

# インパルス応答に含まれる周期性雑音除去の検討

牧野 洪<sup>†</sup> 金田 豊<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 東京電機大学大学院工学研究科 〒120-8551 東京都足立区旭町 5 番

E-mail: † {14kmc22@ms, kaneda@c}.dendai.ac.jp

**あらまし** インパルス応答はスピーカや部屋などの音響系の特性を含む重要な特性量である。しかし、測定の際にはマイクに環境雑音などが付加されるために、SN 比が低下する。付加雑音は、定常であれば周期・非周期の二種類に分類できる。従来はこれらを区別することなく、測定信号のエネルギーを増加することで抑圧を行ってきた。しかし、周期雑音に関しては、特徴的な規則性から効果的な抑圧が期待できる。本報告では、実測した周期雑音から周期成分を推定し、推定結果をインパルス応答から減算する方法を提案した。そして、測定結果に含まれる雑音成分を最小にする測定信号として知られる、MN-SS 信号による測定と組み合わせることにより、より大きな雑音抑圧効果が得られることを、シミュレーションにより確認した。

**キーワード** インパルス応答測定, 掃引正弦波, 雑音抑圧, 周期雑音, 電源雑音

## Study on reduction of periodic noise contained in an impulse response

Ko MAKINO<sup>†</sup> Yutaka KANEDA<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Graduate school of Engineering, Tokyo Denki University,

5 Senju-asahi-cho, Adachi-ku, Tokyo, 120-8551 Japan

E-mail: † {14kmc22@ms, kaneda@c}.dendai.ac.jp

**Abstract** Although the impulse response is an important acoustic characteristic of speakers or rooms, its signal-to-noise ratio (SNR) sometimes deteriorates because of environmental noise. Stationary environmental noise is classified into periodic and non-periodic noise. Conventionally, both types of noise have been suppressed together by increasing the energy of the measurement signal. However, it is expected that the periodic noise can be suppressed effectively by using its regularity. In this report, we propose a method of estimating the periodic component of measured noise, which is subtracted from the impulse response. Then, we combine the proposed method with measurement using a minimum-noise-swept-sine (MN-SS) signal, which is a measurement signal known to minimize the noise component in a measurement result. The simulation result indicates increased noise suppression using the proposed method.

**Keywords** impulse response measurement, swept sine, noise reduction, periodic noise, power noise

### 1. はじめに

インパルス応答はスピーカや部屋などの音響系の特徴を含んでおり、音響計測において重要な特性量である[1]。高い SN 比でインパルス応答測定を行うために掃引正弦波(SS:Swept Sine)信号など高エネルギーな測定信号が利用されている。掃引正弦波とは時間とともに周波数が上昇する正弦波であり、時間に比例して周波数が上昇する TSP(Time Stretched Pulse)信号[2]や、環境雑音のスペクトルを反映した周波数の上昇を行う MN-SS(Minimum Noise - Swept Sine)信号[3]などが提案されている。

本稿ではさらなる SN 比向上を図るために、インパルス応答に付加される雑音の種類に着目し、環境雑音に含まれる周期雑音の抑圧手法について検討を行った。

### 2. 掃引正弦波によるインパルス応答測定

#### 2.1 インパルス応答測定原理

Fig. 1 にインパルス応答測定原理のブロック図を周波数領域で示す。ただし図中の  $k$  は離散周波数番号を表す。図において、 $S(k)$  はインパルス応答測定信号、 $H(k)$  は被測定系のインパルス応答の等価量である周波数特性、 $N(k)$  は雑音を表す。 $1/S(k)$  は測定信号の逆特性を表す。 $S(k)$  を被測定系に入力することで応答信号  $S(k)H(k)$  が得られる。実環境においては環境雑音等が存在するため、応答信号には雑音  $N(k)$  が付加され、 $S(k)H(k) + N(k)$  となる。この応答信号に逆特性  $1/S(k)$  を乗算することで、出力信号  $H(k) + N(k)/S(k)$  を得ることができる。この  $N(k)/S(k)$  はインパルス応答の誤差成分であり、測定信号に依存することが分かる。よって、高エネルギーの測定信号  $S(k)$  を用いることで、誤差を

小さくすることができる。

Fig. 2 に TSP 信号のインパルス応答算出のモデル図を示す。各図は横軸が時間、縦軸が周波数として表した、信号のスペクトログラムである。応答信号(Fig. 2(a))に対して TSP 信号の逆特性(Fig. 2(b))を乗算することで、全周波数成分が一つの時刻に集中したインパルス応答(Fig. 2(c))を得ることができる。

