

線形・非線形ロバスト制御理論を用いたデルタシグマ変調器の設計手法

喜田, 健司

<https://doi.org/10.15017/1500737>

出版情報 : Kyushu University, 2014, 博士 (芸術工学), 課程博士
バージョン :
権利関係 : Fulltext available.

氏 名 : 喜田 健司

論文題名 : 線形・非線形ロバスト制御理論を用いたデルタシグマ変調器の設計手法
Design approach of Delta-Sigma Modulator based on linear and nonlinear robust control theory

区 分 : 甲

論 文 内 容 の 要 旨

アナログーデジタル変換の方法の一つであるデルタシグマ変調器は、量子化器をフィードバックシステム内に組み込むことで量子化雑音に高域上がりの特性を持たせ、信号周波数帯域内の量子化雑音電力を小さくし信号対雑音比(SNR)を高くする技術である。しかし、フィードバックシステムであるために安定性の問題が生じることとなる。本論文では、SNRを保ちながら入力振幅に対する安定性が高いデルタシグマ変調器を設計することを目的とするが、非線形性の高い量子化器がシステム内に存在することが、その設計を困難にしている。従来法では設計者の経験則に依存し、実験を繰り返しながら設計をしているが、本論文では制御理論に立脚した明快な設計手法を提案する。線形ロバスト制御理論である μ 設計法と非線形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を用いてデルタシグマ変調器を設計する手法を示し、その応用例と可能性を示す。

μ 設計法を用いてデルタシグマ変調器のループフィルタを設計する手法では、非線形性の強い量子化器を線形利得と量子化雑音でモデル化する。デルタシグマ変調器の量子化器は1ビット量子化器が使われるため、線形近似すると誤差が発生し、またその線形利得は量子化器への入力の統計的性質に依存して変化する。その誤差を加法的誤差として表現することでプラント集合を定義し、ループフィルタを設計する。この方法で7次と10次を超える11次のループフィルタを設計し、計算機シミュレーションにより既存の設計方法と比べ、SNRを高く保ちつつ入力振幅に対する安定性を高められることを確認した。

そして μ 設計法で設計したループフィルタを用いてさらに安定性を向上させる検討を行った。まずは、線形利得の値を用いてループフィルタを切り替える方法を提案する。先行研究では、SNRは高いが安定性に乏しいループフィルタと、SNRは低いが大きな振幅に対して安定であるループフィルタを用意し、入力振幅の値を参照し、SNRが高いループフィルタが不安定になる入力振幅の前で、安定なループフィルタに切り替えることで、大振幅信号が入力されても安定なデルタシグマ変調器が提案されている。本論文では、入力振幅の値に応じて切り替える方法ではなく、線形利得の値に応じてループフィルタを切り替える方法を提案する。線形利得によってループフィルタを切り替えることで安定性を保ちながら、SNRが高いループフィルタで駆動する割合を大きくできることがシミュレーションにより確認された。次に、ディザを適用した場合の入力振幅に対する安定性について検討する。ディザを付加する箇所として入力信号に付加する場合と量子化器の直前で付加する場合で比較し、またディザも一般的な確率密度関数を用いた広帯域に分布するディザと、高域のみにディザが分布する高域集中ディザを付加して比較した。その結果、量子化器の直前で高域集中ディザを適用した場合が、最も入力振幅に対する安定性が高くなることが確認された。

非線形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を適用する場合は、非線形性の強い量子化器を線形利得と量子化誤差を用いてモデル化することなく、そのまま扱えることが特徴である。本論文ではマッチング条件を満たす場合のスライディングモード制御理論を適用し、デルタシグマ変調器の設計を試みた。結果、ノイズシェイピング特性は示していたがループフィルタを高

次化しても1次の特性と変わらないということが確認され、制御効果があまり期待できないことがわかった。次に、量子化器を線形近似して得られるループフィルタは状態方程式と出力方程式からなる状態空間で表現されているが、その状態方程式のみを使用し、スライディングモード制御理論で扱える状態方程式と切り替え関数からなるモデルを適用することで安定化を目指した。つまり、量子化器を線形近似して求めた不安定なループフィルタに対して、切り替え超平面を設計することで安定なデルタシグマ変調器を設計する。この提案手法ではシステムの零点を利用した切り換え超平面を設計した例を示し、スライディングモード制御理論を適用した方が同程度のSNRを保ちつつ安定性を高めることが可能となった。

本論文の最後に、デルタシグマ変調器の応用例と可能性を示す。同じ伝送容量と仮定したとき、デルタシグマ変調器ではナイキスト型A-D変換器では符号化できない広帯域な信号を、符号化できることを示し、またその特徴を活かしたデジタルーデジタル変換の応用例とロスレス圧縮の可能性について述べる。