

# JAI A

## 初心者でもわかる！？ SDR(ソフトウェア無線)大研究

平成30年 8月 25日

JAI A技術委員会

## --- 目次 ---

1. SDRとは
2. ラジオの進化
3. SDRソフトウェア
4. SDRの方式
5. SDRの利点・欠点
6. デジタル信号処理の基礎理論  
サンプリング定理・直交ミキサ・  
デジタルフィルタ・高速フーリエ変換・復調
7. DSP・SDR開発ツール
8. SDRの未来予測



# SDRとは

SDR(Software Defined Radio)「ソフトウェア無線」は、周波数帯や変調方式などが異なる**さまざまな無線通信を、1台の無線機のソフトウェアを書き換えることで対応する技術**です。



ICOM社  
IC-R30



JVCケンウッド社 TH-D74



AOR社  
AR-DV1



AOR社  
PERSEUS(ペルセウス)



ICOM社 IC-7300



ICOM社 IC-R8600



ALINCO社  
DX-SR9



SDRと言えは多くの人が **dongleタイプ** (Dongle: パソコンに接続する小さな装置) や小型ケースをパソコンに**USB接続してSDRソフトウェアを使用するタイプ**を思い浮かべるが...



写真提供: JF7ELG木幡栄一氏

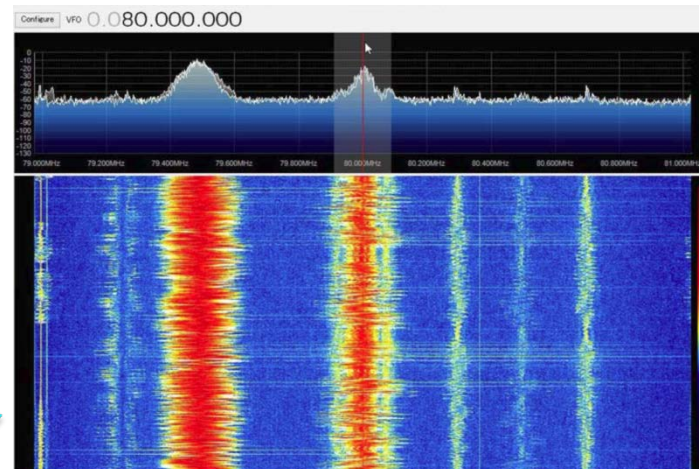
## SDRの本来の意味

移動体通信や業務無線機では、ソフトウェアの変更で様々な通信方式に対応する方式を意味しているが、アマチュア無線では(この講演では)ソフトウェアで無線信号を処理していれば書き換えの可否にかかわらずSDRと呼ぶことにします。



AOR社 PERSEUS(ペルセウス)を  
SDRソフトウェア搭載のパソコンに接続

スペクトラム・アナライザ(上画面)



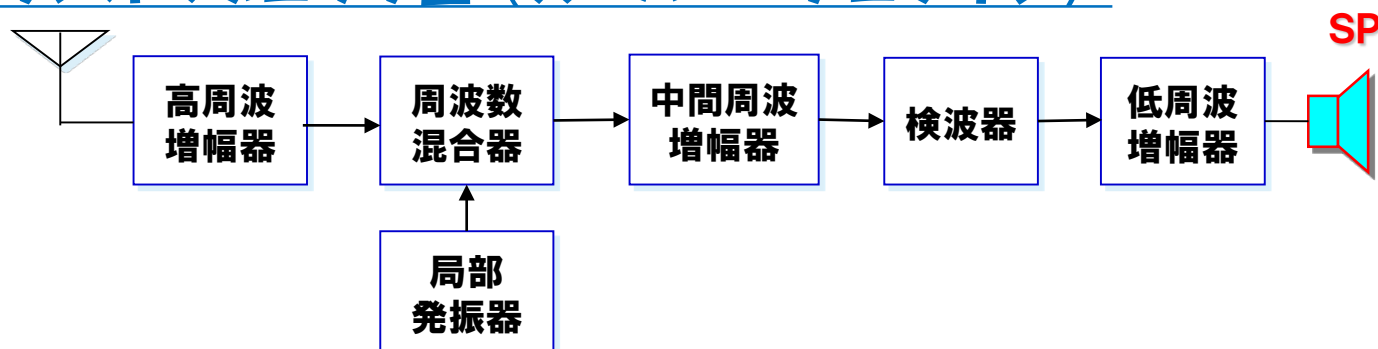
ウォーターフォール(下画面)

周波数

## 従来のラジオとSDRの構成はどのように違うか？

従来は、トランジスタやコイル、コンデンサ等の部品で構成された無線機器を、**デジタル信号処理**に置き換えたもの。

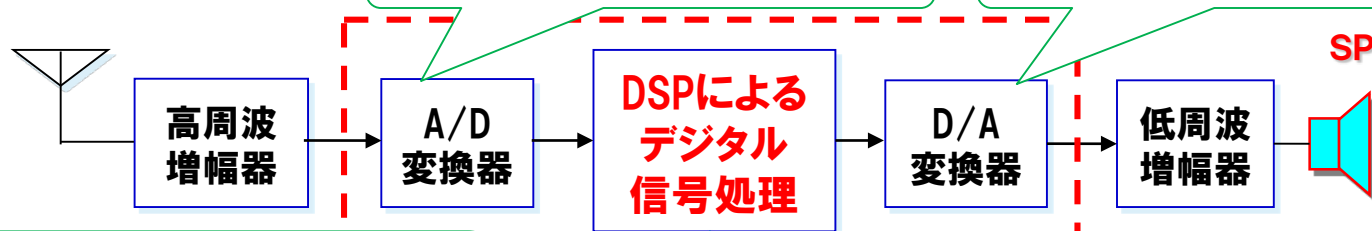
### 従来のラジオのブロック図 (スーパーヘテロダイン)



### SDRのブロック図

アナログ→デジタル変換器

デジタル→アナログ変換器



**DSP (Digital signal processor)**とは  
非常に高速な計算ができる  
CPU(マイクロプロセッサ)

ソフトウェア

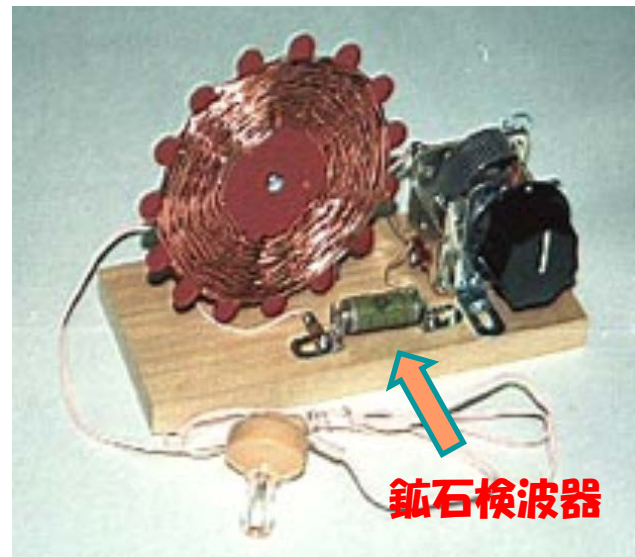
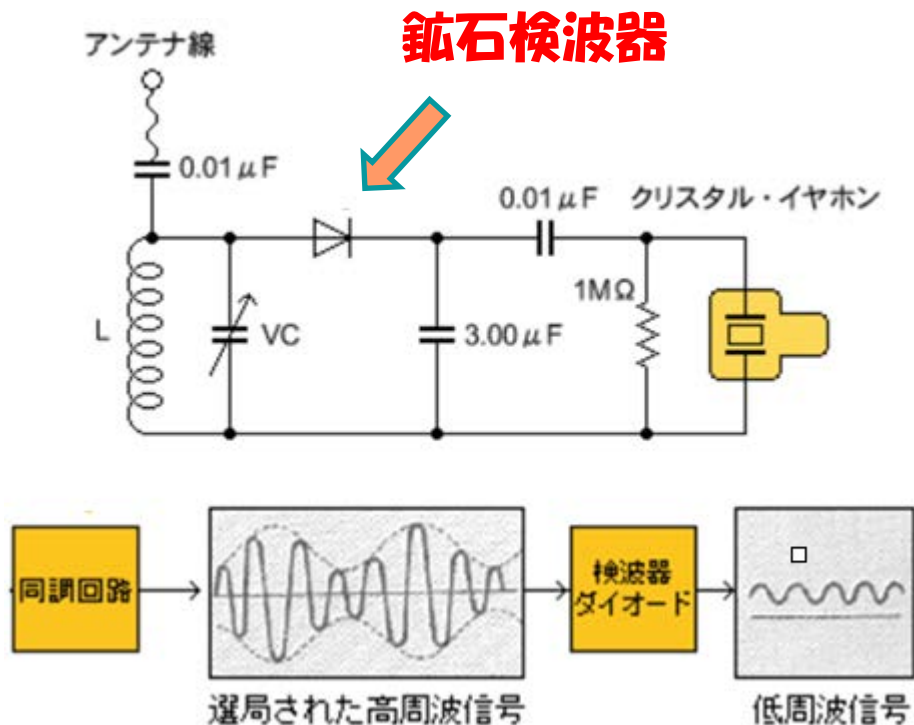
ソフトを変更すれば無線機の  
機能を変更できる。

# ラジオの進化



## 鉱石ラジオ

天然鉱石の『方鉛鉱』や『黄鉄鉱』、『紅亜鉛鉱』等を検波器に使用したラジオ。



FOXトーンを使った鉱石ラジオ

みの虫クリップ

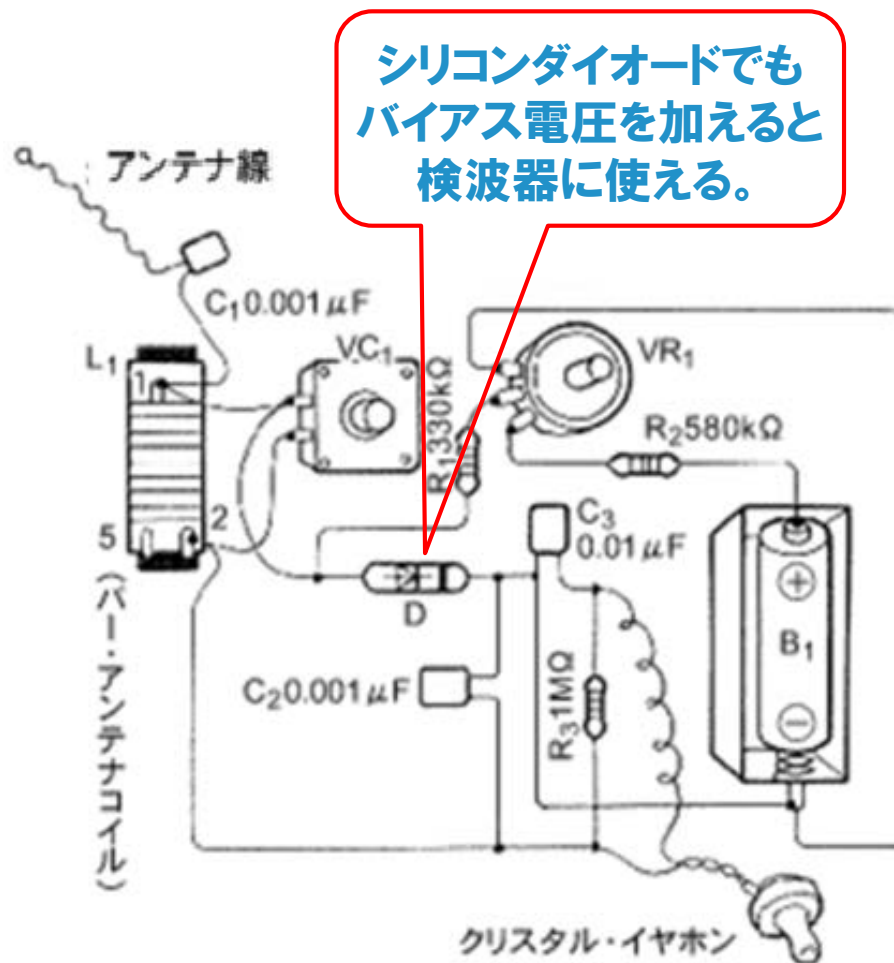
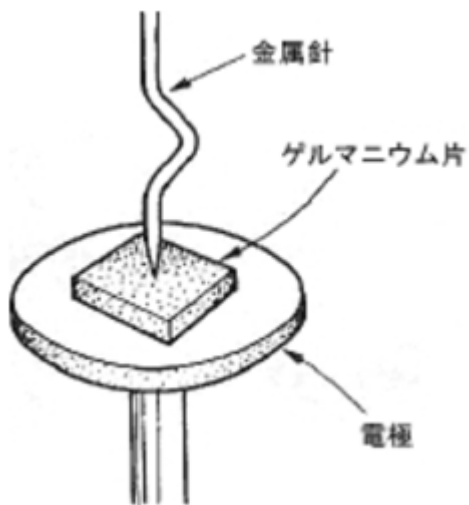


簡単な鉱石検波器の作り方

出典元: 週刊BEACON <https://www.icom.co.jp/beacon/>

## ゲルマニウム・ラジオ

天然鉱石の検波器に感度の良いゲルマニウム・ダイオードが使われたが、当初は大変高価で、貴重品だった。



シリコンダイオードでも  
バイアス電圧を加えると  
検波器に使える。

ゲルマニウムダイオードの構造

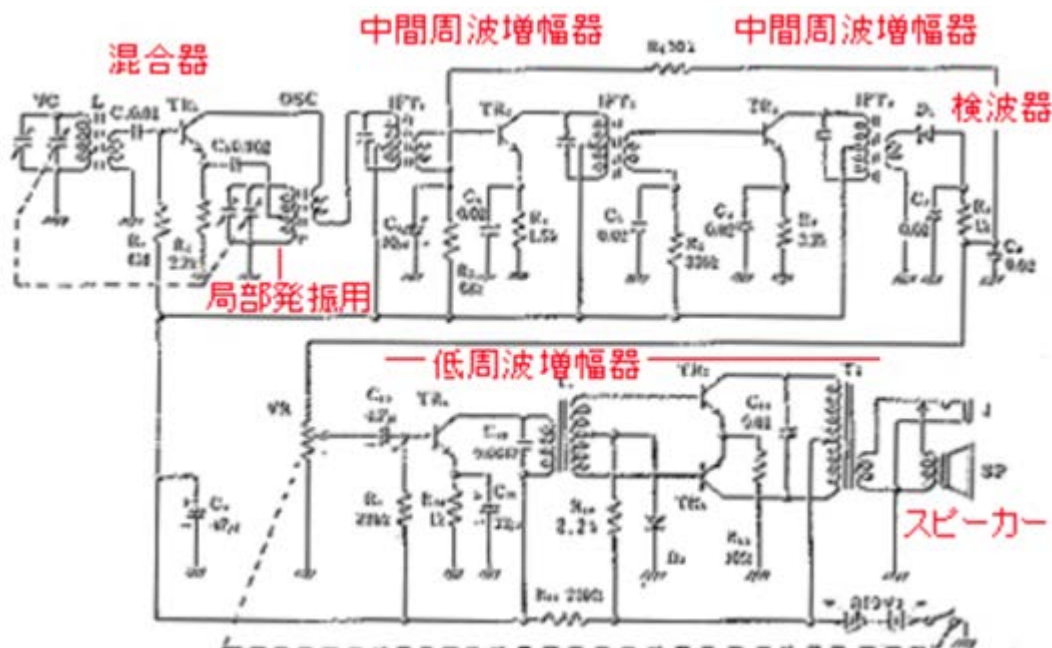
シリコンダイオードの鉱石ラジオ

出典元: 週刊BEACON <https://www.icom.co.jp/beacon/>



## トランジスタ式ラジオ

6石(トランジスタの数)スーパー  
ヘテロダイン方式ラジオ回路図



トランジスタラジオキット  
チェリー製 MODEL CK-606



日本初のトランジスタラジオ  
SONY TR-55(1955年)



出典元: 週刊BEACON <https://www.icom.co.jp/beacon/>  
[https://www.sony.jp/radio/radio\\_sony/history/](https://www.sony.jp/radio/radio_sony/history/)

**DSPラジオ (2011年7月号のラジオライフの記事)****DE1126 (DEGEN)**

DSP (Digital Processor: デジタル信号に対してさまざまな処理をリアルタイムで施すチップ) 搭載。隣接周波数のカブリを抑える。

受信周波数: 520~1710kHz (AMラジオ放送 10kHzステップ選択時)

522~1710kHz (AMラジオ放送 9kHzステップ選択時)

2300~23000kHz (短波放送)

64.0~108.0MHz (FMラジオ放送)

76.0~90.0MHz (FMラジオ放送)

87.0~108.0 MHz (FMラジオ放送) ※メニューで受信範囲選択

電源: 専用リチウムイオン電池

重さ: 121g (電池含む)

問い合わせ先:

order@world-musen.com

http://www.world-musen.com/

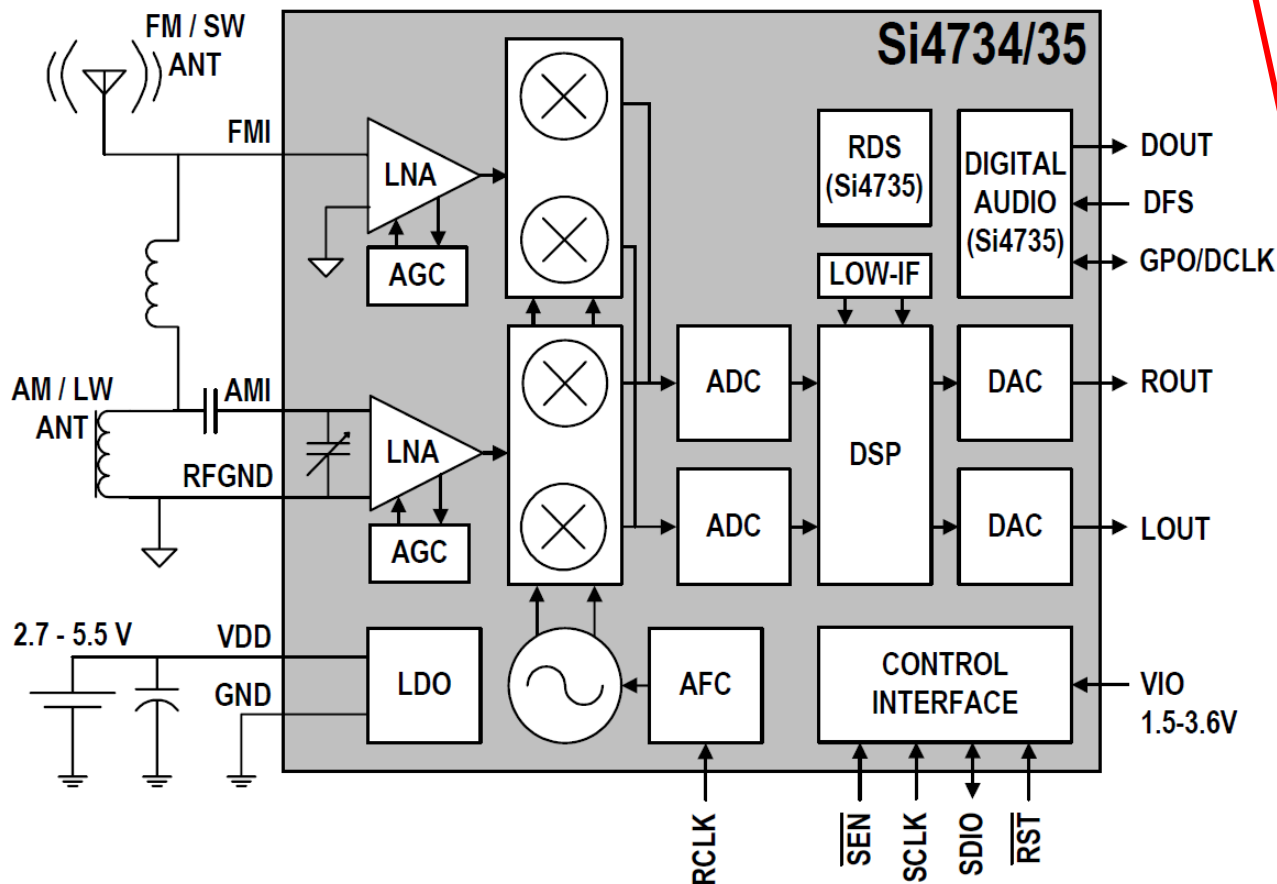


テキストファイル表示機能「EBOOK」。日本語の歌詞ファイルも表示できる



**DSPラジオ(SDR)**

1チップのDSP内蔵ICが搭載される。



受信回路はここだけ



裏フタを開けた

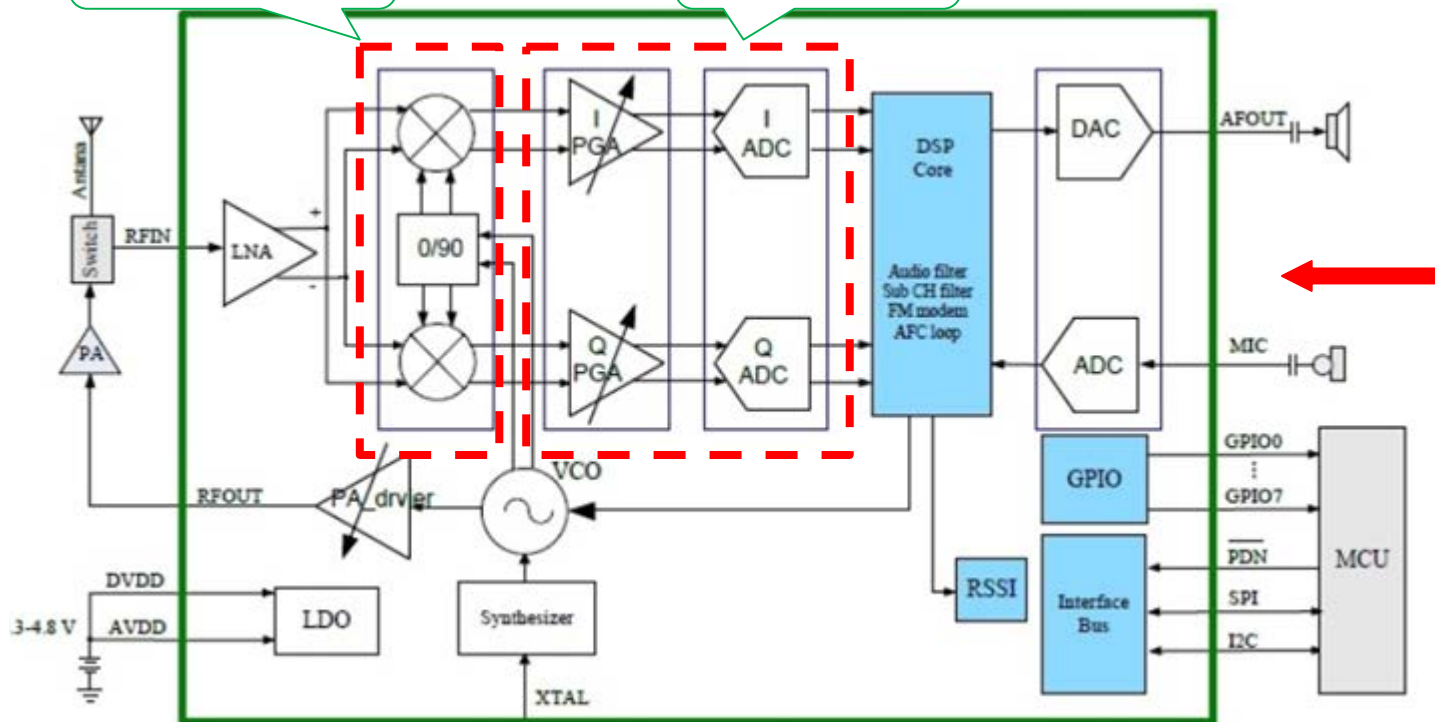
このICはアマチュア無線機のラジオICとしても使われている。

## <参考> 特定小電力アナログトランシーバーの傾向

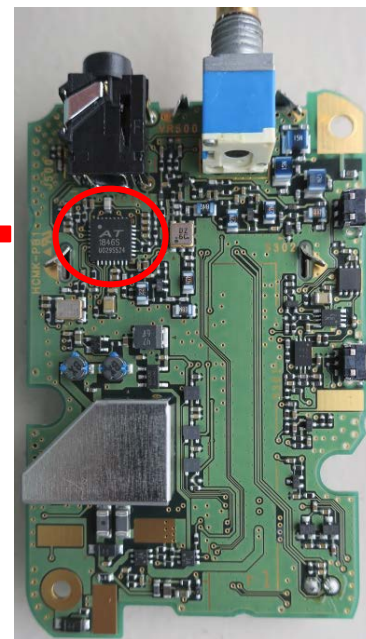
今までは個別の部品を使用していたが、受信だけでなく送信も含め1チップに集積されたICが採用されるようになった。

