

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420360

研究課題名(和文) 超高次デルタシグマ変調器を用いた高精度・高能率A/D変換器の開発

研究課題名(英文) High-accuracy and high-efficiency A/D converters using super-high-order delta-sigma modulators

研究代表者

鮫島 俊哉 (Samejima, Toshiya)

九州大学・芸術工学研究院・准教授

研究者番号：00298192

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：これまで実現されていない超高次のデルタシグマ変調器(変調器)を、ロバスト制御理論に基づいて理論的に設計する方法を構築した。ロバスト制御理論としては、 $\mu$ 設計法、およびスライディングモード制御理論を採用した。変調器の設計問題を、それぞれの制御理論によって解釈することができるように、変調器のシステム構成を再構築し、それぞれの制御理論を適用する際のパラメータ値の選択、評価関数の設定の最適化を含めたシステムの再構成を行った。構築した方法によって、11～12次に至りしかも高い安定性と信号対量子化雑音比を有する超高次の変調器を実現し、それを用いた高精度・高能率のA/D変換器の可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：This work has developed a design methodology for super-high-order delta-sigma ( ) modulators using a robust control theory. The  $\mu$ -synthesis method and sliding mode control theory were adopted for the design of the modulators. The structure of the modulator was rearranged such that designing the loop filter involved in the modulator was translated into a generalized robust control problem in each control theory. Then, a guide in selecting suitable mathematical parameters used in each control theory and circuit parameters of the rearranged modulator was given. Using the developed design methodology, 11-12th order modulators, which can achieve higher signal-to-noise ratio with higher stability than conventional modulators, have been realized. These super-high-order modulators could be applied to high-accuracy and high-efficiency analog-to-digital converters.

研究分野：音響工学

キーワード：符号化 A/D変換器

1. 研究開始当初の背景

一般的に、標準化周波数と量子化 bit 数の両者を大きくすれば、当然ながら高精度なアナログ/デジタル変換器(A/D 変換器)を実現することができる。しかし、それに伴って量子化器の複雑度と伝送容量は単純に増加することになるため、ハードウェアの構成および記録媒体・伝送経路の有効利用という観点からは、望ましいものではない。

ところで、A/D 変換器において、もし標準化周波数を十分高くできれば、量子化 bit 数がたとえ 1 bit のみであっても理論的にはダイナミックレンジを十分大きくすることは可能である。このように量子化 bit 数を 1 bit とすることの利点は、(1)ハードウェア構成が非常に単純となること、(2)逆量子化器(D/A 変換器)が不要となるため部品の精度に頼ることなくクロックの精度のみを利用した D/A 変換ができること、(3)デジタル信号処理の観点からは乗算が単純なゲート回路となり著しく簡素化できること、など幾つかあげることができる。だが実際にどの程度の標準化周波数が必要となるかを計算すると、非現実的な高さの標準化周波数になってしまう。

そこで、デルタシグマ変調器(変調器)を導入した 1 bit 高速標準化方式による A/D 変換器が提案されている[1]。図-1 と図-2 に、通常マルチビット方式による A/D D/A 変換システムと、提案されている 1 bit 高速標準化方式による A/D D/A 変換システムの構成を比較して示している。変調器(図-2 の破線で囲われた部分)では、量子化器 Q を帰還ループの中に設けることにより、Q において発生する量子化雑音に高域上りの周波数特性を持たせている。それによって、信号周波数帯域内では量子化雑音のパワーを小さくすることができるため、1 bit 量子化であっても現実的な標準化周波数で十分なダイナミックレンジを得ることができる。

また、量子化 bit 数を減らした分だけ標準化周波数を高く設定することで、伝送容量は一定に保ちながら、通常マルチビット方式では符号化できない高い周波数成分まで符号化することも可能となる。逆の言い方をすれば、

