

アナログSWによるBM(Balanced Modulator)について

2006/05/05
JA1VCW

1. はじめに

PSNジェネレータを作ったのですが、どうもキャリアサプレッションが思うようにとれません。
何とか良くしようとした結果です。 何かの参考になればと思っています。

2. SWによるBMの動作

2-1 Single Balanced Mixer (SBM)

図のように信号をキャリアの周波数で切り刻んだだけのものです。 これでもキャリアは抑圧されます。
この場合はキャリアのデューティサイクルも特に1:1である必要もありません。 単に高次のスペクトラムの
出方と基本波の出力レベルが変わるだけです。

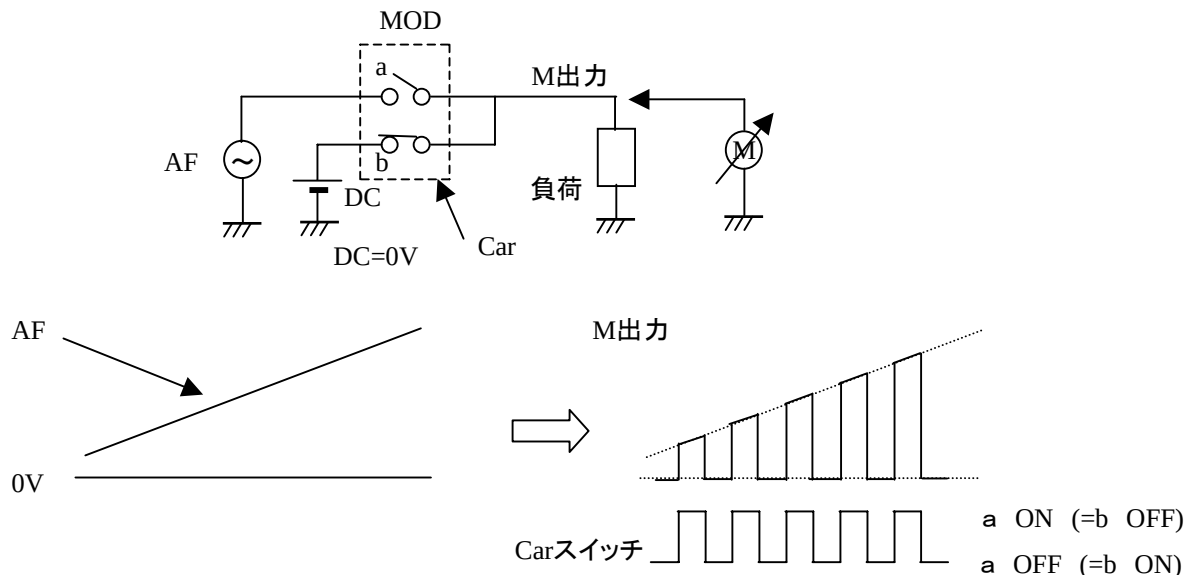
図の記号の意味は次のとおりです。

AF: 被変調信号 サイン波

Car: 変調信号 スwitching周波数のみ

M: 測定系

Mod: 変調器です。 Carの周波数によってON/OFFし、且つ2つのスイッチは排他的に動作します。



CarによってSWをON/OFFします。

aがONのときはAFの電圧が出力されます。

aがOFFのときはDCの電圧が出力されます。(通常DCは0Vに近い)

このときの出力の波形は上図ようになります。

Excelを使用して、シミュレーションを行いました。

条件は、

- 1) キャリア周波数にたいして1周期4ポイントのサンプリングを行う。
- 2) AFは2Vp-pとして、1024ポイントに対して8周期当てはまるようにする。
- 3) 周波数の比は 次のようになります。

$$\text{サンプリング周波数} = \text{キャリア周波数} \times 4$$

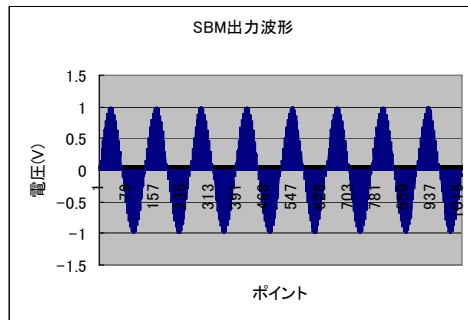
$$\text{AF周波数} = \text{キャリア周波数} \times 8 / 1024 = \text{キャリア周波数} \times 0.0078125$$

従って、キャリア周波数=500kHzのときは サンプリング周波数は4倍の2MHz AFは3.90625kHzです。
半端な周波数になっていますが、これはFFTを行ったときに便利のように決めたためです。

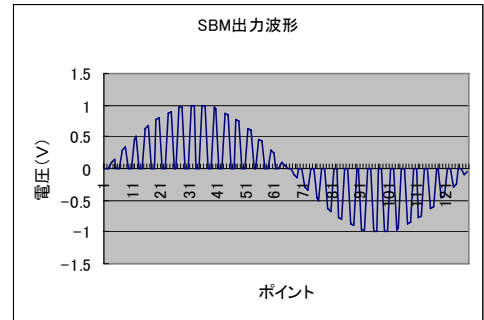
Excelのデータ分析ツールのフーリエ解析を使用しますが、このツールでデータ数(=サンプリング数)は
2のn乗と指定されていることによります。