直交ミキサ

I/Q信号



JVCケンウッド社  
UBZ-M31/M51



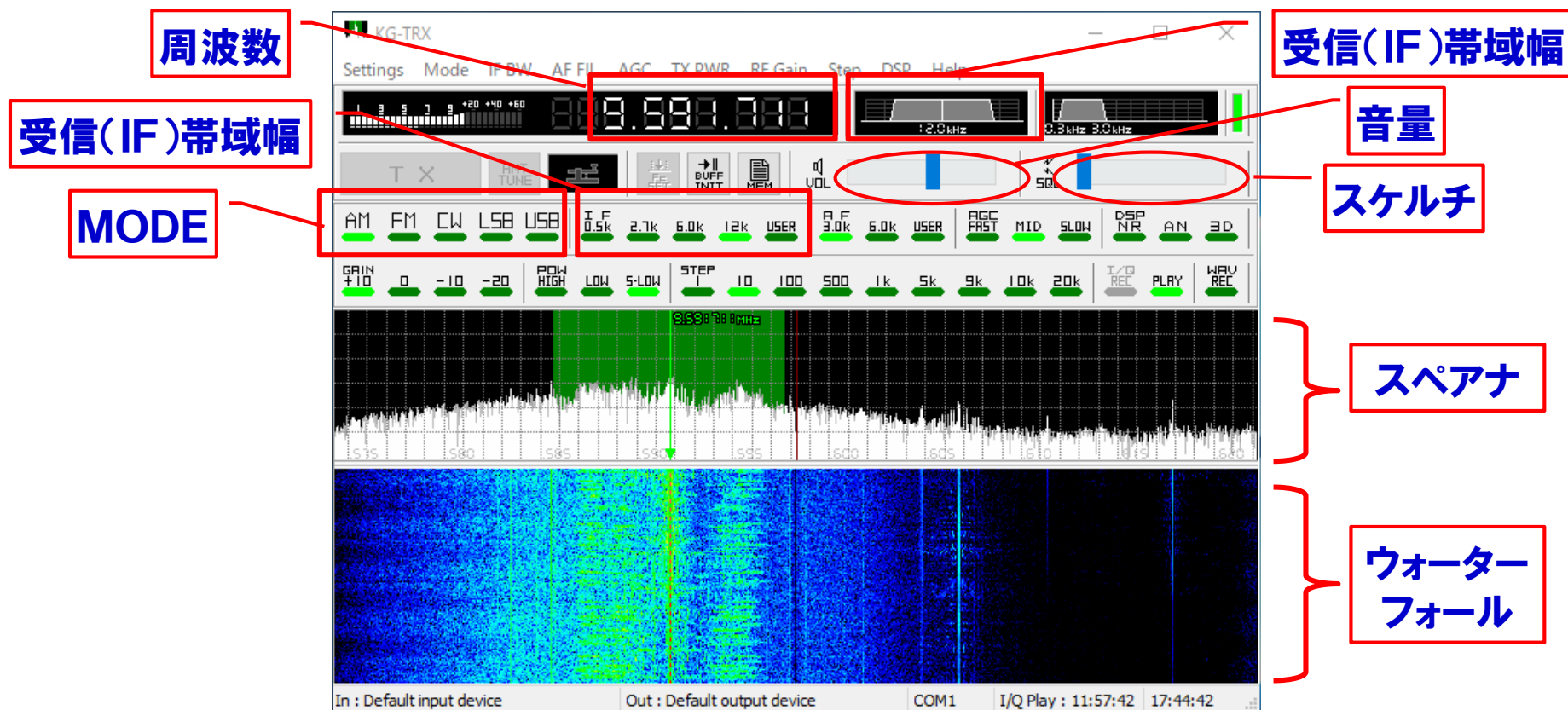
直交ミキサとI/Q信号の画期的な発明により、SDRが飛躍的に進化できた。

# SDRソフトウェア



## 送受信のSDRソフトウェア <KG-TRX>

ALINCO社のSDRトランシーバーDX-SR9用に開発されたSDRソフトウェアKG-TRXの画面。(シンプルで直感的にわかりやすいソフト)



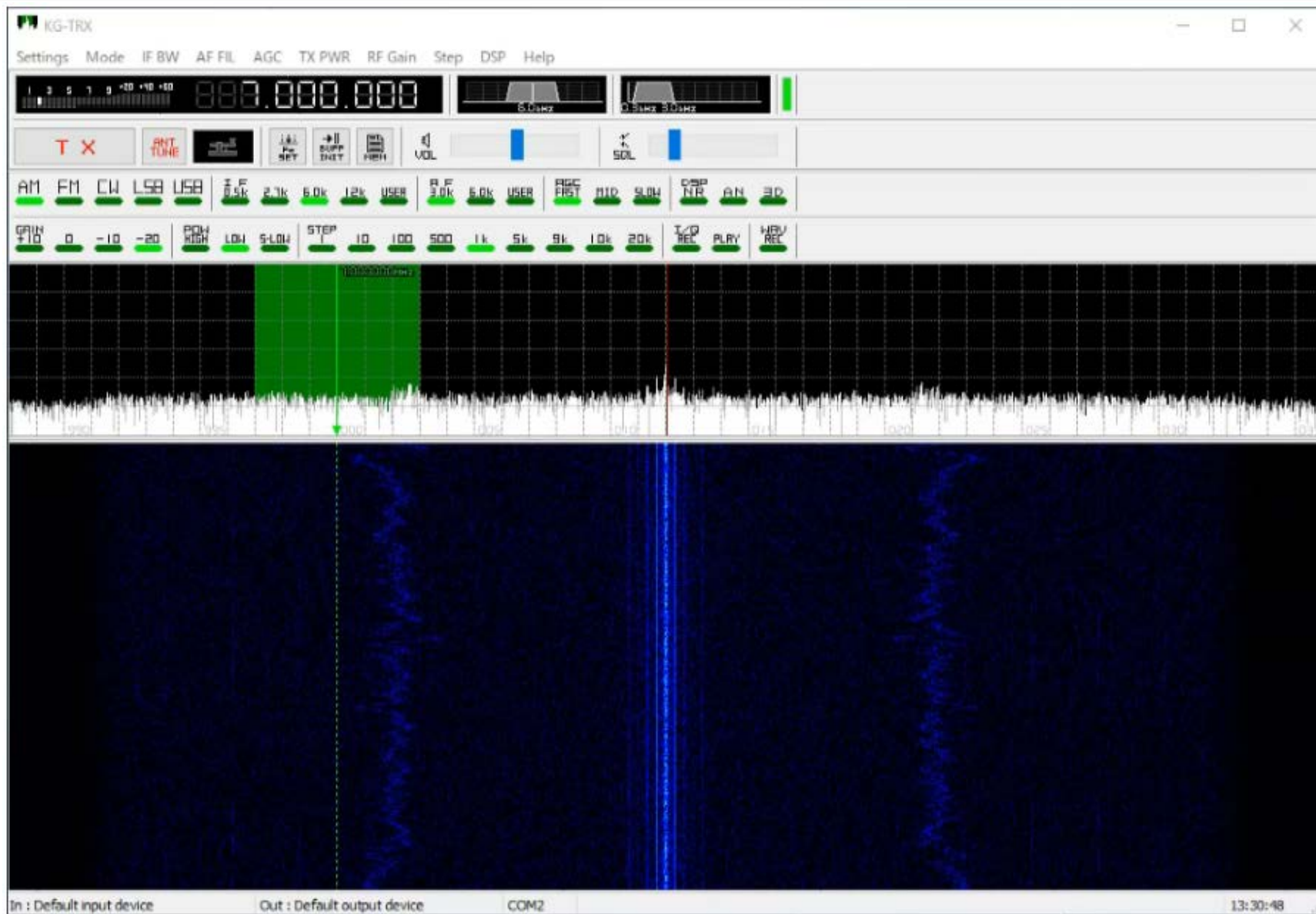
SDRソフトのダウンロード <http://www2.plala.or.jp/hikokibiyori/soft/kgtrx/>

## ALINCO社 SDRトランシーバ DX-SR9と PC の接続例

市販オーディオケーブル3.5mmを使用し、I/Q信号をL/Rラインを使用して接続する。

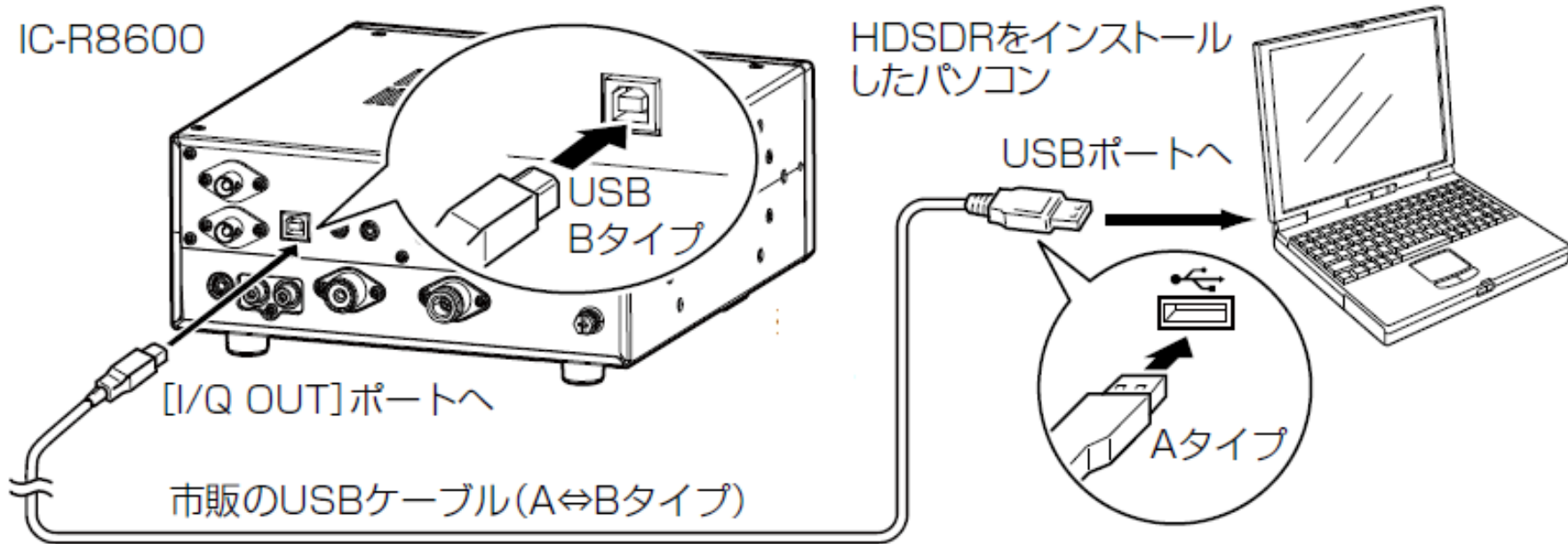
I/Q信号を録音すれば  
帯域全体を再生できる。



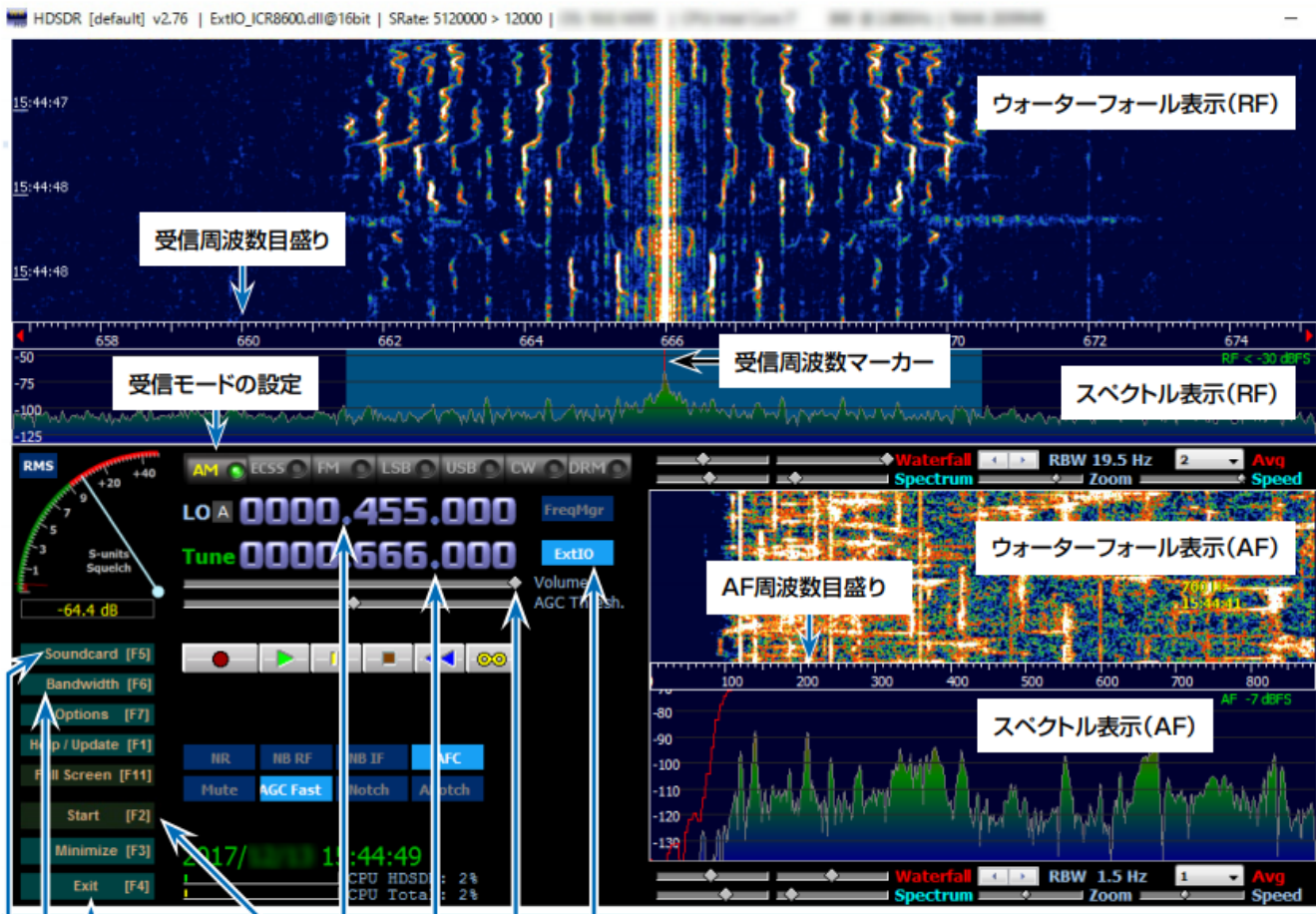


## IC-R8600とPCの接続方法

IC-R8600は、I/Q信号と無線機の周波数を制御する信号が背面の[I/Q OUT]ポートから入出力できる。**1本のケーブルでパソコンのUSBポートに接続することにより**、パソコンにインストールされたSDRソフトウェア(HDSDR)上で、受信信号処理と周波数制御ができる。



## HDSDRの 操作について



メーカーブースで  
デモを  
見てください。

- [F4] リモート解除
- [F6] 受信モードに必要な周波数帯域幅を「Output」で選択
- [F5] 受信音出力先選択
- [F2] I/Q信号の出力開始/停止
- 音量調整
- Tune(受信周波数) HDSDRの周波数設定
- LO(発振周波数) ICR8600の周波数設定
- ExtIO ICR8600のI/Q設定画面(P.2~P.3) クリックすると、下記の項目が表示されます。
  - ◎Sampling Rate, Bit
  - ◎ANT、P.AMP、IP+、ATT、HF BPF、RF Gain
  - ◎USB Dial(別売品：RC-28用)



## PC上で動作する代表的なSDRソフトウェアの例

### HSDR (High Definition Software Defined Radio)

<http://www.hdsdr.de/>

高機能で良く使用される代表的なフリーのSDRソフトウェア。

### Dream (AM/DRM Receiver)

<https://sourceforge.net/projects/drm/>

短波帯を中心としたデジタルラジオ (Digital Radio Mondiale) によりFM放送並みの高音質の放送を受信できることで知名度の高いフリーのSDRソフトウェア。(HSDRでもDRMは受信できる。)

### CW Skimmer

<http://www.dxatlas.com/Download.asp>

SDRソフトと組合せ使用することにより、**広範囲で受信したモジュール信号をリアルタイムにデコードし、運用しているコールサインを一目で見れるように表示してくれるシェアウェアである。**

# SDRの方式

## SDRの方式について

大きく次の3方式に分けられる。

### (1)ダイレクトコンバージョン方式(ゼロIF方式)

一般的にSDRと言うとこの方式。スマホ、Bluetooth、テレビ、**DSPラジオ、特定小電力アナログ無線機**等に広く使われている。

### (2)ダイレクトサンプリング方式

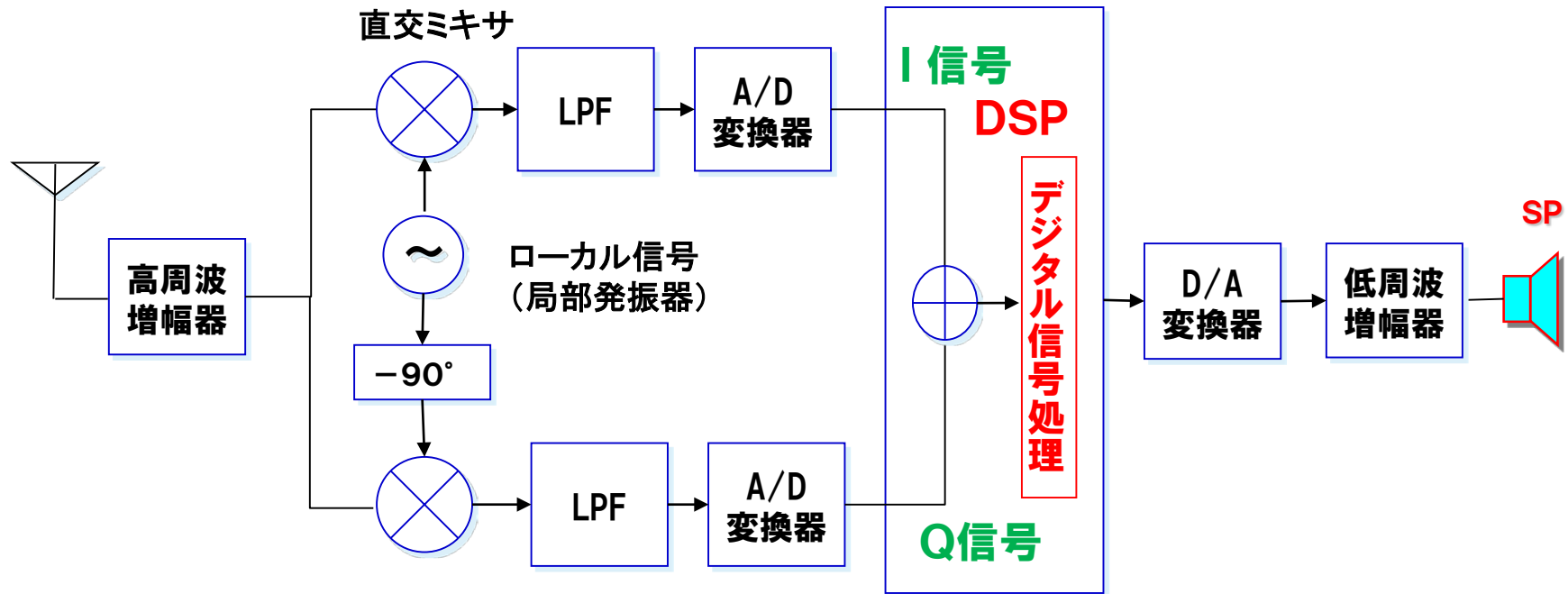
HF帯無線機や一部の無線機に使用される。**信号を直接A/D変換**するため数十MHzまでの低い周波数で使用される。

