

# マイクロホンの周波数特性の校正が ISSS 法による雑音抑制に及ぼす効果 Effect of Microphone Frequency Response Calibration on Noise Suppression by the ISSS Method

原口 侑梧<sup>†</sup> 鳥谷 輝樹<sup>†</sup> 小澤 賢司<sup>†</sup>  
Yugo Haraguchi Teruki Toya Kenji Ozawa

## 1. はじめに

著者らは、小型マイクロホンアレイを用いて高性能な雑音抑制を実現するために、瞬時スペクトル推定に基づくスペクトル減算 (ISSS: Instantaneous-spectrum-estimation-based spectral subtraction) 法を提案し、計算機上のシミュレーション実験により性能評価を行ってきた [1]。ここでは、実機への実装を目指すための第一歩として、アレイを構成するマイクロホンの周波数特性の個体差の校正が雑音抑制に及ぼす効果を検証することとした。

## 2. ISSS 法の原理と実際

### 2.1 ISSS 法の原理と理想条件での性能

マイクロホンからの出力である瞬時音圧を、輝度に変換して 1 ピクセル幅の白黒画像を得る。直線状アレイを構成する複数マイクロホンについてその画像を並べることで、2 次元画像 (時空間音圧分布画像) を得る。アレイと直交する方向から到来する目的音については、全てのマイクロホンに同時に音が到達するので、時空間音圧分布画像としては縦縞が観測される。その画像に 2 次元離散フーリエ変換を適用して得た時空間スペクトルにおいては、目的音は空間の直流 (S-DC: Spatial direct current) ビンに局在する。

一方、斜め方向から到来する雑音の時空間スペクトルは、S-DC 以外のビンにも成分を有する。そこで、その S-DC 以外の観測値に基づいて雑音の S-DC 成分を推定し、目的音と雑音が重畳して観測された時空間スペクトルの S-DC 成分から減算することで、目的音のみを抽出することができる。この手法を ISSS 法と称している [1]。

特に、雑音源が 1 個でその方向が既知であるとすれば、雑音の S-DC 成分を推定することは容易である。具体的には、S-DC に隣接するビンのスペクトルの値を調べ、雑音の到来方向によって一意に決まる比を乗ずることで、雑音の S-DC 成分を算出可能である。マイクロホンに個体差がないという理想条件を仮定した計算機シミュレーションでは、30 dB 程度の雑音低減効果がある [1]。

### 2.2 マイクロホンアレイの実機を用いた場合の性能

マイクロホンアレイとして Seeed 社の ReSpeaker 4-Mic Linear Array Kit [2] を、Raspberry Pi 4B [3] に装着して使用した。このアレイでは、MEMS マイクロホン 4 個が 4 cm 間隔で直線状に配置されている。標準化周波数は 8 kHz、量子化精度は PCM 16 bit とした。防音室 (ミュージックキャビン SC-6) 内で、スピーカ (三菱電機 DIATONE DS-800ZX) 2 台をアレイから 2 m の位置に設置して録音を行った。目的音として女声「あー」をアレイ正面 (0°) のスピー

