

4E27のアンプの変更(スーパー・カソード・ドリブン アンプ)

2013.10.5 JA1VCW

1. アンプの変更

以前4E27という五極管を使用して、ちいさいリニアアンプ(120WPEP)を作ってみました。(レポート有)不都合というほどではないのですが、運用していてもちょっと・・と思えるところがありまして変更してみました。

結果は思惑通りには行きませんでした。うまくゆかないこともあります(とつても多い)。ちょっと残念。

2. 変更理由

2つの理由があります。

一つ目はアンプのゲインが(このシステムにとって)大きすぎる点です。

現在のエキサイタは、SSBでは50WPEP(6146parallel)、AMでは10W Carrier(807single)です。アンプの最大出力は120WPEP位でゲインが6倍位ですのでそのままではオーバードライブになります。従ってアンプのゲインが3倍くらいであればちょうどいい具合になります。

あくまでも現時点の私のシステムについての話です。出力100W強でゲイン6倍のアンプを50Wでドライブするのでゲインを落としたいなどというのはシステム自体の設計が良くないのですが、もともとアンプの製作動機が不純なためこの点は問題にはしません。どうすればゲインが落とせるでしょうか。

二つ目は現回路での動作時の第一グリッド(G1)の電流が大きい事です。この真空管のG1の規格はバイアス+50Vで50mA流れるというグラフがあるだけで、どう考えていいのかわかりません。

現時点でのG1の電流は、キャリアで120W出力すると約50mA程度です。

50mAは大きい様な感じがします。(根拠は薄弱ですが・・・) 少なくできるのであれば少なくしたい。

第二グリッド(G2)については損失が30W!で、6146や807のプレート損失よりも大きいので問題ないと考えます。

最終的にどうなればよいかというと、次のようです。

- 1)アンプのゲインを3倍位にする。
- 2)IMDは現状維持または良くなる。

3. ゲインの落とし方

1)アッテネータ

アンプ入力にアッテネータを入れて電力を1/2にしてやれば、トータルで3倍のアンプになります。でも単に抵抗で熱にするのはちょっと芸が無くて採用する気にはなりません。

2)NFB

NFBをかければゲインは減ります。また、歪みも減少します。しかし、G1の電流については同じようだと思います。

3)スーパー・カソード・ドリブン(S.C.Dと略)

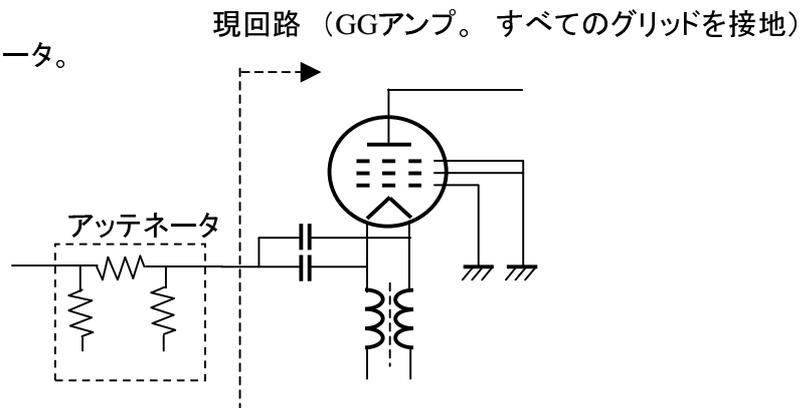
入力の電力をG1だけでなくG2にも分割して加える方法です。この方法ですとG1の電流が減少します。資料によると歪みの減少も期待できるようですが、その理屈は私にはわかりません。

