

各位殿

たかが AGC されど AGC

2005、09、24 詳技苑 小塩 立吉

1. はじめに

AGC ラジオの昔は AVC、今に広く用いられている。ループフィルターは一次遅れの簡単な不帰還ループだから解析の必要もない。そこそこ巧く動作している。

- ・ IF amp は、何十 dB もの制御範囲を持ち制御特性を dB/V で表現しており、これは直線制御ではない。またその制御特性が変わるという問題もある。通過する信号は微視的には直線性がある。

- ・ 検波電圧は単極性で 0V 迄である。小型回路化に伴って下がり精々数 volt 止まり、検波ダイオードの不感電圧は結構大きい。温度制御のサーミスタ温度センサーと似ている。

- ・ 多くの機器仕様書の AGC 欄は静特性を規定し、帯域幅は W,M,N の三種類を設ける程度の記述が多い。広い制御範囲に渡るステップ応答やダイナミック応答を規定した仕様書は少ない。しかし、実際の回路は不可解な動きをすることがある。卑近な例として某有数自動車メーカーカーラジオの AVC は、強電界地域で motor-boating をおこしたり、(検波器が不感域に落ち込みボトボトとリミットサイクルを生ずる。戦前高感度高利得のスーパーラジオが誕生し AVC が始まった頃からこの現象が起き名前もできた。)、変調に伴って応答して動作が不安定になる。

- ・ いざ問題を詰めようと思っても書いた本はなく、非直線回路で結構厄介で取り組む人は極少ない。

- ・ 一方、モノパルス測角レーダーは、その名の如く AGC ループ応答はいくら速くても良い筈である。とはいうもののサンプリング制御だから限界がある。何十年も昔内之浦精測レーダーの受信機を設計した際、高速 AGC の限界を実験的に詰めたことがあった。その後 PPI レーダーの IAGC(Instantaneous AGC)にその経験を活用し、後に実現した log CFAR に匹敵する成果を挙げたことがあった。(IAGC は、PPI の 1sweep 内で動作する瞬時 AGC であり、斜め広域照射で鈍った地上クラッター波形に即応し、その振幅と、その先に続く雑音に至る迄を一定振幅に抑え、波形が鈍らない急峻な航空機 echo パルスを見易くする手法です。)

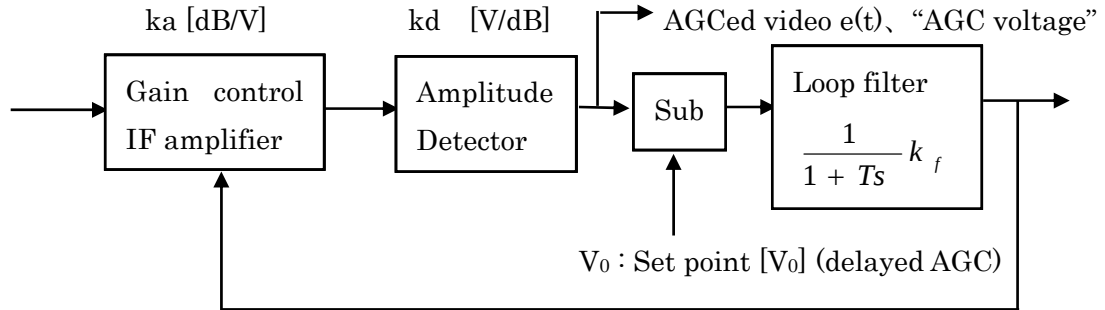
これらの経験を踏まえ、AGC の問題点を皆さんに説明できる程度の簡易シミュレーションを行って AGC が陥りやすい問題点を例示した。最後に私なりの解決提言を述べています。

是非、小生の経験を世代を超えてご紹介したいと思い筆を取った次第です。着陸レーダーの地面エコーも変動し loop AGC が必要かと思いますが、ご参考にして頂ければ幸甚です。

