

卒業研究でスペクトラムアナライザーを試作する。

1. 始めに

当時の新制大学での研究設備は大変貧弱であった。計測器などは大変少なかった。

担当の石田光夫教授の年来の研究分野は超再生受信であったが、そのスペクトラムを観測すべきスペクトラムアナライザーがなかった。

ラジオ製作などで育った私は、テレビ帯にも興味が移っていた。1953(昭和 28)年には東京でテレビ放送が開始され、12 チャンネルの計画と共に長野県では 1958 年秋に美ヶ原に送信所が設置された。1957 年には夏休みから TV 音声受信用の FM 受信機を部品から試作し、八木アンテナも作り 12 月 24 日の東京 NHK-FM の放送開局と同時に飯田で受信した経験があった。

石田教授から頂いたテーマは、スペクトラムアナライザーを試作する。と言うものであった。

当時テレビもある程度普及しラジオ/テレビ屋さんでテレビ受像器用真空管が購入できるようになっていた。

2. スペクトラムアナライザーの試作研究

一年で試作研究を完成するためには、VHF 帯で試作するのが適当と言うこととなった。

しかし、信号発生器がないことには、スペクトラムを観測できない。したがって試作研究の範囲は次のようになり、1958 年は、とにかく忙しい一年を過ごすこととなった。

1) TV 帯までの信号発生器の試作。-----FM-AM 変調が出来る。

周波数帯目標は、TV の 90~108MHz、170~222MHz、混合して FM-TV 中間周波帯も。

2) スペクトラムアナライザーの試作。-----上の信号のスペクトラムを確認する。

先生の期待は、1)、2)項が出来れば、超再生受信現象の発生用信号源も試作し、念願の超再生現象を観測したいと言うことであった。

2.1 スペクトラムアナライザーの試作

多少の経験はあったものの初めてのことが多く戸惑ったが、課題を一つ一つ解決して行った。

1) VHF 帯の発振管 先生所持品のエーコン管(955)を用いる。

2) スペクトラムアナライザーの詳細

a) 分解能を決める中間周波数と帯域幅はラジオ用 455KHz 既製品を活用する。

b) 横軸の周波数走引はリアクタンス管回路を用いる。

c) 鋸歯状波発振は小型のサイラトロンを用いる。

d) 指示器は 3 インチオシロスコープに接続することを前提とする。

内藤昇助手が定年の際、折から信大グリークラブ 40 周年記念に参加の序でに、卒業研究論文と信号発生器を松本で返却して頂いたのであったが、自宅改造の際廃棄してしまい、写真と記憶で書いています。

a) 分解能を決定する帯域増幅器

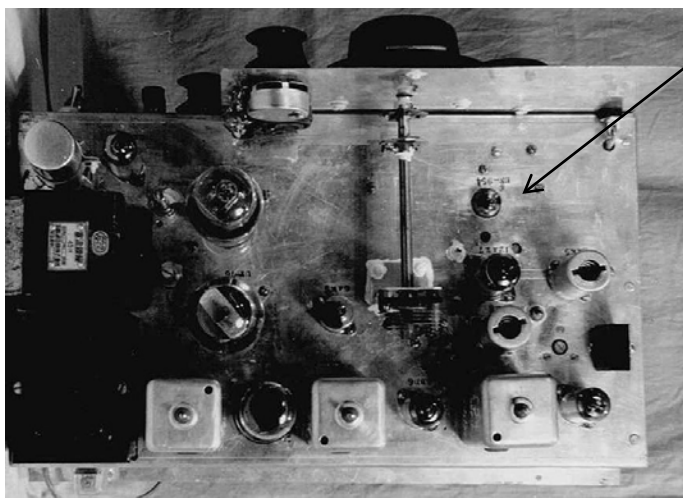
最も苦勞したことは、信号源を走引しながら狭帯域中間周波増幅器で受信する際の過渡応答であった。通常のラジオ用中間周波トランスを使えばスペクトラム分解能は得られると思っていた。