### 2.2 MN-SS 信号によるインパルス応答測定

インパルス応答計測において広く利用されている TSP 信号のパワースペクトルは、次式で表される。

$$P_{TSP}(k) \sim 1 \quad (1)$$

ただし、 $k$ は離散周波数番号を表し、 $\sim$ は比例を表す。式(1)より、TSP 信号は全ての周波数で同一のエネルギーを含むことが分かる。しかし、空調雑音のような室内雑音は、一般的に低周波成分が強いため、TSP 信号では低周波帯域の SN 比が低くなる問題がある。

この対策として、環境雑音に適応する MN 信号が提案されている。MN-SS 信号のパワースペクトルは、次式で表される。

$$P_{MN}(k) \sim \sqrt{P_N(k)} \quad (2)$$

ただし、 $P_N(k)$ は環境雑音のパワースペクトルを表す。この信号は、環境雑音のスペクトルの大小に応じて、各周波数帯域の掃引時間が長短する信号であり、測定結果に含まれる環境雑音の成分  $N(k)/S(k)$  を最小化することができる[3]。

Fig. 3 に環境雑音の例としての Hoth 雑音[4]と、同一エネルギーの TSP 信号と MN-SS 信号それぞれのパワースペクトルを示す。細線は Hoth 雑音、太線は TSP 信号、波線は MN-SS 信号をそれぞれ表す。図より、TSP 信号は 400Hz 以下の帯域が雑音よりもパワーが小さいため、低周波帯域では SN 比が低くなる。これに対して、MN-SS 信号は全帯域で雑音よりもパワーが大きいため、全ての周波数帯域で SN 比を確保できる。

### 3. 雑音低減の考え方

環境雑音が定常である場合、雑音は周期雑音と非周期雑音の二種類に分類できる。Fig. 4 と Fig. 5 に、非周期雑音(白色雑音)と周期雑音(電源雑音)それぞれの波形とスペクトルの例を示す。

Fig. 4(a)(b)に示されるように、非周期雑音は時間波形の振幅や周波数スペクトルが完全にランダムであるために、測定結果からこれを除去することは困難である。よって、TSP や MN-SS などの高エネルギーの測定信号を用いることで、Fig. 1 に示される  $S(k)$  を大きくして、測定結果に含まれる雑音成分  $N(k)/S(k)$  を低減しよ