現在は、すでにデジタル log CFAR などの設計技術が確立し、本質的にモノパルス測角誤差検出が可能な受信機もあり、このメモは不必要かも知れません。とすれば、大変幸いなことであり、捨てて頂いて一向にかまいません。

2. AGC ループの構成例

ループフィルタを最も簡単な一次遅れ型としブロック線図を書けば、下記の通りである。



微小振幅変化に対しては上のようなブロック線図を書くことができる。

$$\text{Loop gain } G = k_a \times k_d \times k_f \quad \text{Loop filter : } \frac{1}{1 + Ts}$$

AGCed ビデオレベルは ある定常状態での微小振幅変化に関しては、 G が十分大きいとすれば AGC 制御されたビデオの応答はほぼ次式の形で表現することができる。

$$e(t) = V_0 \cdot e_{in}(t) \left[1 - e^{-\left(\frac{T}{G}\right)t} \right]$$

AGC にまつわる問題はほぼ次の諸点である。

- 1) 検波器の基準電圧が $V_0=3\text{volt}$ であるとする。仮に入力の信号レベルに $+6\text{dB}$ のステップを仮定すると、当初 6V のビデオ電圧が発生し 3V の誤差電圧がループを巡り充電曲線のようにビデオ振幅は基準電圧に落ち着く。次に元のレベルに減少する場合を考えると -6dB のステップであるから直後 1.5V のビデオ振幅となり -1.5V の誤差電圧がループを巡り 3V に向けて落ち着いて行く。増加の場合と減少の場合とで、応答初期の k_d が明らかに 2 倍異なり、等価時定数も 2 倍異なるので、本質的に増減で利得は異なり被利得調整 IF amp を同じ時定数で制御できないことが分かる。
- 2) またハードウェアの限界から、ともかくも AGC ループが連続的に応答できる限界は 10dB ステップ程度である。と言うのは、仮に検波レベルを 1V とし、ダイオードの不感電圧を 0.3V と見ても、減少ステップの最初ループが切れそうになる。これより急な減少時にはループは切れ、生のループフィルタの時定数による放電を待つことになる。つまりループが制御され始めるまで意外に長い時間が掛かることになる。

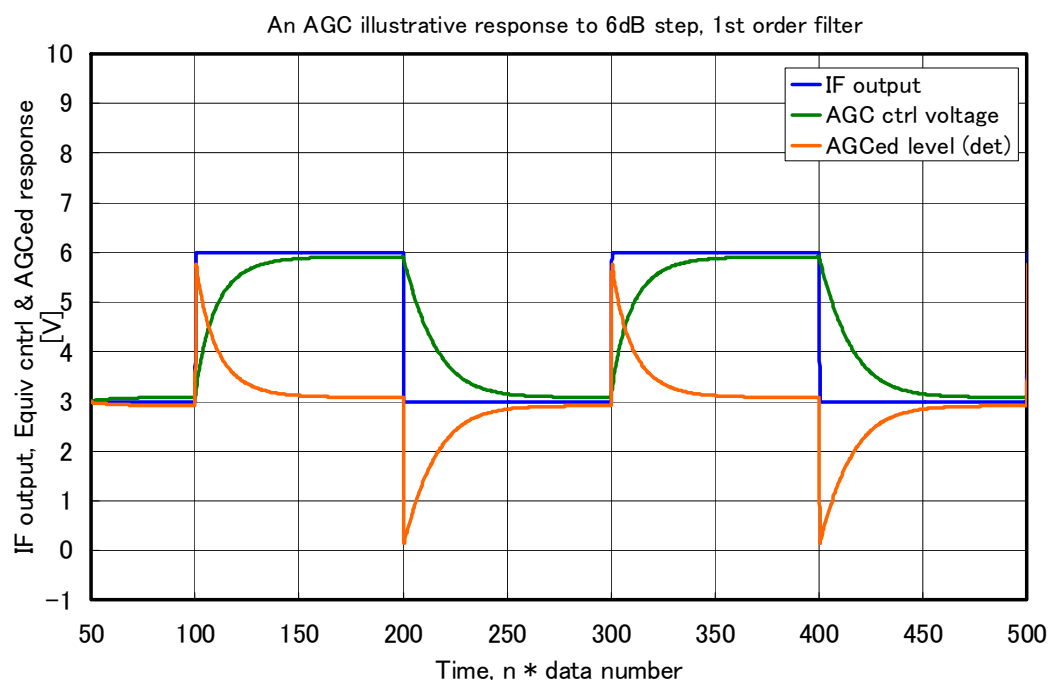
検波器の飽和レベルを 3V とすれば、増加 10dB のステップが限界となる。このように増減共にループ応答開始に限界があり、特に減ステップに対し影響は深刻である。

