2005.5.22

デジタルチャンネルディバイダ channeldivierF3 Ver0.31 について

1．概要

FIR（直線位相）型の３Way のチャンネルディバイダとして機能する、foobar2000 用の DSP プラグインです。

foobar2000 については、こちらをご参照ください。

http://www.foobar2000.org/

foobar2000 の日本語の解説については、こちらをご参照ください。

http://foobar.s53.xrea.com/fbwiki/

2．配布ファイル

・foo_dsp_channeldividerF3.dll	プラグインです。
・FirGain3.exe	Tap 数と周波数特性の関係を示すプログラムです。
・ReadMe3.pdf	本文書です。

3．仕様

現状（Ver031）の仕様は以下の通りです。

・フィルタの種類：カイザー窓を用いた FIR（直線位相）型
・遮断特性：Tap 数で指定（Tap 数と遮断特性の関係については別プログラム（FirGain3.exe）参照）
・阻止帯域減衰量（Stop Band Attenuation）： －144dB
・内部演算精度：64bit（倍精度浮動小数点）
・出力 ch：１ch 低域左、2ch 低域右、3ch 中域左、4ch 中域右、5ch 高域左、6ch 高域右
・出力 bit 数：Output プラグインで指定

4．動作環境

・foobar2000 が動作する環境
・CPU：PentiumⅢ 1GHz 以上推奨
・サウンドカード：6ch 出力をサポートしているもの。24bit 出力推奨

本プログラムを動作させるためには msvcr70.dll が別途必要です。msvcr70.dll は
http://www.vector.co.jp/vpack/filearea/win/util/runtime/index.html の
VC++ .NET ランタイムインストーラー 1.0 などで手に入れることができます。

5．使い方

(1) インストールなど

①foobar2000 がインストールされているフォルダの中の components フォルダに foo_dsp_channeldividerF3.dll を入れてください。
②もし、システムに msvcr70.dll がインストールされていない場合は windows フォルダの system32 ディレクトリか、foobar2000.exe と同じフォルダに msvcr70.dll を入れてくださ

い。
③メニューの foobar2000 から preferences を選び DSP Manager で channeldividerF3 を有効にします。
④DSP Manager の下の channeldividerF3 を選択し、希望のクロス周波数などを入力します。
⑤出力は低音は１～２ch、中音は３～４ch、高音は５～６ch です。

(2) 周波数の指定について
クロスオーバー周波数は、adjust Coefficient（係数調整）チェックボックスにチェックが入っている場合は、低域のローパスフィルタと中域のバンドパスフィルタの低域側は同一の周波数のみ指定可能、中域のバンドパスフィルタのローパス側と高域のハイパスフィルタについても同一の周波数のみ指定可能です。チェックボックスのチェックをはずすとそれぞれ独立に指定できることとなります。詳細は後述します。

(3) 遮断特性
Tap 数で間接的に指定します。Tap 数は必ず奇数にしてください。（一応計算時には奇数に修正するようにはしていますが。）クロスオーバー周波数が低域になるほど、同一の遮断特性を得るためには大きな Tap 数が必要です。

(4) 遅延
遅延はサンプリング周波数 44100Hz のときのサンプル数（Tap）単位で与えてください。サンプル数を入力すると距離を計算し表示します。なお、クロス周波数、遮断特性、遅延の設定については、次に再生ボタンを押し再生が開始された時点で変更されます。

(5) レベル調整
0.5dB 単位でアッテネートできます。単純な掛け算で音量を絞っていますので、あまり、減衰させることは bit 落ちを招くので好ましくありません。ただし、フィルタ演算の結果が１を超えた場合の悪影響を防ぐために低域、中域、高域とも－３ｄB 以下にすることをお勧めします。（基準とするほうを－3dB とし他をそれ以上に減衰させる。）詳細は、１０．測定(6)を参照してください。なお、全体の音量調整は、bit 落ちのことを考えれば、ＤＡコンバータの後のアナログボリュームで調整したほうが良いです。多チャンネルのアナログボリュームになかなか安価で良いのがないのが悩ましいところですが。

