

BMN-SS インパルス応答測定法による 残響時間測定の短時間化

金田 豊 (東京電機大学工学部)

飯山 陽平 (同上)

2019年11月22日

日本音響学会建築音響研究委員会

BMN-SS インパルス応答測定法による残響時間測定の短時間化

Fast measurement of reverberation time by BMN-SS impulse response measurement method

金田 豊 飯山 陽平
Yutaka Kaneda and Yohei Iiyama
東京電機大学工学部
Faculty of Engineering, Tokyo Denki University

内容概要 本報告では、残響時間 T_{30} を測定するための最短の室内インパルス応答測定信号 (BMN 信号) の検討結果を述べる。TSP や ESS (Log-TSP) など、従来の測定信号を用いた場合、周波数帯域ごとに雑音レベルが大きく異なる。その結果、特に雑音レベルが大きい低周波帯域などの雑音レベルを、ISO の推奨値である -45dB 以下とするためには、長時間の測定が必要となる。本報告では、BMN 信号が、全帯域の雑音レベルを -45dB 以下にする最短の測定信号であることを証明し、有効性の評価を行った。今回の実験条件下では、TSP と比べて約 1/100、ESS と比べて、1/4~1/10 の測定時間の短縮効果を確認した。

1. はじめに

残響時間の算出は室内インパルス応答に基づいて算出が行われることが多い[1,2]。しかし、TSP 信号[3]や ESS (Log-TSP) 信号[4,5]、M 系列[6]などの、固定スペクトルを持つ従来信号を用いて測定したインパルス応答は、帯域ごとに雑音レベルが大きく異なるという問題があり、さまざまな不都合を発生させる。例えば、詳細は後述するが、残響時間測定においては、必要な雑音レベルを実現するために、長時間の測定信号が必要となる。

筆者らは近年、この問題を解決するために、CSN 信号[7]を用いて全周波数帯域の雑音レベルを一定とする方法を提案した[8]。しかし CSN 信号はすべての周波数の SN 比を個別に制御するため、制約条件が厳しく、測定信号長が長くなる場合があった。本稿では、CSN 信号の問題点を解決するために、オクターブ帯域ごとに SN 比の制御を行い、全帯域で一定の雑音レベルを実現する、新しい適応形の測定信号、band-wise minimum noise (BMN) 信号[9]について、その最短性を証明し、性能評価結果を報告する。

以下、第 2 節ではインパルス応答測定原理について述べ、第 3 節では残響時間測定における従来の測定信号の問題点を指摘する。第 4 節では全周波数帯域の雑

音レベルを一定とするための方法を説明し、第 5 節では最短信号長で雑音レベルを一定とする BMN 信号を導出する。第 6 節で BMN-SS 信号の具体的な合成手順と測定手順を説明し、第 7 節では BMN 信号の有効性を示す実験結果を報告し、第 8 節でまとめる。

2. インパルス応答測定原理

図 1 (a)(b)に周波数領域で表したインパルス応答の測定原理を示す。 k は離散周波数番号を表す。図 1(a)に示すように、測定信号 $S(k)$ を被測定系に入力して、その出力を逆フィルタ $1/S(k)$ に通すことで被測定系のインパルス応答の等価量である周波数特性 $H(k)$ が求められる。ただし、図 1(b)のように、環境雑音 $N(k)$ (定常雑音と仮定) が加わる場合は、測定結果に $N(k)/S(k)$ の雑音成分が付加される。

$$H(k) + N(k)/S(k) \quad (1)$$

以下では、観測信号に付加される $N(k)$ を「環境雑音」と呼び、一方、測定結果に付加される $N(k)/S(k)$ を「雑音成分」と呼んで区別する。

3. 残響時間測定における従来の測定信号の問題点

残響時間 T_{30} は、周波数帯域分割したインパルス応答 $h_p(n)$ から計算した残響曲線 $r_p(n)$ (ただし、 p

は帯域番号) の-5dB から-35dB の部分の回帰直線より推定される。そして、 T_{30} が精度良く求められるためには、各帯域のインパルス応答の雑音レベルが、インパルス応答波形の瞬時パワーの最大値より-45dB 以下であることが要求されている[2]。以下、全対象帯域において雑音レベルが-45dB 以下である条件を「-45dB 条件」と呼ぶ。

さて、固定スペクトルを有した従来の測定信号で測定した場合には、環境雑音のスペクトル $N(k)$ に依存して、周波数帯域によって雑音レベルが異なるという問題点が発生する。図2に、TSP 信号を用いて測定した、帯域別室内インパルス応答の瞬時パワーの例を、最大値で正規化して示す。

