

安定性を向上させた3値制御方式を用いたデジタル直接駆動型スピーカに関する研究

著者	發出 祐基
出版者	法政大学大学院理工学研究科
雑誌名	法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編
巻	59
ページ	1-8
発行年	2018-03-31
URL	http://doi.org/10.15002/00021567

安定性を向上させた3値制御方式を用いたデジタル直接駆動型スピーカに関する研究

A STUDY ON DIGITALLY DRIVEN SPEAKER SYSTEM
USING THREE-LEVEL CONTROL METHOD WITH HIGH STABILITY

發出 祐基

Yuki Hatsude

指導教員 安田 彰

法政大学大学院理工学研究科電気電子工学専攻修士課程

This paper describes a digitally driven speaker system using a 3-level control method with high stability. The problem of conventional system is degradation of sound quality caused by unstable integrator used for mismatch shaper when the amplitude of the input signal is small. In order to solve this problem, we have introduced new mismatch shaper. The effectiveness of the proposed method was demonstrated by simulation using MATLAB/Simulink and implementation and evaluation using FPGA.

Key Words : *digitally driven speaker system, delta-sigma modulator, 3-level unit elements, noise shaping dynamic element matching*

1. はじめに

近年のスマートホンやタブレット端末に代表されるポータブル機器の急速な普及に伴い、「いつでも、どこでも、誰でも」高音質な音楽が手軽に享受できるような時代となった。これらのポータブル機器において、システムのバッテリー寿命や、手軽に持ち運び可能な大きさ・重さは極めて重要な指標である。そのためシステムに搭載されるオーディオシステムの小型軽量化、低消費電力化の需要が高まってきている。

しかしながら現在のオーディオシステムでは、最終的にスピーカをアナログ信号で駆動する方式が一般的であるため、システム内部にデジタル-アナログ変換器(DAC)、アンプ、LCローパスフィルタなどのアナログ回路が必須となっている。通常アナログ回路は、デジタル回路と比較して回路規模が大きく、消費電力も高くなる傾向にある。そのため、小型軽量化、低消費電力化という観点において抜本的な解決策がなく、音質以外の点で大きな差別化を図ることが難しいのが現状である。

この現状に対して、デジタル信号でスピーカを駆動することができるデジタル直接駆動型スピーカシステム(デジタルスピーカ)が提案されている[1]。このシステムは、マルチビット $\Delta\Sigma$ 変調器(DSM)とNoise Shaping Dynamic Element Matching(NSDEM)[2]によるデジタル信号処理によって、PCなどに記録されたデジタル音源を、一度もアナログ信号に変換することなくスピーカを駆動することができる。そのため従来のオーディオ

システムで不可欠であったアナログ回路部が不要となり、システムの小型軽量化、低消費電力化に大きく貢献することができる。

しかしながらデジタルスピーカでは、入力信号振幅レベルが小さくなった際にシステムを安定に保つことが困難となり、音質が大きく劣化してしまう問題がある。これはシステム内部に用いる高次のNSDEMが有する複数のフィードバックループが、不安定になってしまうためである。デジタルスピーカは、複数の出力ユニットを有するシステムであり、各出力ユニットは消費電力の観点から、3つの状態{-1, 0, +1}で制御(3値制御)される。この3値制御を実現するために、通常は3値制御型NSDEM[1]が用いられている。しかし3値制御型NSDEMの特性は、入力信号振幅レベルに非常に強く依存しているため、入力信号振幅レベルが小さくなると、システム内部のフィードバックループが不安定となり、本来意図する信号処理が行われなくなってしまう。そのため音質が大きく劣化をしてしまう。

本論文では、デジタルスピーカの安定性の向上を目的とし、安定性に優れた3値制御型NSDEMを用いたデジタルスピーカ[3]について、シミュレーション、および実装・評価を行うことで、その有用性を検証した。シミュレーションでは、MATLAB/Simulinkを用いたシステムレベルのシミュレーションを行った。実装・評価では、verilog-HDLで記述したシステムをFPGAを用いて実装し、オーディオアナライザによるアナログ特性解析を行

った。

2. 従来手法

本章では、従来のデジタルスピーカについて説明する。デジタルスピーカは、DSM と NSDEM を用いたデジタル信号処理により、デジタル音源をアナログ信号に変換することなくスピーカを駆動することができる最先端のオーディオシステムである。これにより、従来のオーディオシステムで不可欠であった DAC やアンプ、フィルタなどのアナログ回路部をシステムから取り除くことが可能となるため、システムの小型軽量化、および低消費電力化に大きく寄与することが期待される。

(1) デジタル直接駆動型スピーカ

従来のデジタルスピーカは、スピーカの制御方式の違いから、2 値制御型と 3 値制御型の 2 種類に大別される。

a) 2 値制御型デジタルスピーカ

図 1 に 2 値駆動型デジタルスピーカのブロック図を示す。このシステムは、 $M+1$ レベル DSM、 M エLEMENT 2 値制御型 NSDEM、 M 個のドライバ回路、および出力ユニットから構成される。ここで M は出力ユニットの個数を表す。

