレーション波形において v_{CG} のひずみ度合いが大きい点が少し異なりますが、概ね一致しています。

図 16.12 は図 16.10 の局発回路とグラウンド間の電圧 v_{LoOSC} と中間周波トランスとグラウンド間の電圧 v_{IFT_L56} の周波数特性です。局部発振回路の共振周波数が 1155 [kHz]、中間周波トランスの共振周波数が 455 [kHz] であることが分かります。

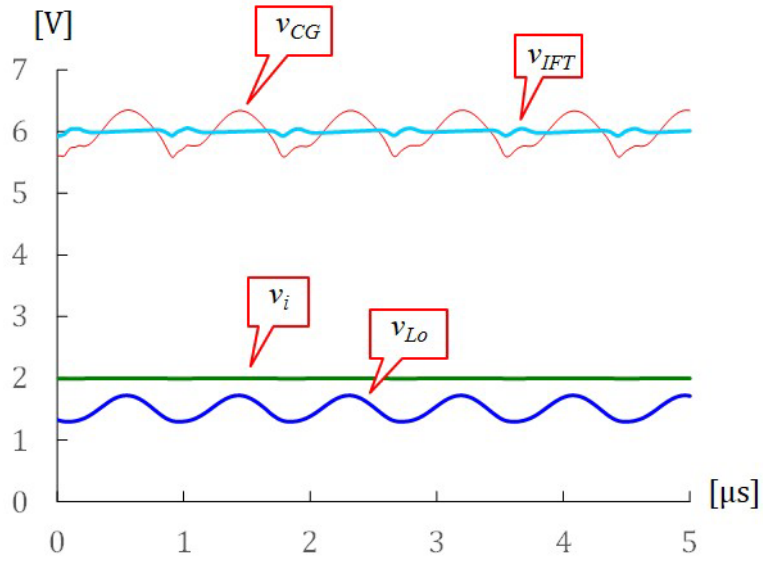


図 16.11: 混合回路の自励発振時の各部の波形

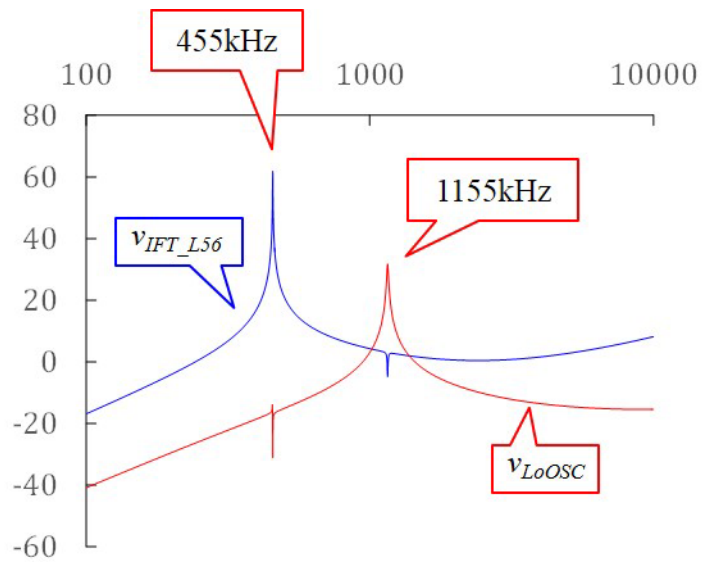


図 16.12: 混合回路の自励発振時の周波数特性

16.6 混合回路による周波数変換のシミュレーション

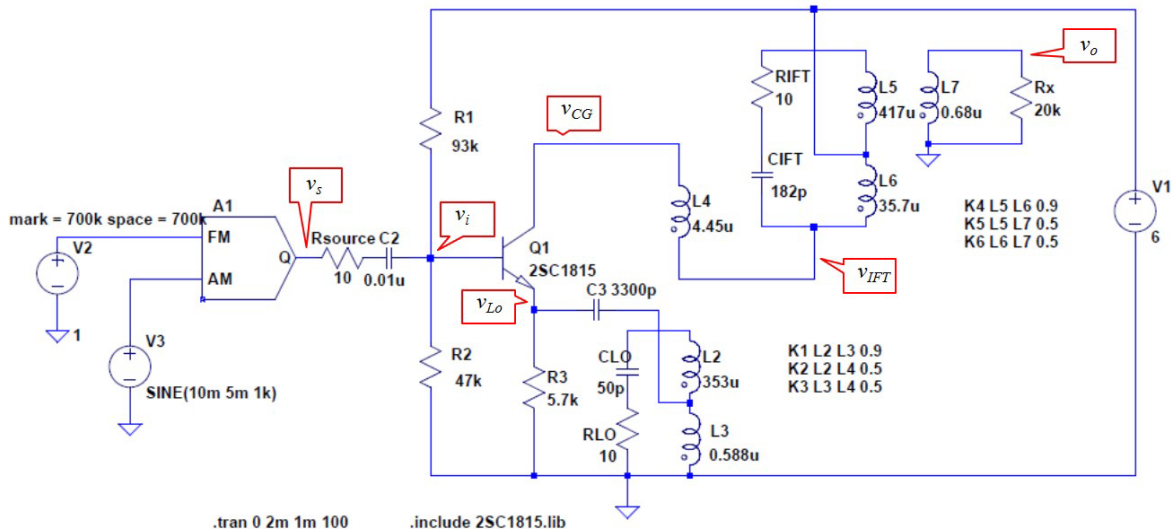


図 16.13: 混合回路のシミュレーション回路 (Mixer.asc)

図 16.13 は混合回路のシミュレーション回路です。図 16.10 の自励発振の回路のホワイトノイズ源を切り離して、新たに AM 信号源をつないでいます。

Edit → Component → [SpecialFunctions] → OK → modulate → OK