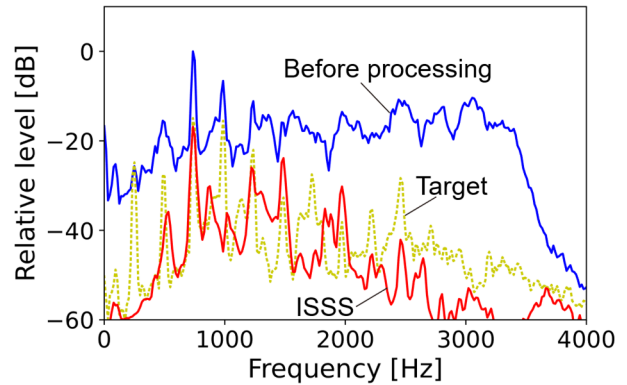


図 1 周波数特性の校正前の振幅スペクトル

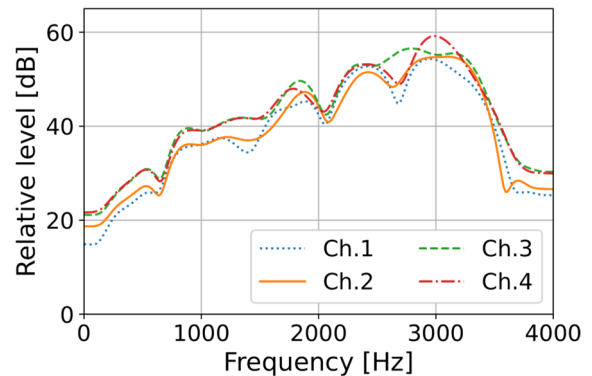


図 2 マイクロホンの周波数特性の個体差

カから、そして白色雑音を  $-20^\circ$  のスピーカから放射して録音した場合の振幅スペクトルを図 1 に青線で示す。

このようにして録音した信号に対して、ISSS 法を適用して雑音抑制した結果を図 1 に赤線で示すとおり、全体的に 30 dB 程度の雑音抑圧効果が見られる。しかし、目的音のみを録音した黄線の特徴と比較すると、特に低周波数域でスペクトルの歪が見られ、SDR としては約 8 dB であり目的音抽出という観点からは十分な性能とは言い難い。

## 3. マイクロホンの特性補正による効果の検証

### 3.1 マイクロホンの周波数特性の補正

アレイ正面のスピーカからスイープ音 (2 s 間で 0 ~ 4 kHz に線形に周波数が上昇) を放射し、各マイクロホンで応答を録音した。その応答に、スイープ音を時間反転させた信号を畳み込むことで、インパルス応答を算出した [4, 5]。インパルス応答のピークを中心に 64 点のハンギング窓をかけて得た振幅スペクトルを図 2 に示す。4 チャンネルのマ

<sup>†</sup> 山梨大学工学部コンピュータ理工学科 Department of Computer Science and Engineering, Faculty of Engineering, University of Yamanashi

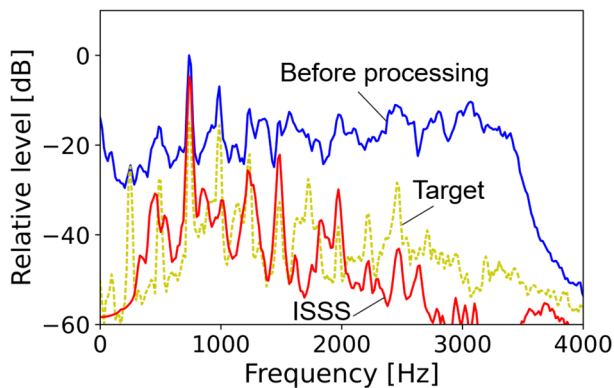


図3 周波数特性の校正後の振幅スペクトル

イクロホンの周波数特性は、概形は類似しているものの、周波数によっては5 dB程度の差異がある。

その差異を校正するために、Ch. 2~4のマイクロホン出力がCh. 1の特性に一致するように、文献[4, 5]の手順に従い補正フィルタを設計した。ただし、ここでは振幅特性のみを補正するフィルタとした。なお、上述のインパルス応答の前後にゼロ詰めを行い、512点のFIRフィルタとした。

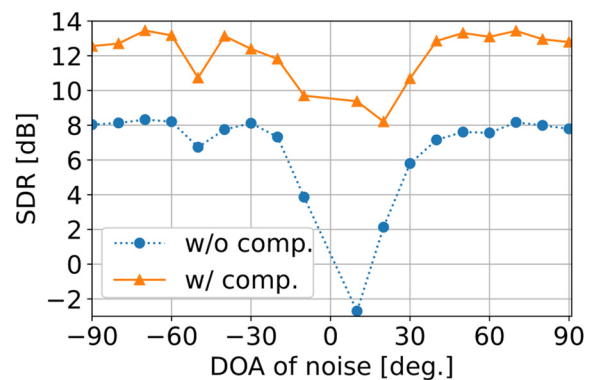
### 3.2 マイクロホンの特性補正による効果の検証

2.2節で収録したCh. 2~4の信号に対して、前節で設計したフィルタを適用した後で、改めてISSS法により雑音抑制した結果を図3に示す。低域(第2及び3高調波)における目的音の減衰が抑えられており、SDRとして約12 dBと改善が見られる。