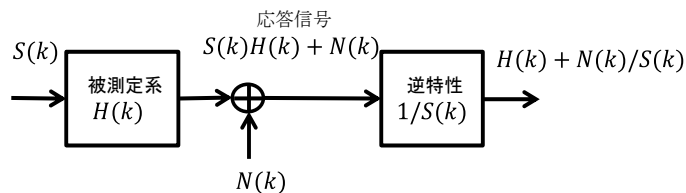


Fig. 1 インパルス応答の測定原理

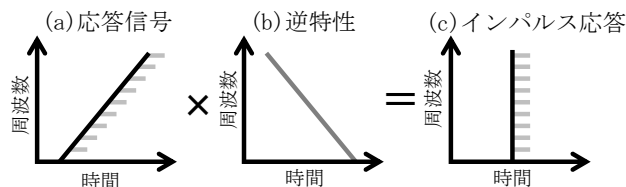


Fig. 2 TSP を用いたインパルス応答算出モデル図

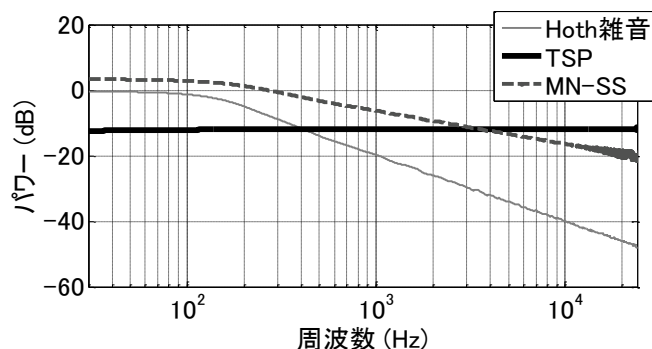


Fig. 3 Hoth 雑音と測定信号の周波数特性

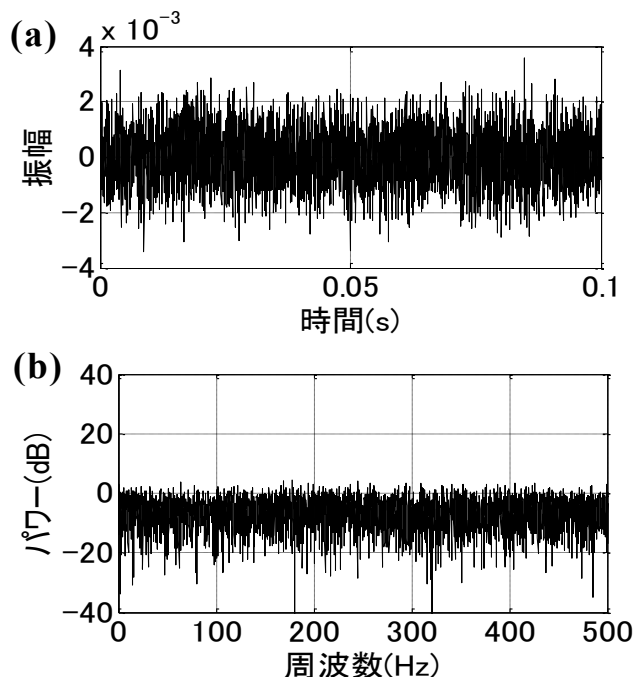


Fig. 4 非周期雑音の例(白色雑音) (a)時間波形, (b)周波数特性

うとするものであった。しかし、この方法では、 $N(k)$ が大きい場合には、 $S(k)$ も大きくする必要があり、そのためには、長い信号長(=測定時間)が必要とされた。

これに対して、周期雑音は Fig. 5(a)(b)のように、時間波形上では周期的な振幅を繰り返し、スペクトル上では特定の周波数でピークとして表現される。そのため、この性質を利用することで、効果的な雑音除去が期待できる。

従来は周期雑音と非周期雑音を区別することなく、測定信号 $S(k)$ のエネルギーを大きくすることで雑音の「低減」を行っていた。これに対して、本研究では非周期雑音には従来通り測定信号による雑音の「低減」を行い、周期雑音には「除去」を行うことで、より高SN比なインパルス応答の測定を目指す。

#### 4. ノッチフィルタによる周期雑音除去

従来の周期雑音除去法としては、特定の周波数を除去するノッチフィルタがある。Fig. 5(b)に示すように、周期雑音は周波数領域で特定のピークとして表れる。電源雑音の場合は、基本周波数 50Hz(東日本)とその倍周波の成分である高調波の周波数によって構成されている。このような周期雑音を除去するためのフィルタ特性を Fig. 6 に示す。図より、50Hz とその倍周波数において、ゲインが小さくなっていることが分かる。このノッチフィルタの除去周波数を最小二乗的に適応的に設定するなど、様々な方法が提案されている[5]。

Fig. 7 にノッチフィルタを適用する場合のブロック図を周波数領域で示す。図において、 $H(k)$ はインパルス応答の周波数特性、 $\tilde{N}(k)$ は周期雑音、 $G(k)$ はノッチフィルタの特性を表す。図のように、ノッチフィルタを適用することで、出力信号 $G(k)H(k) + G(k)\tilde{N}(k)$ が得られる。この時、ノッチフィルタの特性より $G(k)\tilde{N}(k)$ はほぼ 0 となり、周期雑音は除去されるが、周波数特性 $H(k)$ にはノッチフィルタ特性 $G(k)$ が付加されて、結果としてインパルス応答が劣化する。

#### 5. 提案する周期雑音除去法

Fig. 8 に実測した結果のインパルス応答部分と雑音区間(雑音のみが含まれている区間)を示す。ただし振幅を拡大してあるので、インパルス応答の上下は表示されていない。図のように、インパルス応答の測定結果においては雑音区間が明確である場合が多い。

Fig. 8 において、 $n_A(t)$ 、 $n_B(t)$ 、 $n_C(t)$ は図に表示された区間の信号を表し、測定結果の雑音成分である。ただし、 $t(=1,2,\dots)$ は離散時間を表す。また、 $\tilde{h}(t)$ は雑音成分を含んだインパルス応答を表している。この時、 $n_A(t)$ と $n_C(t)$ の信号長は等しく、 $n_B(t)$ と $\tilde{h}(t)$ の信号長は等しいものとする。また、 $n_A(t)$ と $n_B(t)$ 、および $n_C(t)$ と $\tilde{h}(t)$ は時間的に連続しているものと仮定する。以下、この雑音区間を利用した周期雑音除去法を説明する。