図2(b)より、1000Hz 帯域では雑音レベル（雑音成分(図では、おおよそ1秒以降)の瞬時パワーの平均値)は、ほぼ -45dB となっている。しかし、図2(a)に示す125Hz 帯域では、雑音レベルは-45dB より大きな値となっている。従って、-45dB 条件を満たすためには、測定信号長を長くして雑音レベルを低下させる必要がある。

一方、図2(c)に示す8000Hz 帯域では、雑音レベルは-45dB を大きく下回っている。このことは、一見、高性能であるように見えるが、これらの帯域の雑音レベルを低減するために必要以上の信号エネルギー、すなわち、必要以上の長さの測定信号が使われている。

このように、従来の信号で測定した場合には、帯域によって雑音レベルが高すぎたり、また、過度に低すぎたりし、その結果、長時間の測定信号が必要となるという問題点があった。この問題に対して筆者らは、先に、全ての帯域で過剰な品質を持たず、-45dB の雑音レベルを実現することで、測定時間を短縮する測定方法を提案した[8]。

4. 全帯域の雑音レベルを一定とする測定方法 [8]

図3に雑音レベルが-45dB であるときの帯域 p のインパルス応答測定結果の瞬時パワーのモデル図を示す。この時のインパルス応答のエネルギー(瞬時パワーの総和)を $E_H(p)$ と表すと、その値はインパルス応答瞬時パワーの傾き(減衰率)によって異なるため、各帯域 p によって異なる。そして、この帯域の SN 比、

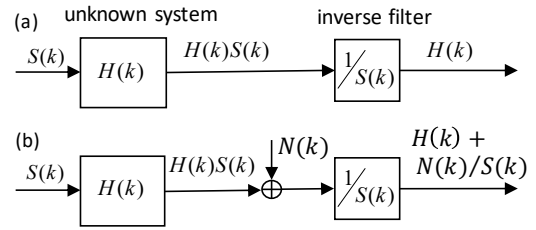


図1 インパルス応答測定原理

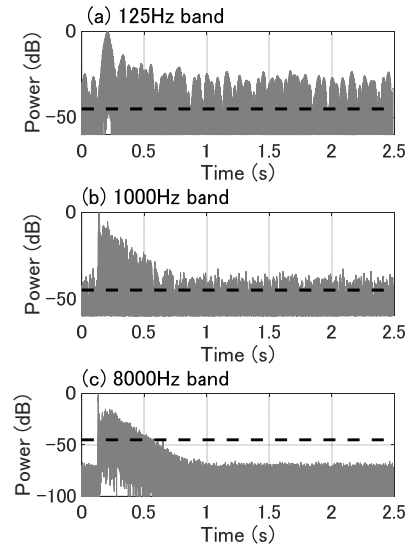


図2 従来信号で測定した帯域別インパルス応答の瞬時パワーと雑音レベル。黒破線は-45dB

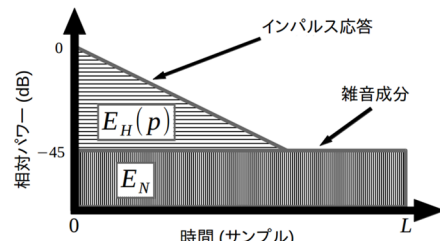


図3 雑音レベルが-45dB である時の帯域 p のインパルス応答瞬時パワーのモデル図

$SNR_D(p)$ は次式のように表される。

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

このことを逆に言えば、第 p 番目の帯域において、式(2)で表される SN 比 $SNR_D(p)$ を実現すれば、雑音レベルは-45dB となる。以下、この $SNR_D(p)$ を「所望 SN 比」と呼ぶ。

さて、式(1)で表される雑音成分 $N(k)/S(k)$ のパワースペクトルは、

$$E[|N(k)/S(k)|^2] = P_N(k)/P_S(k) \quad (3)$$

と表される。ただし、

$$P_N(k) = E[|N(k)|^2] \quad E[\cdot]: \text{期待値} \quad (4)$$

$$P_S(k) = |S(k)|^2 \quad (5)$$

である。従って、周波数 k における測定結果の SN 比 $SNR(k)$ は、系の応答 $H(k)$ と雑音成分のパワー比として、

$$SNR(k) = \frac{|H(k)|^2}{P_N(k)/P_S(k)} \quad (6)$$

と表される。よって、所望 SN 比を実現する CSN 信号のスペクトルは、式(6)を $P_S(k)$ について解き、 $SNR(k)$ を $SNR_D(p)$ とした次式で与えられる。

$$P_{CSN}(k) = \frac{P_N(k)}{|H(k)|^2} SNR_D(p) \quad k \in K_p \quad (7)$$

ただし、 K_p は第 p 番目の帯域の離散周波数範囲を表す。

なお、式中における $|H(k)|^2$ と $E_H(p)$ と $P_N(k)$ は、短時間の事前測定を行うことで、その大まかな推定値を求めて使用する。

5. 雑音レベルを一定とする最短の測定信号： BMN 信号

CSN 信号を用いて所望 SN 比を実現すれば、全帯域の雑音レベルを -45dB 一定とすることができる。しかし、CSN 信号は、オクターブ帯域での所望 SN 比を実現するために、すべての離散周波数 k において所望 SN 比を実現する。このことは、要求が強すぎて、測定信号の短縮という観点からは最適ではない。