実際の回路

回路のイメージです。

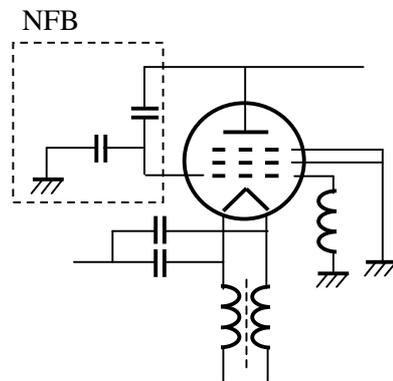
1) アッテネータ

入力に抵抗のアッテネータ。



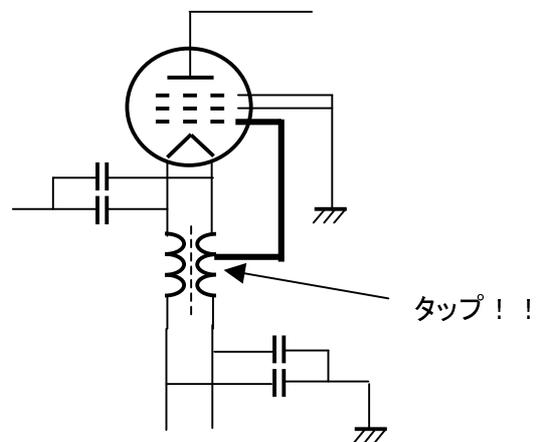
2) NFB

プレートからG1に、信号を分割して帰還する。NFBをかけたぶん歪みが減少する。



3) スーパー・カソード・ドリブン

フィラメントチョークに適切なタップを設けG1に接続します。

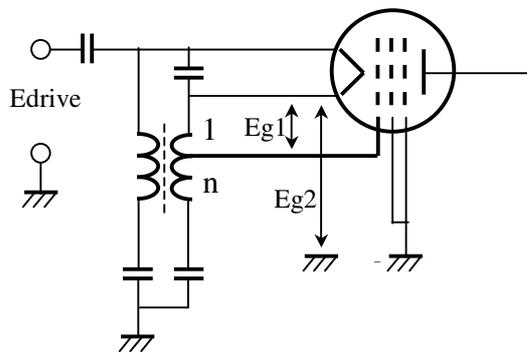


4. スーパー・カソード・ドリブン

かの有名なW6SAIが提唱？する方法であるから、悪かろうはずが無かろうとちょっと狂信的な態度で実験してみました。

次のような効果があるそうです。

- ・ゲインが低下する。従ってドライブ電力がより多く必要。
- ・ドライブ電力の一部は出力に加算される。
- ・G1電流が減少してG2電流が増す。
- ・IMDが改善される。



この回路で、真空管の電極にかかる電圧はカソードが基準ですので

- ・Eg1はG1に印加される電圧。
- ・Eg2はG2に印加される電圧。
- ・フィラメントチョークをオートトランスと見立てて巻数比を n とすれば、

1) $Eg2 = Edrive$

$Eg1 = Edrive/(n+1)$

これらの電圧が各グリッドに印加されます。

2) タップをフィラメント側に接続したときは

$Eg2 = Edrive$

$Eg1 = 0$

となつて、G1がプレート電流を制御しない為ゲインは最低になります。

3) タップをフィラメントと反対側に接続したときは

$Eg2 = Edrive$

$Eg1 = Edrive$

となつて現状と同じです。最大ゲインです。

こんなデータがあります(資料2)。4-400Aを使用した例です。

タップはフィラメント側から 1/5 の所です。(上記で表せば $Eg1:Eg2 = 1:5$)

Item	Unit	4-400A	
		Nomal	S.C.D
DC plate Voltage	V	3000	3000
Zero-Signal DC Plate Current	mA	70	30
Single-Tone DC Plate Current	mA	330	330
Single-Tone DC G2 Current	mA	55	60
Single-Tone DC G1 Current	mA	100	30
Single-Tone Driving Power	W	40	115
Driving Impedance	Ω	140	250
Load Impedance	Ω	5000	5000
Plate Input Power	W	990	990
Plate Output Power	W	600	625
2-tone 3次歪み	dB	—	—
2-tone 5次歪み	dB	—	—

