

初めてのデジタル信号処理

三上 直樹

浮動小数点数演算ユニットを搭載するマイコンが普通に手に入る時代

●ここ20年ですいぶん試しやすくなった

デジタル・フィルタをはじめとするデジタル信号処理は、さまざまな分野で使われています。図1に、2005年初版の拙著⁽¹⁾で掲載した図を示します。この時点でも応用範囲が広いことが分かります。

この図の中に天文学とあります。最近話題になったブラックホールの画像も、電波望遠鏡から得られた信号に対してデジタル信号処理を行うことで得られたものです^{注1}。

2005年の時点では、デジタル信号処理をリアルタイムで動くシステムで使おうとすると、高速なプロセッサが必要でした^{注2}。

例えば音響信号を扱う場合には、DSP (Digital Signal Processor) という、高速なデジタル信号処理に特化したアーキテクチャを持つマイクロプロセッサを使う必要がありました。DSPはかなり高価なものだったため、デジタル信号処理はまだそれほど多くは使われていませんでした。

しかし、近年はマイコン^{注3}の演算性能が大きく上

がっています。その上、整数演算に近い速度で浮動小数点数演算を実行できる浮動小数点数演算ユニットを内蔵するマイコンも安価に入手できるようになりました。そのおかげもあって、デジタル信号処理の応用分野はより多岐にわたるようになりました。

●デジタルであることの強み…小型、高精度

アナログ電子回路で実現する信号処理と比較すると、デジタル信号処理にはいろいろな利点があります。

・高精度化しやすい

データを表現するためのビット長を増やせば増やすほど高精度化できます。

・環境の変化に強い

温度、湿度などによる特性の変化や経年変化が全くないので、安定した品質を実現できます。

・装置を小型化しやすい

アナログ電子回路で実現する場合には、どうしても

注1：もちろん信号処理以外の処理も行っています。

注2：ここでは、デジタル信号処理をソフトウェア的に実現するものとして考えています。

注3：ここではワンチップのマイクロコントローラという意味で使います。

<p><通信></p> <p>モデム 符号化 エコー・キャンセラ 自動等化 スペクトル拡散通信</p>	<p><音響信号処理></p> <p>音響信号情報圧縮(MP3など) 音場制御 電子楽器 アクティブ騒音制御 適応形マイク・アレイ</p>	<p><音声信号処理></p> <p>音声分析 音声合成 音声認識 音声情報圧縮 テキスト-音声変換</p>
<p><画像処理></p> <p>画像情報圧縮(JPEG, MPEG) 画像強調 画像復元 画像認識</p>	<p><計測システム></p> <p>センサ信号処理 振動解析 ロックイン・アンブ 相関関数 高速フーリエ変換(FFT)</p>	<p><制御></p> <p>モータ制御 ハード・ディスク制御 ロボット アクティブ振動制御</p>
<p><自動車></p> <p>エンジン制御 アクティブ・サスペンション アンチロック・ブレーキ カー・オーディオの音場制御</p>	<p><医用システム></p> <p>CT 脳波解析 心電図解析 血流計測 X線写真などの自動診断</p>	<p><天文学、地球探査></p> <p>VLBI(超長基線干渉計) 合成開口電波望遠鏡 開口合成レーダ 地震波解析</p>

図1(1) デジタル信号処理の応用分野…2005年時点でもこれだけ広い分野で利用されている

コラム1 適応線スペクトル強調器をアナログ回路で作れるか？

三上 直樹

アナログ・フィルタで適応線スペクトル強調器(ALE)と同じようなことを行おうとすると、抵抗器、コンデンサなどの回路素子の値を変える必要があります。値を変える手段として素子を交換する方法もありますが、リアルタイムに行うことは困難です。

可変抵抗器や可変コンデンサを使うとしても、リアルタイムで値を変更するのは困難でしょう。というのは、例えば可変抵抗器の抵抗値を変えるためには、摺動子につながっている回転軸をサーボモータなどで回す必要があるため、大がかりになってしまいます。

