

最新プロセッサとシミュレータで無線&計測信号処理

新 アナログ& デジタル・フィルタ 理論と実践

西村 芳一

【CONTENTS】

基本中の基本「FIR フィルタ」…1

超高速！乗算器レス・

デジタル・フィルタ「CIC」…10

波形ひずみゼロ！

ガウシアン近似移動平均フィルタ…19

狭帯域多チャネル通信用「ナイキスト」…26

ノイズを追撃する賢いフィルタ「適応型」…33

アナログ・フィルタ設計 初めの一歩…39

アナログ・フィルタ「LC はしこ型」の基礎…46

LC フィルタ設計ソフトの計算アルゴリズム…52

マイクロストリップ・ラインを使った LC フィルタの基礎…59



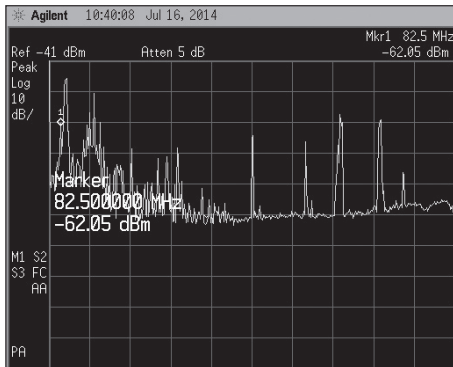
このPDFは、CQ出版社発売の「新 アナログ&デジタル・フィルタ 理論と実践」の一部見本です。

内容・購入方法などにつきましては以下のホームページをご覧ください。

内容 <https://shop.cqpub.co.jp/hanbai/books/51/51051.htm>

購入方法 <https://www.cqpub.co.jp/order.htm>

本冊子は「トランジスタ技術」掲載の記事を抜粋しました。図表番号、連載タイトルと回次、当時の情報などは変えずにそのまま掲載しておりますことをご承知おきくださるようお願いいたします。



最新プロセッサとシミュレータで 無線&計測信号処理 新アナログ&ディジタル・ フィルタ理論と実践

第1回 基本中の基本「FIRフィルタ」

西村 芳一 Yoshikazu Nishimura

連載のねらい

● 高速プロセッサ&シミュレーション時代のフィルタ設計技術を伝えたい

特定の周波数成分を取り出したり、取り除くことができる「フィルタ」は、今でも重要な電子回路です。

特にディジタル・フィルタは、アナログでは実現できない高性能の信号処理を実現できますから、使わない手はありません。プロセッサの高速化やシミュレータの誕生で、その設計法は様変わりしています。

シミュレーションの普及も、設計法に大きな変化をもたらしました。大昔は、試作を繰り返して、アナログ・フィルタの特性を最適化していましたが、今は自宅のパソコンでも高精度なシミュレーションが可能です。完成度の高いフリーのシミュレータも多く、プロセッサの演算速度も格段に上がっています。シミュレ

ーションで予測したとおりに試作すれば、1回で狙った性能が得られることも少なくありません。

本連載では、こうした新しいフィルタ設計の手法を紹介します。表1に本連載で取り上げるフィルター一覧を示します。

● 数百MHzのRF信号もディジタル処理する時代

アナログ信号をディジタル信号に変換するA-Dコンバータや、信号処理用プロセッサ(FPGAやDSP、マイコン)が急速に進化したために、これまで不可能だった、数十M～数百MHzのRF信号もディジタル処理できるようになりました。

図1に示すのは、受信した電波をダイレクトにA-D変換し、ディジタル信号処理によって復調するレシーバSDR(Software Defined Radio)のブロック図です。写真1に示すのは、アナログ・ミキサを使わず、30 MHz以下のアンテナからの電波をA-Dコンバー