試作スペクトラムアナライザ外観

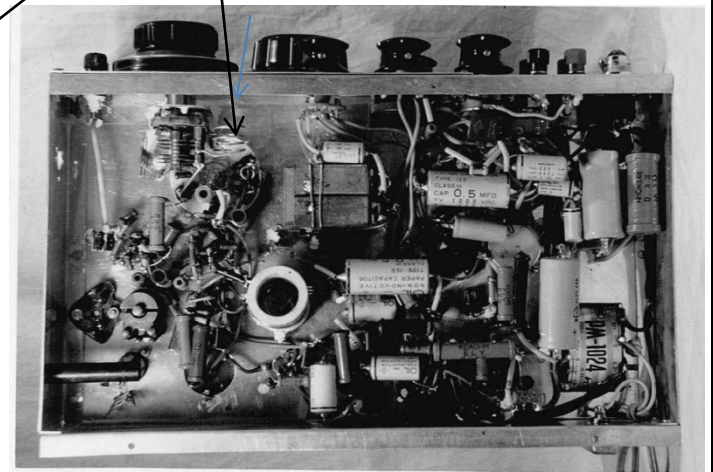


2016年6月に入手 RCA 製エーコン管 6F4
この品種は三極管でさらに高周波での動作を期待しカソード、グリッド、プレートなどが二本引出になっている。



エーコン管 955

エーコン管ソケット



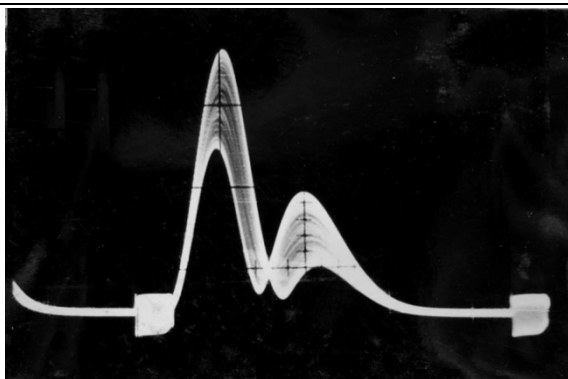
b) スペクトラム分析狭帯域増幅器の過渡応答とその改善

信号を時間と周波数走引により受信すると、パルス状になる。スペクトラムの一部を長方形に切り取ることになり、時間軸ではタイムサイドローブを生ずるのである。(勉強すれば当然のことであった。)

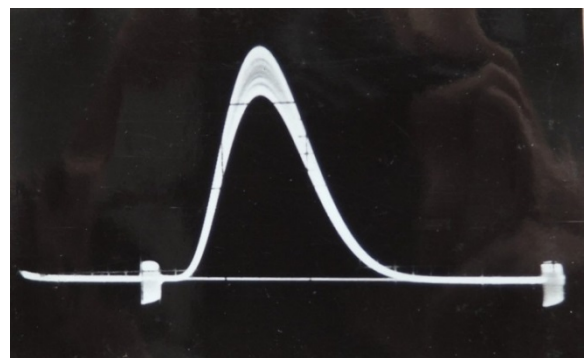
近似モデルとして CW をパルス状に切り取り印加し、実験的に中間周波トランスを改善した。

この問題は、レーダー用スペクトラムアナライザ開発の際の文献が IRE にあることを突き止めた。これらを参考とし解決努力を行った。冬休みのことであった。

ダストコアを抜くと中心周波数が上がり、コイルの遠い部分のインダクタンスが増えることに着目し、さらにダンブ抵抗をやや小さくし疎結合単峰特性を実現し大幅に改善した。検波回路の充放電過渡応答も見られ軽いローパスフィルターを追加し解決した。分解能は、目標の 10kHz から 15kHz に緩和せざるを得なかった。



パルス状 CW 印加と、IF 出力の時間応答(当初)



改善後の IF の時間応答

当時市販されていた A 社のアナライザーもカタログのスペクトラムデーターを見ると、この問題に直面しており、タイムサイドローブが残っており、結果として凌駕することが出来たと思っている。

b) VHF 周波数走引發信器

エーコン管 955 注¹は、第二次大戦末期になって我が国のレーダー用として製造されたもので教授が所蔵しておられた。例えば 3 式 1 号電波探信儀 3 型(150MHz)の局部発振管に使われた。注²



