

まえがき

知人の OM から、富士通のガリウムひ素パワー-FET FLC103WG と FLC253MH - 6 を分けてもらったので、5.7GHz 用のパワー・アンプをつくってみました(写真 1)。

FLC103 は C バンドで 1W, FLC253 は 2W 以上も出るすばらしいデバイスで、5.7GHz 帯用としては最適です。ただ FLC253 を押すには FLC103 はちょっともったいなく、FLC053 あたりが最適なのですが、

はじめに FLC253MH - 6 単体のアンプを実験してみました。FLC253 には 2 種類あり、6GHz 用が“MH - 6”、8GHz 用が“MH - 8”とそれぞれ最後の番号で識別しています。この違いは入力側にそれぞれの周波数のマッチング回路が組み込まれているためで、MH - 6 を 6.5GHz 付近で使う場合は 50 Ω ラインに直に接続できますが、5.7GHz 帯で使用する場合は入・出力側ともマッチング回路が必要です。したがってこのマッチング回路の設計からはじめます。

FET を使用したアンプ回路の設計については多くの方が発表されていますが、マイクロ波帯では主として S パラメータを使ったマイクロストリップ・ラインによる設計が一般的です。そしてこれについては Ham Journal 誌 No.63 に詳細に述べられているので、そちらをご覧ください。ただここで考えなくてはならないことは、S11 および S22 に対してのみマッチングをとる方法では、周波数が高くなると実際との誤差が大きくなるということです。

S11 というのは FET の出力側を 50 Ω でターミネートしたときの入力側から見た反射係数値で、したがって S11 に対してマッチングをとるときは出力側は 50 Ω のラインのみで構成し、次に接続されるものも 50 Ω のインピーダンスを持つものでなければなりません。ここでもし出力側に S22 にマッチングするような回路を接続すると、入・出力側ともにミス・マッチングとなり、FET の持つ最大の特性を引き出すことはできません。このように S11, S22 は相互に関係し合うため、入・出力側とも同時にマッチングをとる(このときマッチング・ゲインが最大となる)ためには S12, S21 をも計算に入れた回路をつくらなければなりません。

この計算はちょっとやっかいで手計算では非能率的なので、コンピュータで計算した方がベターです。幸いにも、古くからこの種の計算プログラムは数多く発表されています。私は米「ham radio」誌の 1982 年 10 月号に Greg Vatt 氏が発表した“Computer aided UHF preamplifier design”(1)をもとにして N88 BASIC に書き替えたものに、ストリップ・ラインや安定係数 K, 雑音指数などの計算ができ、さらにスミス・チャート上にプロットするグラフィック機能を付け加えた“RF - DES7 .BAS”をつくり愛用しています。

ちなみに本家(?)の米国でも Vatt 氏のプログラムに手を加えた“AMPDES .BAS(4)”がアマチュアの間で使われているようです。この“RF - DES7”は使用するデバイス名と使用周波数を入力すると、それに対するマッチング・ポイント m_s , m_l の値、さらにマッチング回路定数を計算してくれるものです。この“RF - DES7”による計算結果を第 1 表に示します。このプログラムでは回路のロス計算に入れていないので、実際に組み立てたものは計算値よりも 1 ~ 2dB 少なくなります。それ以外ではかなり正確です。

ただこのソフトでは単一周波数のみの計算なので全体の周波数特性を見るために、私は IBM - PC 上で働く Eagle Ware 社のシミュレーション・ソフト“SuperStar Pro”を使って最終的に回路定数を決定しています。

第 1 図にこの結果を示します。

ここで考えなければならないのは、「マッチング回路はこれだけでなく無数にある…」ということです。そしてそれぞれの回路により周波数特性が違って来たり、回路定数の誤差がシビヤになったりします。このことは製作に当たってつくりやすさに関係してくるので、どれを選ぶかは設計者の腕の見せどころというわけです。

今回は第 2 図のように入力側インピーダンスは“RF - DES7”の計算から 120 Ω の点に平行に 55 Ω のオープン・スタブでマッチングがとれるので、77 Ω の Q マッチ・セクションとオープン・スタブで構成しました。出力側は位相ラインとオープン・スタブで構成しますが、位相ラインの長さが 1.3mm と短いので、これを省略してもドレイン・リードが若干のインダクタンスを持つため、実際には位相ラインとして働くことを考えてオープン・スタブだけの構成としました。

