

プロセッサ設定の基本～あるいは、クロスオーバーポイントとは何か～

EAWデザインエンジニア ネイザン・バトラー

クロスオーバーとは何か、そしてマルチアンプ・スピーカーシステムに使うときはどう設定すべきか、という点には多くの誤解があります。今日ではユーザー設定可能なDSPプロセッサがあり、かつては専門家の領域だったシグナルプロセッシングを一般のユーザーが行っています。あいにく、メーカーの推奨設定をわずかでも変更することは、システムの特性に有害な影響を与える原因になる場合もあります。本書ではクロスオーバーの詳細と、音質を深刻なまでに損なうありがちな誤りをいくつかご紹介しようと思います。

クロスオーバーとは？

「クロスオーバー」は、1組のフィルターを指す言葉で、1つの電気信号を2つの信号に分割するものです。分割された2つの信号のバンドワイズは、元の信号に比べて狭くなります。「クロスオーバー」という言葉はまた、実際に電気信号を分割するため1組ないし複数組のフィルターで構成された電気機器を指すこともあります。クロスオーバーはまた「周波数分割ネットワーク」とも呼ばれます。

クロスオーバーを構成する1組のフィルターは、ハイパスフィルターとローパスフィルターから成っています。それぞれHPF、LPFという頭文字だけで表すこともあります。フィルターは周波数を選択するもので、該当する周波数を通過させ、他の帯域を排除します。一般にはカットオフ周波数、トポロジー、そしてスロープの3つのパラメーターで定義されます。カットオフ周波数は、フィルターの特性が最大レベルからある量だけ下がったポイントの周波数で定義します。ふつうは最大レベルの0.707倍または0.5倍になったポイント、後で示すようにそれぞれ「-3dB」と「-6dB」のポイントです。トポロジーはカットオフ周波数付近でフィルターが描く形で定義されます。今日使われているフィルター・トポロジーで最も一般的なのは、バターワース、リンクウイツ・ライリー、ベッセルです。この例を図1でご紹介します。フィルターのスロープは、カットオフ周波数を超えて特性が下がっていく割合で定義します。通常はdB/octで表され、一般的なのは6、12、18、24dB/octです。

「フィルタースロープ」と「フィルター次数」は互換性のある言葉です。フィルター次数が1つ増えるとスロープは6dB/oct増大します。単純に、1次フィルターは6dB/oct、2次フィルターは12dB/octなどとなっています。たとえば、24dB/octバターワース・フィルターと4次バターワース・フィルターは同じものなのです。

フルレンジのスピーカーシステムにとって、クロスオーバーは不可欠です。単体のスピーカーユニットでは、フルバンドワイズ(20Hz～20kHz)を同じレベルで出力できないからです。ウーファーは低域信号を、ツイーターは高域信号を再生するのがふつうです。クロスオーバーが適切な周波数を適切なスピーカーユニットに分配しているのです。

通常、クロスオーバーはパッシブとアクティブに分類されます。パッシブ・クロスオーバーはアンプの後ろ(スピーカーレベル)で音声スペクトルを分割するもので、スピーカーのエンクロージャーに入っているものがこちらです。アクティブ・クロスオーバーはアンプの前(ラインレベル)で音声スペクトルを分割するもので、単体の電気機器としてシグナルソースとアンプの間に挿入します。クロスオーバーからの信号は対応するユニットに等しく供給され、ユニットは音声スペクトル中の該当する部分を再生します。クロスオーバーが適切に設計されていれば、各

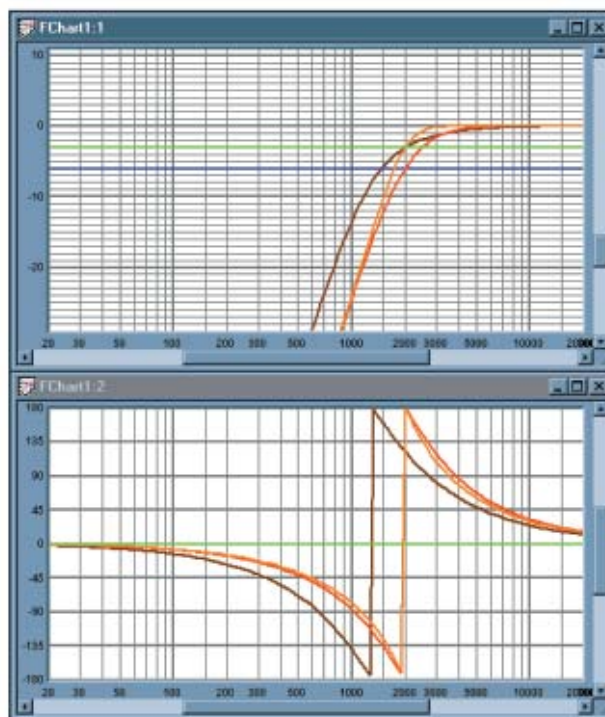


図1…24dB/oct、2kHzのハイパスフィルター各種の比較
赤…リンクウイツ・ライリー
オレンジ…バターワース
茶…ベッセル
緑…-3dB
青…-6dB

ユニットからの信号をきちんと「合算」することができ、元の信号を完全に、正確に再生することができます。実際には許容入力やビームワイズなど、クロスオーバーに大きな影響を受ける要素が他にも多くあり、これらをすべて考慮しながら設計を進めていくのです。