出力波形

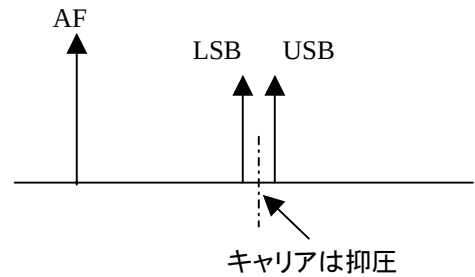
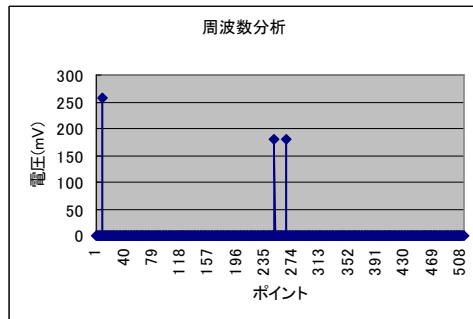
Excelによるシミュレーション結果です。



拡大
→



周波数分布



シングルバランスなので、AF信号は抑圧されずに出力に現れます。

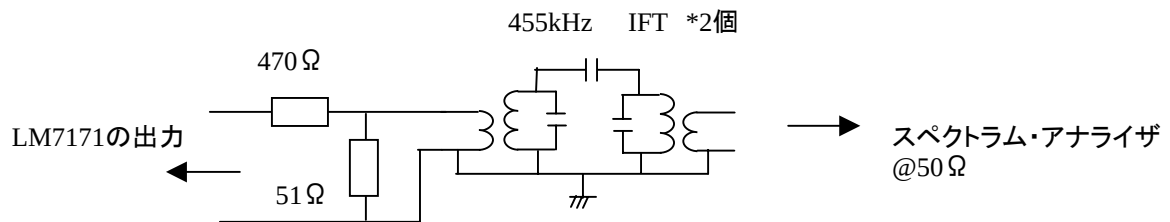
AFとM出力は周波数が十分離れているので、簡単に分離できますからSBMでも十分使用可能です。

出力の取り出し方ですが、バンドパスフィルタを入れています。

このフィルタがどういうわけか、出力アンプと相性が悪くてフィルタの同調点によって、ひずみが増したり、サイドバンドのリークがはっせいしました。今回は適当な取り出し方を行なっています。

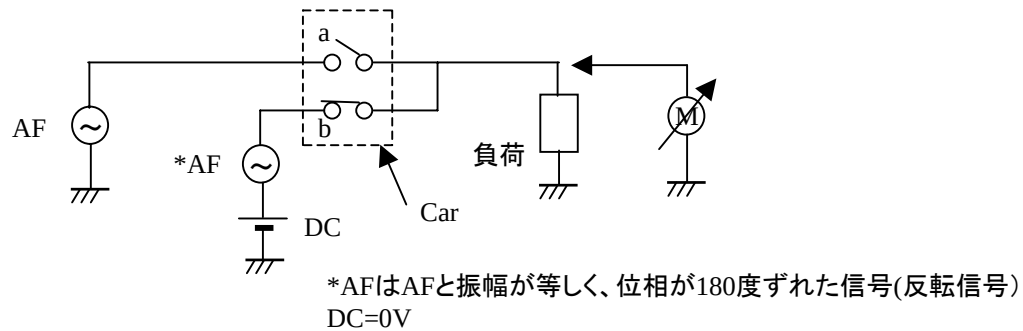
かなりもったいない接続方法ですが、あとでまた別の方法を考えます。

フィルタは BPF, LPF等いろいろと考えられます。

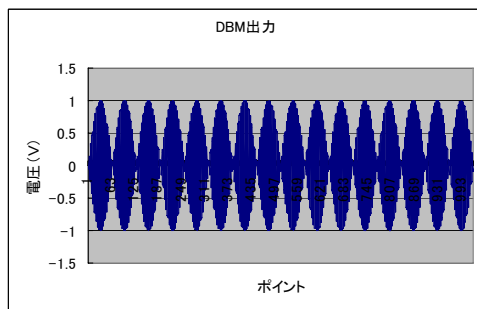


2-2 Double Balanced Mixer (DBM)

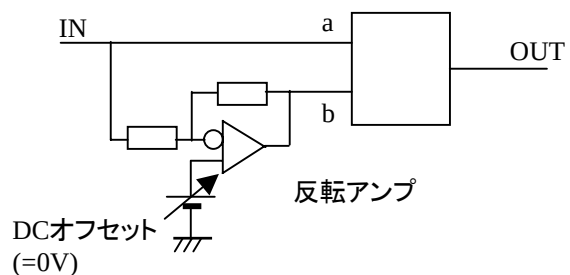
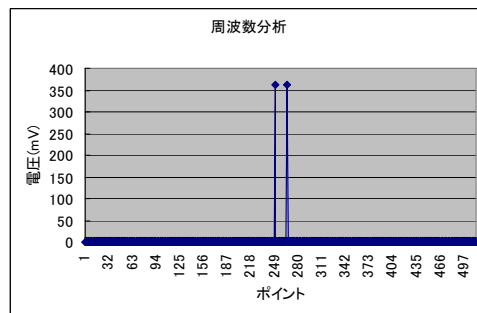
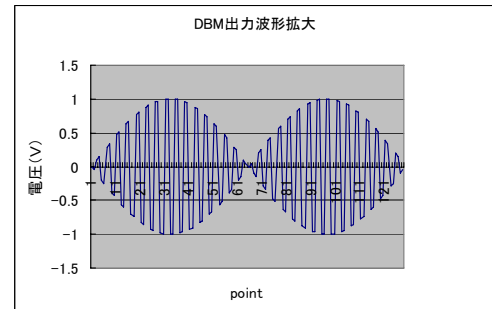
DBMは入力を差動にすれば容易に実現できます。