通常マルチビット方式と同じ周波数帯域を符号化できればよい場合には、それに必要な伝送容量を節約することができるわけである。

帰還ループ内の Q を、さらに変調器に置き換えていく(つまり変調器を入れ子構造にする、これを変調器の高次化ということ)により、信号周波数帯域内の信号対量子化雑音比(SNR)をさらに高くできるが、量子化器の非線形性のために 3 次以上の変調器ではその動作が不安定となることがある。特に 1 bit 量子化器は非線形性が非常に強くなるため、安定性が保証された有効な変調器の設計が非常に困難となる。このようなことから、現状の 1 bit 高速標準化方式の A/D 変換器では、高々数次程度の変調器を用いたものまでしか実現されておらず、しかもその設計は試行錯誤的な手法によるものがほとんどである。

研究代表者らは最近、変調器における 1 bit 量子化器を加法的な不確かさを有する制御対象とみなし、変調器の設計にロバスト制御理論を導入することを試み始めてきている[2]。そのような設計手法によって、上述の問題を克服できる見通しを得たため、本研究を計画した。

2. 研究の目的

本研究では、変調器の設計手法として、一般的に行われてきた試行錯誤的なものではなく、ロバスト制御理論に基づいた理論的な手法を構築する。構築した手法により、これまで実現されていない超高次の変調器を設計し、それを用いた高精度・高能率の A/D 変換器を開発する。数 10 次を超える超高次の変調器がもし実現できれば、量子化 bit 数がたとえ 1 bit であっても、現実的な標準化周波数のまま高い SNR が得られ、しかも通常マルチビット方式では不可能な広帯域信号のデジタル記録が、非圧縮でかつ伝送容量を増やすことなく可能となる。それを以て、音響・映像信号を対象とした記録媒体・伝送経路のさらなる有効利用を図ることを目的とする。

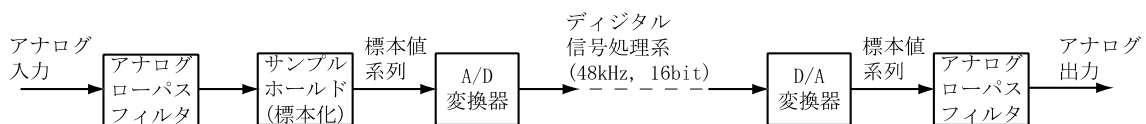


図-1 通常マルチビット方式による A/D, D/A 変換システム

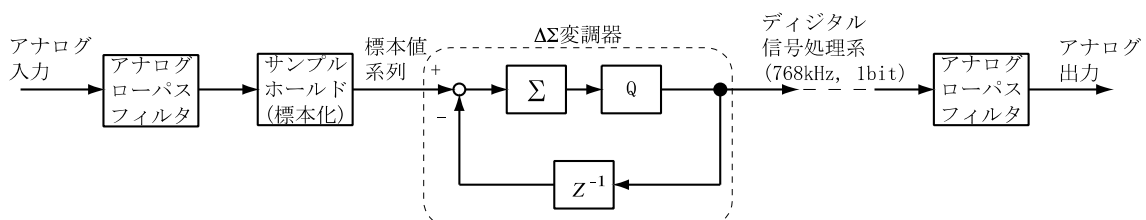


図-2 ΔΣ変調器を導入した 1 bit 高速標準化方式による A/D, D/A 変換システム：  
Σは積分器、Qは 1bit 量子化器、z<sup>-1</sup>は 1 サンプル遅延を表す

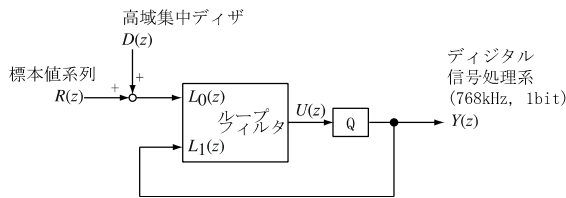


図-3 高次の 変調器を一般化したブロック線図，および高域集中ディザの導入

具体的には， 変調器の設計問題を，制御対象(量子化器)のモデル化誤差(線形利得としてモデル化した際の誤差)に対するロバスト安定化と，制御対象の外乱(量子化雑音)に対する感度を低減させることを目的とするような，ロバスト制御問題として取り扱う。本研究ではそれを解く手法として， $\mu$ 設計法と呼ばれるロバスト制御器設計手法を使用する。さらに，同じくロバスト制御理論の枠組みで発達してきた，スライディングモード制御理論の導入も試みる。