６．問題点
・音楽再生中に DSP マネージャーを開くと問題が生じる可能性があります。

７．いいわけ
作者はデジタル処理に関してもプログラム作成に関してもド素人です。FIR フィルタを使いためにデジタル処理を入門書を読んで勉強し（見よう見まねで中身を良く理解せずに）PASCAL（delphi）でチャンデバを作って遊んでいました。これは waveFile 限定、DirectSound 限定だったので、ＣＤを直接再生しＡＳＩＯで出力したいために（これを 1 から作るのは私には不可能です）foobar のプラグインの作り方及び C＋＋の勉強を始めました。だもんで、hallow world の類以外では作者が C＋＋を使用して作ったものとしては channeldivierF に続く 2 番目のソフトです。（まだＣ＋＋をよく理解してません。本来、フィルタ係数についてはクラス化した配列として２Way も 3Way も統一的に扱うべきなんででしょうが、クラスとか継承とかがよくわかっていないので、２Way と 3Way を別々に作成してます。）ということで、ひょっとしたらとんでもないミスをしている可能性はあります。また、ここに書いていることも間違いがたくさんあると思います。その場合は、なにとぞご容赦ください。

８．使用上の注意及び免責
本プラグインは作成途上であり、思わぬところで雑音が出る可能性があります。従って、ツィー

タ保護のために、ツィータとアンプを直結せず、必ず保護用のコンデンサを直列につないでください。

また、Windows の警告音を出さないようにするため、コントロールパネルの「サウンドとオーディオデバイス」を選択し「サウンド」タグのサウンド設定から「サウンドなし」を選択するか、Windows の警告音や他のアプリケーションの音は別のサウンドカードから出力させることをお奨めします。（これをやらないと警告音が大音量で出てビックリすることがあります）

なお、本プログラムを使用することにより生じたいかなる損害についても、作者は一切の責任を負わないものとさせていただきます。

９．仕様などの詳細

(1) 遮断特性

①遮断特性指定方法など

このプラグインで用いているフィルタ係数は教科書通りのカイザー窓を用いたものです。カイザー窓で FIR フィルタを設計する場合、通常、通過帯域（pass band)、阻止帯域（stop band)、阻止帯域減衰量（stop band attenuation）を指定すると、指定性能を満足する必要 Tap 数（フィルタ長）が計算され、計算された Tap 数分のフィルタ係数が計算されます。チャンデバの場合、CD のダイナミックレンジやＡＤコンバータのダイナミックレンジ、サウンドカードの出力などを考えると阻止帯域減衰量は－144dB あれば十分なので、これで固定とすると、あとは、通過帯域と阻止帯域を指定すればよいことになりますが、二つの数字を指定するのは面倒？（プログラム的にも）だったので、Tap 数を指定することにより間接的に両者を指定することにしました。

②FirGain3.exe について

Tap 数から遮断特性を想像するのは結構難しいので Tap 数と周波数を指定すると周波数特性を描画するソフト FirGain3.exe を別に作成しました。（前に delphi で作ったチャンデバの表示部分をそのまま使いました。手抜きソフトですので描画にやたら時間がかかることがあります）

プログラムを立ち上げると、以下のような画面（一部）がでますので、カットオフのところに希望のクロスオーバー周波数を入れ Tap 数を入力し、フィルタ特性計算ボタンを押すと、指定したクロスオーバー周波数と Tap 数の周波数特性が出ます。カイザー窓推薦 Tap 数(参考)の欄は、プラグインの周波数特性推測には関係ありません。(手抜きプログラムですみません。)

合成周波数特性は青色の線で示されます。係数調整のチェックをしたりはずしたりして計算をさせると係数調整（詳細は後述します。）の効果がわかりやすいと思います。

③遮断特性・遅延とサンプリング周波数の関係

遮断特性と遅延の指定はサンプリング周波数 44100Hz の場合の Tap 数を指定することにより行いますが、他のサンプリング周波数の音源の場合は、44100Hz とほぼ同様の減衰率、遅延となるよう内部で簡易的なやりかたでフィルタの再構成を行います。具体的には、指定した Tap 数を内部でサンプリング周波数に比例して増加させています。従って画面で 4001Tap の Tap 数を指定した場合でも、88200Hz の音源を再生する場合は 8003Tap の計算を行うこととなります。現在個人で手に入れられるソースはサンプリング周波数 44100Hz のものに限られていると思うので、ここまでやる必要があるのかどうか疑問でしたが、異なるサンプリング周波数のものを間違って再生した場合のツィータの保護などを考慮しこのような構成にしました。