5.1. 所望 SN 比を実現するための測定信号の条件

第 p 番目の帯域成分の SN 比、 $SNR(p)$ は、 $|H(k)|^2$ と雑音成分のパワースペクトル $P_N(k)/P_S(k)$ を、それぞれ第 p 番目の帯域の周波数範囲で総和を取ったものの比として

$$SNR(p) = \frac{\sum_{k \in K_p} |H(k)|^2}{\sum_{k \in K_p} \{P_N(k)/P_S(k)\}} \quad (8)$$

と表される。

ここで、SN 比が所望 SN 比であるとすると、次式を

得る。

$$SNR_D(p) = \frac{\sum_{k \in K_p} |H(k)|^2}{\sum_{k \in K_p} \{P_N(k)/P_S(k)\}} \quad (9)$$

この式は第 p 番目の帯域の SN 比を $SNR_D(p)$ とするために必要な測定信号のパワースペクトル $P_S(k)$ の条件式を表している。すなわち、この式を満たすパワースペクトル $P_S(k)$ を持つ測定信号を用いれば、各帯域において所望 SN 比 $SNR_D(p)$ が実現される。

ただし、式(9)を満たす $P_S(k)$ は一意ではない。言い換えれば、式(9)を満たす測定信号は無数に存在する。前節で述べた CSN 信号もその一つである。そこで、次項では式(9)を満たす信号の中で最短時間となる測定信号を導出する。

5.2. 所望 SN 比を実現する最短の測定信号

MN 信号（雑音成分を最小化する測定信号）の原理 [10,11]に基づけば、 $\sqrt{P_N(k)}$ に比例したパワースペクトルを持つ測定信号は、同一のエネルギー $\sum_k P_S(k)$ を持つ測定信号の中で、雑音成分エネルギー $\sum_k \{P_N(k)/P_S(k)\}$ を最小にする。一方、この測定信号は、所望の雑音成分エネルギーを実現する最短時間の測定信号でもある（証明は付録1）。よって、第 p 番目の帯域において式(9)を満たす（言い換えれば、式(11)の分母の雑音成分エネルギーを実現する）最短時間の測定信号のパワースペクトルは、 $\sqrt{P_N(k)}$ に比例した信号として、

$$P_S(k) = C(p) \cdot \sqrt{P_N(k)} \quad (10)$$

$C(p) : k \in K_p$ の範囲で定数、

と表すことができる。

式(10)を式(9)に代入すると、

$$SNR_D(p) = C(p) \frac{\sum_{k \in K_p} |H(k)|^2}{\sum_{k \in K_p} \sqrt{P_N(k)}} \quad (11)$$

となる。これを $C(p)$ に関して解けば、

$$C(p) = SNR_D(p) \frac{\sum_{k \in K_p} \sqrt{P_N(k)}}{\sum_{k \in K_p} |H(k)|^2} \quad (12)$$

となる。

よって、各帯域 p で SN 比 $SNR_D(p)$ を実現し、雑

音レベルを-45dB とする最短時間の測定信号のパワースペクトルを $P_{BMN}(k)$ と表すと、式(10)(12)より、

$$\begin{aligned} P_{BMN}(k) &= C(p) \cdot \sqrt{P_N(k)} \\ &= SNR_D(p) \frac{\sum_{k \in K_p} \sqrt{P_N(k)}}{\sum_{k \in K_p} |H(k)|^2} \sqrt{P_N(k)} \end{aligned} \quad (13)$$

と表される。この、各帯域ごとに雑音最小化信号に比例するスペクトルを持つ信号を band-wise minimum noise (BMN) 信号と呼ぶ。

BMN 信号は雑音レベルを-45dB 一定値とするだけでなく式(2)の分母の雑音レベルを所望の値にすることで、各帯域における雑音レベルを任意の値に制御可能であることを付記しておく。

6. BMN-SS 信号の合成手順と測定手順

式(13)からわかるように、BMN 信号のパワースペクトル $P_{BMN}(k)$ を得るためには、雑音のパワースペクトル $P_N(k)$ および系の周波数特性 $H(k)$ が必要である。そこで最初に短時間での事前測定を行い、これらの推定値を求める。

① 環境雑音を 1-2 秒程度録音して、そのパワースペクトルの推定値 $\hat{P}_N(k)$ を求める。

② 系の事前測定を行い、室内インパルス応答の推定値 $\hat{h}(n)$ 、およびそれを DFT した系の周波数特性の大きな推定値 $\hat{H}(k)$ を求める。