以上の回路のシミュレーション・リストと結果を第 2 表と第 3 図に示します。第 1 図と第 3 図を比べてみると、マッチング回路の違いによって周波数特性がプロードになっていることがわかります。これは回路の Q が低くなっているためにつくりやすい設計といえます。

前段 FLC-103 についても同様にシミュレーションによって定数決定をしました。その結果を第 3 表と第 4 図に示します。

マイナス・バイアス回路と電源供給回路について

FET の使用に当たっては低い周波数では高いゲインを持つことや、高い周波数での位相の回り込みによる発振を避けるために、バイアス回路や電源回路にも対策が必要です。具体的には「CQ ham radio」1994 年 7 月号 (p. 241, 第 3 図) のような回路が使われていることはよく知られているところです。

ここで L1 は目的周波数で 1/4 波長の高インピーダンス・ライン, L2 は同じく 1/4 波長の低インピーダンスのオープン・スタブで構成しています。したがって L1 と L2 の接続点のインピーダンスは目的周波数ではアースに対してショートとなります。このため L1 とストリップ・ラインの接続点からこの回路を見たときは、高インピーダンスとなり、目的周波数ではこの回路は切り離されたものとなって何ら影響も与えません。

しかしこれ以外の周波数ではこの回路の影響を無視することはできなくなり、発振などのトラブルの原因になります。図中の R と C はこれを改善するためのものです、こうして各部の設計が終わったので、第 5 図に全体の回路を示しておきます

プリント基板の製作について

回路図を書くことはできても、これを具体的なプリント・パターンにすることは計算による設計とは違った大きな問題があります。5.7GHz 帯のようなマイクロ波ともなると、0.1mm 単位の寸法の正確さが要求されるわけで、手書きやテープを切って貼りつける方法ではルーペを覗きながらの作業となり、私のように視力の怪しくなった者には難しく、また拡大図面から原寸フィルムにする方法で原図をプロッタで描いたとしても 1 回ごとの試作に時間がかかります。なれば時間節約のためにまとめて寸法の違ったものを一度につくったとしても、必ずしも正解があるわけではありませんし、ムダでもあります。このように試作基板についてはいまひとつ思うにまかせません。

プロの世界ではカッティング・プロッタで遮光性フィルムをカットし、ポジ・ネガ・フィルムをつくる方法があることは前から知っていました。そこで何とかアマチュアでもこの方法が使えないかと思い、いろいろな資料を採してみたところ、数社でつくっていることがわかりました。そのなかでローランド・デージー社の「スケッチメイト」というプロッタが価格も手ごろだったので調べてみました(6)。

カタログ上では専用シートを切るようになっていたので、同社の東京展示場に問い合わせたところ、遮光性フィルム(俗称赤ネガ(7))もカットできることがわかり、その入手先も教えてもらえたので、性能の点で多少の不安はありましたが購入に踏み切りました。

このプロッタはフラット・ベッド型で通常のペン・プロッタとしての使いかたのほかに、カツ・ナイフの刃先を使ってシートを切ることができるものです。この使い方の詳細は別に書く機会もあると思いますのでここでは省略しますが、私は PC9801 とアスキー社の「CANDY4」という CAD ソフトを使ってプロッタに出力しています。

これらのシステムのおかげで設計変更からフィルムのカット、基板の製作、測定のサイクルが約 1 時間程度でできるようになり、4~5 回これを繰り返せばたいいの回路を完成できるようになりました。

こうして仕上がったポジ・フィルムからプリント基板をつくる方法については、これまでに多くの方がたが発表されているので、ここでは省略させていただきます。

今回使用したプリント板は松下電工のガラス熱硬化 PPO 銅張積層板というもので、ガラスエポキシ板よりも高周波性能がよく、テフロン基板よりも硬度が高いうえに加工性もよく廉価なので、この周波数帯には最適と思われます。なお板厚は 0.8mm のものを使用しました。第 6 図にパターン図を、第 7 図に部品配置図を示します。図中の小穴部分は 1mm のハトメで上下の基板を接続し、また酸化防止のためにフラックスを塗っています。