位相…ちょっとした解説

特定の周波数において、位相特性の数値とスロープが似ていると出力が「合算」されません。位相特性とは、2つの信号が到達したときの位相差や時間差であると解釈することができます。2つのフィルターの位相特性が似ていれば安定した合算ができ、似ていなければ完全に打ち消し合おうとします。前述したフィルター・トポロジーとスロープは、それぞれ独特の位相特性を持っています。図1をごらんください。

次の例は、スピーカーシステムによく見られる位相の変化を描いたものです。こうしたデータは SIA Smaart のような音響測定ツールで取ることができます。図2にある2つのフィルターの位相特性について考えてみましょう。

2つのフィルターの相対出力特性は同一ですが、位相特性は明らかに違います。位相特性を入念に見ていくと、スロープは同じですが、2つの信号が180度違っていることがわかります。この違いは極性反転の特徴です。これを図3のような単一周波数に発生する位相シフトと識別することは、まずできません。

図3では位相が定まらず、スロープ共々周波数によって変化しています。これがタイムオフセット、つまりディレイの特徴で、2つのデバイスに距離があることを示しています。このオフセットは下記の式で算出できます。

$$t = \frac{\phi_1(f) - \phi_2(f)}{f \times 360}$$

この式によれば、タイムオフセットは、特定の周波数での位相差の絶対値を、その周波数と360度の積で割ったものに等しいのです。では周波数を500Hzと仮定してみましょう。グラフを見ると、500Hzのとき青い線は-90度でオレンジの線は-180度ですから、その差は90度です。このため2つの信号の時間差は、 $90 / (360 \times 500\text{Hz}) = 0.5\text{msec}$ となります。この計算はどの周波数でもできます。結果は同じになるでしょう。

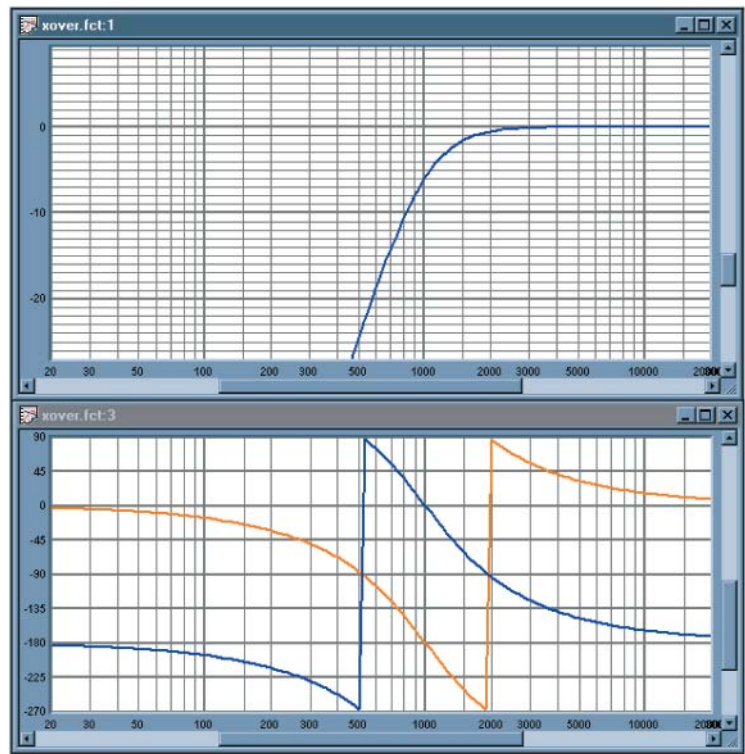


図2…2つのフィルター
オレンジ…通常
青…極性反転時

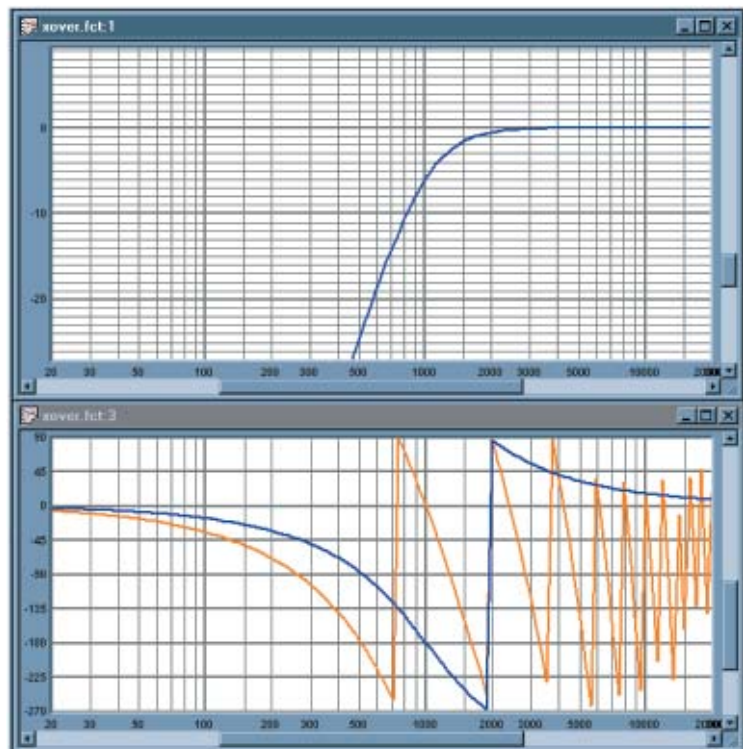


図3…2つのフィルター
オレンジ…ディレイがかかったもの
青…通常

位相プロットの「包み込まれた」部分にも注意が必要です。このグラフのY軸は-270度から+90度です。位相プロットは通常360度の範囲で表示されます。0度と360度は等しく、同様に90度と-270度、180度と-180度も等しいのです。このグラフをちょっとと見ただけでは、位相特性が一定の割合で減少していることに気付かないでしょう。たとえばオレンジの線では2kHzのとき実際には-630度になっているのです(700Hzまでで-270度、さらに2kHzまでの間で「包み込まれた」部分として-360度を加算)。こうした数値を上記の式にあてはめても適切な結果が算出されます。

