

帯域制限したインパルス応答測定信号の 雑音低減効果の検討

茂木 宏太[†] 金田 豊[†]

[†] 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: [†] {16kmc21@ms, kaneda@c}.dendai.ac.jp

あらまし インパルス応答は音響系の周波数特性や残響時間を求めることができる重要な測定量である。インパルス応答測定は全周波数帯域での測定が基本であるが、測定の目的によっては不要な周波数帯域が存在する。その場合、帯域制限したインパルス応答測定信号を用いることで雑音低減効果が向上する。この雑音低減効果の向上の大きさは使用する測定信号や環境雑音に依存するが、その定量的な関係についてこれまで検討がなされてこなかった。本稿では各測定信号の帯域制限による雑音低減効果向上を理論的に定式化した。そして、実環境測定による雑音低減効果の測定値と理論値を比較し、理論式の妥当性を確認した。

キーワード インパルス応答測定, 掃引正弦波, 雑音低減効果, 帯域制限, 信号選択

Study on the noise reduction effect of band-limited impulse response measurement signal

Kouta MOTEGI[†] Yutaka KANEDA[†]

[†] Graduate school of Engineering, Tokyo Denki University,

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

E-mail: [†] {16kmc21@ms, kaneda@c}.dendai.ac.jp

Abstract An impulse response is important because it can be used to obtain the frequency characteristics and reverberation time of an acoustic system. Basically, the impulse response is measured over all frequency bands. However, there are unnecessary frequency bands depending on the purpose of measurement. In such a case, the noise reduction effect can be improved by using a band-limited measurement signal. This improvement of the noise reduction effect depends on the measurement signal characteristics and environmental noise; however, the quantitative relationship has not yet been investigated. In this paper, the improvement of the noise reduction effect by the band limitation of each measurement signal is theoretically formulated. Then, the validity of the theoretical formula is confirmed by comparing experimentally measured and theoretical values.

Keywords impulse response measurement, swept sine, noise reduction ratio, band limited, signal selection

1. はじめに

音響系の周波数特性や残響時間を求めるためにインパルス応答の測定は重要である。そしてインパルス応答測定用信号として掃引正弦波 (SS:Swept Sine) 信号が広く利用されている。その中にはスペクトルが固定である信号 (TSP[1], Log-SS[2]) や、環境に依存してスペクトルを変化させる信号 (MN-SS(雑音最小化信号[3])) がある。これらを使用してインパルス応答を測定する場合、全周波数帯域で測定するのが基本的だが、測定の目的には必要のない周波数帯域も存在する。そこで不要な帯域を制限することで測定信号の雑音低

減効果を増加することが出来る。本稿ではその効果を定式化し実験的検証を行った。

2. インパルス応答測定原理

Fig. 1 にインパルス応答測定系を周波数領域で表現したブロック図を示す。図において $S(f)$ はインパルス応答測定用の信号である。ここで、 f は周波数を表すが、図では省略している。また、 $H(f)$ はインパルス応答と等価量である系の周波数特性を表し、 $N(f)$ は定常な環境雑音、 $1/S(f)$ は測定信号の逆特性を表す。測定用信号 $S(k)$ を測定系に入力すると応答信号 $H(f)S(f)$ が出力される。雑音 $N(f)$ が無い場合、この応答信号 $H(f)S(f)$

に逆特性 $1/S(f)$ をかけることで $H(f)$ を得ることが出来る。そして $H(f)$ を逆フーリエ変換することでインパルス応答が得られる。

しかし現実には環境雑音 $N(f)$ が存在し、 $N(f)/S(f)$ が測定誤差となる。この測定結果に含まれる雑音性誤差をパワースペクトルで表すと、 $P_N(f)/P_S(f)$ となる。ただし、 $P_N(f)$ 、 $P_S(f)$ はそれぞれ環境雑音および測定信号のパワースペクトルを表す。雑音性誤差の大きさが測定信号に大きく依存することがわかる。