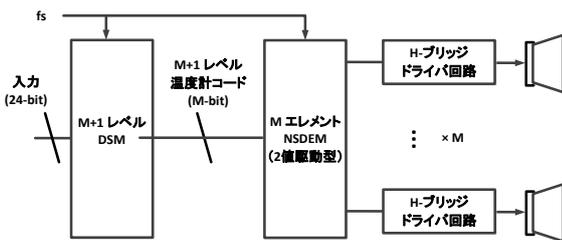


図 1 2 値制御型デジタルスピーカ

システムへ入力される 24 ビットのデジタル音源は、 $M+1$ レベルのマルチビット DSM により M ビットの温度計コードに再量子化される。この温度計コードは、ドライバ回路に入力されて出力ユニットを駆動する。しかし、実際には製造過程で生じるコイル長や抵抗値のばらつきにより各出力ユニットの特性は異なるものとなる。そのため、出力は非線形特性となり再生される音声信号の音質は劣化する。この出力ユニット間の特性ミスマッチに起因する音響特性の劣化を低減するため、DSM とドライバ回路間に NSDEM が用いられる。ここで、図に 2 値制御型 NSDEM のブロック図を示す。

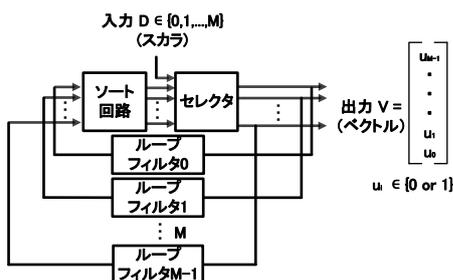


図 2 2 値制御型 NSDEM

2 値制御型 NSDEM は、セレクタ、ソート回路、 M 個のループフィルタから構成される。入力 D は、前段に接続される DSM から出力される温度計コードであり、何個の出力ユニットを駆動するかを示すスカラ信号である。出力 V は M 個の要素からなるベクトル信号であり、各要素がそれぞれの出力ユニットに対応する制御信号となる。この制御信号は、2 値制御型の場合では $\{0, 1\}$ のいずれかの値であり、この制御信号がドライバ回路に入力され、出力ユニットが $\{-1, +1\}$ の 2 値で制御される。2 値制御型 NSDEM では、入力 D と過去の出力ユニットの使用回数に基づいて、駆動する出力ユニットが決定される。出力 V を各ループフィルタにフィードバックし、それぞれの出力ユニットの使用回数を積分する。そして積分した信号をソート回路によってソートして、使用回数の少ない出力ユニットを優先的に選択していく。このアルゴリズムを繰り返すことにより、全ての出力ユニットの使用回数が等しくなるように制御され、ミスマッチに起因するノイズを平均化することができる。NSDEM の特徴は、ループフィルタの伝達関数によって、任意のノイズシェーピング特性を実現できる点である。デジタルスピーカでは、ノイズシェーピング効果の高い 3 次程度の高次の NSDEM を用いることで、ミスマッチの影響を強力にシェーピングした後、音声信号を再生している。

しかしながら 2 値制御型 NSDEM では、図 3 に示すように、出力ユニットを $\{-1, +1\}$ の 2 値でしか制御できないため、入力信号振幅レベルに依らず常に全ての出力ユニットに電力を供給する必要がある。そのため出力は常にオフセットを持った状態となり、ドライバ回路におけるスイッチング頻度が高くなってしまふ。これによりドライバ回路を構成するトランジスタのオン抵抗による伝導損失や、スイッチング損失が大きくなり、消費電力が高くなる傾向にある。したがって低消費電力が求められるポータブルオーディオなどのアプリケーションを想定した場合、このシステムを導入することは難しい。この出力オフセットによる消費電力増大の問題を解決するため、デジタルスピーカでは、次項で説明する 3 値制御型デジタルスピーカが用いられる。

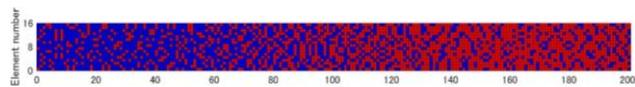


図 3 2 値制御型の駆動パターン (青: -1, 赤: +1)

b) 3 値制御型デジタルスピーカ

図 4 に 3 値駆動型デジタルスピーカのブロック図を示す。このシステムは、 $2M+1$ レベル DSM、 M エLEMENT 3 値制御型 NSDEM、 M 個のドライバ回路、および出力ユニットから構成される。このシステムでは、各出力ユニットを $\{-1, 0, +1\}$ の 3 値で制御することにより、消費電力を削減することができる。