ベース電流とG1の電流が、およそ 1/2, 1/3 に減少しています。

ドライブパワーが約3倍必要で、出力が4%程度増加している事がわかります。

歪みに関してはこの資料では記述がありません。

5. 実験

5.1 方法

タップの位置(n)をどのように決めるかということが問題です。

どうしてよいか分かりませんので、カットアンドトライ(行きあたりばったり!)です。

構造上タップは出しづらいので、第3の巻線を設けます。

フィラメントチョークはバイファイラ巻きで30回*2ですので、これを分割します。

右図のように接続してもOKです。巻数は左図とは変わります。

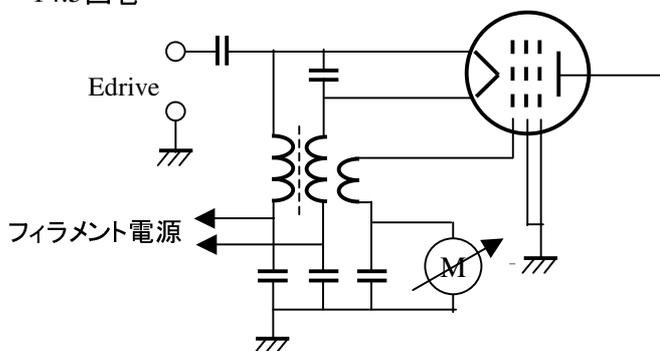
(すなわち1:nの“1”側の巻線とするか、“n”側の巻線にするかです)

右図はグリッド電流が測定しづらい点があります。(回路を工夫すればできるが、ちょっと厄介)
巻数を次のように決めました。ちょうどフィラメント電源から見て、チョーク全体の1/4, 1/2, 3/4の所からタップを出したのと同じようです。以後コイルの接続の呼称をタップというようにします。

G1巻線の回数と接続

- ・巻線無し (G1は直接GND)
- ・8.5回巻(1)
- ・14.5回巻

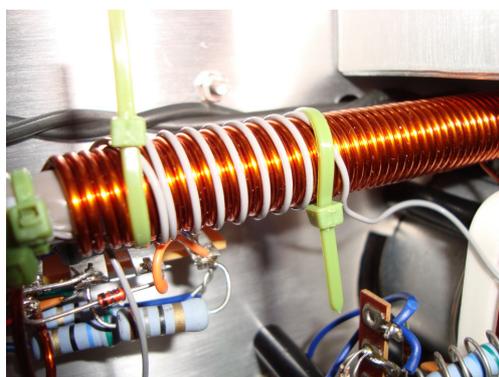
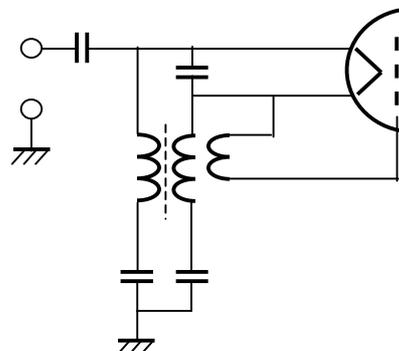
接続 A



G1巻線の回数と接続

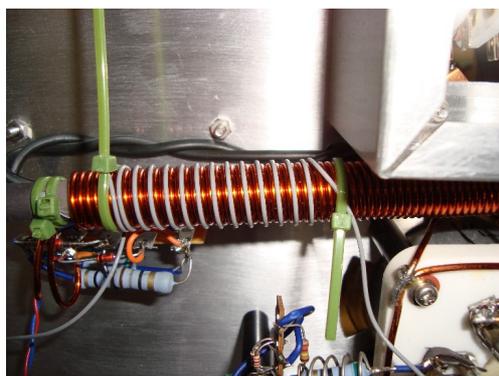
- ・8.5回巻(2)

接続 B



G1巻線の様子

- 8.5回巻(1) => 接続A 1/4タップと呼びます。
測定データは 5.5 3)
- 8.5回巻(2) => 接続B 3/4タップと呼びます。
測定データは 5.5 5)



G1巻線の様子

- 14.5回巻 => 接続A 2/4タップと呼びます。
測定データは 5.5 4)

