

第1章

ようこそ高周波の世界へ！

～めざせ高周波エンジニア～

1.1 本書で扱う周波数帯と回路

「高周波」という言葉に厳密な定義はなく、漠然と使われています。そこで本書では、300 M ~ 3 GHz を高周波 (図 1・1) とし、この周波数帯の回路を「高周波回路」と位置づけることにします。

そして、Bluetooth、無線LANなどの無線データ通信機器の開発が加速している1 ~ 3 GHz帯の回路 (図 1・2) を中心に取り扱います。チップ部品で構成した回路と、マイクロストリップ・ラインなどで構成した回路が混在する、面白い領域だと思います。チップ部品では、その寄生成分によって、理想特性からのずれが生じてくる周波数です。



図1-1 本書で扱う「高周波」の帯域

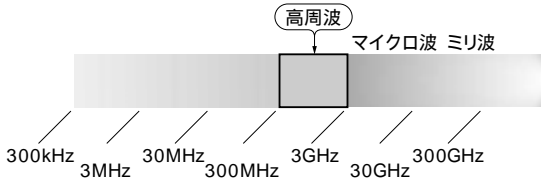
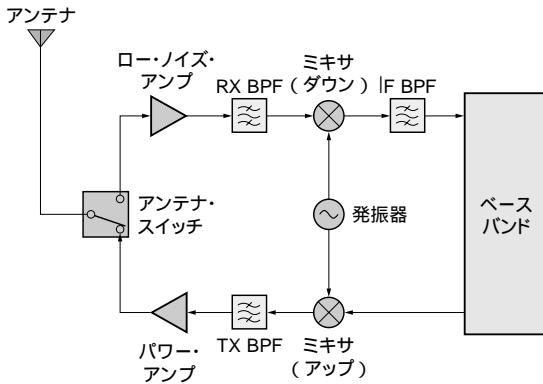


図1-2 2 GHz帯送受信システムのブロック図



1.2 高周波回路の設計環境の変化

今も昔も大事なものは「経験」

高周波やマイクロ波回路シミュレータの急速な進歩と、コンピュータの高性能化によって、高周波回路の設計者が手にする道具は「はんだごて」から「キーボード」へと変わりつつあります(図1-3)。

しかし道具が変わっても、それを使う設計者に求められるものは変わりません。それは「経験」です。

必要とされる経験とは何か？ちょっと回り道をしながら考えてみましょう。

昔の設計スタイル

私が高周波の世界に足を踏み入れたころ(といっても今から十数年前ですが)をちょっと振り返ってみましょう。

第 2 章

高周波の基礎知識

～ 高周波信号とうまく付き合うために～

2.1 信号の波の長さを意識しよう！

1 MHzの真空中の1波長は300 m

電気・電子回路のなかでも、高周波回路や分布定数回路は特殊な領域だと思っている人がいるかもしれません。でも本当は、取り扱うことが多い低周波交流回路のほうが特殊なのです。それはなぜでしょうか？

交流信号の波長は、周波数の逆数に比例します。低周波の場合、例えば1 MHzの信号の自由空間(真空中)での波長は次式から約300 mです。

$$= \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{1 \times 10^6} = 300 \text{ m} \dots \dots \dots (2.1)$$

ただし、 λ : 波長 [m], c : 光速 [m/s], f : 信号の周波数 [Hz]

さまざまな電子機器で一般に使われているFR-4(ガラス・エポキシ)基板上では、自由空間よりも波長が短くなりますが、それでもその波長は約160 mもあります。図2.1にイメージを示します。

皆さんが使っている基板は、いくら大きいと言っても、せいぜい数十cm程度ですから、1 MHzの信号を扱う回路を設計する場合には、その波長をまったく意識することなく設計しているのです。つまり、「配線上の位置に関係なく、信号の振幅と位相は何処でも等しい」という近似を無意識に行っているわけです。