この事前測定では、あまり高い SN 比は要求されない。例えば、 $\hat{H}(k)$ に雑音成分が-10dB 含まれており、式(13)の分母項が 1.1 倍になったとしても、その誤差は 0.5dB ($\cong 10 \cdot \log_{10}(1.1)$) 程度である。従って、-45dB の雑音レベルを実現する本測定と比べて、信号長は、十分に短いもので良い。

③ インパルス応答の推定値 $\hat{h}(n)$ を帯域分割し、図 3 に示したエネルギー $E_H(p)$ を得る。そして、式(2)より、所望 SN 比 $SNR_D(p)$ を得る。

④ 式(13)の $P_N(k)$ 、 $H(k)$ の代わりに、 $\hat{P}_N(k)$ 、 $\hat{H}(k)$ を用いて計算し、BMN 信号のパワースペクトル $P_{BMN}(k)$ を得る。

⑤ パーセバルの関係に基づいて、次式により測定信号の実効長 J を計算する。

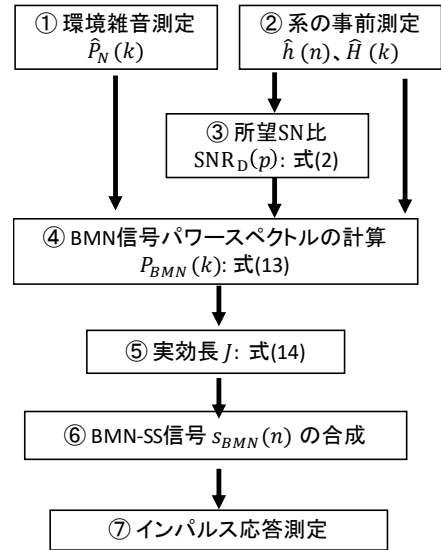


図 4 BMN-SS 信号の合成と測定の手順

表 1 実験条件

部屋容積	460m ³ (講義室)
スピーカ	BOSE MM-101
サブウーファ	YAMAHA NS-SW300
測定信号	BMN-SS, TSP, ESS, CSN-SS
測定信号音圧レベル	5m の距離で 約80dB
環境雑音レベル	約60dB
サンプリング周波数	48kHz
帯域分割	1/3 オクターブバンド
対象の周波数範囲	63Hz ~ 8000Hz

$$J = \frac{1}{A_{eff}^2} \cdot \frac{1}{L} \cdot \sum_{k=0}^{L-1} P_{BMN}(k) \quad (14)$$

ただし、 A_{eff} は測定信号の実効値を表す。

⑥ パワースペクトル $P_{BMN}(k)$ を持つ掃引正弦波 BMN-SS を合成する。合成方法の詳細は参考文献 [10,12]を参照されたい。

⑦ インパルス応答を測定する。

7. 音場実験

BMN-SS 信号の有効性を検証するために、実音場におけるインパルス応答測定実験を行った。

7.1. 実験条件

実験条件を表 1、図 5 に示す。BMN-SS 信号と比較を行うために、従来の代表的測定信号である TSP、ESS、

および CSN 信号を用いた測定も行った。このとき、TSP、ESS 信号の振幅と実効長は、BMN-SS 信号と同一の値とし、各測定信号のエネルギーを等しくした。また、CSN 信号に関しては、雑音レベルを-45dB 一定とするために必要な信号長を評価した。

7.2. 実験結果

図 4 に示した手順に従って室内音響系のインパルス応答測定を行った。事前測定(手順①②)した $\hat{P}_N(k)$ 、 $|H(k)|^2$ を図 6(a)(b) に示す。次に、 $\hat{h}(n)$ から所望 SN 比 $SNR_D(p)$ を計算し(手順③)、その結果を図 6(c) に示す。一般的に低周波数帯域ではインパルス応答長が長く、そのエネルギー(図 3 の $E_H(p)$) が大きいため、低域での所望 SN 比が大きくなっている。

次に、 $\hat{P}_N(k)$ 、 $|\hat{H}(k)|^2$ 、 $SNR_D(p)$ を用いて、BMN 信号のスペクトル $P_{BMN}(k)$ を計算した(手順④)。その結果を、図 6(d) に示す。 $\hat{P}_N(k)$ および $SNR_D(p)$ の低周波成分が大きいため、 $P_{BMN}(k)$ は低周波数帯域に大きなエネルギーを持っている。

次に、測定信号の実効長 J を計算し(手順⑤)た結果、 $J=261690$ サンプル(≈ 5.5 秒)であった。そして、測定信号長 L は J の 2 倍、523380 サンプル(≈ 11 秒)として、BMN-SS の時間信号 $s_{BMN}(n)$ を合成した(手順⑥)。

