

# 日本音響学会講演論文集

## 時間高次空間2次の二次元 $\Delta\Sigma$ 変調

○平野孝明, 柳田裕隆 (山形大学大学院)

### 1 はじめに

$\Delta\Sigma$  変調は, ループフィルタを 3 次以上で設計すると, 安定性が保証されていない。そこで, 我々は  $\Delta\Sigma$  変調の高次化のために, サークュラーアレイと呼ばれる 2 次元アレイの空間的な特徴を利用することで, 空間軸にも  $\Delta\Sigma$  変調を拡張し, 時間と空間のハイブリッド型の二次元  $\Delta\Sigma$  変調を提案してきた。近年,  $\Delta\Sigma$  変調に対してロバスト制御理論であるスライディングモード制御理論が適用され, 高次の  $\Delta\Sigma$  変調の安定化が実現された。[1]本研究では, このスライディングモード制御理論を二次元  $\Delta\Sigma$  変調に適用, 時間高次空間 2 次の  $\Delta\Sigma$  変調を実現し, 信号雑音比(SNR)の向上を試みた。

#### 1.1 サークュラーアレイスピーカ

実験に使用したスピーカは, 直径 2cm の小型スピーカ素子を円環状に 64 個配置した構造を有している。サーキュラーアレイスピーカには次の特徴がある。[2]

- 1) 3 次的に集束点を設定することができる
- 2) 小型スピーカを円環状に配置していることにより, リニアアレイの先端と終端を繋いだ形とみなすことができるため, 1 次元アレイとして信号処理を行うことが可能
- 3) フルアレイ構成よりも少ないスピーカ素子数で構成される

### 2 $\Delta\Sigma$ 変調

#### 2.1 ハイブリッド型二次元 $\Delta\Sigma$ 変調

本研究では, サークュラーアレイスピーカの持つ空間的な性質に着目し, 空間軸にもループフィルタを組み込むことで, 4 つのループフィルタを持つ”時間 2 次空間 2 次のハイブリッド型二次元  $\Delta\Sigma$  変調”を実現している。

[3]この変調器の構成を Fig. 1 に示す。赤枠に囲まれた部分が時間軸, 青枠に囲まれた部分が空間軸となる。時間 2 次空間 2 次の二次元  $\Delta\Sigma$  変調は, 量子化ビット数を 1 bit に抑えつつ高音質な音声データを得ることができる。

(U(z):入力信号, E(z):量子化器, P(z):出力)

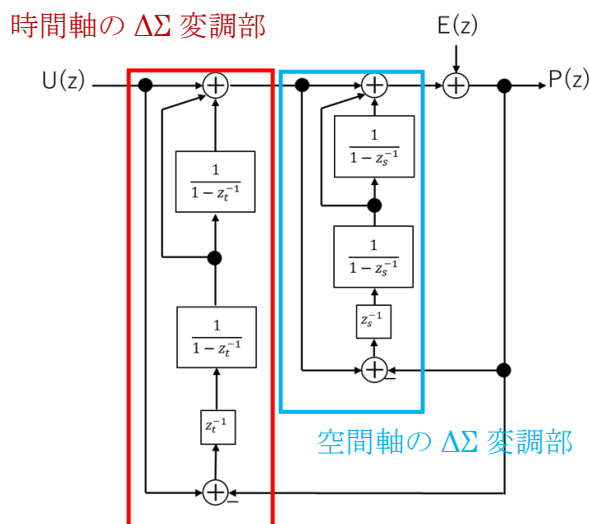


Fig. 1 時間 2 次空間 2 次の二次元  $\Delta\Sigma$  変調

#### 2.2 スライディングモード制御理論

スライディングモード制御は, 非線形および時変システムの制御に使用される一種の制御手法である。この手法は, システムの状態が所定の「スライディング面」と呼ばれる超平面上を移動するように制御信号を設計する。スライディングモード制御の基本的な考え方は, システムの状態をスライディング面上に制約することで, 目標の状態にシステムを迅速かつ正確に収束させ, 摂動や外部ノイズに対してロバスト性を持ち, 理論的な基盤が確立される。喜田健司らの研究[1]では, このスライディングモード制御理論を用いて高次の  $\Delta\Sigma$  変調器が実現し, SNR を保ちつつ安定な動作が確認された。その  $\Delta\Sigma$  変調器の構成を Fig. 2 に示す。