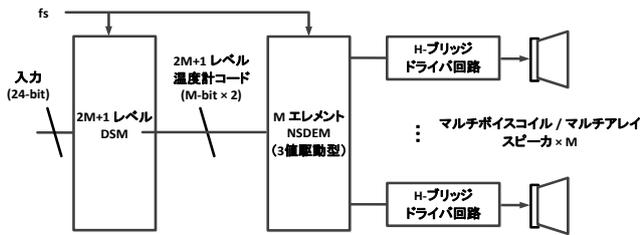


図4 3値制御型デジタルスピーカ

次に、図5に2値制御型NSDEMのブロック図を示す。

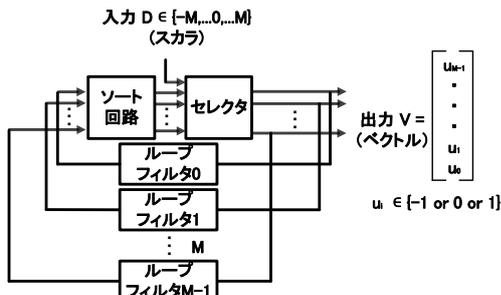


図5 3値制御型NSDEM

3値制御型NSDEMは2値制御型と同様に、セクタ、ソート回路、 M 個のループフィルタから構成される。3値制御型の場合では、出力 V を構成する M 個の要素は $\{-1, 0, +1\}$ のいずれかの値であり、各出力ユニットは $\{-1, 0, +1\}$ の3値で制御される。3値制御型NSDEMのアルゴリズムは、基本的には2値制御型NSDEMと同様である。しかし3値制御型NSDEMで行われる積分は、出力ユニットをプラス方向で使用したのかマイナス方向で使用したのか区別して積分するため、プラス側出力時は使用頻度の低い出力ユニットから順に選択し、この時選択した出力ユニットに対応するループフィルタに $+1$ が入力され、マイナス側出力時は使用頻度の高い出力ユニットから順に選択し、この時選択した出力ユニットに対応するループフィルタに -1 が入力される。これらの動作により、全てのループフィルタの積分値が等しくなるように制御され、出力ユニットの使用回数の平均化が行われる。ここで、3値制御型NSDEMを用いた場合の出力ユニットの駆動パターンを図6に示す。

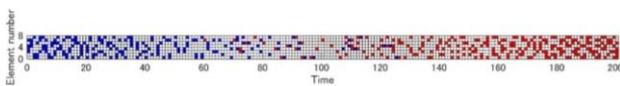


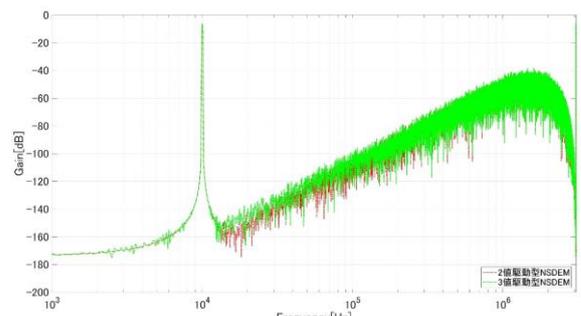
図6 3値制御型の駆動パターン（青：-1，白：0，赤：+1）

図6より、DSMから出力される温度計コードは3値の制御信号であるため、図3に示した2値制御型の駆動パターンと比較して、駆動する出力ユニットの数が少なくなっていることが確認できる。3値制御型NSDEMを用いた場合、駆動する出力ユニットの数は入力信号振幅レベルに応じて増減されるため、2値制御型NSDEMを

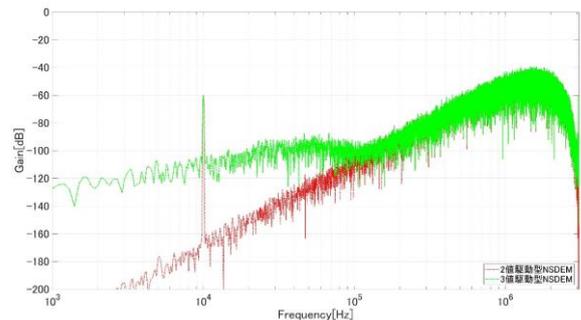
用いた場合における問題であった出力オフセット成分は含まれない。そのため、2値制御型NSDEMを用いた場合と比較して消費電力が大きく削減される。

(2) 問題点

前節では、2値制御型、および3値制御型デジタルスピーカについて概説し、デジタルスピーカでは3値制御が必須であることを説明した。しかしながら、3値制御型デジタルスピーカでは入力信号が小さくなった際に、NSDEMループが不安定となり音質が劣化するという問題がある。本節ではこの問題点について、17レベルのDSMを用いた2値制御型、および3値制御型デジタルスピーカを例に挙げ説明する。この例ではDSMの量子化レベル数を17としているため、出力ユニット数は2値制御型システムでは16個、3値制御型システムでは8個であり、NSDEMを構成するループフィルタの数もそれぞれ16個、および8個である。図7に両システムの -6dB 入力時、および -60dB 入力時における出力スペクトルを示す。ここで、出力ユニットのミスマッチは1%を仮定した。



