

相反法による頭部インパルス応答の高速計測システム

☆寺島眞生, 森川大輔, モクタリ パーハム, 平原達也 (富山県立大)

1 はじめに

直接法を用いて多点の頭部インパルス応答 (hrir: head-related transfer function) を測ると, 計測時間が長くなるために, 計測した hrir は計測中の頭部位置変動の影響を受ける[1]. この問題は相反法を用いることで解消されるが, 耳栓スピーカは低域ほど出力音圧レベルが低いために, 約 500 Hz 以上の hrir しか計測できない[2]. 本稿では, 使用する耳栓スピーカの諸特性と, 計測室の背景雑音レベルを勘案した TSP (Time Stretched Pulse) 信号を用いて, 相反法の問題を解決した結果について述べる.

2 相反法による hrir の計測システム

相反法による hrir の高速計測システムには Linux PC で制御する 48 ch の AD/DA 変換器 (DASmini-E2000, COMEX) を用いた[2]. サンプリング周波数 F_s は 48 kHz とした. DA 変換器の出力電圧信号をヘッドホンアンプ (ATHA21, audio-technica) を介して電力増幅し, 耳栓スピーカを駆動した. 耳栓スピーカから放射した TSP 信号音は小型 ECM (Electret Condenser Microphone) で受信し, プリアンプ (MA-BOX, COMEX) で 38 dB 電圧増幅して AD 変換した.

2.1 耳栓スピーカ

耳栓スピーカは, 閉空間に音圧を発生するよう設計されたイヤホン用のドライバー・ユニットをシリコン印象材に埋めこんで外耳道入口に装着し, 開放空間に音波を放射する. 今回用いたドライバー・ユニットは動電型の MT006B (Foster Electric) で, その共振周波数

f_0 は約 2.7 kHz, f_0 以下の放射音圧レベルは約 -15 dB/oct で下がる (Fig.1).

MT006B の入力電圧レベル V_{in} と音源距離 0.13 m での出力音圧レベル SPL_{out} の関係 $|H_{MT}(f)|$ を Fig.2 に示す. 入力信号の周波数が 300 Hz では, V_{in} が 10 dBV まで SPL_{out} は線形に増加するが, V_{in} が 10 dBV 以上では高調波歪のレベルが急増する. 一方, 入力信号の周波数が f_0 (2.7 kHz) では, SPL_{out} が線形に増加するのは V_{in} が -10 dBV 以下である. V_{in} が -10 dBV 以上では SPL_{out} が飽和するとともに異音が発生し, 高調波歪のレベル変化もおおきな挙動を示す. したがって, MT006B の最大許容入力電圧レベルは -12 dBV といえる.

2.2 計測信号

波形包絡の振幅値が一定である TSP 信号を用いる場合も $V_{in} \leq -12$ dBV にする必要がある. しかし, この制約は f_0 における制約であり, f_0 より低い周波数ではより高い V_{in} を MT006B に印加できる.

デジタル信号処理では, Fig.1 に示す MT006B の周波数特性の逆特性 $1/|H_{MT}(f)|$ を用いて, TSP 信号の振幅を周波数ごとに調整することで問題は解決するよう見える. しかし, アナログ信号では, DA 変換器には最大出力電圧の壁があるし, 計測室と計測系には暗騒音レベルの壁がある. そこで, f_0 以下の周波数帯域の S/N を確保するよう周波数ごとの振幅値を最適化した, 最大振幅最適化 TSP (MAO-TSP: Maximum Amplitude Optimized-TSP) 信号を考案した.

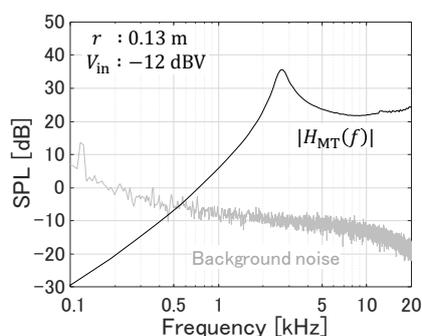


Fig.1 MT006B の周波数特性

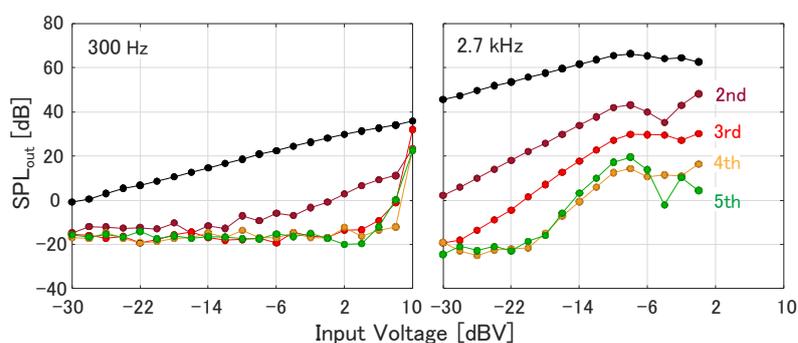


Fig.2 MT006B の入出力特性および高調波歪特性

* Fast hrir measurement system with reciprocal method, by TERASHIMA Mao, MORIKAWA Daisuke, MOKHTARI Parham and HIRAHARA Tatsuya (Toyama Prefectural Univ).