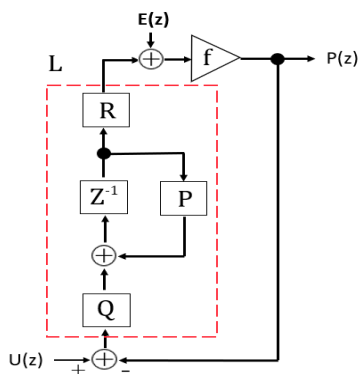


Fig. 2 スライディングモード制御理論を用いた  $\Delta\Sigma$  変調

Fig. 2 の点線で囲まれているループフィルタ L は状態空間モデルで表現されている。状態空間モデルで表現されたループフィルタ L の P, Q, R は行列で表せることができ、 $\Delta\Sigma$  変調の次数に応じて行列が変化する。具体的には、N 次の  $\Delta\Sigma$  変調に対して P は(N×N 行列), Q は(N×1 行列), R は(1×N 行列)となる。3 次の  $\Delta\Sigma$  変調の場合ループフィルタ L の P, Q, R は、

$$P = \begin{pmatrix} 0.9971 & 1 & 0 \\ -0.005772 & 0.9971 & 0.5953 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$Q = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$R = (0.1006 \quad 0.6532 \quad 0.9624)$$

となる。f はフィードバックゲインとなっており、3 次の  $\Delta\Sigma$  変調の場合、

$$f = 1.6099$$

となる。

この理論を用いてサーキュラーアレイスピーカの駆動信号の設計を行い、その結果、10 次の  $\Delta\Sigma$  変調まで実現し、SNR が 103.5 dB に達することが確認された。この高い SNR 値は、システムが信号の精緻な制御と品質の向上に成功していることを示している。

## 2.3 新しいハイブリッド型二次元 $\Delta\Sigma$ 変調器

時間 2 次元空間 2 次元の二次元  $\Delta\Sigma$  変調とスライディングモード制御理論を用いた高次の  $\Delta\Sigma$  変調を組み合わせ、時間高次元空間 2 次元の二次元  $\Delta\Sigma$  変調を開発した。この新しい回路設計により、SNR の向上を試みた。Fig.1 の時間 2 次元空間 2 次元の二次元  $\Delta\Sigma$  変調における時間軸の部分を、スライディングモード制御理論を用いた  $\Delta\Sigma$  変調に置き換え、これに量子化器の後にフィードバックゲイン f を配置した。この手法により、時間軸においてスライディングモード制御理論を活用して  $\Delta\Sigma$  変調を行うことが可能となった。Fig.3 にその回路を示す。

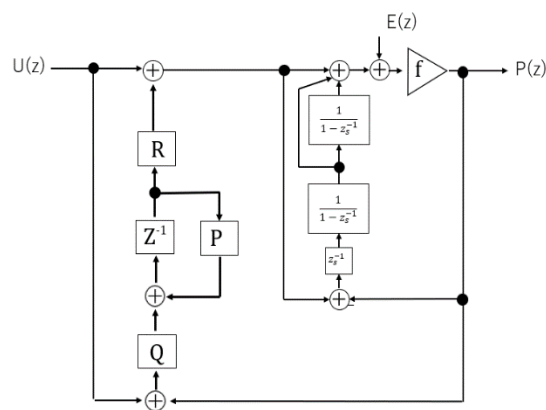


Fig. 3 時間高次元空間 2 次元の二次元  $\Delta\Sigma$  変調

## 3 シミュレーション実験

### 3.1 シミュレーション条件

シミュレーションを行う際の実験条件を table.1 に示す。SNR の評価を行う周波数の範囲は、可聴音域の下限である 20 Hz から、実用性を考慮しての耳の感度が良い周波数帯域 2000~4000 Hz[4]を考慮し、5000 Hz までとし、シミュレーションを行った。

Table.1 : 実験条件

	実験	単位
スピーカ素子数	64	個
サーキュラーアレイ半径	0.3	[m]
入力信号周波数 (連続正弦波)	1	[kHz]
音速	340	[m/s]
集束距離	1.0	[m]
サンプリング周波数	250	[kHz]
SNR の範囲	20~5000	[Hz]

### 3.2 SNR 比較

初めに比較対象として同じ実験条件のもとを行い、周波数スペクトルと SNR を記録した。時間 2 次空間 2 次の二次元  $\Delta\Sigma$  変調の場合を Fig.4 に、時間軸のみ高次にしたスライディングモード制御理論を用いた 10 次の  $\Delta\Sigma$  変調の場合(空間軸  $\Delta\Sigma$  変調無し)を Fig.5 に示す。