SBMでは信号と0Vの間をスイッチしましたが、DBMでは信号と反転信号の間をスイッチします。そうしますと、AF成分はキャンセルされてなくなります。また、出力レベルも2倍になります。この様子をシミュレーションすると次のようになります。



拡大
⇒



DBMなので、AFもキャリアも抑圧されています。こちらのほうがよいと思われます。

出力もSBMの2倍あります。

実現は簡単で、AFの反転増幅器があれば実現します。この反転アンプのゲインは正確に“1”で無くとも不都合は生じません。ただし“1”でない場合はその分振幅が変化します。

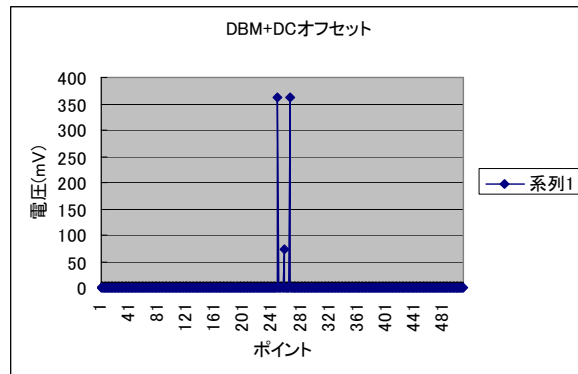
DCオフセットはキャリアもれになりますので調整が必要です。

2-3 キャリアリークについて

BMでは、a、bをスイッチしていますが、a、b間に直流の電位差があれば、キャリアの周波数でスイッチするのですからキャリアリークとなるのは自明です。

従ってa、b間の電位差を0VのするようにDCオフセットを調整します。

仮にAF信号が2V_{p-p}で、a、b間の電位差が100mVあった場合のExcelの計算結果はつぎのようになりました。



キャリアサブプレッションの定義は知らないのですが、スペクトラムでの信号とキャリアとのレベル比とすると、DSBの片側の電圧値は362mV、キャリアは72mVですから比をdBで表わすと14dBとなります。

50dBのキャリアサブプレッションを得ようとする、DC電圧の差は1.13mVとなります。

この電圧を調整しなくてはなりません。

実際にはSWのドライブの回路にも依存し、ドライブのインピーダンスがa、bでおなじならば前記の計算とおりになると思われますが、そうでないときにはもっと大きな調整範囲が必要になることがあります。

SBMでは出力レベルがDBMと比較して6dBの差があり、DBMが有利です。

フィルタタイプのSSB発生器ではフィルタ自体が10～20dB程度のキャリアの抑圧があるのでBMで40dBも抑圧されれば最終的に50～60dBとなり、そのあたりの6dBはあまり気になりませんが、PSNタイプやウェーバータイプではBMの抑圧特性がそのまま現れるのでキャリアの抑圧が40dB程度になり、そのときの6dBは受信してキャリアリークの違いがわかるような差となると思われます。

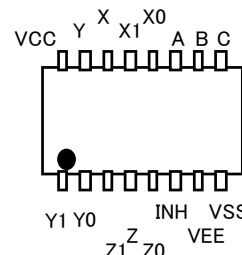
3-1 SBM

PSN用としてIとOの入力を受けます。

SBMの場合はAF信号とキャリアバランスのDCオフセットを、SWとうまく結合するのが難しいようです。



SN74HC4053



X0,X1, A, ,INH =>GND

$V_{EE} \Rightarrow -5V$

VCC=>+5V

※1k 要調整。

$$3.5782\text{MHz} / 4 = 447\text{kHz}$$

しかし、PSNタイプではサイドバンドサプレッションが悪化する場合があるので注意が必要です。

PSN用ですので2組の回路があります。それなりにトータルの特性は悪くなっているようです。

測定器は アンリツの MS-68B というアナログスぺアナです。

SBMの実際の出力です。周波数は447kHz付近です。

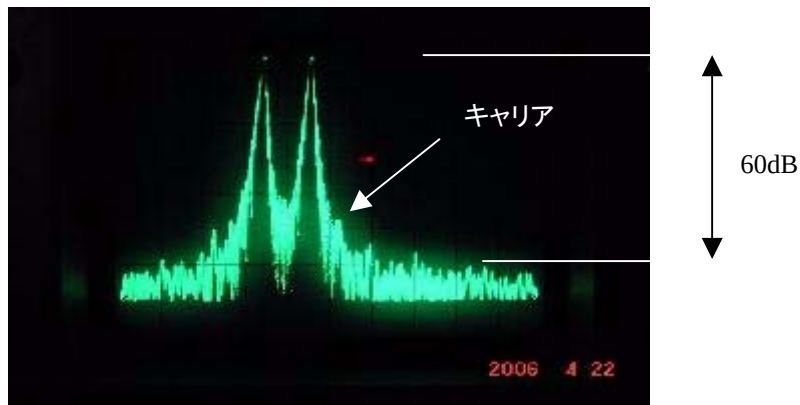
キャリアサプレッション -50dB以下
サイドバンドサプレッション -55dB以下
3次ひずみ -55dB以下

この程度ですと、室温程度でしたらパワーオンから比較的安定に動作するようです。
AFは図示した回路の入力電圧です。AF240mVp-pを超えると、3次ひずみ特性が悪化します。
写真は、BM単体ではなくてPSNと組み合わせたときのトータルの特性です。LSBを取り出しています。
以下スペアナの写真は、レベルは適当ですので相対値比較となります。

