

補正手法

DEQX システムのアプローチは、従来のデジタルクロスオーバーおよびルーム補正設計とどう異なるのか

技術的手法の比較

関連資料：『DEQX システム — 技術性能レビュー』

エグゼクティブ・サマリー

DEQX システムは、ドライバーの補正、クロスオーバーの位相整合、そして室内環境への統合という各要素を、実際のリスニング位置を基準とした、一つの「幾何学的な課題」として捉えます。

本稿では、この手法が具体的にどのようなものか、また、クロスオーバー設計やドライバー補正を先に行い、その後に室内補正を別途追加するという一般的な手法と比べてどのような違いがあるのかを、各側面から詳述します。

本システムの最大の特徴は「統合」にあります。リニアフェーズ（直線位相）FIR クロスオーバー設計、位相を考慮した室内補正、そしてリスニング位置を基準とした測定といった各要素を、個別の工程ではなく一つの課題として統合的に処理することで、それぞれの要素が相互に関連し合った状態で最適化されるのです。

1. 一般的な手法：2 段階の逐次処理

多くのマルチウェイスピーカースystemと、それらに組み合わせて使用されるルーム補正製品では、広く定着した次のような手順が採用されています。

- クロスオーバーとドライバー間の整合を最初に設計・測定します。測定は通常スピーカーから一定の標準距離（一般的には約 1 m）を取り、軸上または軸に近い位置を基準として行います。
- クロスオーバーには、一般に最小位相型（Linkwitz-Riley などの IIR 方式）が使用されます。このフィルター方式の特性として、各クロスオーバー周波数で位相回転と群遅延が生じます。
- ルーム補正を使用する場合は、後段の処理として適用され、主に振幅周波数特性の補正に重点が置かれます。
- 測定時のゲーティングでは、通常、いずれか一方が優先されます。すなわち、きれいな位相データを得るための短い準無響室的な測定ゲート、または低域の詳細を捉えるための長い測定時間です。

これらの選択はいずれも、測定の容易さ、演算効率、そして低域の詳細を把握することの実際的な難しさを考慮した、合理的な技術上の判断に基づいています。

これに対して DEQX のアプローチでは、リスナーが実際に座る位置でシステム全体を最適化し、設計の初期段階から室内音響への適合を組み込むという、異なる道筋を取ります。

2. DEQX システムのアプローチ：単一の統合された問題として扱う

本資料で検討する手法では、同じ一連の課題に対して異なる方法で取り組みます。ドライバーの補正、クロスオーバーの挙動、室内音響への適合を、それぞれ独立した段階として順番に処理するのではなく、ひとつの統合された計算問題として扱います。

2.1 個々のドライバー補正を出発点とする

各ドライバーを個別に測定し、その実際の特性に基づいて振幅と位相の両方を補正します。これにより、システムに実際に使用されているドライバーの特性を基礎としてクロスオーバーを構築します。

これが、その後に行うすべての補正の基盤となります。

2.2 リニアフェーズ FIR クロスオーバー

クロスオーバーには、最小位相型の IIR ネットワークではなく、リニアフェーズ FIR フィルターを使用します。これにより、従来型クロスオーバーがその遷移周波数で生じさせる、固有の位相回転と群遅延を取り除きます。

さらに、応答の速い周波数帯域には、計算によって明示的に遅延を追加します。これにより、リスニング位置で各ドライバーの音が時間的に再び一致するようにします。これはフィルター方式の副次的な結果に任せるのではなく、意図的に計算して実施する工程です。

各 8 チャンネル（4 帯域 × 左右）には、それぞれ 8,192 タップの FIR フィルターがリアルタイムで動作します。フィルター長は約 170.7 ms であり、フィルター自体が持つ周波数分解能は約 5.9 Hz です。

これは非常に高い分解能です。可聴帯域の最下部においても補正カーブを高い精度で形成できるほど細かく、特にクリーンで急峻なリニアフェーズ遷移を実現するために、最も長いフィルター長が必要となる低域で、その能力が生かされます。