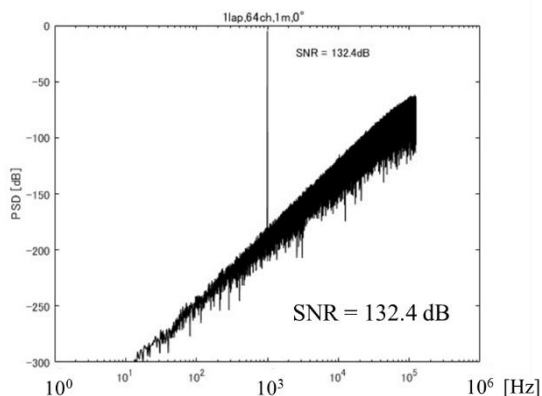


Fig. 4 時間 2 次空間 2 次の二次元  $\Delta\Sigma$  変調

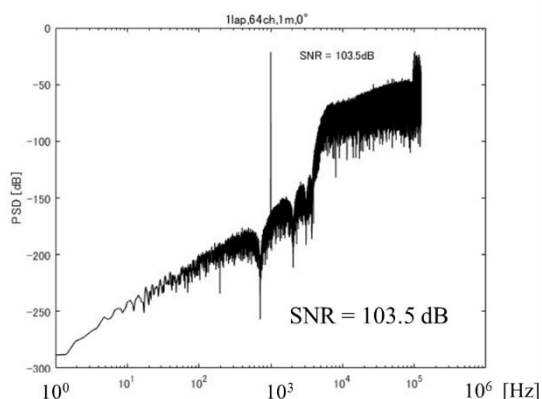


Fig.5 スライディングモード制御理論  
10 次の  $\Delta\Sigma$  変調

Fig.3 に示した回路を用いて時間高次空間 2 次の二次元  $\Delta\Sigma$  変調のシミュレーションを行った。時間軸の次数は 2 次から 10 次までの範囲で、徐々に次数を上げて観測を行った。発振が発生し、周波数スペクトルが観測できなくなるまで実施し、周波数スペクトルの変化と SNR の値を観測した。今回提案した時間高次空間 2 次の新しいハイブリッド型二次元  $\Delta\Sigma$  変調器を用いたときの SNR を table2 に示した。Fig.6 は時間 10 次空間 2 次のときの周波数スペクトルである。

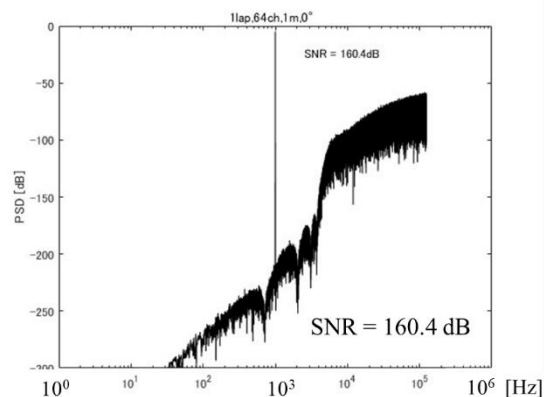


Fig. 6 時間 10 次空間 2 次の二次元  $\Delta\Sigma$  変調

Table.2 : 時間軸の各次数の SNR

次数	SNR(dB)
2	121.4
3	128.6
4	146.2
5	146.6
6	154.1
7	153.8
8	159.2
9	159.0
10	160.4

## 4 結果と考察

新手法である時間 10 次空間 2 次の二次元  $\Delta\Sigma$  変調は従来法の一般的な時間 2 次の  $\Delta\Sigma$  変調や、我々の提案してきた時間 2 次空間 2 次の二次元  $\Delta\Sigma$  変調に比べて、今回の新手法は SNR が飛躍的に向上することを明らかにした。また、時間 2 次空間 2 次のように  $\Delta\Sigma$  の特徴である、高域上がりの量子化雑音特性を示し、ノイズシェイピングされていることが確認できた。Fig.6 の周波数スペクトルでは Fig.5 と同様に音のピーク付近で局所的な低下が見られた。

時間軸の各次数における SNR は、8 次以降は評価においてほぼ変化が見られず、周波数スペクトルもほとんど変動がないことが確認された。また、偶数の次数の方が安定で SNR の評価が高いことが確認された。

## 5 まとめ

本研究では、時間 2 次空間 2 次の二次元  $\Delta\Sigma$

変調と、スライディングモード制御理論を用いた  $\Delta\Sigma$  変調を組み合わせることで、時間高次空間 2 次の二次元  $\Delta\Sigma$  変調を実現し、SNR の評価を向上させることができた。今後は、この手法を更に発展させ、空間軸にもスライディングモード制御理論を適用することで、より高次の  $\Delta\Sigma$  変調を実現したいと考えている。また、スライディングモード制御理論を用いた  $\Delta\Sigma$  変調の周波数スペクトルには局所的な低下が見られるが、その原因はまだ特定されていないため、今後の研究で解明を進めていく予定である。

### 参考文献

- [1] 喜田健司, 他, “スライディングモード制御理論による高次デルタシグマ変調器の実現”, 日本音響学会誌 74 巻 3 号 (2018), pp. 120–129
- [2] 大井一希, 他, “二次元  $\Delta\Sigma$  変調を用いたサーキュラーアレイスピーカの指向性制御”, 日本音響学会 2019 年秋季研究発表会 3-P-14 高橋, 鈴木, 音講論 (春), 123-124, 2005.
- [3] 斉藤裕貴, 他, “2 次元  $\Delta\Sigma$  変調を用いたスピーカアレイシステムの構築”, 平成 23 年度第 6 回情報処理学会東北支部研究会
- [4] 中村美和, 他, “人間特性と感性を考慮した情報提示音の開発”, 自動車技術会論文集 Vol,49,No.2, March 2018.