組み立てと配線について

基板が完成したらまず部品を取り付けていきます。

はじめにチップ抵抗やコンデンサをハンダ付けします。部品は 51 が 2 個、2pF が 3 個、1000pF が 5 個の都合 10 個です。このようなチップ部品のハンダ付けをするときは、あらかじめハンダ付けする部分のパターンへ薄く予備ハンダをしておきます。たとえば 51 チップ抵抗の場合は、幅広いオープン・スタブに軽くハンダを乗せ、ピンセットでチップ抵抗を押さえながら、そのハンダを使ってハンダ付けします。抵抗の反対側はそのあとで

ハンダ付けします。このときハンダはできるだけ少量ですますようにします。

部品同士がとなり合うような箇所はとくに注意が必要で、あとから付ける部品が取り付けにくくなるので要注意です。私は 0.5mm のハンダを使っています。またハンダごても先端の細い小容量の(10~30W)絶縁のよいセラミック型のものを使います。リークのあるハンダごては、ガリヒ素 FET を破損することがあるので十分注意してください。こてのリークを調べるにはハンダごてを電源に差し込み、こての金具部分とアース間にテストを当て(AC 計最小レンジで)、少しでも針の振れるものは使わないことです。なお、AC 100V ラインは片側がアースされているため、プラグ極性によっては振れない場合もあるので、必ず極性を変えて調べます。

さて、次は 1k の半固定抵抗を取り付けます。センタが 51 と 1000pF の接続点へ、あとの 2 本はアースと -5V のランドにそれぞれハンダ付けします。この半固定抵抗はチップ部品の上にもたがるため、ハンダ量が多いとショートの原因になるので注意してください。念のためテストでショートの有無を確かめておきます。

あとはドレイン回路の 3 (カーボン抵抗)1 本とインダクタや電源回路の電解コンデンサ 2 個をハンダ付けします。ここまで終わったところで一服して、いままでの作業にミスがないことを確かめてください。

最終工程の FET 取り付けの前に、各部の電圧が正常に出ていることを調べるため +B 端子とアース間に +10V の電源を、マイナス・バイアス用として -5V を接続します。1k の半固定抵抗を回してゲートのマイナス電圧が 0 から -5V まで変化することを確認したら、マイナス側へいっぱい回しておきます。

コネクタとケース入れについて

いよいよ最終工程のケース入れになりますが、適当なケースがあればよいのですが、自作するのは大変です。私は手元にあったでき合いのケースに入れました(写真 2)が、少し小さすぎてあとで放熱に悩まされました。

コネクタは SMA 型の座を使うことにします。この座には四つ穴とふたつ穴のものがありますが、ケースの底板の厚さによって四つ穴は使えないことがあるので注意してください。コネクタは座からすぐにセンタ・ピンが出ているものではなく、白いテフロン部分が 4mm ほど出ているものがが必要です(この長さはケースの厚さによって違います)。

ケースには基板やコネクタ、FET などの取り付け穴が開いていませんから、その加工をしなくてはなりません。その前にひとつ問題があります。それは使用デバイスの FLC103 と FLC253 で、その底面からゲートやドレインのリードまでの高さが違うことです。メーカー製品はこの高さを合わせるためにケース底面を掘り込んでありますが、アマチュアではそのような加工はフライス盤がなければできません。

そこで基板の下部に第 8 図のような厚さ 0.5mm の鋼版を敷くことで解決しました。第 9 図にケース加工図を示します。また第 4 表に組み立てに必要なビス類を書いております。

調整について

ケースへプリント基板を取り付け、コネクタのピンと貫通コンへのハンダ付けが終わればいよいよ調整に入りますが、これに必要な機器は次のとおりです。

テスト

電源: + 10V 2A, - 5V 20mA(単 3 電池 3 個でも可)

5.7GHz, 100mW の出る高周波電源(0~最大まで可変できれば最適)

(可変できなければ)アッテネータ(若干)

パワー・メータ(5.7GHz で 5W が測れるもの)

1A 直流電流計

これらを全部そろえるのは難しいかもしれませんがこの記事に興味をお持ちの方なら 5GHz のトランスバートはあると思いますので、それを高周波電源として使い、アッテネータとして適当な長さの同軸ケーブルで代用する、または IF 入力を変えて出力をコントロールしてください。しかしパワー・メータだけは正確なものが欲しいので、なければローカル局やお仲間から借用してください。