- 955 は VHF 迄使用できるエーコン管でレーダー受信部に、局部発振管として使用され、954 は、5 極管であり高周波増幅に用いられた。
- 955 の外観及びソケットは左の写真の通りであり、筆者もほぼ同じ物を使った。(捺印は 954 と間違っています。)
- ヒーター6.3V,0.15A、プレート電圧 180V,4.4mA、 $\mu=25$
- スペクトラムアナライザーでは 100MHz 帯の走引發信器として動作させ、ミニアチュア管 6AK5 をリアクタンス管として用いた。

○ 注¹ エーコン管とソケット http://www.anc-tv.ne.jp/~suzuki3/amp_955_2c39/a_955_2c39_amp.htm より

○ 注² レーダー回路図は、日本無線史および http://minouta17.web.fc2.com/navy_1-3-rader.html より

周波数走引を行う方法は、電子管のミラー効果を補強したようなリアクタンス管回路がありこれを勉強して、955 発振回路にミニアチュア管 6AK5 を三極管結合で用い結合させた。ミラー効果を利用するもので、リアクタンスの変化は得られるがキャパシタンスと共にコンダクタンス分が発振管に負荷となり、発振が弱くなる問題があり TV 高帯域での実現は困難であった。

c) 鋸歯状波走引波形の発生

簡単な回路で鋸歯状波をオシロスコープの走引と同期して発生させるため、ST 管小型サイラトロン TY16G を用いプレートへの CR の充電曲線を利用した。

しかし、整流電源に定電圧回路はなく、充電電流、発振管、リアクタンス管共に電流が変化し直線走引が難しく、補正回路を工夫して直線走引を実現した。

2.2 全体設計製作と問題点の克服

骨格が固まったところで全体の回路図を引き、高周波部品の入手のため夏休みの帰郷の際、東京神田のラジオ街に行ったこともあったが、他の部品は市内で入手できた。

なお論文を廃棄してしまったので回路図の再現は諦めることとする。写真から球数と回路規模をご想像下さい。

2.3 信号発生側の試作

スペクトラムアナライザーの試験をするためには、信号源がなくてはならない。このために AM-FM 変調が可能な信号発生器が必要でありこの試作も実施した。

- 周波数帯 FM、TV の低および高周波数帯、混合して TV・FM の IF 帯。
- 変調方式 AM および FM、正弦波発振 ウィーンブリッジ発振回路
- FM 変調 リアクタンス管回路 (スペクトラムアナライザーと類似 6J4 使用)
- 周波数校正 10MHz 水晶発振器の高調波 ビートを受信し聞いて判定。

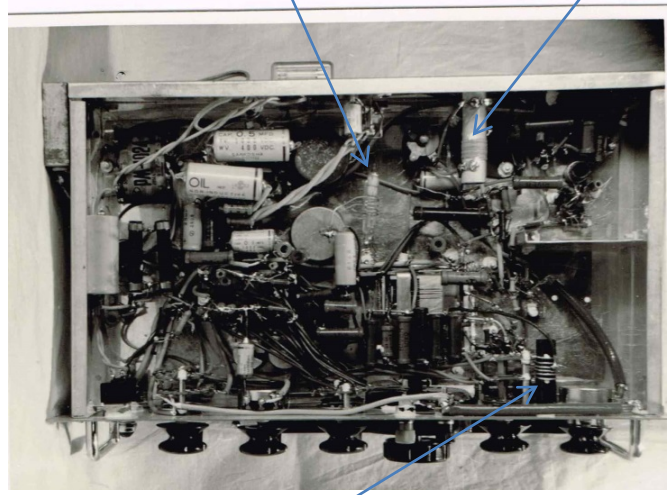
この試作での問題点は、

○正弦波発信器のウィーンブリッジ発振回路は理論通り発振したが、振幅自動調整回路が必須であり、最終的にガラス管入りサーミスターを入手し解決した。変調波の歪みはスペクト