クロスオーバー・ポイント

クロスオーバー・ポイントとは、ハイパスフィルターとローパスフィルターが交差するポイントを周波数で定義したものです。これが(パッシブでもアクティブでも)電氣的なクロスオーバーで2つのフィルターが交差するポイント、あるいは2つの音響的なフィルターのクロスオーバー・ポイントになります。スピーカユニットも実際にはフィルターです。本質的にどのユニットも、カットオフ周波数、スロープ、トポロジーを持つハイパスフィルターとローパスフィルターを備えているのです。

よく「Xというシステムのクロスオーバー・ポイントは？」と質問されることがあります。対する回答は、求められているものとはかけ離れてしまいます。システムXの音響的なクロスオーバー・ポイントに関する全情報を答えることになるためです。システムの音響的なクロスオーバー・ポイントとは、スピーカユニットの音響特性と電気フィルターの特性を数学的に組み合わせて解釈するものなのです。電気フィルターを音響フィルターにかけると、2つの特性が結合されてその結果図4のような新しい特性カーブが生まれます。

先ほどの質問は「システムXに対するクロスオーバーの設定はどうなっているのか」ということでしょうか。システムの設定はクロスオーバー・ポイントだけでは解釈できません。前にも書いたように、クロスオーバーはハイパスフィルターとローパスフィルターからできています。2つのフィルターを完全に特定するには、3つのパラメーターをすべて記述する以外に方法がないのです。

システムの例

次の例を考えてみましょう。次ページの図5は、1つのエンクロージャーにマウントした高域ユニットと低域ユニットそのままの特性です。

2つのレベル/能率の差、高域ユニットの位相の遅れがはっきり見て取れます。おそらく高域ユニットはスロートの長いホーンにマウントされていて、そのためにウーファーに対して遅れているのでしょう。このシステムを適切に使うには、特性を「フラットに」するクロスオーバーを開発しなければなりません。図6に示したプロセッシング(次ページにパラメーターをご紹介します)を施すと、図7に示す結果が出ます。