構築した設計手法によって，高いSNRを保持しつつかつ高い安定性も有するような，超高次の 変調器の設計にチャレンジし，それをを用いた高精度・高能率のA/D変換器をハードウェアとして実装することを目指す。

### 3. 研究の方法

#### (1) $\mu$ 設計法による 変調器の設計

最初に， 変調器の設計に対して，ロバスト制御理論の一つである $\mu$ 設計法を効果的に適用するための検討を行った。

変調器(図-2の破線で囲われた部分)を高次化した場合に，そのブロック線図を一般化して表すと，図-3のようなフィードバックシステムとなる。本研究では，量子化器Qを線形利得としてモデル化し，それを加法的不確かさを有する制御対象とみなした。また，ループフィルタ $L_0(z)$ ， $L_1(z)$ をフィードバック制御器とみなした。このことにより，変調器の設計問題は，制御対象の不確かさに対してフィードバックシステムの安定性を保ちつつ，信号周波数帯域内のSNRを大きくするような $L_0(z)$ ， $L_1(z)$ を求めるという，ロバスト制御問題として取り扱うことができるようになった。

本研究においては， $\mu$ 設計法を適用する際のパラメータ値の選択，評価関数の設定について，適切な目安を求めた。さらに，システム構成上の工夫として，図-3に示すように高域集中ディザの付加を新たに導入して，安定性の改善を試みた。

#### (2) スライディングモード制御理論による 変調器の設計

次に，同じくロバスト制御理論の枠組みで発達してきた，スライディングモード制御理論の導入を試みた。スライディングモード制御は，時変のスイッチング入力によってロバ

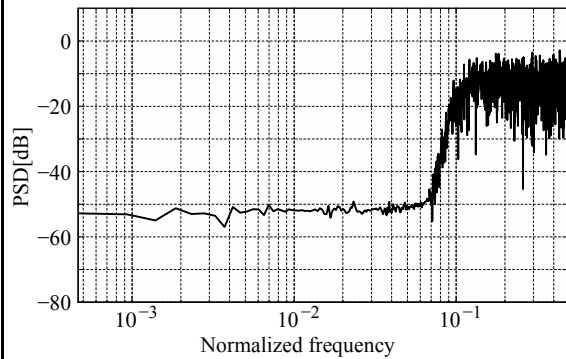


図-4 高域集中ディザの周波数特性

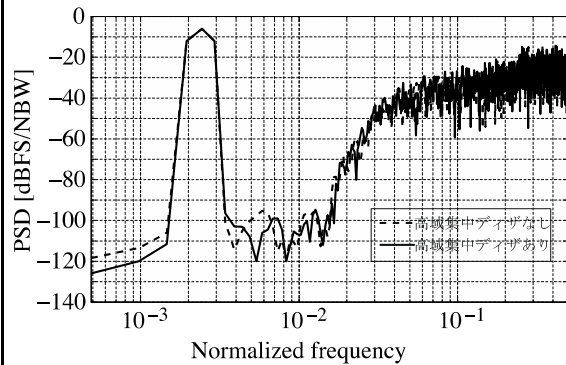


図-5 正弦波入力における量子化器の出力のPSD ( $\mu$ 設計法，5次 変調器)

ストな制御効果を得る手法であり， $\mu$ 設計法など他の手法に比べて，ロバスト制御器設計が容易であるという利点を有する。

まず， 変調器の設計問題をスライディングモード制御理論によって解釈することができるように， 変調器のシステム構成を再構築し，当該の設計問題を，スライディングモード制御器を設計する問題に落とし込む作業を行った。そして，スライディングモード制御理論を適用する際のパラメータ値の選択，評価関数の設定の最適化を含めたシステムの再構成を行った。

### 4. 研究成果

#### (1) $\mu$ 設計法による 変調器の設計

##### 提案する 変調器の設計

構築した $\mu$ 設計法による手法[2]によって，オーバーサンプリング比32の5次 変調器を設計した。高域集中ディザは， $\pm 0.01$ に一樣分布する確率変数によって生成した時間波形を，カットオフ周波数が正規化周波数0.2となるハイパスフィルタにかけることで作成した。図-4に，その高域集中ディザのワースペクトル密度(PSD)を示した。正規化周波数0.1以上の帯域にパワーが集中するような，所望の高域集中ディザとなっている。