3. 雑音低減効果の理論値

3.1 雑音低減効果

パルス信号を用いて測定したインパルス応答に含まれる雑音性誤差の時間軸パワーを p_{N0} と表す。また、測定信号を用いて得られたインパルス応答に含まれる雑音性誤差の時間軸パワーを p_{N1} と表す。この時、測定信号による雑音低減効果 NRR (Noise Reduction Rate) を次式で定義する。

$$NRR = p_{N0} / p_{N1} \quad (1)$$

この NRR に寄与するものとして、1) 全帯域 (本稿では 0Hz からナイキスト周波数まで) で定義される測定信号のスペクトルが持つ雑音低減効果 NRR_0 、2) 測定信号に対する帯域制限の効果 NRR_1 、3) 雑音に対する帯域制限効果 NRR_2 の 3 つがあげられる。以下、これらについて説明を加える。

3.2 測定信号スペクトルが持つ雑音低減効果

全帯域で定義される測定信号のスペクトル $P_S(f)$ が持つ雑音低減効果 NRR_0 は、環境雑音のパワースペクトル $P_N(f)$ との関連性より、次式のように表すことができる [4]。

$$NRR_0 = J \cdot p_s \cdot \frac{1}{\frac{1}{f_{max}} \int_0^{f_{max}} \frac{\hat{P}_N(f)}{\hat{P}_S(f)} df} \quad (2)$$

ただし、 J は測定信号の実効長を、 p_s は測定信号の時間軸のパワーを表す。また、 $\hat{P}_S(f)$ 、 $\hat{P}_N(f)$ はそれぞれ、 $P_S(f)$ 、 $P_N(f)$ をその平均パワー (例えば、 $\frac{1}{f_{max}} \int_0^{f_{max}} P_S(f) df$) で正規化したものである。

この NRR_0 を最小とする測定信号のスペクトルは

$$P_S(f) = c \cdot \sqrt{P_N(f)} \quad (c: \text{定数}) \quad (3)$$

であり [3]、このスペクトルを持つ掃引正弦波を MN-SS (Minimum Noise-Swept Sine) 信号と呼ぶ。

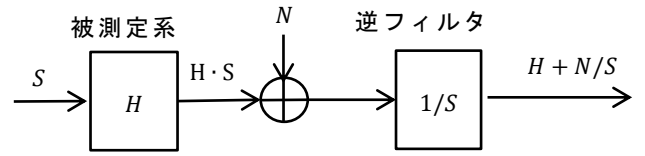


Fig. 1 インパルス応答の測定原理

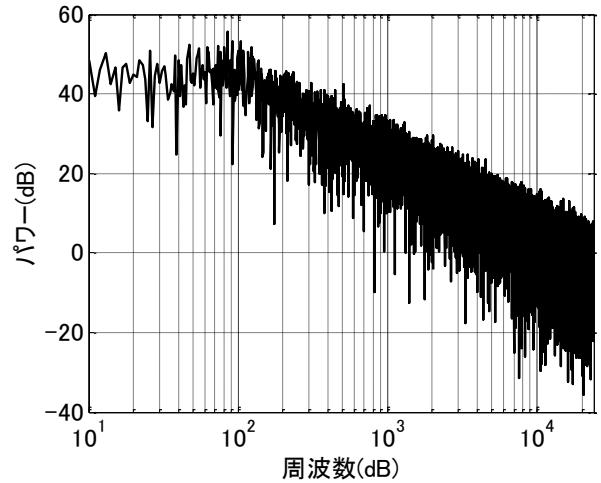


Fig. 2 Hoth 雑音のパワースペクトル

ここで上限周波数 (ナイキスト周波数) を、 $f_{max} = 24\text{kHz}$ とする。また、環境雑音は Fig. 2 にスペクトルを示した Hoth 雑音とする。そして、測定信号としては、白色スペクトル ($P_S(f) = c$ (c : 定数)) を持つ TSP 信号、ピンクスペクトル ($P_S(f) = 1/f$) を持つ Log-SS 信号、そして式 (3) のスペクトルを持つ MN-SS 信号、の 3 種類の掃引正弦波を考える。(以下、3 章での計算は以上の条件で行う)