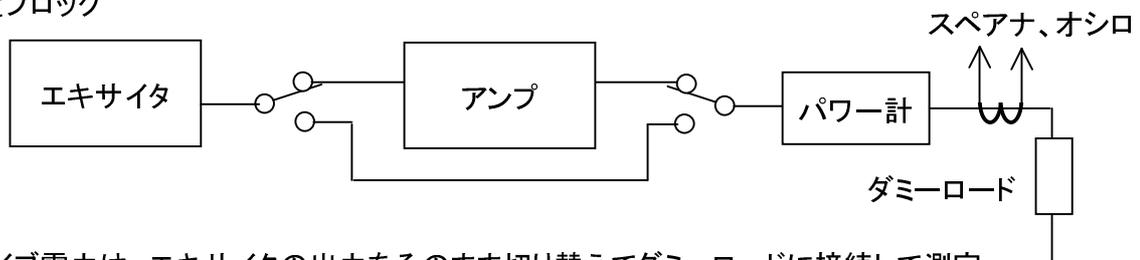
5.2 結果

下表のようになりました。

ベース電流はすべて 8mAです。

項目	Unit	グリッド巻線			
		無し	1/4タップ	1/2タップ	3/4タップ
1-tone ドライブ	W	19	18	20	33
G1電流	mA	50	33	19	0
1-tone 出力	W	120	120	120	110
1-tone プレート電圧	V	1600	1600	1620	1600
1-tone プレート電流	mA	145	142	140	130
1-tone 入力電力	W	232	227.2	226.8	208
2-tone ドライブ	W	6.3	6.5	6	7
2-tone 出力	W	50	50	40	40
2-tone ドライブ(peak)	W	16	16	15	16
2-tone 出力(peak)	W	120	120	120	110
IMD-3rd	dB	-33	-29	-25	-20
IMD-5th	dB	-40	-33	-35	-34
データ写真 5.5 項		2)	3)	4)	5)

測定ブロック



ドライブ電力は、エキサイタの出力をそのまま切り替えてダミーロードに接続して測定。

2-toneのpeak値はオシロスコープでモニタしたp-pと同じ振幅のキャリアを発生させてその電力を読む。

5.3 結果の考察

S.C.Dによって次のように考察されます。

- 1) パワーゲインは少なくなります。ただし1/4, 1/2 タップでは有意な差は認められず、3/4タップで約6倍=>3倍強になり、のゲインの減少が見られました。
- 2) ドライブ電力のフィードスルーによるプレート効率の上昇については良くわかりません。
- 3) 3/4タップの2-toneのゲインはちょっと変。何か間違えたかな。
- 4) G1の電流はタップとともに減少しますが、タップの位置との関係は何だかよくわかりません。
- 5) IMDについては、タップを上げる(フィラメント電源側からフィラメントに近づける)と悪化しています。資料1によると S.C.Dはカソード接地のAB1クラスの同じ送信管を使ったアンプと比較して 3rd -27dB => -46dB 5th -36dB => -49dB 劇的に改善されたと書いてあります。この点は全く資料と反対の結果です。なぜでしょう。
- 6) タップの位置によって、アンプ自体の入力インピーダンスは変化すると考えますが、今回エキサイタから1:4のインピーダンス変換トランスを通してドライブしています。これがIMDに影響するのでしょうか。ちなみにGGとS.C.Dの1/4タップでは、入力側のSWRの変化は 1.7 => 1.8 程度の変化しかありませんでした。

5.4 今回の結論

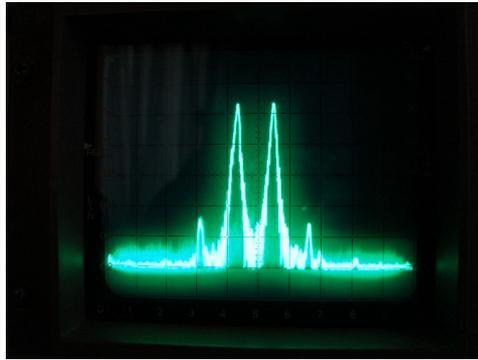
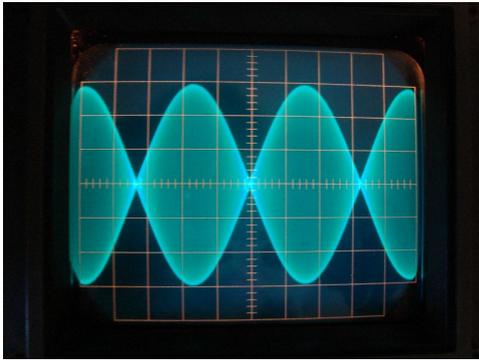
アンプゲインの減少はIMDの悪化を伴いました。