図 7(a) に合成した BMN-SS 信号 $s_{BMN}(n)$ の波形を示し、図 7(b) にスペクトログラムを示す。また、図 7(c) には比較のために ESS 信号のスペクトログラムを示した。BMN-SS 信号は ESS 信号と比べて低域の掃引時間が長く、低域により大きなエネルギーを持っていることがわかる。

図 7(d) に BMN-SS 信号を用いて測定(手順⑦)したインパルス応答時間波形を示す。図 8 に BMN-SS 信号を用いて測定したときの 125 Hz 帯域、1000 Hz 帯域、8000 Hz 帯域の帯域別インパルス応答瞬時パワーを示す。図より、いずれの帯域においても雑音レベルはほぼ-45dB(破線)となっている。

7.3. 従来法との比較評価

図 9 に BMN-SS、および、従来信号である TSP、ESS

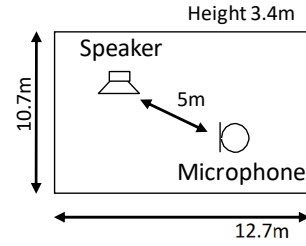


図 5 配置図

を用いて測定したインパルス応答の、1/3 オクターブ

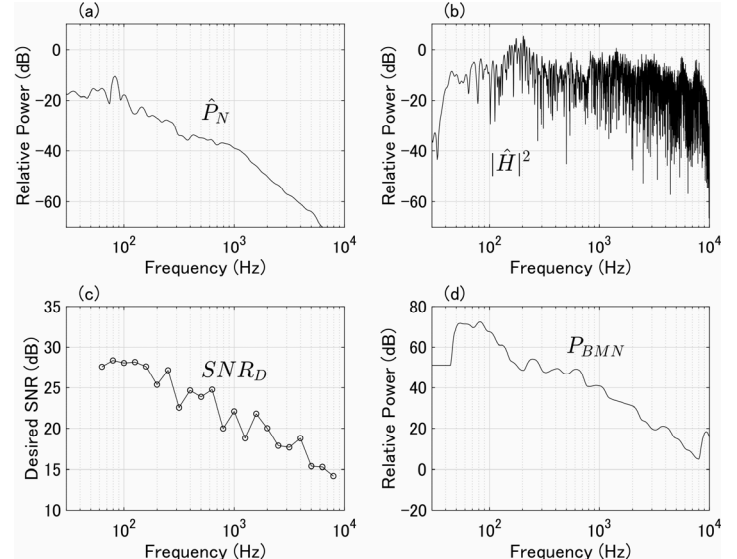


図 6 事前測定結果と BMN 信号のスペクトル $P_{BMN}(k)$

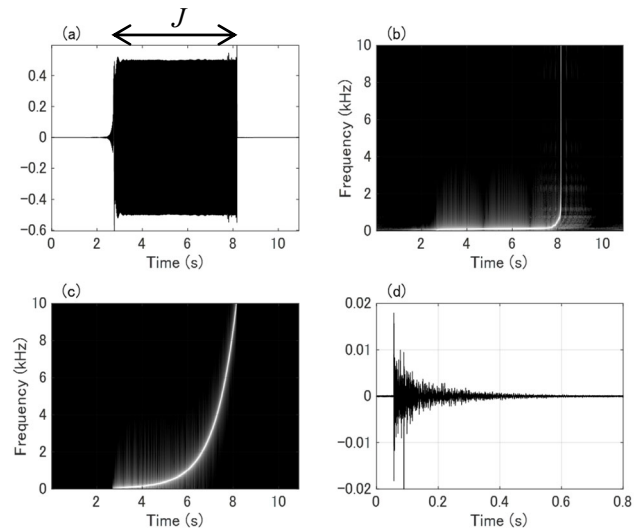


図 7 (a) BMN-SS 波形、(b) そのスペクトログラム、(c) ESS 信号のスペクトログラム、(d) 測定したインパルス応答波形

バンドごとの雑音レベルを示す。図より、BMN-SS で測定した結果は、対象とする周波数帯域である 63 Hz ~ 8000 Hz 帯域において、雑音レベルがほぼ-45 dB に制御されている。これに対して、同じエネルギーで測

定した TSP および ESS の測定結果は、高周波数帯域では雑音レベルが -45dB よりも大きく下回っており、過剰品質な測定結果となっている。その反面、低周波数帯域では雑音レベルが -45dB より大きく、残響時間 T_{30} の測定条件を満たしていない。

図 9 において、ESS 信号による最大雑音レベルは、 80Hz 帯域で約 -35dB である。この雑音レベルを 10dB 低減して -45dB とするためには、信号長を 10 倍にする必要がある。言い換えれば、BMN-SS 信号は、ESS 信号に比べて $1/10$ の信号長で -45dB 条件を満たしている。同様に TSP 信号の最大雑音レベルは、 80Hz で約 -19dB であり、 -45dB 条件を満たすためには、信号長を 400 倍にする必要がある。