この長さのフィルターを 8 系統、リアルタイムで同時に動作させることは、相応の演算能力を必要とします。これも、このレベルの補正を特徴づける重要な要素です（第 4 章参照）。

その結果、クロスオーバー周波数における位相回転のないクロスオーバーが実現します。

これらのフィルターは、高速な FFT（高速フーリエ変換）ベースの畳み込み処理によってリアルタイムで動作します。

時間領域で直接畳み込みを行う場合、演算量は出力サンプルごとにフィルター長に比例して増加します。8,192 タップのフィルターを 8 チャンネルで処理する場合、これは大きな演算負荷になります。

これに対し、高速畳み込みでは、周波数領域での乗算によって同等の処理を実行します。さらに、ブロック単位の分割処理を採用することで、バッファリングを効率的に行います。

これは、プロフェッショナル向けの畳み込みベースのオーディオ処理でも広く用いられている一般的な技術です。DEQX では、この技術を適用することによって、8,192 タップ、8 チャンネルのフィルターバンクをリアルタイムで動作させています。

2.3 実際のリスニング位置を基準とした音の到達時間

一般的な固定距離を基準とするのではなく、本システムでは、実際のリスニング位置を基準に音の到達時間（Time-of-Flight）を考慮して補正を計算します。

今回評価したシステムでは、リスニング位置までの距離は 2.8 m です。したがって、補正は、リスナーにとって実際に重要となる幾何学的条件に固有のものとなります。

2.4 意図的に選択された測定ゲート

約 5.9 Hz の細かな分解能を持つフィルターを備えているため、本システムには、室内測定で必要とされる以上の本来の分解能が確保されています。

ドライバー補正は、室内で測定したデータから導出されますが、その測定には 55 ms のゲートを使用します。これは約 18 Hz の周波数分解能に相当します。つまり、フィルターには測定で使用する分解能の約 3 倍の余裕があり、その余裕は意図的に温存されています。

55 ms という値は、低域の詳細を意味のある形で捉えるのに十分な長さである一方、位相および群遅延の推定が、十分に発達した残響音場ではなく、直接音に支配される程度に短い時間となるよう、特に選ばれています。

この長さであれば、個々の低次のルームモードを、それぞれ独立した現象として識別するのに十分な測定が可能です。同時に、位相測定の精度も維持できます。

このようにして、位相測定の明瞭さと正確さを確保します。

フィルターに残された分解能の余裕は、いわば保険として機能します。補正の限界を決めるのはフィルター長ではなく、補正に用いる測定データに対して、音響的な理由に基づいて意図的に設定された上限だけです。