グリッド電流の減少は実現できました。少し減少させたいと思い1/4タップに固定してあります。

5.5 結果の写真

1) エキサイタ出力(リニアアンプ入力)

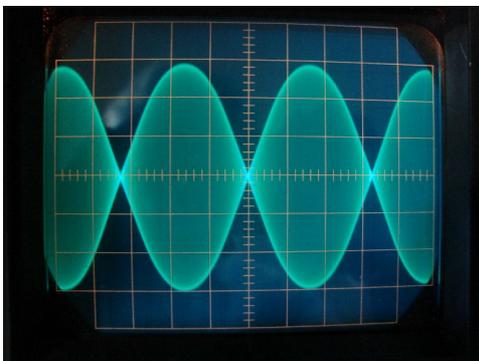
条件によって振幅は変わりますが、IMDはほとんど同じです。



3rd IMD : -36dB
5th IMD : -

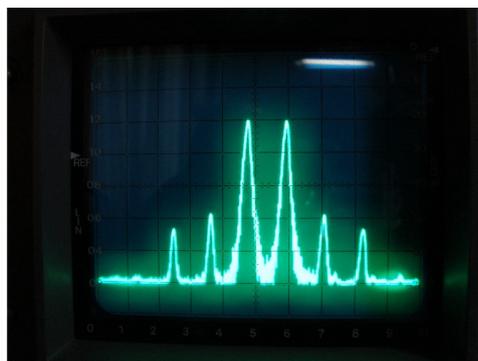
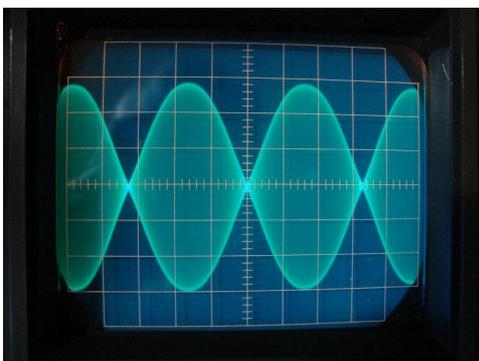
以下は出力で、振幅は1-toneで120Wを出力した時と同じにしてあります。(6div = 120W)

2) リニアアンプ出力 (オリジナル、G1巻線無し)



3rd IMD : -33dB
5th IMD : -40dB

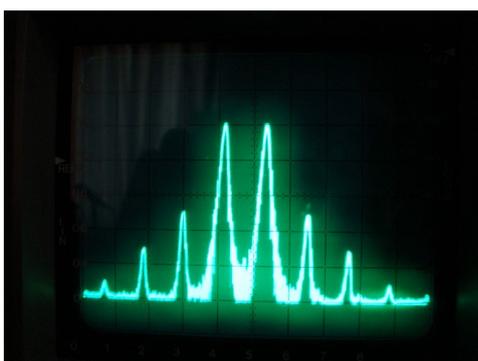
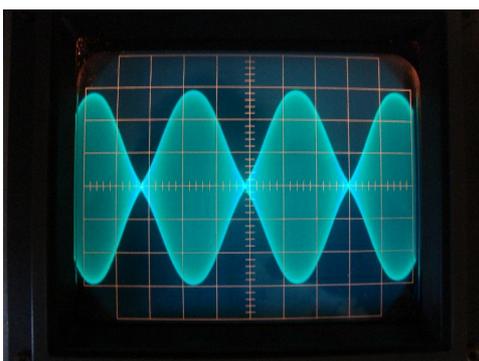
3) リニアアンプ出力 (オリジナル、G1巻線8.5回 => 1/4タップ)



