時空間ΔΣ変調による音響波面の符号化

王 磊, 畠山智紀, 柳田裕隆, 田村安孝

山形大学大学院理工学研究科

〒992-8510 米沢市城南 4-3-16

Audio Wavefront Coding with Spatio-Temporal $\Delta\Sigma$ modulation

Wang Lei, Tomoki Hatakeyama, Hirotaka Yanagida, and Yasutaka Tamura

Graduate School of Science and Engineering, Yamagata University

4-3-16, Jonan, Yonezawa

1. 研究の目的と背景

本論文の研究は, 音場や電磁波など時間と空間の 両方の次元を持つ物理量を, アレイ素子で効率良く かつ高い再現性で扱うための符号化手法の実現を目 指している。この符号化方式の応用としては, スピ ーカアレイによる音場の制御, マイクロフォンアレ イによる指向性形成, 環境に応じて指向性を制御で きるアンテナなどが挙げられる。

これまで、スピーカアレイによる指向性音場の発 生を目的として、時空間に拡張した2次元ΔΣ変調 の方法が提案され、音場の持つ空間的帯域制限の性 質を利用することで、比較的低いサンプリング周波 数の1ビット量子化により高い SN 比が得られるこ とが示されている[1]。

一方, 2次元ΔΣ変調は,時間2次・空間2次以 上の次数では動作が不安定になるため,時間領域の みのΔΣ変調で有効である「高次数化による符号化 効率の向上」についての検討は十分ではなかった。

2. 高次の2次元ΔΣ変調の安定化

2.1 安定化の方針

高次の多次元ΔΣ変調の安定性を理論的に解析す ることは難しい問題である。しかし、1次元の高次 ΔΣ変調器の設計において、雑音伝達関数の利得の 帯域外の値を制限することで安定化できるという経 験則が示されている。

そこで、本研究では、雑音伝達関数(NTF)の利得 を指定した値で近似できるハイレベル設計手法によ り高次ΔΣ変調器を設計し,空間フィルタ挿入型構 成と併用することを検討した。Fig.1 に,今回検討 した2次元ΔΣ変調器の構成例を示す。



Fig.1 2次元ΔΣ変調器の構成例

2.2 ハイレベル設計

ハイレベル設計には R. Schreier による MATLAB ツールボックスを用いた。また、時間と空間の $\Delta \Sigma$ 変調ループの分離に使用する空間フィルタには、音 場の集束角度によりカットオフ周波数を変化させた FFT を用いる低域通過フィルタを用いた。

パラメータの調整の結果,帯域外の雑音伝達関数 の利得を 1.5 に制限したカスケード共振器帰還型

(CRFB)構成の高次 $\Delta \Sigma$ 変調器と FFT を用いる空間低域フィルタを組み合わせることで、時間 5 次・空間 5 次まで安定に動作する 2 次元 $\Delta \Sigma$ 変調を設計することができた。Fig,2 に設計された時間 5 次の $\Delta \Sigma$ 変調システムのブロック線図を示す。

設計の結果, Fig.2 で示される定数乗算器の係数は,



Fig.2 時間5次のΔΣ変調システムの構成

 $b_1 = 0.0007, \quad c_1 = c_2 = c_3 = c_4 = c_5 = 1, \quad a_1 = 0.0007,$ $a_2 = 0.0087, \quad a_3 = 0.0554, \quad a_4 = 0.2502, \quad a_5 = 0.5562$ $\geq t_3 \supset t_{-\infty}$

3. シミュレーション

3.1 想定したシステム

2次元ΔΣ変調を用いる集束音場発生システムを 想定した数値シミュレーションを行った。このシス テムは、スピーカを円周上に配置したアレイを持ち、 指定された集束点に一定周波数の連続正弦波を発生 させる。シミュレーションの条件は、

スピーカアレイ半径:0.5m

空間チャンネル数:2048

焦点の位置:距離 3m,角度 10°

オーバサンプル比:1~128

発生信号の周波数:1kHz

である。焦点位置で観測された波形をサンプル点数 2048×8 点でサンプルしてパワースペクトル密度関 数を求め,直流から 8kHz までの周波数帯域で SN 比の dB 値 *snr* を計算した。*snr* より,等価ビット数 *R*bit を,

Rbit = (snr - 1.76)/6.02

により求めた。

変調器の次数を, (a)~(d)のように設定し, 等価ビ ット数を比較した。 (a)時間5次ΔΣ(T5) (b)空間5次時間1次ΔΣ(S5T1) (c)空間5次時間2次ΔΣ(S5T2)

(d) 空間 5 次時間 5 次 Δ Σ (S5T5)

時間のみの $\Delta \Sigma$ 変調(a)では,空間 $\Delta \Sigma$ 変調ブ

ロックの代わりに0レベルをしきい値とする1ビッ ト量子化器アレイが使われている。

3.2 帯域制限フィルタ無しの場合

1ビットの符号化出力で,空間チャンネル数と同 じ個数のスピーカを駆動した場合を想定したシミュ レーションを行った。Fig.3 に空間5次・時間1次 の2次元ΔΣ変調を用いた場合の集束点での観測波 形,Fig4にそのパワースペクトル密度関数を示す。 Fig.5に各変調器の等価ビット数とオーバサンプル 比(OSR)の関係を示す。このグラフからは,帯域制 限フィルタを用いない場合は,時間の次数を変えて も (S5T1, S5T2, S5T5),SN 比の差が認められ ないことがわかる。