### (3)ヘテロダイン方式

スーパーヘテロダイン方式の**IF信号または検波信号を信号処理**する方法。一般的なHF帯無線機、D-STAR無線機、デジタル簡易無線、業務無線等に使用される。



## ダイレクトコンバージョン方式(ゼロIF方式)

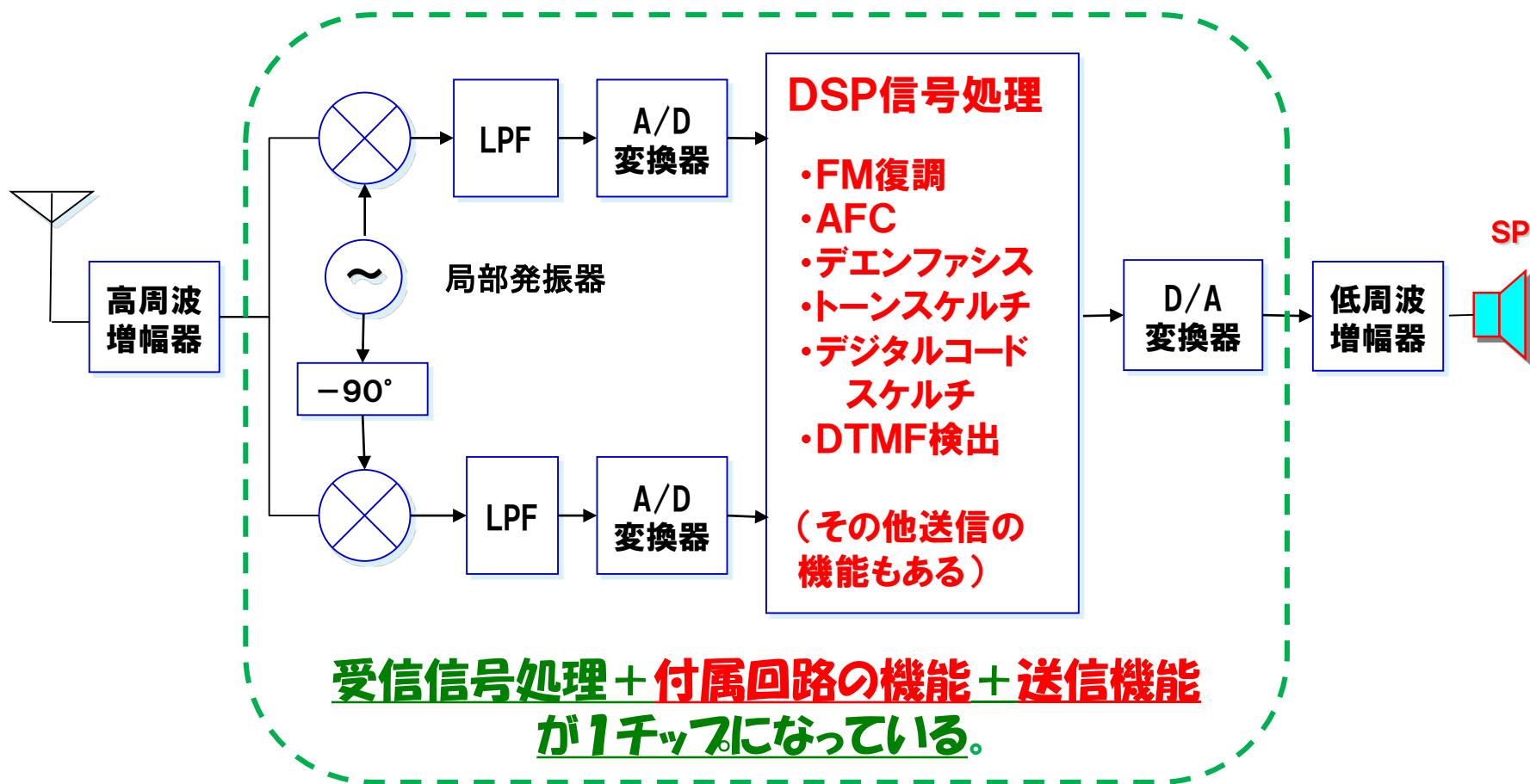


### 直交ミキサ

2つのミキサ(周波数混合器)に $90^\circ$ 位相をずらした局部発振信号を入れる。ミキサから出力されたI/Q信号を合わせると**イメージ混信**が除去できて受信したい信号が取り出せる画期的な方式。

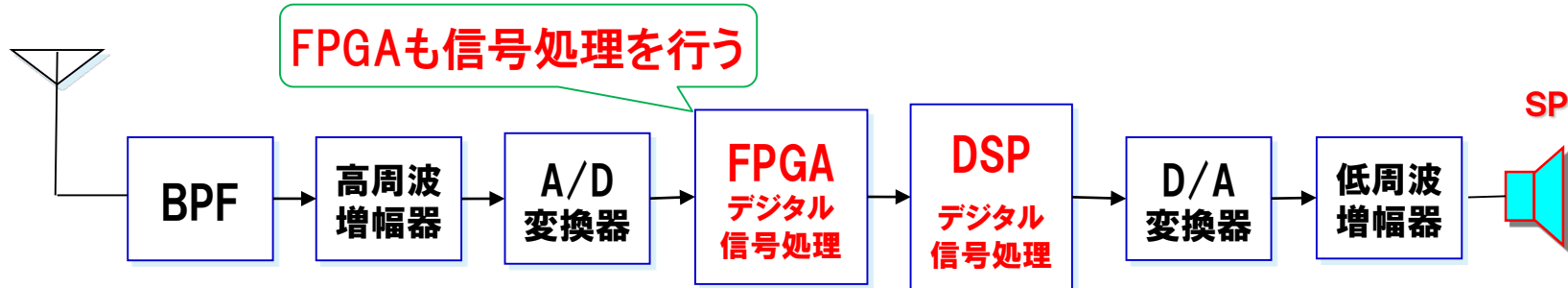
## ダイレクトコンバージョン方式 特小アナログトランシーバの場合

DSPの中ではどのような信号処理が行われているか？



## ダイレクトサンプリング方式とは？

HF帯のように周波数が低い場合、**受信信号を直接A/D変換してFPGAとDSPでデジタル信号処理を行う。FPGAで高速処理することにより、更に多彩な信号処理とDSPの負荷を軽減できる。**

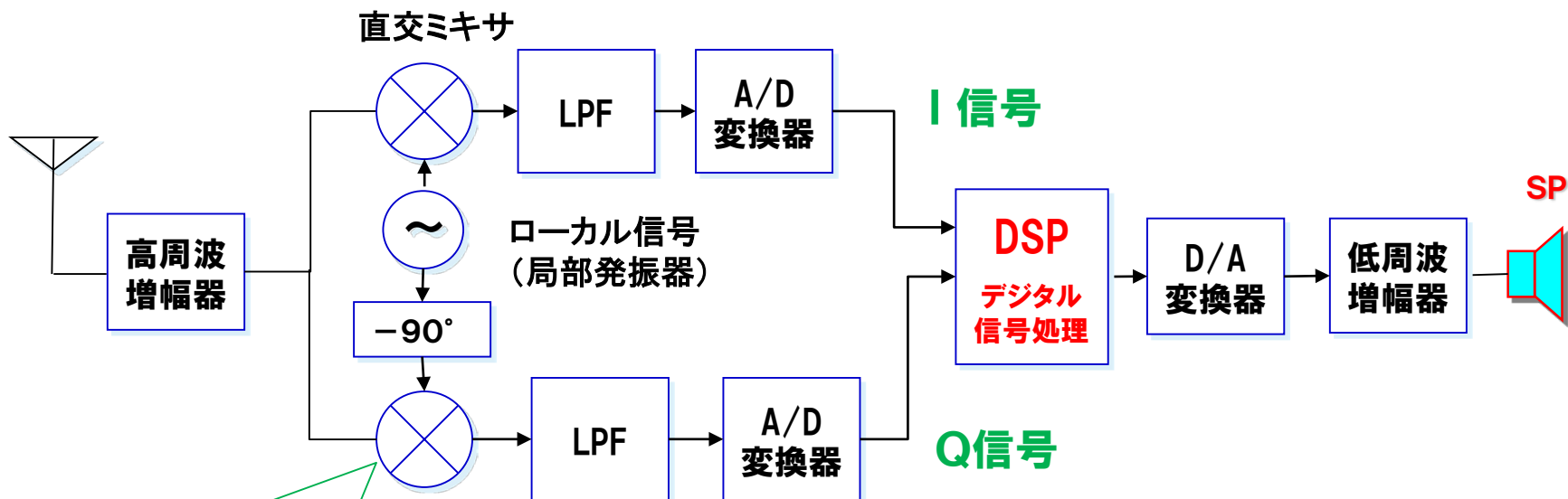


BPF: Band-Pass Filter (帯域フィルタ)

FPGA: Field-Programmable Gate Array (ソフトでロジック回路を構成できる部品)

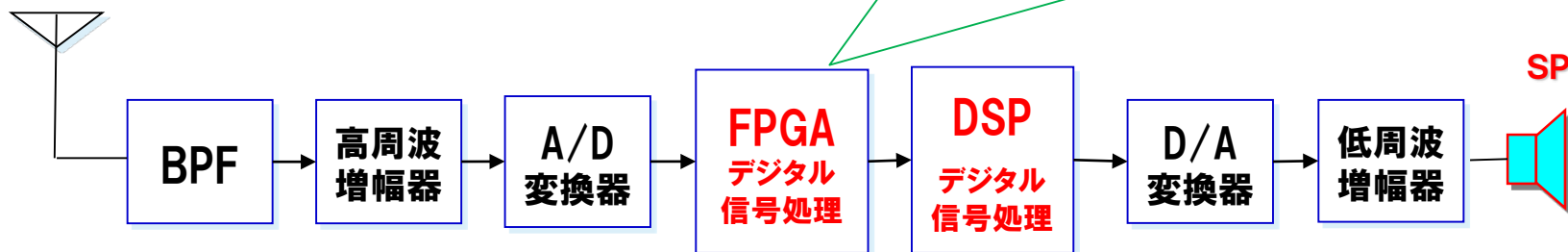
受信周波数はA/D変換器のサンプリング周波数の半分以下となる。受信信号を直接デジタルに変換して信号処理を行うため**アナログ・デバイスの非直線性の影響は皆無となり、イメージ妨害がなく混変特性の良い受信や、高速バンドスコープが実現できる。**

## ダイレクトコンバージョン方式とダイレクトサンプリング方式



アナログ直交ミキサを使っている

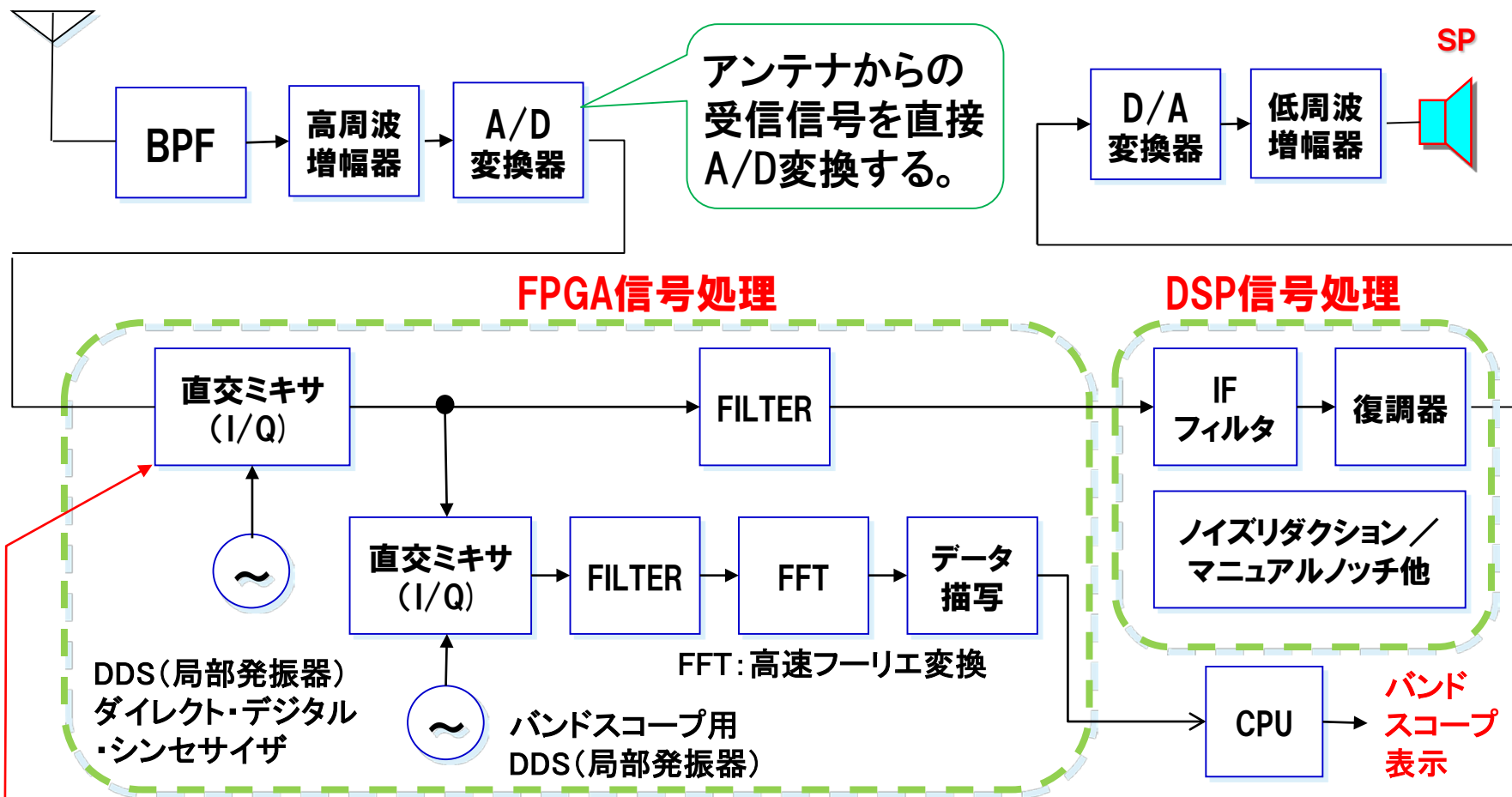
FPGAの中でデジタル直交ミキサを使っている



アナログ・デバイスの非直線性の影響は皆無となっている。

## ダイレクトサンプリング方式 IC-R8600の場合

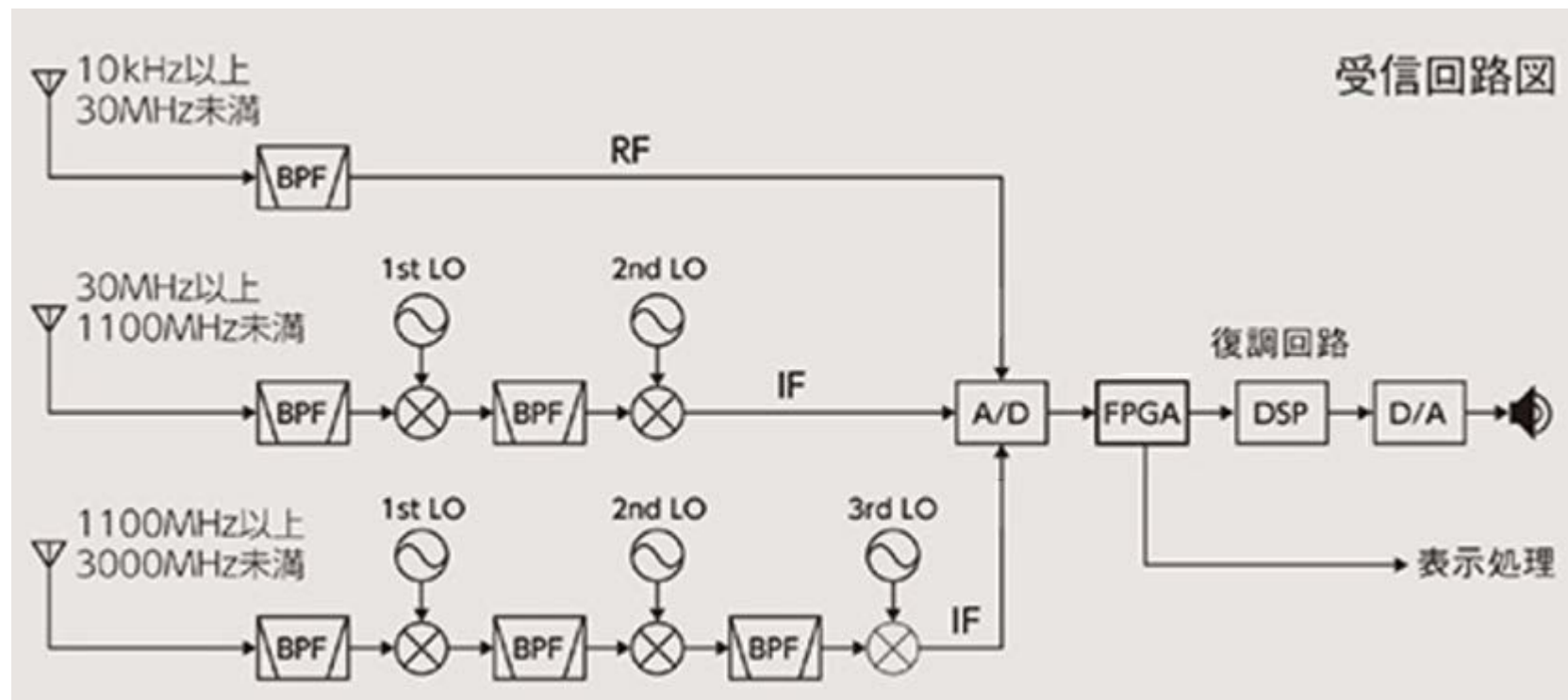
FPGA・DSPの中ではどのような信号処理が行われているか？



直交ミキサで変換するので、ダイレクト・サンプリング・スーパーヘテロダイン方式とも呼ばれる。

## IC-R8600 広帯域受信機(10kHz~3GHz)

3GHzまで受信可能な広帯域受信機。  
30MHz以上の高い周波数はダウンコンバートしてA/D変換で取り込めるようにしている。



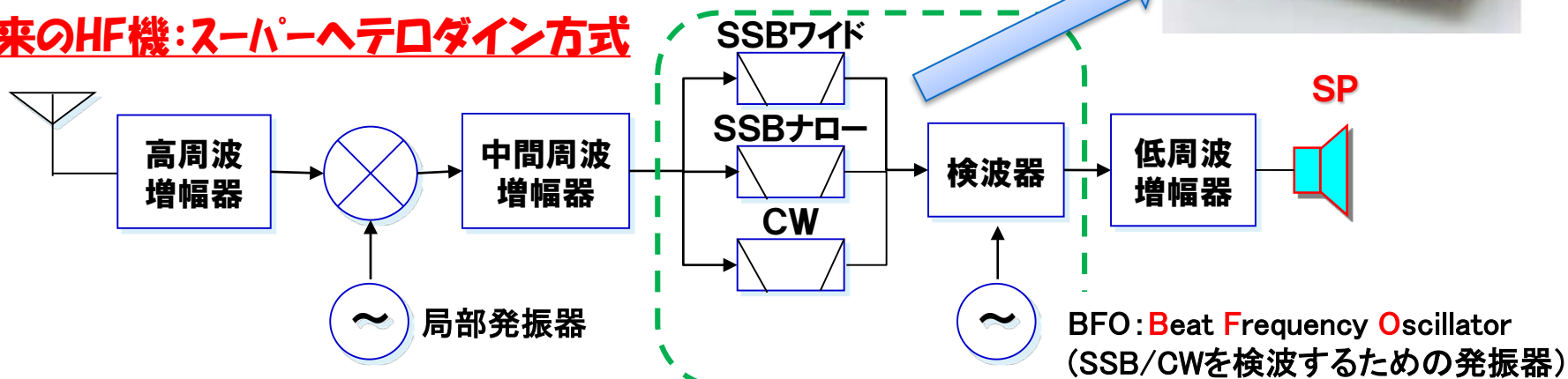
## ヘテロダイン方式

従来のHF機はSSB/CWフィルタに右写真に示すクリスタルフィルタを使っていたが、非常に高価なものであった。最近ではDSPによる信号処理に置き換えるとともに、検波等も行っている。