アナログ・フィルタの特性をリアルタイムに変え

る簡単な方法として、例えば抵抗器であれば、FETを使えば実現できます。ゲート-ソース間の電圧を変えれば、ドレイン-ソース間の等価的な抵抗値を変えられます。コンデンサであれば容量可変ダイオード(varicap diodeまたはvariable capacitance diode)があります。もっとも容量可変ダイオードではあまり大きな容量のものはありません。最大容量が1000pF以下のものしか入手できないと思います。いずれにしても、素子のばらつきが大きかったり、値を選択する自由度が大きくなかったりということで、そのような回路の設計や、回路を作るときの調整が非常にやっかいになることは想像できます。

小型化できない部品を使わざるを得ない場合があります。従って小型化には限界がありますが、デジタル信号処理ではかなりの小型化が可能です。

● できる処理が多い

デジタル信号処理では、計算機のプログラムとして表現できる処理は、原理的にどんなものであっても実現できます。そのため、アナログ信号処理では難しい適応的な処理や非線形の処理^{注4}も実現できます。

● 他のデジタル処理との親和性が高い

情報圧縮、誤り訂正、暗号化などの他のデジタル処理と協調して働かせやすくなります。データの蓄積や伝送の処理を考えると非常に都合が良く、いろいろな付加価値も期待できます。携帯電話がその良い例です。

● アナログ信号処理の方が向いている場合もある

ソフトウェア的にデジタル信号処理を実現する場合、アナログ電子回路によって実現する信号処理が扱える周波数にはおよびません。しかし、FPGA(Field Programmable Gate Array)で実現すれば、かなりの

注4：非線形の処理にはいろいろな種類がありますが、信号同士の乗算がその代表的なものです。例えば、信号の変調や復調の処理を行う場合に、信号同士を乗算する場合があります。

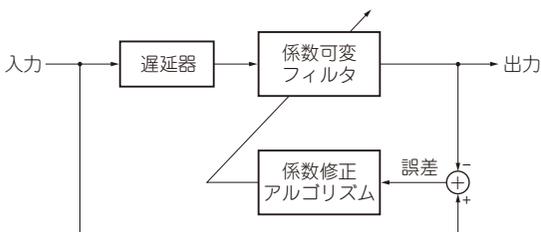


図2 適応線スペクトル強調器(ALE)で行われる大まかな処理

ところまでは良い勝負になります。

デジタル・フィルタの応用例

以降では、デジタル信号処理の分野の中で重要な位置を占めるデジタル・フィルタの応用例を示します。

本特集では、デジタル・フィルタの基礎について説明します。しかし、それだけではあまり面白くはありません。そこで基礎からは少し外れますが、デジタル・フィルタを使ってできることを知ってもらうため、非線形の処理や適応処理といった発展的な処理の例も示します。

● 応用例1：雑音の適応的な除去

適応線スペクトル強調器(Adaptive Line Enhancer, ALE)は、雑音成分を抑制するために使われる適応フィルタの一種です。雑音が重畳した信号に含まれる周波数が不明なライン・スペクトルの成分を強調します。ライン・スペクトルとは、周期信号が持つスペクトルのことです。

周波数が不明な正弦波が幾つか含まれる信号があり、そこに雑音が重畳している場合でも、ALEを使うと雑音を抑えてそれらの正弦波を強調できます。

図2にALEで行う処理の概略を示します。係数可変フィルタの部分はデジタル・フィルタで作ります。デジタル・フィルタは係数を書き替えることで特性を変更できるので、ALEはデジタル・フィルタの特徴を生かしたシステムと言えます。