Fig. 3 に 3 つの測定信号の時間-周波数特性を示す。図より、TSP は時間に比例して周波数が増加していること、Log-SS は周波数が時間の指数関数として増加しているため、低周波部分の掃引時間が長いこと、Hoth 雑音に対する MN-SS は Log-SS に近い特性を持っていることなどがわかる。

このとき、TSP の NRR_0 (白色スペクトル信号が持つ雑音低減効果) を基準 (0dB) とすると、Log-SS は約 9dB、MN-SS は約 11dB の雑音低減量を持つことが計算された。Fig. 2 のように低域成分の大きい雑音に対しては、低域エネルギーの大きい Log-SS や MN-SS が、TSP に比べて有利となることがわかる。

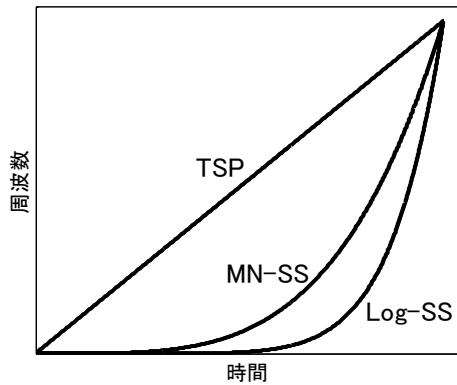


Fig. 3 各測定信号の時間-周波数特性

3.3 測定信号の帯域制限による雑音低減効果

掃引正弦波の測定信号を帯域制限したときに得られる効果として時間短縮または使用周波数帯域のエネルギー増加が見込める。Fig. 4 は掃引正弦波信号の時間-周波数特性の例を示す。図において、この信号は0Hz から上限周波数 f_{max} までを時間 T_0 で掃引する。この時、この信号の周波数 f_1 以下をカットし $f_1 \sim f_{max}$ で帯域制限すると、掃引時間は T_1 に短縮される。

一方、帯域制限した測定信号を元の時間長で掃引すると、単位周波数あたりの信号エネルギーは増加する。すなわち、 $f_1 \sim f_{max}$ の帯域の掃引時間を T_1 から T_0 に増加すると各周波数あたりの信号エネルギーは T_0/T_1 倍に増加し、その分、測定結果に含まれる雑音レベルの低下が見込める。

測定信号のパワースペクトルを $P_s(f)$ とすると、ある帯域を掃引する時間 (T_0 や T_1) はその帯域に含まれるエネルギーに比例する。よって、上限周波数を f_{max} で固定し、下限周波数 f_1 をパラメータとした帯域制限による雑音低減効果 $NRR_1(f_1)$ は

$$NRR_1(f_1) = \frac{T_0}{T_1(f_1)} = \frac{\int_0^{f_{max}} P_s(f) df}{\int_{f_1}^{f_{max}} P_s(f) df} \quad (4)$$

となる。

例として TSP, Log-SS, MN-SS の 3 種の測定信号の $NRR_1(f_1)$ 値を Fig. 5 に示す。図より、Log-SS は低域の掃引時間が長いいため、例えば 100 Hz 以上に帯域制限をすれば約 2.5dB の雑音低減効果が得られる。しかし TSP では 100Hz 以下の制限ではほとんど信号長が変化しないので、大きな低減効果は得られない。