表1 本連載で取り上げる予定のフィルター一覧

FIRやIIRなどの基本的なディジタル・フィルタはもちろん、ディジタルでは手におえない、GHz帯アナログ・フィルタも紹介する

タイプ	種類	基本特性
ディジタル	FIR	有限インパルス応答、直線位相特性
	IIR	無限インパルス応答、アナログ・フィルタの置き換えが容易
	CIC	移動平均LPF、SDRのダウン・サンプリング信号処理用
	CCI	移動平均LPF、SDRのオーバー・サンプリング信号処理用
	ヒルベルト	奇対称インパルス・レスポンス、I/Q分離用
	ガウシャン	移動平均ボックスカー・フィルタ、GMSK変調での波形成形
	ナイキスト	ディジタル無線機の波形成形や帯域制限
	FFT	特性可変型(適応型)
	適応	LMS, FFT, RLS, 自動ノイズ・キャンセリングに利用
	ウェーブ	LC梯子型フィルタのシミュレーションに利用
アナログ	カルマン	多変数制御の適応フィルタ、航空宇宙分野で利用
	アクティブ	100 kHz以下のアナログ信号処理用、オーディオなど
	LCはしご型	100 k～100 MHzのアナログ信号処理用
	ハイブリッド	100 M～400 MHz、集中定数と分布定数の組み合わせ、LCはしご型
	マイクロストリップ	400 M～2 GHz、LCはしご型、マイクロストリップ・ラインで構成
	共振型Ⅰ	200 M～2 GHz、誘電体で構成、ヘリカル・フィルタに利用
	共振型Ⅱ	2 GHz以上、インターディジタル・フィルタ、コム・ライン・フィルタ
	組み合わせ	BPF、分波フィルタに利用

CIC(Cascaded Integrator Comb), CCI(Cascaded Comb Integrator), LMS(Least Mean Square), FFT(Fast Fourier Transform), RLS(Recursive Least Square)

図1 ダイレクト・サンプリング受信機の信号処理ブロック

数十M～数百MHzのRF信号もデジタル処理する時代になっている

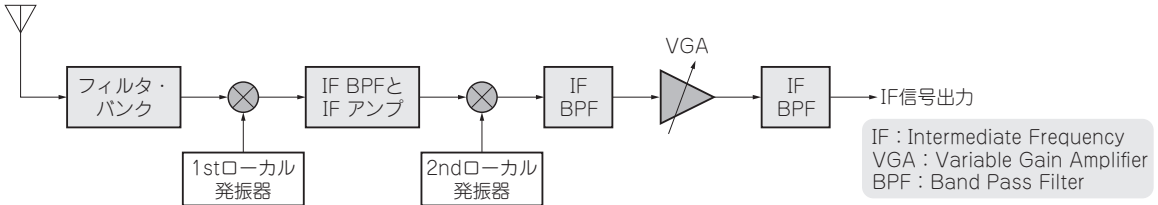
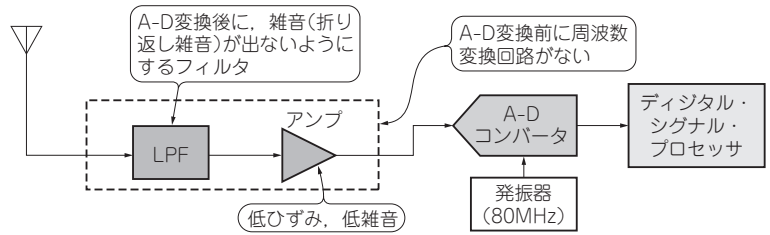


図2 従来のアナログ受信機の内部ブロック



写真1 アナログ・ミキサを使わずダイレクトに電波をA-Dコンバータに入力するタイプの受信機の例
FPGAを内蔵し、RF信号を処理する。SDR(Software Defined Radio)とも呼ぶ