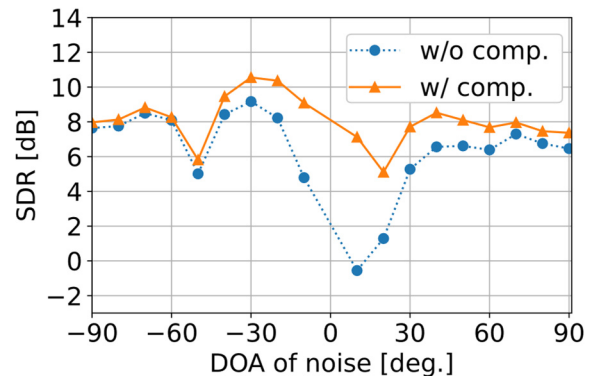
以上は、目的音が女声「あー」で、雑音の到来方向(DOA: Direction of arrival)が $-20^\circ$ の場合についての結果である。雑音のDOAを $-90^\circ \sim 90^\circ$ まで $10^\circ$ 刻み( $0^\circ$ を除く)で変化させて補正前後のSDRを観測した結果を図4(a)に示す。補正後は全体的にSDRの向上が認められ、特に $0^\circ$ 付近での効果が大きい。これは、 $0^\circ$ 付近では補正前のSDRが低いことによる。すなわち、雑音のDOAが $\pm 10^\circ$ といった場合には、雑音の時空間スペクトルもS-DCビンが極めて優勢となるため、逆にS-DCビンに隣接するビンのパワーは小さくなる。それゆえ、マイクロホンの特性に不一致があると、S-DCビンにおける成分の推定誤差が大きくなり、SDRが低くなる。

目的音を女声「Welcome to Japan.」に代えて、同様な検討を行った結果を図4(b)に示す。補正の効果は、 $0^\circ$ 付近では明白であるものの、全体として図4(a)に比べて弱い。この傾向は、他の音声信号についても同様であった。これは、母音区間では図4(a)と同様な効果があるものの、その時間長は音声の一部に限られることが原因であると考えられる。また、高域については、図3に見られるように補正の効果は小さいため、摩擦音など一部の子音については十分な効果が得られなかったものと考えられる。

なお、DOAが $0^\circ$ から離れると効果が小さくなる一つの原因として、マイクロホンの周波数特性の個体差がDOAに依存することもある。すなわち、目的音をS-DCに局在させるためには、 $0^\circ$ の特性を用いて補正するのが有効であるが、DOAが大きい雑音に対しては必ずしも有効ではなかったと考える。



(a) 女声「あー」



(b) 女声「Welcome to Japan.」

図4 周波数特性の校正によるSDRの変化

## 4. おわりに

本研究では、著者らが開発した雑音抑制手法であるISSS法の実機搭載に向けて、マイクロホンの個体差の影響と、その校正の効果について検討した。その結果、ISSS法は雑音抑制については十分な効果があるものの、目的音抽出という観点では更なる改善の余地があることが示された。

今後は、マイクロホンの位相特性まで含めた校正を行うことで、更なる改善を目指したいと考えている。また、雑音源が複数あり、そのDOAが未知である場合も検討対象とする予定である。

### 謝辞

本研究は、JSPS 科研費(24K02958)の助成を得て実施した。

### 参考文献

- [1] K. Ozawa, M. Morise, and S. Sakamoto, "Sound source separation by instantaneous-estimation-based spectral subtraction," Proc. Int. Conf. Systems and Informatics (ICSAI 2018), pp. 870-875, Nov. (2018).
- [2] <https://jp.seeedstudio.com/ReSpeaker-4-Mic-Linear-Array-Kit-for-Raspberry-Pi.html> (2025/4/17 参照).
- [3] <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/> (2025/4/17 参照).
- [4] 鈴木陽一, 浅野太, 曾根敏夫, "音響系の伝達関数の模擬をめぐって(その1)," 日本音響学会誌, vol. 44, No.12, pp. 936-942 (1988).
- [5] 鈴木陽一, 浅野太, 曾根敏夫, "音響系の伝達関数の模擬をめぐって(その2)," 日本音響学会誌, vol. 45, no. 1, pp. 44-50 (1989).