1 GHzのプリント基板上の1波長はたったの16 cm

それでは扱う信号の周波数が1 GHzになったらどうなるでしょうか。

図2-1 プリント・パターン上の電圧振幅の分布イメージ

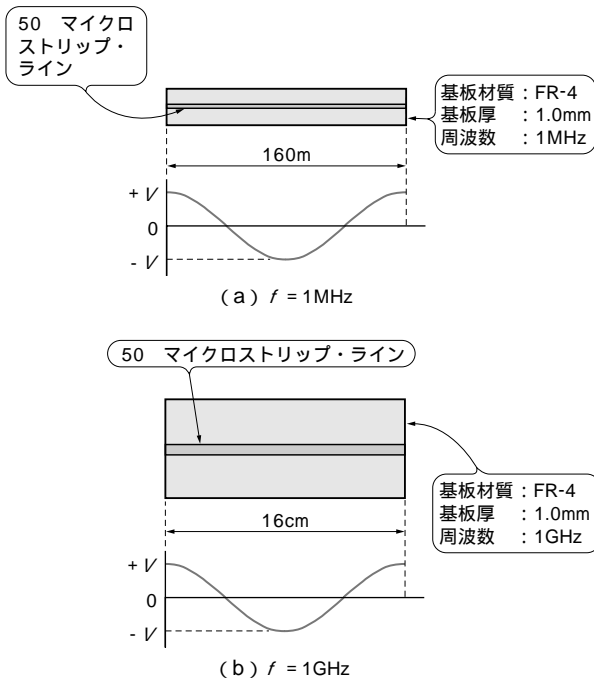


図2-1(b)に示すように、自由空間での波長は1MHzの1/1000の30cmに、FR-4基板上ではわずかに約16cmになってしまいます。つまり扱う信号の波長に対して基板上の配線長が無視できなくなります。何気なく描いたプリント・パターンでも、ライン上の位置が数cm違っただけで、信号の位相と振幅がまったく違ってきます。

図2-2は、長さ2cmのプリント・パターンの入口と出口で、位相と振幅がどれくらい変化するのか、1MHzと1GHzで比較したものです。ここでは入力で振幅が最大になっていると仮定しました。

1MHzの場合には振幅と位相はともにほとんど変化していません。ごくわずかな変化なので、この差を測定しようとしても簡単には測定できないでしょう。

一方、1GHzの場合には、振幅が約30%低下し、位相は45°も変化してしまいます。

このように、取り扱う信号の周波数が高くなると、配線の長さが伝送される信号の波長に対して無視できないものになってきます。つまり、配線(伝送線路)も通過する信号の

第3章

スイッチの設計と製作

～信号の流れを制御するテクニック～

3.1 高周波スイッチに要求される役割と性能

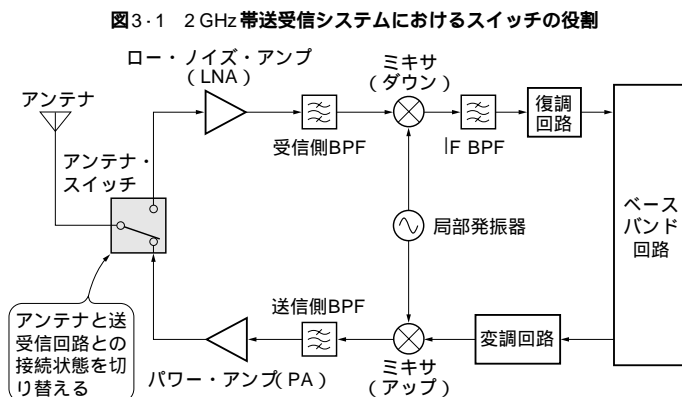
スイッチの役割

一般的な送受信システムにおいて、アンテナから入ってきた信号は、まず図3・1に示すスイッチを通過します。図からわかるように、スイッチはアンテナへ出て行く信号が最後に通過する回路でもあります。

スイッチの役割は次のとおりです。

▶ 受信するとき

- アンテナと受信回路を接続する
- アンテナから入ってきた信号を送信回路側に漏らさずに、減衰を最小限に抑えて



受信回路に伝達する

- 送信回路から発生するノイズがスイッチを通じて受信回路に回り込まないようにする [図3-2(a)]