また、CSN 信号を用いた結果は、ほぼ -45dB 一定の雑音レベルが得られたので、図 9 へのプロットは省略した。このとき、CSN 信号が必要とした信号長は、BMN 信号に比べて約 4 倍であった。

このように BMN 信号を用いることで -45dB 条件を満たすための信号長を大幅に短縮することができる。ただし、BMN-SS 信号では環境雑音の録音、予備事前測定や信号合成などの事前の準備時間が必要である。今回、この準備時間は約 4.4 秒だった（環境雑音の録音時間が 2 秒、系の応答の事前測定は 1.4 秒、BMN 信号合成のための計算時間は約 1 秒）。一方、 -45dB 条件を満たすための信号長は、BMN 信号長は 22 秒（2 周期）であるので、合計測定時間は、 26.4 秒となる。これに対して、10 倍の信号長を必要とする ESS の測定信号長は約 220 秒となる。このように、BMN 信号は準備時間を含めても大幅な測定時間の短縮となっていることが確認できた。

7.4. 環境条件に対する考察

BMN 信号の有効性は環境条件に依存する。前項での実験条件では、図 6(a)に見られるように環境雑音が 80Hz 付近に大きな成分を持っていた。このことが、固定スペクトルを持った ESS 信号を用いた測定に悪影響を及ぼし、図 9 に示したように 80Hz 付近で雑音レベルが増大した。

一方、図 10(a)(b)は、他の室内での測定結果である。

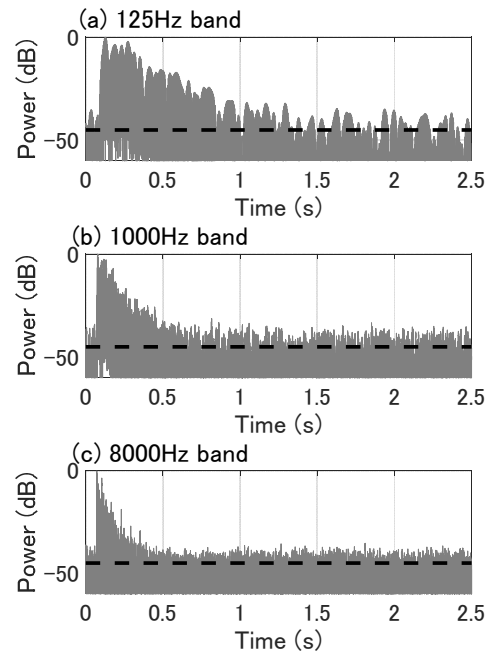


図 8 BMN 信号で測定したインパルス応答の帯域別瞬時パワーと雑音レベル。黒破線は -45dB

この環境では、図 10(a)に示すように、音響系の応答 $|\hat{H}(k)|^2$ が 160Hz 付近で低下している。その結果、該

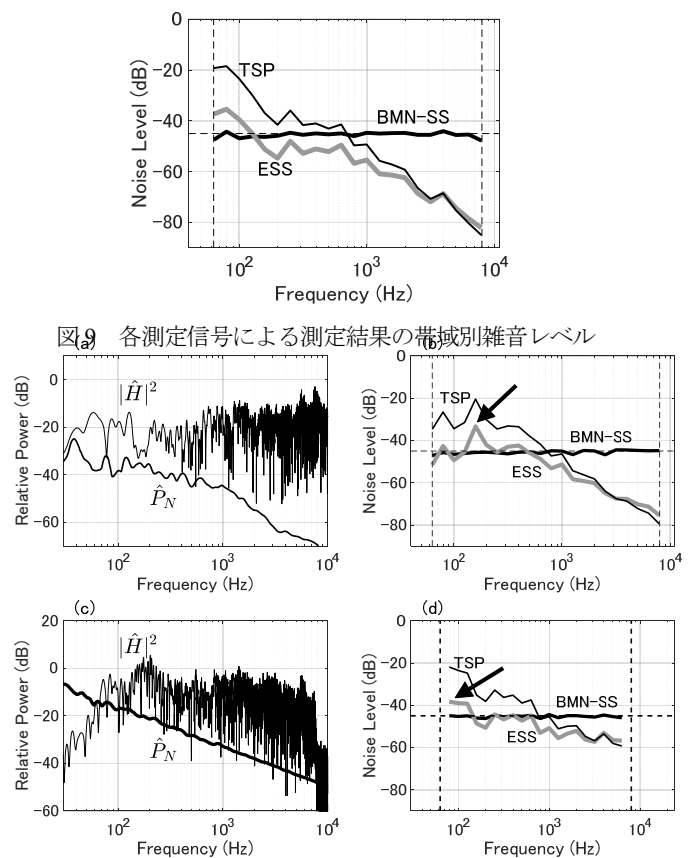


図 9 各測定信号による測定結果の帯域別雑音レベル

図 10 他の環境条件における測定結果

当周波数帯域の SN 比が低下し、固定スペクトルを持った ESS 信号を用いた測定では、図 10(b)に示すように、最大雑音レベルが約-34dB まで上昇している(矢印部)。この場合も、BMN を用いると約 1/10 の信号長の短縮が可能である。また、CSN 信号に対する BMN 信号の信号短縮効果は約 1/2 であった。