④遮断特性の対称性について

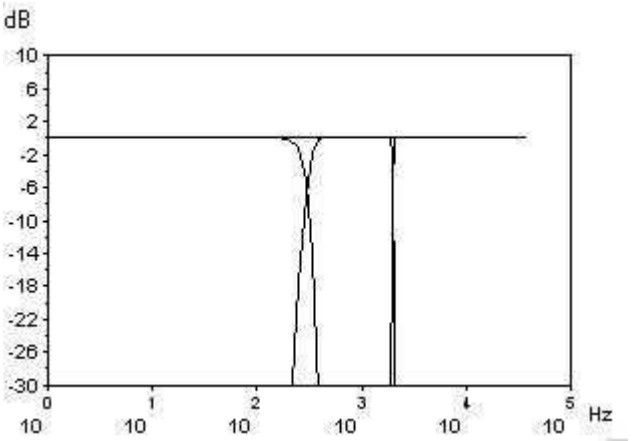
カイザー窓を用いた FIR フィルタの場合、ローパスとハイパスで同一の周波数・Tap 数を指定した場合、周波数特性は実数軸において対称となり、オーディオで標準的に使われている対数軸では対称になりません。バンドパスフィルタ（中域）のローパスとハイパスについても同様です。従って、対数軸で表示した場合は中域についてはハイパスフィルタの切れが悪く、ローパスフィルタの切れがやけによいように見えます。カイザー窓を使っている限りバンドパスフィルタ(中域)のローパスとハイパスの遮断特性は個別には指定できないのでこの点はご容赦ください。（係数調整にチェックを入れるとバンドパスフィルタの特性は低域と高域の Tap 数で決定されるので、見かけ上、ある程度中域の遮断特性をローパスとハイパスで別々に変更できるようになります。）

⑤フィルタ係数の調整について

カイザー窓を用いた FIR フィルタの場合、見かけ上同一の遮断特性を得るためにはクロス周波数が低いほど大きな Tap 数（クロス周波数に反比例した Tap 数）が必要になります。このため、３Way では各フィルタのタップ数を同一とした場合、低域と中域の遮断特性をある程度急峻にすると高域では著しく急峻な特性となります。周波数特性のグラフを対数軸で見ると特にこれが強調されます。

下図は、scilab（matlab 互換の数値計算用ソフト）でカイザー窓を用いたフィルタ（300Hz、2000Hz のローパス、バンドパス、ハイパス、それぞれ Tap 数 901Tap のもの）の周波数特性及び合成特性を計算させたものです。合成特性はフラットですが高域の遮断特性はものすごく急になっています。

scilab についてはこちらをご参照ください。
http://scilabsoft.inria.fr/

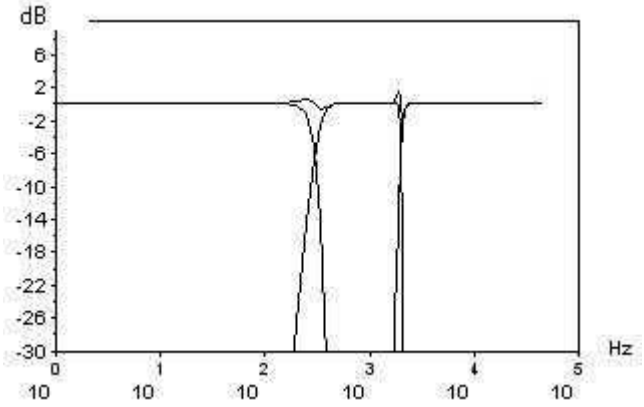


これを避けるためには、各フィルタ毎に Tap 数を指定すればよいわけですが、カイザー窓

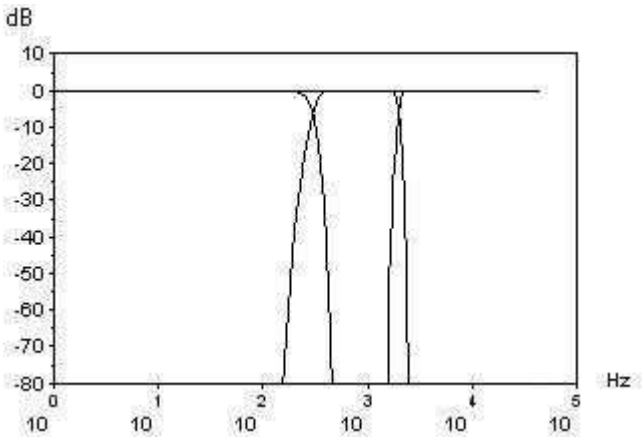
でこれを行うと問題が生じます。
　FIR フィルタは、計算の起点となる時点はフィルタ係数の中央ですから、まず、タップ数の異なる３つのフィルタの群遅延をそろえるために、フィルタ係数の中央をあわせ、Tap 数の短いフィルタの前後にゼロを詰めます。こんな感じです。