▶ 送信するとき

- 送信回路とアンテナを接続する
- 送信回路から送り出される信号を受信回路側に漏らさずに、減衰を最小限に抑えてアンテナに伝達する [図3-2(b)]

スイッチに要求される性能

スイッチに要求される性能をまとめると次のようになります。

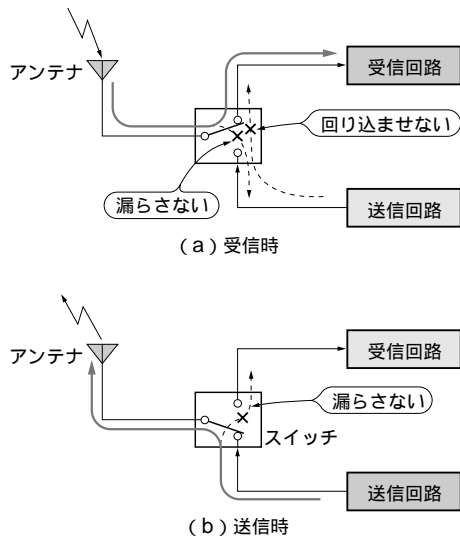
- ▶ 低挿入損失であること
- ▶ 高アイソレーションであること

SPDTスイッチの挿入損失とアイソレーションには密接な関係、つまり「漏れが大きい伝達される信号が少ない 挿入損失が大きい」という関係があります。

また、受信するときに送信系回路で生じるさまざまなノイズが、送受信回路の接点であるスイッチを通して、受信回路に回り込まないことが重要です。

- ▶ スイッチング速度が速いこと

図3-2
アンテナ・スイッチに要求される特性



第 4 章

ロー・ノイズ・アンプの設計と製作

～ 微小な信号を増幅するテクニック～

本章では、送受信システムの受信部に使われているロー・ノイズ・アンプ LNA (Low Noise Amplifier) の設計法について解説します。

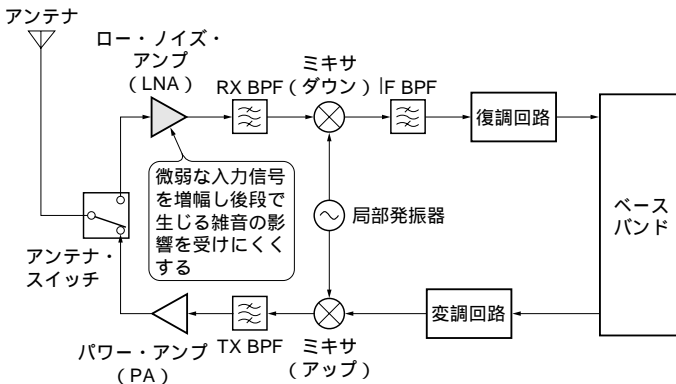
図4-1に示すように、LNAはアンテナから入ってきてスイッチを通過した微弱な信号を増幅します。

4.1 LNAの役割

受信機の感度(受信感度)は、受信回路から発生するノイズの量によって大きく変化します。

システムによっては - 100 dBm といった、とても微弱な信号を受信しなければなら

図4-1 2 GHz帯送受信システムにおけるLNAの役割



いことさえあります。このくらいの微弱な信号になると、そのまま復調できません。アンプで信号を増幅する必要があります。

ただし、増幅した結果アンプから発生するノイズが、増幅後の信号レベルよりも大きいと、信号とノイズの見分けがつかなくなってしまいます。そこで、受信回路のアンプにはノイズの発生が少ないアンプ、つまりLNAを使います。

LNAによって希望の信号を増幅して、信号とノイズとのレベル差を大きくしておけば、LNAの後に接続されるミキサなどでノイズが付加されても、その影響を受けにくくすることができます。

4.2 雑音は小さいほど、ゲインは大きいほど良い

雑音の大きさを表すパラメータ「雑音指数」

LNAは、アンテナで受けた微弱な電波にノイズを付加することなく増幅し、次段に送り出す役割を担っています。この部分にノイズ特性の悪いアンプを使うと、微弱な信号がノイズに埋もれてしまいます。