##### 設計した 変調器の性能評価

図-5に，正規化周波数5/2048，振幅0.5の正弦波を入力信号としたときの，量子化器の出力のPSDを示す。高域集中ディザを加え

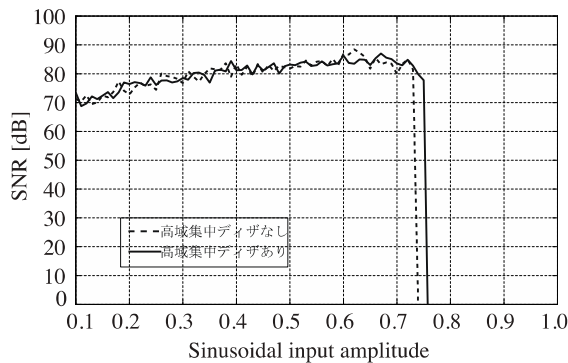


図-6 正弦波入力振幅の大きさによる SNR の変化 ( $\mu$  設計法, 5 次 変調器)

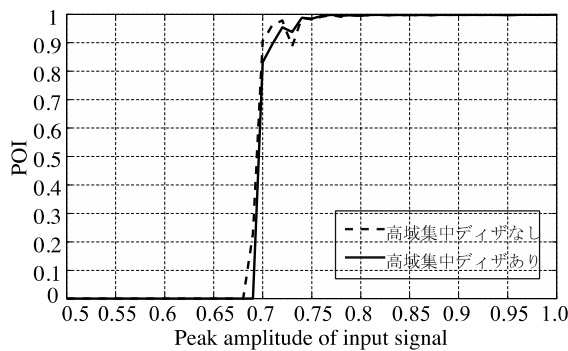


図-7 正弦波入力振幅の大きさによる POI の変化 ( $\mu$  設計法, 5 次 変調器)

たととしても, PSD に大きな悪影響は与えず, 理想的な高域上りのノイズシェイピング特性が得られている。

図-6 は, 正規化周波数 5/2048 の正弦波を入力信号としたときの, 正弦波の振幅に対する SNR の変化を示したものである。SNR が 0 dB 以下となるところは, 変調器が所望の安定した動作をしていないことを示している。図-7 には, 縦軸を POI (Probability of Instability) としたものを示した。POI は,  $2^{16}$  Taps の信号を入力したときに, 変調器が不安定な動作をする時間の割合を示したものである。POI が 0 のときは常に安定しており, 1 に近くなるほどすぐに不安定な動作に至ってしまうことを表している。図-6, 7 より, 高域集中ディザを導入することによって,  $\mu$  設計法による変調器の安定性がわずかであるが改善されることが分かった。

$\mu$  設計法と高域集中ディザの導入により, 従来のような試行錯誤的な手法に頼らずに, 簡便・迅速に性能の良い変調器を設計することができるようになったと考えている。

さらに, 構築した設計手法によって, これまでに実現されていない, 高い SNR を保持しつつかつ高い安定性も有するような, 超高次の変調器の設計にトライした。その結果,  $\mu$  設計法においては, 既往の研究では実現できていなかった高い安定性と SNR を有する 11 次の変調器を実現できた。

## (2) スライディングモード制御理論による変調器の設計

### 提案する設計手法の概要

図-8 に, 変調器の設計問題をスライディングモード制御理論によって解釈することができるように再構築した, 新しい変調器のシステム構成を示した。なお, このシステム構成をスライディングモード制御理論の観点からみると, 図-9 のようになる。

提案する手法では, まず何らかの既往の設計手法によって, ループフィルタ  $L(z)$  のプロトタイプを作成する。次に,  $L(z)$  を状態空間表現したときの状態方程式の係数行列  $A, B$ , および出力方程式の係数行列  $C$  を用いて, スライディングモード制御理論により, 切り換え超平面を規定する行列  $S$ , およびスライディングモードコントローラを作成する。そして, 先のプロトタイプにおける  $C$  を,  $S$  に置き換える。この置き換えによって変更されたループフィルタを  $L'(z)$  とする。以上の手続きによって, プロトタイプのループフィルタ  $L(z)$  が, より高い安定性を有するループフィルタ  $L'(z)$  となることが期待できる。