(a) -6dB 入力時



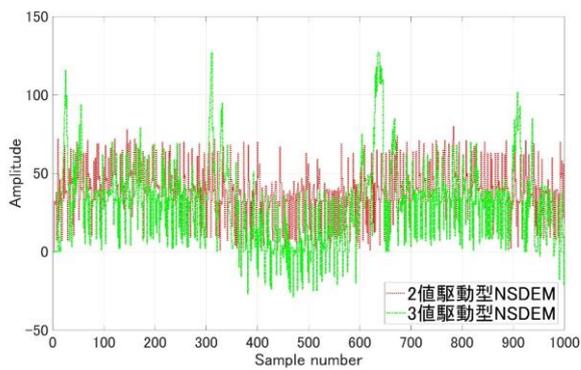
(b) -60dB 入力時

図7 出力スペクトル比較

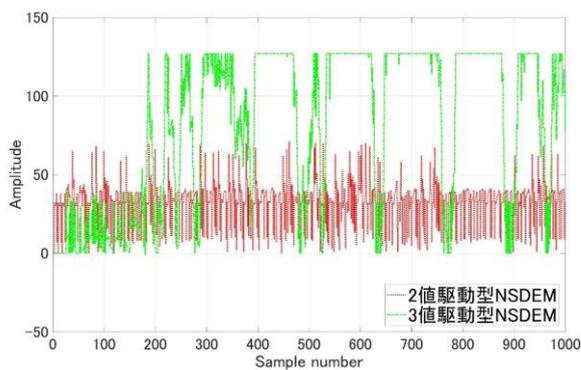
図7(a)からわかるように -6dB 入力時には、両システムのノイズシェーピング特性はほぼ等しいものであり、両システムの特性に大きな差を確認することはできない。しかしながら図7(b)に示す -60dB 入力時には、両システムの特性に大きな差が生じていることが確認できる。すなわち、2値制御型デジタルスピーカでは、 -6dB 入力時と同様に3次のノイズシェーピング特性が実現されている。これに対して3値制御型デジタル

ピーカでは、100kHz よりも低周波帯域におけるノイズシェーピング特性が大きく劣化しており、2 値制御型システムとの SNR の差は 45dB 以上となる。これは 3 値制御型システムでは、小音量再生時において mismatches の影響が十分に低減できず、音質が劇的に劣化することを意味している。

この 3 値制御型デジタルスピーカにおける小信号特性劣化の原因は、3 値制御型 NSDEM を構成するループフィルタの安定性に起因する。すなわち、3 値制御型 NSDEM では、システムへの入力信号振幅が小さくなった場合、駆動する出力ユニット数が極端に少なくなるため、NSDEM を構成するループフィルタの出力値が急激に増大し、本来のアルゴリズムに基づいた信号処理を行うことが不可能な状態になるためである。そのため mismatches の影響を十分に低減することができず、出力される音質の劣化を招く。ここで図 8 に -6dB 入力時、および -60dB 入力時における NSDEM の 1 個分のループフィルタ (図 2, および図 5 中のループフィルタ 0) の出力信号波形を示す。



(a) -6dB 入力時



(b) -60dB 入力時

図 8 ループフィルタの出力信号

NSDEM は図 2, および図 5 に示したように、複数のループフィルタから構成されるフィードバックループを有しているシステムである。このループフィルタは高次のノイズシェーピング特性を実現するため、3 個の積分器を縦続接続した構成が用いられる。この例において、2 値制御型システムでは、NSDEM の入力信号 D の中央

値は 8 となるため、小信号入力時においては入力 $D = 8$ を中心として 6, 7, 8, 9, 10 などの 8 近傍の温度計コードが NSDEM へ入力されることになる。つまり、小信号入力時において全 16 個のうち約半分である 8 個程度のループフィルタへ常に 1 が入力されることになる。そのためシステムへの入力信号振幅が小さくなった場合でも、セレクトラから半数程度のループフィルタに 1 がフィードバックされ、積分処理、および各段最小値の減算処理が正常に繰り返し行われるためループフィルタの安定性は保たれる。図 8 (a) からわかるように、2 値制御型 NSDEM では、-6dB および -60dB いずれの入力においても積分値が急激に増大することなく、安定に動作していることが確認できる。そのため、図 7 に示すように小信号入力時においても優れたノイズシェーピング特性を実現することができる。

これに対して 3 値制御型システムでは、NSDEM の入力信号 D の中央値が 0 となるため、0 を中心として -2, -1, 0, +1, +2 のように 0 近傍の温度計コードが頻繁に NSDEM へ入力されることになる。つまり、駆動する出力ユニットの数が 1, 2 個程度となり全 8 個のうち 1, 2 個程度のループフィルタのみ、セレクトラからのフィードバック値である 1 あるいは -1 が入力され、それ以外のループフィルタは何も入力されない状態になる。先述したように NSDEM では各出力ユニットの使用回数を積分し、その積分結果に基づいて実際に駆動する出力ユニットを決定する。そのため、一度入力信号が入ると、各ループフィルタには何かしらの値が記録された状態となっている。この状態で、先述のループフィルタに何も入力されない状態となった場合、ループフィルタに記録された値は 2 段目以降の積分器で積分が繰り返し行われ、積分値は急激に増大していく。本論文ではこの状態を、NSDEM は不安定な状態であると定義する。このため、図 8 (a) では安定に動作しているが、図 8 (b) では不安定な状態となり積分値が急激に増大し 127 で飽和していることが確認できる (ここでは 127 に飽和器を用いている)。

以上のように、3 値制御型 NSDEM は、小信号入力時において不安定となり音質が大きく劣化してしまう。そのため、安定性を向上させた新たな 3 値制御型のシステム構成が求められている。

3. 提案手法

本章では、3 値制御の新規手法を示し、その手法により実現される 3 値制御型 NSDEM を用いたデジタルスピーカについて説明する。第 2 章では、2 値制御型 NSDEM は 3 値制御型 NSDEM に比べて小信号特性が優れていることを示した。すなわち小信号入力時において、3 値制御型 NSDEM ではフィードバックループを安定に保つことができず、ノイズシェーピング特性が大きく劣化してしまうが、2 値制御型 NSDEM では安定に保つことができ、ノイズシェーピング特性が損なわれにくい性質があ