Fig.3. 集束位置での観測波形(空間5次時間1次ΔΣ, 帯域制限フィルタ無し)



Fig.4. 集束位置での観測波形のパワースペクトル密度関数(空間5次時間1次ΔΣ,帯域制限フィルタ無し)



Fig.5. 集束位置での SN比(等価ビット数)と OSR の関係(空間5次時間1次ΔΣ,帯域制限フィルタ無し)

2 次元 $\Delta \Sigma$ 変調との比較に用いている時間のみの $\Delta \Sigma$ 変調 (T5) では、低いオーバーサンプル比(OSR) では SN 比が低いが、OSR を増加すると、 Rbit 値 が急に増加する。OSR が 32 を超えると、時間のみ の $\Delta \Sigma$ 変調の Rbit 値は 2 次元 $\Delta \Sigma$ 変調を用いるも のより高くなる。

以上の結果から、帯域制限フィルタを用いない場 合、空間ΔΣ変調を導入した効果は明確に現れてい ないことがわかる。

3.3 帯域制限フィルタ有りの場合

1ビットの符号化出力で駆動する場合,空間チャ ンネル数と同じ個数と間隔を持つスピーカアレイが 必要となるが,実装を考えると現実的ではない。ま た,帯域制限フィルタを挿入することで SN 比も改 善されることが示されている。そこで,1ビット出 力を空間的な帯域制限フィルタで処理し,空間的間 引き(spatial decimation)してスピーカを駆動す る場合を想定してシミュレーションを行った。

Fig.6 に空間 5 次・時間 1 次の 2 次元 Δ Σ 変調を 用い,帯域制限フィルタに,変調器に用いたものと 同じ特性のフィルタを用いた場合の,集束点での観 測波形を示す。帯域制限フィルタ無しの場合と比較 すると、雑音が低減されていることがわかる。Fig7 に、波形のパワースペクトル密度関数を示す。高周 波数領域での雑音のレベルが低下し、等価ビット数 も 6bit 程度向上していることがわかる。



Fig.6. 集束位置での観測波形(空間5次時間1次ΔΣ, 帯域制限フィルタ有り)



Fig.7. 集束位置での観測波形のパワースペクトル密度関数(空間5次時間1次ΔΣ,帯域制限フィルタ有り)



Fig.8. 集束位置での SN 比(等価ビット数)と OSR の関 係(空間 5 次時間 1 次 Δ Σ, 帯域制限フィルタ有り)

Fig.8 に各変調器の等価ビット数とオーバサンプ ル比(OSR)の関係を示す。帯域制限フィルタを用い ることにより、OSR 増加による SN 比向上率の時間 の次数による差が明確になったことがわかる。時間 2 次(S5T2)は時間 1 次(S5T1)よりも等価ビッ ト数の増加率が高い。また、空間 5 次・時間 5 次 (S5T5)は、時間のみの 5 次(T5)と同じ等価ビ ット数増加を示しながら、T5 より高い等価ビット数 であることがわかる。

OSR が低い場合の、2次元ΔΣ変調の時間のみの ΔΣ変調に対する優位性も明確である。例えば、空 間5次・時間2次のΔΣ変調を用いると、16倍オー バサンプル(サンプリング周波数 256kHz)で、 104.6dB(等価ビット数17.1)のSN 比が得られる ことが示された

スピーカアレイ駆動システムの場合,空間帯域制 限フィルタは,受動アナログ素子により構成される ことになる。しかし,今回のシミュレーションでは 2次元ΔΣ変調器のループ内に挿入したものと同じ FFT を用いる空間的低域通過フィルタを用いて計 算を行った。

4. おわりに

周波数領域処理の空間フィルタとハイレベル設計 により、安定に動作する、空間5次・時間5次まで の2次元ΔΣ変調を設計できた

スピーカアレイによる集束音場発生システムを想 定したシミュレーションでは、2 次元ΔΣ変調器の 1 ビット出力を空間帯域制限フィルタで処理するこ とにより、高い SN 比が得られることがわかった。 空間5次・時間2次のΔΣ変調を用いる、スピーカ アレイ半径0.5m、空間チャンネル数2048、サンプ リング周波数256kHzのシステムにおいて、周波数 1kHzの集束音場を、104.6dB(等価ビット数17.1) の SN 比で発生できることが示された

以上の研究成果により,2次元ΔΣ変調の次数の 選択の範囲が拡がったと考えている。オーバサンプ ル比の違いや,使用目的(AD か DA かなど)に応 じた,最適な空間と時間の次数の検討や,空間帯域 制限フィルタの実装方式の検討が,次の課題となる。

参考文献

- Y. Tamura, O Akasaka, and M. Okada : Wavefront generation using a dense array and multidimensional modulation, Jpn. J. Appl. Phys., Vol.36, 3053-3056 (1997)
- [2] Y. Tamura, N. Kawakami, O. Akasaka, M. Okada, K. Koyama: Beam-forming using multidimensional sigma-delta modulation, Proc. of IEEE Ultrasonics Symposium, vol.2, 1077-1080 (1998)
- [3] 岡部智仁,田村安孝,柳田裕隆,伊藤圭一:高 次数2次元ΔΣ変調とサーキュラスピーカアレイ による収束音場形成,日本音響学会研究発表会講 演論文集(CD-ROM), 3-5-12 (2006)