低域フィルタ		
零詰め	中域フィルタ	零詰め
零詰め	高域フィルタ	零詰め

　これで一応群遅延は合うわけですが、このフィルタをそのまま使うと、合成特性がクロス周波数でフラットになりません。クロスオーバー周波数を 300Hz、2000Hz、Tap 数を 901Tap、701Tap、301Tap としてゼロ詰めしたものの合成特性を scilab で計算したものは以下の通りで、合成特性はフラットになっていません。



　これを補正するため、最初に計算された 3 つのフィルタの合成特性からインパルスを差し引いた差分を中域のフィルタに加えます。scilab での計算結果は以下の通りであり、合成特性はフラットになっています。adjust Coefficient にチェックを入れると、この補正を行います。



インパルスとの差分を中域に全部割り振っているということは、結局、インパルスから低域と高域の係数を引いたものを中域の係数とすることと同じですから、この補正を行うと、Tap 数の変更による遮断特性の変更は低域の Tap 数と高域の Tap 数の影響が支配的となり、中域の Tap 数を変えても中域の遮断特性は変わらなくなります。

チェックをはずせば、クロスオーバー周波数を別々に指定することはできるようになります。この場合は、合成特性はフラットにはなりません。（クロス周波数を別々に指定するということは、もともと、合成特性がフラットであることをあきらめているはずなので・・・・・。）

(2) 演算速度

FIR フィルタの畳込みには FFT を利用していますので、現在発売されているＰＣであれば、3Way のチャンデバとして必要な演算速度は確保できると思います。演算量は、Tap 数の最大値＋ディレイの Tap 数の最大値が２の累乗を超えた時（例えば 1023 から 1025 へ）段階的に増加します。一部のフィルタの Tap 数を小さくしても演算量は変化しません。（群遅延を合わせるため前後に零詰めしているので見かけ上の Tap 数は同一になるため。）

チャンデバとしては 8000Tap 前後で動けば必要十分だと思いますが、当方で確認したところでは Celelon500MHz のノートパソコンでハードディスク上の wave ファイルを再生した場合で１万６千 Tap でも音飛びしませんでした。athlon2600＋のマシンでハードディスク上の wave ファイルを再生した場合は 26 万 Tap（無意味ですけど）まで音飛びはしませんでした。（26 万 Tap の場合遅延はすごく大きくなります。再生ボタンを押してから音が出るまで約 19 秒かかりました。遅延を少なくするためには、多分、分割畳込みをすれば良いんでしょうが、チャンデバ用途としてはここまで大きな Tap 数は不必要なのでそのままにしてあります。）

もし、音が飛ぶようであれば、サウンドカードのレイテンシを大きくして、Output プラグインのバッファのサイズを大きくし、playback で Full file buffering に大きい値を入れれば改善できるかもしれません。また、Visualization をオフにすると改善できる可能性があります。

(3)遅延（Time Alignment）

遅延については、サンプリング周波数単位の簡易的な方法を用いています。指定は Tap 数単位で行います。（1Tap の遅延は 343.5m/s（音速）÷44100（サンプリング周波数）＝7.8mm））プログラム的にはフィルタ係数の前にゼロを入れることによって実現しています。従って、計算上の Tap 数は指定した Tap 数＋遅延 Tap 数となります。遅延の指定はサンプリング周波数 44100Hz の時の Tap 数の距離を前提に行いますが、異なるサンプリング周波数のものを再生する場合は、遅延についてもサンプリング周波数に比例して変更していますので、表示される距離との差は、１サンプルあたりの距離の差程度にはなっていると思います。

(4)出力 bit 数

本プラグインは内部演算は倍精度浮動小数点（64bit）で計算し output プラグインあるいは次の DSP プラグインにデータを引き継いでいます。出力 bit 数は output プラグインで決めることとなりますが、可能であれば 24bit 以上を推薦します。計算結果にはディザなどは加えずそのまま output プラグインに渡しています。大多数の音楽ソースは 16bit ですが、16bit 信号を演算し 16bit に丸めて出力した時にディザを加えていない場合は、フィルタ計算の結果に原信号と相関関係のある雑音がのるため、微少音がザラつくと言われています。24bit 出力にすれば、誤差が十分小さくなること、ＡＤコンバータやアナログ回路のＳＮ比に隠れることなどの理由でこの問題は小さくなるとも言われています。また、後述するように出力は－3dB 程度落とした方がよいので、これによる bit 落ちを防ぐためにも出力は 24bit 以上とすることを勧めます。