とクリックしていくことで AM 信号源を呼び出すことができます。図の設定により、AM 信号源の出力電圧 v_s に振幅 10 [mV]、周波数 700 [kHz] のキャリア信号を振幅 5 [mV]、周波数 1 [kHz] の信号源で AM 変調した波形が得られます。

ここで、新たに AM 信号源の内部抵抗 R_{source} と中間周波トランスの内部抵抗 R_{IFT} を導入しています。コイルの内部抵抗はコイル定数の 1 つとして指定できますが、本書では内部抵抗の存在を明示化するために、コイルの外に出してあります。これらの内部抵抗は、シミュレーション結果にみられる不自然な振動を抑えるために導入しました。

図 16.14 は内部抵抗の効果を示すシミュレーション結果です。中間周波トランスの出力側の電圧 v_o の上に AM 信号源の電圧 v_s を重ねて表示してあります。 v_s は 1 [kHz] の信号により変調された AM 信号です。同図 (a) は $R_{source} = R_{IFT} = 0$ の場合、(b) は $R_{source} = 0, R_{IFT} = 10[\Omega]$ の場合、(c) は $R_{source} = R_{IFT} = 10[\Omega]$ の場合です。内部抵抗が 0 の場合、出力電圧 v_o には実験では観測されない振動が見られます。 $R_{source} = 0, R_{IFT} = 10[\Omega]$ の場合には振動が抑えられていますが、少し残っています。 $R_{source} = R_{IFT} = 10[\Omega]$ とする