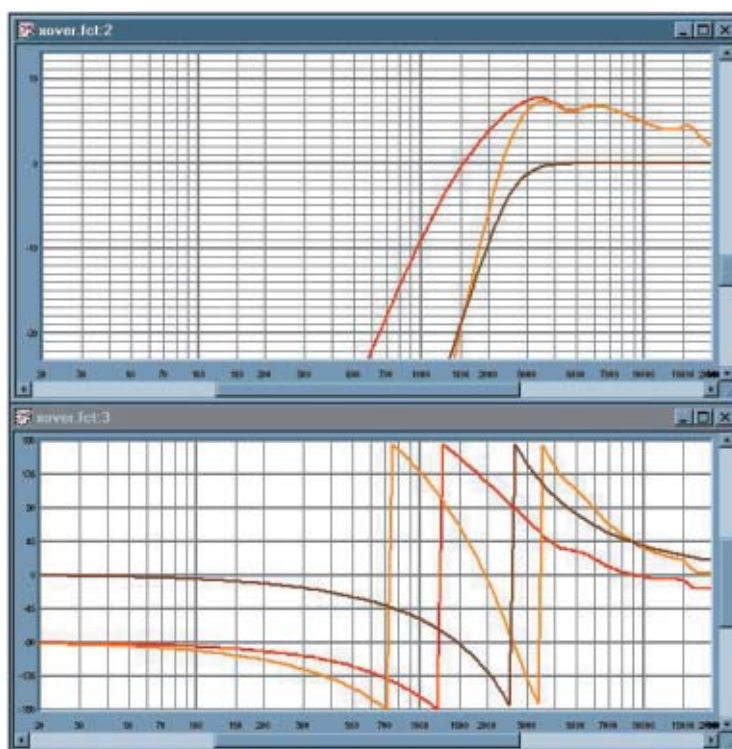


図4

赤…高域ユニットの特性
茶…電氣的ハイパスフィルター
オレンジ…結果の特性

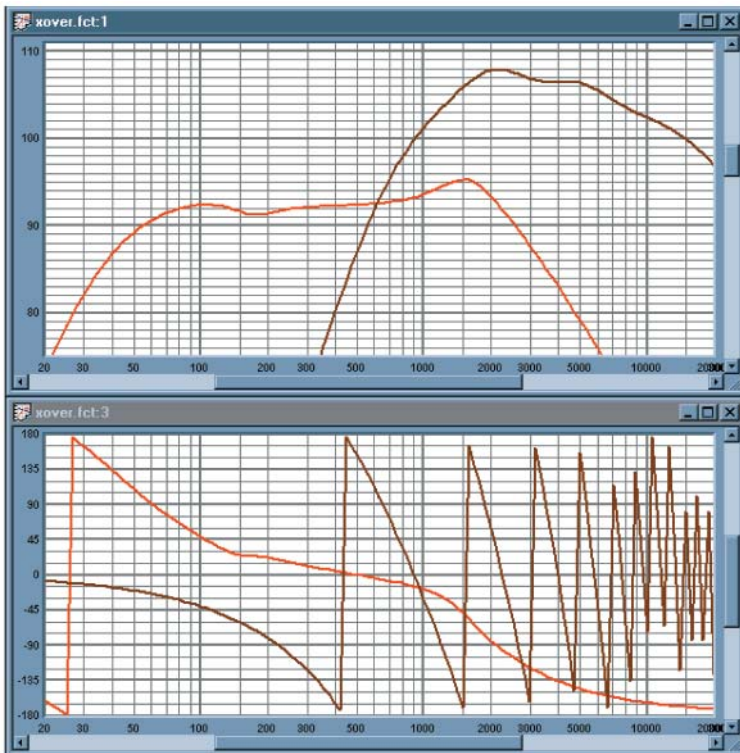


図5…2つのユニットの音響特性
 赤…低域
 茶…高域
 クロスオーバーポイントはほぼ 613Hz

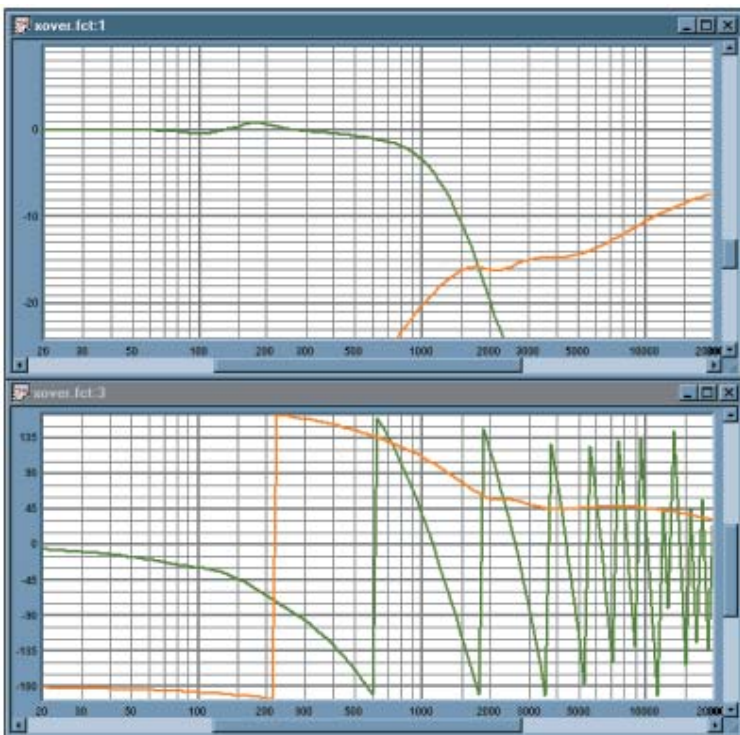


図6…電気クロスオーバーの特性
 緑…低域
 オレンジ…高域
 クロスオーバーポイントはおよそ 1.8kHz

電氣的ローパスフィルター

ゲイン	0.0dB		
ディレイ	0.5msec		
極性	+		
HPF	なし		
LPF	944Hz	24dB/oct	ベッセル
PEQ1	2239Hz	-5.0dB	Q=1.19
PEQ2	917Hz	+1.0dB	Q=1.19
PEQ3	103Hz	-0.5dB	Q=2.00
PEQ4	178Hz	+1.0dB	Q=2.00

電氣的ハイパスフィルター

ゲイン	-5.5dB		
ディレイ	0.0msec		
極性	+		
HPF	2053Hz	12dB/oct	バターワース
LPF	なし		
PEQ1	4597Hz	-8.5dB	Q=0.67
PEQ2	2239Hz	-3.0dB	Q=1.68

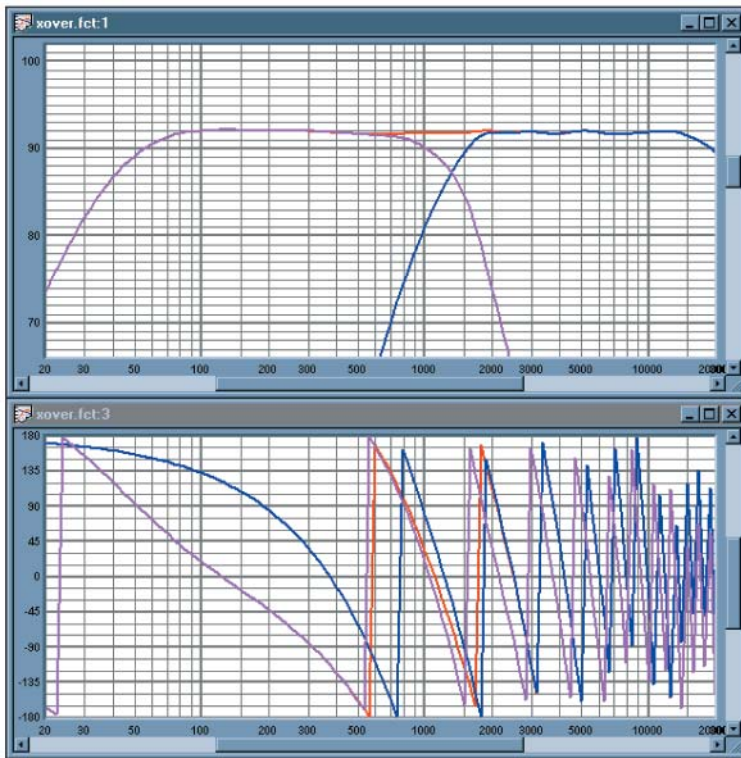


図7…クロスオーバーを含むシステム全体の特性
 ピンク…低域
 青…高域
 赤…全体
 クロスオーバーポイントはおよそ1.3kHz

特に50Hzから20kHz(-3dB)で全体的な特性がかなりフラットになるでしょう。高域と低域の位相特性は、クロスオーバー付近で似たようなスロープを描き差は90度未満です。これは低域にディレイをかけて高域と整合した結果によるものです。もちろん、これはシステムの解決策になりうるクロスオーバーの一例にすぎません。他にも多くの方法があるのです。ここで注意すべきことは、図7での音響的クロスオーバーが1.3kHzだという点です。低域のローパスフィルターで設定した944Hzにも、高域のハイパスフィルター