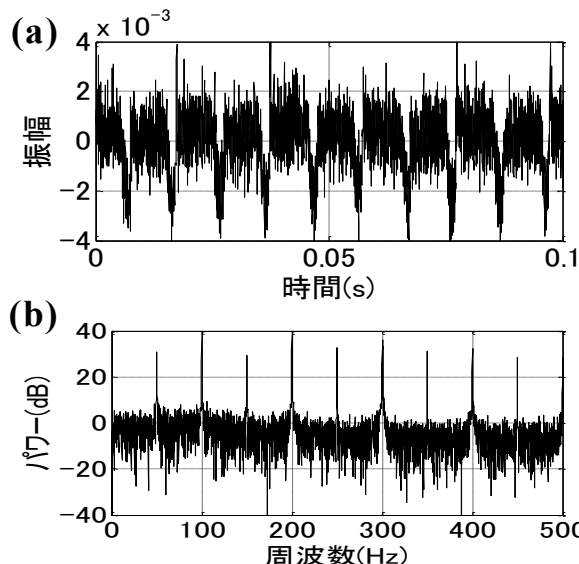


Fig. 5 周期雑音の例(電源雑音) (a)時間波形, (b)周波数特性

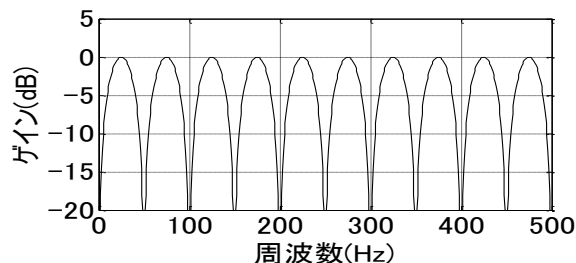


Fig. 6 電源雑音除去用ノッチフィルタ特性

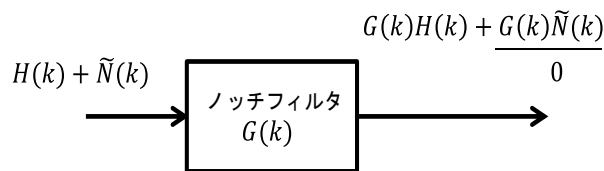


Fig. 7 ノッチフィルタを用いた周期雑音除去

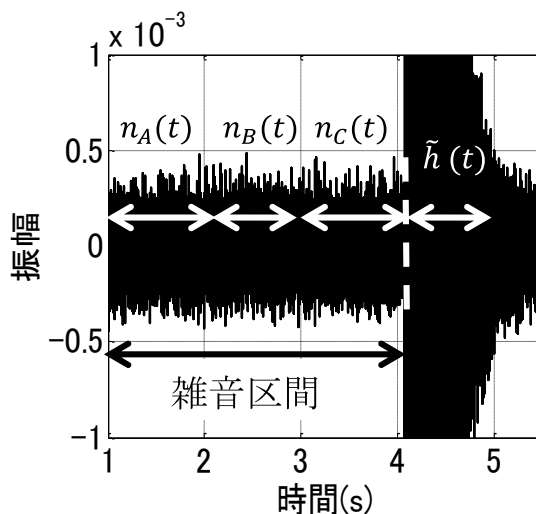


Fig. 8 実測インパルス応答と雑音区間

最初の手順を Fig. 9①に示す. 図において,  $g(t)$ は周期雑音除去用 FIR フィルタのフィルタ係数(=インパルス応答)を表し, その長さは  $l$ であるとする. 雑音  $n_A(t)$ をフィルタ  $g(t)$ に入力した時の出力を  $y(t)$ と表す. この時, 雑音  $n_A(t)$ の畳み込み行列を  $N_A$ と表した時, 出力ベクトル  $\mathbf{y}$ は次式のように表される.