る。そこで我々は、この2値制御型 NSDEM の優れた安定性に注目し、2値制御型 NSDEM の出力信号を3値制御信号に変換することにより、小信号入力時においても安定に動作する3値制御型 NSDEM [3]を提案した。

(1) 安定性を向上させた3値制御方式

この節では、3値制御の新規手法の基本概念について説明する。3値制御の新規手法は、3値制御型 NSDEM と比較して非常に優れた安定性を有する2値制御型 NSDEM の出力信号を3値制御信号に変換することで実現される。2値制御型 NSDEM から出力される2値制御信号を3値制御信号へ変換するため、図9に示すエンコーダーを用いる。このエンコーダーの真理値表を表1に示す。このエンコーダーは、出力ユニット2個分の2値制御信号を入力とし、出力ユニット1個分の3値制御信号を出力する。図9において、 u_a 、 u_b が入力信号であり出力ユニット2個分の2値制御信号を、 $s(sp, sn)$ が出力信号であり出力ユニット1個分の3値制御信号をそれぞれ示している。このエンコーダーを2値制御型 NSDEM の後段に複数個接続することで、2値制御型 NSDEM を用いて3値制御を行うことが可能となり、安定性を向上させた3値制御型 NSDEM を実現することができる。

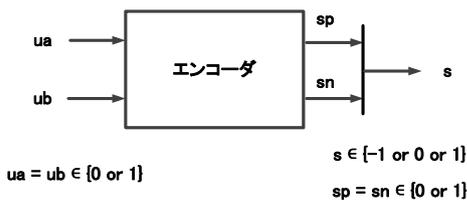


図9 エンコーダーのブロック図

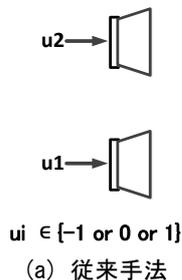
表1 エンコーダーの真理値表

入力		出力		
u_a	u_b	s	s_p	s_n
0	0	-1	0	1
0	1	0	0	0
1	0			
1	1	1	1	0

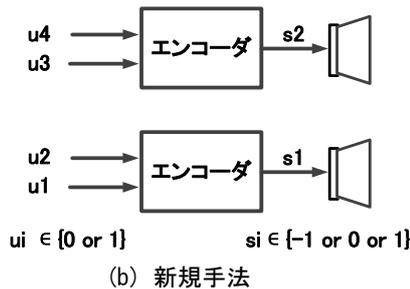
図10に出力ユニット数が2個の場合における従来の3値制御型 NSDEM を用いた場合の出力方式と、提案3値制御型 NSDEM を用いた場合の出力方式の比較を示す。従来手法では、3値制御型 NSDEM から3値制御信号である u_2 および u_1 が出力され、直接2個の出力ユニットに入力されていた。

これに対し提案手法では、まず2値制御型 NSDEM から出力される出力ユニット4個分の2値制御信号 ($u_1 \sim u_4$) を、2個分ずつのペア (u_1 と u_2 , u_3 と u_4) に分ける。その後 u_1 と u_2 , u_3 と u_4 はそれぞれ別々のエンコーダーに入力され、入力されたペアの組み合わせに応じて3値制御信号である s_2 および s_1 が出力される。そして s_2 , および s_1 は各出力ユニットに入力される。こ

の手法を用いることにより、2値制御型 NSDEM の優れた安定性を継承しつつ、3値制御を行うことができる。すなわち、小信号入力時においても極めて安定に動作する3値制御型 NSDEM を実現することが可能となる。



(a) 従来手法



(b) 新規手法

図10 出力方式比較

(2) システム構成

この節では、前節で説明したエンコーダーにより実現される提案3値制御型 NSDEM を用いたデジタルスピーカについて、その具体的なシステム構成、および信号処理プロセスについて述べる。図11に提案3値制御型 NSDEM を用いたデジタルスピーカのシステム構成を示す。このシステムは、 $2M+1$ レベル DSM (2値)、 $2M$ エlement NSDEM (2値)、 M 個のエンコーダー、ドライバ回路および出力ユニットから構成される。第3章で説明したように、システムを構成する NSDEM は2値制御型であるため、小信号入力時においても安定性を維持しつつ、出力ユニットを3値制御することができる。

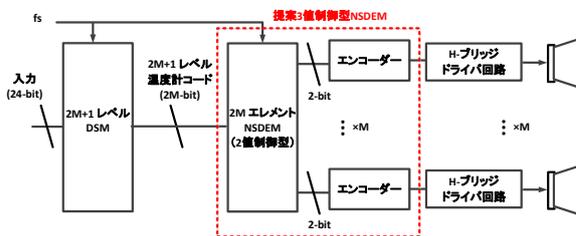


図11 提案手法のシステム構成

次に、 $M=8$ の場合におけるシステムを想定し、信号処理過程について詳しく説明する。このシステムでは、以下の流れで信号処理が行われる。

- ① システムへ入力された 24bit のオーディオ信号は DSM により再量子化され、16bit の温度計コードが

出力される。

- ② 温度計コードは NSDEM に入力され、温度計コードが示す大きさと、過去の出力ユニットの使用回数を基にしてシャッフリングされる。
- ③ シャッフリングされたコードは 2bit 毎に分けられ、8 個のエンコーダーにそれぞれ入力される。
- ④ 8 個のエンコーダーは、表 1 に示す真理値上に従い 3 値制御信号を出力する。
- ⑤ 3 値制御信号は各出力ユニットに入力され、各出力ユニットから $\{-1, 0, +1\}$ に応じた音圧が生成される。