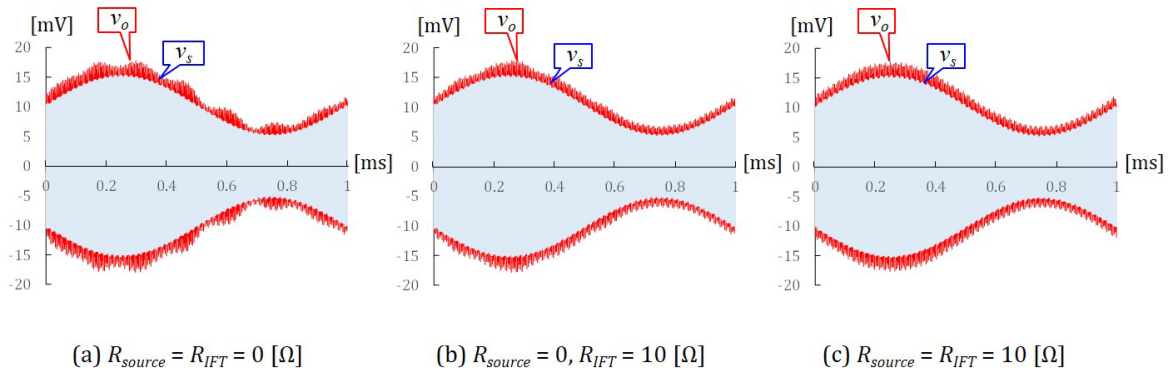


図 16.14: 電源の内部抵抗 R_{source} と中間周波トランスの内部抵抗 R_{IFT} の出力電圧 v_o への影響

と不自然な振動が消えました。コイルの内部抵抗および電源の内部抵抗を考慮しないことの方が不自然なので、これら内部抵抗の導入は（抵抗の大きさはさておき）妥当です。

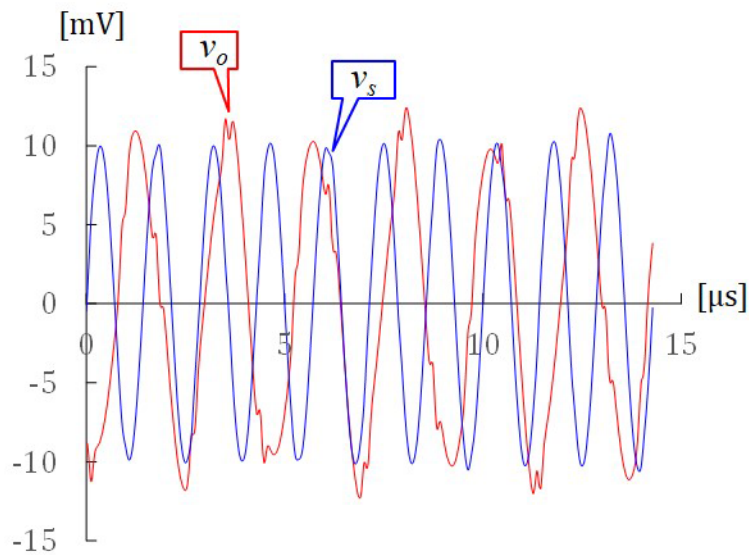


図 16.15: 混合回路による周波数変換の様子

図 16.15 は図 16.14(c) の時間軸を約 70 倍に拡大して、一部を抜粋した波形です。 v_s が約 700 [kHz], v_o が約 455 [kHz] で振動している様子が分かります。 局部発振回路の共振周波数 1155 [kHz] に対して、700 [kHz] の信号が混合回路に入力されたことで、中間周波トランスにおいて両者の差の周波数 455 [kHz] の共振が励起されていることが分かります。 すなわち、キャリア信号が 700 [kHz] の AM 信号が混合回路に入力されたところ、キャリア信号が 455 [kHz] の AM 信号が出力されました。 キャリアに載っている信号成