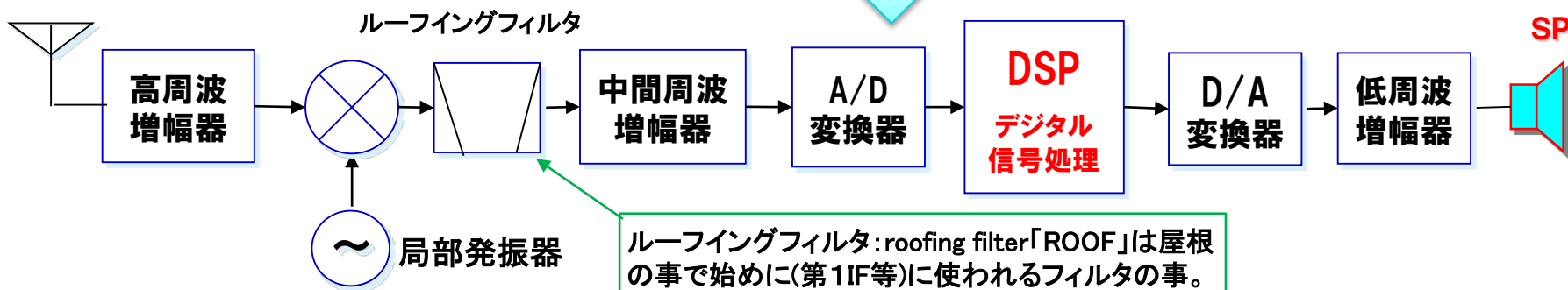
クリスタルフィルタの外観



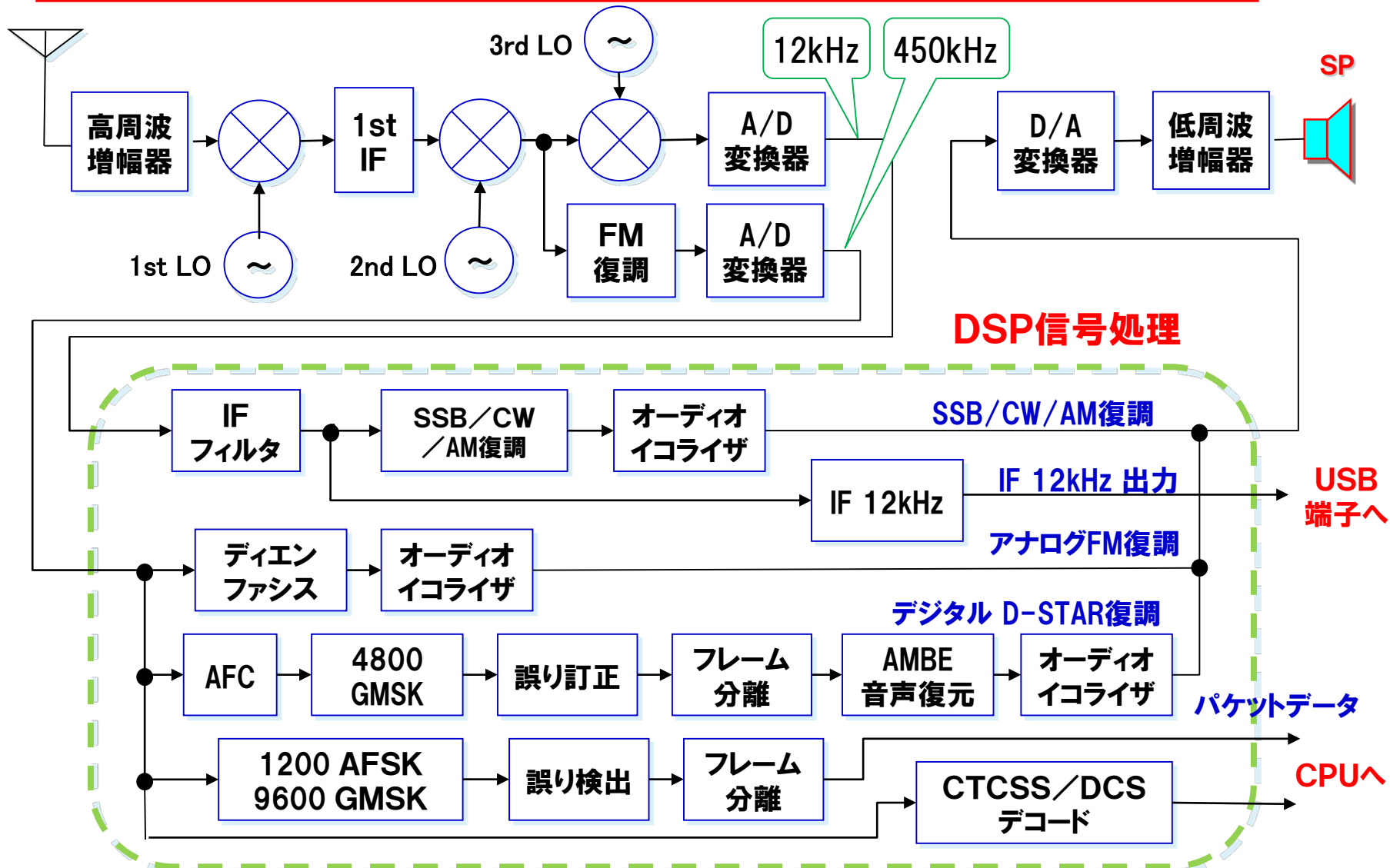
### 従来のHF機:スーパーヘテロダイン方式



### 最近の一般的なHF機:ヘテロダイン方式



## ヘテロダイン方式: TH-D74(Bバンド: 広帯域バンド)の場合

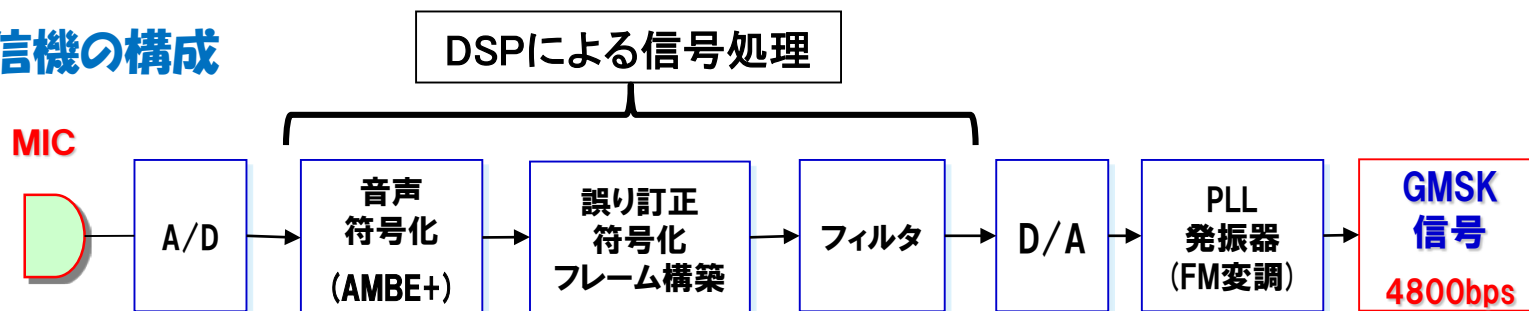




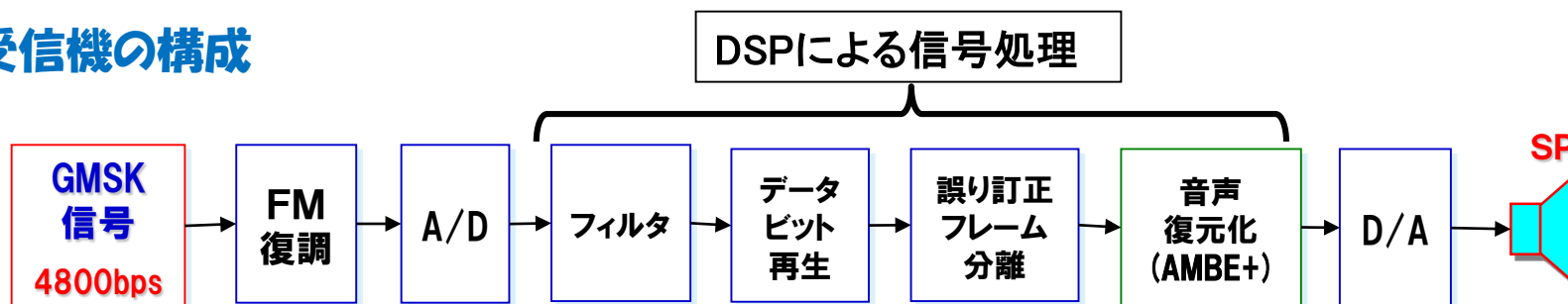
## D-STAR無線機の信号処理

D-STAR無線機の「デジタル変調方式」=「SDR」ではない。しかし、デジタル変調を行うために、音声をデジタルデータに変換する音声符号化と、FM復調信号からデジタルデータを再生するデジタル信号処理を行っている。

### 送信機の構成



### 受信機の構成



部分的であるがデジタル信号処理を行っているのでSDRである。

# SDRの利点・欠点

## SDRの利点・欠点について

### ・ダイレクトコンバージョン

受信信号を直接ベースバンド(低周波信号)に変換できるため、**イメージ受信がなく、受信可能周波数範囲や受信帯域が広帯域にできる。**選択度はベースバンドの低周波フィルタで決まるため、高価な水晶フィルタ等は必要ない。精度の高いI/Qチャンネル間のバランスが必要であるが、DSPのデジタル信号処理により容易にできるようになった。

### ・ダイレクトサンプリング

受信信号を直接A/D変換器でデジタルに変換して信号処理を行うため**アナログ・デバイスの非直線性の影響は皆無となり、高い混変調特性を持つ受信性能が得られる。**また広帯域で取り込めるため広帯域で高速なバンドスコープが実現できる。受信周波数はA/D変換器で決定される。

SDRの信号処理は**部品の温度特性に依存しないため良好な性能が得られる。**また受信信号が強すぎるとA/D変換器でオーバーフローが発生し、デジタル信号への正常な変換ができなくなる場合があるので要注意。

## 各方式の利点・欠点比較表 (講演者の個人的な意見です)

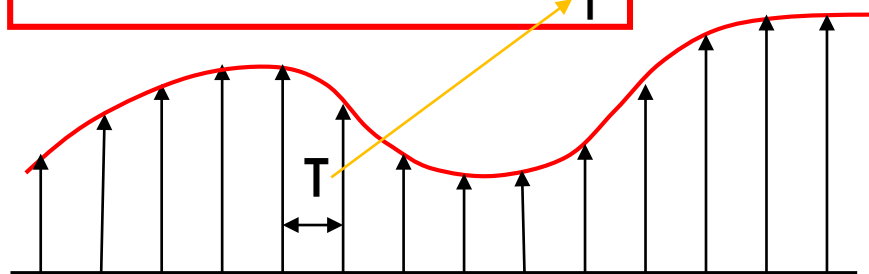
	項目	SDR方式			従来方式
		ダイレクトコンバージョン方式	ダイレクトサンプリング方式	ヘテロダイン方式	スーパーヘテロダイン受信機
1	受信感度	○	◎	◎	◎
2	隣接チャネル感度抑圧	△	○	○	◎
3	相互変調特性	△	◎	○	○
4	ブロッキング特性	○	◎	◎	◎
5	イメージ受信(スプリアス)	◎	◎	○	○
6	選択度	○	◎	◎	◎
7	帯域幅の自由度	◎	◎	◎	△
8	帯域幅の広帯域化	◎	○	○	△
9	受信範囲の広帯域化	◎	△	○	○
10	汎用性・拡張性	◎	◎	○	△
11	コスト	◎	△	△	○
12	消費電力	◎	○	○	○

# デジタル信号処理 の基礎理論

## アナログをデジタルに変換する⇒サンプリング周波数

アナログ信号をデジタルのデータに変換するときは、ある間隔で電圧を測定し、数値にする。この間隔をサンプリング周期と言い、その逆数をサンプリング周波数と言う。

$$\text{サンプリング周波数(Hz)} = \frac{1}{T}$$



➡ A/D 変換器 ➡

電圧値

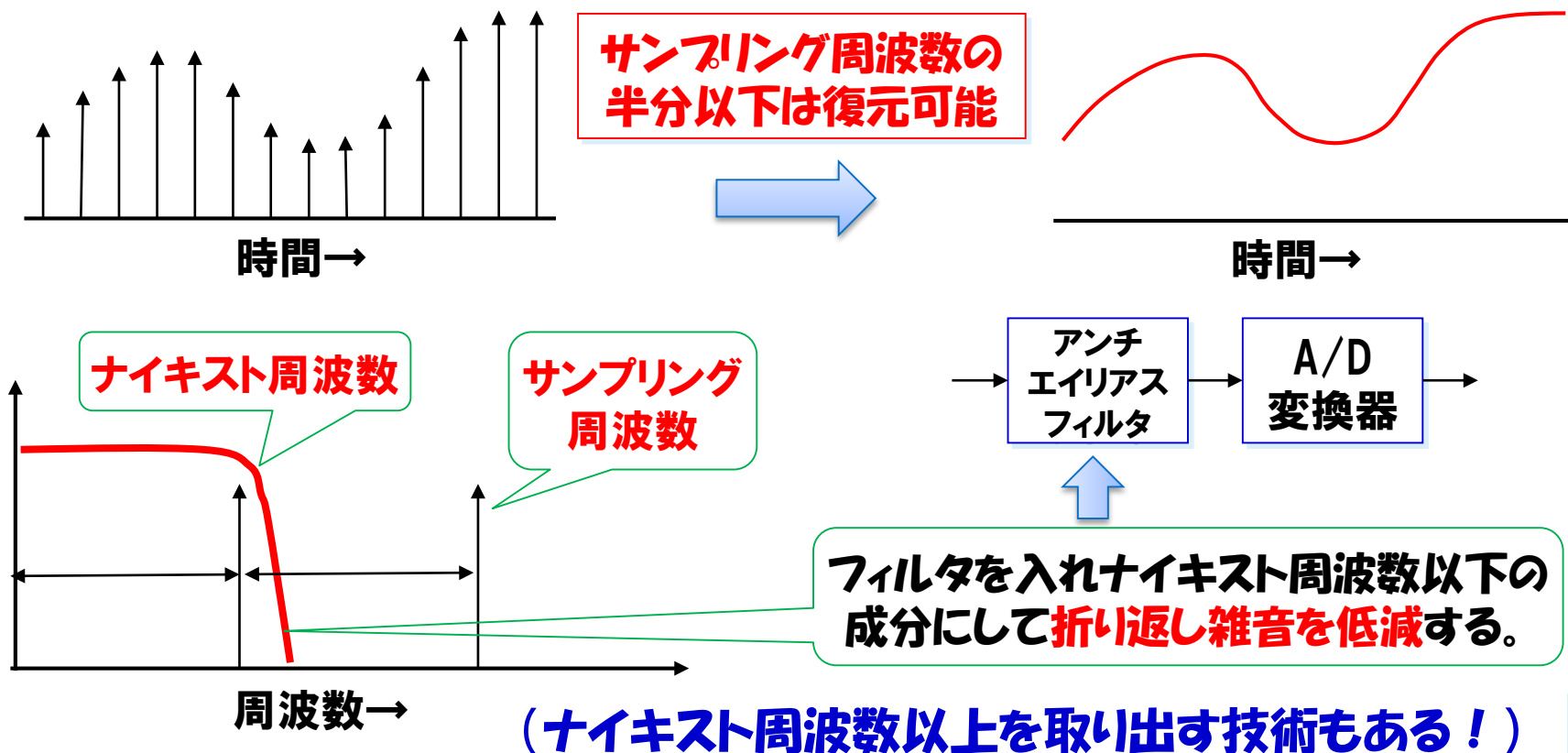
```

00110000111000
  ↓
00110000111101
  ↓
00110001000011
  ↓
00110001001011
  ↓
00110001001110
  ⋮
  
```

信号名	サンプリング周波数	備考
電話 (ISDNなど)	8kHz	無線機の音声もほぼ同じ
CD	44.1kHz	
DVD	48kHz	PCのサウンドカードもこれが多い
IC-R8600	122.88MHz	高くして折り返し雑音に有利な構成

## サンプリング定理とナイキスト周波数

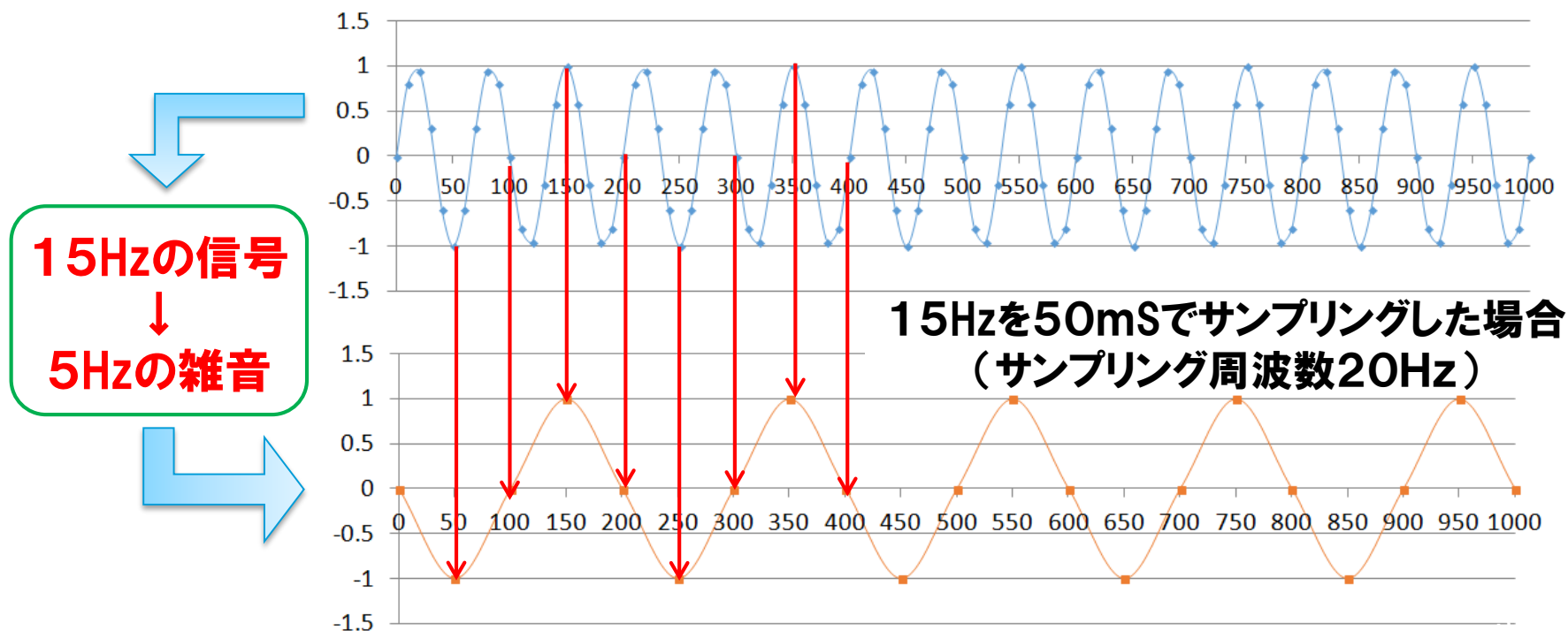
アナログ信号の周波数帯域の2倍以上のサンプリング周波数でサンプリングすれば、元の連続波形に戻せる。これを「サンプリング定理」と言い、サンプリング周波数の半分の周波数を「ナイキスト周波数」と言う。



## 折り返し雑音とは

A/D変換器において、**ナイキスト周波数を超える周波数成分をサンプリング**する場合、デジタル化された出力信号には「**折り返し雑音**」と呼ぶ雑音が混入してしまう。そこで、LPFなどの回路(アンチエイリアス・フィルタ)を使って雑音が入らないようにする。

