

FM ラジオ作製教材の検討

飯塚 正明

千葉大学教育学部

Development of Teaching Materials to Fabrication of FM Radio

Masaaki Iizuka

Faculty of Education, Chiba University

電気技術者の多くは、子供時代にラジオ製作から電気・電子技術に興味をもち、技術者の道に進んでいる者が少ない。初めて作るラジオ教材は、AM ラジオである。これは、回路が簡単であることだけでなく、簡単な回路であることから、部品一つ一つが特性に影響をおよぼす回路であり、部品の改良と共に特性の改善が得られ、技術の核心に触れることが出来る。しかし、近年、このAM ラジオで受信可能なAM 放送の放送停止が進められている。我が国では、今日でもAM 放送が続けられているが、すでに、海外では放送を停止した国もある。テレビ放送がアナログ放送から地上デジタル放送への変更とともに放送電波帯がVHF からUHF へと移動した。その結果、FM ラジオ放送の利用電波帯が広がり、ワイドFM となった。広がった電波帯にAM 放送と同じ放送が行われるようになり、FM ラジオだけで、FM 放送だけでなく、AM 放送と同じ内容の受信も可能となった。これは、AM 放送電波帯の停止の可能性が高まったといえる。AM 放送が停止してしまうと、技術者育成のきっかけでもあるAM ラジオ教材が製作できなくなってしまう。本研究では、AM ラジオ教材にかわるFM ラジオ教材の検討を行った。FM ラジオでは、AM ラジオに比較し、復調回路が複雑である。AM ラジオでは、鉱石ラジオと呼ばれる無電源ラジオが作製教材の代表例である。無電源ラジオとして、FM 復調回路だけのラジオの検討を行った。筆者の環境では、電界強度が低く、放送の受信が出来ないため、増幅回路を検討した。回路が複雑なラジオでは、初心者への製作には困難であるため、トランジスタ1石で検討を行った。その結果、超再生方式のFM ラジオ回路であれば、増幅度を高くすることが可能であり、1石での回路が作製できることから、超再生FM ラジオ作製教材の検討を行った。

キーワード：AM ラジオ (AM radio)、FM ラジオ (FM radio)、鉱石ラジオ (crystal radio)、
超再生ラジオ (super-regenerative detector)、電子工作 (electronic handicrafts)

1. はじめに

近年、電波の利用が大きな変化をしている。特に大きく変化したのは、地上テレビ放送がアナログ放送からデジタル放送に変更され、利用する電波帯が、超短波 (VHF) から極超短波 (UHF) に変更された。また、携帯電話でも、情報量の増大とともに、利用する電波の周波数は、より高い周波数へと移動している。WiFiなどの無線LANも同様に、情報量増加に合わせて、より高い周波数の規格へ移行している。

放送局等では、低い周波数で利用していた情報通信を停止することが検討されている。AMラジオ放送は、TV 放送の周波数帯の移動により、周波数帯を広げることが出来たワイド FM 放送帯域にFM 放送として同時送信が行われている。現在のAM 放送は約1MHz 近傍の電波を利用しているため、同調回路の容量が大きく、小型化が難しい。携帯機器では80MHz 近傍のFM ラジオ受信機の機能を持った機器が増えているが、AM ラジオ受信機の機能を持った機器は皆無である。AM 放送局等は、停波を検討しており、AM 放送電波帯の停波の可能性が

高まっている。我が国では、今日でもAM 放送が続けられているが、すでに、海外では放送を停止した国もある。AM 放送が停止してしまうと、技術者育成のきっかけでもあるAM ラジオ教材が製作できなくなってしまうために、それにかわるFM ラジオ教材を検討する必要があると考えられる。本研究では、入門者向けAM ラジオ教材にかわるFM ラジオ教材についての検討を行った。

2. FM ラジオ教材の回路設計における検討課題

本研究では、AM ラジオ作製教材にかわるFM ラジオ作製教材を検討することである。AM ラジオは利用する周波数帯が低いために、比較的回路設計が容易であり、製作も容易であることから、電子回路の入門教材として長らく用いられてきた。AM ラジオで使用する電波は伝搬しやすく、送信出力が大きく、無電源ラジオ教材も利用されてきた。一方で、Web ページ等では、FM 無電源ラジオの製作例も見られるため、FM ラジオ作製教材として、無電源ラジオや1石ラジオの教材化を検討する。