で設定した2053Hzにも関係する情報はあません。さらに図5のドライバーのままの特性を見ても、図6の電気フィルターにおけるクロスオーバーポイントにも関連性がないのです。

どうして非対称フィルターなのか？

上記の例では、高域には12dB/octのバターワースを、低域には24dB/octのベッセルを使用しました。このように対称ではないフィルター・スロープとポロジを使うことは当たり前になっています。というのは、フィルター・

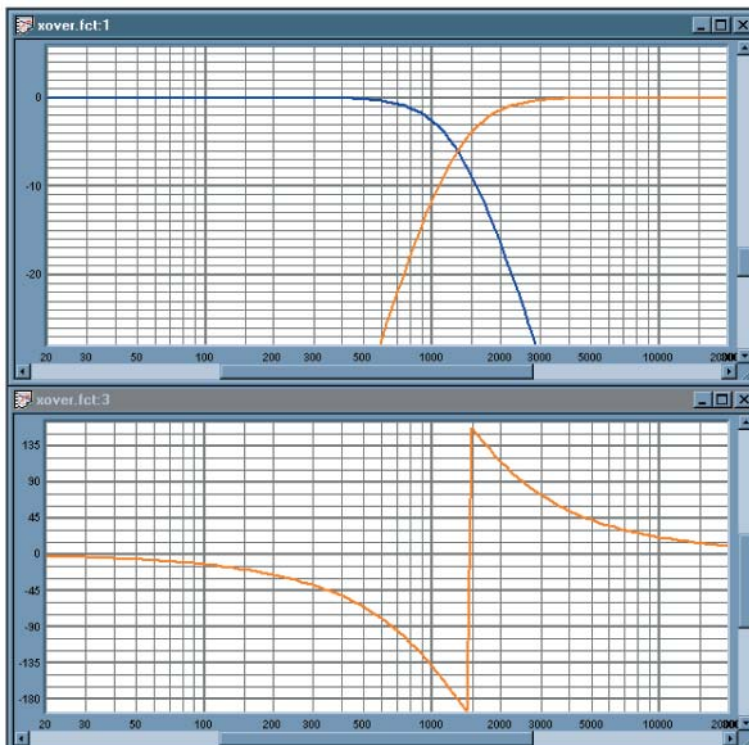


図8…24dB/octリンクウイツ・ライリーのHPFとLPF
 いずれも1.3kHz
 位相特性が重複していて青いプロットが見えない

スロープやポロジが一致するユニットの組み合わせはごくわずかだからです。図5に戻ってみると、高域ユニットと低域ユニットそれぞれが本質的に持っているスロープとポロジは、同じものではありません。すでに書いたように、スピーカーシステム全体の音響特性とは、クロスオーバーの電気特性とユニットの音響特性の組み合わせによって決まります。電気フィルターを対称なものにするためには、対称なカーブを持つ組み合わせのユニットを使わなければなりません。現実には難しいため、ユニットの対称ではない特性を補足するコンポーネントとして非対称電気フィルターが必要になります。

比較的安価なエレクトロニック・クロスオーバーでは、あいにく非対称スロープ/ポロジを設定することはできません。安いクロスオーバーの多くは、中心周波数を合わせるための回転式ノブ、「周波数」と名付けられた簡単なものが1つ付いているだけで

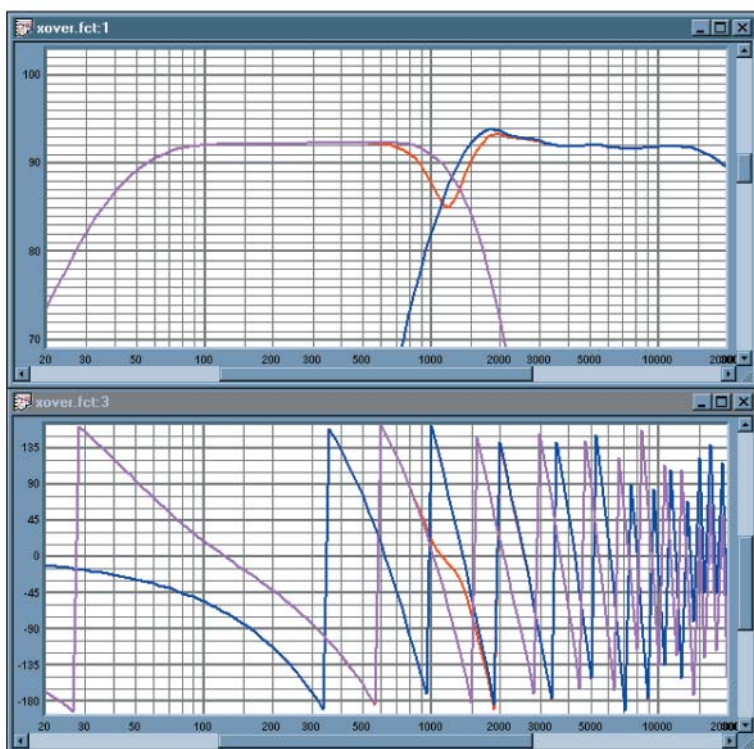


図9…図6のクロスオーバーをHPF、LPFとも
24dB/octリンクウイツ・ライリーの1.3kHzに変更
ピンク…低域
青…高域
位相特性の違いに注目!