分が 1 [kHz] であることに変わりはありません。

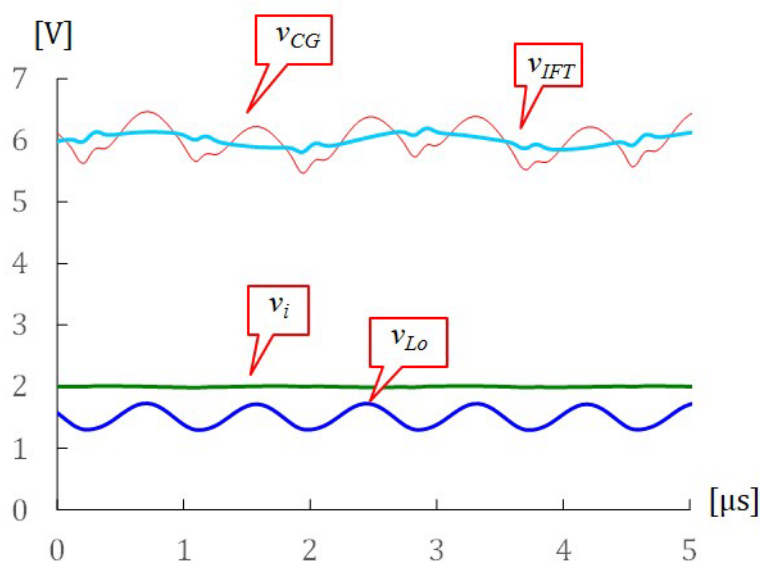


図 16.16: 混合回路の各部の波形

図 16.16 は混合回路の各部の波形です。図 16.11 の自励発振時との違いは v_{IFT} に 455 [kHz] の振動が現れている点です。

16.7 まとめ

本章では、スーパーヘテロダインラジオの混合回路を LTspice によりシミュレーションした結果を紹介しました。10 年程前に CircuitMaker を使った回路シミュレーションの教材「電子回路ノート」を執筆しましたが、今回、LTspice を使用してみて、その性能の高さに快感を持って取り組むことができました。10 年間のシミュレータおよびパソコンの進歩による差なのか、LTspice が元から良かったのか、そこは使いこなしてこなかったために分かりません。本章のシミュレーションができれば、スーパーヘテロダインラジオ全体のシミュレーションも難しいことではないかと思われまます。

なお、紹介した範囲内ではシミュレーション結果は実験結果とよく合っていました。コンデンサ C_3 の静電容量を大きくしたときの第 10 章混合回路の 10.2 節の間欠発振現象をシミュレーションで確認することもできます。ただし、シミュレーションでは間欠発振に異常振動が重畳するなど、モデル化が十分ではない状況も見られます。

参考文献

- [1] 古橋武「ラジオノート」
- [2] 神崎康宏「電子回路シミュレータ LTspice 入門」CQ 出版社, 2009
- [3] 神崎康宏, 木下淳「LTspice スタートアップ・マニュアル」トランジスタ技術 2008 年 7 月号別冊付録, CQ 出版社, 2008
- [4] 遠坂俊昭「電子回路シミュレータ LTspice 実践入門」CQ 出版社, 2011
- [5] 堀米毅「定番回路シミュレータ LTspice 部品モデル作成術」CQ 出版社, 2013

索引

- 2SC1815, 7
- AM 信号源, 13
- IFT.asc, 6
- .include 2SC1815.lib, 8
- local_self_oscillation.asc, 7
- local_self_oscillation_with_IFT.asc, 11
- LoOSC.asc, 4
- Mixer.asc, 13
- .MODEL ステートメント, 8
- OSC コイル, 3
- エミッタ-グラウンド間電圧, 9
- 間欠発振, 15
- 結合係数, 3
- コレクタ電流, 9
- コレクタ-グラウンド間電圧, 9
- 周波数解析, 10
- 自励発振, 7
- 中間周波トランス, 11
- 内部抵抗, 7, 13
- 不自然な振動, 13
- ベース-エミッタ間電圧, 10
- ベース-グラウンド間電圧, 9
- ホワイトノイズ源, 8
- 巻き数比, 3
- 和動的な接続, 4

著者

古橋 武

名古屋大学名誉教授 工学博士

本稿の内容は、著作権法上で認められている例外を除き、著者の許可なく複製することはできません。