3) もう一つのループ利得変化の要因

利得被制御 IF amp の制御感度は k_a [dB/volt] で表現される。特に留意して設計した場合を除き何十 dB に渡って k_a は一定ではなく、数倍から 10 倍程度変わっている例も散見されるが、静特性を規定しているので、「AGC 曲線が曲がっていますね。」程度である。このような場合、AGC 応答は先に述べた本質的な特性に加え信号強度に沿って応答が大幅に変化することになる。真空管ラジオの昔からトランジスタの現代まで利得の制御感度が上がる強信号レベルで応答が速くなり不安定になることが多い。差動アンプ IF 段のように dB-linear が実現出来るものもある。

Motor-boating が起きたときの安易な救済手段は思い切って大きい時定数を選ぶこととなる。

3. 簡易計算による AGC ループのステップ応答



先に説明したように、増と減ステップで応答速度が明らかに異なる様子が示されている。

今回、なかなか AGC ループ全てをモデル化することができず、IF 出力(検波出力) ステップ変化は種々の変化を仮定し、これに $\alpha \beta$ トラッカーを置き通過した信号を対数圧縮して IF 出力から引き算するという便法を用いました。けしからんというご批判があれば甘受します。

是非どなたか、より完全な AGC シミュレーションに挑戦して下さい。

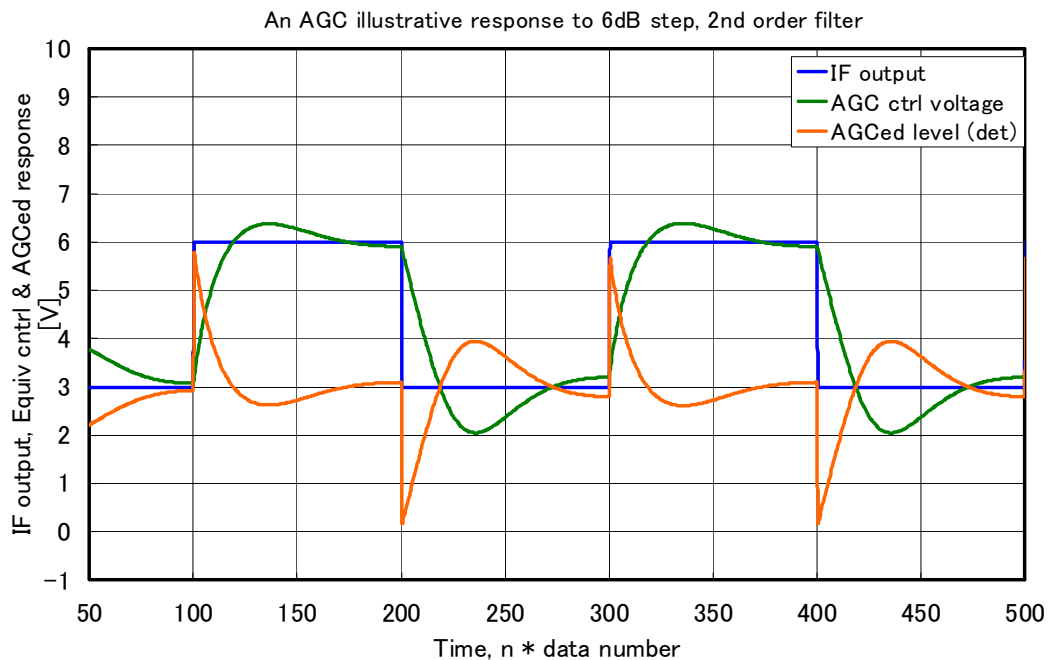
さらに大きい一桁のステップが印可された場合の応答例を示す。



特にループが切れた後の応答は、やや模式的に編集作成したのでご了解願いたい。
 10~20dB の信号レベル変化はレーダーではよく起こることであり、スピンのあるロケットなどの信号レベルは相当手強い周期的変動がある。実効上早期復帰の工夫が課題である。