価なクロスオーバーではディレイを調整できないでしょうし、できたとしても0.5msecという精度はないと思われるので、このテストでもディレイを使いません。結果は図10の通りです。

もうひとつ価値のある実験として、対称フィルターである24dB/octのリンクウイツ・ライリーを1.8kHzにしてみ

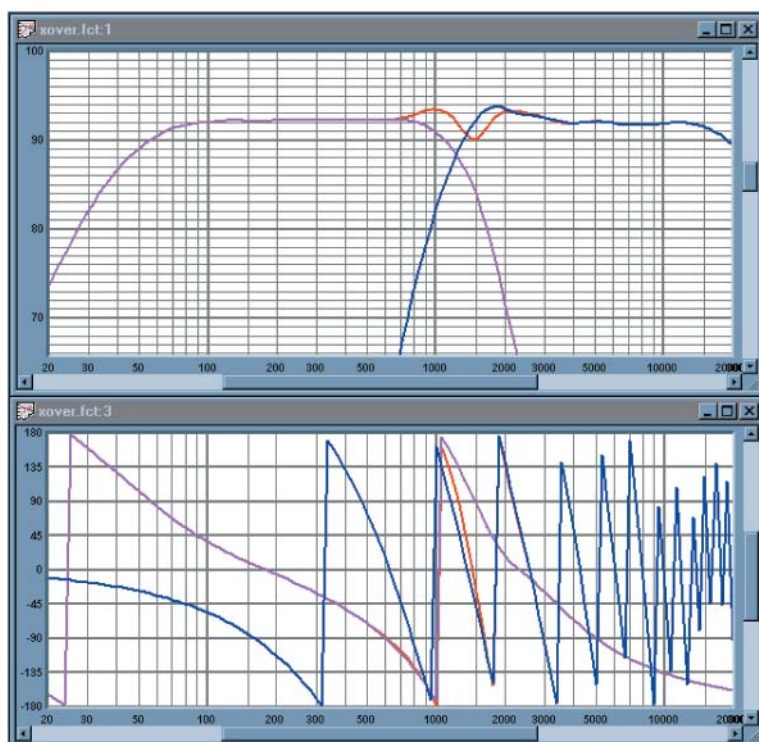


図10…図9のシステムからディレイを外した状態

す。これが「クロスオーバー・ポイントはいつ?」という質問の発端になっているのでしょうか。こうしたクロスオーバーで設定できる唯一の周波数パラメーターなのですから。こうした機器は通常、24dB/octのリンクウイツ・ライリーをハイパス、ローパスフィルター共に使っています。カットオフの slope が高く、設定した周波数で位相特性が揃うためです。前ページ図8に示します。

こうしたクロスオーバー、つまり周波数ノブが1つしかない機器を図5のシステムに使った場合を考えてみましょう。図9をごらんください。

このカーブは図6に示したものと同じプロセッシング、ただしハイパス/ローパスフィルターを共に24dB/octのリンクウイツ・ライリーで1.3kHzに設定したときの、全体的な特性を表しています。1.3kHzを選んだ理由は、図7の通りシステム全体でのクロスオーバー・ポイントだからです。

他に2つの可能性を考えてみましょう。まず前出の例からディレイを外します。安

まず前出の例からディレイを外します。安価なクロスオーバーではディレイを調整できないでしょうし、できたとしても0.5msecという精度はないと思われるので、このテストでもディレイを使いません。結果は図10の通りです。

最後に、対称フィルター24dB/octのリンクウイツ・ライリーを使った新しい例を、図9のフィルターで考えてみましょう。ここでは他のパラメトリックまたはグラフィック・イコライザーで特性を安定させるものと仮定して、特性をフラットにするにはどうすればいいか考えてみます。

図9の位相特性を見ると、クロスオーバー帯域(800Hzから2kHz)での位相差はほぼ180度で安定しています。これは位相の反転を表しています。図12は高域信号の位相を反転した場合の効果と、さらにイコライザーを挿入して1.49kHzを操作した場合のものです。さらにイコライザーをやや操作してみます。その結果特性はフラットになりますが、どう変えればいいのか把握することは難しいでしょう。