係数修正アルゴリズムの部分は高度な計算を行う場合もありますが、この部分もデジタル的な処理を使わなければ実現が困難です。

▶ PCアプリで雑音除去の効果を確認する

ALEの働きを確認するために筆者の作ったアプリケーション(ALE_LMS_波形)^{注5}の画面を図3に示します。

図3は、次の2つを合成した信号を用いています。

- ①周波数200Hzの正弦波
- ②周波数600Hzの正弦波で振幅が①の半分

この信号に、SN比が10dBになるような大きさの白色雑音を重畳させ、それに対してALEの処理を行っています。

このアプリケーションでは、図3の[再生]ボタンをクリックすれば、ALEの入力信号と出力信号が音としてPCのスピーカから流れます。これらを聴いて、雑音などの程度減少するかを確認することができます^{注6}。

図3(a)は雑音が重畳されていない場合の入力信号です。

図3(b)は開始直後です。出力信号は徐々に雑音がない状態に近づいています。

図3(c)はある程度時間が経過した状態です。ほとんど雑音のない状態になっており、元の波形がきれいに復元されています。

● 応用例2：ソフトウェア無線

従来、無線機はアナログ電子回路を組み合わせで作られていました。しかし、いろいろな方式に柔軟に対応させるのが難しいため、ソフトウェア無線受信機(SDR, Software Defined Radio)が出てきました。

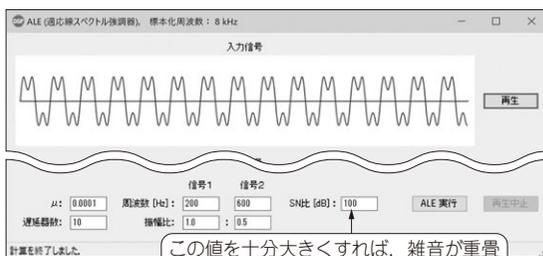
SDRの典型的な構成を図4に示します。SDRで行われる処理の中で、デジタル・フィルタの処理(低域通過フィルタの部分)は主要な構成要素の1つです。

その他に、非線形の処理や適応処理も使われています。非線形の処理には次のようなものがあります。

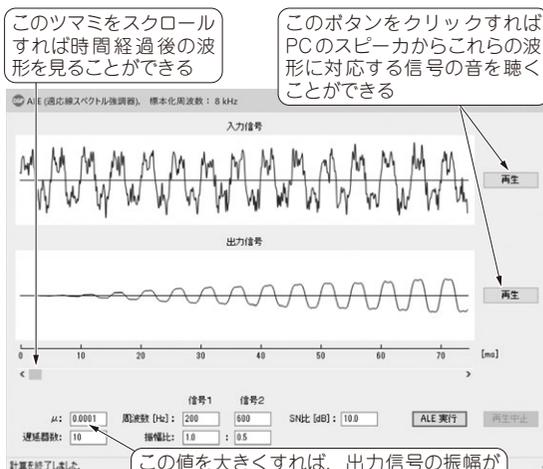
- 数値制御発信器で発生する正弦波と入力信号との乗算
- AM復調処理での2乗や平方根を求める計算
- FM復調処理でのarctanの計算が非線形の処理

図4には示していませんが、状況によって変化する妨害電波などの影響を除くために、適応的な処理が併用されることもあります。

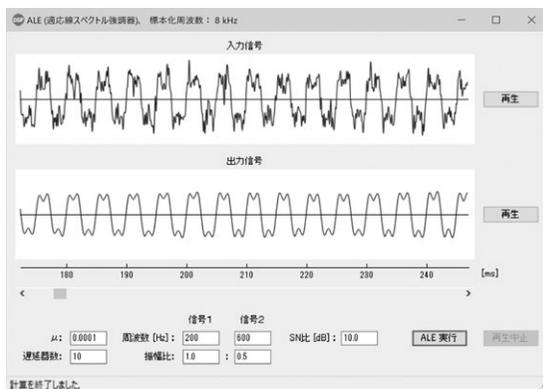
無線機で使われる変調/復調方式として、AM/FM



(a) 雑音が重畳されていない場合の入力信号



(b) 開始直後



(c) 開始からある程度時間が経過した後

図3 適応線スペクトル強調器(ALE)の効果をPC上で確認する(ALE_LMS_波形)