図4・2に示すように、増幅器の雑音特性は雑音指数で表現します。NF(Noise Figure)とも言います。ある増幅システムの雑音指数を F [dB]、ある増幅回路の入力信号の S/N を S_{N1} [dB] と出力信号の S/N を S_{N2} [dB] とすると、

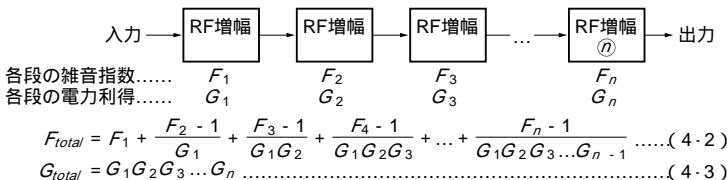
$$F = S_{N1} - S_{N2} \dots\dots\dots(4 \cdot 1)$$

で表されます。

増幅回路の雑音指数は入力信号の S/N と出力信号の S/N の比です。図4・3に示すように、雑音指数の悪いアンプを使うと、アンプ内部で生じたノイズが信号に加わり、入力信号を抽出できなくなります。

LNAのゲインと雑音指数は、通信距離、アンテナ、送信電力、システムの要求性能な

図4・2 (4) 雑音指数の算出方法



$$F_{total} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \frac{F_4 - 1}{G_1 G_2 G_3} + \dots + \frac{F_n - 1}{G_1 G_2 G_3 \dots G_{n-1}} \dots\dots(4 \cdot 2)$$

$$G_{total} = G_1 G_2 G_3 \dots G_n \dots\dots\dots(4 \cdot 3)$$

後の項ほど分母が大きくなる。初段の雑音指数 F_1 が全体の雑音指数に与える影響が一番大きい

第5章 ミキサの設計と製作

～ 周波数を上げたり下げたりするテクニック～

図5-1に示すように、送受信回路には、受信側と送信側にそれぞれミキサ回路が挿入されています。受信側ではアンテナから入ってくる信号と発振器の出力を、送信側ではベースバンド回路から出力される信号と発振器の出力を混ぜ合わせます。

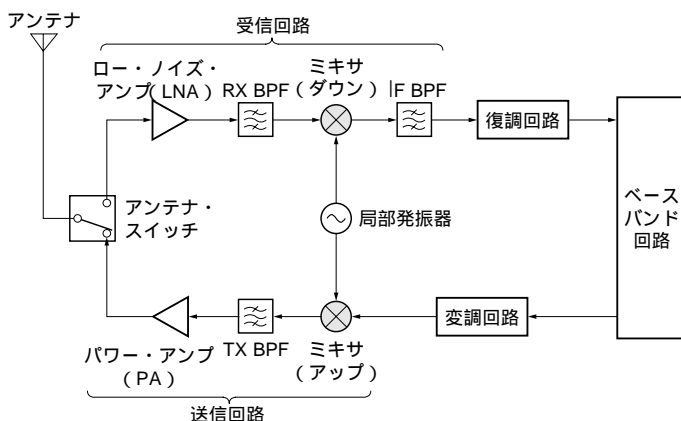
「ミキサ」は名前のとおり信号と信号を「混ぜる」回路です。では、何のために二つの信号を混ぜる必要があるのか、またどうやって混ぜるのかを見ていきましょう。

5.1 ミキサの役割

送信回路におけるミキサの役割

図5-1に示す送受信回路を見てください。

図5-1
2 GHz 帯送受信
システムの例



変調回路にて、低周波のアナログまたはデジタル信号で変調されたキャリア(搬送波)は、局部発振器(Local Oscillator)の出力信号とミキサで混合されます。ミキサは、100 M ~ 300 MHzの信号を送信周波数2.4 GHzまで引き上げる役割を担っています[図5-2(a)]。パワー・アンプは、その信号を増幅して、電波としてアンテナから送り出します。