例として、 $\Delta \Sigma$ 変調器の出力が 11 (3 値出力では+3に相当する) であるサンプルにおける上記の信号処理過程を図 12 に示す。

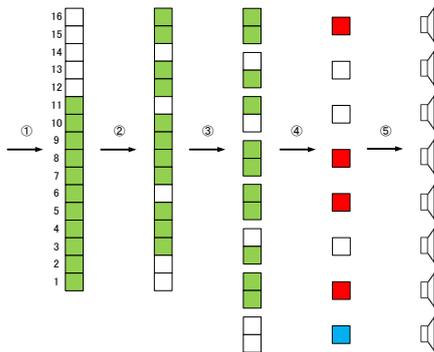
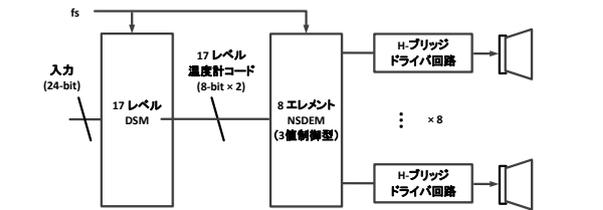


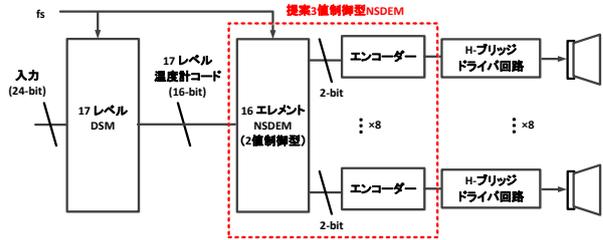
図 12 提案手法の信号処理過程

4. シミュレーション

提案手法の有用性を Mathworks 社の MATLAB/Simulink を用いたシミュレーションにより検証した。このシミュレーションでは、図 13 に示すように、従来 3 値制御型 NSDEM と提案 3 値制御型 NSDEM を用いた 2 つのシステムの特性を比較する。表 2 にシミュレーション条件を示す。従来システム、および提案システム共に、17 レベルの DSM を用いた。出力ユニットについては、1% のミスマッチを有する 8 個の出力ユニットを想定した。また、システムに用いた DSM、および NSDEM のループフィルタの構成を図 14 に、また各係数を表 3 にそれぞれ示す。DSM、および NSDEM は 3 次の構成を採用した。図中の MIN1~MIN の値は、各ループフィルタの 1 段目、2 段目、3 段目の積分器出力の最小値を表している。NSDEM では各出力ユニットの使用回数を、動作クロック毎に積分していく。そのため高次のループフィルタでは、積分器の段数を重ねる毎に積分値は大きな値となり、その値は時間経過と共に増大し続ける。これを防ぐために各段積分器出力の最小値を減算することにより、ソート回路で決定される出力ユニットの優先順位に影響を与えることなく積分器の安定性を保っている。



(a) 従来 3 値制御型 NSDEM を用いたデジタルスピーカ

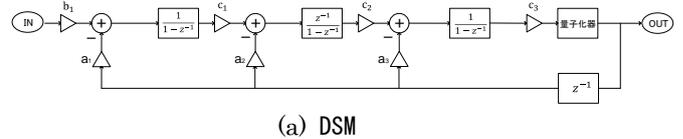


(b) 提案 3 値制御型 NSDEM を用いたデジタルスピーカ

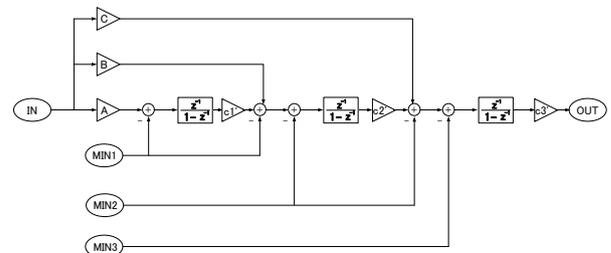
図 13 比較したシステム

表 2 シミュレーション条件

入力信号	10kHz 正弦波
$\Delta \Sigma$ 変調器動作周波数	6.144 MHz
量子化レベル数	17 レベル
出力ユニット数	8
ミスマッチ	1%