１０．測定

素人が個人で測定できることには限りがありますが、とりあえず測定した結果を示します。

サウンドカードの Prodigy192 には、Direct Wire という機能があり、任意の ch の出力をデジタルデータのまま入力に戻すことができます。これを利用し測定をしてみました。測定には efu 氏作成の WaveGene、WaveSpectra、Sigeboh 氏作成の WaveAnalyzer32 を使用させていただきました。ご両人に感謝いたします。

(1) 遮断特性

クロスオーバー周波数を 300Hz、2000Hz、Tap 数を 901Tap、701Tap、301Tap、係数補正有りに設定し、スイープ音を再生し、出力を WaveSpectra に入力して FFT にかけピークホールドさせたものが、図１、図２、図３です。それなりの遮断特性になっていると思います。

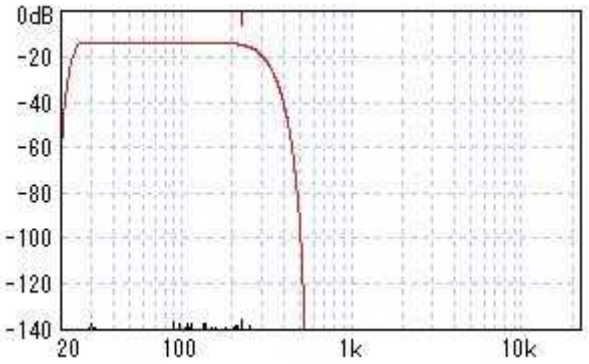


図１　低域

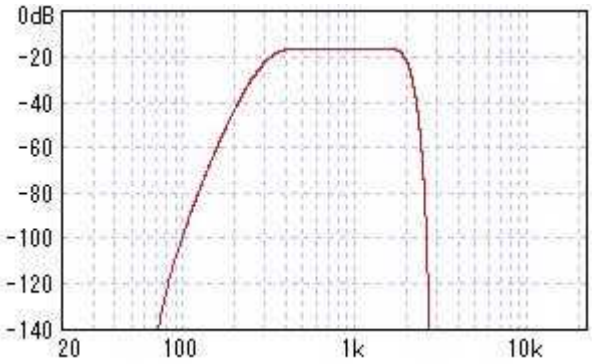


図２　中域

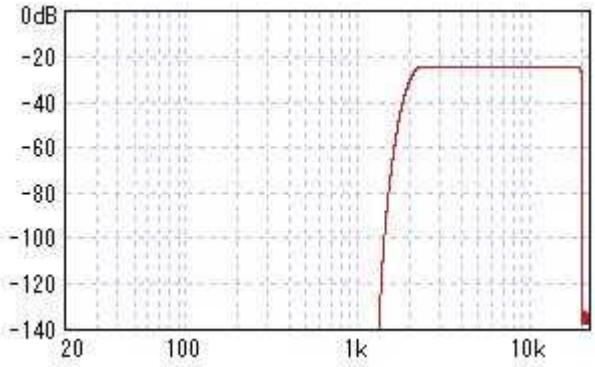


図３　高域

(2) 合成周波数特性

channeldividerF3 の後ろに、低音、中音、高音の和をとるために foobar2000 のプラグイン Downmix channels to mono をいれ、スイープ音を再生させ、合成周波数特性を計りました。

クロスオーバー周波数を 300Hz、2000Hz、Tap 数を 901Tap、701Tap、301Tap、係数補正有りに設定した場合の結果は図４の通りであり合成周波数特性はフラットになっています。同様の設定で補正をしない場合の結果は図５のとおりでありクロス周波数で特性が波打っています。（20Hz 前後が波打っているのは測定上の問題（録音ボタンを押すタイミングがずれたため）です。）

