

BMN-SS インパルス応答測定法による残響時間測定の有効性検討*

☆飯山陽平, 金田豊 (東京電機大学)

1 はじめに

残響時間とは系の響きの大小を示す指標であり, 室内音響の代表的な評価量である. 残響時間は通常, 測定対象系のインパルス応答から算出されるが, 広い範囲の周波数帯域で高い SN 比が求められるため長時間の測定が必要となる.

この問題に対して, 筆者らは測定結果の帯域ごとの SN 比の制御を行える Band-wise Minimum Noise Swept Sine (BMN-SS) 信号を提案した [1]. 本報告ではこの BMN-SS 信号を用いて求めたインパルス応答による残響時間測定の有効性の確認を行う.

2 インパルス応答測定原理

図 1 は周波数表現によるインパルス応答の測定原理のブロック図である. ただし, k は離散周波数番号を表す. 掃引正弦波などの測定信号 $S(k)$ を被測定系に入力し, 出力に逆フィルタ $1/S(k)$ をかけることで, インパルス応答の等価量である, 系の周波数特性 $H(k)$ が得られる. このとき, 定常な環境雑音 $N(k)$ が加わると測定結果には $N(k)/S(k)$ で表される雑音成分が含まれる.

各帯域 p における SN 比は, 帯域 p に含まれる応答成分 $H(k)$ のパワーの総和 (エネルギー) と雑音成分 $N(k)/S(k)$ のパワーの総和の比として次式で表される.

$$SN(p) = \frac{\sum_{k \in p} |H(k)|^2}{\sum_{k \in p} \left\{ |N(k)|^2 / |S(k)|^2 \right\}} \quad (1)$$

3 残響時間測定に要求される SN 比

残響時間測定の要求条件は各 1/3 オクターブ (またはオクターブ) バンドの雑音レベルが各帯域のインパルス応答の瞬時パワーの最大値と比べて -45 dB 以下というものである [2]. 図 2 にこの条件を満たす場合のモデル図を示す. 図において赤く示した部分は第 p 番目の帯域のインパルス応答の瞬時パワーを, その最大値を 0 dB として表示したもので, 面積 $E_H(p)$ は応答エネルギーとなっている. また, 青く示した部分は -45 dB の雑音成分を表している. 測定信号の長さを L としたとき, 雑音成分のエネルギー (面積) は $10^{-4.5} \cdot L$ である. よって, -45 dB の雑音レベルを実現するために必要な帯域 p の SN 比 $D_{SN}(p)$ は次のように表せる.

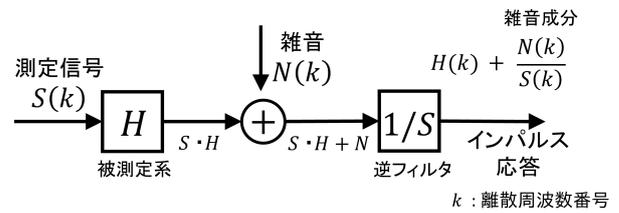
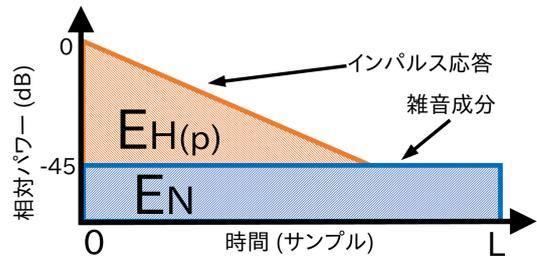


図 1 インパルス応答測定原理 (周波数表現)

図 2 残響時間測定の要求条件を満たす帯域 p のインパルス応答瞬時パワーモデル

$$D_{SN}(p) = \frac{E_H(p)}{E_N} = \frac{E_H(p)}{10^{-4.5} \cdot L} \quad (2)$$

4 BMN-SS 信号の測定原理

さて, 第 p 番目の帯域の雑音成分のエネルギーを最小にする測定信号のパワー $|S(k)|^2$ は

$$|S(k)|^2 = C_p \cdot |N(k)| \quad (3)$$

と表される [3]. ただし C_p は定数である. この雑音成分を最小化する信号は, 要求された SN 比を実現するための最短時間の測定信号となっている.

式 (1) の左辺を要求される SN 比 $D_{SN}(p)$ とおいて, 右辺に式 (3) を代入し, C_p に関して解くと

$$C_p = D_{SN}(p) \cdot \frac{\sum_{k \in p} |N(k)|}{\sum_{k \in p} |H(k)|^2} \quad (4)$$

と求められる.

$C_p \cdot |N(k)|$ をパワーとして持つ測定信号による測定結果は, 各オクターブバンドにおいて, 式 (2) で表された要求 SN 比 $D_{SN}(p)$ を実現する. そのため, 全対象の周波数帯域で -45 dB 一定の雑音レベルを実現する最短時間のインパルス応答測定信号となる. この信号を BMN-SS 信号と呼ぶ.

* Effectiveness of reverberation time measurement using BMN-SS impulse response measurement method, by IYAMA, Yohei and KANEDA, Yutaka (Tokyo Denki University).