以外にもさまざまな方式があります。SDRであればそれらに柔軟に対応できます。

筆者がトランジスタ技術誌で紹介した⁽²⁾、中波帯域であるAM/FMのSDR方式を使った受信機を写真1に示します。このSDRは、デジタル信号処理の部分にマイコンを使っています。

注5: このプログラムは本誌サポート・ページから取得し、ダブルクリックするだけで実行できます。

注6: 音を再生して聴く場合は、十分に低域の音まで再生できるスピーカを使ってください。特にノートPCの場合、搭載されているスピーカは、低い周波数領域の音はうまく再生できません。筆者のノートPCでは、400Hz以下になるとほとんど音が聞こえません。そのような場合には、信号の周波数を高くするか、低域まで再生できる外付けのスピーカ(アクティブ・スピーカなど)を使ってください。

特設

デジタル信号処理のススメ

Python エフェクティブ

マイコンで時報検出

特集

フィルタ作り 基礎の基礎

係数アプリや波形観測アプリで合点! FIR&IIRフィルタ作り

配布プリント基板で体験! マイコンで動くフィルタ作り

特集 PCアプリとマイコン基板で作り学ぶ デジタル・フィルタ

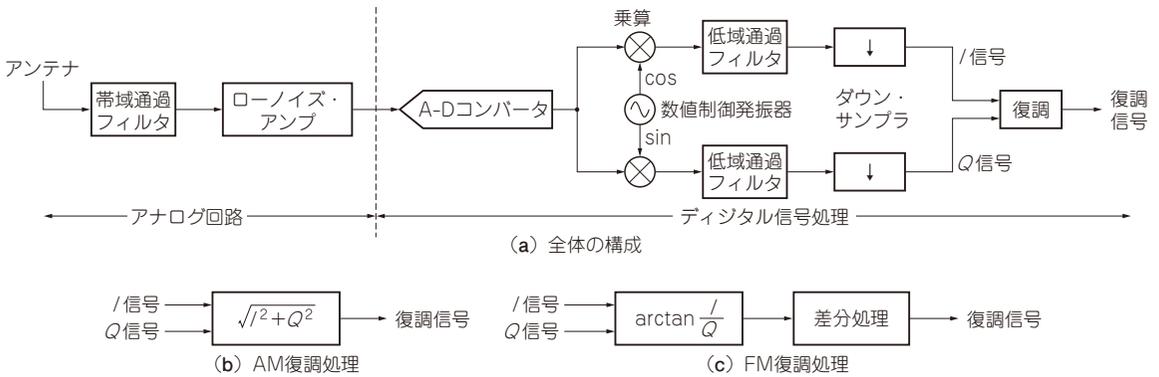


図4 ソフトウェア無線受信機 (SDR) の典型的な構成

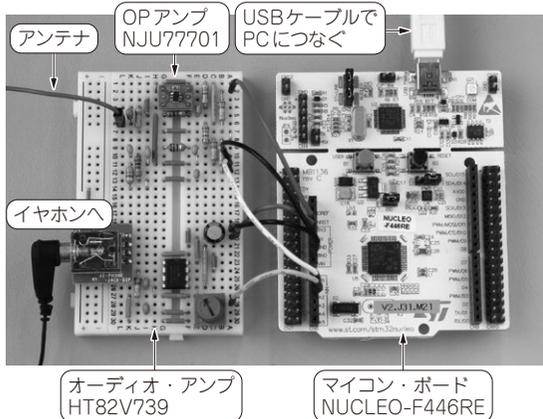


写真1 ソフトウェア無線機を構成するマイコン・ボードと外付け回路
トランジスタ技術2021年1月号で紹介したもの

● 応用例3：ヒルベルト変換器とその応用⁽³⁾

信号処理の中で、位相シフタの処理が必要になる場合があります。位相シフタは信号の位相だけを変化させる処理です。広い周波数範囲の信号に対して振幅は変化させずに一定の位相差の信号を得る処理を、精度よくアナログの電子回路で実現することは非常に困難です。しかし、デジタル・フィルタであれば高精度なものを簡単に実現できます。

