

日本音響学会講演論文集

SDD法による非線形2次元アレイスピーカの駆動*

○鹿間大晟, 柳田裕隆 (山形大院)

1 はじめに

2次元平面上にスピーカ素子を並べた2次元アレイスピーカは音の集束や拡散, アクティブ消音など, 幅広い分野で応用可能であるが, コスト面での課題が残っている。そこで, 駆動回路のチャンネル数を大幅に削減する2次元アレイスピーカとして, 非線形の電界歪特性を利用したエッジ接続型構造が提案された。[1]

青田らは, スピーカを駆動する手法として, 少ない駆動信号で2次元音場を形成するSDD(Semi Discrete Decomposition)法[2]と, SDDの重み係数をPWMによって変調する方式を提案し, シミュレーションによって集束音場の形成に成功した。[3]

しかし, これまで提案された駆動方式は, 動作周波数の増大や量子化誤差が大きいなど課題が残っていた。また, エッジ接続型構造の静電スピーカを駆動するために高電圧駆動回路が必要になる。

本稿では, SDD+PMW 処理を不帰還ループ内に入れ $\Delta\Sigma$ 変調を構成し, 課題である量子化誤差が低減できるかについて検証を行う。また, 静電スピーカを駆動する高電圧回路の設計・試作を行う。

2 SDD(Semi Discrete Decomposition)

Semi Discrete Decomposition(以下 SDD)は, 半離散分解と呼ばれる行列分解手法の1つで, 行列を $\delta = \{-1, 0, 1\}$ という3値の要素で構成されたベクトルの外積の加重和により近似する。

M 行 N 列の実行列 A のSDD近似行列 $A^{(k)}$ は, 以下の式で表される。

$$A^{(k)} \cong \sum_{i=1}^k d_i x_i y_i^T \quad (1)$$

x_i は $-1, 0, 1$ の3値を取る M 次元ベクトル,

y_i は $-1, 0, 1$ の3値を取る N 次元ベクトル, d_i は k 行 k 列の正の実数の対角成分の値, k は非負の整数であり, この値が大きいほど $A^{(k)}$ の近似精度は高くなる。

このSDD処理を二次元音源パターンに適用することにより, 行と列の2方向への音響信号に分けることができる。その信号をそれぞれエッジ接続型構造のスピーカに入力することにより駆動することができる。

3 PWM(Pulse Width Modulation)

x_i と y_i は $-1, 0, 1$ の3値を取るが, 重み係数 d_i は正の実数なため, 高精度のアナログ回路が必要になる。したがって, 回路の駆動が容易になるよう d_i を変換する必要がある。

本稿では, SDDの重み係数 d_i をPWMによって高さ一定のパルスに変換する。 d_i は正の実数であり, この値に比例した幅のパルスをクロックに同期して発生させる。SDDの項数を k , 量子化ビット数を Nq とすると, 1オーディオサンプルに対し $k \times 2^{(Nq-1)}$ 周期のクロックを設定する必要がある。また, サンプリング周波数を f_s とすると, PWMを用いてスピーカを駆動するためには $f_s \times k \times 2^{(Nq-1)}$ Hz以上の動作周波数が必要となる。

4 $\Delta\Sigma$ 変調の適用

SDDによる近似とPWMによる誤差は, 量子化誤差と考えられる。そこで, SDD+PWMの処理を不帰還ループ内に入れ, $\Delta\Sigma$ 変調器を構成することで, 量子化誤差の低減が可能であると考えられる。

Fig.1に $\Delta\Sigma$ 変調の構成例を示す。

* “Driving of nonlinear two-dimensional array speaker by SDD method (2023)“, by SHIKAMA taisei, and YANAGIDA hirotaka(Yamagata University)

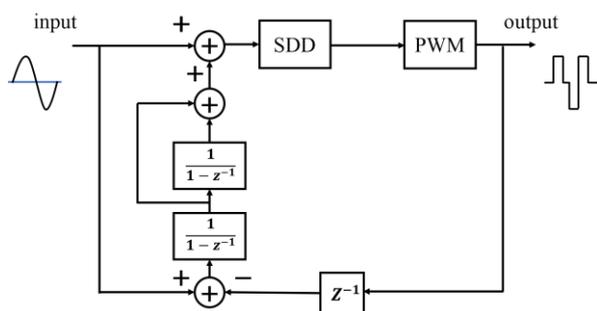


Fig.1 $\Delta \Sigma$ modulation configuration example

5 シミュレーション

量子化雑音が少ない最低限のSDDの項数 k の求め、そこからPWM駆動するための動作周波数の決定、 $\Delta \Sigma$ 変調を構成した場合としていない場合の比較を行った。