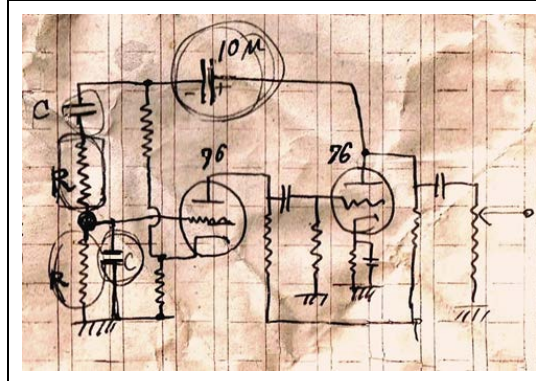
ラムを観察する際に誤差となり重要であった。

- FM 変調回路は、容量性リアクタンス回路を用いたが発振回路へ容量変化と共にアドミタンス分が発生し発振回路の負荷となり、高 TV 周波数帯では困難であった。

信号発生器と言っても本格的出力減衰器は持たず簡便な物であったが、相当の努力を要した。バリコンは、二連の市販品の中心部 2~3 枚残し切り取って VHF 用に改造した。

ダイヤルは校正し周波数を捺印	出力メータ	ガラス管サーミスター	校正用水晶発信器のコイル
			
試作信号発生器 FMIF, FM, L&H-TV 帯		VHF 帯発振コイル バンド切り替えも	

当時のメモ発見



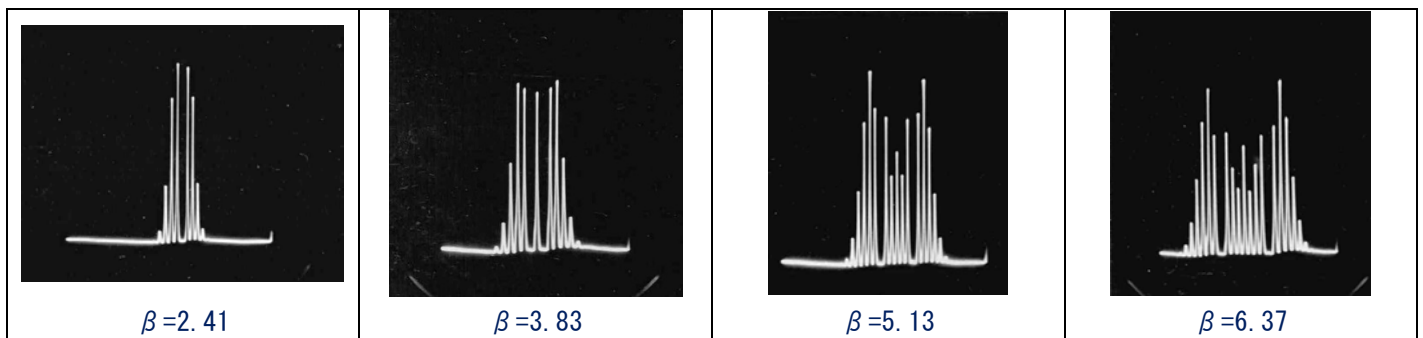
ウィーンブリッジ発振回路スケッチ

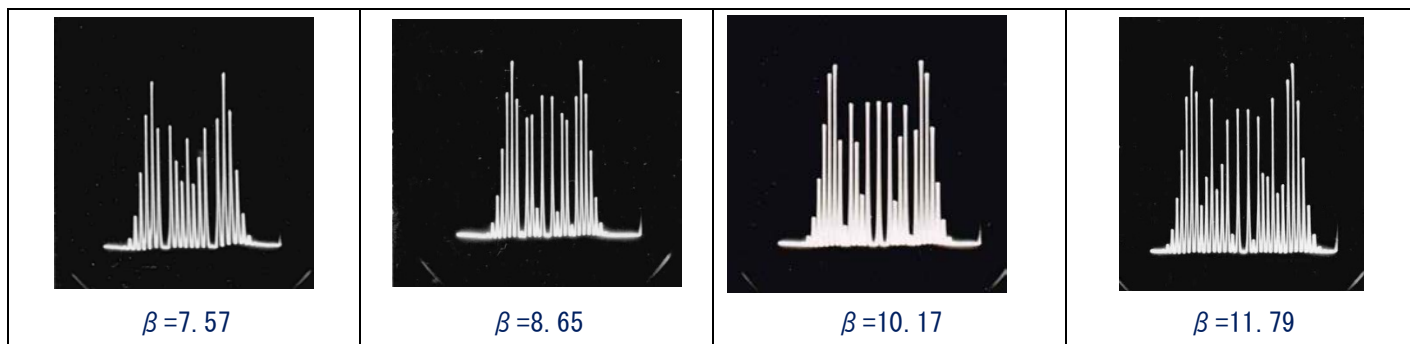
卒業論文は廃棄してしまったが、一枚だけメモが残っていた。

- ウィーンブリッジ発振原理図から実現回路化を検討中、未完。