3rd IMD : -29dB
5th IMD : -33dB

現在はこの状態

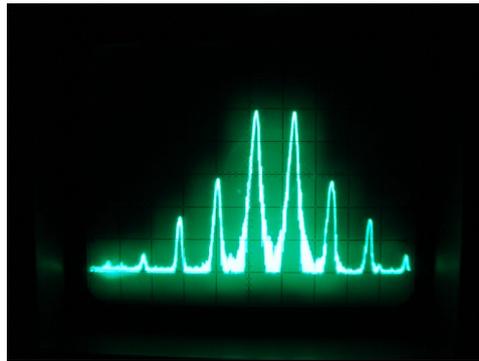
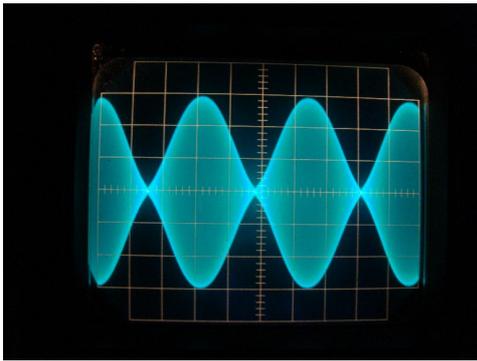
4) リニアアンプ出力 (オリジナル、G1巻線14.5回 => 1/2タップ)



3rd IMD : -25dB
5th IMD : -35dB

クロスオーバー歪みが発生

5) リニアアンプ出力 (オリジナル、G1巻線8.5回 => 3/4タップ)



3rd IMD : -20dB
5th IMD : -34dB

クロスオーバー歪みが顕著

ある時点のデータはこのように取れていますが、歪みに影響を与えるパラメータが多くて2dB～3dB位は簡単に変化します。

例えば、リニア、エキサイタなどの同調バリコンに位置によって変わりますし、ドライブ電力や出力電力によっても変化します。

歪みが打ち消しあうのか、バリコンの位置で3次歪みが-50dB位になることもあります。

現実的にはいちいち歪みの良い点を見ながら同調バリコンを調整するわけにもゆかないので、この程度の結果とします。キャリアで120W出力付近で最大出力に調整した場合が最良でした。

2-toneで最大に調整した時は若干にIMDの低下がありました。ALCが無いために波形の頭がつぶれ電力指示が大きくなったためと推定されます。ALCをかければ改善されると考えます。

真空管のアンプの良いところは、高次歪みが少ないところです。

6. その他の変更、実験など

1) やっと端材で作った木枠ができましたのでセットしました。

少しまとまったので整理し易そうです。

端材なので角材にしても寸法が違っていたりしてつじつま合わせが多く、見た目よりも時間がかかっています。



2) 電源のフィルタコンデンサの容量によると思いますがACの突入電流が大きく、ACプラグの端が溶けたりしました。(電源SWを配線する前にプラグでon/offしていました) それを防止すべくACラインにサーミスタを入れてみました。どんな規格のものを使用すればいいのか皆目見当がつかないのでさしあたって初期抵抗 8Ω のものを使ってみました。(石塚電子 8D-11)

8Ω なので初期電流は $100V$ では $12.5A$ 以上は流れない計算となります。

ACに直列に可動鉄片型の電流計を入れて、長い時間間隔(10分以上)で電源を投入しますと、その瞬間サーミスタが無い時は $30A.F.S.$ のメータが振り切れませんが、サーミスタを入れると $15A$ 程度まで抑えられます。メータでの測定は目安ですが効果はあります。

電圧変動はあります。SSB等でほとんど電力を使っていない時から、フルパワーを出力しますと瞬間に $3V$ 程度AC電圧が下がりました。数秒で戻ります。ピークでどの位の電圧降下があるかわかりません。初期抵抗 5Ω のものでも良かったと思われます。