位相を $-\pi/2$ シフトする位相シフタは、ヒルベルト変換用フィルタで実現できます。これもデジタル・フィルタの一種です。

実際に実現可能なヒルベルト変換用フィルタは直流付近と標本化周波数の半分の周波数付近を除くと、信号の周波数を変化させても、高い精度で利得を一定に保つことができます。

この位相シフタの使い道はいろいろありますが、ここでは周波数変換器を取り上げます。周波数変換器で行う処理を図5に示します。これも非線形の処理ですが、このような構成で簡単にしかも精度良く周波数を

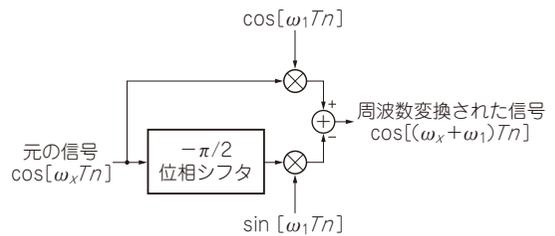


図5 位相シフタを利用する周波数変換
 $-\pi/2$ 位相シフタとして、ヒルベルト変換用のデジタル・フィルタを使う

変換できます。

▶ PCアプリで位相シフタの効果を確認する

$-\pi/2$ 位相シフタと周波数変換器の動作を確認するためのアプリケーション (Hilbert変換_周波数変換_正弦波入力_波形)^{注5}の画面を図6に示します。この周波数変換器は、周波数が100Hz高くなるように作られています。 .exe ファイルをダブルクリックするだけで実行できます。

図6(a)と図6(b)は、位相シフタの様子を示しています^{注7}。同相・直交信号というところに、2つの波形が表示されています。この両者の位相差が、ちょうど $\pi/2$ になっています。

図6(c)に周波数変換を行っている様子を示します。200Hzの正弦波の入力に対して、100Hz高い300Hzの正弦波が出力されています。

本特集で扱う内容

● 第1部：PCアプリで体験して学ぶデジタル・フィルタの基礎

第1部ではデジタル・フィルタの基礎について説明します。基礎と言っても、回路網理論、制御理論、フーリエ変換、z変換、システム理論と非常に多岐にわたります⁽⁴⁾。これらは本特集では扱いません。

● 第2部：デジタル・フィルタの構成法およびその係数の設計法

第2部では、大きく分けて3つのテーマを取り上げます。

1. フィルタの構成法

離散時間システムの要素をどのように接続してデジタル・フィルタを作ればよいのかを、ブロック図を交えて説明します。

2. ブロック図の中で使われる乗算器の係数

乗算器の係数(フィルタの係数とも呼ばれる)を設計する方法を説明します。

フィルタによっては、演算誤差とフィルタの係数の誤差の影響を知っておく必要があります。これについても取り上げます。

3. PCアプリでデジタル・フィルタの動作を確認

デジタル・フィルタの動作を確認するためにPCで動くアプリケーションを使いました。これでデジタル・フィルタの様子を見てみます。

● 第3部：デジタル・フィルタをSTM32マイコンで動かす

第3部では、マイコンで動作するデジタル・フィルタを紹介します。このプログラムの最初のバージョンは、Mbedを使って作ったものです。特集では、Mbedの後継であるKeil Studio Cloudでもコンパイル(ビルド)できるように修正を行ったものを紹介します。これも本誌のサポート・ページから入手できます。<https://interface.cqpub.co.jp/2306T/>