ラジオの回路を考えるためには以下の項目にあわせて回路を検討する。

連絡先著者：

- (1) 共振回路とQとインピーダンス
- (2) 検波方式 復調方法 (弁別回路, AGC)
- (3) 電波の強度と増幅回路

ラジオの回路は、同調回路（共振回路）によって多くの電波から必要な周波数の電波を選別することと、選別された電波の信号から復調（検波）を行い、情報の信号を取り出すことから成り立っている。感度等のラジオの性能を高めるためには、共振回路の特性と復調回路の特性を高めることが必要である。放送を聴くためには信号の大きさも必要であり、増幅回路を検討する必要がある。共振回路、復調回路、増幅回路について検討を進めていく。

3. 共振回路の最適化

ストレートラジオ等では選局するためにLC共振回路を用いる。感度や放送局の選択度を高くするためには、LC共振回路の特性が重要である（同調回路として最適化する必要がある。）。LC共振回路の選択度（共振度）Q値が高い方が、放送局の選択度が高くなる。また、感度を高くするためには、共振時のインピーダンス（Z）も重要なパラメータとなる。コイルはインダクタンスがその特性となるが、Q値も特性の一つとして用いられている。

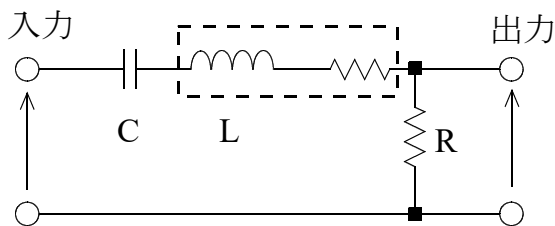


図1 LC直列共振回路

まずは、図1に示すようなRLC直列回路を考える。インピーダンス、およびQ値は次の式のように表される。

$$Z = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

$$Q = \frac{L}{R\sqrt{LC}} = \frac{\sqrt{L}}{R\sqrt{C}} = \frac{1}{R} \cdot \omega_0 L = \frac{1}{R} \cdot \frac{1}{\omega_0 C} \quad (\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C})$$

LC直列回路として考えた場合、Lの内部抵抗が無視できず、抵抗Rと同様の効果がある。Qを高くするためにはRを小さくすることが必要となる。コイルを構成する材料を変えることで、内部抵抗は小さくできる。しかし、電流が流れる部分には、より大きな問題がある。一般的な電線は円柱となるが、この断面に一樣に電流が流れるわけではなく、円周にのみ電流が流れることがわかっている。電線の直径を増加させると断面積は半径の2乗で増加するが、円周は半径と同じ率でしか増加しない。

そのため、電線の太さを増加させても、内部抵抗の低下があまり期待できない。AMラジオの共振用コイルでは、細い電線同士を多数まとめたリッツ線というものをを用いてコイルを作製している。リッツ線は、1本の電線を太くすることに比べて、電流の流れる断面積が大きくでき、内部抵抗を小さくできる。AMラジオの共振用コイルはインダクタンスが大きく巻き数が多いため、リッツ線を用いると、コイルの内部抵抗の大きな低下が期待出来る。LC直列回路では、共振時には、インピーダンスが小さくなり共振周波数の信号のみが回路を通り抜け安くなる。しかし、信号を取り出すためにはLC回路を流れる電流を取り出さなくてはならないため、その回路のインピーダンスによって、Q値が小さくなってしまう。