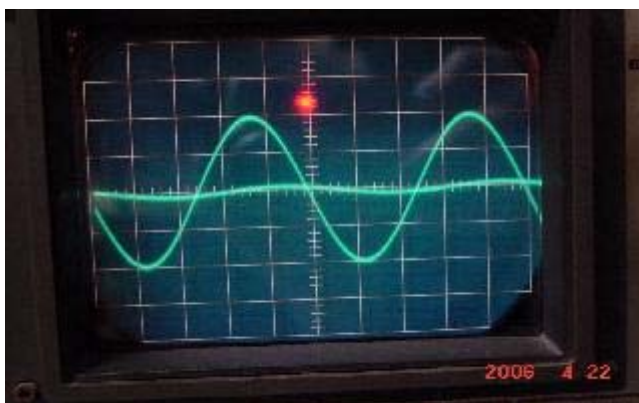
SBM 2kHz シングルトーン AF240mVp-p/1980Hz 1kHz/div 100Hz/RBW



SBM 700Hz, 2kHz ツートーン AF120mVp-p/tone(776Hz, 1980Hz) 1kHz/div 100Hz/RBW



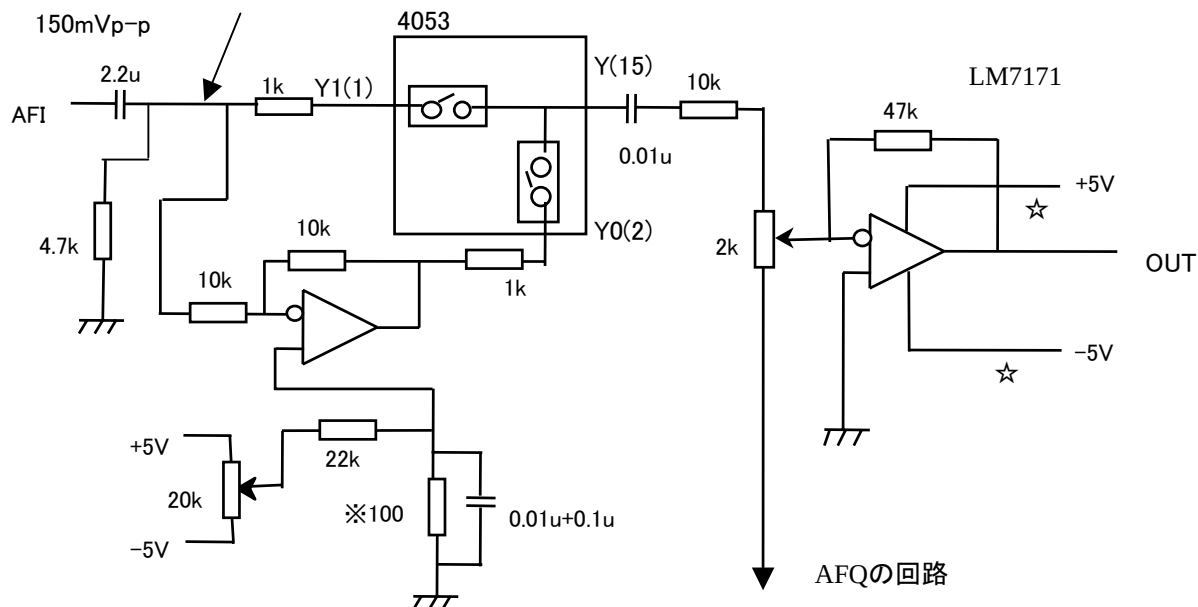
SBM出力波形(回路図の4053の4pin) 1980Hz AF入力240mVp-p 50mV/div, 100us/div



3-2 Double Balanced Mixer (DBM)

この場合はAF反転した信号を図のようにSWに印加します。

できればここに非反転アンプを入れ、4.7kを47kくらいにしたい。



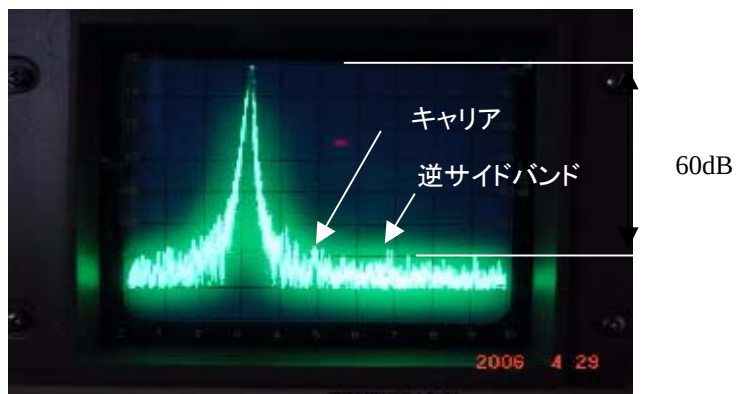
SW (1),(2)の端子から見てバランスの取れた回路となります。どちらの端子もAMPの出力に接続されます。DCをどこかでカットしておかないと特性が悪くなりそうなので、図のところに2.2uFのセラコンを入れてあります。また、4.7Kの抵抗が入っていますが、これがないとキャリアサプレッションのヌルが取れなくなります。本来でしたら2.2uFの後に1段高インピーダンスのバッファで受けてからBMに接続したほうが良いと思われます。今回はこれで、VRの調整が若干クリチカルになる以外、特に問題になることはありませんでした。

2.2uFと4.7kで位相シフトが発生します。4.7kを1kに変えると低い周波数ではっきり逆サイドの漏れが発生します。フィルタタイプでは気にしなくてもよいでしょう。今回は4.7kで良しとしました。可能であれば10uFにしたいのですが、リークの少ないコンデンサが必要ですので電解コンデンサは不可です。無極性のタンタルコンデンサか又はセラコンが良さそうです。

