

拡散性反射音モデルを用いた MUSIC および PH-MUSIC 法の誤差要因の検討*

☆湯浅 一輝, 金田 豊 (東京電機大)

1 はじめに

筆者らは前報において MUSIC 音源方向推定法の低周波領域における誤差要因を検討した。MUSIC 法の空間相関行列を確認したところ、低周波領域にて固有値の値が一つとなり反射音等による不要音の空間相関が目的音の空間相関と類似しているのが原因だと分かった[1]。

本報告では、室内反射音が拡散音となって悪影響を及ぼしていると仮説を立て、拡散性反射音モデルを用いてシミュレーションにより誤差要因の検討を行った。

2 MUSIC 法による音源方向推定

M 個のマイクロホンで受音した場合に第 i 番目のマイクロホンの周波数帯域 ω のスペクトル(複素数)を $X_i(\omega)$ と表す時、空間相関行列 $R(\omega)$ は次式で表される。

$$R(\omega) = \begin{bmatrix} \Phi_{11}(\omega) & \Phi_{12}(\omega) & \dots & \Phi_{1M}(\omega) \\ \Phi_{21}(\omega) & \Phi_{22}(\omega) & \dots & \Phi_{2M}(\omega) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Phi_{M1}(\omega) & \Phi_{M2}(\omega) & \dots & \Phi_{MM}(\omega) \end{bmatrix} \quad (1)$$

ただし、 $\Phi_{ij}(\omega) = E[X_i(\omega)X_j^*(\omega)]$ 、 $E[\cdot]$ は期待値で、 $*$ は複素共役である。

MUSIC 法では、方向制御ベクトル $d(\omega, \theta)$ と $R(\omega)$ の雑音部分空間である相関行列 $R_n(\omega)$ [2] を用いて方向スペクトルを算出し、到来方向推定を行う。方向スペクトル $P_{MUSIC}(\omega, \theta)$ (周波数 ω における θ 方向から到来する音の強さの推定値) は次式によって求められる。

$$P_{MUSIC}(\omega, \theta) = \frac{1}{d^H(\omega, \theta) R_n(\omega) d(\omega, \theta)} \quad (2)$$

3 MUSIC 法の誤推定要因

3.1 推定誤差の特徴

図 1 に実環境で MUSIC 法を用いた場合の方向スペクトル $P_{MUSIC}(\omega, \theta)$ の一例を示す。図の横軸は方向 θ 、縦軸は周波数 $f (= \omega/2\pi)$ を

表し、赤い色ほど方向スペクトルの値が大きくなり、その方向に音源があるものと推定される。

音源は音声一つで 45° 方向にある。高い周波数ではマイクロホン間隔に依存した空間折り返しの影響で複数の音源が推定されているが、周波数平均をとれば、その影響は軽減される。

一方、低周波では、 45° 方向の推定に対して、以下の特徴を持つ誤差が発生する。

- ① 0° 方向に推定方向が変位する
- ② 周波数が低いほど影響が大きい

3.2 拡散音の空間相関

方向推定に対する最大の誤差要因は室内反射音である。通常、室内反射音は多数の方向から到来するので、これを拡散音として一次近似することにする。

拡散音の空間 2 点間相関は、

$$R = \frac{\sin(kr)}{kr} \quad (3)$$

となる[3]。ただし、 $k = 2\pi f / c$ (c : 音速)、 r は 2 点間距離を表す。図 2 に $r = 4\text{cm}$ の場合の相関係数を示した。

0° 方向から到来する音は位相差が無い(直線配列の場合)ので、空間複素相関 $\Phi_{ij}(\omega)$ は実数値となる。一方、拡散音の相関関数は式(3)で示した実数値となるので、拡散音は 0° 方向の音と誤推定される。また、図 2 よりわかるように、拡散音の相関は低周波数ほど大きいので、その影響は低周波ほど大きい。

このように、拡散音が加算されると 3.1 で示した①②の特徴を持つ誤差が発生するので、図 1 の推定誤差は拡散音となった反射音の影響と推定できる。

4 拡散音モデルによる検証

前項の仮説を検証するために以下のモデルによる検証を行った。モデルでは空間相関行列 $R(\omega)$ を

$$R(\omega) = \alpha_{DR} R_d(\omega) + R_r(\omega) \quad (4)$$

* Study on error factors of MUSIC and PH-MUSIC method based on diffused reflective sound model, by YUASA Kazuki, and KANEDA Yutaka (Tokyo Denki University).