シミュレーションを行う際のパラメータをTable 1に示す。

Table 1 Simulation conditions

アレイ規模	8×8
アレイ寸法(縦)[m]	1.2
アレイ寸法(横)[m]	0.8
集束点までの距離[m]	1
周波数[kHz]	1
信号帯域幅[kHz]	1
角度[°]	0~60
サンプリング周波数[Hz]	256
オーバーサンプリング比	32
量子化ビット数	1

5.1 PWM 駆動するための駆動周波数の決定

SDDの項数 k を大きくすると量子化雑音が減るが、駆動周波数が k 倍になる。そこで、SDD項数 k とSN比の関係をシミュレーションによって調査し、適切な k を決定する。Fig.2にシミュレーションの結果を示す。結果、SDDの項数が、最低 $k=3$ で十分駆動できることが明らかになった。このとき、PWM駆動するための駆動周波数は、 $256 \times k \times 2^{(Nq-1)}$ の式より、768 kHz以上となる。

5.2 $\Delta \Sigma$ 変調の適用結果

$\Delta \Sigma$ 変調を構成しない場合とした場合で比較を行う。SDD項数 k は3で固定する。

Fig.3に $\Delta \Sigma$ 変調を適用しない場合、Fig.4に

$\Delta \Sigma$ 変調を適用した場合の結果を示す。

Fig.3は、信号成分の1 kHz 周辺を含め全周波数帯で-40dB程度のノイズが発生している。それに対して Fig.4では、信号域近傍の5kHzでもノイズが-80dB以下に抑えられており、高周波数帯でノイズが増加するノイズシェイピングの効果が表れている。