サンプリング周波数20Hzのナイキスト周波数10Hz、15Hzの信号は5Hzの雑音になる。

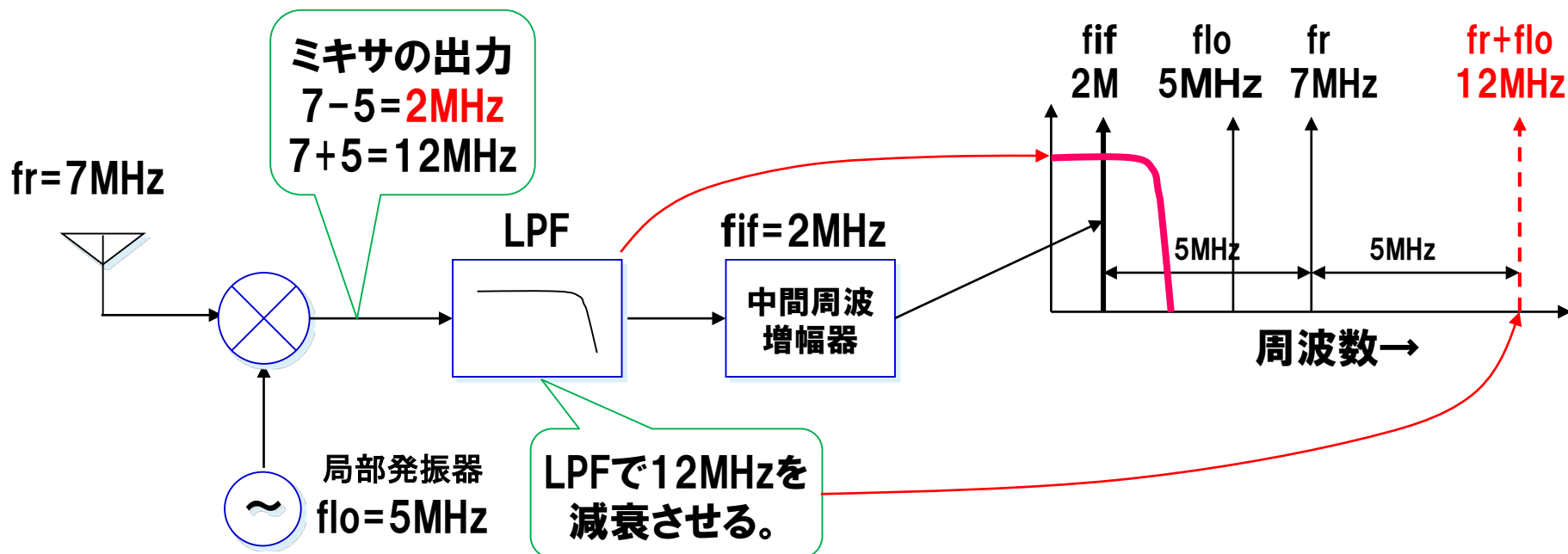




## 直交ミキサについて: 何でI,Q信号を使うのか?

アナログミキサ(周波数混合器)のおさらい。

中間周波数が2MHzの受信機で、7MHzの信号を受信する場合  
ミキサの出力にIF成分以外にスプリアス成分(12MHz)が発生する。

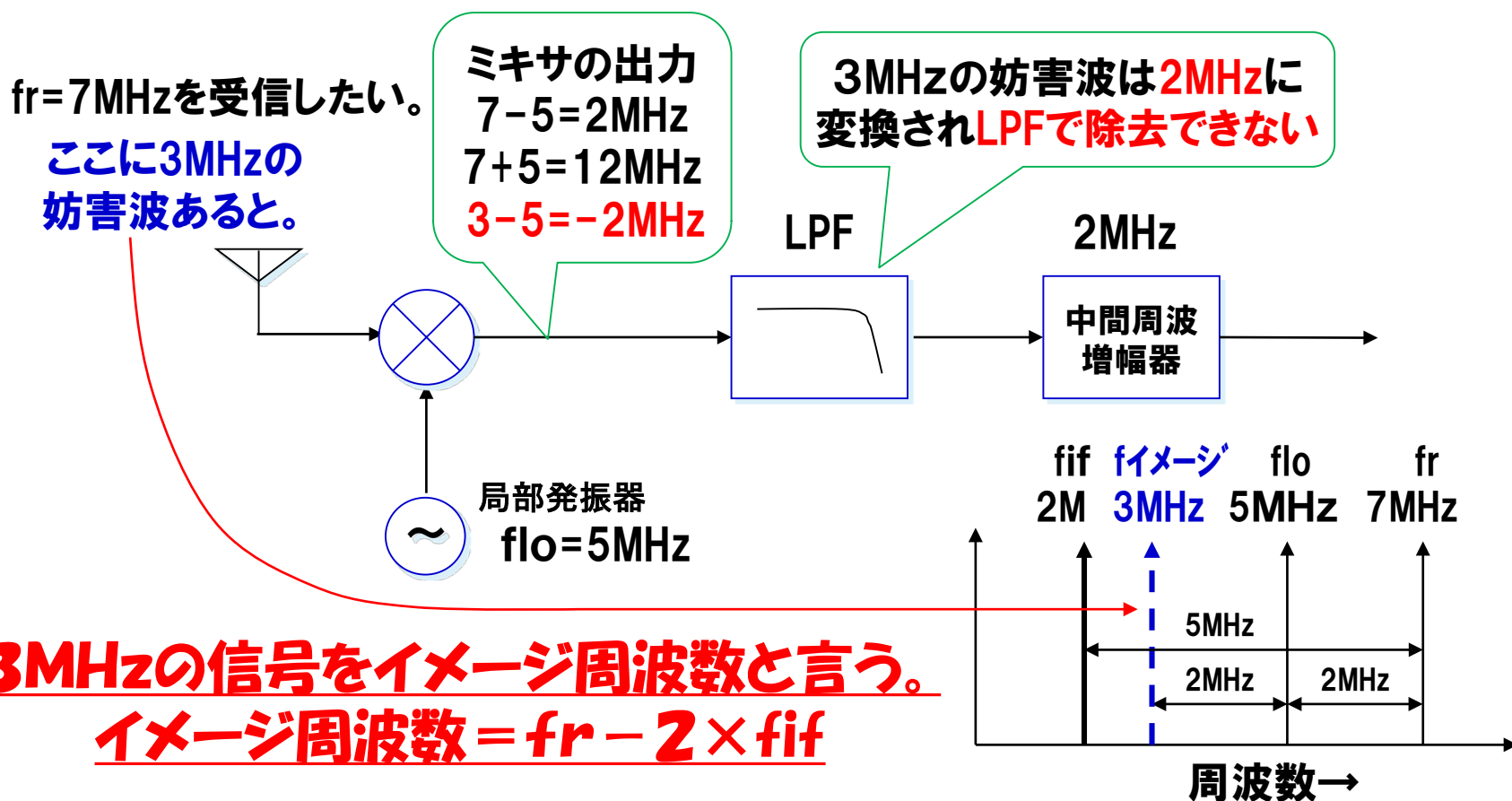


**アナログミキサは信号を和差算しているのではなく乗算を行う。  
(デバイスの非直線性を利用する)**

## 直交ミキサ: イメージ周波数の妨害波

アナログミキサ(周波数混合器)のおさらい。

ここで3MHzの妨害波があった場合→受信されてしまう!



## 直交ミキサ: イメージ周波数の妨害波対応

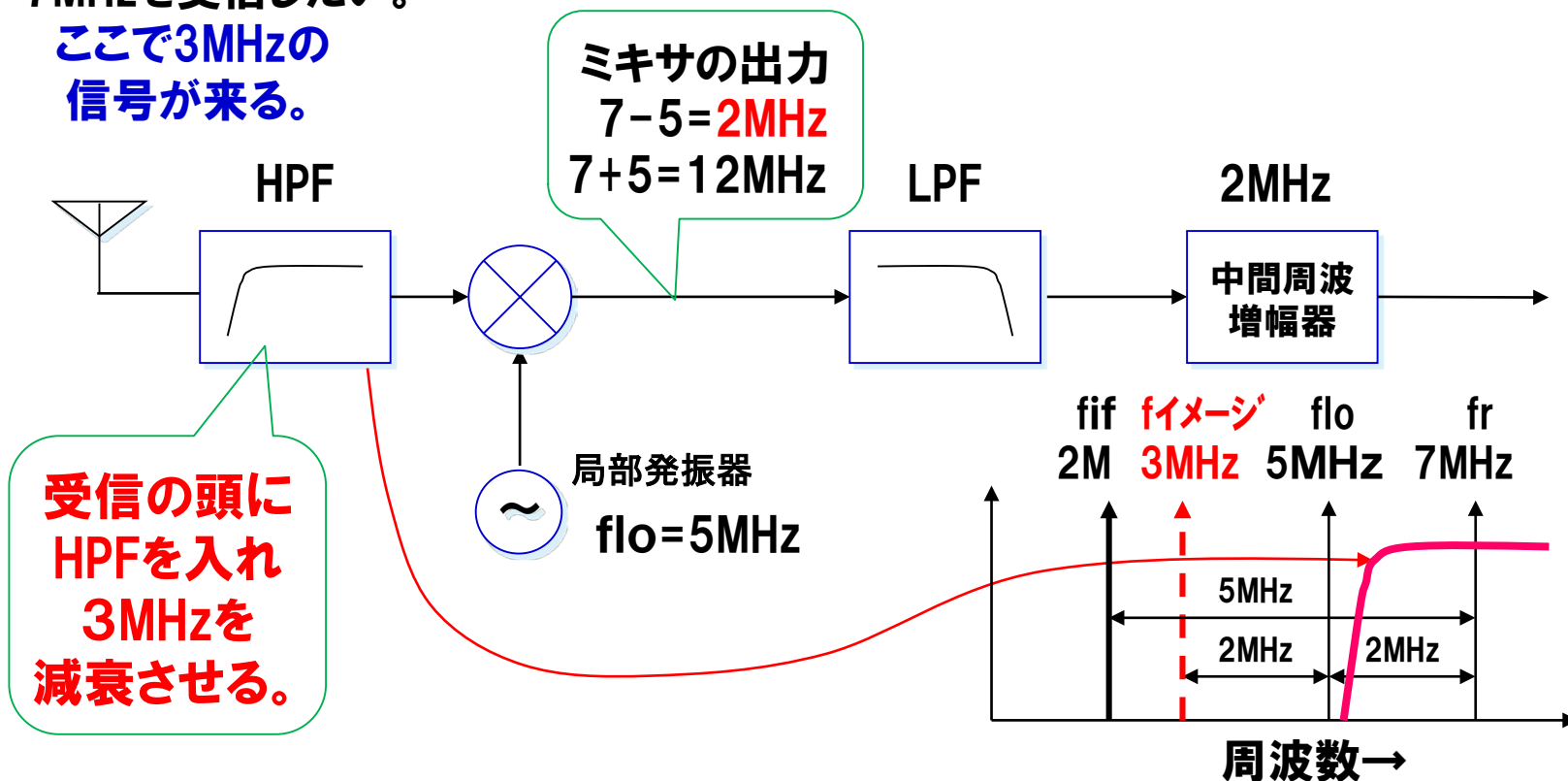
アナログミキサ(周波数混合器)のおさらい。

イメージ周波数はミキサの前にHPFを入れて除去する。

$f_r = 7\text{MHz}$ を受信したい。

ここで3MHzの  
信号が来る。

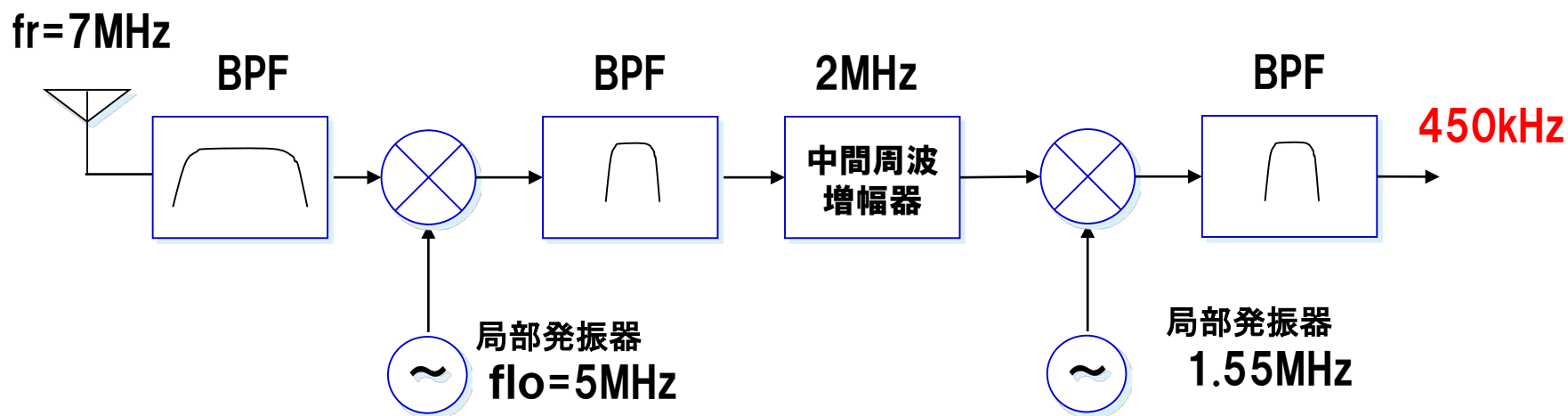
ミキサの出力  
 $7 - 5 = 2\text{MHz}$   
 $7 + 5 = 12\text{MHz}$



## 直交ミキサ:ダブルスーパーヘテロダインの構成

アナログミキサ(周波数混合器)のおさらい。

一般的にはBPFを使用して、更に低い中間周波数に変換する。

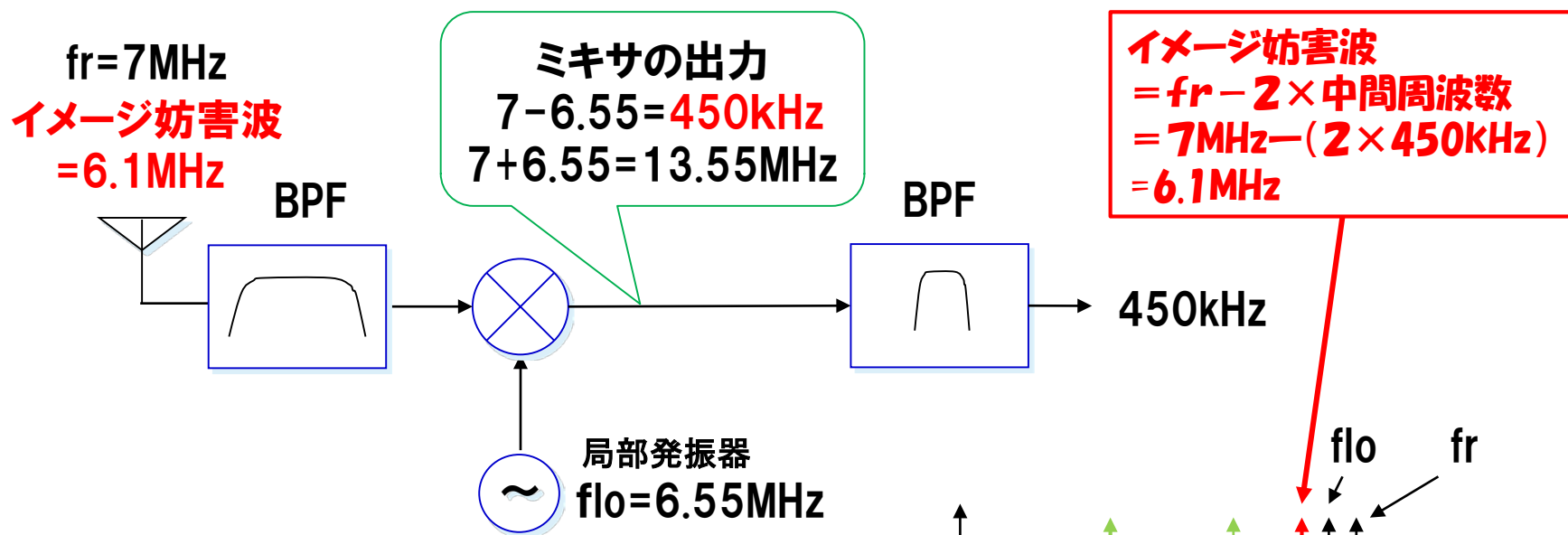


なぜ2回周波数変換を行うか？(ダブルコンバージョン)  
始めから450kHzに変換できないのか？

## 直交ミキサ: 何でI,Q信号を使うのか?

アナログミキサ(周波数混合器)のおさらい。

1回の周波数変換で450kHzの低い中間周波数にすると...

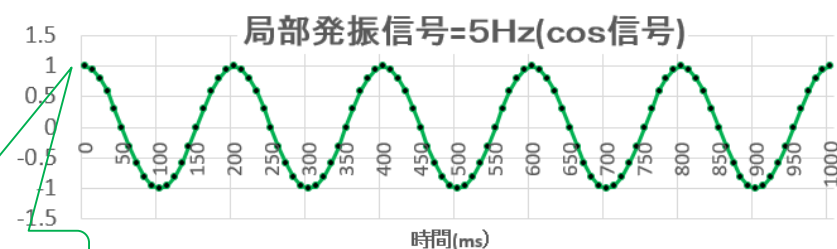
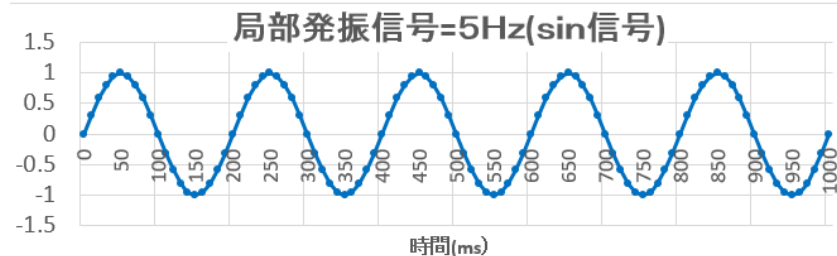
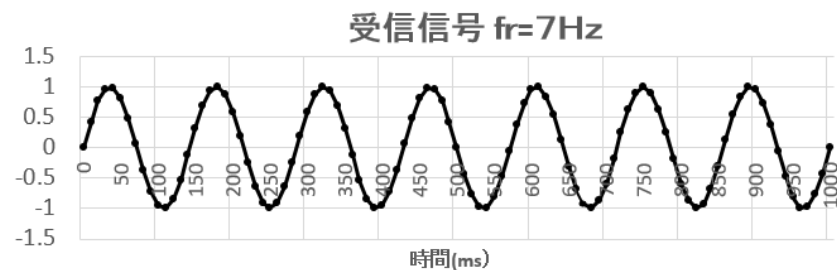
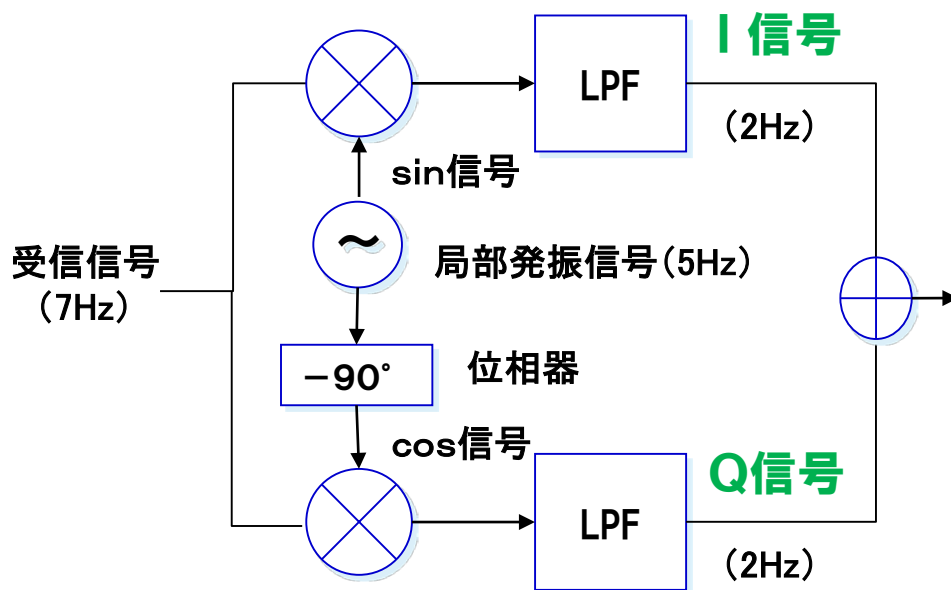


イメージ妨害波6.1MHzが存在すると  
これを前段のBPFで切るのは困難である。

そこで直交ミキサが登場する。

## 直交ミキサに信号を入れてみる

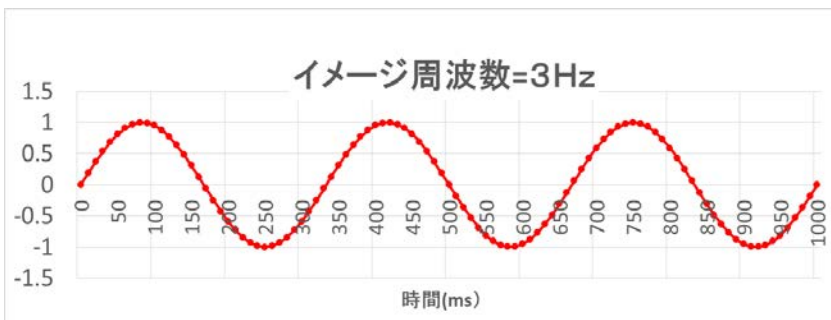
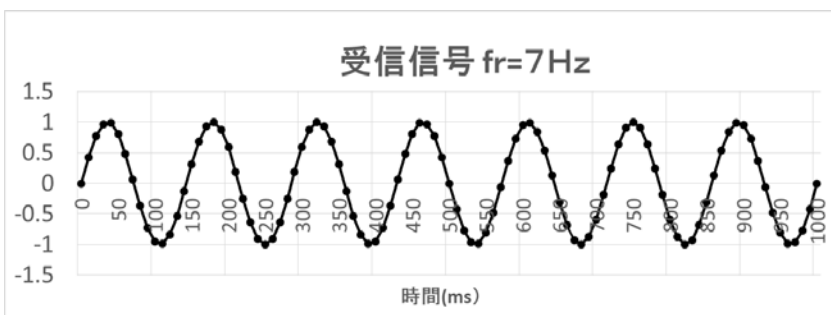
2つのミキサに入力は同じものの、局部発振信号として位相を90°ずらしたsin信号とcos信号を入れI/Q信号を合成する。ここではEXCELで計算するため入力信号7Hz、局部発振信号5HzとしてI/Q信号2Hzを取り出す。



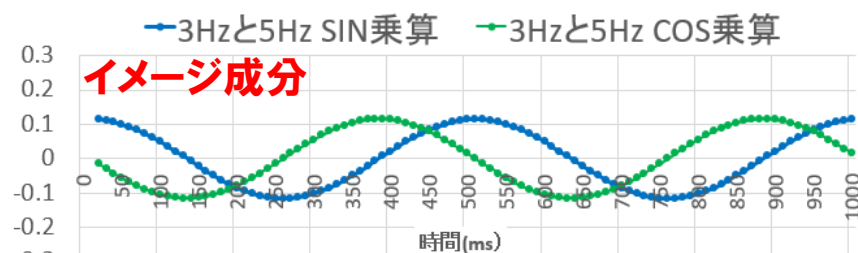
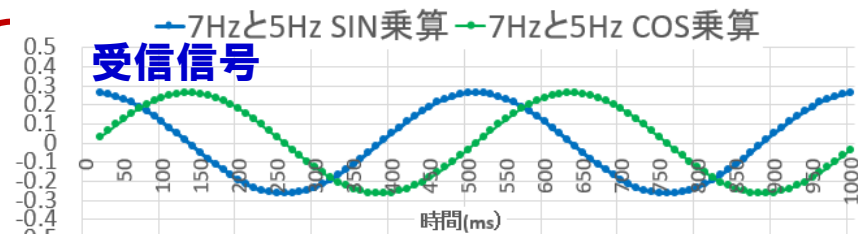
COSは1から始まる

## 直交ミキサ:イメージ成分除去

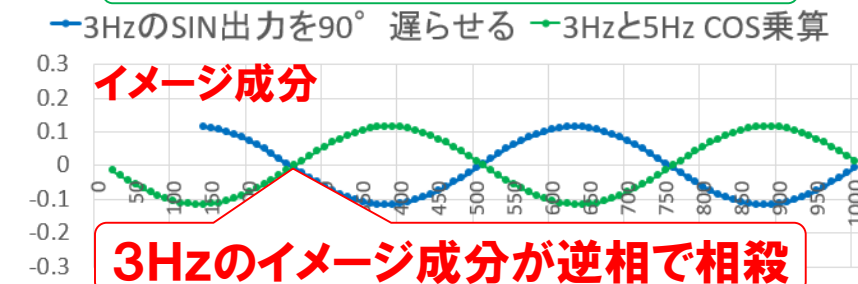
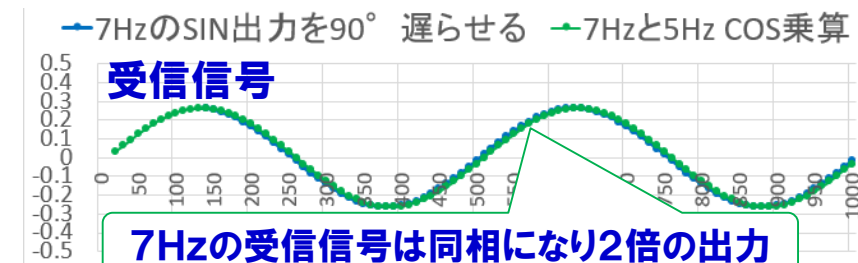
受信入力信号にイメージ周波数  
3Hzの信号を含め、2つミキサ出力  
のI/Q信号を合成する。