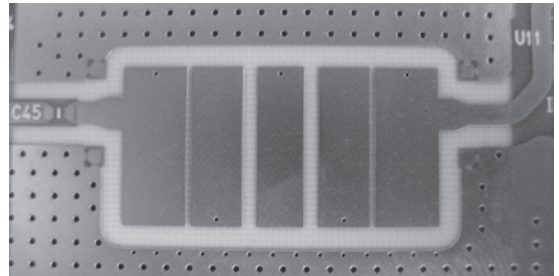


写真2 プリント基板上で構成された中心周波数GHz超のRF信号用アナログBPF

タに直接入力して、FPGAやDSPで処理する受信機(PERSEUS, AOR)です。図2に示すのは従来の無線機のブロック図です。アナログ回路で構成されたミキサや発振回路、フィルタを使っていました。

● アナログ・フィルタはこれからも欠かせない

本連載ではアナログ・フィルタの作り方も解説します。

アナログ・フィルタのすべてをデジタルに置き換えることはできません。アナログ・フィルタとデジタル・フィルタの両方を設計できて一人前です。

シャノンのサンプリング定理から逃げることはできませんから、A-Dコンバータの前には、図1に示すダイレクト・サンプリングSDRでも、アナログ回路で構成されたアンチエイリアシング・フィルタは必須です。

GHzを超えるマイクロ波用のフィルタもデジタルでは作ることができません。写真2に示すのはプリント・パターンで構成した中心周波数が3GHzのインターデジタル型のBPFです。

● FIRフィルタやIIRフィルタだけじゃない…

教科書に必ず登場するデジタル・フィルタといえ

ば、FIR(Finite Impulse Response) や IIR(Infinite Impulse Response)ですが、ほかにもデジタルの強みを生かしたものがたくさんあり実用化されています。

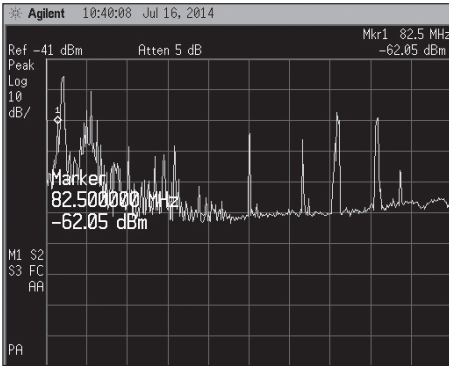
▶ 適応フィルタ

これは、信号の特性に合わせて構成を変えて周波数特性を動的に調整できるフィルタです。アナログ・フィルタにも、バリキャップを使って中心周波数を変化させることができるものがありますが、デジタル信号処理を利用すれば、ハードウェアを変更することなく、ゲインや位相など、さまざまな周波数特性を最適化できます。

▶ カルマン・フィルタ

ロケットの姿勢制御に利用されているカルマン・フィルタも、注目です。

抵抗やコンデンサで構成するアナログ・フィルタや教科書的なデジタル・フィルタ FIRは、過去のデータを平均化するだけですが、カルマン・フィルタは未来の値を予知します。人が一部の機能に障害が出ても適応するのと同じように冗長性が高く、いくつかあるセンサのうちの1つが故障しても、変数間の物理的な依存関係をもとに真の信号を予測し、実測値とのずれをもとに自らの特性を最適化します。



最新プロセッサとシミュレータで 無線&計測信号処理 新アナログ&ディジタル・ フィルタ理論と実践

第2回 超高速! 乗算器レス・ ディジタル・フィルタ「CIC」

西村 芳一 Yoshikazu Nishimura

● 高速サンプリング・データの間引き処理によるエイリアシング発生を抑制する方法を伝授

サンプリング周波数が100 MSPSを超えるA-Dコンバータも珍しくなくなり、HF帯のRF信号を直接A-D変換して、FPGAでディジタル信号処理する設計が増えてきました。今回紹介するのは、クロック周波数が100 MHzといった高い周波数のときのFPGAに実装するときに有効なディジタル・フィルタ「CIC (Cascaded Integral-Comb) フィルタ」です。〈編集部〉