送受信信号と低周波のデータ信号との中間に位置するこの信号を中間周波信号、またはIF(Inter mediate Frequency)信号と呼びます。

受信回路におけるミキサの役割

アンテナで受信した高周波の信号(RF信号)をLNAでいったん増幅し、その信号と局部発振器との出力をミキサで混ぜます。

ミキサは、2.4 GHzのRF信号を100 M ~ 300 MHzのIF信号に周波数を引き下げる役割を担っています[図5-2(b)]。

どうして周波数を変換する必要があるのか？

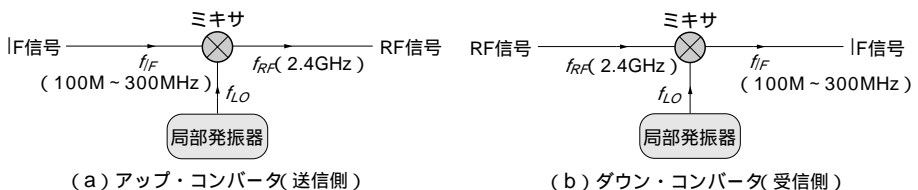
▶ 高い周波数の信号を扱うのは難しいうえにお金がかかる

半導体部品はずいぶん進化しましたが、2 GHz帯という周波数は、直接扱うにはとても高く、安定に動作する変復調回路や増幅回路を設計するのは容易ではありません。使用できる部品も限られるのでコストが高くなります。

そこで一般の送受信機は、ミキサを使って送受信する周波数よりも1桁ほど低い周波数の信号に変換してから、増幅したり変復調します。

IF周波数は、IFフィルタ(SAWフィルタ)をどうするか、つまり既存の品を使うか新規開発品を使うかに大きく依存します。新規でSAWフィルタを開発するのなら希望の周波数に設定できますが、100万円以上の費用がかかることがあります。低コストを狙う場合は、既存のフィルタを使うのが得策です。

図5-2 ミキサの基本動作



第6章

フィルタの設計と製作

～ 希望の周波数成分を取り出すテクニック ～

フィルタは、ベースバンド入出力からRF入出力まで、周波数に応じたさまざまな構成のものが使われており、受信回路や送信回路においてとても重要な役割を果たします。

理論式や設計式は専門書にまかせることにして、ここでは、さまざまな素子を使用した単純な構成のフィルタを試作し評価して、高周波のフィルタを身近なものにしましょう。

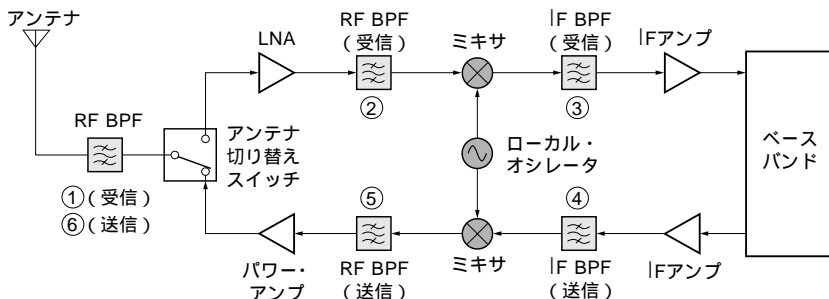
6.1 高周波フィルタの種類と役割

受信回路におけるフィルタの役割

図6・1に示すのは、GHz帯送受信機のブロック図です。受信回路には ~ の、送信回路には ~ のBPFが使われています。

ここで、アンテナ入力からIF回路までの間に挿入されている、 ~ のフィルタの役割を順に説明しましょう。なお、ブロック図にはありませんが、一般にベースバンド回路

図6・1 GHz帯送受信システムにおけるBPFの役割



の帯域制限用にもLPFが挿入されています。

RF BPF

皆さんの周りの空間には、さまざまな周波数の電波が飛び交っています。アンテナには周波数特性があり、これらの電波の中から必要な帯域の信号だけを選択する働きをしていますが、それでも不要な電波を受信してしまいます。