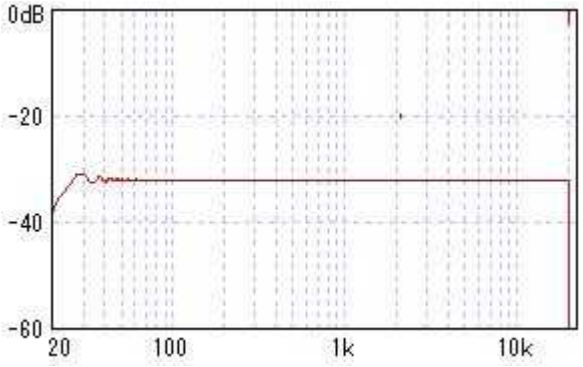


図４ 合成周波数特性、係数補正有り

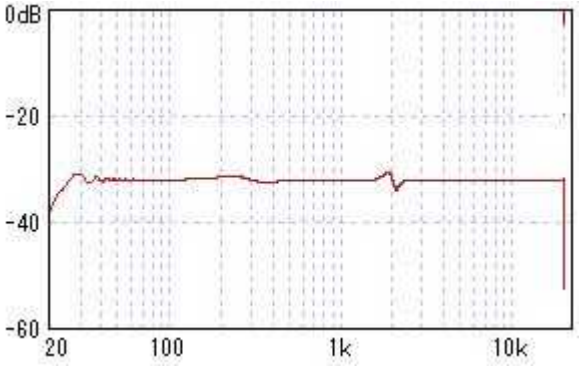


図５ 合成周波数特性 係数補正無し

(3) 合成波形

クロスオーバー周波数を 300Hz、2000Hz、Tap 数を 901Tap、701Tap、301Tap、係数補正有りに設定し、300Hz、2000Hz の単発サイン波を再生し、合成波形を観測したものが図６、図７です。ChanneldividerF3 は直線位相型 FIR フィルタなので、単発サイン波が再合成されています。もっとも、これはデジタルデータでの合成なので、空気中で異なるスピーカから再生される音波がこのように合成されるかというと議論のあるところでしょう。

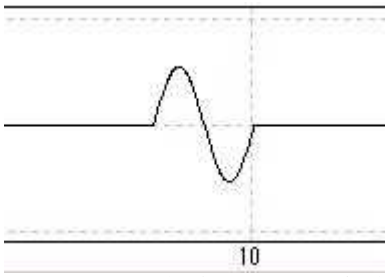


図６ 300Hz 単発サイン波合成波形

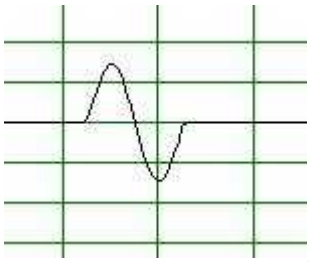


図 7 2000Hz 単発サイン波合成波形

(4) sin 波 純音の再生

クロスオーバー周波数を 300Hz、2000Hz、Tap 数を 901Tap、701Tap、301Tap、係数補正有りに設定し、300Hz、2000Hz の sin 波：純音を再生し、WaveSpectra に入力し、周波数特性を調べたのが図８、図９、図１０、図１１です。変な歪は出ていないようです。