$$\mathbf{y} = N_A \mathbf{g} \quad (3)$$

ただし,

$$N_A = \begin{pmatrix} n_A(l) & \dots & n_A(2) & n_A(1) \\ n_A(l+1) & \dots & n_A(3) & n_A(2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ n_A(m) & \dots & n_A(m-l+2) & n_A(m-l+1) \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{y} = [y(l), y(l+1), \dots, y(m)]^T \quad (5)$$

$$\mathbf{g} = [g(0), g(1), \dots, g(l-1)]^T \quad (6)$$

$T$ は転置を表し,  $m$ は  $n_A(t)$ の長さを表す

この時, フィルタ係数  $g(t)$ は, 雑音  $n_A(t)$ を用いて雑音  $n_C(t)$ を予測するように定められる. 具体的には, 雑音  $n_C(t)$ とフィルタ出力  $y(t)$ の差  $e(t)$ の二乗和が最小になるように決定され, 次の式で求められる.

$$\mathbf{g} = (N_A^T N_A)^{-1} N_A^T \mathbf{m}_c \quad (7)$$

ただし,  $\mathbf{m}_c = [n_c(l), n_c(l+1), \dots, n_c(m)]^T$ である.

このようにして決定したフィルタは, 雑音  $n_A(t)$ を用いて雑音  $n_C(t)$ に含まれる周期成分を良好に除去することができる. 従って, Fig. 9②に示すように, 雑音  $n_A(t)$ に連続した区間の雑音  $n_B(t)$ を入力すれば, 雑音  $n_C(t)$ に連続した区間に存在するインパルス応答  $\hat{h}(t)$ に含まれる雑音  $n_D(t)$ に含まれる周期成分を除去することが可能であると考えられる.

この方法は Fig. 7のノッチフィルタを用いた場合の出力と比較した場合, 出力のインパルス応答に対してフィルタ特性が付加されていないという点で優れている. 即ち, 提案手法においては, インパルス応答の劣化は生じないことになる.

## 6. 周期雑音除去法の性能評価

### 6.1 ノッチフィルタを用いた方法との比較

周期雑音除去効果を確認するために, Fig. 7に示したノッチフィルタを用いた方法と, Fig. 9に示した提案手法で周期雑音除去シミュレーションを行い, 比較した. 長時間の測定信号を用いて SN 比が十分に大きい室内伝達系の周波数特性  $H(k)$ を測定し, これを真値とする. 真値に対して, 基本周波数が 50Hz で, 1kHz までの周期成分を含む音響的な電源雑音を付加した. Fig. 10(a)に周波数特性の真値  $H(k)$ を示し, それに電源雑音を付加した周波数特性を Fig. 10(b)に示す. Fig. 10(b)より, 付加した電源雑音の周期成分が 100Hz,

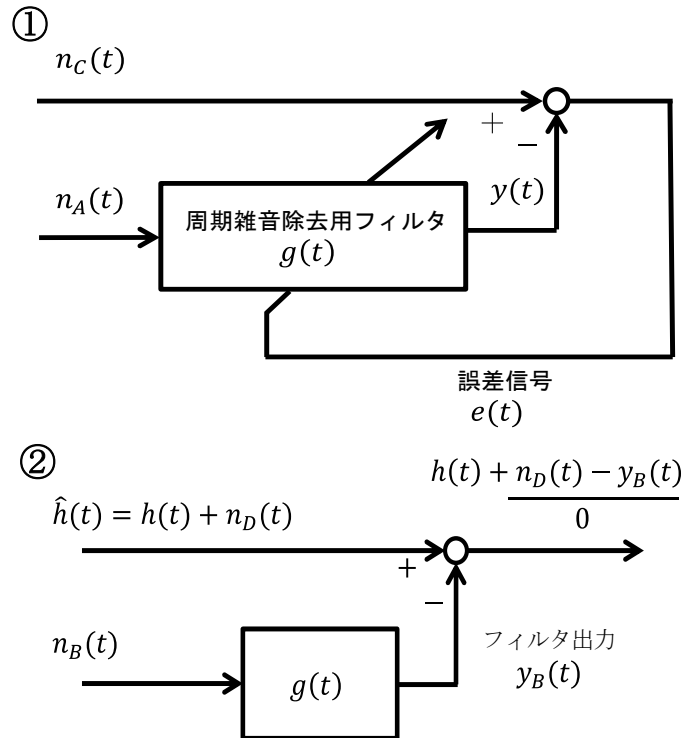


Fig. 9 提案する周期雑音除去法 ①周期雑音除去用フィルタ導出, ②インパルス応答内の周期雑音除去

200Hz, 300Hz でピークとして表れていることが確認できる. この信号に対して, ノッチフィルタ, 提案手法の二手法を適用し, 周波数特性の変化を検討した. この時, 各除去手法を適用して得られた周波数特性  $\hat{H}(k)$ と真値  $H(k)$ の正規化誤差  $E$ を次の式で定義する.