そこでこのBPFで、アンテナから入ってきたさまざまな周波数の信号の中から、受信しようとする周波数帯域の信号を取り出します。

RF BPF

次段のミキサで周波数変換(ダウン・コンバージョン)を行ったときに、IF周波数帯域に妨害信号が入らないように、不要な帯域の周波数成分を除去します。

周波数変換すると、さまざまな周波数の信号が発生し妨害波になります。妨害波の中で最も注意しなければならないのは、イメージ周波数[コラム(p.208)参照]です。ここに使用するBPFは、イメージ周波数帯域を十分に減衰させるものを選ぶ必要があります。

周波数変換したときに、イメージ周波数からも受信信号と同じ周波数のIF周波数を生じますから、BPFがないと、イメージ周波数に存在するノイズなどによって、受信信号が妨害を受けます。

IF BPF

ミキサでの周波数変換によって生じる多くの周波数成分の中から、希望のIF信号だけを取り出します。受信信号の帯域を制限する働きを併せもつこともあります。

送信回路におけるフィルタの役割

IF BPF

次段のミキサで周波数変換(アップ・コンバージョン)を行ったときに、RF周波数帯域に妨害信号が入らないようにします。送信信号の帯域を制限する働きを併せもつ場合もあります。

RF BPF

ミキサでの周波数変換によって生じる、多くの周波数成分の中から、希望のRF信号だけを取り出します。

RF BPF

増幅時にパワー・アンプのひずみによって発生するスプリアス成分と、大電力信号の入力によってアンテナ・スイッチで発生するスプリアス成分が、アンテナから放出されない

第7章

検波回路の設計と製作

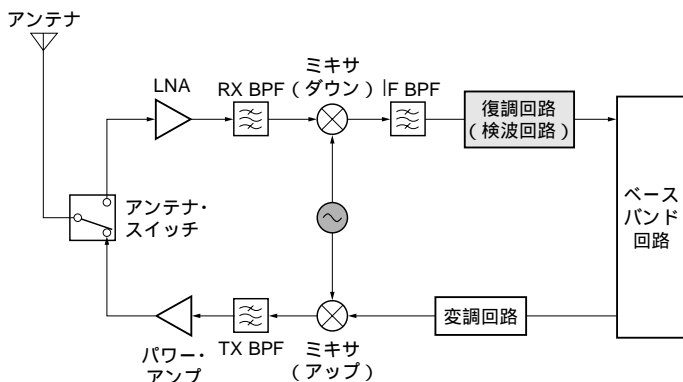
～変調信号を復調するテクニック～

本章では、復調回路の基本形である、ダイオードを使ったGHz帯の検波回路を設計し、実際に製作します。

ここでは、その動作を理解するために、ダイオード、コンデンサ、抵抗、コイルなどを使ったアナログ回路で検波回路を作りますが、無線LANなど、最近の無線データ通信の復調回路の多くは、A・DコンバータでIF信号を取り込むデジタル回路で実現されています。

図7・1に示すように、検波回路は送受信システムにおいてベースバンド回路の前段に置かれており、AM(Amplitude Modulation)変調信号やASK(Amplitude Shift Keying)変調信号、パルス変調信号などから、変調される前の信号を復元します。

図7・1 GHz帯送受信システムにおける検波回路の役割



7.1 検波回路のキー・パーツ「ショットキー・バリア・ダイオード」

PN接合型シリコン・ダイオードとの違い

高周波信号の検波には、ミキサなどにも使われることの多いショットキー・バリア・ダイオード(以下, SBD)がよく使用されます。SBDには、汎用のPN接合型のシリコン・ダイオードと同様に整流特性があります。

▶ 高速動作が得意

PN接合型シリコン・ダイオードでは、P型とN型の半導体を接続して作られており、多数キャリアと少数キャリアによって電荷が運ばれます。一方、SBDは金属と半導体とを接触させてできており、多数キャリアしかないため、とても高速な動作が可能で、高周