直交ミキサ出力



上記青色のsin信号を $90^\circ$ 遅らせる



イメージ成分がキャンセルされ  
性能の良い受信機ができる。

## 直交ミキサ:加法定理で説明

直交ミキサでイメージ混信を完全に除去できることを、EXCELで計算した波形で説明したが、**三角関数の加法定理を使うと簡単に説明**できる。加法定理の式は下記の通り。

$$\textcircled{1} \sin(\alpha + \beta) = \sin \alpha \cos \beta + \cos \alpha \sin \beta$$

$$\textcircled{2} \sin(\alpha - \beta) = \sin \alpha \cos \beta - \cos \alpha \sin \beta$$

$$\textcircled{3} \cos(\alpha + \beta) = \cos \alpha \cos \beta - \sin \alpha \sin \beta$$

$$\textcircled{4} \cos(\alpha - \beta) = \cos \alpha \cos \beta + \sin \alpha \sin \beta$$

①と②から(②から①を引いて、両辺を2で割る)下式を得る。

$$\sin \alpha \cos \beta = \frac{1}{2} \{ \sin(\alpha - \beta) + \sin(\alpha + \beta) \} \rightarrow \text{Q信号の構成}$$

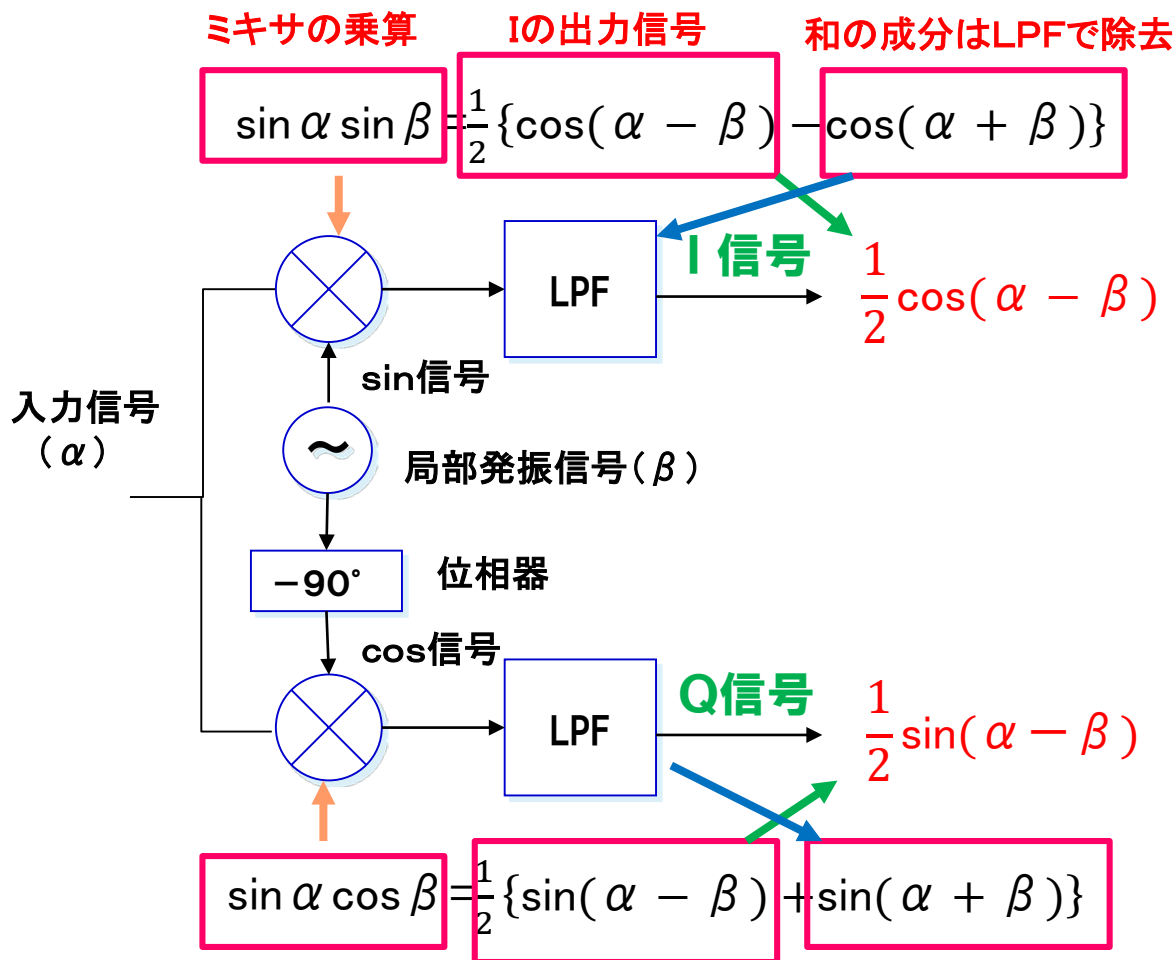
③と④から(④から③を引いて、両辺を2で割る)下式を得る。

$$\sin \alpha \sin \beta = \frac{1}{2} \{ \cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta) \} \rightarrow \text{I信号の構成}$$



## 直交ミキサ: 式をブロック図に対応

求めた式を直交ミキサのブロックに対応させる。

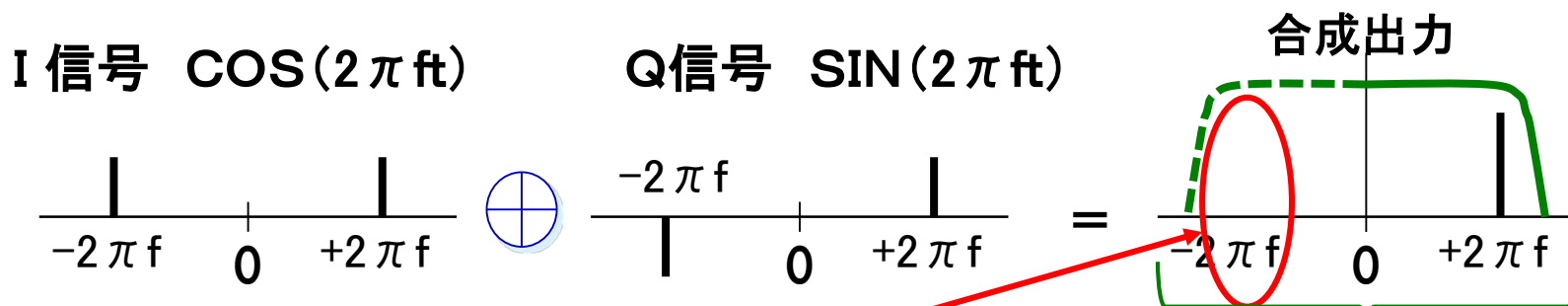


直交ミキサは三角関数の公式通りである。

I信号はcosの偶関数で $\alpha - \beta$ の正負に関係なく同じ値が得られるが、Q信号はsinの奇関数で $\alpha - \beta$ の正負で出力も反転する。

**直交ミキサ:ここがすごい、世紀の発明!**

直交ミキサのI/Q信号の合成出力を複素表現すると下記の通り。

**直交ミキサでI/Q変換することにより下記のメリットがある。**

- ① **イメージ混信を除去**でき、**ダブル・トリプルスーパーヘテロダイン**は不要。
- ② マイナスの周波数が扱えるので**帯域幅が2倍**になる。(0Hzも信号である)  
BPFを作成する際、LPFが良い。高価なクリスタルフィルタ等は不要。
- ③ 瞬時の位相、周波数、振幅を知ることができる。(なんでも復調できる)

**直交ミキサでI/Q信号を作る上で重要なこと**

局部発振信号を正確に $90^\circ$  ずらしてI/Q信号のバランスでイメージを相殺する。

**I/Qの局部発振信号(sin, cos)をソフトウェア(FPGAやDSP)で実現することで、  
ずれのないほぼ完全な直交ミキサを実現。(アナログ回路では難しい)**

## 12kHzオフセットI/Q信号について

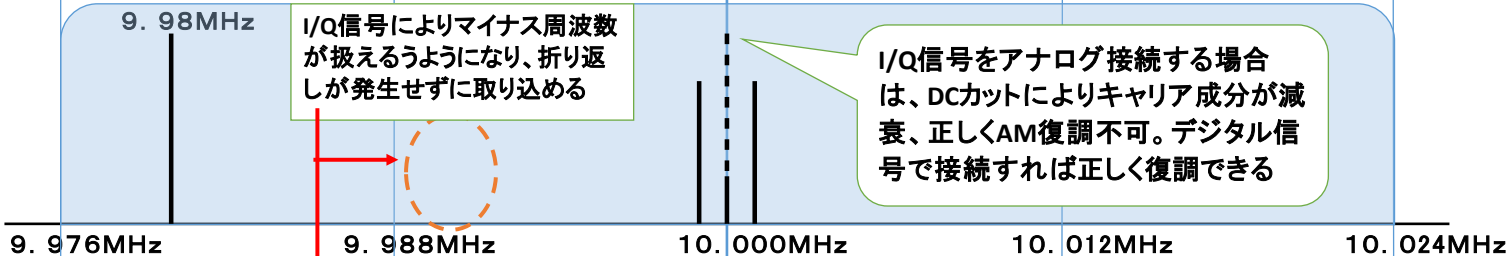
I/Q信号はDCもAMの搬送波等の信号となる。PCのアナログサウンドカードはDCがカットされるため12kHzオフセットして対応している。(ALINCO社のDX-SR9等)

周波数10MHzを1kHzで変調した信号と9.98MHzの無変調信号を3方式で受信した場合。

I/Q信号の周波数 -24kHz -12kHz 0kHz +12kHz +24kHz

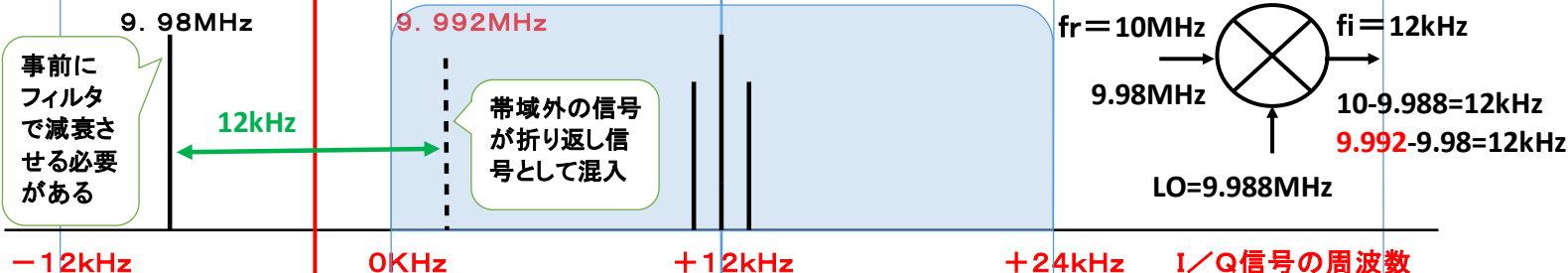
① I/Q信号  
(オフセット無し)

実際の周波数

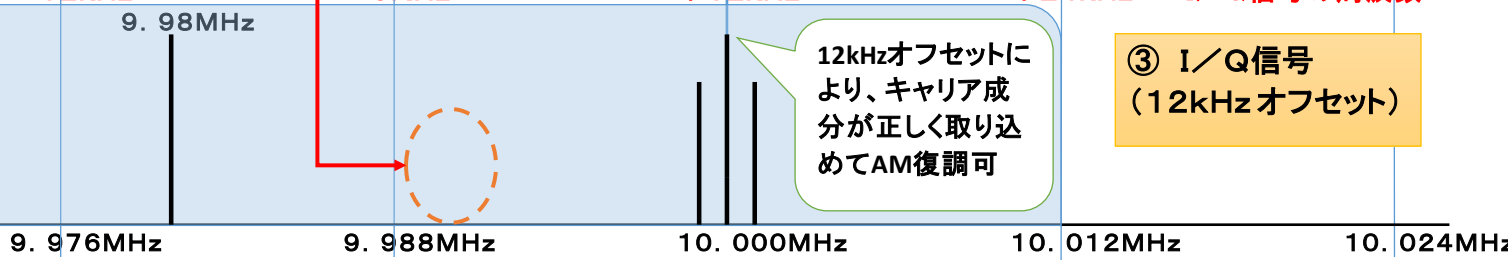


② 12kHzIF信号

受信できる帯域



③ I/Q信号  
(12kHzオフセット)



## デジタルフィルタについて:どのように行われているか?

何で足し算、引き算、掛け算でフィルタができるのか?

代表的なデジタルフィルタは下記の2つに分類される。

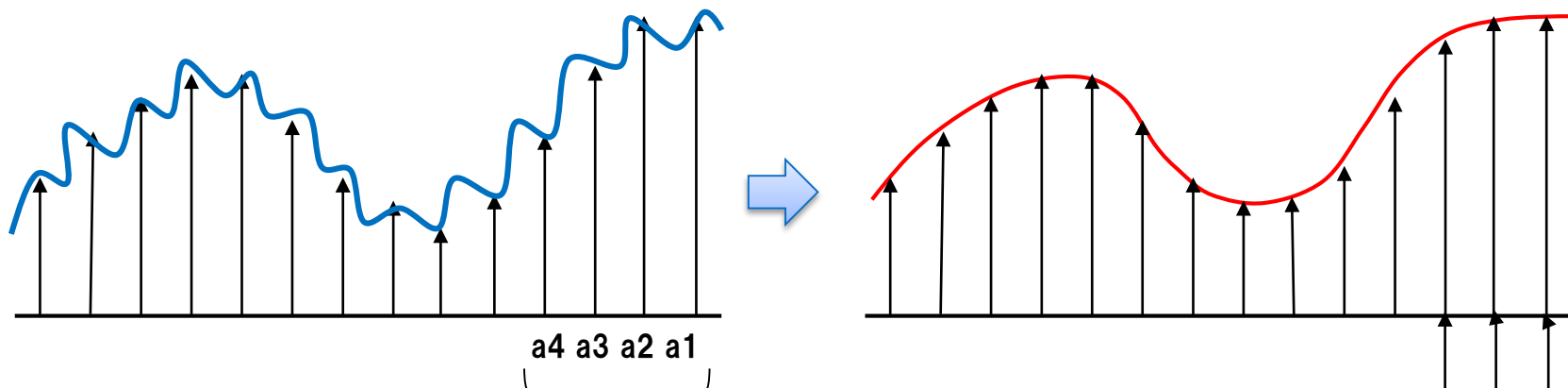
- ・FIRフィルタ(Finite Impulse Response)
- ・IIR(Infinite Impulse Response)

種類	計算量	減衰特性	位相特性	歪	設計	ダイナミックレンジ
FIR	大きい	悪い	良い	良い	容易	広い
IIR	小さい	良い	悪い	悪い	難しい	狭い

FIRフィルタは計算量は多くなるが、設計が容易で良質なフィルタを作れる。FIRフィルタを理解するためにまずLPFの一種である「移動平均フィルタ」について説明する。

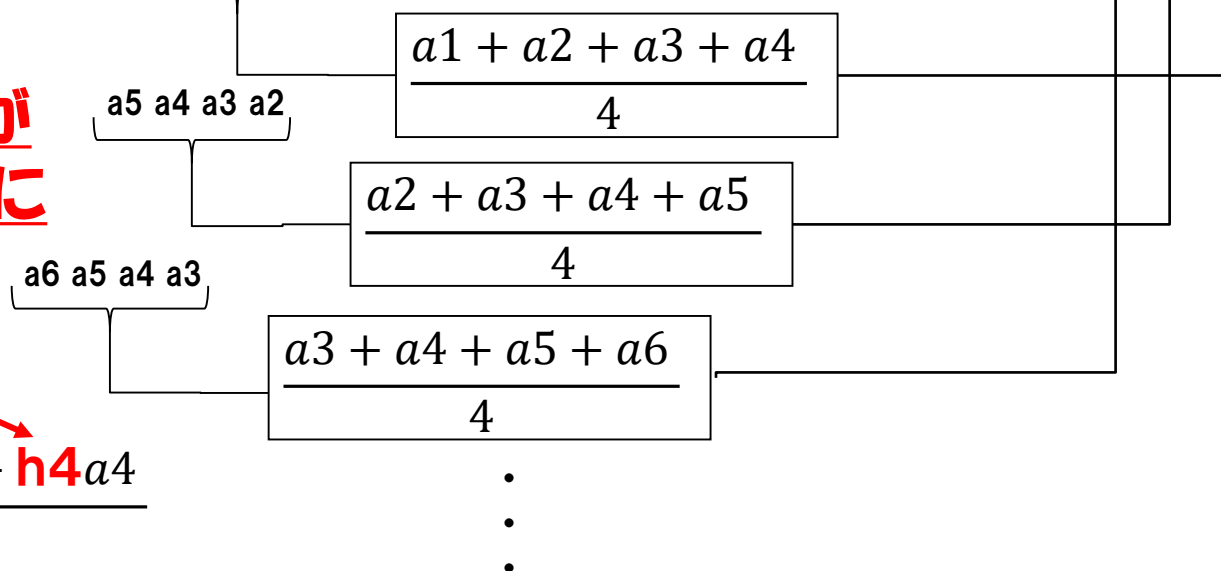
## 移動平均フィルタ

1サンプリングごとに平均を取ると波形が滑らかになる。



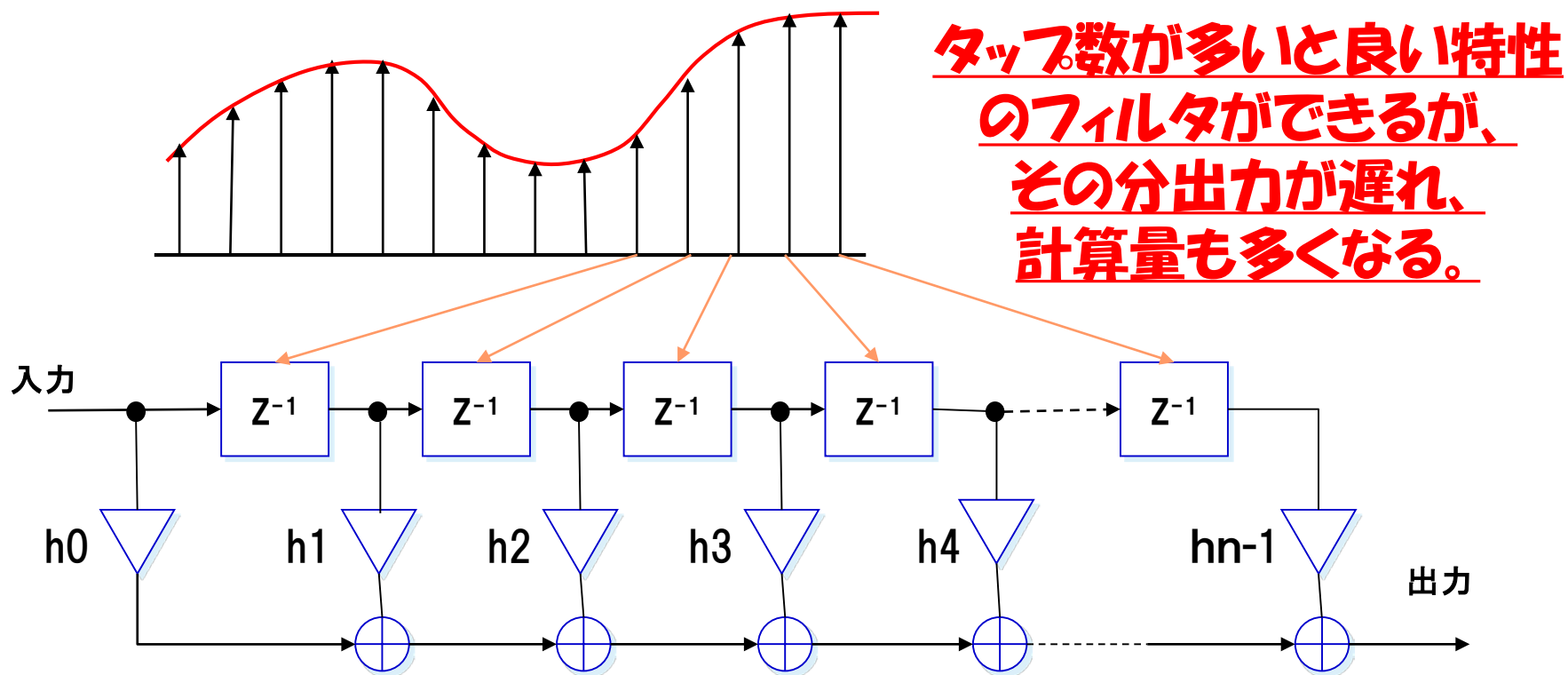
**FIRフィルタも  
原理は同じであるが  
サンプリングした値に  
係数を掛ける。**

$$\frac{h_1 a_1 + h_2 a_2 + h_3 a_3 + h_4 a_4}{4}$$



## FIRフィルタについて:構成

FIRフィルタのブロック構成は下記のようになる。サンプリングした値を左から順番に入れて、係数 $h_n$ を掛け算したものを全て足し算して出力する。 $Z^{-1}$ の段数をタップ数と言う。