### 提案する変調器の設計とその性能評価

構築したスライディングモード制御理論による手法によって, オーバーサンプリング比 32 の 5 次変調器を設計した。プロトタイプのループフィルタは, MATLAB のツールボックスとして実装されている, 関数 `synthesizeNTF()` [3] を用いて作成した。

図-10 に, 正規化周波数 5/2048, 振幅 0.5 の正弦波を入力信号としたときの, 量子化器の出力の PSD を示す。比較対象 (Conventional Method) は, プロトタイプのループフィルタを用いた変調器である。提案手法 (Proposed Method) においても, 理想的な高域上りのノイズシェイピング特性が得られていることが分かる。

図-11 は, 正規化周波数 5/2048, および 30/2048 の正弦波を入力信号としたときの, 正弦波の振幅に対する SNR の変化を示したものである。提案手法のほうが, より大きな振幅の入力信号まで安定に動作することが示されている。

さらに, スライディングモード制御理論を導入した手法においても同様に, 超高次の変調器の設計にトライした。その結果, スライディングモード制御理論においては 12 次の変調器を設計・実現することができた。図-12 は, その 12 次の変調器に, 正規化周波数 5/2048, および 30/2048 の正弦波を入力信号としたときの, 正弦波の振幅に対する SNR の変化を示したものである。なお, 既往の設計手法では, 安定な 12 次の変調器は実現できなかった。

最後に, 正弦波以外の入力信号として, 図-13(a) に示すような, 基本周波数 2/2048, 振幅が時間変化する矩形波を A/D, D/A 変換す

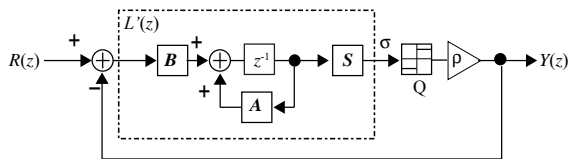


図-8 提案する 変調器

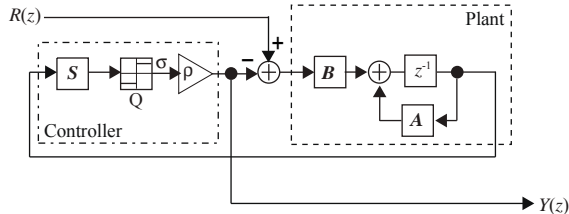


図-9 スライディングモード制御理論における制御系ブロック線図

ることを想定したシミュレーションを行った。この矩形波入力信号を、スライディングモード制御理論による 12 次の 変調器によって 2 値量子化した。その量子化器の出力信号を、カットオフ周波数が正規化周波数  $32/2048$  となるローパスフィルタに通すことで復号化した。その復号化信号を図-13(b)に示す。このような矩形波入力信号を完全に復元することは、標本化定理からいってももちろんできないわけであるが、矩形波信号を 10 秒以上入力しても、変調器が発散することなく動作していることは着目すべき点である。それは、図-13(a)のような振幅が大きい低周波の矩形波は、変調器にとって過入力の状態が続くため、不安定になりやすい信号と言われているからである。

### (3) 今後の展望

補助事業期間最終年度においては、高次変調器による音響信号の符号化伝送を用いた応用システムとして、動電型スピーカの線形・非線形歪みのロバスト制御システムと組み合わせたトータルシステムの開発や、音響信号以外の信号の符号化伝送への展開研究として、無線信号を対象としたバンドパス型高次変調器の開発を実施した。これらについては、既に端緒となる研究成果を発表することができた。

本研究にて構築した、理論的な設計手法によれば、これまでなかなか実現することができなかった数 10 次にもなるとする超高次の変調器を実現することも可能となるはずである。変調器を超高次化していくことによって、信号周波数帯域内の SNR はいくらでも高くすることができるので、伝送容量節約のための可逆圧縮符号化の代替方式として変調器を位置付けることもできる。例えば、本研究にて実現した 12 次変調器では、エンコーダが行う処理はアップサンプリングのための補間処理と高々 12 次のディ