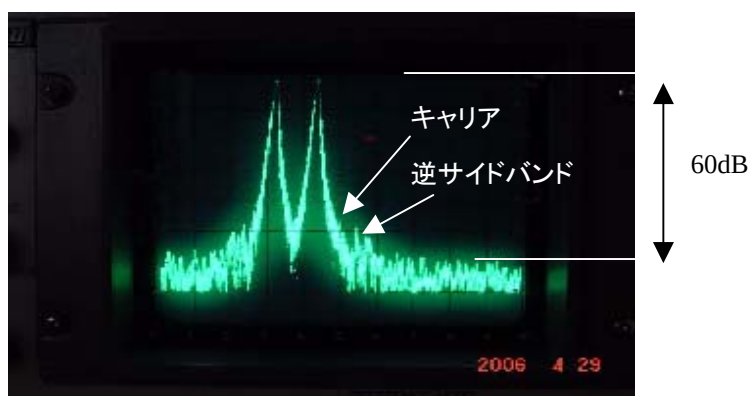
出力の3次歪みを同じくらいにした場合、DBMのAF入力電圧が低くなりました。

DBMの実際の出力です。周波数は447kHz付近です。
写真は、BM単体ではなくてPSNと組み合わせたときの特性です。

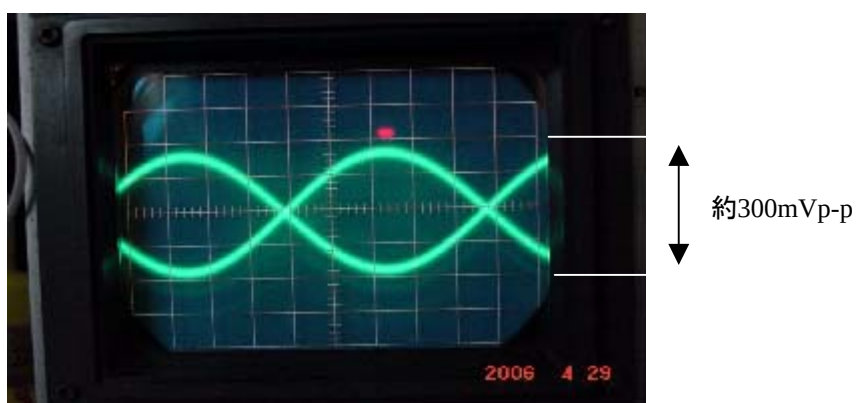
DBM 2kHz シングルトーン AF150mVp-p(1980Hz) 1kHz/div 100Hz/RBW