3.4 帯域外雑音の除去による雑音低減効果

インパルス応答の測定対象とする帯域を制限する場合、使用周波数帯域外の雑音を除去することで雑音低減効果が得られる。

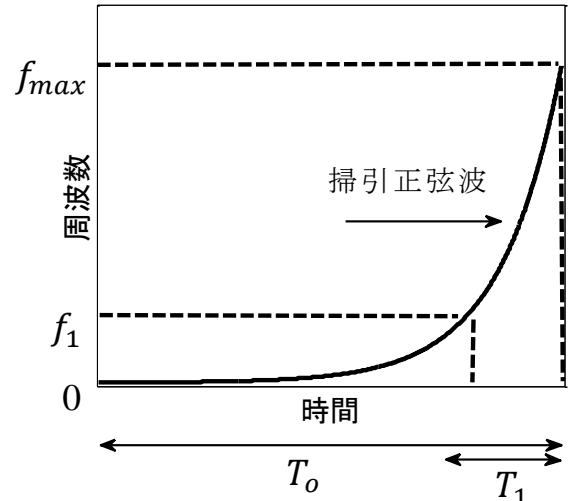


Fig. 4 掃引正弦波の時間-周波数特性と帯域制限効果

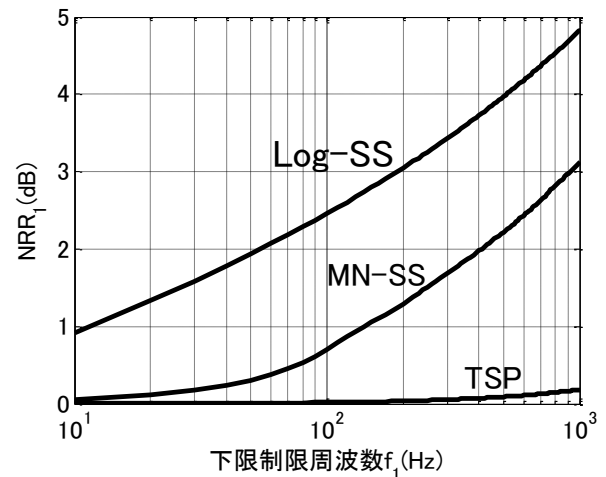


Fig. 5 $NRR_1(f_1)$ の理論値

第 2 章で述べたように、測定されたインパルス応答に含まれる雑音性誤差パワーは $P_N(f)/P_s(f)$ となる。これを帯域制限し、 f_1 以下の雑音成分をカットすることで得られる雑音低減効果 $NRR_2(f_1)$ は、帯域制限前後の雑音性誤差のエネルギー比として

$$NRR_2(f_1) = \frac{\int_0^{f_{max}} P_N(f)/P_s(f) df}{\int_{f_1}^{f_{max}} P_N(f)/P_s(f) df} \quad (5)$$

となる。

例として 3 種類の測定信号の $NRR_2(f_1)$ を Fig. 6 に示す。TSP で測定した結果に含まれる雑音性誤差は元の雑音と同様のスペクトル形状で低域が大きいので、帯域制限 (低域を除去) する効果が高く、例えば 100Hz 以上で帯域制限を行うと約 3dB 以上の低減効果が見込まれる。一方、Log-SS や MN-SS では、測定結果においてはパワーの大きい低域雑音成分が抑圧されているため TSP と比べて雑音低減量が小さい。

3.5 総合的雑音低減効果

3.2、3.3、3.4 で述べた、3 つの雑音低減効果を合わせた総合的な雑音低減効果は

$$NRR(f_1) = NRR_0 \cdot NRR_1(f_1) \cdot NRR_2(f_1) \quad (6)$$

と表される。

それぞれの雑音低減効果は、使用する測定信号のパワースペクトル $P_s(f)$ と測定環境の雑音パワースペクトル $P_N(f)$ がわかれば理論値を得ることができる。そして、それぞれの理論値を掛け合わせれば、帯域制限による総合的雑音低減効果 $NRR(f_1)$ の理論値を得ることができる。

Hoth 雑音を環境雑音とした場合の各測定信号の $NRR(f_1)$ の理論値を Fig. 7 に示す。図における 0dB は TSP で全帯域測定した場合の雑音低減量であり、破線は各測定信号の NRR_0 の値を示す。実線は各測定信号を用いた場合の総合的雑音低減量 $NRR(f_1)$ を示す。

Hoth 雑音に対する雑音低減効果は MN-SS 信号が最大であるが、MN-SS と Log-SS の雑音低減効果はほぼ同じ値となる。これは、Hoth 雑音に対する雑音最小化信号(MN-SS)のスペクトル $\sqrt{P_N(f)}$ が、Log-SS 信号のスペクトルと類似しているためである。

このように、実際の測定環境の雑音に対する各測定信号の雑音低減効果を比較することで、環境雑音に適した測定信号の選択と使用帯域の選定の指標を得ることができる。

4. 帯域制限のシミュレーション

以上の理論結果の正当性を確認するためにシミュレーション実験を行った。シミュレーションのブロック図を Fig. 8 に示す。図において、まず同一のパワーと信号長を持った 3 つの測定信号、TSP、Log-SS、MN-SS を合成する。環境雑音は Hoth 雑音とし、MN-SS はそのスペクトルを利用して合成する。