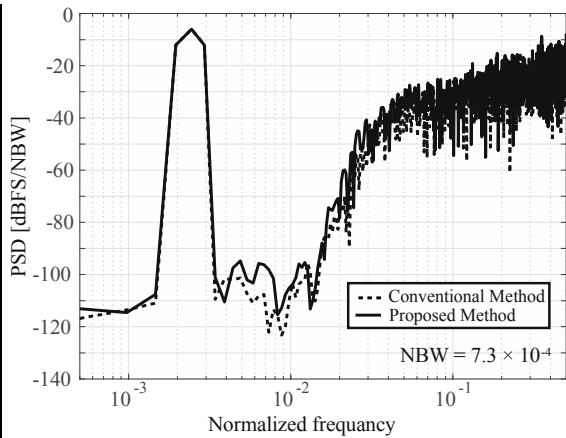
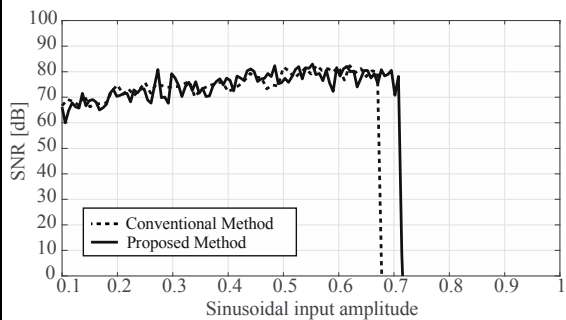
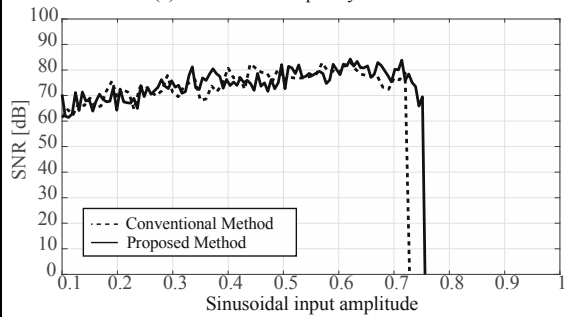


図-10 正弦波入力における量子化器の出力の PSD(5 次 変調器)



(a) Normalized frequency = 5/2048



(b) Normalized frequency = 30/2048

図-11 正弦波入力の振幅の大きさによる SNR の変化(5 次 変調器)

ジタルフィルタリング、および 1 bit 再量子化のみである。また、復元アナログ信号を得るためのデコーダと逆量子化器は不要であるという利点を持つ。これらの特徴は、例えばスーパーハイビジョンや立体映像のような、将来需要の増加することが確実に見込まれる、情報量の非常に多いコンテンツの高品位記録・配信にも貢献できると考えられる。

### <引用文献>

- [1] 山崎芳男, “高速 1bit 信号処理,” JAS journal, 37 巻, 5 号, 21-28 (1997).
- [2] 喜田健司, 福本隆史, 鮫島俊哉, “ $\mu$ 設計に基づいたデルタシグマ変調器設計手法,” 日本音響学会誌, 69 巻, 2 号, 49-57 (2013).

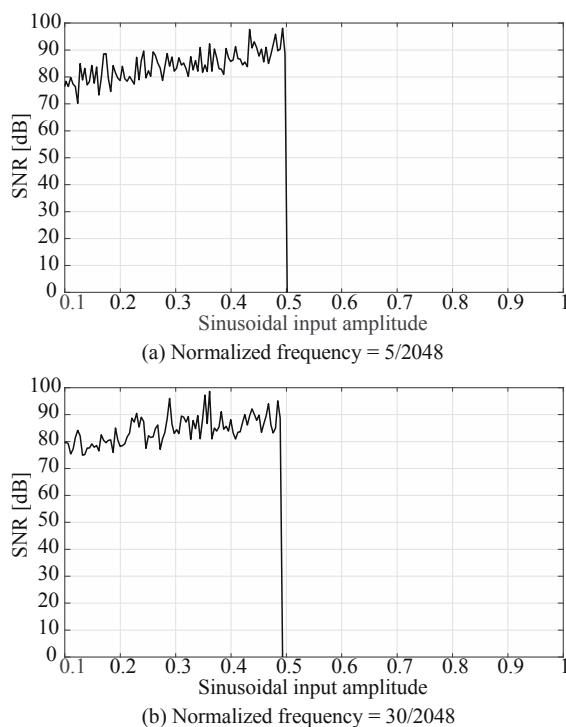


図-12 正弦波入力の振幅の大きさによる SNR の変化(スライディングモード制御理論, 12次 変調器)