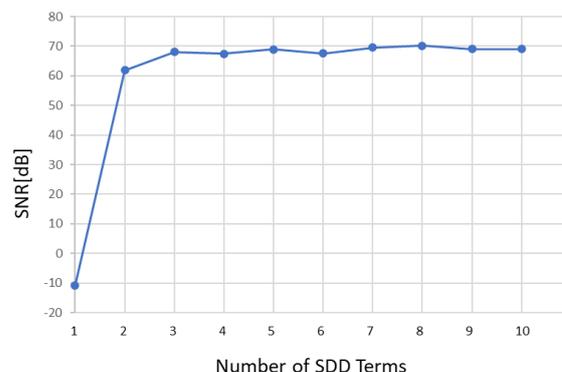


Fig.2 Relationship as number of SDD terms and SN ratio

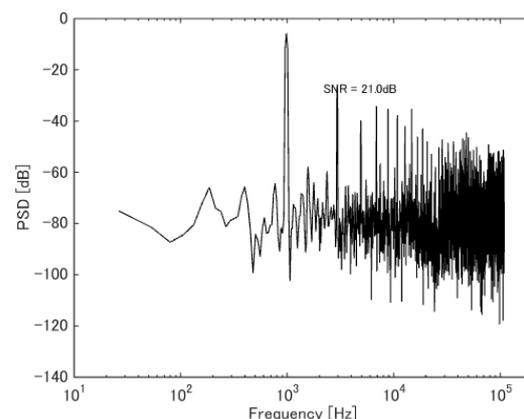


Fig.3 Power spectrum when $\Delta \Sigma$ modulation is not applied

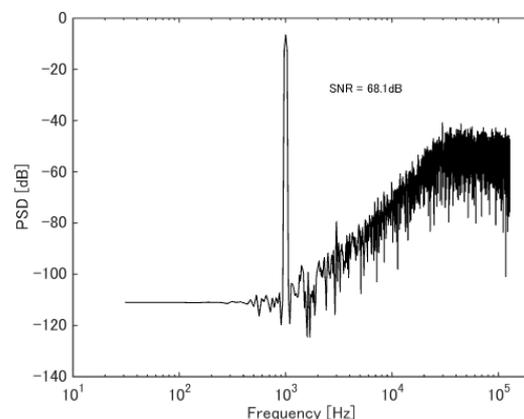


Fig.4 Power spectrum when $\Delta \Sigma$ modulation is applied

6 スピーカ駆動回路

エッジ接続型構造の静電スピーカの特性上の理由から高電圧駆動回路が、シミュレーションの結果から高周波駆動回路が必要である。

本稿ではそのような駆動回路を、Maxim Integrated 製の MAX4940WVKIT+ という超音波パルサーを使用することにより実現した。

6.1 シミュレーション

スピーカを駆動し音響波を観測することを想定し、受信波形を計算することで、スピーカ駆動回路の動作検証を行う。

回路シミュレーション上で差周波数が 1 kHz になるように 2 つの異なる周波数(1000 kHz ,1001 kHz)の信号を作成し、スピーカに入力する。

スピーカからの出力波形を Fig.5 に示す。スピーカから 1 kHz の信号が出力されていることがわかる。

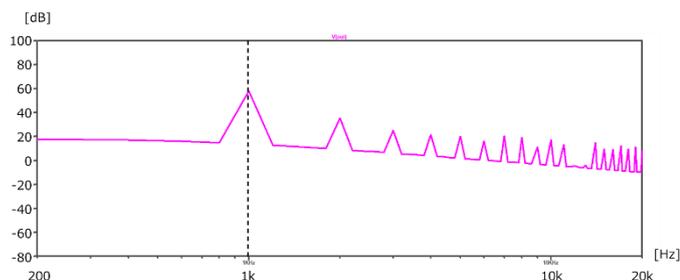


Fig.5 Simulation frequency spectrum

6.2 実測

Fig.6 にスピーカ駆動回路で用いた機材を示す。



Fig.6 Equipment used for speaker drive circuit

FPGA で作成したロジック信号(x , $-x$, y)を超音波パルサーへ出力する。今回は, x を 970.2 kHz, y を 984.6 kHz に設定している。

超音波パルサーでは、入力された信号を土

80 V 程度に昇圧し、スピーカへ出力する。

スピーカでは入力された信号の差周波成分を出力する。今回は、970.2 kHz と 984.6 kHz の差周波である 14.4 kHz が出力されることが想定される。

Fig.7 にスピーカから出力された音をマイクで観測した波形を示す。この波形から、2 つの信号の差周波成分である 14.4 kHz の音出力されていることがわかる。

以上より、設計した駆動回路を用いてスピーカを駆動できることが確認された。

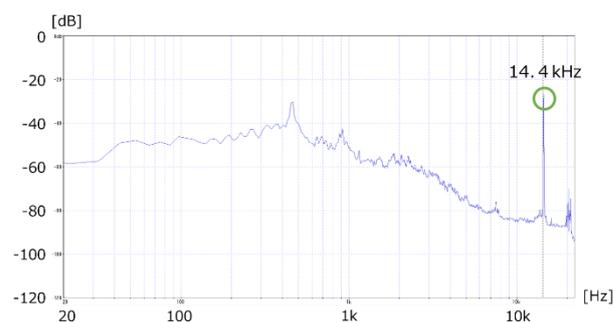


Fig.7 Actual frequency spectrum

7 おわりに

少ない駆動信号で 2 次元音場を生成する SDD 法と SDD の重み係数 d を PWM によって変調する方式に $\Delta\Sigma$ 変調を適用する手法の提案と検証を行った。シミュレーションの結果、量子化誤差の低減が確認できた。また、SDD 項数が最低 3 で安定することが確認できた。

また、設計したスピーカ駆動回路が、シミュレーションにより正常に動作することが確認された。スピーカ駆動回路を試作し駆動した結果、スピーカから入力信号の差周波数の音が発生した。

参考文献

- [1] Ichiro Fujishima et al, 2009 IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings, 2221-2224 (2009)
- [2] TAMARA G. KOLDA et al, ACM Transactions on Mathematical Software, Vol. 26, No. 3, September 2000, Pages 415-435
- [3] 青田 他, 音講論 (秋) 1-P-37,2017.