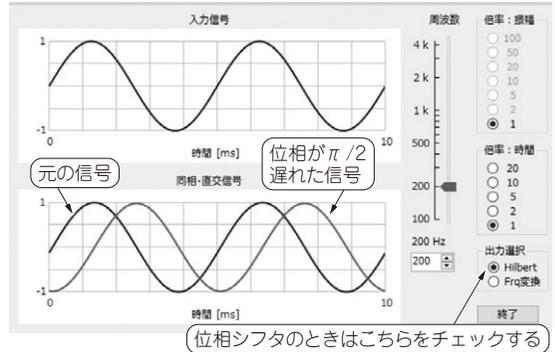
読者がSTM32マイコン・ボードを使って記事の内容を試しやすいように、プリント基板を作りました(写真2)。

第2部では周波数で特性を見ながらフィルタ設計できる

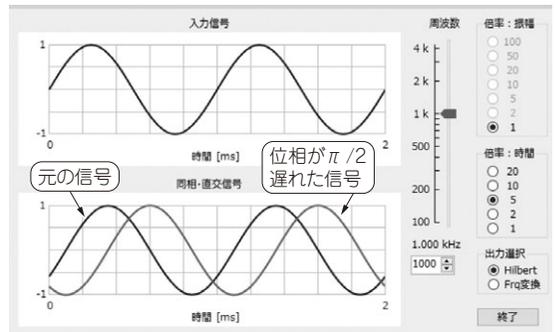
● フィルタ係数を決めるアプリを提供する

デジタル・フィルタのプログラムを作ることは、それほど難しいことではありません。しかし、その処理の中で使う乗算の乗数(フィルタの係数と呼ばれる)を決めることは簡単ではないので注8、フィルタを自分自身で作る際には、これが目の前に立ちはだかる大きな壁となります。

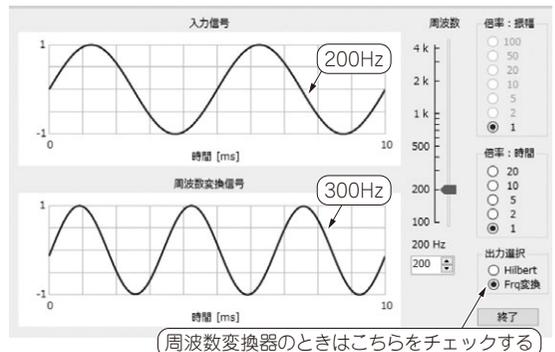
本特集でも第2部でフィルタの係数の決め方(フィルタの設計と呼ばれている)について簡単に説明しています注9。しかし、この説明だけでは、自分自身でフィルタの係数を求める(実際にはそのためのプログラムを作る必要がある)ことは非常に困難です。そのため、実際にデジタル・フィルタを作るとなると、既にできている設計用のアプリケーションを使うのが



(a) $-\pi/2$ 位相シフタ(200Hz)



(b) $-\pi/2$ 位相シフタ(1kHz)



(c) 周波数変換(200Hz→300Hz)

図6 $-\pi/2$ 位相シフタと周波数変換器の動作をPC上で確かめる筆者が作ったアプリケーション(Hilbert変換_周波数変換_正弦波入力_波形)を実行している様子

注7: ヒルベルト変換用のフィルタは、位相遅延の他に時間の遅延も伴います。そのため、上側に表示される入力信号と、下側に表示される元の信号の位相は一致しません。下側に表示されている2つの波形は、ヒルベルト変換用のフィルタによる時間の遅延があることを考慮して表示しています。詳しくは参考文献(3)を参考にしてください。

注8: デジタル・フィルタを実現する方法として、プログラムで実現する以外にも、例えばFPGAで作るなどあります。どの方法を探るにしても、乗算の際の乗数を決めるのは簡単なことではありません。

注9: 独自に設計用のプログラムを作るための解説は、それだけで1冊の本の分量になってしまいます。

特設

デジタル信号処理のススメ

Python

マイコンで時報検出

特集

フィルタ作り 基礎の基礎

係数アプリや波形観測アプリで合点! FIR&IIRフィルタ作り

配布プリント基板で体験! マイコンで動くフィルタ作り