後に双三極管を用い、二段目のプレート抵抗にサーミスを挿入し自動振幅調整を実現した。
- 発振周波数は、結局 $f = 1 / 2\pi CR$ (各々CとRは同じ。)
利得は3が必要とされる。ごく僅か越えるよう自動調整が必須。
- 変調周波数は、15kHz。AM 用 1kHz 等に切り替え。

2.4 得られた FM 波スペクトラム

かなりの総合動作特性が得られたと思われたので、スペクトラムアナライザと信号発生器を接続し総合特性を測定した。変調周波数 15kHz、走引幅は約 0.6MHz、縦軸は相対振幅直線である。

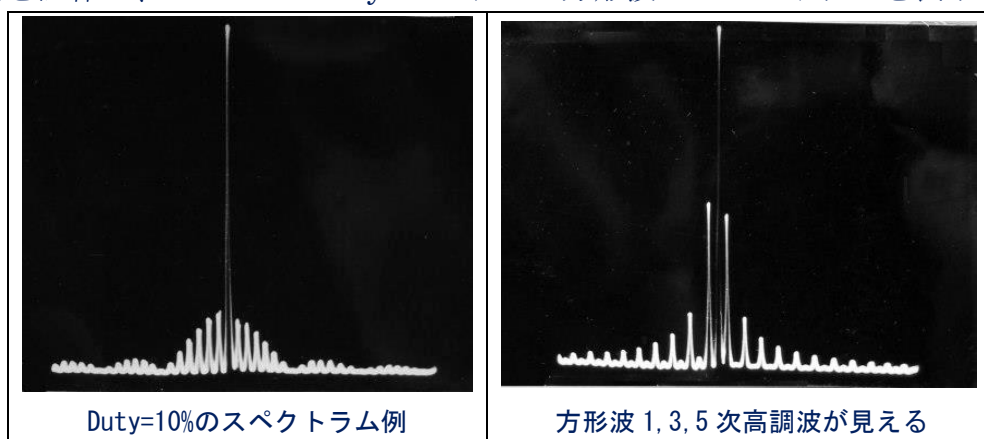




FM 変調波の各側波帯の振幅はベッセル関数にしたがって変化する、特定の変調指数の時たとえば第 1 回目にキャリアが消失するのは FM 変調指数 $\beta=2.41$ の時である。以下多数の例。

2.5 得られたパルスド CW のスペクトラム例

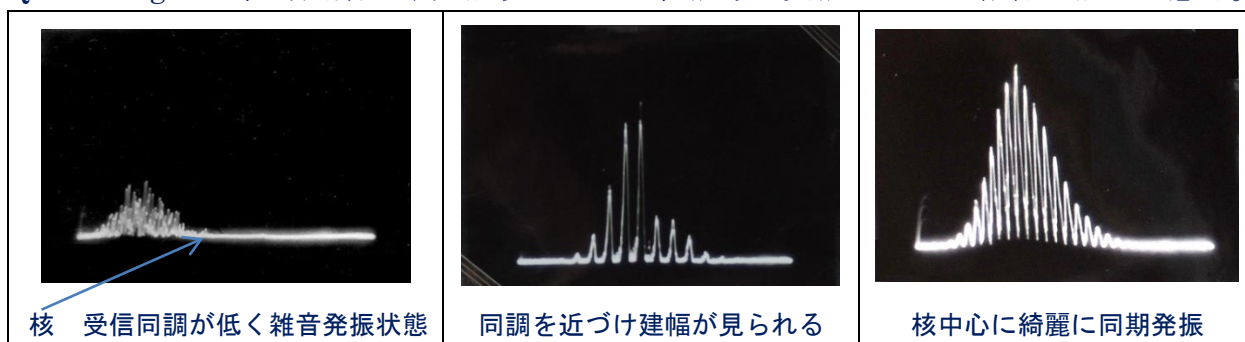
変調回路を試作し、15kHz の Duty=10%および方形波のスペクトラムを表示した。