$$E = 10 \log_{10} \left| \frac{\sum_{k=0}^{N-1} |H(k)| - |\hat{H}(k)|}{\sum_{k=0}^{N-1} |H(k)|} \right|^2 \quad (8)$$

Fig. 11に, Fig. 10(b)の信号に対して二手法を適用した結果の周波数特性を示す. Fig. 11(a)はノッチフィルタの結果で, ノッチフィルタは周波数ピークを低減できるが, 真値(Fig. 10(a))と比較すると, そのスペクトルを大きく変化させていることが分かる. これに対して提案手法の結果である Fig. 11(b)では, ピークを低減させつつ, 真値のスペクトルを保持していることが確認できる.

それぞれに関して式(8)で定義する誤差率  $E$ を求めた. 電源雑音を付加した Fig. 10(b)の信号の誤差は -12.7dB だった. これに対してノッチフィルタで周期雑音を除去した Fig. 11(a)の結果は -6.19dB と, 誤差は増大した. 一方, 提案手法を適用した結果 Fig. 11(b)の結果は -22.2dB であった. 以上の結果より, 提案手法によって約 10dB の雑音低減効果を確認できた.

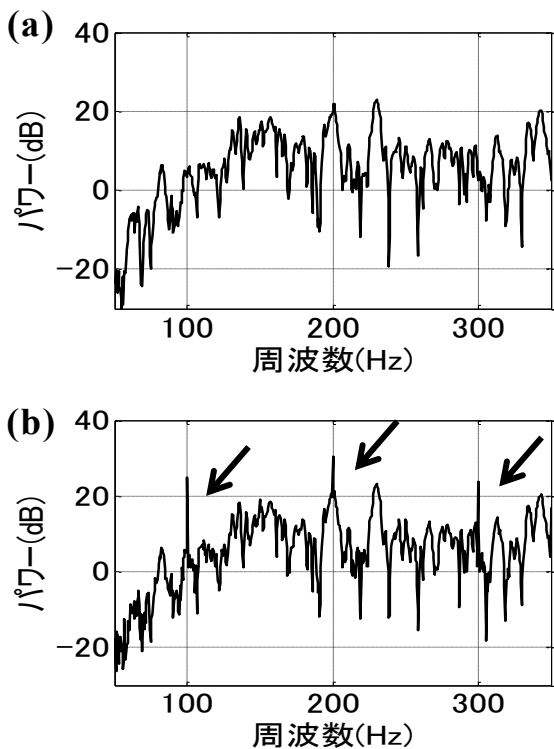


Fig. 10 シミュレーション用インパルス応答周波数特性 (a)真値, (b)電源雑音付加

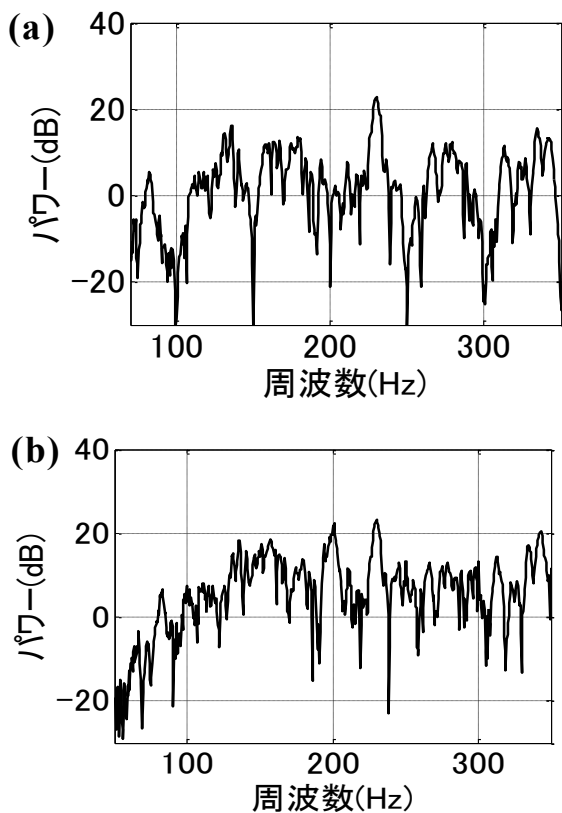


Fig. 11 周期雑音除去法を適用した結果の周波数特性 (a)ノッチフィルタ, (b)提案手法

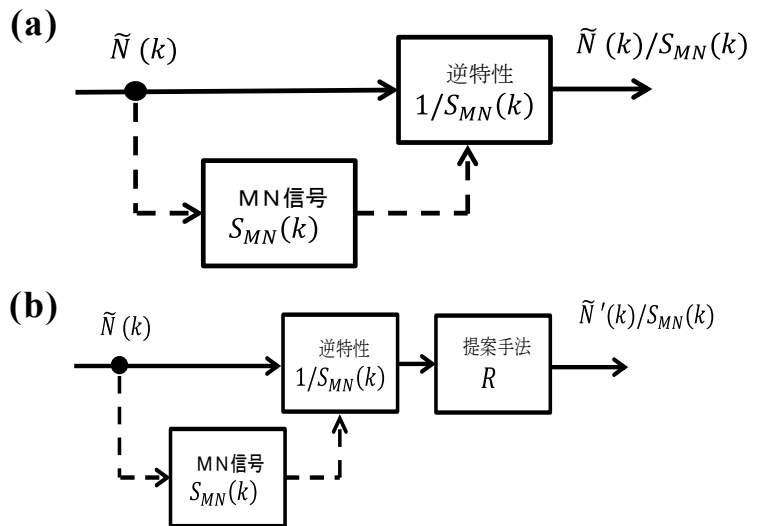


Fig. 12 MN-SS 信号による雑音性誤差に関するシミュレーション系 (a)提案手法未使用, (b)提案手法使用