コラム お勧めの良書

Microwave Solid State Circuit Design

わからないことがあったり、仕事で困ったとき、とりあえず最初に見る本をもっていますか。きっと、その本にはいろいろなことが載っていて、その人にとって使いやすいはずで

私にもそんな本があります。困ったときにはまずその本で調べ、それでもわからなければほかの本で調べるという手順が、いつの間にかでき上がっていました。

この本には、

- 伝送線路
- マッチング回路/フィルタなどの受動回路
- アンブ/ミキサなどの能動回路
- スイッチ/移相器などのコントロール回路
- 半導体



などととても広範囲のテーマで、わかりやすく説明されています。

Inder Bahl, Prakash Bhartia 著, 914p., US\$250 (amazon.comの 販 価), John Wiley & Sons 刊, ISBN 0-471-83189-1

第 8 章

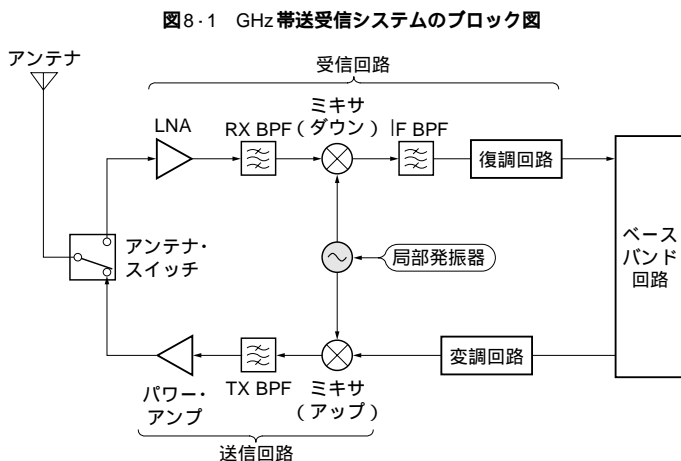
発振回路の設計と製作

～ 発振の原理から VCO の製作まで ～

本章では、図 8・1 に示す GHz 帯送受信回路の局部発振器などを構成する高周波発振回路の設計事例を紹介します。

高周波発振回路には、ディスクリートのトランジスタを利用した LC 発振回路や VCO (Voltage Controlled Oscillator) を利用した PLL (Phase Locked Loop) などが使われます。

特に第 9 章で詳しく説明する PLL は、負帰還技術を応用した回路で、位相比較器、VCO、分周器、ループ・フィルタなどで構成されています。希望の帯域で良好な発振安定度や過渡応答特性を得るためには、ループ・フィルタをうまく設計する必要があります。



8.1 発振回路の基礎

発振とは、増幅器の入力に信号を加えなくても、増幅器が一定の周波数と振幅の信号を出力し続ける状態のことを言います。まずは、この発振がどのような原理で行われるのか簡単に説明しましょう。

高周波増幅器を作ったことのある人なら、一度は異常発振を経験しているでしょう。この異常発振が、発振器の動作を理解するために重要なヒントを与えています。

なぜ発振するのか？

正帰還を応用している

図8-2は、出力の一部を帰還回路を通して入力に戻す帰還増幅器のブロック図です。

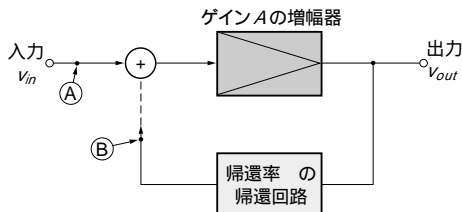
図8-3と図8-4は、図8-2の帰還回路と入力の間を切り離した状態で観測されるA点とB点の波形例です。図8-3の波形は正帰還がかかるときの波形を、図8-4は負帰還がかかるときの波形を表しています。

正帰還回路は、帰還回路からの信号と入力が入力が、同じ極性で加算されるので、入出力間のゲインは増幅器のゲインAよりも大きくなります。したがって、入力信号よりも大きい信号が帰還されて入力に加えられる場合は、入力信号がなくても帰還信号を入力として永遠に信号が出力されます。このように発振回路は、正帰還の技術を応用しているのです。