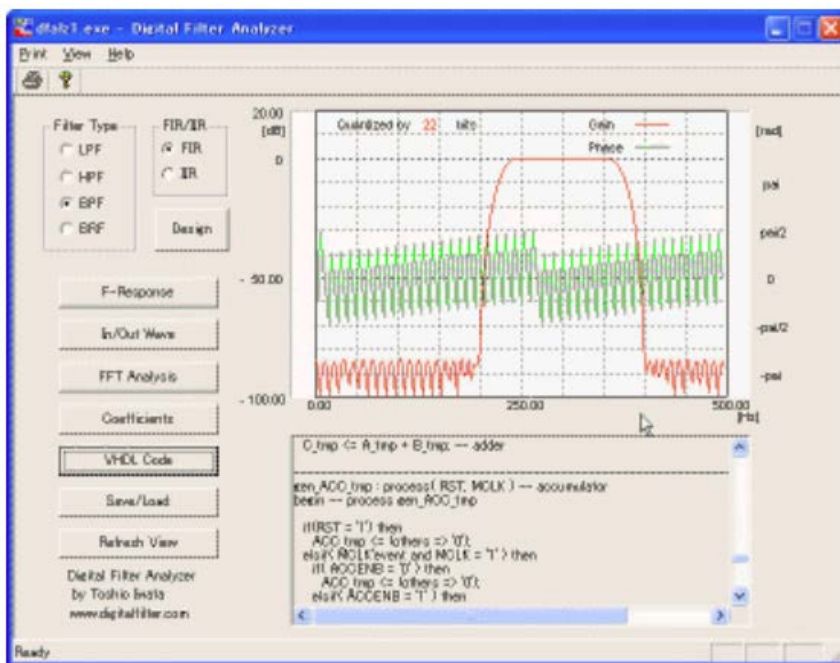
## FIRフィルタについて

係数はどのようになるのかフリーソフトを使ってみる。

DIGITALFILTER.COM の「Digital Filter Analyzer」を使う。

<http://digitalfilter.com/products/dfalz/jpdfalz.html>

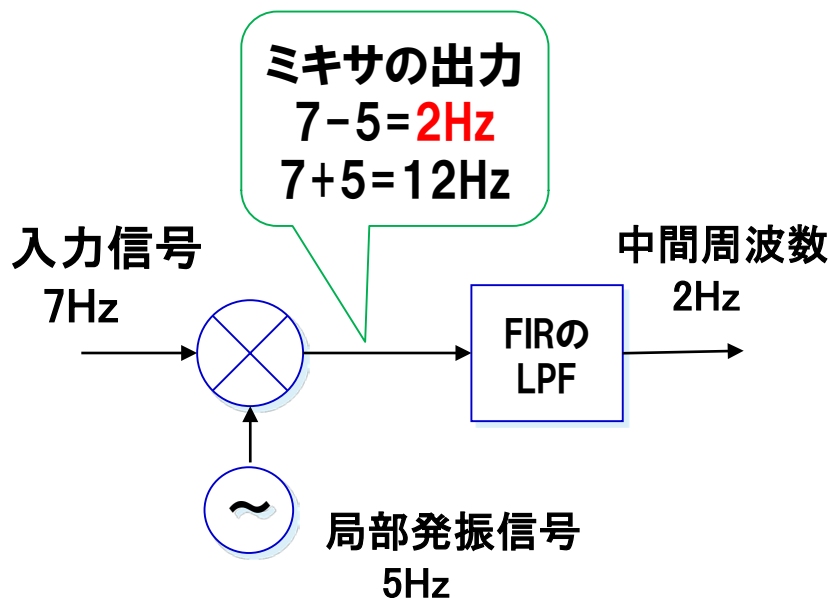
このソフトは直感的にわかり易く、使いやすいソフトです。



**DIGITALFILTER.COM**  
のサイトはデジタル  
技術の宝庫です。

## FIRフィルタの設計

直交ミキサで実験した、入力信号7Hz、局部発振信号5Hzで、中間周波数2Hzを取り出す場合の、**12Hzを除去するFIRフィルタの計算を行ってみる。**



フィルタの設計画面

FIR Low Pass Filter

$$H(z) = h_0 + h_1 z^{-1} + h_2 z^{-2} + \dots + h_{N-1} z^{-(N-1)}$$

in  $\rightarrow$  out

LPF by FIR

Sampling F (fs) = 100 Hz

Tap count (N) = 8

Pass band edge (fc1) = 3 Hz

RR = K\*(d1/d2) = 10

Stop band edge (fc2) = 11 Hz

Multiple coeffs by 1

OK Cancel

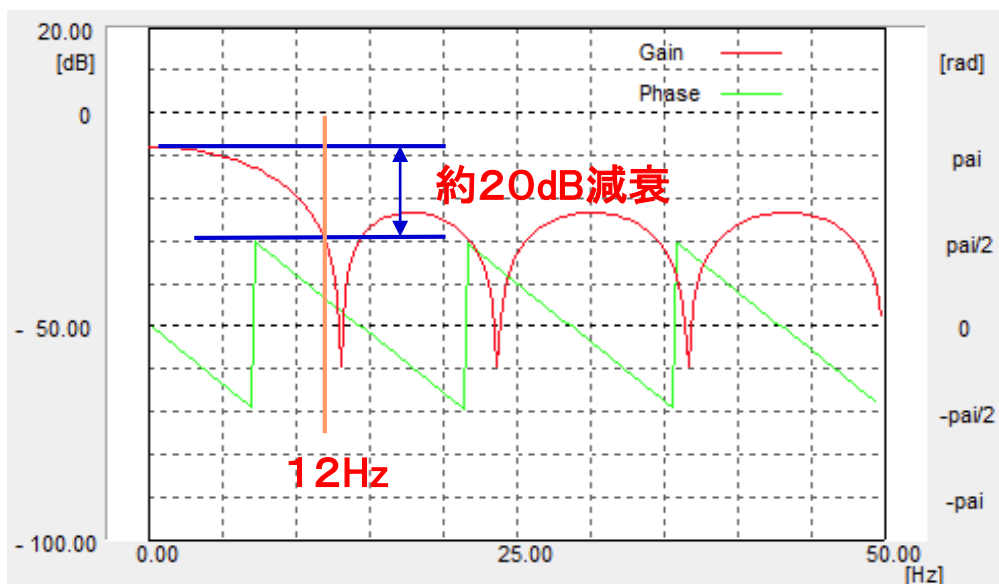
パスバンド 3Hz ストップバンド 11Hz タップ数 8



## FIRフィルタの設計結果

計算結果を左図に、またタップ数を変更したものを右図に示す。

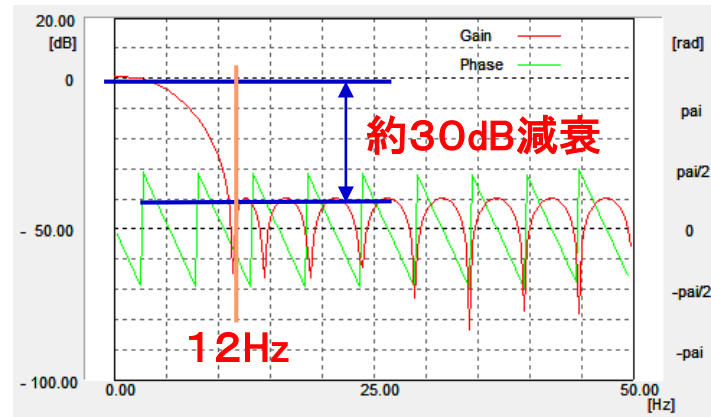
計算結果 8タップで12Hzは約20dB減衰



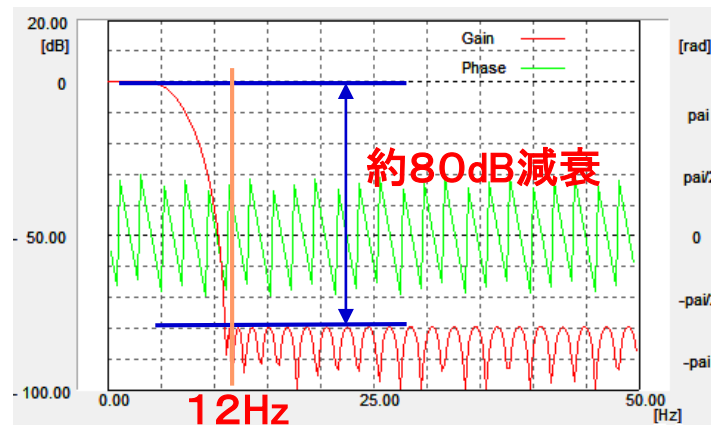
```
Data is Real : 1.0 => 1.0
h[ 0] = 0.049738520
h[ 1] = 0.039930405
h[ 2] = 0.049069337
h[ 3] = 0.054186411
h[ 4] = 0.054186411
h[ 5] = 0.049069337
h[ 6] = 0.039930405
h[ 7] = 0.049738520
```

これが8タップの係数  $h_n$

タップ数を20にした結果



タップ数を50にした結果



**FIRフィルタについて**

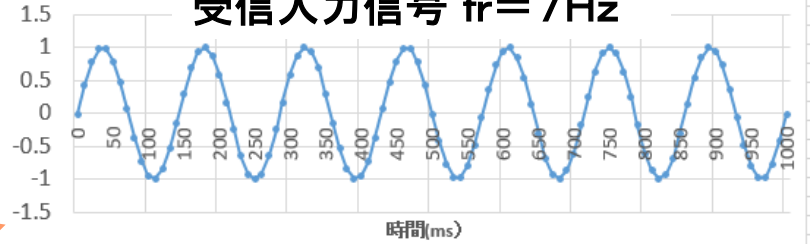
計算結果をEXCELを使って計算。  
右下のLPFの出力は12Hzが減衰されているのがわかる。

10msで  
サンプリング

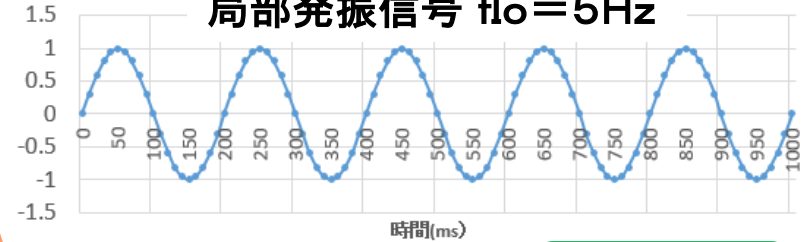
時間(ms)	入力7Hz	ローカル 5Hz	ミキサ出力	LPF出力
0	0	0	0	0
10	0.425779292	0.309016994	0.131573007	
20	0.770613243	0.587785252	0.452896321	
30	0.968583161	0.809016994	0.783600238	
40	0.982287251	0.951066516	0.934210691	
50	0.809016994	1	0.809016994	
60	0.481753674	0.951066516	0.458174971	
70	0.06279052	0.809016994	0.050798597	
80	-0.368124553	0.587785252	-0.216378183	0.171286998
90	-0.728968627	0.309016994	-0.225263694	0.150969854
100	-0.951066516	1.22515E-16	-1.16519E-16	0.123943502
110	-0.992114701	-0.309016994	0.306580303	0.096476123
120	-0.844327926	-0.587785252	0.496283503	7*0.0497335204664
130	-0.535826795	-0.809016994	0.433492983	0.058415382
140	-0.12533234	-0.951066516	0.119198988	0.047036159
150	0.309016994	-1	-0.309016994	0.034407936
160	0.684547106	-0.951066516	-0.651042986	0.015348587
170	0.929776486	-0.809016994	-0.752204978	-0.01203066
180	0.998026728	-0.587785252	-0.586625392	-0.045108668
190	0.87630668	-0.309016994	-0.270793656	-0.077982497
200	0.587785252	-2.4503E-16	-1.44025E-16	-0.104477486
210	0.187381315	0.309016994	0.057904011	-0.121310658
220	-0.248689887	0.587785252	-0.146176248	-0.129695579
230	-0.627402999	0.809016994	-0.51550504	-0.124501486

8タップで  
過去の7個の  
データを使用

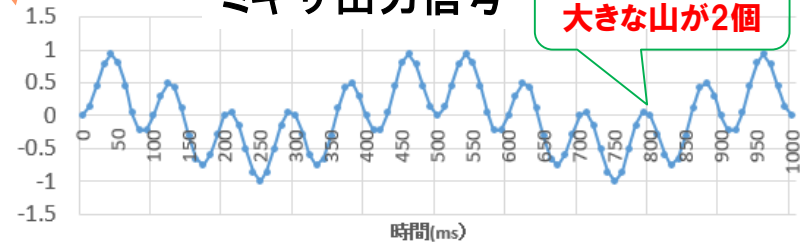
受信入力信号 fr=7Hz



局部発振信号 fo=5Hz



ミキサ出力信号

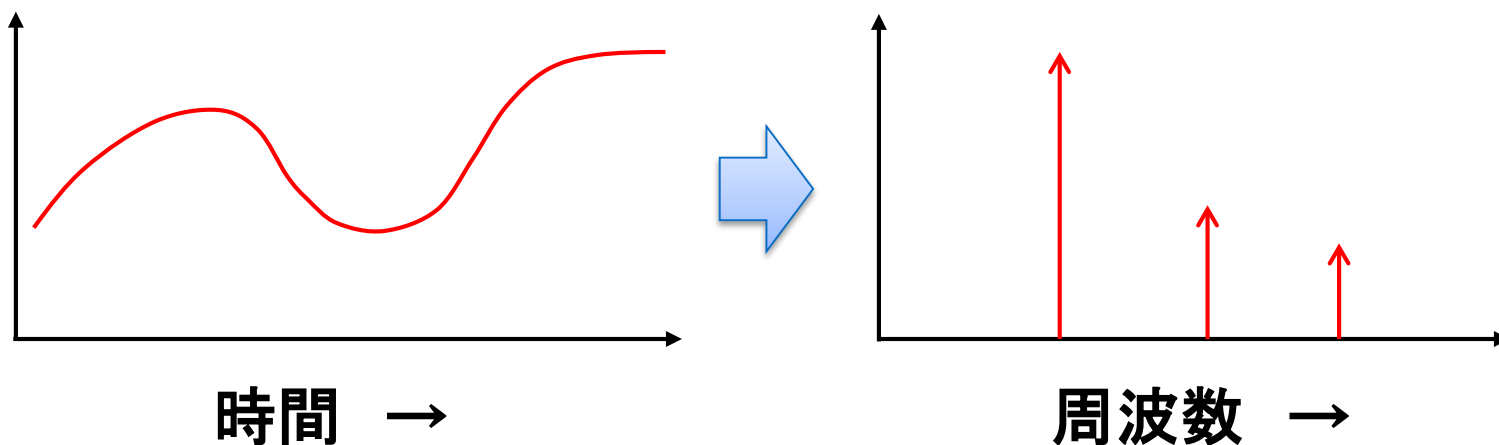


12Hzを8タップのLPFで減衰

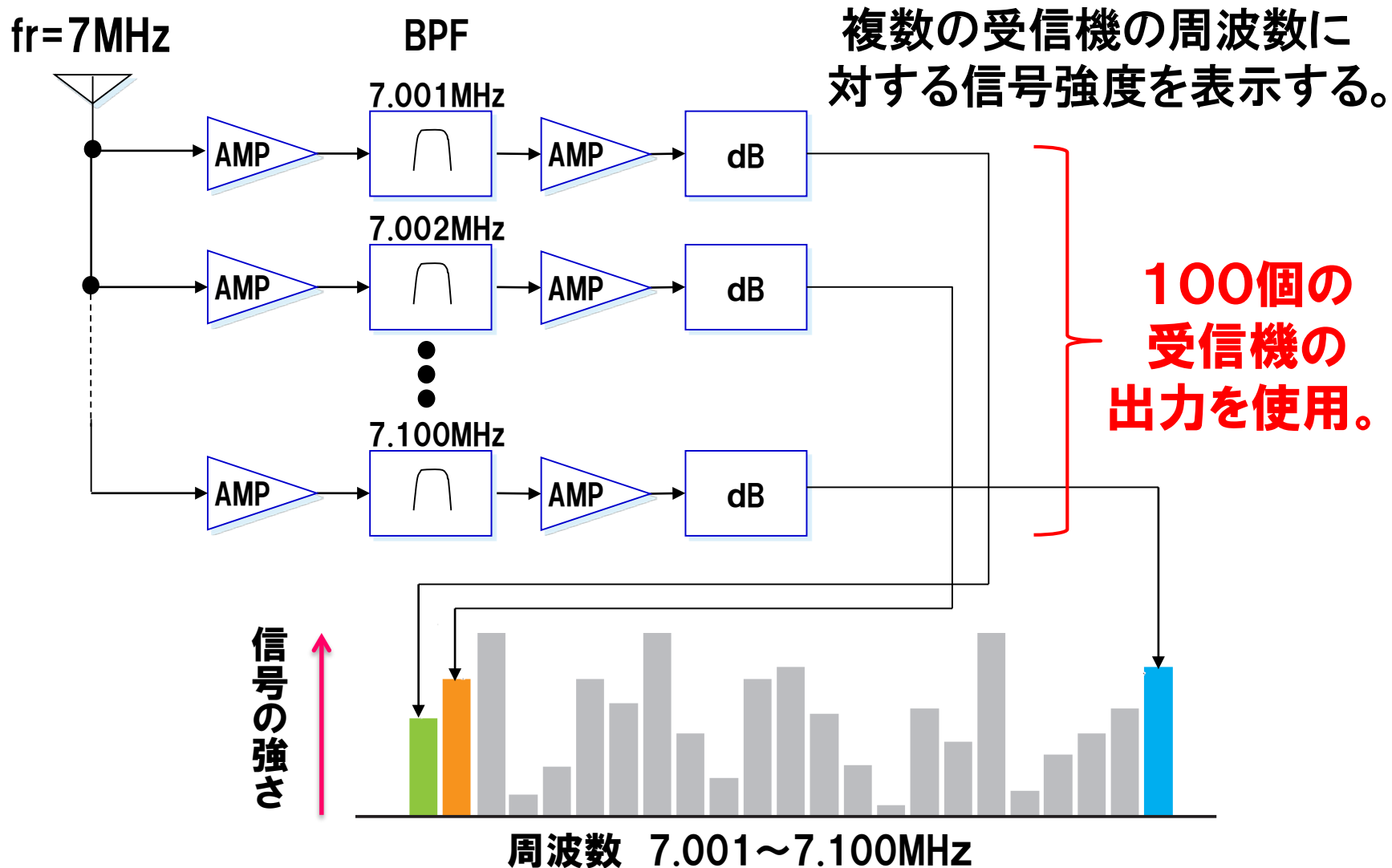


## 高速フーリエ変換

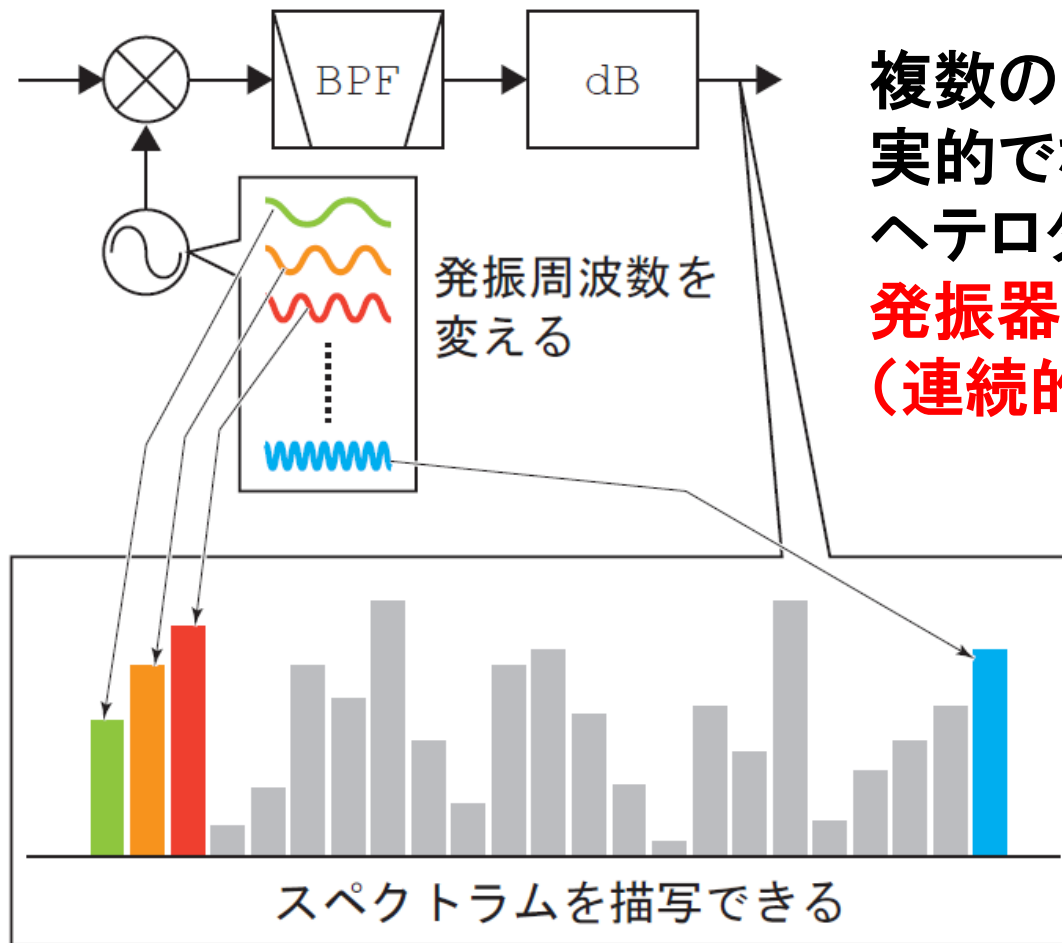
高速フーリエ変換(FFT:Fast Fourier Transform)は、時間軸を周波数軸に変換できる演算である。わかり易く言い換えると、オシロスコープで測定した波形をスペクトラムアナライザの表示に変換できる。