## 6.2 MN-SS 信号測定時の周期雑音除去法の利用

MN-SS 信号を用いて測定することでインパルス応答測定結果に含まれる雑音成分 (Fig. 1 の  $N(k)/S(k)$ ) は最小化されることが証明されている [6]. しかし、環境雑音に周期成分が含まれている場合には、提案手法を用いることで、さらなる SN 比の向上が期待できる。このことを確認するために、周期雑音存在下での MN-SS 信号による測定に関して、提案手法を用いた場合とそうでない場合でのシミュレーションを行い、比較した。シミュレーションでは、雑音成分を表す  $N(k)/S(k)$  を比較する。

Fig. 12 にシミュレーション系を周波数領域で示す。 $\tilde{N}(k)$  は前節のシミュレーションで用いた電源雑音である。そして、 $\tilde{N}(k)$  から導出した MN 信号の周波数特性を  $S_{MN}(k)$  として表している。Fig. 12(a) では作成した  $S_{MN}(k)$  の逆特性を  $\tilde{N}(k)$  に乗算することで、従来の MN 信号を用いた結果に含まれる雑音成分を得る。

一方、Fig. 12(b) の  $R$  は提案する周期雑音除去処理を表す。提案法では逆特性  $1/S_{MN}(k)$  を乗算した後、提案手法を適用して周期雑音を除去する。その結果を、 $\tilde{N}'(k)/S_{MN}(k)$  と表す。各出力信号  $\tilde{N}(k)/S_{MN}(k)$  と  $\tilde{N}'(k)/S_{MN}(k)$  を比較する。

Fig. 13 に電源雑音  $\tilde{N}(k)$  と、Fig. 12 における出力信号  $\tilde{N}(k)/S_{MN}(k)$  と  $\tilde{N}'(k)/S_{MN}(k)$  を示す。Fig. 13(a) より、電源雑音を示す 50Hz 間隔のピークが存在することが分かる。この信号に対して Fig. 12(a) の手法を適用した結果が Fig. 13(b)、Fig. 12(b) の手法を適用した結果が Fig. 13(c) である。Fig. 13(b) より、MN-SS 信号によって、全ての周波数帯域での雑音成分が小さくなっているが、ピークは完全に除去できていないことが確認できる。これに対して提案手法を使用した Fig. 13(c) では、Fig.