DBM 700Hz, 2kHz ツートーン AF75mVp-p/tone(776Hz, 1980Hz) 1kHz/div 100Hz/RBW



DBM出力波形(回路図の4053の4pin)
1980Hz AF入力150mVp-p

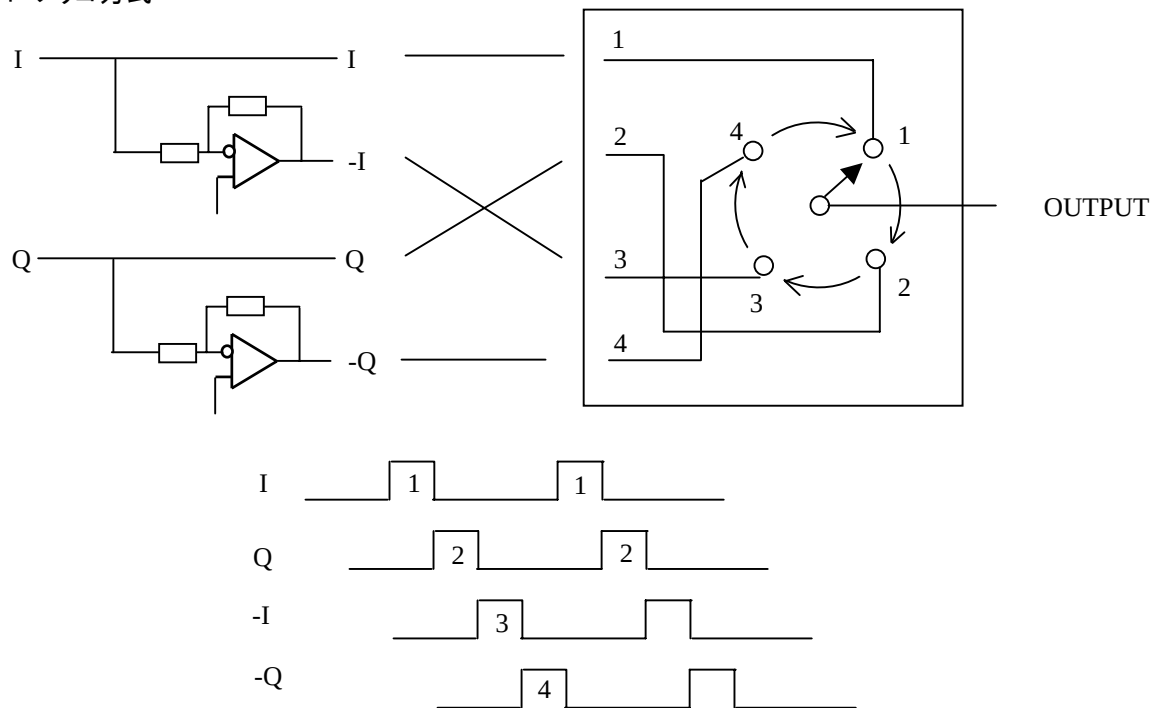


4. バリエーション

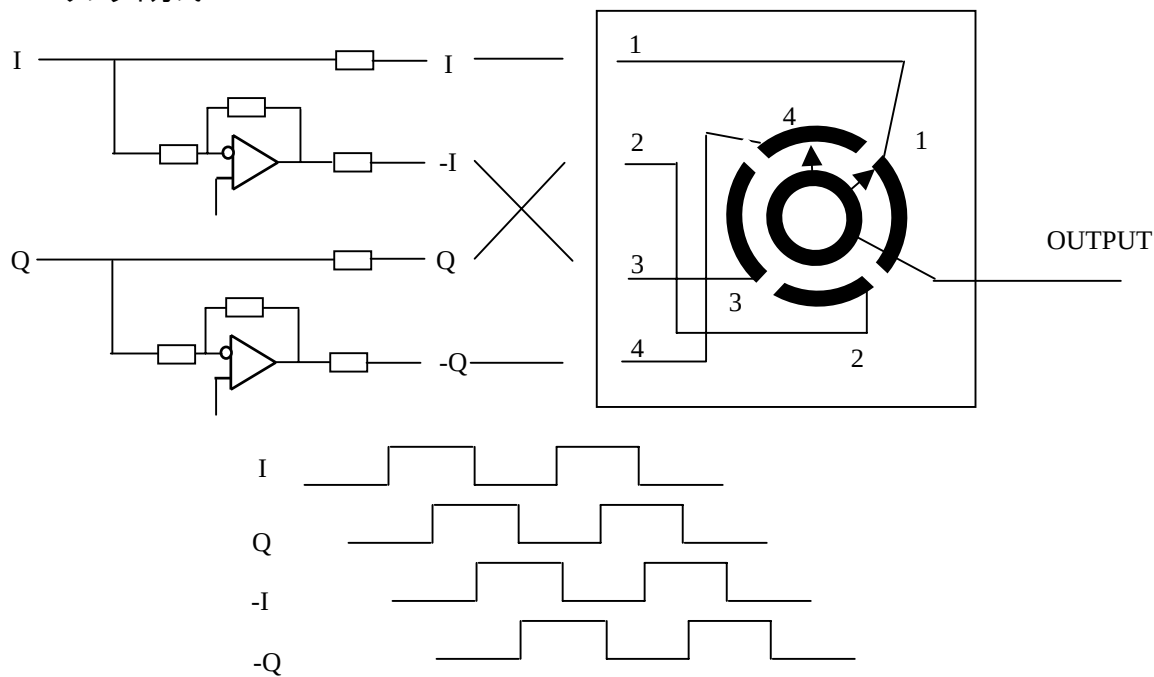
良く使用される回路等に次のようなものがあります。

1)ではメリゴとよばれる方式で、2)ではバタフライ方式です。(両方とも通称です)
SWをON/OFFするタイミングが変わっているだけです。

4-1 メリゴ方式



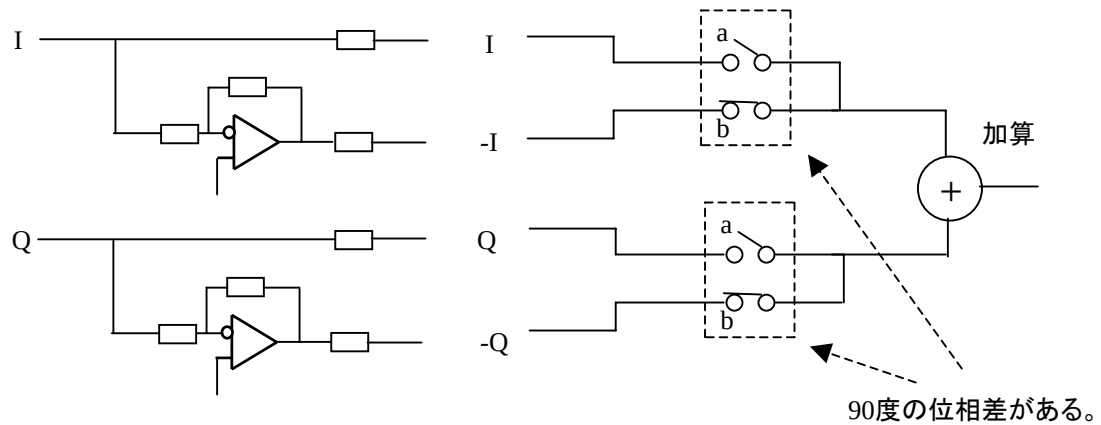
4-2 バタフライ方式



- 1) $I, Q, -I, -Q$ の順に90度ずれて接続する。
- 2) $I, -I$ 及び、 $Q, -Q$ はそれぞれ排他的である。
- 3) それら全ての和を出力とする。