4) AGC ループフィルタに二次遅れ型が使用出来ないものか

一般に AGC ループフィルタは決まって一次遅れ型が使用される。二次遅れフィルタで多少オーバーシュートを許しても速く静定させたいのに、何故だろうか？



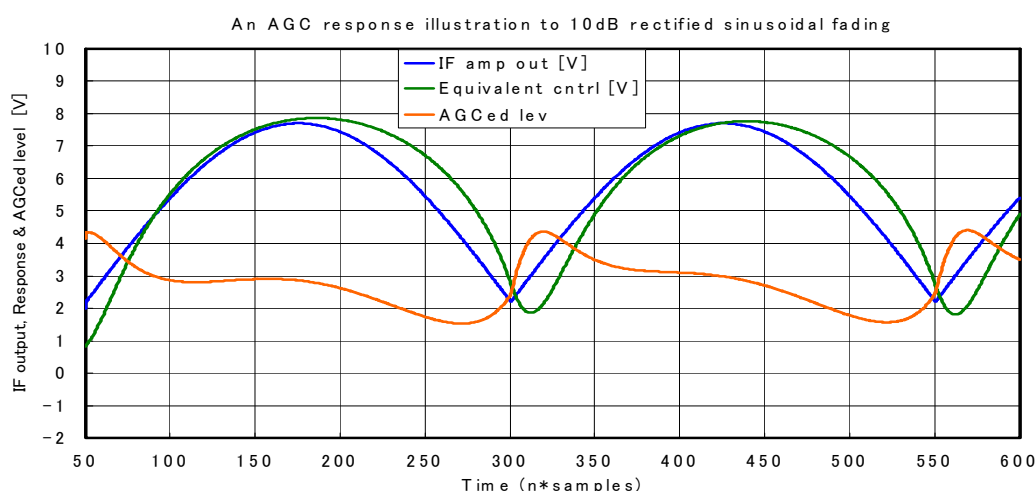
上の二次フィルター挿入の例をみると何故使用しないかが理解できる。増の場合に極僅かの **over-shoot** を許す程度に常数を設定しても、減少ステップではループ利得と等価時定数が定まらないためループ応答が大きい影響を受ける。さらに大きいステップに対しては多く致命的な影響となる。

一方、一次遅れフィルターの場合、とにもかくにも安定応答が確保できる。

しかし、高速な応答を追求し一次遅れフィルターを軽くして行くと、サンプルホールドとロールオフフィルターなどの位相回転が効き始め、どうしても二次ループ的応答となり限界を迎える。大雑把に言って、後に述べる提言を実行してもレーダー繰り返し周期の 10-20 倍の等価時定数が高速ループ安定の限度になる。

4) 手強い周期変化に対する AGC 応答例

スピノケットの信号強度はまるでアンテナパターンを測っているようだし、マルチパスフェーディングも全波整流ないしは $\sin X / X$ 型の相当深い変化が生ずるものである。このような場合 AGC がどこまでレベル変化を圧縮しているかは余り語られていない。参考のためほんの一計算例を示すこととします。