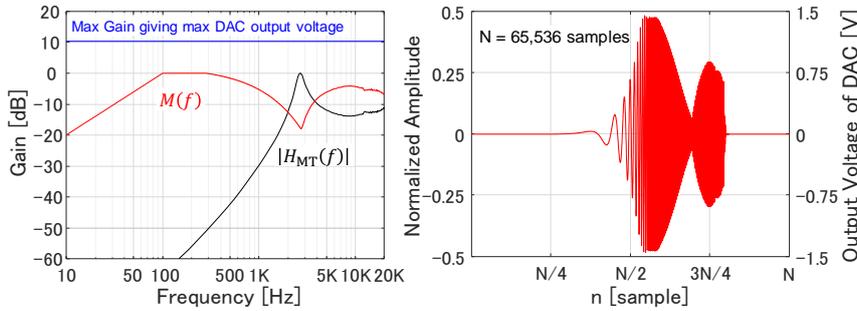


Fig.3 MT006B 用 MAO-filter の振幅特性と MAO-TSP 信号波形



Fig.4 マイクロホンアレイ

MAO-TSP 信号 $H(k)$ は式(1)で定義される.

$$H(k) = \begin{cases} H(1) & (k = 0) \\ \frac{M(k)}{\sqrt{k}} \exp(-jak \log k) & (k = 1, 2, \dots, \frac{N}{2}) \\ H(N-k) & (k = \frac{N}{2} + 1, \dots, N-1) \end{cases} \quad (1)$$

ここで, k は離散周波数番号, N は信号長, a は $\pi/\log(N/2)$, $M(k)$ は MAO-filter の振幅特性である.

$|H_{MT}(f_0)| = 1$, $G(f) = 1/|H_{MT}(f)|$ として, MAO-filter の振幅特性 $M(f)$ は式(2)で与えられる.

$$M(f) = \begin{cases} G(f) \cdot 10^{\frac{G_0}{20}} & (f_0 \leq f) \\ 10^{\frac{f-f_L}{f_0-f_L} \frac{G_0}{20}} & (f_L \leq f < f_0) \\ 1 & (100 \leq f < f_L) \\ \frac{f}{100} & (f \leq 100) \end{cases} \quad (2)$$

ここで, $f = kFs/N$ である. そして, MT006B では $G_0 = -18$ dB, $f_L = 300$ Hz である. このときの $M(f)$ と MAO-TSP 信号波形を Fig.3 に示す.

2.3 マイクロホンアレイ

hrir の高速計測システムでは, 直線マイクロホンアレイ (Fig.4) を 4 本用いた. 1 本のマイクロホンアレイには, 6ϕ の小型 ECM (EM-258, Primo) を 6 個, 0.2 m 間隔で, 長さ 1 m, 6×6 mm のアルミ角棒上に配置した. 各 ECM は 3D プリンタで製作したマイクホルダに装着して角棒に固定した. このマイクロホンアレイでは, その構造物による反射波が 5 kHz 以上の帯域で確認されたが, それらの反射波の有無によるインパルス応答のスペクトルの差は 1 dB 以下であった.

3 インパルス応答の計測

インパルス応答は, N が 65,536 点の TSP 信号を 3 周期放射して 2 周期目の TSP 応答波形から求めた. 観測点は, 音源距離 r を 0.13 ~ 1.13 m の 0.2 m 毎の 6 点, 水平角 θ を 0 ~ 270 ° の 90 ° 毎の 4 方位, 計 24 点とした.

観測点 $(r, \theta) = (0.13 \text{ m}, 0^\circ)$ で受音した TSP

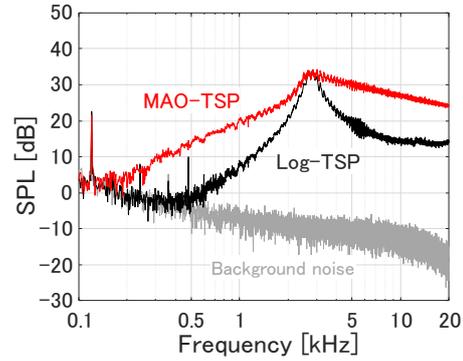


Fig.5 TSP 応答波形のスペクトル

応答波形のスペクトルを Fig. 5 に示す. MAO-TSP 信号を用いると, 従来の Log-TSP 信号[3] を用いた場合より, 低域の S/N は最大 18 dB 改善された. その結果, 計測可能帯域は $r = 0.13$ m で 200 Hz 以上, $r = 1.13$ m では 400 Hz 以上であった. この観測点は誘導ハム雑音成分レベルが最も高いが, その雑音成分は hrir 算出時に相殺される.

4 まとめ

イヤホン用ドライバー・ユニットを耳栓スピーカとして用いるときに f_0 以下の周波数帯域での S/N を確保する MAO-TSP 信号を考案した. これを用いると低域の S/N が改善され, 相反法による hrir の高速計測システムの計測可能帯域を広げることができた.

加算平均法や引き伸ばし時間を長くして低域の S/N を稼ぐ TSP 信号[4]では計測時間が長くなるが, MAO-TSP 信号を用いればワンショットで hrir の高速計測が可能である.

謝辞 MAO-TSP 信号の設計についてご指導頂いた東京電機大学の金田豊教授に感謝する. 本研究の一部は科研費 (17K00244) による.

参考文献

- [1] Hirahara et al., *Acoust. Sci. Tech.* 31 (2), 165-171, 2010.
- [2] 今井ら, 音響誌, 68(10), 513-519, 2012.
- [3] 金田, 音響誌, 69(10), 549-554, 2013.
- [4] 飯山, 金田, 音講論 (秋), 499-500, 2019.