13(b)に含まれていた雑音の、ピークが除去されていることが分かる。また、各結果を0~1000Hzの範囲で平均パワーを求めたところ、Fig. 13(b)は-61.4dBであるのに対して、Fig. 13(c)は-64.9dBと低減されていた。

## 7. まとめ

本報告では、高 SN 比のインパルス応答測定のための周期雑音除去法について提案し、その検証を行った。インパルス応答の測定結果に含まれる雑音成分は MN 信号を用いることで最小化することが証明されていた。しかし、環境雑音に周期雑音が含まれている場合には、これをさらに低減できる可能性がある。本報告では、インパルス応答内の雑音区間から周期雑音除去用フィルタを求め、これに雑音信号を入力したフィルタ結果を、インパルス応答から減算することで、周期雑音の除去を行う方法を提案した。シミュレーションにより、提案法と MN-SS 信号を組み合わせたインパルス応答測定により、雑音成分がより小さくなることを明らかにした。

## 謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 15H02728 の助成を受けたものです。

## 文 献

- [1] 橋秀樹, "室内音響測定の実状と今後の課題," 日本音響学会誌 49, 2, pp. 97-102 (1993).
- [2] Y. Suzuki, F. Asano, H. Y. Kim, and T. Sone, "An Optimum computer-generated pulse signal suitable for the measurement of very long impulse responses," J. Acoust. Soc. Am. 97(2), pp. 1119-1123, 1995.
- [3] 守谷直也, 金田豊, "雑音に起因する誤差を最小化するインパルス応答測定信号," 日本音響学会誌 64, 12, pp. 695-701 (2008).
- [4] IEEE Std269-2001, "Draft Standard Methods for Measuring Transmission Performance of Analog and Digital Telephone Sets, Handsets and Headsets" pp. 80-82, Jan. 2002.
- [5] Y. Sugiura, A. Kawamura, and N. Aikawa, "A Comb Filter with Adaptive Notch Bandwidth for Periodic Noise Reduction," Proc. of ICICS 2013, pp. 1-4, Tainan, Dec. 2013.
- [6] Y. Kaneda, "Noise Reduction Performance of Various Signals for Impulse Response Measurement," Journal of the Audio Engineering Society, 63, 5, pp. 348-357, May 2015.

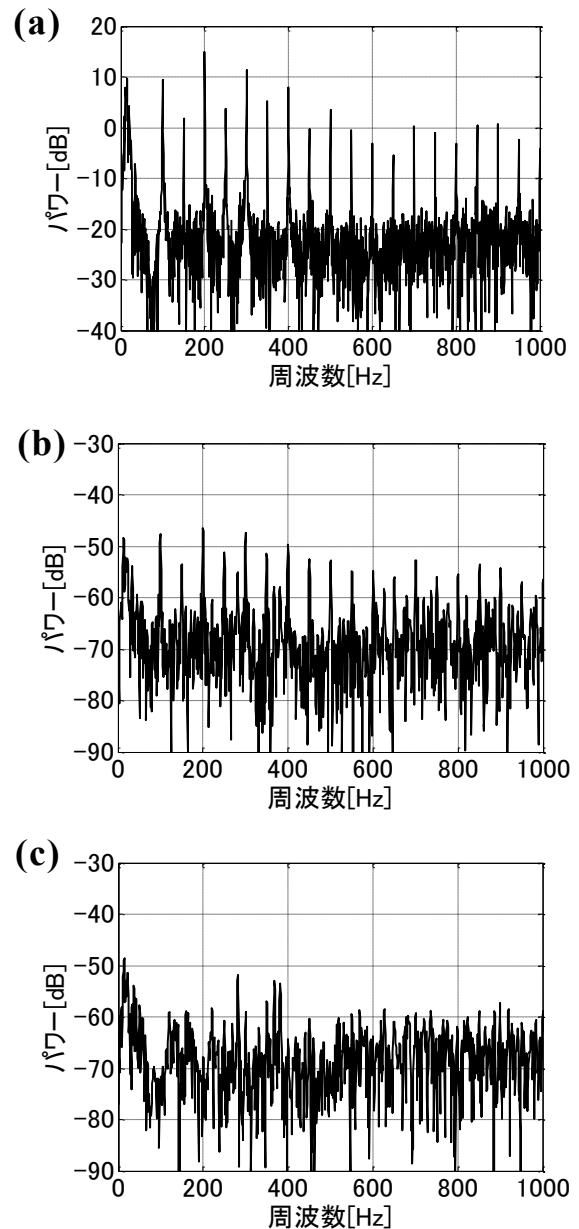


Fig. 13 雑音に関する周波数特性 (a)電源雑音, (b)提案手法未使用時の雑音成分, (c)提案法使用時の雑音成分