

$\Delta\Sigma$ 変調器における過剰ループ遅延の補償

Excess Loop Delay Compensation in Delta Sigma Modulator

1230139 平井 幸弥 (回路工学研究室)

(指導教員 橘 昌良 教授)

1. はじめに

年々、デジタル集積回路の高速化と集積化が進んでいる。デジタル集積回路の高速化に伴って、アナログ-デジタル(AD)変換器に対しても同等の高速化が求められている。本研究では、AD変換器の1種である $\Delta\Sigma$ 変調器を扱う。 $\Delta\Sigma$ 変調器はオーバーサンプリングとノイズシェーピングにより量子化ノイズを信号帯域外へと遷移させ、SN比を高めることができる。しかし、 $\Delta\Sigma$ 変調器の非理想要因の1つとして過剰ループ遅延があり、回路内の遅延がノイズシェーピング特性を劣化させ、場合によっては変調器を不安定化させる[1]。

2. 過剰ループ遅延の補償

本研究では積分器に抵抗 R_z を追加することで不安定零点を消去している。不安定零点を持つシステムはオーバーシュートや位相遅れが現れ、過剰ループ遅延の原因となるためである。本研究の積分器の回路図を示す。

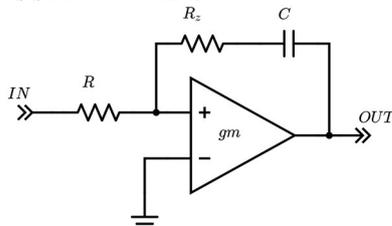


図1. 抵抗を付加した積分器

抵抗 R_z の調整により零点の配置を設定でき、 $R_z = 1/g_m$ とすれば、

$$\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = -\frac{\alpha}{sCR}$$

で表せ、零点を消去できる。 $\alpha = g_m R / (1 + g_m R)$ である。

下図に抵抗を付加した場合と元の積分器の位相特性を示す。

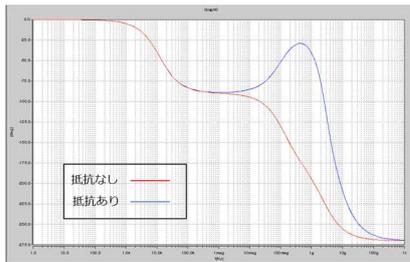


図2. 積分器の位相特性

1[MHz]以上で差が生じはじめ、 -180° に達する周波数は、それぞれ、500MHz, 3.5GHzとなった。 $\Delta\Sigma$ 変調器では、SNRを高めるために高周波でサンプリングするため、積分器での位相特性の違いが変調器に影響すると考えた。

3. スペクトル評価

不安定化の根本的な原因は、遅延によって変化したNTFが量子化雑音を過度に増幅し、積分器あるいは量子化器を飽和させることにある。内部が飽和した変調器の出力信号のスペクトルには、入力信号の整数倍の高調波が現れ、SNRの悪化、最大安定振幅の減少へと至る。よって、本研究では入力正弦波の振幅を変化させたときのSNR、全高調波歪の測定結果をループ遅延が改善されたかどうかの判断基準とする。

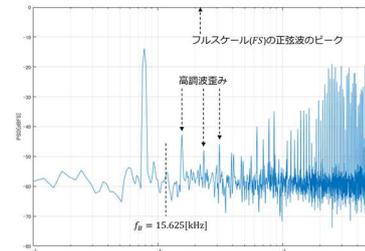


図3. 変調器出力のスペクトル

SNRは高調波を含まない、帯域内の信号と雑音の比であり、THDは全高調波歪と信号の比として計算した。量子化器のサンプリング周波数は1[MHz]で、入力信号の周波数は7.8125[kHz]とした。

下図にSNR, THDの測定結果を示す。

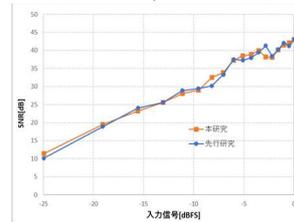


図4. 入力信号対SNR

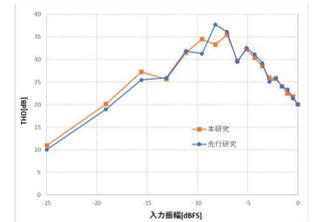


図5. 入力信号対THD

フルスケール振幅を与えても変調器が不安定になる傾向はなく、SNRは上昇し続けている。THDの図から、入力振幅の増加に伴い高調波の影響が大きくなっていることはわかるが、どちらも先行研究との差は見られなかった。

4. 結論

積分器の不安定零点を打ち消すことによって、過剰ループ遅延を補償することを目指した。過剰ループ遅延がノイズシェーピング特性を劣化させ、変調器SNR、安定性が悪化するためである。スペクトル解析によると、先行研究との変化は見られず、本研究の手法では遅延が改善されたとは言えない結果となった。

先行研究と比較して改善された様子が見えなかったのは、1次 $\Delta\Sigma$ 変調器の安定性が元から高く安定性の低下という観点から遅延が改善されたかどうかの判断はできなかったこと、動作周波数が低く位相特性改善の影響を受けなかったこと、ゼロ連続時間型においてはゼロリング速度の低下はさほど重要ではないことなどの理由が挙げられる。本研究での1次 $\Delta\Sigma$ 変調器においては零点相殺の利点がほとんど見出せない結果となったが、動作周波数が高かったり、より高次の変調器の場合については、変化が生じる可能性はある。

また、代替案としては、補償のための抵抗と並列にキャパシタを配置するPhantom Zero Compensation[2]、閉ループフィッティングによる積分器のパラメータを補正する手法[3]がある。

参考文献

- [1] S Pavan, R Scherier, G.C.Temes, $\Delta\Sigma$ 型アナログ/デジタル変換器入門, 丸善出版, 2019.
- [2] Mattias Andersson, "Continuous-Time Delta-Sigma Modulators for Wireless Communication," Lund Institute of Technology, Lund University, Doctoral Dissertation, Lund, Mar. 2014
- [3] S. Pavan, "Systematic design centering of continuous time oversampling converters," IEEE Trans. Circuits Syst. II: Express Briefs, vol. 57, no. 3, pp. 158–162, Mar. 2010.