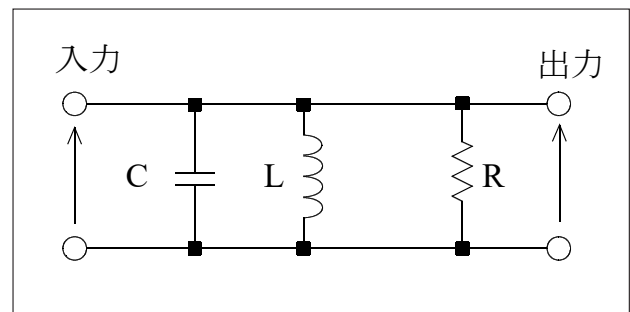


図2 LC並列共振回路

ラジオに使われる共振回路は、LC並列回路を用いることが一般的である。ここでは、図2に示すようなRLC並列回路を考える。RLC並列回路のインピーダンスとQ値は次のような式で表される。

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L} + j\omega C} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)^2}}$$

$$Q = R \frac{\sqrt{C}}{\sqrt{L}} = R \cdot \omega_0 C = R \cdot \frac{1}{\omega_0 L} \quad (\text{逆共振 } \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C})$$

並列回路では、直列回路とアドミタンスが反転するような特性を示し、共振時にインピーダンスが大きくなる逆共振という特性になる。Q値を高くするためにはRの値が大きい必要があり、信号を取り出す回路のインピーダンスが高いことが要求される。これは、復調回路等での入力インピーダンスが高いことが必要であることを示している。直列共振では、コイルのインダクタンスが大きい方がQ値が高くなるが、並列共振では、コンデンサのキャパシタンスが大きい方がQ値が高くなることがわかる。FMラジオの周波数帯では、コイルのインダクタンスはあまり小さくなく、巻き数が少ないためにコイルの内部抵抗によるQ値の制御は難しい。無電源ラジオでは、共振回路の後に、検波回路とイヤホンが接続される。そのため、イヤホンのインピーダンスも重要なパラメータとなる。イヤホンとして、以前は、クリスタルイヤホンが利用されていたが、今日では、セラミックイヤホンに代わり、インピーダンスが低下している。

FMラジオの周波数範囲は76～86MHz、ワイドFMでは76～96MHzである。選局はバリコンでキャパシタン

スを変化させることとして考える。82MHzでのコイルのインダクタンスに対するインピーダンスとQ値の特性から、コイルのインダクタンスを決定していく。しかし、コイルの内部抵抗の制御で、Q値を高くすることが難しく、同調回路だけで感度を高めることが難しい。

4. 復調方法の検討（弁別回路、AGC、検波方式）

周波数変調では、変調信号は、信号波に合わせて搬送波の周波数を変化させることで変調している。そのため、周波数の変化を振幅の変化に変えることで復調を行う。このような回路を周波数弁別回路という。また、振幅成分に信号がないため、受信強度の変動に起因する復調波の変動がなく雑音が少ない。一方で、受信された変調信号の強度が変動すると、復調波に影響することがあり、復調する前に信号強度を一定にするAGC（Automatic Gain Control）回路が必要となる。周波数弁別回路にはいくつかの方式があるので、それらについて検討していく。

4.1 スロープ検波

スロープ検波と呼ばれる回路は、AM検波と同じ回路で、ダイオードが1つでFM検波を行う回路である。共振回路は、共振周波数から少しずれると信号強度が周波数に対して急激に低下する。周波数が変動するFM変調信号において、共振周波数からずれた信号をダイオードに入力すると、周波数に対して信号レベルが変化しAM信号と同じように、振幅の変化が取り出せ、復調信号となる。しかし、共振度Qが高いことが重要で、Qが低いと振幅の変化が小さくなり、復調が難しい。スロープ検波であれば、AMゲルマラジオと同様な回路で共振回路にダイオードを接続した回路となる。ただし、検波回路のインピーダンスの影響から、同調回路が複雑となることと共振度を高くすることが難しい。スロープ検波回路では無電源で動作可能なラジオが作製できる可能性がある。しかし、AGCの機能がなく、電圧変動も復調されてしまう。