と表した。ここで、 $R_d(\omega)$ は、一方向からの平面波を想定した相関行列、 $R_r(\omega)$ は、マイクロホン間距離 r を式(3)に代入して計算した拡散音の相関行列、 α_{DR} は、直接音間接音比を表す。

図1の実験は、残響時間が約1.3秒(500Hz)の室(6.3×9.1×2.8m)で、人間が45°方向から発声した単語音声、壁から1m離れた場所に4cm間隔で直線配列した4個のマイクロホンで録音した方向推定結果である。シミュレーションではこの条件に合わせて、 R_d 、 R_r 、 α_{DR} を計算し($\alpha_{DR} = -4.7\text{dB}$)[4]、式(4)で得られた相関行列 $R(\omega)$ から式(2)を用いて方向スペクトルを計算した。結果を図3に示す。

実環境(図1)と拡散音モデルの方向スペクトル(図3)を比較してみる。両者は類似しており、ともに2500Hz以下で0°方向へと劣化している様子が見られた。また、それぞれの空間相関行列 $R(\omega)$ の4つの固有値(図4、5)をみると、低域で一つの固有値だけが大きくなるなど類似点が多い。これらのことから、式(4)のモデルは実測結果をよく反映しており、低域の誤差要因は拡散性反射音による影響であると考えられる。

一方、PH-MUSIC法(図6)では、低域において同様に劣化しているが、MUSIC法と比べると、1500Hz以上で反射音(拡散音)の影響が軽減されていることが見て取れた。

5 むすび

本稿では、MUSICの低周波数帯における誤差要因について、拡散性反射音モデルを用いて検討した。結果、誤差要因は反射音や雑音などによる拡散音の影響であり、拡散音の相関係数が大きい帯域で推定誤差が発生していた。そして、同様の帯域で固有値が一つだけ大きくなっていった。また、PH処理を適用することで誤差要因をある程度抑圧することが可能であることがわかった。

参考文献

- [1] 湯浅、金田、音講論(秋),339-340, 2018.
- [2] 浅野、“音のアレイ信号処理”，日本音響学会、107-124, 2011.
- [3] 磯部、“相関関数およびスペクトル”，東京大学出版会、149, 1968.
- [4] 橘・矢野、“環境騒音・建築音響の測定”，日本音響学会、8, 2004.

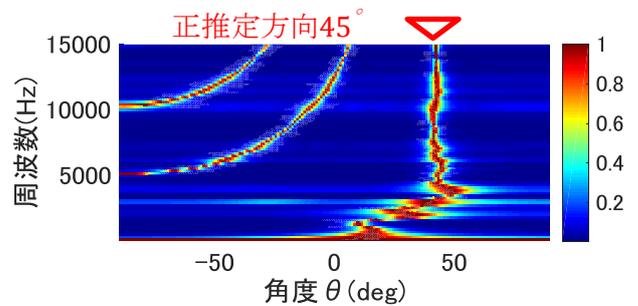


図1 実環境のMUSIC方向スペクトル

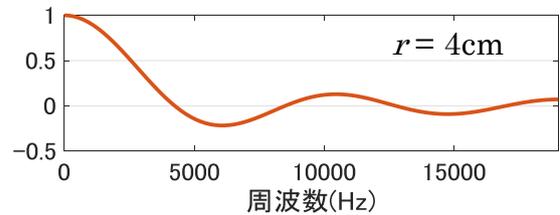


図2 拡散音場における2点間の相関係数

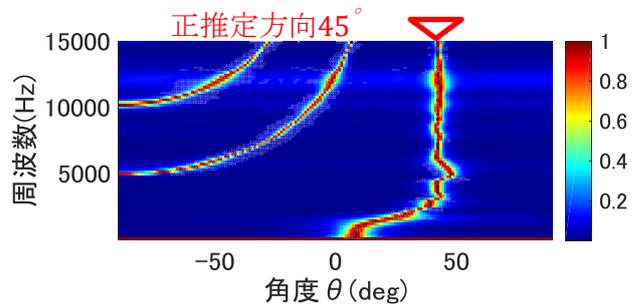


図3 拡散音モデルに基づいた方向スペクトル

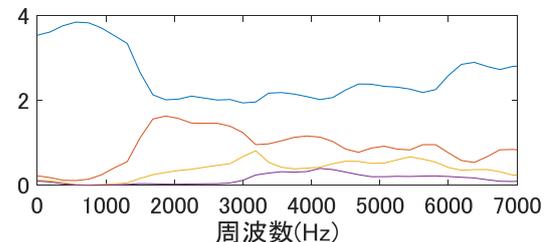


図4 実環境の $R(\omega)$ の固有値

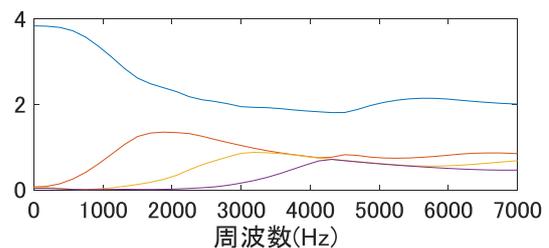


図5 拡散音モデルに基づいた $R(\omega)$ の固有値

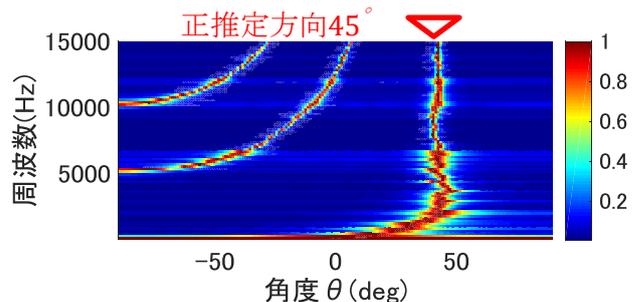


図6 実環境のPH-MUSIC方向スペクトル