

1 はじめに

音響機器や室内の周波数応答特性を測定することは、重要な基本技術である。古くからこの測定には、スイープ正弦波信号が用いられてきた。この測定において、測定時間に余裕がある場合、長時間の信号を発生させることで、精度良く、SN比の高い測定を行うことができる。しかし、一方では、短時間のスイープ信号で測定したいという要求もある。本報告では発生させる信号長と測定結果の関係について検討した。

2 古典的なスイープ正弦波測定法

アナログ回路を用いた古典的な周波数応答測定法を Fig.1 に示す。この測定ではスイープ信号長を短くすると、積分器の平均化効果により、周波数応答の山谷がつぶれるため (Fig.2)、スイープ時間を短くすることはできない。

3 信号処理を利用した測定法

Fig.3 に信号処理を用いた測定法を示す。スイープ正弦波の応答 $y(t)$ に対し、逆関数を適用してインパルス応答 $h(t)$ を得る。この $h(t)$ をフーリエ変換することで周波数応答を得る。代表的な線形スイープ信号として TSP 信号 [1] が知られている。TSP 信号の定義式を次式に示す。

$$TSP(f) = \begin{cases} \exp(-j2\pi Jf^2 / N^2) & (0 \leq f \leq N/2) \\ TSP^*(N-f)^2 & (N/2 < f \leq N) \end{cases} \quad (1)$$

J は信号の実行長を表す定数 (以下では $J = N/2$ と固定), N は信号長, f は離散周波数である。スイープ信号 $tsp(t)$ は $TSP(f)$ を逆フーリエ変換することで得られる。また逆関数 $itsp(t)$ は次式で与えられる

$$itsp(t) = tsp(-t) \quad (2)$$

4 円状畳み込みを利用した測定法

信号 $s(t)$ と系 H , および、応答 $y(t)$ と逆関数 S^{-1} がそれぞれ円状畳み込みを行えば、正

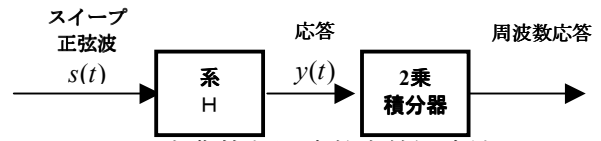


Fig.1 古典的な周波数応答測定法

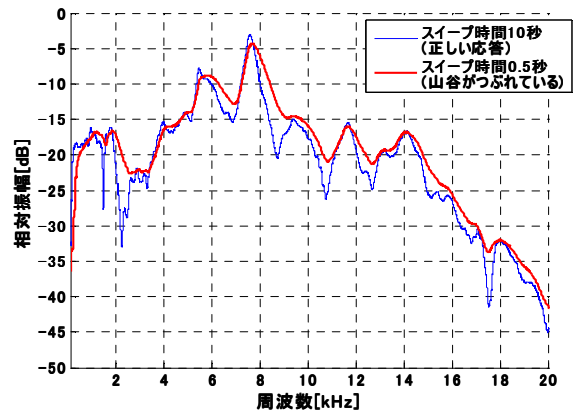


Fig.2 古典的測定におけるスイープ時間の影響

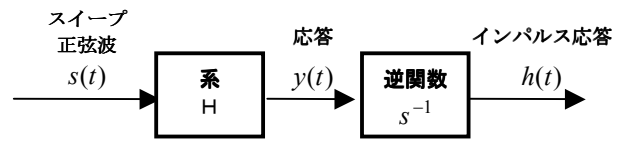


Fig.3 逆関数によるインパルス応答測定

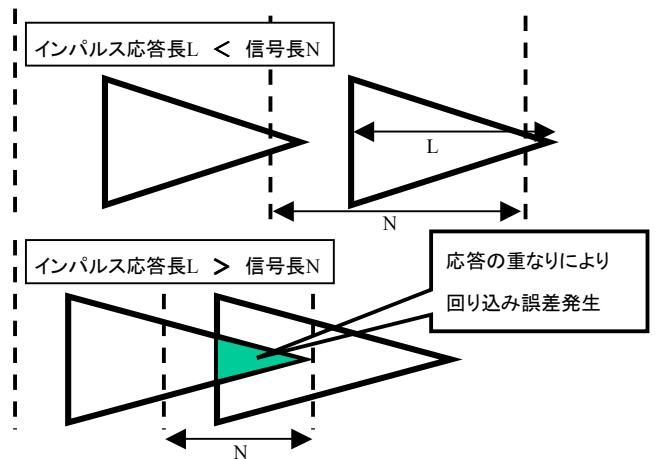


Fig.4 円状畳み込みによる誤差の発生

確なインパルス応答を測定することができる。しかしスイープ正弦波信号の長さ N が系 H のインパルス応答長 L より短い場合は信号の回り込みが起こり誤差 (Fig.4) が発生してしまう。

* The effect of sweep time on frequency response measurement by swept sine method, by MURASAWA, Ryota and KANEDA, Yutaka (Tokyo Denki University).