図 10(c)(d)は、平均的な室内騒音の一つである Hoth 雑音[13]を環境雑音として用いたシミュレーション結果である。Hoth 雑音は”平均的な”雑音であるので、図 10(c)に示すように、スペクトルに起伏がない。この場合、同様に起伏の無い固定スペクトルを持つ ESS 信号との適合性が良く、最大雑音レベルは、-39dB (矢印部)と、前記の実測結果より小さなものとなっている。しかし、この場合でも、BMN 信号は ESS 信号に比べて、約 1/4 の信号長短縮効果を持つ。また、CSN 信号に対する BMN 信号の信号短縮効果は約 1/6 であった。

以上のように、従来の固定スペクトルを持った測定信号は、環境雑音のスペクトルや音響系の周波数特性の影響を受け、周波数ごとに雑音レベルが上昇大きく変動する。また、適応形信号の一つである CSN 信号は、周波数ごとの SN 比制御という制約が強いため、最短の信号とはなりえない。これに対して、BMN 信号は、周波数帯域単位で SN 比制御を行うもので、環境雑音や系の特性に依存せず、一定の雑音レベルを最短の信号で実現し、その結果、従来信号に比べて大幅な測定時間の短縮を達成する。

8. むすび

本論文では、インパルス応答の帯域ごとの雑音レベルを任意に制御できる最短の測定信号、band-width minimum noise (BMN) 信号を提案した。まず、雑音レベルを制御可能な測定信号が満たすべき条件式を示し、その中で、最短信号長を持つ BMN 信号のスペクトルを導出した。

音響インパルス応答から残響時間 T_{30} を算出するためには、全ての周波数帯域の雑音レベルが-45dB 以下という条件(-45dB 条件)が必要である。従来の測定信号を用いて測定した場合、帯域によって雑音レベルが大きく異なることが多く、そのため、-45dB 条件を満たす

ためには、長時間の測定信号が必要とされた。

この問題に対して、雑音レベルを全帯域で-45dB と制御することの有効性は知られていたが、そのための最適な測定信号は知られていなかった。本論文では、信号最短性が保証された BMN 信号を用いて、全帯域の雑音レベルを-45dB 一定に制御することで、-45dB 条件を満たして T_{30} を測定するための最短の測定信号を実現できることを示した。

BMN 信号は事前に環境雑音と被測定系の大きな周波数特性を測定し、その結果を反映させて合成する適応形測定信号である。そのため、特定の周波数成分が大きい環境雑音下や、特定の周波数帯域の感度が低下した音響系における測定であっても、全帯域一定の雑音レベルを実現することができる。

実際の室内環境でインパルス応答測定を行った。その結果、-45dB 条件を満たすために必要な信号長は、従来の固定スペクトルの測定信号である TSP (線形 SS)と比べて、約 1/200、ESS に比べて、約 1/10 と大幅な測定信号短縮効果を確認した。また、全帯域の雑音レベルを-45dB とする従来信号である CSN と比べても 1/2 ~ 1/4 となり、BMN 信号の最短性が確認できた。

参考文献

- [1] M. R. Schroeder, "New method of measuring reverberation time," J. Acoust. Soc. Am., **37**, 409-412 (1965).
- [2] ISO 3382-1:2009(E), Acoustics - Measurement of room acoustics parameters - Part 1: Performance spaces.
- [3] Y. Suzuki, F. Asano, H. Kim and T. Sone, "An optimum computer-generated pulse signal suitable for the measurement of very long impulse responses," J. Acoust. Soc. Am., **97**, 1119-1123 (1995).
- [4] Griesinger, D; "Beyond MLS-Occupied Hall Measurement with FFT Techniques," in 101th AES Convention, 4403, (M-3) (Nov. 1996).
- [5] A. Farina, "Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique," 108th AES Convention, 5093, (D-4), Feb. 2000.
- [6] J. Borish, "An efficient algorithm for measuring the impulse response using pseudorandom noise," J. Audio Eng. Soc., **31**, 478-488 (1983).
- [7] H. Ochiai and Y. Kaneda, "A recursive adaptive method of impulse response measurement with constant SNR over target frequency band," J. Audio Eng. Soc., **61**, 647-655 (2013).
- [8] 中原, 金田, "インパルス応答測定結果の帯域別雑音レベルを一定とする効率的な残響時間測定法," 音学誌, **72**, 7, 358-366 (2016).