(a) DSM



(b) NSDEM

図 14 $\Delta \Sigma$ 変調器・NSDEM の各構成

表 3 DSM・NSDEM の各係数

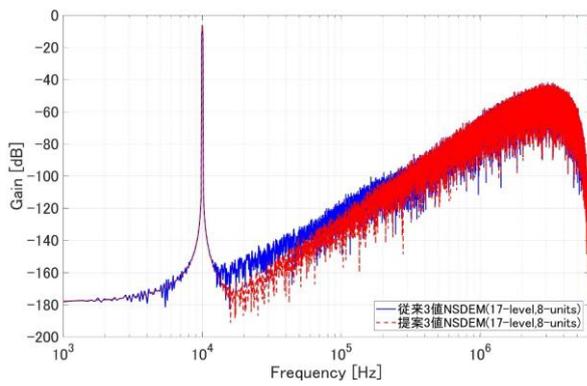
(a) DSM (3 次)

	a1	a2	a3	b1	c1	c2	c3
3次DSM	1	3	3	1	1	1	1

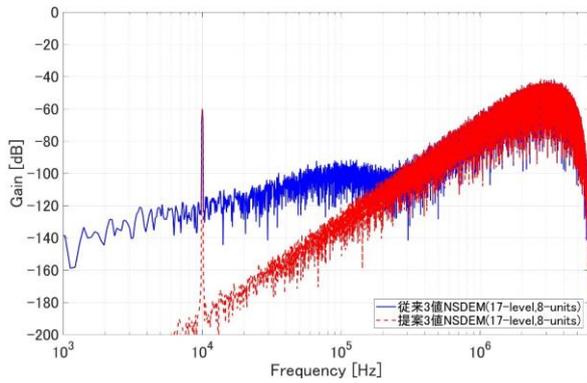
(b) NSDEM (3 次)

	A	B	C	c1'	c2'	c3'
3次NSDEM	1	8	32	1	1	1

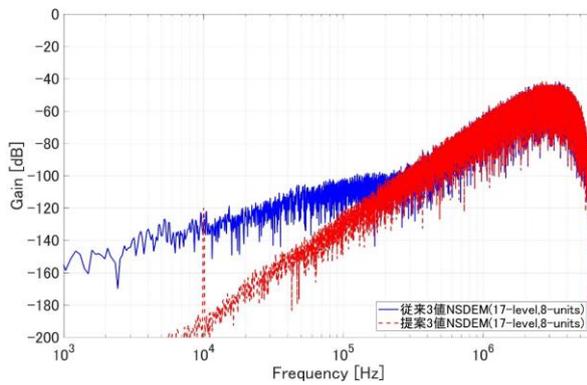
図 15 に、入力信号振幅レベルが -6dB、-60dB、-120dB における FFT 解析による各システムの出カスペクトルを示す。また出カスペクトルから算出した SNR を表 4 に示す。



(a) -6dB 入力時



(b) -60dB 入力時



(c) -120dB 入力時

図 15 出力スペクトル

表 4 SNR 比較

	入力レベル [dB]		
	-6	-60	-120
従来3値システム	128.6	34.0	-25.2
提案3値システム1	134.3	95.9	34.5

図 15(a)より、両システム共に 3 次のノイズシェーピング特性を確認でき、SNR も 130dB 程度と非常に高い値を実現している。このことから、-6dB 入力時においてはどちらのシステムも安定に動作しているといえる。しかしながら図 15(b)(c)では、従来 3 値制御型 NSDEM を用いたシステム出力スペクトルが、大きく劣化していることがわかる。これは第 2 章で述べたように、入力信号が小さくなったため 3 値制御型 NSDEM が不安定になった

ためである。これに対して提案 3 値制御型 NSDEM を用いたシステムでは、図 15(a)と同様に、3 次のノイズシェーピング特性が実現されていることが確認できる。このことから提案 3 値制御型 NSDEM を用いることにより、小信号入力時においても安定に動作するデジタルスピーカが実現されていることがわかる。

5. 実装・評価

従来、および提案システムを verilog-HDL で設計し、PCB と FPGA (Xilinx 製 Kintex-7 XC7K70T) を用いて実装を行い、アナログ特性の評価を行った。実装したシステムは、第 4 章で比較したシステムと同様のものである。動作周波数は 6.144MHz であり、出力ユニットについては、8Ω のセメント抵抗 8 個で構成されるダミーロードを用いた。図 16 に測定環境の概略図を示す。PC から USB 経由で入力される 24bit の入力信号は、I2S 信号に変換された後、インターポレーションフィルタにより 8 倍にアップサンプリングされる。この時に発生するイメージ信号はフィルタにより強力に減衰される。その後 FPGA に入力され、ドライバ回路、およびダミーロードに入力される。8 個の H ブリッジ回路を内蔵したドライバ回路 (Trigence Semiconductor 社製) の出力信号はダミーロードに入力されると同時に、加算回路に入力され、加算結果のアナログ信号はオーディオアナライザ UPV (Rohde&Schwarz 社製) に入力される。なおドライバ回路に供給する電圧は 3.3V とした。