負帰還は、ひずみや周波数特性を改善する目的でオーディオ・アンプ回路によく使われています。

帰還信号と入力信号が打ち消し合うため、入出力間のゲインは増幅器のゲインAよりも小さくなります。そして帰還量が多いほど入出力間ゲインが低下します。出力信号をそのまま入力に戻す負帰還回路のゲインは1、出力信号を戻さなければゲインはAです。

図8-2 発振回路の基本は帰還増幅器



第9章

PLL の設計と製作

～ 安定した発振信号を得るための制御テクニック ～

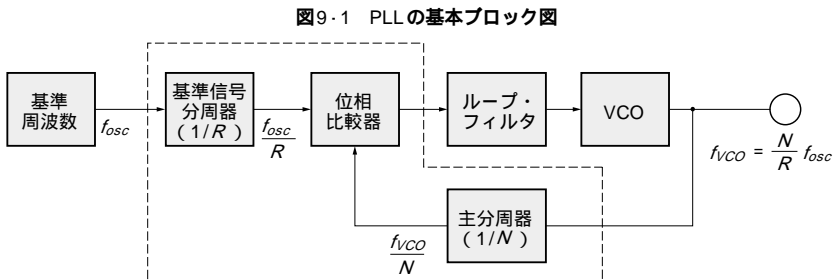
9.1 PLLとは...安定度の高い発振器

負帰還技術を利用した安定度の高い発振回路

第8章で紹介したLC共振回路や伝送線路を使った発振器単体は、温度変化や経時的変化に対する発振周波数が変動しやすく、安定ではありません。発振周波数を安定化するには、入力に発振出力をフィードバックして、安定した基準信号と比較し、制御する必要があります。

図9-1に示すのはPLL(Phase Locked Loop)の基本ブロック図です。

電圧で発振周波数を制御できるVCOや、水晶発振器など、周波数の安定した基準信号と出力信号の位相を比較する位相比較器(PD: Phase Detector)、位相比較器のパルス信号出力を平滑するループ・フィルタ、分周器、基準信号発振器などで構成されています。



PLLを構成する回路エレメント

PLLは、基準信号の周波数(位相)とVCOの出力を比較して、その差分がゼロになるように動作します。基準信号と同程度の精度まで、PLLの出力つまりVCOの出力周波数を安定化できます。

図9・1に示す基準信号源には、水晶発振器がよく使われます。さらに安定度が要求される場合は、温度補償された水晶発振器(TCXO)が使われます。

VCOの発振出力信号は、カウンタで分周されて位相比較器に入力されます。位相比較器には、基準信号も一緒に加えられており、二つの信号の位相ずれに比例した誤差信号を出力します。

ループ・フィルタは、位相比較器から出力されるパルス状の誤差信号を直流に変換し、VCO入力に与えます。後述のようにループ・フィルタの定数は、基準信号の漏れによるスプリアス、位相雑音特性やロックの収束特性などに大きく影響するので、用途に合わせ

表9・1 GHz帯で使えるPLL IC

型名	メーカー名	最大動作周波数 [GHz]	設定方法	最大位相比較 周波数 [MHz]	
ADF4112	アナログ・デバイス	3	S	55	
ADF4113		4	S	55	
LMX2325	ナショナル セミコンダクター	2.8	S	10	
LMX2326		2.8	S	10	
PE3226	Peregrine	2.2	S, P	20	
PE3239		2.2	S	20	
PE3240		2.2	S	20	
PE3335		3	S, P	20	
PE3339		3	S	20	
PE3340		3	S	20	
PE3341		2.7	S, EEP	20	
PE3342		2.7	S, EEP	20	
SP5659		Zarlink Semiconductor (旧GEC Plessey)	2.7	S	2
MB1515		富士通	2.5	S	-
MB15E06	2.5		S	8	
MB15E07	2.5		S	8	
MB1508	2.5		S	-	
SA8016	フィリップス	2.5	S	4	
SA8027		2.5	S	4	