- [9] 中原, 金田, "帯域別雑音レベルを一定とする残響時間測定用信号の改良," 音講論春, 2-Q-2 (2016).
- [10] 守谷, 金田, "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," 音学誌, **64**, **12**, 695-701 (2008).
- [11] Y. Kaneda, "Noise reduction performance of various signals for impulse response measurement," J. Audio Eng. Soc., **63**, 348-357 (2015).
- [12] S. Müller and P. Massarani, "Transfer-function measurement with sweeps," J. Audio Eng. Soc., **49**, 443-471 (2001).
- [13] IEEE 269-2010 - IEEE Standard Methods for Measuring Transmission Performance of Analog and Digital Telephone Sets, Handsets, and Headsets, p. 85, (2010).

※ BMN 信号を用いた測定ソフトウェアを下記で公開しています。

<http://www.asp.c.dendai.ac.jp>

付録: 最小の雑音成分エネルギーを与える測定信号と最短の測定信号の等価性

ある周波数範囲 K で定められたエネルギー E_1 を持つ測定信号を $S_1(k)$ と表す。すなわち、

$$\sum_{k \in K} |S_1(k)|^2 = E_1 \quad (\text{A1})$$

また、信号 $S_1(k)$ を用いて測定した場合の周波数範囲 K の雑音成分のエネルギー E_N は、

$$E_N = \sum_{k \in K} \{P_N(k)/|S_1(k)|^2\} \quad (\text{A2})$$

と表される。

さて、エネルギーが E_1 である測定信号 $S_1(k)$ (式 (A1) の関係を満たす $S_1(k)$) の中で、最小の雑音成分エネルギー E_{Nmin} を与える測定信号を $S_{min}(k)$ と表す。すなわち、 $S_{min}(k)$ に関して、以下の関係が成立する。

$$\sum_{k \in K} |S_{min}(k)|^2 = E_1 \quad (\text{A3})$$

$$\begin{aligned} E_{Nmin} &= \sum_{k \in K} \{P_N(k)/|S_{min}(k)|^2\} \\ &\leq \sum_{k \in K} \{P_N(k)/|S_1(k)|^2\} \end{aligned} \quad (\text{A4})$$

ここで、 $S_{min}(k)$ と同じ雑音成分のエネルギー E_{Nmin} を与える任意の信号を $S_2(k)$ と表す。すなわち、

$$\sum_{k \in K} \{P_N(k)/|S_2(k)|^2\} = E_{Nmin} \quad (\text{A5})$$

また、 $S_2(k)$ のエネルギーを E_2 と表す。

$$\sum_{k \in K} |S_2(k)|^2 = E_2 \quad (\text{A6})$$

この時、次式で定義される測定信号 $S'_2(k)$

$$S'_2(k) = \sqrt{\frac{E_1}{E_2}} S_2(k) \quad (\text{A7})$$

を考えると、そのエネルギーは、

$$\sum_{k \in K} |S'_2(k)|^2 = E_1 \quad (\text{A8})$$

となる。

$S'_2(k)$ のエネルギーは E_1 であるので、その雑音成分エネルギーは E_{Nmin} より大きい。すなわち、式 (A4) の関係が成立する。

$$E_{Nmin} \leq \sum_{k \in K} \{P_N(k)/|S'_2(k)|^2\} \quad (\text{A9})$$

そして、式 (A7)、式 (A5) の関係を用いれば、

$$\begin{aligned} E_{Nmin} &\leq \sum_{k \in K} \left\{ P_N(k) / \left| \sqrt{\frac{E_1}{E_2}} S_2(k) \right|^2 \right\} \\ &= \frac{E_2}{E_1} \sum_{k \in K} \{P_N(k)/|S_2(k)|^2\} \\ &= \frac{E_2}{E_1} E_{Nmin} \end{aligned} \quad (\text{A10})$$

となる。両辺を E_{Nmin} で除すと、

$$1 \leq E_2/E_1 \quad (\text{A11})$$

となり、

$$E_1 \leq E_2 \quad (\text{A12})$$

が成立する。

このことより、測定信号 $S_{min}(k)$ のエネルギー E_1 は同じ雑音成分エネルギー E_{Nmin} を与えるどのような信号 $S_2(k)$ のエネルギー E_2 よりも小さいこと、すなわち、 $S_{min}(k)$ は E_{Nmin} を与える信号の中で最小エネルギーの信号であることがわかる。そして、同一実効値の測定信号を考えた場合には、最小エネルギーの信号 $S_{min}(k)$ は最短の測定信号となる。