5 BMN-SS 信号の合成・測定手順

図3に提案する残響時間測定法の流れを示す。式(2), (3), (4)から分かるように, BMN-SS 信号の合成には環境雑音 $N(k)$ と系の応答 $H(k)$ の特性が必要となる。このとき, $H(k)$ は未知であるため, 事前に雑音レベルが -25 dB 程度の測定 (測定時間は本測定の $1/100$) を行って得られる推定値 $\hat{H}(k)$ を利用する。

6 有効性の確認実験

提案法の有効性確認のために室内の残響時間の測定を行った。対象室は寸法 $6.3 \times 9.1 \times 2.8$ m の会議室である。測定用スピーカにはフルレンジスピーカ (BOSE MM-101) を利用した。

図4に提案法の BMN-SS 信号, および従来法である Log-SS 信号, TSP 信号による測定結果の帯域別雑音レベルを示す。図は, 指定帯域である 100 Hz \sim 10 kHz までの全ての $1/3$ オクターブバンドにおいて, 雑音レベルが -45 dB 以下になるようにしたときの測定結果であり, 信号長は各信号によって異なる。Log-SS 信号, TSP 信号では必要以上に雑音レベルの低い帯域が存在し, 測定信号長の増加の要因となっている。一方, BMN-SS 信号では, 雑音レベルがほぼ -45 dB 一定に制御されていることが分かる。

このとき, 指定帯域において所望雑音レベルの実現に必要な信号長の一覧を表1に示す。ただし, CSN-SS 信号は雑音レベルを -45 dB 一定とする従来信号である [1]。表から, BMN-SS 信号が所望雑音レベルの実現に必要な信号長は CSN-SS 信号の約 $1/4$, Log-SS 信号の約 $1/20$, TSP 信号の約 $1/140$ であることが分かる。

また, 図5に測定結果から算出された, 帯域別の残響時間を示す。ここで, 図における真値は, Log-SS 信号による長時間測定 (測定時間 175 秒) により得たものである。図から, BMN-SS 信号による測定で得られた残響時間はこの真値とほぼ同一の結果が得ることが分かる。

以上より, BMN-SS 信号は従来信号よりも短時間で, 長時間での測定と同精度の残響時間測定が可能であることが確認できた。

7 むすび

本報告では BMN-SS インパルス応答測定法を利用した残響時間測定の有効性について検討した。BMN-SS 信号は短時間で従来法と同じ精度の残響時間を算出でき, 今回の実験条件では, 必要な測定時間は従来法である CSN-SS 信号に対し約 $1/4$, Log-SS 信号に対し約 $1/20$, TSP 信号に対し約 $1/140$ であった。

参考文献

- [1] 中原, 金田, 音講論集 (秋), 2-Q-2 (2016).
- [2] ISO3382-1:2009, p.6.
- [3] 守谷, 他, 音学誌, 64(12), 695-701 (2008).
- [4] 中原, 金田, 音講論集 (春), 1-Q-36 (2015).

謝辞 本研究は JSPS 科研費 15H02728 の助成を受けたものです。

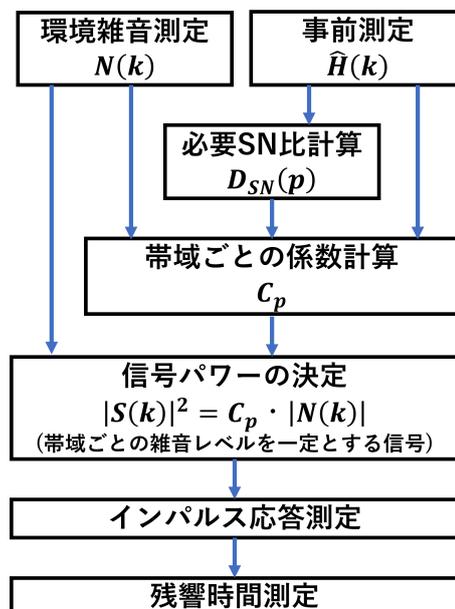


図3 BMN-SS 信号の合成・測定手順

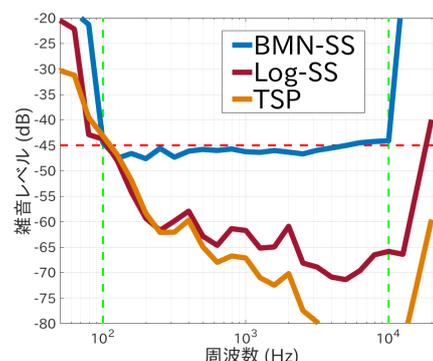


図4 測定結果の帯域別雑音レベル

表1 所望雑音レベルの実現に必要な信号長

測定信号	信号長 (秒)
BMN-SS	1
CSN-SS	4
Log-SS	20
TSP	142

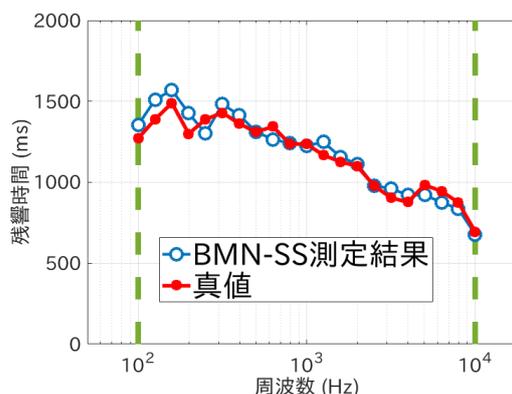


図5 帯域ごと残響時間算出結果