シミュレーションにより、この誤差の大きさを検証した。Fig.3の系 H としてFig.5に示したスピーカのインパルス応答 h_0 を用いた。この応答長 L は512(2^9)であった。スイープ信号長を $2^2 \sim 2^{10}$ と変化させながら真のインパルス応答との測定誤差 E を求めた。

$$E = \frac{\|h_0 - h_1\|^2}{\|h_0\|^2} \quad (3)$$

検証結果をFig.6の○印として示す。Fig.6から信号長がインパルス応答長 L (2^9)以上の場合では誤差は-100dB以下となり、十分に正確に測定できている。しかし信号長が L より短い場合は信号の回り込みにより誤差が発生し、値が悪くなっている。

5 線形畳み込みによる測定法

式(1)で定義されるTSP信号は、その逆関数 $it_{sp}(t)$ と線形畳み込みを行っても誤差が小さいという特徴をもつ[1]。逆関数での線形畳み込みを行えばFig.4で示すような誤差は発生しないのでインパルス応答長 L より信号長 N を短くすることが可能である。

実際に信号長を短くして誤差評価を行った。結果をFig.6の□印に示す。信号長 2^8 では円状畳み込みより約50dBほど誤差が低減できている。しかしそれでも信号長を大幅に短くすると誤差が増加してしまう。

6 信号長の長い逆フィルタの利用

スイープ信号の長さ N は測定時間に直結するが、逆関数の長さは、計算時間が早ければ測定時間には影響しない。そこで長さが N の $it_{sp}(t)$ の代わりにフィルタ長を長くした近似逆フィルタを利用することを考える。近似逆フィルタ \hat{s}^{-1} は次式で求めた[2]。

$$\hat{s}^{-1} = (\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{d} \quad (4)$$

ここで、 \mathbf{d} をインパルス信号ベクトル、 \mathbf{G} は $t_{sp}(t)$ を列とした畳み込み行列である。

今回の検証ではフィルタ長が信号長 N の2倍のものと4倍のものをを用いた。Fig.6の△印にフィルタ長2倍のものを、▽印にフィルタ長4倍のものを示した。図より、逆フィルタ長を $2N$ とすると、線形畳み込みと比べて20dB程度の誤差低減が得られ、さらに $4N$ とすれば誤差は十分無視できる程度となる。このことからフィルタ長の長い近似逆フィルタを用いることによって信号長が短い場合でも正確に測定できることがわかる。

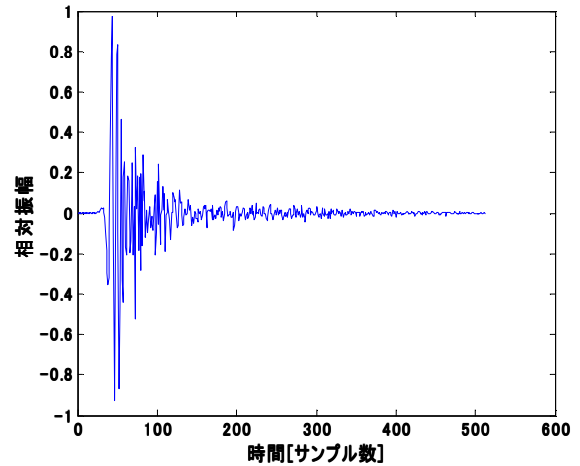


Fig.5 誤差評価に用いたインパルス応答

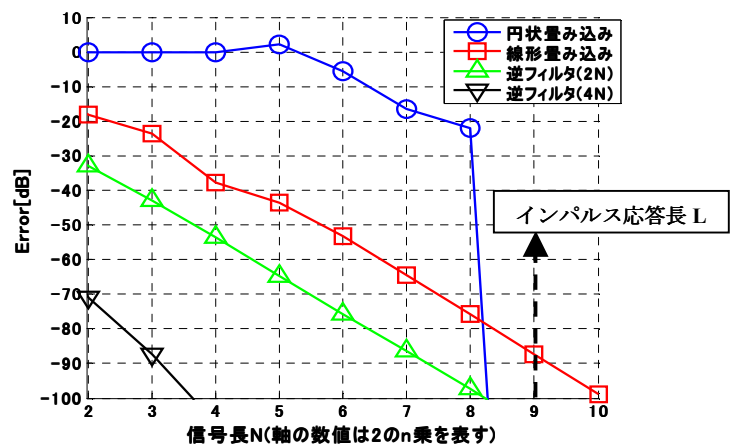


Fig.6 信号長 N と測定誤差 E の関係

7 むすび

古典的な測定方法と異なり、逆関数を利用したスイープ正弦波測定ではスイープ時間を短くしても、精度の良い周波数特性が測定できることを示した。

信号長 N とインパルス応答長 L の関係が $N > L$ の場合には円状畳み込みを利用することで正確に測定することができる。(雑音や非線形などの誤差は除く)しかし $N < L$ の場合TSP信号などを用いて線形畳み込みを行う必要がある。また N が小さい場合にはITSP信号ではなく、信号長を長くした近似逆フィルタを別途設計することで誤差を大幅に低減できる。

参考文献

- [1]鈴木 他, 信学技報, EA92-86, 1992.
- [2]大賀 他, "音響システムとデジタル信号処理", pp.153-156, 1995.