4.2 フォスター・シーレー検波

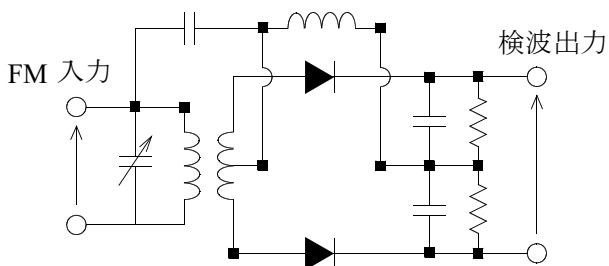


図3 フォスター・シーレー検波回路

フォスター・シーレー検波回路の回路図を図3に示す。この回路の動作は、共振回路を通過した信号は、共振周波数を境に周波数に対して位相が反転し、位相が変化していく。共振周波数が低いときは、電流が電圧の位相より進んだ容量性となり、周波数が高いときは、電流が電

圧より遅れる誘導性となる。共振回路から相互結合した信号から容量性と誘導性をダイオードで復調し、そのレベルの差から復調信号を取り出す回路である。この回路では、共振回路の他、ダイオード、チョークコイル、コンデンサ、抵抗などが必要となる。この回路でも、無電源で動作可能なラジオの作製が可能であると考えられる。しかし、AGCの機能はなく、電圧変動が復調されてしまう。

4.3 レシオ検波（比検波）

レシオ検波回路を図4に示す。この回路は、フォスター・シーレーの回路によく似ているが、ダイオードの向きと出力の回路が異なっている。この回路は、大きなコンデンサがダイオードの出力に接続されており、この両端の電圧が一定に保たれる。そのため、入力電圧が変化しても、その影響を低減できる効果があり、AGCの機能がついている回路である。この回路でも、無電源FMラジオ回路が作製できる可能性が考えられる。

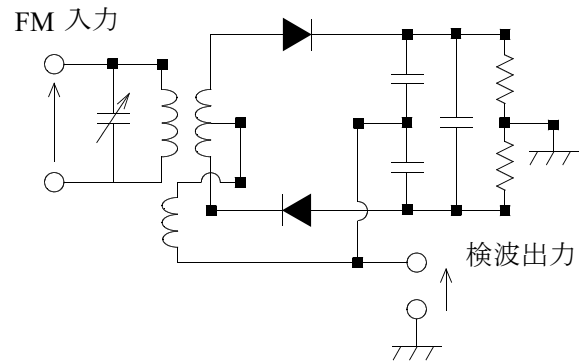


図4 レシオ検波回路

4.4 その他の復調回路

その他、ピークデファレンシャル検波回路、クワッドラチャ検波回路、PLL検波回路など、周波数の変化を電圧の変化に変え検波するような回路がある。これらは、復調する周波数を特定しないと復調できず、ヘテロダイン受信機に利用される回路であり、共振回路と組み合わせて使うことが難しい。そのため、無電源ラジオや1石ラジオの検波回路として利用は困難である。

5. 電波の強度と増幅回路

FMラジオは周波数が高く、遠距離の通信を行う目的ではない。そのため、AMラジオ放送局に比較し送信電力が少なく、周波数が高く直接波で伝搬し、建物や地形の影響が大きいため、電波の強度が小さくなっている地域が多い。これは、AMラジオでは、アンテナを大きくすれば受信が可能であるが、FMラジオではアンテナの大きさや設置の高さなどの調整だけでは受信強度の解決が難しいと考えられる。放送局の近傍であれば、ゲルマニウムラジオのような無電源ラジオの教材化が可能であ

と考えられるが、多くの環境では、無電源ラジオは受信が難しく、教材化が困難であると考えられる。Webページ等で見られる無電源FMラジオの作製例では、放送局近傍でしか、動作が確認が出来ていないようである。このことから、動作可能なFMラジオ教材には、増幅回路が必要であると考えられる。一般的に、共振回路の後に増幅を行うのであるが、周波数弁別回路は共振回路の特性を利用しており、ストレートラジオの回路構造では、信号の増幅が困難である。共振回路の前に増幅回路を入れる場合は、回路が複雑になり、回路特性も不安定となるので、教材化は難しいと考えられる。ここまで検討した検波回路のフォスター・シーレー検波とスロープ検波を用いた無電源ラジオを作製したが、千葉市ではFMラジオ放送を聴くことは不可能であった。