2.5 すでに位相が補正された基盤の上にルーム補正を重ねる

自動パラメトリック・ルーム補正は、音の到達時間を基準とし、位相整合がすでに行われた測定結果から導出されます。そして、その基盤の上に適用されます。

したがって、ルーム補正と時間・位相の整合は互いに独立した処理ではなく、ひとつの計算として連携して機能します。

2.6 閉ループによる反復検証

本システムでは、補正を適用した後の室内測定結果を、段階ごとに繰り返し測定します。

具体的には、次の 3 段階で再測定を行います。

1. ドライバー補正と遅延補償を適用した後
2. 自動 PEQ を導出した後

3. すべての補正を統合した最終結果を検証する段階

これは、測定、補正、再測定を繰り返す閉ループ型の反復検証プロセスで、各段階で、計算によって予測されたとおりに補正が機能していることを確認します。

3. 比較一覧

比較項目	一般的な手法	DEQX システムの手法
クロスオーバーの位相特性	最小位相型（IIR）。フィルター方式の特性として、各クロスオーバー周波数で位相回転と群遅延が生じる	リニアフェーズ FIR。固有の位相回転がなく、計算による遅延補償で各帯域の時間を整合させる
基準となる幾何学的条件	標準的な基準距離（一般に約 1 m、軸上または軸付近）	実際のリスニング位置を基準とした音の到達時間
フィルター長	比較的短い FIR、または従来型の IIR 設計	全 8 チャンネルそれぞれに 8,192 タップのリニアフェーズ FIR（本来の周波数分解能は約 5.9 Hz）
ドライバー補正とルーム補正の関係	クロスオーバーを先に設計し、その後にルーム補正を適用する逐次処理	ドライバー補正、クロスオーバーの遅延、室内音響との整合を、ひとつの統合された問題として同時に計算する
測定ゲートの長さ	位相精度を優先した短いゲート、または低域分解能を優先した長時間・非ゲート測定	55 ms。約 18 Hz の周波数分解能と、位相領域での精度を両立させるための意図的な選択
ルーム補正の対象範囲	振幅周波数特性に重点を置くことが多い	振幅と位相・群遅延を一体的に補正し、チャンネルごとに検証する
検証プロセス	通常は測定して補正を適用する 1 回のサイクル	多段階の閉ループ処理：測定 → 補正 → 再測定 → PEQ → 再測定

4. この組み合わせを特徴づけるもの

リニアフェーズ FIR クロスオーバー、位相を考慮したルーム補正、そしてリスニング位置を基準とする測定は、それぞれ単独でも適切に実装することが容易ではありません。

これらをひとつの計算として統合していることが、本手法を際立たせる要因です。

・リニアフェーズ FIR クロスオーバーの実現には、高い演算能力と高度な設計技術が必要です。従来の最小位相型フィルターに比べて設計・演算の負担が大きく、最小位相型では必要とされない、明示的な遅延補償の設計も求められます。本システムでは、4 帯域の左右両チャンネル、合計 8 チャンネルに対して、8,192 タップの独立したフィルターを 8 系統同時にリアルタイムで動作させています。これに

は直接形式の処理ではなく、高速な FFT ベースの畳み込み処理が必要であり、相応の演算能力を意図的に投入した設計となっています。

- ・ドライバー補正とルーム補正を、システム固有の幾何学的条件に基づく単一の問題として解くこと。これを、互いに独立した2つの問題として処理するのではなく実現するには、測定と補正の仕組みそのものを、当初から統合を前提として構築する必要があります。これは設計の根幹に関わる判断です。
- ・低域の分解能と位相精度を同時に満たす測定ゲート長の選択。どちらか一方を優先するのではなく、両方を同時に満たすように測定ゲートの長さを調整することは、補正の目的に即した、意図的な技術的判断を反映しています。
- ・閉ループによる多段階の再検証。計算された補正が、実際の使用環境において意図した結果を達成していることを確認します。

5. 本レビューによる裏付け

関連資料である『技術性能レビュー』では、今回評価したシステムにおいて、本手法が意図どおりに機能していることを示す直接的な証拠を記録しています。

その内容は、次のとおりです。

- ・インパルス応答によって確認された、各ドライバーの音の到達タイミングがサンプル単位で整合していること。
- ・中域および高域において、群遅延が実質的にフラットであること。
- ・サブウーファー帯域の位相挙動が、物理法則に基づいて独立に計算された室内共振周波数およびヌル周波数と、正確に一致していること。
- ・適用された補正フィルター群が、破壊的干渉によるヌルも含め、実際に補正可能な対象だけを適切に選択していること。
- ・最終段階で行われた閉ループ再測定の結果が、それ以前のすべての分析段階と整合していること。

これらの知見は、設計意図だけを根拠としたものではありません。複数の測定手法を用いて独立に検証され、相互に裏付けられています。

翻訳は以上です。

※ 本訳では原文の記述内容を維持しています。特に、技術的な評価や性能に関する記述は、原文が示す主張として翻訳しており、独立した技術検証によって新たに確認したものではありません。