バタフライ方式は、今回のDBMと同じカテゴリに入ると考えます。
発想の始点が違っているだけのようです。

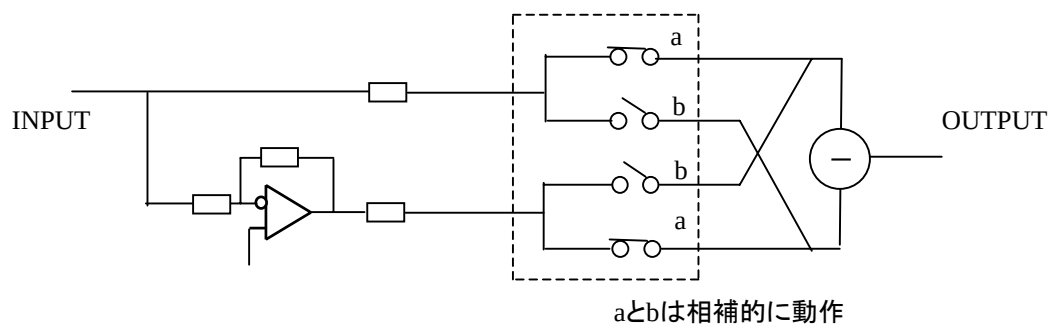
今回のDBMをPSN用に2ブロック組み合わせ。



- 1) I,-Iを排他的に切り替える。 Q,-Qを排他的に切り替える。
- 2) IとQの切換の位相は90度ずれている。
- 3) それらの和を出力とする。

4-3 SWをバランス型にした場合

フィルタタイプなどに使用される、高性能なタイプです。
私は浅学にして、今回のDBMとどのように違うのかわかりません。

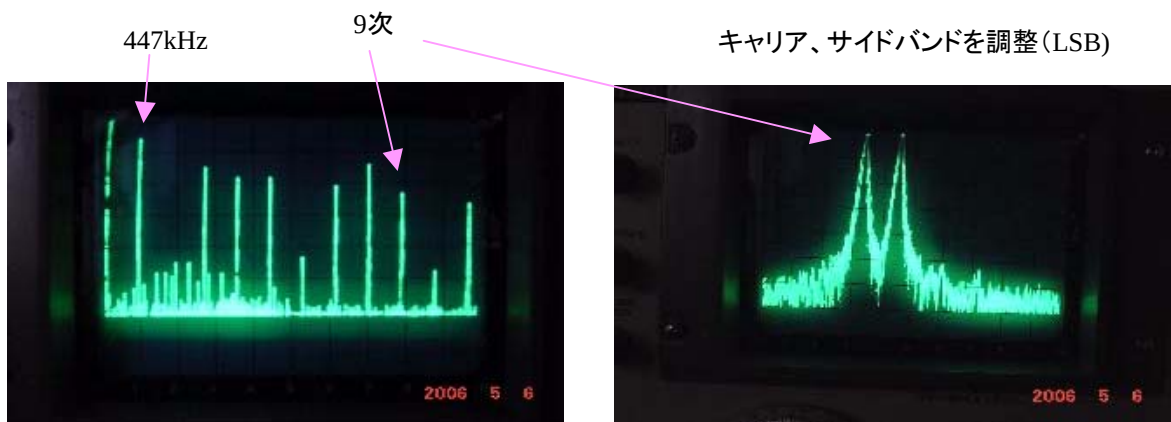


差動のSW入力をSWしたあとと差動で受けるタイプです。

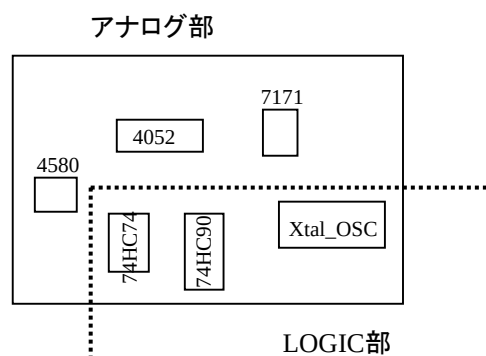
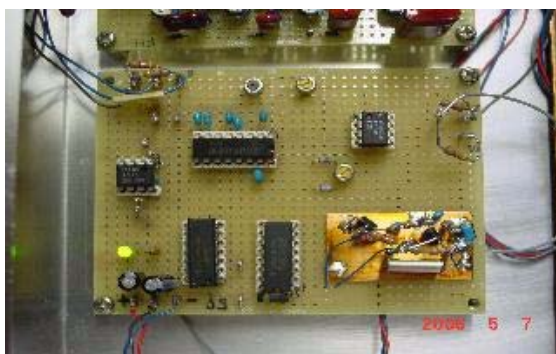
5. 感想

447kHzにおいての実験の感想です。

- 1) キャリアサプレッションは50dB@455kHz程度は難しくないようです。一時的な値は60dB以上にはなります。温度変化などを含めて60dBを持続するのは困難でした。
- 2) これ以上サプレッションを良くするにはキャリアの位相補正も組み合わせないといけないようです。位相補正をおこなうと、PSNの場合はAFの位相シフトが発生して、サイドバンドサプレッションも悪化することがあります。また、ダイレクトコンバージョン送信機等では、広帯域性が損なわれる場合があります。フィルタタイプではそのような使用方法は無いので懸念は無用でしょう。
- 3) PSNの発生器はあちこちにクリITICALなポイントがあるようで、このBMの出力をオシロスコープのプロブで触るだけで(約10pF程度の容量)、サイドバンドサプレッションの悪化が見られました。(今回は約10dBくらい) 同様にAFPSNからBMまでの間も、極力位相シフトが発生しないようにしないといけません。出力をモニタしながら調整、実験をおこなわないと、思わぬところで不都合が発生することがあります。
- 4) DBMのAFの入りにバッファが入っていないので、反転アンプや4.7kが影響して、DCオフセットが発生し、そのためにキャリアヌルの時のVRが中点になりません。実験していませんがバッファを入れると中点に近づき、22kを大きくしても良いようになると思われます。そうするともう少し調整が楽になりそうです。
- 5) 温度特性は見えてませんが、コールドスタートから、密閉したシャーシ全体がほのかに暖まるくらいまでサプレッション50dBはOKです。ドライヤーであぶるのは、過激で自信がないので実験していません。簡単な温度計がほしいです。
- 6) 3次ひずみは、トータルで60dBは取れていそうです。BMだけのひずみを測るべきだったのですが、PSN, フィルタなど全部を含んだひずみになってしまいました。こでひずみが発生すると後出は取れないので注意が必要です。ノイズレベルは-65dB程度ですが、アベレージングが可能なスペアナがあるともっと細かいところまで見えそうです。今回はこれで良しとします。
- 7) 高調波のスプリアス(?)がいっぱい出ます。理論的に出ますのでフィルタで取るしか方法ありません。下図のようなスペクトラムになりました。なぜこのようなスペクトラムになるかわかりません。目的に信号をとりだすには、実際にはセラミックフィルタの帯域の広いものを通してやるのが良いようです。9次の信号(?)に着目して調整を行うと、基本波と同じような特性の信号が得られます。まさにサンプリングの理論どおりです。9次のスプリアスですから4.023MHzです。もう少し回路を検討するなど(特に加算アンプ、論理ICに高速なものを使用するなど)すると、ダイレクトコンバージョンの送信機ができそうです。ただし9次のレベルは447KkHzに比べて20dB程度低くなっています。モニタをしても音質は基本波と遜色ありません。どういうわけか、キャリアバランス、サイドバンドサプレッションの安定度は悪くなります。調整直後は447kHzと同様な特性になります。