これまでの検討から、FMラジオ作製の教材化として、信号の増幅が可能で、選択度Qも高く出来る回路として、再生検波回路を検討する。

6. 再生検波と超再生検波

再生検波回路とは、増幅回路の出力から発振を起こさない程度に正帰還をかけることで増幅度を高くした検波回路である。また、正帰還をかけると、周波数の選択度も非常に高くなる。このことから、増幅度、選択度が再生検波回路を用いることで向上が期待できる。VHFの領域では、感度を高めるため、正帰還をより高めた超再生検波回路が利用される。発振回路は、増幅出力を正帰還させることで発振を開始するが、発振の初期段階では、帰還された信号により発振波形が徐々に増加していき発振に至る。超再生回路では、正帰還を十分に高くしておき、安定な発振が開始する前の段階で止まるように回路を設計する。そのことにより、帰還率が高く、増幅度、選択度が再生検波よりも高くできる検波方式となっている。

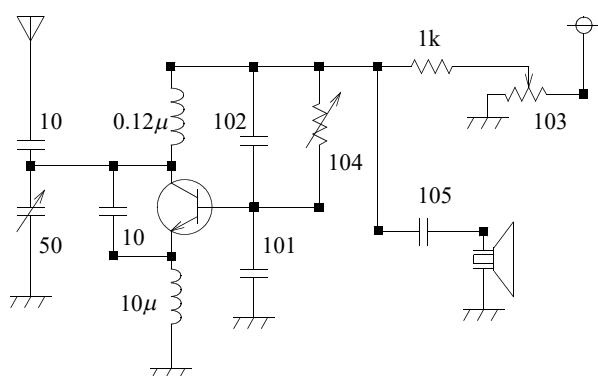


図5 超再生検波FMラジオ

超再生検波回路で作製した回路図を図5に示す。AMラジオの周波数は1MHz程度であるので、低価格の部品が多く、教材化する上で、使用する部品の選択は容易で

ある。一方、FMラジオでは100MHz程度となるため、部品の選別も重要である。今回作製した回路では、帰還率調整用に可変抵抗を設置してある。抵抗を調整し、発振状態から増幅状態に調整するとラジオの動作となる。回路作製によく用いられるトランジスタの2SC1815やその代替品として使われるBA733などは周波数帯域幅FTは80MHz程度でFMラジオの周波数領域では発信に至るほどの増幅度がない。これらのトランジスタを用いて回路を作製したが、FMラジオの周波数領域では増幅度が低く、発振が確認できなかった。そこで、FTが180MHzの2SC1740で設計を行った。しかし、このトランジスタを用いて回路を作製し動作を確認したが、この素子でも増幅度が低く、安定した発振が確認できなかった。そこで周波数帯域幅積（FT）が550MHzの2SC1923を用いることとした。このトランジスタでは目的とする周波数帯域で発振が確認され、超再生検波の動作も確認できた。このような回路では、FTが500MHz程度以上のトランジスタが必要であることが分かった。1m程度のアンテナを接続し、出力にはセラミックイヤホンを用いることで、千葉市で受信を試みたところ、微弱ではあるが、FMラジオ放送の再生が確認できた。

7. おわりに

本研究では、FMラジオ教材の検討を行った。放送している電波塔から離れた場所では、電界が弱いために、無電源ラジオの回路では、動作が確認できない。高い増幅度の増幅回路を用いた超再生検波方式の回路を用いることで、放送の再生が確認できた。AMラジオの放送が停止しても、やや回路が複雑になるが、ラジオ作製教材が可能であると考えられる。今回作製した回路は調整が必要な回路となっている。実際の講座等で回路作製を考えると、超再生検波の調整は難しいと考えられるので、調整の必要のない回路への設計変更が必要である。

参考文献

- 1) 鈴木憲次, "高周波回路の設計・製作", CQ出版社, 1992
- 2) 根日屋英之, "高周波・無線教科書", CQ出版社, 2008
- 3) 鈴木憲次, "ラジオ&ワイヤレス回路の設計・製作", CQ出版社, 1999
- 4) 今井栄, "作りながら理解するラジオと電子回路", CQ出版社, 2010

謝辞

本研究の一部は科学研究費補助金（基盤研究(C)）課題番号18K02976 の補助を受けて実施した。