乗算器レスのシンプル構成だから 高速に動く

● 乗算器が不要で高速処理が可能

図1に示すのは、FPGAに組み込んで利用しているFIRフィルタ回路(30タップの例)です。

減衰特性をもっと急峻にしたければ、タップ数を30や40に増しますが、そうすると30~40個もの乗算

器が必要になります。こんなに多くの乗算器を実装できるFPGAやASICは、グレードが高く高価です。

CICは、乗算器を使わない、加算器だけでできたシンプルな高速信号処理用のディジタル・フィルタです(図2)。FIRフィルタと比べると、その特性は優れているとはいえませんが(次ページのコラム参照)、FPGAのように限られたハードウェア資源を使って高速なフィルタリング処理をしなければならないときに欠かせません。

逆にサンプリング周波数が低い場合は、CICフィルタは使わないほうがよいでしょう。FIRフィルタやIIRフィルタなどの高性能なディジタル・フィルタのほうがコストもかからずお勧めです。

● FIRフィルタは乗算器食い虫

写真1に示すのは、80 MHzのRF信号をダイレクトにサンプリングできる無線機「AR5001D」です。内部では、直交ディジタル・ミキサでキャリア周波数が0 HzになるようなI/Q信号を生成しています(図3)。復調方式をAMとすると、最終的に再生されるのは音声なので、帯域は±6 kHzもあれば十分です。しかし



写真1 実際のSDR無線機(AR5001D, AOR)はCICフィルタを利用している

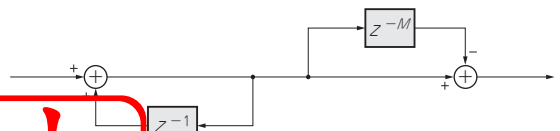


図2 乗算器を使わないシンプルで高速動作が得意なCICフィルタ

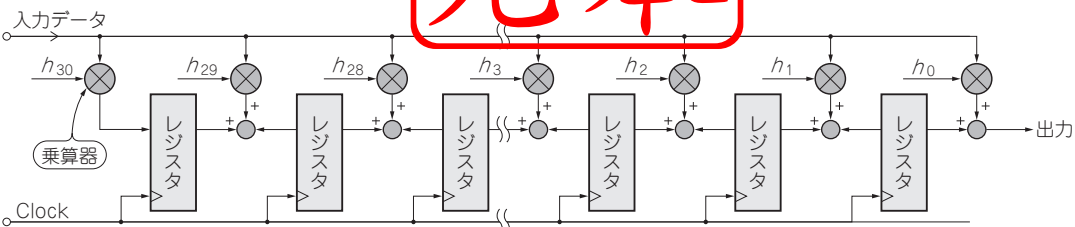
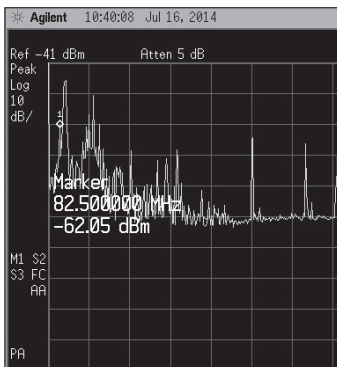


図1 急峻な減衰特性が得られる高次FIRフィルタをFPGAで作るためにはたくさんの乗算器が必要
30次のFIRフィルタをFPGAで作るのは非現実的



最新プロセッサとシミュレータで 無線&計測信号処理 新アナログ&ディジタル・フィルタ 理論と実践

第15回(最終回) ストリーミング信号の低ひずみ圧縮フィルタ「CQF」
MP3やモーションJPEGに利用されている

西村 芳一 Yoshikazu Nishimura

私たちがよく使う画像ファイル・フォーマットJPEGは、 8×8 ピクセルの領域に区切り、離散コサイン変換(DCT: Discrete Cosine Transform)を使って周波数成分に変換する圧縮技術です(1992年リリース)。