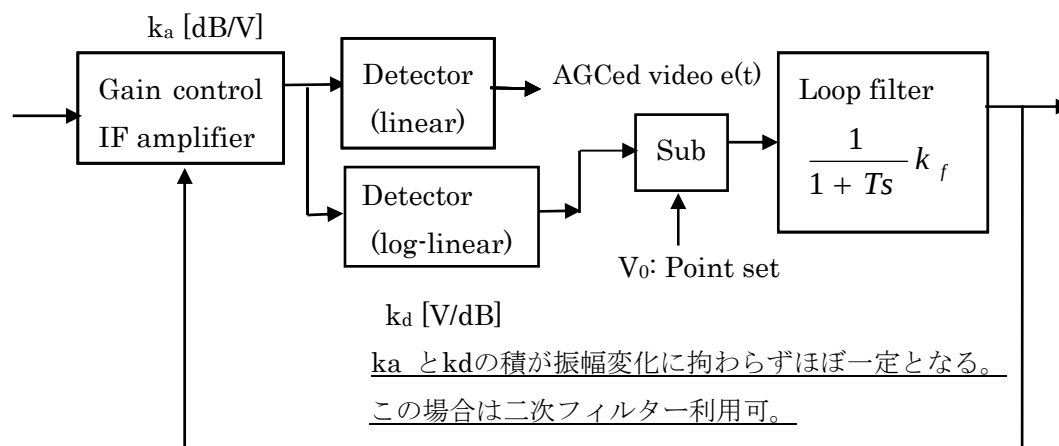


この例では、応答の遅れによって十分大きい振幅の時にもう AGC ビデオレベルが減少してしまい、谷から復活し、まだ S/N が悪いのに拘わらずビデオレベルが盛り上がるなど振幅変動の圧縮度が悪く、期待外れの AGC 応答となっている。

現実にはいっそ長い時定数の AGC を選択し、軌道に沿って生ずる大きい変化に追従するものの、スピンなど生の変化にはほとんど応答させず、生の変化がビデオに現れるような状態で使用されているのではないかと想像する。

4. 全信号強度範囲で応答が一定で、荒い変化にも安定に動作する AGC の構成提案

Vehicle の姿勢性制御が一般化し信号レベルが安定している近代宇宙通信系では AGC に対する要求も軽くなるが、一次レーダーでは着陸レーダーも含めて振幅変化は wild である。やはり本質的に安定な AGC 回路が望ましいと思います。



「ループ利得ほぼ一定」を実現する AGC 系統図

経験済みの安定な AGC の設計提言(不十分ながら第一世代精測レーダーに試行済み)

- 1) 普通振幅検波回路はビデオ信号用に用い、もう一個対数増幅器を併置し安定後の振幅に対し±10dB 程度のダイナミックレンジを log-linear に近くする。

こうすれば $k_a \times k_d$ の積つまりループ利得一定を実現し、増、減ステップに対してほぼ同じような応答を期待できる。

- 2) 言うまでもなく被利得制御 IF amp の制御特性は、制御範囲に渡って極力 dB-linear とする。こうすると AGC 電圧で受信電力を直読できるという副次効果を生む。
- 3) それでも、大きい減ステップに対して検波電圧が 0 になることは避けられない。この時間を見計らいループフィルター時定数を制御し、早くループを閉じる工夫が必要となる。多少のぎくしゃくは発生する。

- 4) 熱雑音から強信号まで安定な log CFAR 的 AGC と言うことは、無信号の雑音ビデオのピークが僅か V_0 を超え、少し AGC を効かせて置くということである。

追尾レーダーなどは、低 S/N では誤差が急増し通常と別の近似式となる。低 S/N での AGC をどう設計すべきかの議論は他に譲ることとする。

一方、現代の IC 化され耳に快い AM ラジオの AVC は、(FM ラジオでも)微弱信号に対しジャージャー雑音を出してまで頑張らず、弱信号以下では雑音を目立たせず復調音が自然に消え入るよう IF 利得を相当低く抑え、また V_0 を設定する delayed AGC を曖昧にし、非直線利得制御も気にせず、良い意味の合目的設計、極力無駄を省いた設計をしているようである。

5. 結び

今回の問題提起が何かのお役に立てば幸いである。また色々な手段が可能な現代ですから、より良い AGC とは何かを議論し、実用化して頂きたいものである。

以上