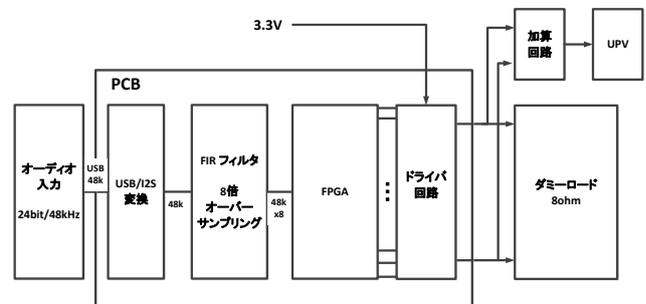
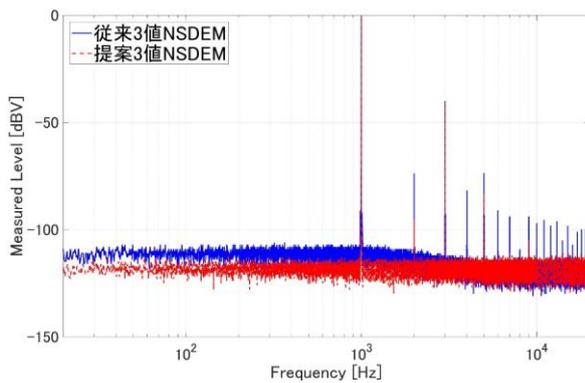
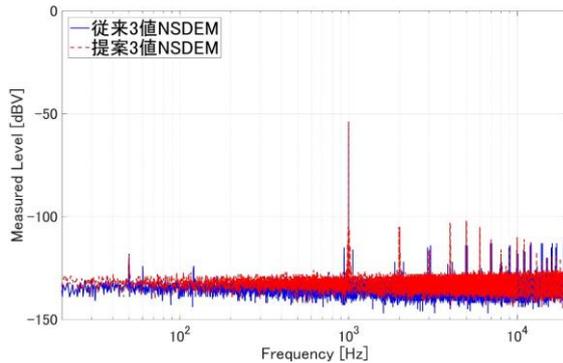


図 16 実測環境概略図

評価ではオーディオアナライザを用いた FFT 解析を行った。図 17 に -6dB、および -60dB 入力時における出力スペクトルを示す。図 17(a)より、可聴帯域内における高調波歪成分が大きく低減されていることが確認できる。また、ノイズフロアも従来システムよりも提案システムの方が低いことがわかる。しかし図 17(b)では、従来、および提案システム共に同等の特性であることがわかる。これは、評価系に用いた抵抗のミスマッチ成分が小さく、提案システムの効果がわかりにくい状態であるためであると考えられる。そのため評価系を再検討した詳細な評価が必要である。



(a) -6dB 入力時



(b) -60dB 入力時

図 17 出力スペクトル

次に従来、および提案システムの回路規模の比較を行った。両システムのルックアップテーブル (LUT) を比較したものを表 5 に示す。

表 5 LUT 比較

	使用数	使用可能数	使用率 [%]
従来3値NSDEM	4046	41000	9.9
提案3値NSDEM	8841		21.6

表 5 から提案システムは、従来システムと比較して LUT の使用率が 11.7% 高いことが確認できる。これは M 個の出力ユニットを有するシステムを実現する場合、従来システムでは M エLEMENT の 3 値制御型 NSDEM が必要であったのに対して、提案システムでは $2M$ エLEMENT の 2 値制御型 NSDEM が必要になるためである。NSDEM ではELEMENT 数が増えると、NSDEM を構成するソート回路の回路規模が指数関数的に増加する。そのため提案手法を用いた場合、 M 個の出力ユニットに対して、 $2M$ エLEMENT のソート回路が必要となるため、よりこの影響を受けやすくなってしまっているのが現状である。

この課題点の解決手法の一つとして、ツリー構造 NSDEM を用いる手法がある。

この手法では、低値ELEMENT の NSDEM を複数用いて、並列処理させることにより、多値ELEMENT の NSDEM と同等の性能を維持しつつ、NSDEM 全体の回路規模を削減することができる。このツリー構造 NSDEM を用いることにより、本提案手法の性能を維持しつつ、回路規模の増大の課題を解決できると考えられる。

6. まとめ

本論文では、デジタルスピーカの安定性の向上を目的とし、安定性を向上させた 3 値制御型 NSDEM を用いたデジタルスピーカの有用性について、MATLAB/Simulink によるシミュレーション、FPGA による実装・評価を行い検証した。その結果、従来の問題であった小信号入力時における安定性が向上し、音質を大幅に改善できることを確認することができた。

今後の課題として、更に詳細な評価、および回路規模削減を目的とした新たなシステム構成の検討を行っていきたいと考えている。

謝辞 :

本研究を行うにあたり、数多くのご指導を戴いた法政大学理工学部安田彰教授に深謝の意を表す。また、本研究に関する様々なご助言を戴いた西勝聡氏、同研究室の皆様、研究環境の維持・管理をしてくださりました吉野理貴氏に感謝の意を表す。また、本研究に多大なる協力を戴いた株式会社 Trigence Semiconductor 様に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) M. Yoshino, M. Iwaide, D. Kuniyoshi, H. Ohtani, A. Yasuda, and J. Okamura, "A novel audio playback chip using digitally driven speaker architecture with 80%@-10dBFS power efficiency, 5.5W@3.3V supply and 100dB SNR," IEEE Custom Integrated Circuit Conference, San Francisco, CA, USA, 2011.
- 2) A. Yasuda, H. Tanimoto, T. Iida, "A third-order Δ - Σ Modulator Using Second-Order Noise-Shaping Dynamic Element Matching," IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 33, pp. 1879-1886, 1998.
- 3) Yuki Hatsude, Go Harumi, Satoshi Saikatsu, Michitaka Yoshino, Akira Yasuda, "Third-Order Mismatch Shaping Technique with Improved Small Amplitude Input Performance for a Digitally Driven Speaker System," IEEJ International Conference on Analog VLSI Circuits, Boston, USA, 2016.