JPEGは、圧縮率を上げると離散コサイン変換のブロックひずみが発生し、再合成したときにノイズ(モスキート・ノイズ)として現れます。

これを解決するために、データを領域に区切らずに周波数成分に分割する多重解像度解析を使います。この変換に共役直交フィルタ(CQF: Conjugate Quadrature Filter)と呼ばれるFIRフィルタを用いると、ブロックひずみを発生させずに再構成できるのです。

図1に2バンドのサブバンド・コーダの例を示します。入力された波形は、ロー・パスとハイ・パスのハーフ・バンド・フィルタで分割とダウン・サンプリングが行われ、コーダに送られます。そのときエイリアシングが発生しますが、それを逆変換用の共役直交フィルタに通すとエイリアシングがキャン

セルされます。最後にこれらを加算すると元の波形が再現されるのです。

本稿では、共役直交フィルタの概要を解説し、入力波形が再合成されるようすを、MATLABを使って説明します。

〈編集部〉

1992年誕生のJPEGの問題点と進化形

■ JPEGはブロックに区切って圧縮

● 人の目が感じない高周波成分を圧縮してしまう

JPEGやMPEGなどディジタル画像圧縮には、ベースとして離散コサイン変換(DCT)が使われます。それによって時間軸の信号を周波数領域に変換し、成分の重要度に合わせて再量子化します。例えば、映像信号の低周波成分には大体の形状を決める重要な働きがあります。一方、高周波成分には輪郭をくっきり見せる情報があります。人間の目は高周波成分に対して感度が低いので、情報を圧縮しても問題ないのです。

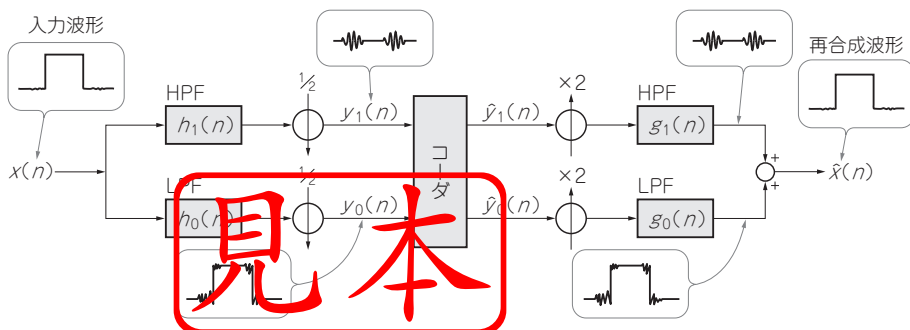
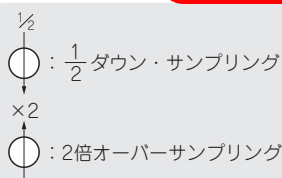


図1 2バンドのサブバンド・コーダに共役直交フィルタ(CQF)を用いる例

ハーフ・バンド・フィルタで低域と高域に分割され、 $1/2$ ダウン・サンプリングされるとエイリアシングが発生する。共役直交フィルタを用いると、再構成するときにエイリアシング成分がキャンセルされ、完全に元の波形を再構成できる



HPF: High Pass Filter(ハイ・パス・フィルタ)
LPF: Low Pass Filter(ロー・パス・フィルタ)

$$\begin{cases} H_0(z) = \sum_{n=0}^{L-1} h_0(n)z^{-n} \\ H_1(z) = \sum_{n=0}^{L-1} (-1)^n h_0(L-1-n)z^{-n} \\ G_0(z) = \sum_{n=0}^{L-1} h_0(L-1-n)z^{-n} \\ G_1(z) = \sum_{n=0}^{L-1} (-1)^n h_0(n)z^{-n} \end{cases}$$

伝達関数

$h_0(n)$: 基本LPFの係数