次に各測定信号を帯域制限した信号 S' を合成する。このシミュレーションは雑音性誤差のみを評価するため、系のゲインは 0 と考えて、雑音のみを逆フィルタ $1/S'$ に通す。ただし、 $1/S'$ の特性には S' において除外された帯域の過大な逆特性が含まれているので、これをさらに帯域制限して除去する。その結果、帯域制限された測定信号を用いた場合の雑音性誤差 $(N/S)'$ を求めることができる。シミュレーションではまず全周波数帯域の TSP を用いた場合の誤差パワーを求め、これを基準(0dB)として他の条件の雑音低減効果 $NRR(f_1)$ を評価した。シミュレーション結果を Fig. 9 に示す。図において全周波数帯域の Log-SS、MN-SS を用いた場合の雑音低減効果 NRR_0 を破線で表す。Fig. 7 の理論値と比較するとシミュレーション値は約 1dB の誤差の範囲で一致した。

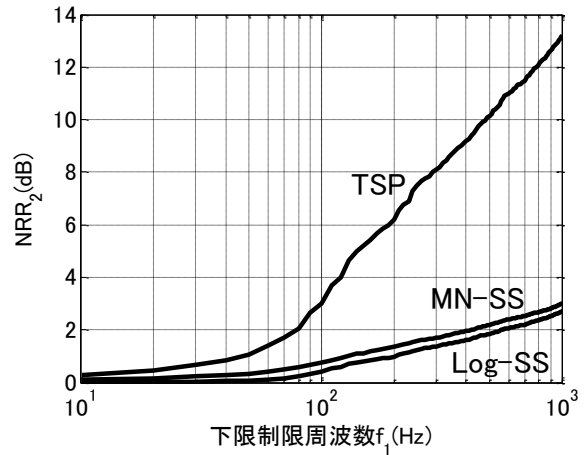


Fig. 6 $NRR_2(f_1)$ の理論値

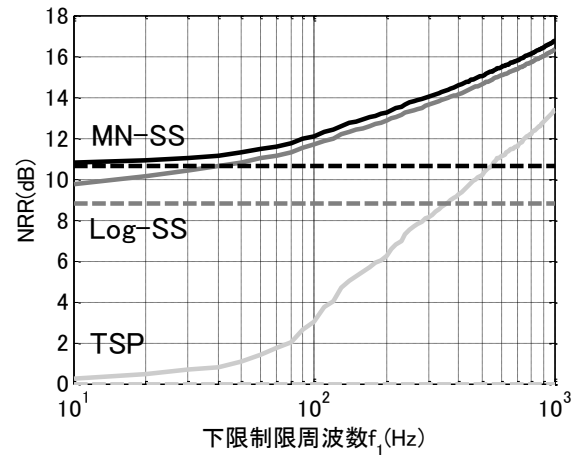


Fig. 7 $NRR(f_1)$ の理論値

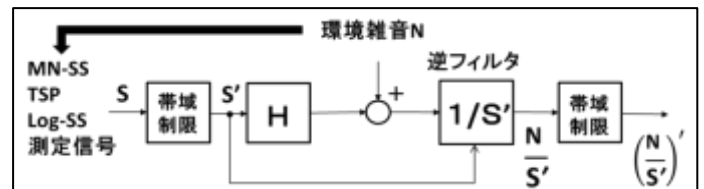


Fig. 8 シミュレーションと実測のブロック図

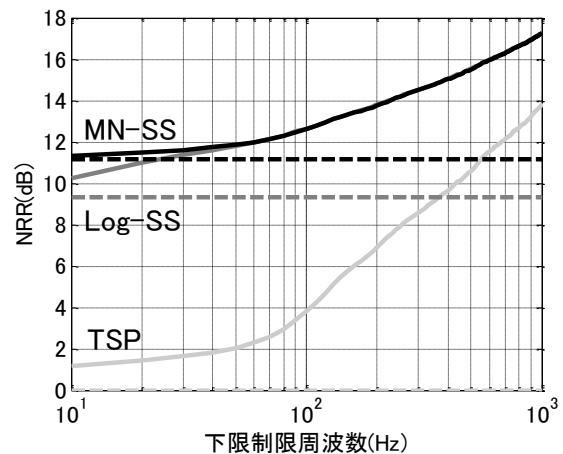


Fig. 9 $NRR(f_1)$ のシミュレーション結果

また、帯域制限周波数 f_1 を変化させて得られた総合的雑音低減効果 $NRR(f_1)$ のシミュレーション値 (Fig. 9 実線) も理論値 (Fig. 7 実線) と約 1dB の誤差範囲で一致し、前節で示した $NRR(f_1)$ の理論式の正当性が確認できた。

5. 実験的検証

実環境でインパルス応答を測定し、帯域制限の効果を確認した。実験は 2 種類の環境雑音を持った部屋 A と B で行った。それぞれのパワースペクトル $P_N(f)$ を Fig. 10、11 に示す。Fig. 10 の雑音は 15Hz 付近に大きな成分を持っており、100Hz 以上では大きく減衰している。また Fig. 11 の雑音は同様に低域成分が大きい、100Hz 以上と以下の成分の差は Fig. 10 ほど大きなものではない。