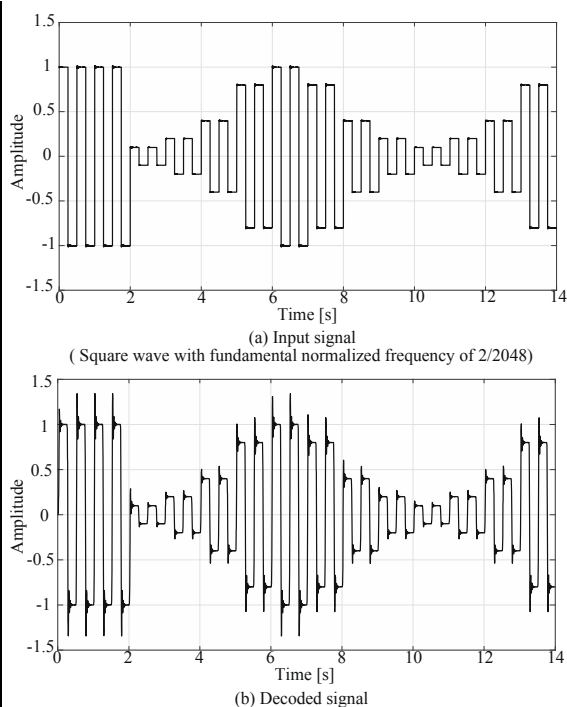


図-13 矩形波入力信号の復号化の結果 (スライディングモード制御理論, 12次 変調器)

[3] R. Schreier, "The delta-sigma toolbox version 7.1," Matlab code and documentation (2006).

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計 6件)

喜田健司, 上野大二郎, 石川博康, 鮫島俊哉, 篠永英之, "H 制御理論によるバンドパス型デルタシグマ変調器の設計手法," 2017 年電子情報通信学会総合大会基礎・境界/NOLTA 講演論文集, A-1-14, 2017.3.22-2017.3.25, 名城大学 (愛知県・名古屋市).

門脇侑資, 鮫島俊哉, "ニューラルネットワーク型フィードバック制御によるラウドスピーカの非線形歪み抑制," 日本音響学会 2017 年春季研究発表会講演論文集, pp. 531-534, 2017.3.15-2017.3.17, 明治大学 (神奈川県・川崎市).

Kenji Kita and Toshiya Samejima, "Stability improvement of delta-sigma modulator by sliding mode control theory," Proc. 2016 IEEE 5th Global Conference on Consumer Electronics, pp. 571-572, 2016.10.11-2016.10.14, MIELPARQUE KYOTO (Kyoto, Japan).

Yusuke Kadowaki and Toshiya Samejima, "Combined inverse filtering and feedback control for robust

equalization and distortion reduction in loudspeaker systems," Proc. AES 141st Convention 2016, Paper Number 9608, 2016.9.29-2016.10.2, LA Convention Center (Los Angeles, CA, USA).

喜田健司, 鮫島俊哉, "切り換え超平面とスライディングモードコントローラを適用したデルタシグマ変調器の設計手法," 日本音響学会 2016 年春季研究発表会講演論文集, pp. 643-644, 2016.3.9-2016.3.11, 桐蔭横浜大学 (神奈川県・横浜市).

喜田健司, 鮫島俊哉, "ディザを適用したデルタシグマ変調器の安定性について," 日本音響学会 2014 年秋季研究発表会講演論文集, pp. 563-564, 2014.9.3-2014.9.5, 北海学園大学 (北海道・札幌).

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

鮫島 俊哉 (SAMEJIMA, Toshiya)

九州大学・大学院芸術工学研究院・准教授  
研究者番号: 00298192