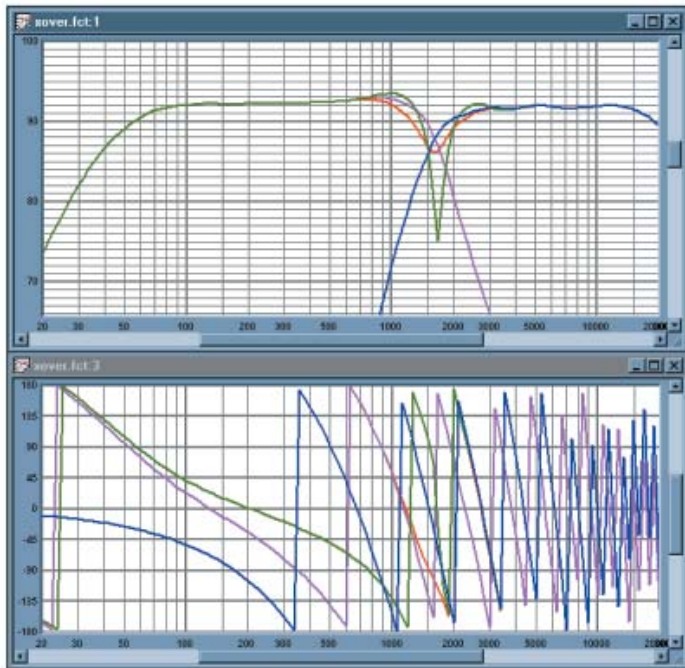


図 11…図 10 のケースでクロスオーバーポイントを 1.8kHz に変更
赤…0.5msec のディレイをかけた状態
緑…ディレイをかけていない状態

高品質な測定機器がなくてはここまで補正できないのです。

なお悪いことに、1.49kHz にかけた Q の低いパラメトリック・イコライゼーションは、ISO 規格の中心周波数しかないグラフィック・イコライザーでは再現できません。さらに輪をかけて、イコライザーがクロスオーバーでの過激な加算を排除するため、ハイパスフィルターとローパスフィルターの周波数は十分すぎるほど分離する、つまりローパスフィルターのカットオフ周波数をより低く、ハイパスフィルターのカットオフ周波数をより高くしてしまうのです。その上、この結果が許

容入力や軸外特性、バンドワイズなど他のパラメーターにどう影響するかまったくわからないのです。

図 6 の例で使った設定に手を加えてみます。赤は変更されたもの、緑は追加されたものです。

電気的ローパスフィルター

ゲイン	0.0dB
ディレイ	0.5msec
極性	+
HPF	なし
LPF	1296Hz 24dB/oct リンクウイツツ・ライリー
PEQ1	2239Hz -5.0dB Q=1.19
PEQ2	917Hz +1.0dB Q=1.19
PEQ3	103Hz -0.5dB Q=2.00
PEQ4	178Hz +1.0dB Q=2.00

電気的ハイパスフィルター

ゲイン	-5.5dB
ディレイ	0.0msec
極性	-
HPF	1296Hz 24dB/oct リンクウイツツ・ライリー
LPF	なし
PEQ1	4597Hz -8.5dB Q=0.67
PEQ2	2239Hz -3.0dB Q=1.68
PEQ3	1496Hz -3.5dB Q=1.26

ゲインは何をしているの？

ルームアコースティックの変化などによって、あるクロスオーバー出力チャンネルのゲインを変更することがよくあります。アンプ側であれプロセッサー側であれ、チャンネルのゲインを変えることもまた、クロスオーバー・ポイントを変えることだと認識しておかなければなりません。

図 13 が示すように、相対出力特性の上でゲインを変更しても、位相特性に変化はありません。とはいうものの、クロスオーバー・ポイントが変わっても 2 つのフィルター間の位相の関係が変わらなければ、新しいクロスオーバー・ポイントで位相の関係が変わってしまう可能性は十分にあり、適切に合算されない場

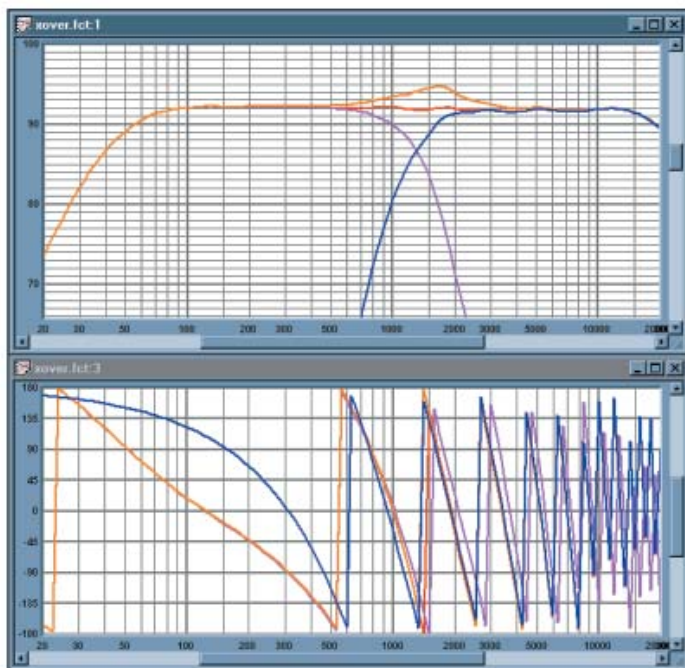


図 13

青 / 茶…LPF0dB、HPF-6dB、fx=1.7kHz
青 / 赤…LPF+6dB、HPF+6dB、fx=1.5kHz
赤と茶の位相特性が重複し、茶のプロットが見えない

合も出てきます。たとえば、1.6kHzから1.9kHzの間で各部の位相特性が似ているとき、この帯域では適切に合算されます。しかしこの帯域以外では位相特性がかなり違っていることもあり得ます。クロスオーバー・ポイントを1.9kHz以上または1.6kHz以下に移動すると、必ずしも適切に合算されるとは限りません。システム設計のときに考えますが、すべてのシステムが同じように順応性を備えているわけではありません。チャンネルごとのレベルを調整するときは十分な注意が必要です。この例でもまた、システムのカロスオーバー・ポイントが不完全な情報であるばかりか、システムパラメーターをわずかでも変えると大きく変動するものだということがわかります。