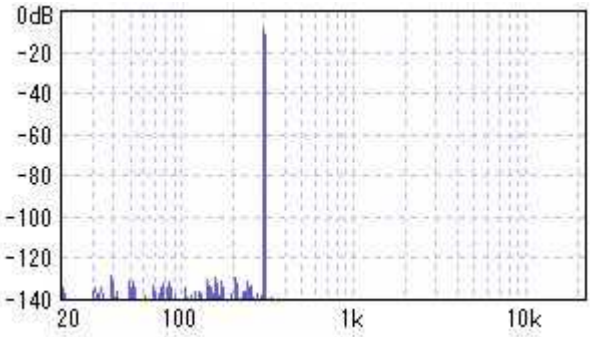


図８ 300Hz 純音低域

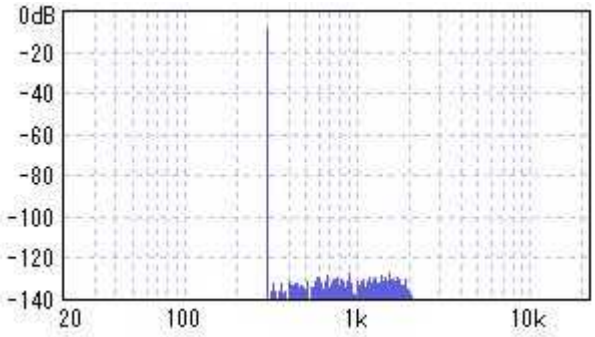


図 9 300Hz 純音中域

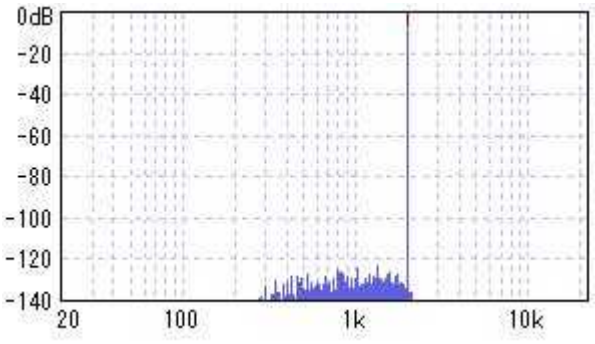


図 10　2000Hz 純音中域

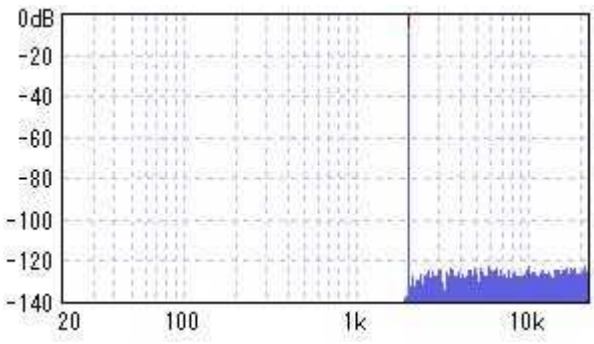


図 11　2000Hz 純音高域

(5) 遅延

クロスオーバー周波数を 300Hz、2000Hz、Tap 数を 901Tap、701Tap、301Tap に設定し、300Hz、2000Hz（サンプリング周波数 44100Hz）の sin 波を再生し、WaveSpectra に 300Hz の場合は低域を左 ch、中域を右 ch に、2000Hz の場合は中域を左 ch、高域を右 ch に入力してリサージュを描かしてみました。図 12、図 15 が遅延無し、図 13、図 16 が中域、高域を半波長：180 度（74Tap、11Tap）遅延させたもの、図 14、図 17 が中域、高域を１／４波長：90 度（37Tap、6Tap）遅延させたものです。2000Hz の場合は波長が短くサンプリング周波数あたりの遅延では正確には 90 度の位相ズレを実現できていないため円が若干ゆがんでいますが、ほぼ理論通りのリサージュが描けていると思います。

300Hz 遅延無し

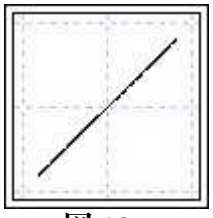


図 12

300Hz 半波長遅延

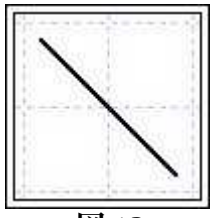


図 13

300Hz90 度遅延

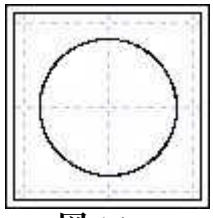


図 14

2000Hz 遅延無し

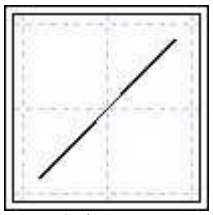


図 15

2000Hz 半波長遅延

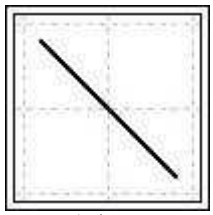


図 16

2000Hz90 度遅延

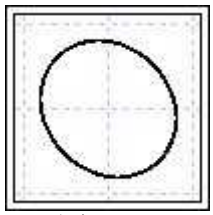


図 17

(6) 演算結果が１を超えた場合の影響

DSP プラグインにはデータは１に正規化された（最大値が１の）倍精度浮動小数点で渡されます。渡されたデータは DSP プラグインで計算され Output プラグインに渡され、ここで出力 Bit 数に応じて適切な値に変換されハードウェアにデータが渡されます。（らしいです。）

ところで、デジタルチャンデバの場合、最大ビットの音が連続した場合（コンプレッサーを多用するＪＰＯＰのような音楽の場合）演算結果が１（最大値）を超える場合があります。

通常、最大 bit 数を超えた値がサウンドカードに送られるとバチッという反転ノイズがでますが、output プラグインでは指定された最大 bit 数より大きい数値があった場合それを最大 bit 数にあわせる、いわゆるリミッターが働くようになっています。（らしいです。）

リミッターが働くことは働かないで反転ノイズが出る（ツィータが壊れる危険性有り）よりはるかに良い状況ですが、チャンデバとしては遮断特性に影響が出ます。

リミッターがかかるということは、リミッターが係る直前のデータとリミッターがかかったデータとの間でデータとして不連続な点が現れるということで高周波が発生したことと同じですし、リミッターがかかった値が連続した場合、データは直線状態となり、直流が現れたと同じこととなります。