2.6 模擬超再生信号スペクトラム

再生ラジオは、真空管検波同調回路を発振一步手前に置くと、等価的に Q が上がり感度が増す。それを越える超再生受信回路の動作を書き出せば下記の通りである。

- 受信機を受信信号近辺に同調し超音波～20kHz(Quenching 周波数と言う)で断続し、毎サイクル毎に準発振状態(発振または／しそうな状態)に置く。 強烈な雑音が聞こえる状態。
- AM 受信信号が印加されると受信すべき信号が核信号となり、Quenching 周波数のサイクル毎に受信信号の振幅に依存して発振する状態に変わる。
- 微弱な AM 受信信号の変調振幅に依存し発振電力に変わる。毎 Quenching サイクル毎に発振が始まる、つまり変調音が聞こえる。雑音状態がほぼ消えて音声聞こえる。
- しかし、発振の建幅現象は、時間の指数関数的であると言われ、当然有効な受信レベル／変調度が限定され、直線性は全くなく極めて歪みの多い受信方式である。*Hi-Fi* じゃない。微小受信電力が発振電力に変換される。これを利得と見れば”高利得”である。
- Quenching とは、毎周期の準発振状態を止め、信号が受信されると雑音が消える意味。



◎核発信器自体の応用は、現在も並列配置の発振素子を同期発振させるため意味がある。

超再生の発振出力は、外部に漏れ他の受信機を大いに妨害する。再生ラジオも一旦発振すると近所に妨害を与える。スーパー普及と共に影を潜めた。スーパーラジオも局部発振電力が漏れるが、少ない。

極安価な子供用として、トランジスタ時代にも超再生受信のトランシーバーが K 社から販売されていたことがあった。が、試したところあまりにも音質、安定度共に悪かった。妨害を与えるので発売が禁止されているようである。

上の写真に示す状態つまり、受信同調を下から近づけ急に建幅する所を石田先生に見ていただいたところ、なぜか大変不機嫌になられ、部屋に戻ってしまわれた。

像するに、一本のスペクトラムになると想像しておられたようである。

この実験は、超再生受信モデルとして **quenching** 発振(15kHz)も含め模擬しており間違っていないと思います。

3. この経験は後に役立った。

この卒業研究に打ち込み試作研究を行った経験は、技術者になってからも種々役に立った。

- 1) 入社直後、ある広帯域受信機を含む装置の担当となり、その中にスペクトラムアナライザ一部分があり近親感が湧いた。
- 2) FM 変調スペクトラムの形や、フーリエ変換・逆変換、フィルターの過渡現象などの問題に遭遇した場合、感覚として理解していたことが役立ったり、記憶が甦った。
- 3) チャープ(chirp)レーダーを二度にわたり経験したが、タイムサイドローブと感度を両立させるフィルターの設計、最近では DSP に与える分解能を落とさず現実的窓関数選定に際し役立った。