測定のプロック図は Fig. 8 に示したもので、測定信号は TSP, Log-SS, MN-SS の 3 種、サンプリング周波数は 48kHz、信号長は 2^{16} 、帯域制限は下限周波数を 10~1000Hz の範囲で 10Hz 刻みで変化させた。雑音性誤差のレベルは測定したインパルス応答が十分減衰した区間の時間軸パワー値より求めた。帯域制限を行わない TSP 信号の雑音低減効果 NRR_0 を基準値(0dB)とした。

最初に環境雑音のパワースペクトル $P_N(f)$ を測定し、測定信号のパワースペクトル $P_S(f)$ と合わせて、 NRR_0 と $NRR(f_1)$ の理論値を計算した。Fig. 12、13 の破線に各測定信号の NRR_0 値、実線に帯域制限した場合の $NRR(f_1)$ 値の理論値を示す。

Fig.14、15 に実測した各信号の雑音低減量を実線で示す。これらを Fig.12、13 の理論値と比較すると、帯域制限の下限周波数 f_1 の上昇に伴う $NRR(f_1)$ の上昇傾向は類似しているが、絶対的な大きさには 5dB 程度の誤差が生じた。

この原因は、 NRR_0 の不一致と考えて、 NRR_0 の値を強制的に理論値と一致させて表示したものが Fig.16、17 である。この場合縦軸は、帯域制限による雑音低減効果 $NRR_1(f_1) \cdot NRR_2(f_1)$ のみを表している。図において、破線は $NRR_1(f_1) \cdot NRR_2(f_1)$ の理論値、実線は測定値を表している。図より、これらは理論結果と良く一致しており、測定信号の帯域制限による雑音低減効果の理論式の有効性を示している。

なお、 NRR_0 の不一致の原因は、環境雑音の超低周波成分のスペクトルの時間変動が大きく、理論値を求めた時の雑音スペクトルと実測中のスペクトルの相違が原因と考えられるが、今後の検討課題である。