やはり本当はリレーなどでショートするのが良いようです。

性質上部品が熱くなります。電流を流している時は触ってられない位に熱くなります。

発熱している為に抵抗が小さくなっている訳で、これをファンの風が当たるようなところに配置すると特性が変化してしまいます。

3) ベース電流がちょっと少ないので、サプレッサグリッド(G3)に電圧をかけてみました。

電池で $+25V$ かけました。結果はベース電流 $8mA \Rightarrow 10mA$ に増加。パワーが 1% 程度増加。

IMDは $1dB$ 位悪化。もっともこれは動作点が変わったからかもしれません。

それ以上追及せずに結局元に戻しました。

7. 感想、その他

- 1) 以前 HamRadio の記事を見て面白そうだなと思って、機会があったら実験したいなと思っていました。日本では知る限りデータが無く、海外の検索でもS.C.Dの単語や動作要項はあるのですが、実際に実験しての評価がほとんどみつかりませんでした。
しかし、今回の実験ではあまり良い結果は得られませんでした。私の方法がどこか悪いところがあったのでしょうか。
- 2) IMD の測定は結構面倒でした。ちゃんとした測定器があればよいのですが、こちらは古いジャン測基本的にはスペアナ、オシロ、パワー計および2-tone 発生器です。校正等は全くしていません。いちいち1-tone (キャリア)で所定のパワーを出力し、オシロで振幅を測定し、2-toneに切り替えて1-toneと同じ振幅になるように2-tone のゲインを調整します。
その後スペアナで歪みを測定しますが、古いアナログスペアナなので、見ているそばから周波数がドリフトして画面の端に波形が移動してゆきます。
写真撮影はスペアナのストレージ機能を使用して波形を固定しますが、輝度と残像の調整がむづかしく、ちょっと油断をするとハレーションを起こします。
測定中に設定を間違えたり、同じデータを2度取ってしまったたり、回路を変えてまた戻して測定するとなぜかデータが違ったりします。私の未熟のなせる所です。前出の10枚の写真を撮るのに半日かかっています。
- 3) 真空管のアンプでは一般的に出力同調回路があって、その調整でIMD が変わったりします。
ただ、実際の音声の運用ではおそらくIMD の数dBの変化はわからないのではないかと思います。
- 4) 出力の同調を正しい状態にするには、位相と振幅を検出してその関係で同調位置を決める方法が良いのではないかと考えます。すなわちオートチューン等で行っている方法です。
真空管のアンプで、オートチューン+NFBという方式が 今の所一番良い方法と思われるます。
- 5) 半導体で広帯域のアンプ等を使用し、無調整化すれば比較的安定なIMDの状態を維持できると
思われます。
- 6) ちょっと話がずれますが、最近半導体アンプでプリディストーションという方法ですごく良好なIMD を
実現している技術もあります(資料4)。まだプロの領域でのようでアマでは、特に自作ではもう少し
先のような感じがしますが、(アマチュアに需要があれば)そのうちどこかのメーカーで採用するの
では・・
- 7) JR1KQU局がS.C.Dを使用されています。AMなのでIMD はあまり重要ではないようですが、
ベース電流が少ないのとドライブ電力が余っているためと聞いたような気がします。(資料3)
- 8) IMDにかかると苦労します。何かの条件で数dB位は簡単に悪化しますが、数dB良くするのは
大変です。
- 9) 今回は実験しませんでした。時間があればNFB もかけてみたいと思います。
- 10) IMDに関して、球のG2の特性も関係しているのかもしれませんが。
- 11) G1を直接フィラメントに接続した測定も行ったのですが、ゲインが“1”でいくらなんでも使えないと
思って即やめてしまいました。同じようにデータを取っておけばよかった。

以上

資料

- 1) “Semi- and Super-Cathode-Driven Amplifiers” QST July 1967
- 2) “Ham Radio Techniques” Ham Radio November 1986
- 3) Homepage <http://jp7cze.cocolog-nifty.com/jr1kqu/reijin.html>
- 4) Homepage http://www.jrc.co.jp/jp/company/html/review62/pdf/JRCreview62_10.pdf