- 8) 今回PSN用に90度ずれたキャリアでドライブするBMを2ブロック使用する場合と、フィルタタイプなどの1ブロック使用の場合と内容が混在しているところがあります。本来でしたらDBMのみの特性を調べればよかったのですが、PSNをいじっている最中でしたのでこのようなことになりました。
- 9) メリゴ、バタフライなどの方式は、バランスの調整に4個VRを使用していることが多いようです。今回の方法ですと、基本的に2個のVRで調整が完了します。サイドバンドのバランスをとるためにさらに1個のVRを使用します。
- 10) BMの出力にはかなりの大ききでSW切り替え時のパルス波形が観測できます。しかし全体の特性には影響していないようです。
- 11) DBMの部分の写真です。
アナログ部とロジック部をわけました。GNDも分けてあります。



以上

参考文献(記事などの表題は省略します。)

- 1) ハムジャーナル No.86, 87, 91
- 2) 2191空挺団, Blackfin空挺団(ホームページ)
- 3) JA3DEW(ホームページ)

付録

Excelによるシミュレーションの方法を示します。

	B列	C列	D列	E列	F列	H列	I列
	point	sin data	offset	data	sample data	FFT結果	spectrum
4	0	0	0.1	-1	-0.1	0	0
5	1	0.049067674	0.1	-1	-0.149067674	0	0
6	2	0.09801714	0.1	1	0.19801714	0	0
	3	0.146730474	0.1	1	0.246730474	0	0
	245	-0.514102744	0.1	-1	0.414102744	0	0
	246	-0.471396737	0.1	1	-0.371396737	0	0
	247	-0.427555093	0.1	1	-0.327555093	0	0
	248	-0.382683432	0.1	-1	0.282683432	-256.0000000000001-255.99	362.038672
	249	-0.336889853	0.1	-1	0.236889853	0	0
	250	-0.290284677	0.1	1	-0.190284677	0	0
	251	-0.24298018	0.1	1	-0.14298018	0	0
	252	-0.195090322	0.1	-1	0.095090322	0	0
	253	-0.146730474	0.1	-1	0.046730474	0	0
	254	-0.09801714	0.1	1	0.00198286	0	0
	255	-0.049067674	0.1	1	0.050932326	0	0
	256	-4.90059E-16	0.1	-1	-0.1	-51.1999999999999+51.2i	72.40773439
	257	0.049067674	0.1	-1	-0.149067674	0	0
	258	0.09801714	0.1	1	0.19801714	0	0
	259	0.146730474	0.1	1	0.246730474	0	0
	260	0.195090322	0.1	-1	-0.295090322	0	0
	261	0.24298018	0.1	-1	-0.34298018	0	0
	262	0.290284677	0.1	1	0.390284677	0	0
	263	0.336889853	0.1	1	0.436889853	0	0
	264	0.382683432	0.1	-1	-0.482683432	256+255.9999999999999i	362.038672
	265	0.427555093	0.1	-1	-0.527555093	0	0
	266	0.471396737	0.1	1	0.571396737	0	0
	267	0.514102744	0.1	1	0.614102744	0	0

=SIN(2*PI()*8/1024*B4)
信号の波形

オフセット電圧

サンプリング信号
DBM用

=(C4+D4)*E4
DBM出力

FFT実施後の値(複素数)

=IMABS(H4)

- 1) 0～1023ポイントまで使用します。FFTを実行する場合2のn乗のデータが必要なためです。
- 2) この中に8サイクルのサイン波を入れます。 $\text{SIN}(2 \times \text{PI}() \times 8 / 1024 \times B4)$ というのは8周期($2 \times \text{PI}() \times 8$)を1024ポイント(/1024)に分解して、1ポイントずつ値を求めます。
- 3) F列はサインデータにoffsetをくわえていますので、(C4+D4)。 さらにサンプリングE4を乗算します。
- 4) H列はFFTの分析処理です。この列はFFT計算した結果で realpart+imaginalypart の表記となります。imaginalypartの後はiの文字がつきます。
- 5) パワースペクトラムは $\text{sqrt}(R^2 + I^2)$ ですが、IMABS()という関数で計算してくれます。後はグラフ表示をすれば出来上がりです。