パラメトリック・イコライゼーション

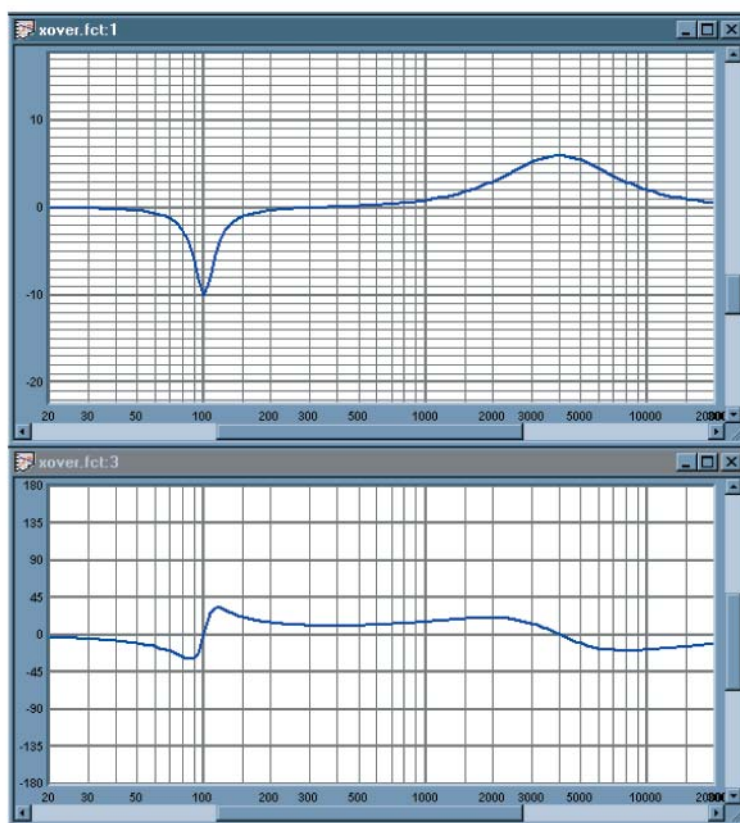


図 14…2つのパラメトリックフィルター
 ① 100Hz…ゲイン=-10dB、Q=6.3
 ② 4kHz…ゲイン=+6dB、Q=0.67
 位相が相対値に付随して変わっている

システム設定でとても重要な局面は、パラメトリック・イコライゼーションです。パラメトリック・イコライゼーションは一種のフィルターで、ある周波数帯域で0以外のゲインを持ち、その帯域より上や下では0ゲインになっています。今までの例でおわかりのように、ユニットのリニアではない動作を排除するためにイコライザを使います。パラメトリック・イコライザは3つのパラメーターで定義されます。Qまたはバンドワイズ、中心周波数、そしてゲインです。Qまたはバンドワイズは、フィルターの幅を定義するものです。バンドワイズやQの計算法はいくつかありますが、規準がないためここで説明するのはやめましょう。ただ「Qが低い」「バンドワイズが高い」フィルターは広い帯域に、「Qが高い」「バンドワイズが低い」フィルターは狭い帯域に効果を与えます。フィルターのゲインはdBで表し、中心周波数に現れるブーストまたはカット量を表します。図14にパラメトリック・フィルターの例を挙げます。

ここでは2つのパラメトリック・イコライゼーションを見えています。100Hzのフィ

ルターはQが高い、またはバンドワイズが低いといえるでしょう。それに対して4kHzのフィルターはQが低い、またはバンドワイズが高いといえます。それぞれ実際には下記のように設定しています。

	周波数	ゲイン	バンドワイズ	周波数	ゲイン	Q
PEQ1	3981Hz	+6.0dB	1.50	PEQ1	3981Hz	+6.0dB
PEQ2	100Hz	-10.0dB	0.20	PEQ2	100Hz	-10.0dB

問題は、パラメトリック・イコライゼーションには位相変化がつきものだ、ということです。この変化は重要です。プロセッサにパラメトリックを挿入すると、クロスオーバーでの位相特性に変化をもたらす原因になり得、そのためユニットの合算に影響を与えるのです。一方で設計者にとってメリットになる場合もあります。Qの高いフィルターをマイナスゲインにしてクロスオーバーやその付近に挿入すると、位相や相対出力に十分な変化が得られ、合算が楽になるのです。しかしクロスオーバーで生じる特性上のディップを緩和するため、ある周波数をブーストする目的で使うべきではありません。多くの場合、すでにおわかりのように、クロスオーバーで発生する特性上のディップは2つのユニットで適切に位相が整合されていないために発生するのです。パラメトリック・イコライゼーション

でこのディップが落ち着くことはまれですし、できたとしてもその結果生まれるサウンドは魅力的なものにはならないでしょう。

最後に

スピーカープロセッサの設定を定義することが複雑な作業であることを少々ご紹介してきました。先にも述べた通り、ひとつのスピーカーシステムに対するクロスオーバーでの解決策はいくつもあります。もちろん違う角度からクロスオーバーの設計にアプローチすれば、結果は良くなったり、悪くなったり、変化します。EAWはスピーカーに最適な設定を生み出すために努力しています。エンジニアリングに多くの時間を割き、最新の測定設備を利用するのは、比類ないシステムパフォーマンスを実現する設定を見出すためです。EAWのユーザーには工場推奨のプロセッサ設定を強くお勧めします。この設定が、スピーカーの持てる能力を最高に発揮してくれることでしょう。