以上を第 10 図のように接続しますが、+ 電源と高周波電源はまだ接続しません。まずテストでゲート電圧が -4~-5V くらいになっていることを確認します。またテストをオーム計にして、ドレインとアース間に導通がないことを確かめます。これらが OK ならば + 端子に電流計を介して電源を接続します。実はこの瞬間がいちばん緊張するときなのですが、上記のテストをパスしていれば、ほとんど電流は流れないはずで

ここで FLC103 のバイアス用半固定抵抗を回してドレイン電流が 0~300mA くらい変化することを確認

250mA にセットします。次に FLC253 のバイアスを変えて全電流が 850mA になるようにセットします。

ここで高周波電源を接続して 10～20mW を入力します。これで問題なければパワー・メータが 1～2W を指示するはずですが、極端に異なるときは手早く電源を切って各部を点検してください。原因としてはカップリングの 2pF のチップ・コンのハンダ付け不良、SMA コネクタのセンタ・ピンがアースされていることが多いものです。ここまでがよければ高周波電源の出力を変え、それにしたがってパワー・メータの指示がスムーズに変化し、ゲインとして 20dB くらい(10mW 入力で 1W 出力, 20mW 入力で 2W 出力)あり、最大出力が 2.5W くらい出ていれば OK です。

第 6 図のパターンでつくれば、デバイスのバラツキが多少あってもこれに近い性能が出るはずですが、実際にはプリント基板の製作誤差などでカット&トライが必要になることがあるので、調整の要領を書いておきます。なお、ここで新しく用意するものは細いスチロール棒の先に 2～3mm 角の金属片を接着したもの(大きさの違うものを 2～3 種つくっておくとよい)とカツタ・ナイフです。

これらでパワー計の指示を見ながら金属片をストリップ・ラインやスタブの上を滑らせていきますが、その位置によってパワーが変化しますから、増える箇所に小さな(1×3mm くらいの)金属片をハンダ付けしてみます(ガリヒ素 FET のリードの切れ端などが最適です)。オープン・スタブの調整はカツタ・ナイフでスタブの先端から 0.5～1mm くらいのところに切れ目を入れていきます。このような調整で 0.5dB でも 1dB でも出力が増えればしめたものです。

ここで大切なことが 2, 3 あります。まずハンダごてですが、いくらリークのないこてを使ってもたいせつな FET をオシャカにすることがあるので、ハンダ付けするときには必ずハンダごてを 100V 電源から抜くことです。また思わぬショートを防ぐためにも + 電源も外しておきます。

次に金属片を使ってドレイン側を調整するとき、誤つてショートさせるとそのショックで FET をオシャカにすることがよくあります。この原因は + 電源にあります。つまり電源がショートから回復するときに大きなスパイクが出て、それによって FET を破壊するようです。この対策としては電源に並列に 12～13V のツェナ・ダイオードを入れておきます。

まとめ

以上で FLC253 を使ったパワー・アンプの説明を終わりますが、第 11 図にこのアンプの入出力特性を、第 12 図に周波数特性を示します。これで見るとリターン・ロスの最小になる周波数が高い方へズレていますが、これは調整をパワー計のみで行ったためで、リターン・ロスを見ながら FLC103 の入力側のマッチング回路を調整すればよくなる可能性があります。また、今回使用したケースは少し小さかったようで、放熱板(写真 1 参照)を付けてもかなり熱くなります。FET は熱暴走がないので助かりますが、この点も考えなければならぬところです。

*

この実験に当たってデバイスを提供してくださったり、貴重な測定器を貸してくださった OM の方がたに感謝の意を表します。

参考文献・参考資料

- (1) Greg Vatt, "Computer - aided UHF preamplifier Design" 「ham radio」, Oct. 1982 p. 28～35
- (2) "S - Parameter Techniques for Faster, More Accurate Network Design", 「HEWLETT PACKARD Applications note」, 95 - 1
- (3) William H. Froehner, "Quick amplifier design with scattering parameters", 「Electronics」, Oct 16, 1967 p. 100～109
- (4) Paul Shuch, N6TX, "Wideband Microwave Amplifier Design", 「QEX」, Oct. 1989 p. 3～13
- (5) 「富士通半導体デバイス DATA BOOK」
- (6) 「スケッチメイト取説」, ローランド デージー社
- (7) 「AK ストリップ・コート」, 株式会社カタログ