4) 現代スペクトラムアナライザは、タイムサイドローブが-40dB も得られる Hamming

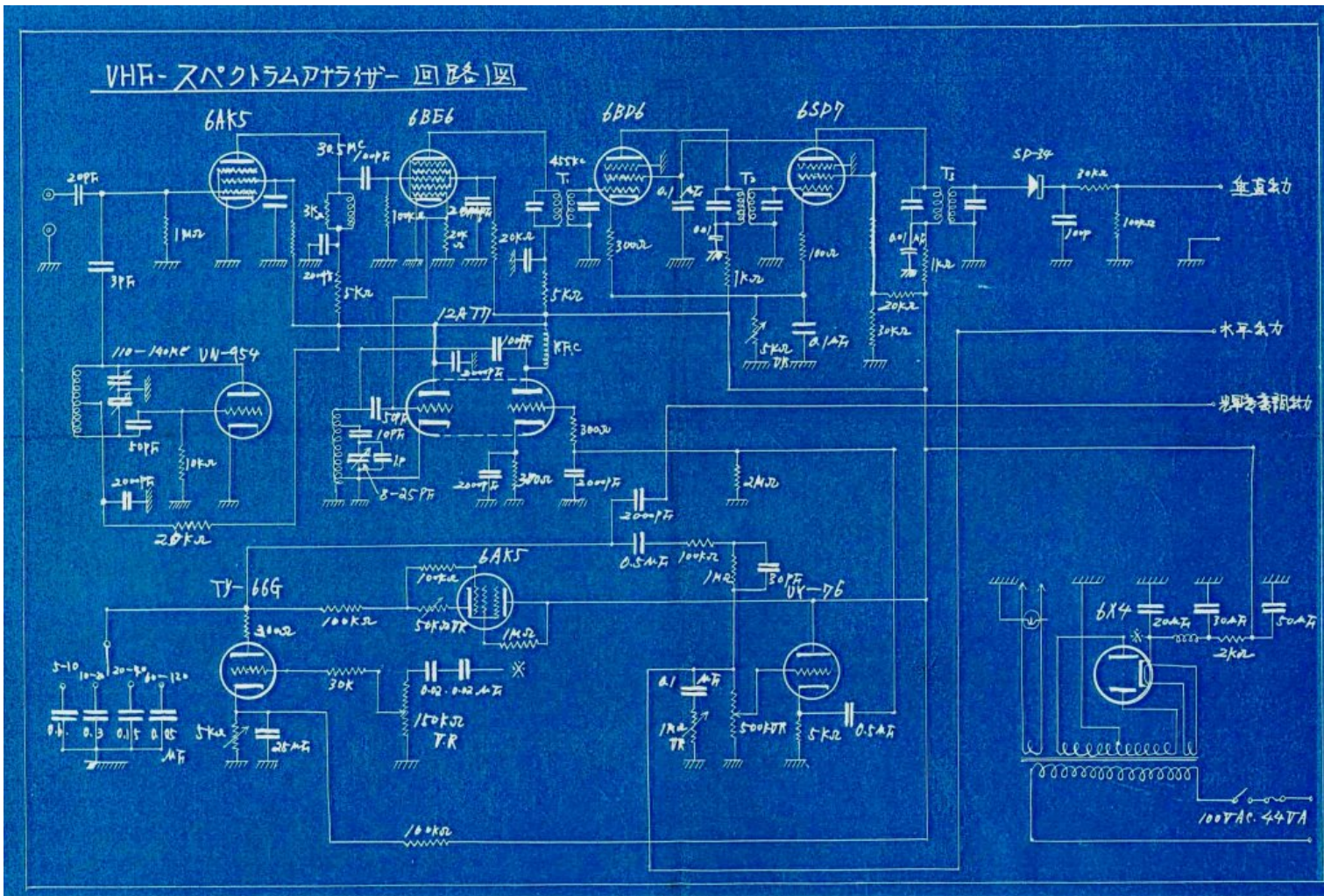
窓関数を採用したり、ディジタルフィルターやソフトウェアにより最適パラメーターを選定したり、各部分の安定度が向上し、非常に狭分解能の実現、対数目盛を採用するなど隔世の感がある。

4. 付 録 回路図見付かる!!

2016 年暮れ小外の物置の学時代以来の合唱楽譜を整理廃棄している最中に、奇しくも卒業研究の実験ノートが見付かった。当時献身打ち込んだ実験ノートを捨てがたく保存していたのだった。その中に当時描いたリコピーなどない時代「青写真」の回路図が挟んであった。正直大変な感激を覚えました。保存状態が大変良くここに掲載します。

(2014/12/11 記、2016/07/03 最近購入のエアコン管追記、2017/02/07 回路図発見追加掲載)

4.1 VHF スペクトラムアナライザ回路図



4.2 VHF-AFM 試験発振器 回路図