## スペクトラムアナライザを実現するには



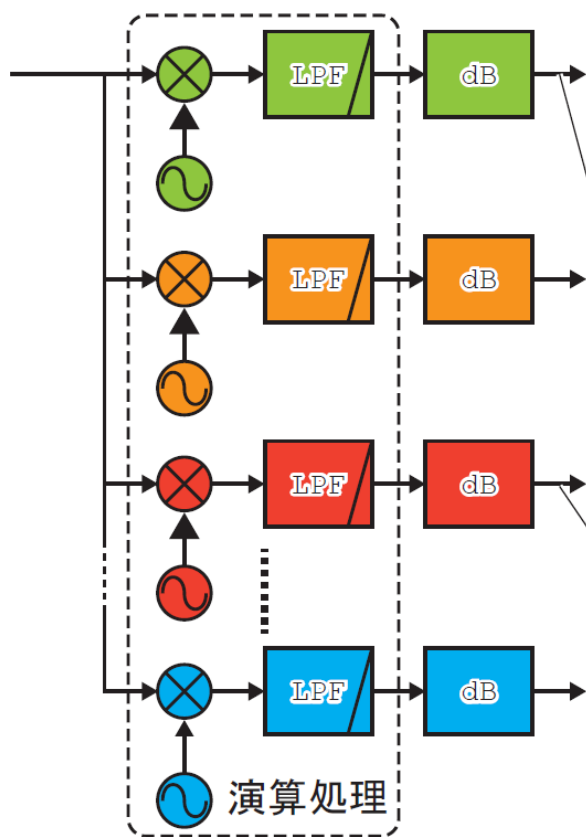
## スペクトラムアナライザは局部発振周波数をスイープして実現



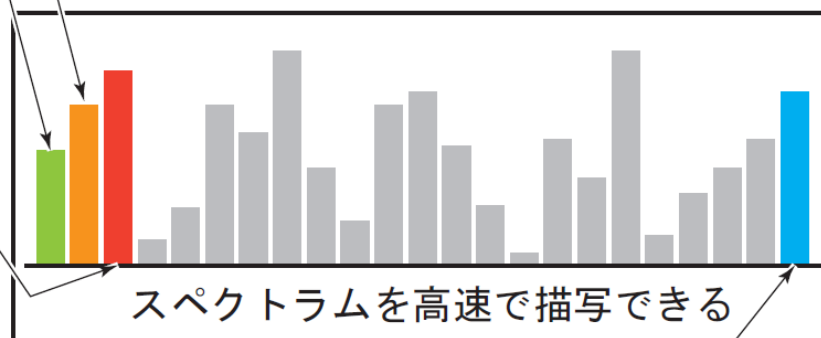
複数の受信機を並べるのは現実的でなく、従来はスーパーヘテロダインの構造で、**局部発振器の周波数をスイープ(連続的に可変)して実現。**

**BPFの帯域を狭くすると、信号を伝達する時間が遅くなり、高速の描写が出来ない。**

## 高速フーリエ変換の演算で実現する



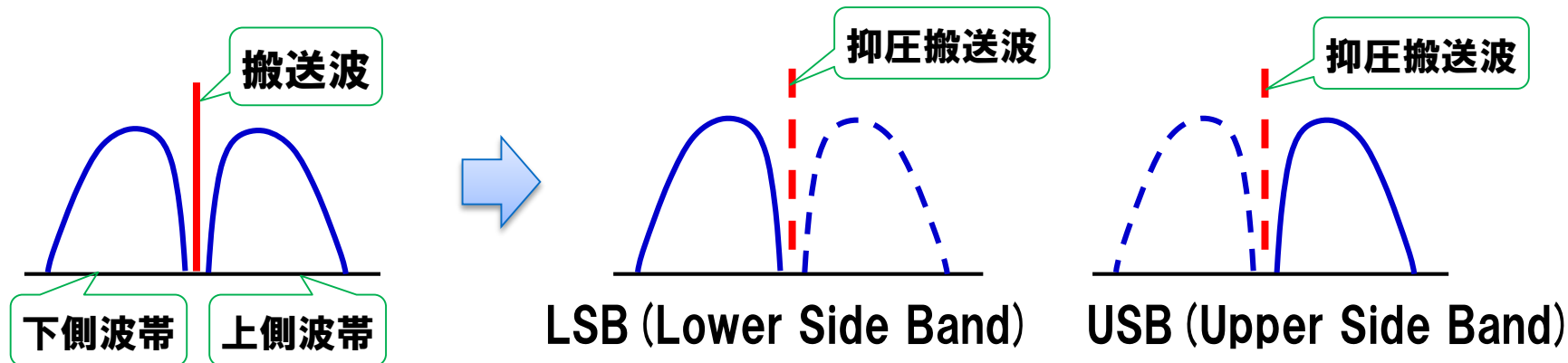
左図の破線のブロックを高速フーリエ変換の演算で信号処理することにより実現する。



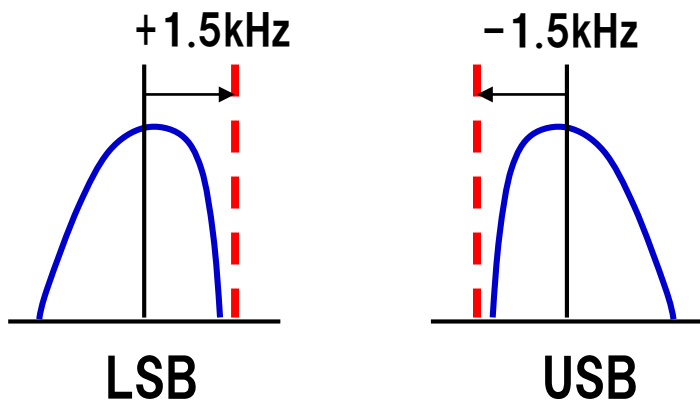
BPFの遅延時間が少なく、狭帯域でも高速・高精度に描写できる。

## 復調について①:SSBの復調

SSBは搬送波(キャリア)を抑圧してどちらかの側波帯を取り出したものである。



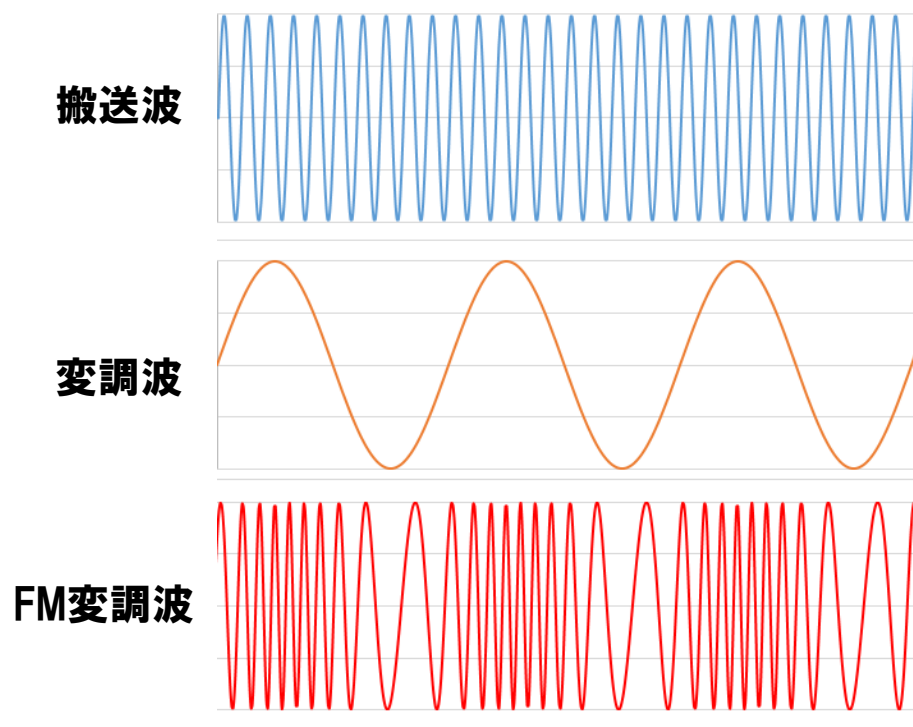
復調はLSBは $+1.5\text{kHz}$ 、USBは $-1.5\text{kHz}$ の局部発振周波数でミキサの演算をすることにより可能となる。



SSB,CWはアナログの時はBFO信号(Beat Frequency Oscillator)を混合(乗算)して復調出力するところは同じである。

## 復調について②:FMの復調

FM(Frequency Modulation)は変調信号に応じて搬送波の周波数を可変する。また、周波数と位相は密接な関係にある。



周波数の単位はHzであるが、角周波数で表すと  $\text{rad/sec}$ (角度/秒)となる。

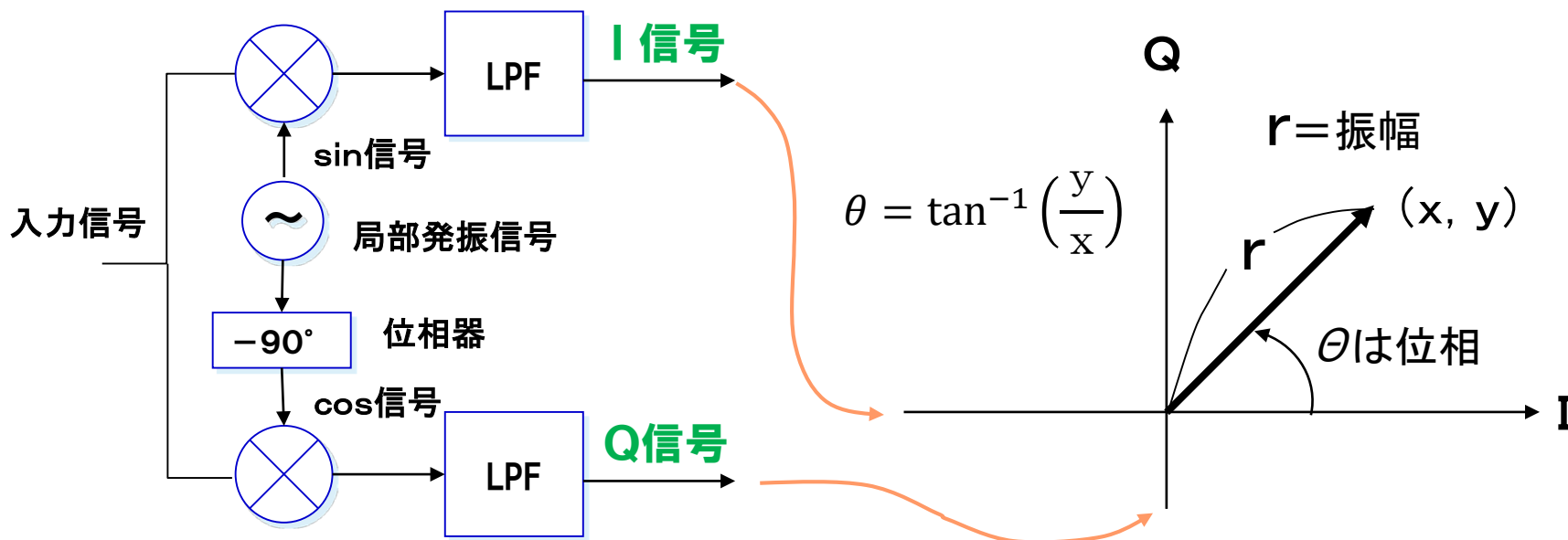
周波数:  $\text{rad/sec} = \text{角度/秒}$   
周波数に時間をかけると  
(角度/秒)  $\times$  秒 = 角度(位相)

位相がわかれば時間微分が周波数(角周波数)となり、FM変調波の復調が実現できる。



## 復調について②:FMの復調

直交ミキサのI/Q信号を使って位相を求める。I/Qは直交している信号でそれぞれの大きさを  $\tan^{-1}(y/x)$  により位相を求め、時間微分することにより周波数を求めることができる。



FM波は振幅が一定であるが、伝搬時にフェージング等によって変動する。アナログの場合はリミッタ等で一定に戻すが、デジタルのFM復調は位相しか見ないので、理想的なFM復調ができる。

# DSP・SDR開発ツール

## DSP開発における数値解析ソフトウェアの例

### •MATLAB ←無線メーカーの人が良く使っている。

アメリカのMathWorks社が開発した最も使用されているソフト。行列計算、関数とデータの可視化、アルゴリズム開発を行う。

### •FreeMat

オープンソースの数値解析プログラミング言語。MATLAB と100%の互換性はないが、機能としては95%をカバーしている。

### •GNU Octave

数値解析を目的とした高レベルプログラミング言語。GNU General Public Licenseの条件の下のフリーソフトウェアである。

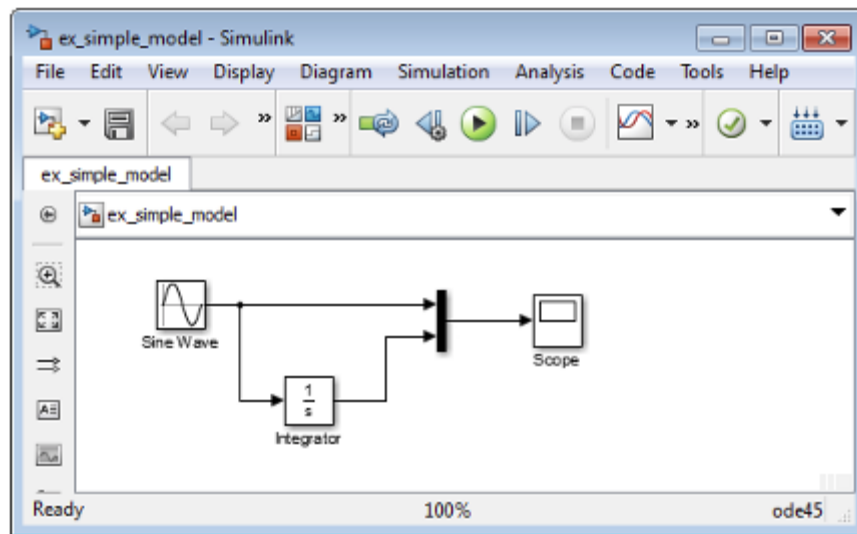
### •Scilab(サイラボ)

フランスのINRIA(国立情報学自動制御研究所)とENPCで開発されているオープンソースの数値計算システムである。

## SDRソフトの開発環境の例

### •MATLAB / Simulink

汎用シミュレーションプラットフォームMATLAB/SimulinkもSDRのソフトウェア開発環境としてよく使われている。



MATLAB/Simulinkのシミュレーション例  
出典：<https://jp.mathworks.com/help/simulink/>

### •GnuRadio

オープンソースのSDR専用開発環境である。SDR“USRP”のソフトウェア開発環境として、Ettus Research社が開発した。

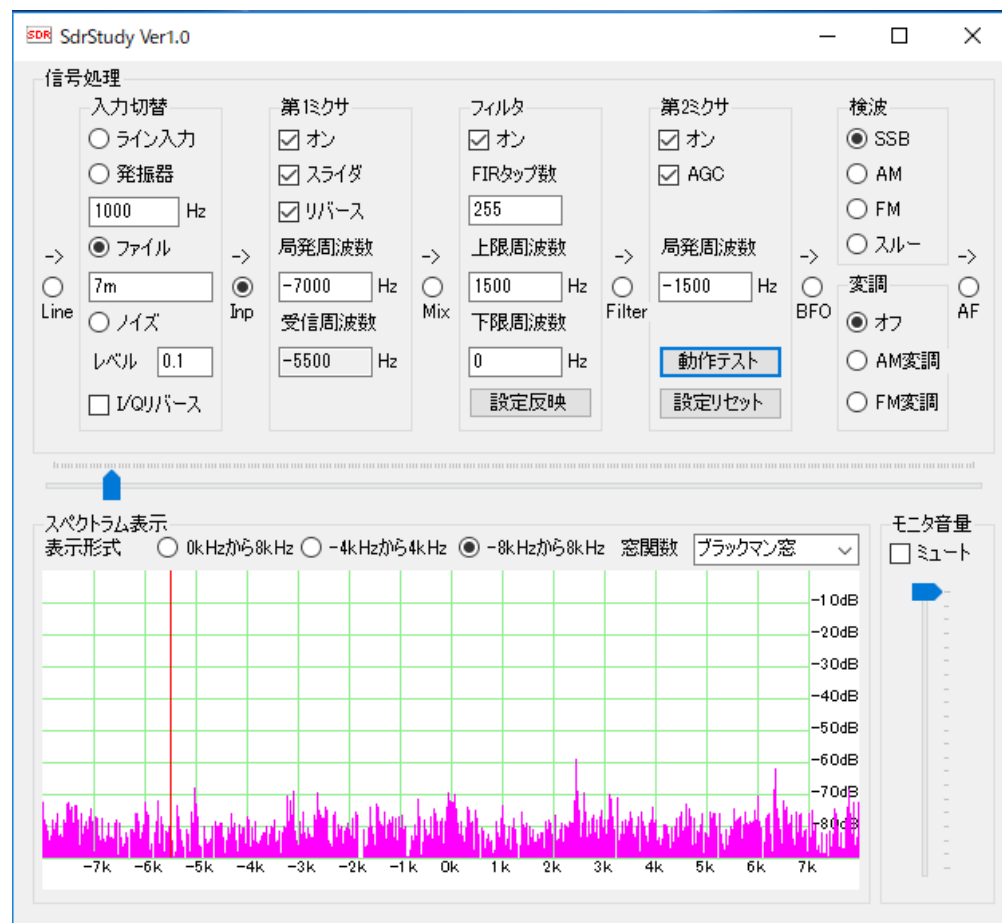
### •LabVIEW

米国のNational Instruments社が販売する実験機器の制御や信号処理を可能にするビジュアルプログラミング環境である。

## RFワールド No.22 SdrStudyのお勧め

RFワールドNo. 22「らくらく！SDR無線入門」のダウンロードサービスのソフト

<http://www.rf-world.jp/bn/RFW22/RFW22SDR.shtml>



**信号処理の入門に最適！**

**これで何ができるか？**

- ・外部入力や内蔵信号源に対し、ミキサ、フィルタ、BFO、検波、変調の信号処理がパソコン上で体験できる。
- ・スペアナ機能で観察できる。
- ・ソースが公開されているので信号処理の勉強およびカスタマイズができる。
- ・RFワールドNo.22に詳細な解説がある。

**部品を半田付けしなくても実現できる。**

## RFワールドNo.22 SdrStudyのデモ

The screenshot shows the SdrStudy Ver1.0 software interface. The top section is titled "信号処理" (Signal Processing) and contains several control panels:

- 入力切替** (Input Switch): Radio buttons for "ライン入力" (Line Input), "発振器" (Oscillator), "ファイル" (File), "lsb" (LSB), "ノイズ" (Noise), and "I/Qリバーズ" (I/Q Reverse). The "ノイズ" option is selected. A "レベル" (Level) slider is set to 0.1.
- 第1ミキサ** (1st Mixer): Checkboxes for "オン" (On), "スライダ" (Slider), and "リバーズ" (Reverse). Below are "局発周波数" (1000 Hz) and "受信周波数" (0 Hz) input fields.
- フィルタ** (Filter): Checkboxes for "オン" (On) and "FIRタップ数" (16). Below are "上限周波数" (1500 Hz) and "下限周波数" (0 Hz) input fields. A "設定反映" (Apply Settings) button is highlighted.
- 第2ミキサ** (2nd Mixer): Checkboxes for "オン" (On) and "AGC". Below is a "局発周波数" (-1500 Hz) input field. "動作テスト" (Action Test) and "設定リセット" (Reset Settings) buttons are present.
- 検波** (Detection): Radio buttons for "SSB", "AM", "FM", "スルー", "変調" (Modulation), and "AF". "SSB" is selected. Below are "AM変調" and "FM変調" options.

The bottom section is titled "スペクトラム表示" (Spectrum Display) and includes:

- 表示形式** (Display Format): Radio buttons for "0k Hzから8k Hz", "-4k Hzから4k Hz", and "-8k Hzから8k Hz". The "-8k Hzから8k Hz" option is selected.
- 窓関数** (Window Function): A dropdown menu set to "ブラックマン窓" (Blackman window).
- モニタ音量** (Monitor Volume): A vertical slider with a "ミュート" (Mute) checkbox.
- Spectrum Plot:** A graph showing a magenta signal spectrum centered at 0 Hz, with a peak level of approximately -40 dB. The x-axis ranges from -7k to 7k Hz, and the y-axis ranges from -80 dB to -10 dB.

# SDRの未来予測

## ・高性能・小型化・低消費電力・低コスト化・フレキシビリティ

半導体のプロセスの進化とともに高集積化、高性能化が進み、信号処理技術も進化してSDRの性能向上が図れる。具体的には

- ・A/D変換器の高速・低廉化で1.2GHz帯もダイレクトサンプリングを実現。
- ・LC発振器のVFO、PLLから、ICチップの局部発振器に置き換わり、直交ミキサと合わせて広受信範囲で高性能な無線機が期待される。
- ・長年培ったスーパーヘテロダインから、ダイレクトコンバージョン／ダイレクトサンプリングに置き換わり、今後弱点が克服され性能の向上が期待される。

## ・SDRインターフェースの標準化

SDR機器とパソコン間のインターフェース仕様が標準化され、どのSDRソフトウェアでも簡単に接続できるようになり、Windows標準アプリも搭載される。これによりロケーションの良い場所にあるSDR機器から、広帯域のI/Q信号が配信されリアルタイムで受信するとともに、録音して広い帯域を再生できる。

## ・ニュータイプのソフトラジオ少年が現れる

SDRソフト開発の得意なニュータイプのラジオ少年が現れ、トランジスタ、コイル、コンデンサの話は聞かれず、半田ごてを持つラジオ少年が少なくなる。

(講演者の個人的な希望を含む予測です)



下記の書籍を参考にさせていただきました。

□ RFワールド No.22 「らくらく！SDR無線入門」

著者 中本 伸一

CQ出版社

□ フルデジタル無線機の信号処理

著者 西村 芳一／中村 健真

CQ出版社

□ ソフトウェアで作る無線機的设计法

編著 太郎丸 眞／坂口 啓

科学情報出版株式会社

少しでもお役に立てて、SDRに興味を持って頂ければ幸いです。

**ご清聴ありがとうございました。**

ハムフェア 2018 JAIA技術委員会