フィルタ処理が終わった後の output プラグイン処理でこのようなことが起こるということはハイパスフィルタで直流域が出る可能性があり、ローパスフィルタで高周波が出ることがあるということです。

実際、最大値が０dB であるホワイトノイズを波形生成ソフト（Wavegen）で作成したものを、１KHz クロスで再生したところ、ハイパスフィルタの周波数特性は図 18 のとおりで、リミッターが作動し低周波が発生したせいか？阻止帯域減衰量が非常に少なく（－40dB）なっています。一方、最大値が－６dB であるホワイトノイズを再生したところ、このような現象は起こらず、阻止帯域減衰量は期待通りとなっています。この理由は上記のとおりであると考えらます。

そこで、これを避けるために最大値０dB のホワイトのイズを再生し、ディバイダ内部のボリュームで各音域を－３dB に下げて、同じファイルを再生したところ周波数特性は、図 19 のとおり問題ないものとなりました。0dB のホワイトノイズを使い色々実験してみると、阻止帯域減衰量の劣化が多いのはハイパスフィルタで、クロス周波数 5000Hz 前後の時最も影響が大きいようで、この場合も－4.5dB 高音を減衰させると、減衰量に問題はなくなりました。通常の音楽ではホワイトノイズほど高音のエネルギーが大きいわけではないので、必ずしも－4.5dB 下げる必要はないとは思いますが、ある程度、音量は減衰させたほうが良さそうです。

で、通常、ツィータの能率が最も高いので、ウーハーのアッテネーターの値を－3db 程度にしておき、これを基準に高域を絞れば、この悪影響からは逃れられるのではないかと思います。

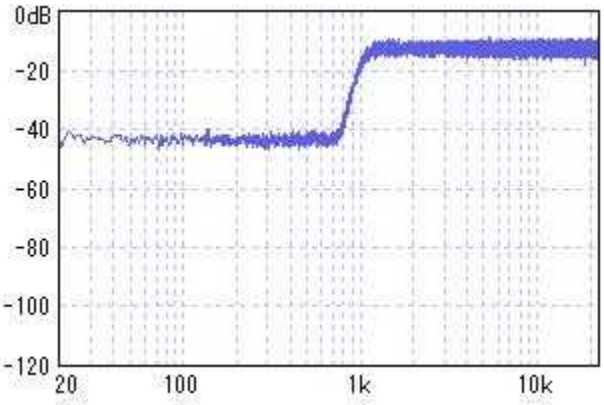


図 18　ゲイン調整無し

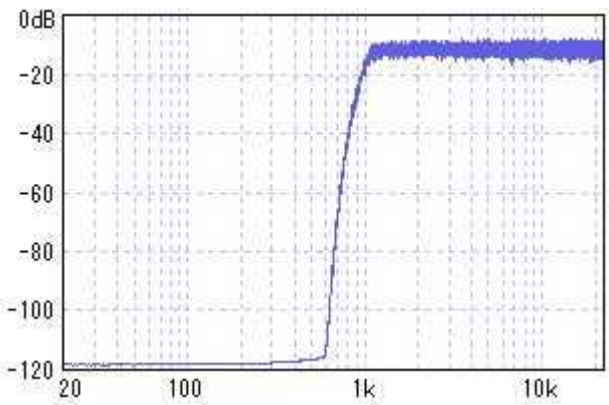


図 19　内部で－3dB ダウン

１１．著作権など

本プログラムはフリーソフトです。非営利の場合は（商業用に使う人がいるとは思えませんが）自由に使って頂いてかまいません。再配布もご自由にどうぞ。ただし、再配布する場合はプラグインと FirGain3.exe と本文書を同時に配布してください。

著作権は minn にあります。（日本の法律では著作権の放棄はできないらしいので）

１２．謝辞

本プログラムを作成するに当たり、いろいろご指導を頂いたａ氏、ｓ氏、ｎ氏、ｉ氏、ｔ氏に感謝いたします。また、ＦＦＴについては、大浦拓哉氏作成のソフトを使わせていただきました。すばらしいソフトを公開されている大浦氏に感謝いたします。

１３．バージョン履歴

031　　フィルタ係数の最後がずれる場合があったのを修正した。
030　　ディレイを追加した。
020　　フィルタ係数調整を追加した。
010　　最初のバージョン