6. まとめ

本報告では各種掃引正弦波によるインパルス応答測定の際に帯域制限をすることで得られる雑音低減効

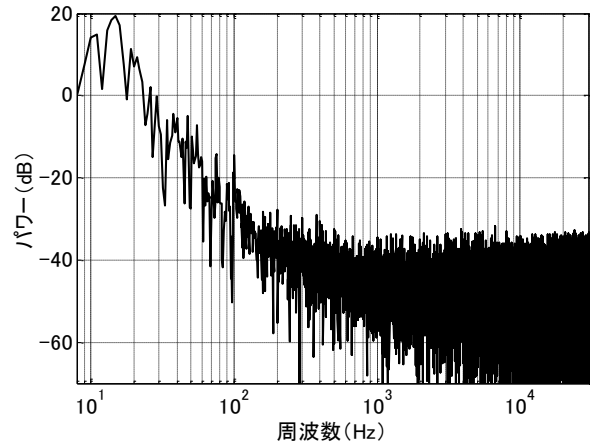


Fig. 10 部屋 A の環境雑音パワースペクトル

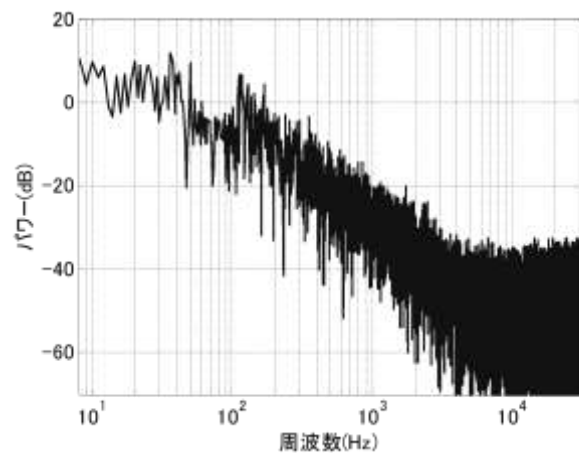


Fig. 11 部屋 B の環境雑音パワースペクトル

果を、測定信号と環境雑音のパワースペクトルで表す理論式を示した。そして、帯域制限をすることで得られる雑音低減効果の理論値との検証をシミュレーションと実環境実験で行った。その結果、実測において一部の不一致があったが、帯域制限の効果を表す理論式の有効性は確認できた。

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] 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.
- [2] A. Farina, "Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique," in 108th AES Convention, 5093, (D-4) (2000 Feb.).
- [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] 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.

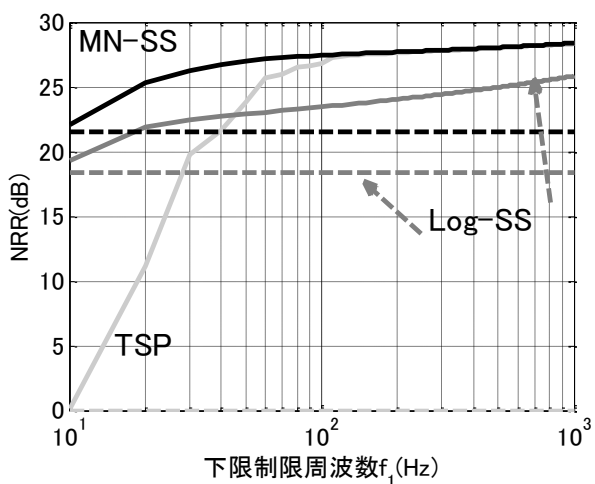


Fig. 12 部屋 A の $NRR(f_1)$ 理論値

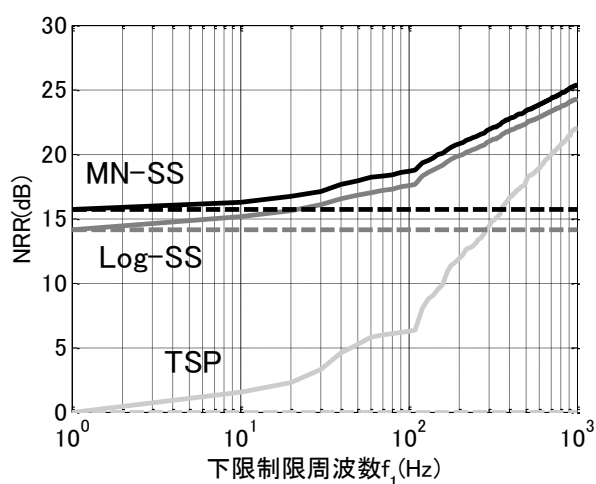


Fig. 13 部屋 B の $NRR(f_1)$ 理論値

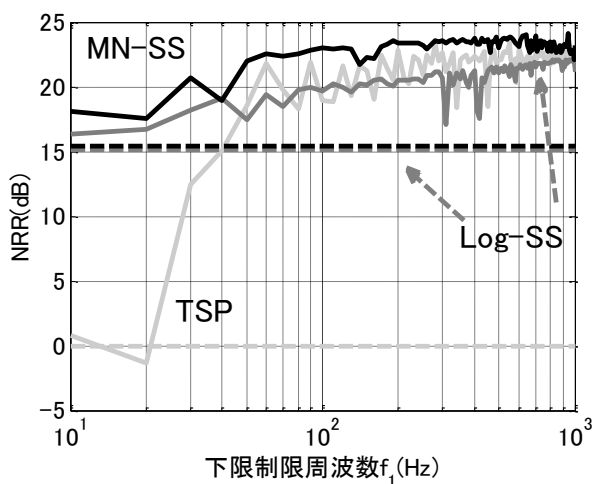


Fig. 14 部屋 A の $NRR(f_1)$ 測定値

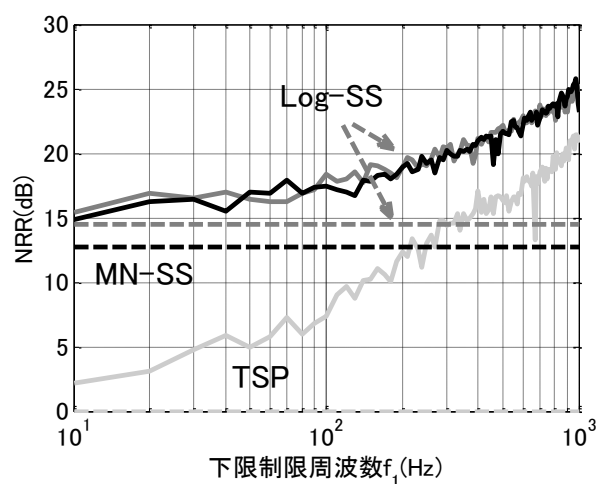


Fig. 15 部屋 B の $NRR(f_1)$ 測定値

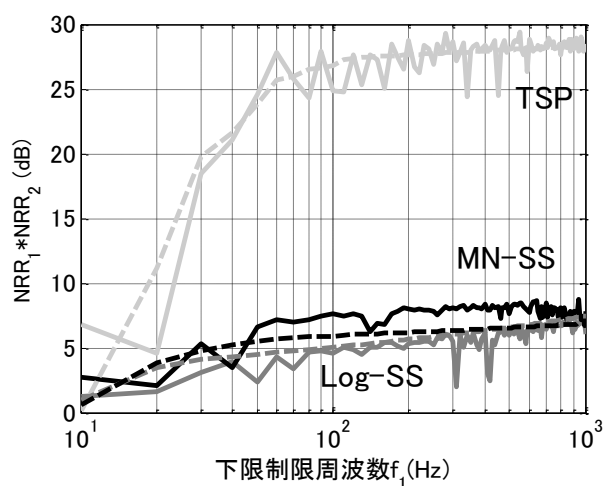


Fig. 16 部屋 A の $NRR_1(f_1) * NRR_2(f_1)$

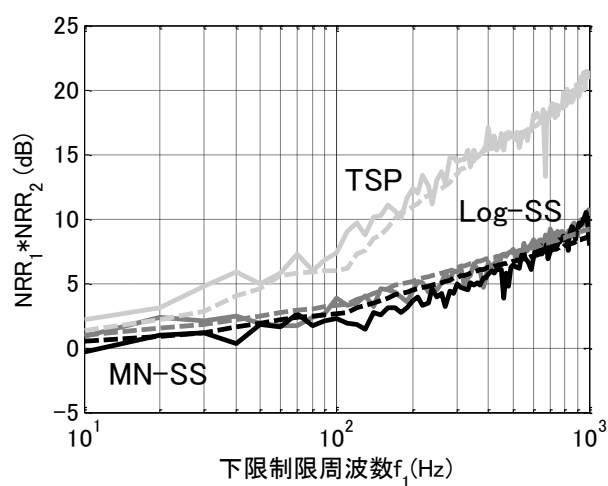


Fig. 17 部屋 B の $NRR_1(f_1) * NRR_2(f_1)$